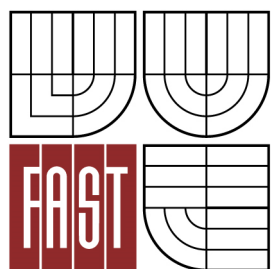




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ  
ÚSTAV POZEMNÍHO STAVITELSTVÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING  
INSTITUTE OF BUILDING STRUCTURES

# ANALÝZA ÚČINKU KONCENTRACE SLUNEČNÍHO ZÁŘENÍ NA DEGRADACI TEPELNÝCH IZOLACÍ VE SKLADBÁCH PLOCHÝCH STŘECH

ANALYSIS OF EFFECT OF SOLAR RADIATION CONCENTRATION ON THE  
THERMAL INSULATION DEGRADATION IN THE FLAT ROOF CONSTRUCTION

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
DIPLOMA THESIS

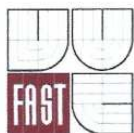
AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

BC. ONDŘEJ ŽIDEK

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. ANTONÍN ŽÁK, Ph.D.

BRNO 2016



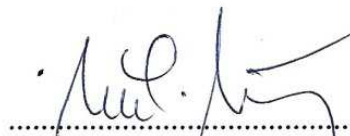
# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

<b>Studijní program</b>	N3607 Stavební inženýrství
<b>Typ studijního programu</b>	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
<b>Studijní obor</b>	3608T001 Pozemní stavby
<b>Pracoviště</b>	Ústav pozemního stavitelství

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>Diplomant</b>	Bc. Ondřej Židek
<b>Název</b>	Analýza účinku koncentrace slunečního záření na degradaci tepelných izolací ve skladbách plochých střech
<b>Vedoucí diplomové práce</b>	Ing. Antonín Žák, Ph.D.
<b>Datum zadání diplomové práce</b>	31. 3. 2015
<b>Datum odevzdání diplomové práce</b>	15. 1. 2016

V Brně dne 31. 3. 2015

  
.....  
prof. Ing. Miloslav Novotný, CSc.  
Vedoucí ústavu



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

## Podklady a literatura

Rešerše současného poznání, katalogy a odborná literatura, Stavební zákon č. 183/2006 Sb., Zákon č. 350/2012 Sb., Vyhláška č. 499/2006 Sb., Vyhláška č. 62/2013 Sb., Vyhláška 268/2009 Sb., Vyhláška 398/2009 Sb., platné ČSN, směrnice děkana č. 19/2011 a dodatky Manuály k použitému softwaru.

## Zásady pro vypracování (zadání, cíle práce, požadované výstupy)

Zadání:

Analýza účinku koncentrace slunečního záření na degradaci tepelných izolací ve skladbách plochých střech

Cíl práce:

Rešerše současného stavu poznání problematiky. V práci budou využívány počítačové simulace a experiment pro analýzu vlivu koncentrace slunečního záření v blízkosti odrazivých a průsvitných ploch na zvýšení teploty přiléhajících konstrukcí. Analýza je zaměřena na ověření správnosti použití různých tepelněizolačních materiálů na bázi pěnových plastů v aplikacích plochých střech.

Teoretické výsledky z počítačových simulací budou validovány experimentem provedeným na modelu. Výsledky práce budou podkladem pro případnou optimalizaci systémových skladeb DEKROOF.

Požadované výstupy:

Práce bude tvořena hlavní textovou částí a přílohami. Součástí přílohy budou výsledky simulací, experimentu a fotodokumentace.

Práce bude předložena v knižní podobě v deskách z tvrdého papíru potažených černým plátnem s předepsaným popisem se zlatým (stříbrným) písmem.

VŠKP bude obsahovat kromě ostatních položek také položku h) Úvod (popis námětu na zadání VŠKP), položku i) Vlastní text práce a položku j) Závěr (zhodnocení obsahu VŠKP, soulad se zadáním, změny oproti původní studii).

Osnova práce bude zpracována dle směrnice děkana č. 19/2011 a dodatky.

## Struktura bakalářské/diplomové práce

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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



.....  
Ing. Antonín Žák, Ph.D.  
Vedoucí diplomové práce

## **Abstrakt**

Diplomová práce se zabývá vlivem přímého a odraženého slunečního záření na teplotní namáhání a degradaci tepelných izolací ve skladbách plochých střech. Na mnoha stavbách se objevil problém ve výrazné degradaci tepelné izolace z pěnového polystyrenu v blízkosti prosklených ploch. Pro zjištění příčiny tohoto problému bylo nutno nastudovat a ověřit vlastnosti stavebních materiálů a fyzikální podstatu vlivu slunečního záření na stavební konstrukce. V úvodní části jsou uvedeny případy staveb, na kterých se tato degradace projevila a dosavadní získané poznatky o této problematice.

Teoretická část popisuje technické vlastnosti tepelných izolantů používaných ve skladbách plochých střech, podstatu a dělení slunečního záření, optické zákony odrazu světla a fyzikální teorii k vysvětlení tepelně technického chování stavebních materiálů a konstrukcí.

Poslední část se zabývá popisem praktického modelu a analýzou dosažených dat tepelného namáhání konstrukce ploché střechy. Součástí praktické části je také určení významu různých vlivů konfigurace stavby pomocí dynamických simulací. V závěru praktické části jsou validovány dosažené teoretické poznatky analýzou získaných dat z praktického modelu.

## **Klíčová slova**

Degradace tepelné izolace, expandovaný pěnový polystyren, šíření tepla, plochá střecha, sluneční záření, globální záření, difuzní záření, přímé záření, lom světla, emisivita, tepelné namáhání konstrukcí.

## **Abstract**

The master's thesis analyzes influence of direct and reflected solar radiation to heat strain and degradation of thermal insulation in the flat roof construction. In many building was a problem in a significant degradation of thermal insulation made from expanded polystyrene in the vicinity of glass surfaces. To determine the causes of this problem, it was necessary to study and test the properties of building materials and the physical nature of the effect of solar radiation on the building structure. In the introductory section lists the cases of buildings with degradation of thermal insulation and existing knowledge on this issue.

The theoretical part describes the technical properties of thermal insulating materials used in the flat roof construction, nature and division of solar radiation, optical laws of light reflection and physical theory to explain the technical thermal behavior of building materials and structures.

The last part describes a practical model and analyzing measured data in thermal stress in the flat roof construction. The practical part also determines the importance of different influences configuration structures using to dynamic simulations. At the end of the practical part they are validated theoretical knowledge obtained by analyzing data from a practical model.

## **Keywords**

Degradation of thermal insulation, expanded polystyrene foam, heat transmission, flat roof, solar radiation, global radiation, diffuse radiation, refraction, emissivity, heat stress of construction.



## **Bibliografická citace VŠKP**

Bc. Ondřej Židek *Analýza účinku koncentrace slunečního záření na degradaci tepelných izolací ve skladbách plochých střech*. Brno, 2016. 166 s., 28 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemního stavitelství. Vedoucí práce Ing. Antonín Žák, Ph.D.

**Prohlášení:**

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

V Brně dne 8.1.2016

.....  
podpis autora  
Bc. Ondřej Židek

## Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat svému školiteli panu Ing. Antonínu Žákovi Ph.D. za poskytnutí mnoha cenných rad, za podporu, vedení mé diplomové práce a za pomoc s návrhem a výstavbou praktického modelu. Děkuji také firmě DEKTRADE a.s. za poskytnutí měřících zařízení, materiálu na výstavbu praktického modelu a za prostor pro instalaci modelu. Mé další poděkování patří panu Ing. Janu Staškovi za konzultaci k programu Design Builder a panu Ing. Petru Slaninovi Ph.D. za pomoc s programem WUFI Pro. V neposlední řadě chci velmi poděkovat za podporu během celého mého vysokoškolského studia své rodině, přítelkyni a kolegům.

V Brně dne 8.1.2016

.....  
podpis autora  
Bc. Ondřej Židek

<b>ÚVOD.....</b>	<b>5</b>
<b>1 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY .....</b>	<b>6</b>
1.1 Řadový rodinný dům, Lázně Bohdaneč .....	7
1.2 Bytový dům, Zlín.....	9
1.3 Rodinný dům, Svinary .....	10
1.4 Rodinný dům 4 .....	11
1.5 Skladová hala, Moravské Budějovice .....	12
1.6 Experiment s polykarbonátovými deskami .....	12
<b>2 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE .....</b>	<b>13</b>
<b>3 ZVOLENÁ METODIKA ZPRACOVÁNÍ .....</b>	<b>14</b>
3.1 Literární rešerše .....	14
3.2 Analýza vlastností stavebních materiálů .....	14
3.3 Analýza zabudování tepelných izolací do skladeb plochých střech.....	14
3.4 Analýza fyzikálních dějů .....	14
3.5 Analýza konstrukcí vycházející ze základních fyzikálních vztahů .....	15
3.6 Podrobné dynamické simulace .....	15
3.7 Experimentální měření v in-situ .....	15
3.8 Syntéza dosažených výsledků .....	15
3.9 Analýza chyb použitých metod a získaných výsledků .....	15
<b>4 ZÁKLADNÍ FYZIKÁLNÍ TEORIE K ŘEŠENÉ PROBLEMATICE .....</b>	<b>16</b>
4.1 Způsoby přenosu tepla ve stavebních konstrukcích .....	16
4.1.1 Šíření tepla vedením .....	16
4.1.2 Šíření tepla prouděním.....	19
4.1.3 Šíření tepla zářením .....	20
4.2 Tepelně technické vlastnosti stavebních materiálů .....	24
4.2.1 Objemová hmotnost.....	24
4.2.2 Měrná tepelná kapacita .....	24
4.2.3 Součinitel tepelné vodivosti.....	24
4.2.4 Součinitel teplotní vodivosti .....	25
4.2.5 Množství tepla.....	25
4.3 Tepelně technické vlastnosti konstrukcí.....	26
4.3.1 Doba chladnutí .....	26
4.3.2 Tepelná akumulace .....	26
4.3.3 Tepelná setrvačnost.....	26
4.3.4 Teplotní stabilita .....	26
4.3.5 Fázový posun .....	27
4.3.6 Faktor útlumu při prostupu tepla (decrement factor).....	27
4.3.7 teplotní útlum (thermal heat damping) .....	27
4.4 Slunce a sluneční záření .....	28
4.4.1 Obecně o Slunci .....	28
4.4.2 Poloha Slunce na obloze .....	28

4.4.3	Sluneční záření.....	32
4.4.4	Přeměna slunečního záření při průchodu zasklením.....	40
4.4.5	Součinitel znečištění atmosféry .....	40
4.4.6	Vliv oblačnosti a polohy Slunce na intenzitu záření.....	41
4.4.7	Sluneční záření v České republice .....	43
4.4.8	Měření solárního záření .....	43
4.5	Prostup, lom a odrazivost slunečního záření stavebním zasklením.....	45
4.5.1	Lom světla.....	45
4.5.2	Zákon odrazu .....	46
4.5.3	Prostup světla stavebními skly.....	47
<b>5</b>	<b>KONTRUKČNÍ ŘEŠENÍ PLOCHÝCH STŘECH.....</b>	<b>50</b>
5.1	Historie plochých střech .....	50
5.2	Dělení plochých střech .....	50
5.2.1	Jednoplášťové ploché střechy .....	50
5.2.2	Střechy dvouplášťové .....	52
5.3	Zásady pro navrhování plochých střech .....	52
5.4	Materiály používané ve skladbách plochých střech .....	54
5.4.1	Tepelně izolační materiály .....	54
<b>6</b>	<b>FORMULACE OKRAJOVÝCH PODMÍNEK .....</b>	<b>74</b>
6.1	Podnebí České republiky .....	74
6.2	Klimatické podmínky ve stavební tepelné technice .....	74
6.3	Návrhové parametry venkovního vzduchu.....	75
6.3.1	Návrhová teplota venkovního vzduchu v letním období.....	75
6.3.2	Návrhová střední intenzita globálního slunečního záření v letním období ...	75
6.3.3	Součinitel při přestupu tepla na vnějším povrchu konstrukce .....	76
6.3.4	Sluneční teplota.....	76
<b>7</b>	<b>POČÍTAČOVÉ DYNAMICKÉ SIMULACE.....</b>	<b>78</b>
7.1	Použitý software .....	78
7.1.1	Design Builder .....	78
7.1.2	WUFI PRO .....	79
7.1.3	Teplo 2010 .....	80
7.2	Počáteční model pro dynamické simulace.....	80
7.2.1	Požadavky na model .....	80
7.2.2	Návrh počátečního modelu: .....	81
7.3	Řešené vlivy konfigurace budovy na teplotní namáhání stavebních konstrukcí...	87
7.3.1	Vliv orientace přilehlé fasády .....	88
7.3.2	Vliv umístění stavby dle souřadnice zeměpisné šířky .....	94
7.3.3	Vliv velikosti a členění přilehlých zasklených ploch .....	99
7.4	Vytvoření vlastního souboru klimatických dat pro Brno .....	109
7.4.1	Přepočítání minutových klimatických dat na data hodinová .....	109
7.4.2	Výpočet difuzní složky slunečního záření.....	112



7.4.3	Analýza sumy dopadající sluneční energie.....	116
7.4.4	Porovnání naměřených klimatických dat.....	118
<b>8</b>	<b>EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ V IN-SITU .....</b>	<b>119</b>
8.1	Kritéria pro sestavení modelu.....	119
8.2	Vybraná lokace pro instalaci modelu .....	119
8.3	Sestavení modelu.....	120
8.4	Měřicí zařízení.....	123
8.4.1	Pyrometr, čidlo globální radiace EMS 11.....	124
8.4.2	Radiační kryt AI077.....	124
8.4.3	COMET LOGGER S0141 .....	125
8.4.4	Teplotní sonda Pt1000TG8/E .....	125
8.4.5	Teplotní sonda Pt1000TG7/E .....	126
8.4.6	Datalogger V32P4.....	126
8.5	Materiály použité na experimentálním modelu .....	126
8.5.1	Pěnový polystyren EPS 150S .....	127
8.5.2	Povlaková hydroizolační krytina z PVC-m .....	127
8.5.3	Povlaková hydroizolační asfaltová krytina.....	128
8.5.4	Travní koberec z umělé hmoty .....	129
8.5.5	Výplň otvoru s izolačním trojsklem.....	130
8.6	Analýza získaných dat u jednotlivých variant středních krytin.....	131
8.6.1	Vztah mezi sumou sluneční energie a maximální teplotou .....	133
8.6.2	Vztah mezi průměrnou intenzitou záření a teplotou.....	134
8.6.3	Skladba s asfaltovou střešní krytinou .....	135
8.6.4	Skladba s PVC střešní krytinou .....	139
8.6.5	Skladba s asfaltovou střešní krytinou a položeným umělým trávnikem .....	140
8.6.6	Skladba s PVC střešní krytinou a položeným umělým trávnikem .....	143
8.7	Syntéza dosažených výsledků u všech střešních skladeb.....	145
8.7.1	Vliv odražené složky slunečního záření .....	145
8.7.2	Vliv volby střešní krytiny na průběh povrchových teplot .....	145
8.7.3	Vliv položení travního koberce z umělé hmoty.....	145
8.7.4	Délka expozice tepelného izolantu vysokým teplotám.....	146
<b>9</b>	<b>VALIDACE TEORETICKÝCH MODELŮ EXPERIMENTEM.....</b>	<b>147</b>
<b>10</b>	<b>ZÁVĚRY PRO TECHNICKOU PRAXI .....</b>	<b>148</b>
10.1	Překročení teplotní odolnosti EPS.....	148
10.2	Návrh úpravy skladby ploché střechy v blízkosti ploché střechy .....	149
10.2.1	Změna povrchové úpravy ploché střechy .....	149
10.2.2	Změna materiálu tepelné izolace .....	149
10.2.3	Nevhodné povrchové úpravy .....	150
<b>11</b>	<b>DALŠÍ MOŽNOSTI VÝZKUMU.....</b>	<b>150</b>
<b>12</b>	<b>ZHODNOCENÍ VYTÝČENÝCH CÍLŮ.....</b>	<b>151</b>

<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....</b>	<b>152</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ.....</b>	<b>157</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH INDEXŮ.....</b>	<b>158</b>
<b>PŘÍLOHY.....</b>	<b>159</b>

## ÚVOD

Diplomová práce se zabývá vlivem přímého a odraženého slunečního záření na teplotní namáhání a degradaci tepelných izolací ve skladbách plochých střech. Na mnoha stavbách se objevil v posledních letech problém s výraznou degradací tepelné izolace z pěnového expandovaného polystyrenu (dále EPS) ve vzdálenosti přibližně jednoho metru od zasklených výplní stavebních otvorů nebo od jiných lesklých ploch. U plochých střech se jedná například o balkonové dveře, prosklené střešní atria či o liniové střešní světlíky. Degradace tepelného izolantu se také projevila po aplikaci umělého trávníku na hydroizolační vrstvu.

Degradace tepelného izolantu je s nejvyšší pravděpodobností způsobena překročením tepelné odolnosti materiálu. Dlouhodobá teplotní odolnost EPS činí 80°C, krátkodobě dokáže EPS odolat teplotě do 100°C. [1] Dosahované povrchové teploty na plochých střechách v letním období se běžně pohybují kolem 80°C v závislosti na emisivitě krytiny a intenzitě slunečního záření. V případě započítání odrazové složky slunečního záření od zasklených či lesklých ploch bude docházet k navýšení povrchové teploty nad 80°C. [2]

Pro zjištění vlivu slunečního záření na teplotní namáhání tepelného izolantu bylo nutno nastudovat a ověřit vlastnosti stavebních materiálů, fyzikální podstatu a chování slunečního záření na stavební konstrukce. Součástí práce je hodnocení tepelného namáhání izolantu prostřednictvím vlastních výpočtů a analýzou počítačových dynamických simulací v programu DesignBulder a WUFI Pro. Výsledky dynamických počítačových simulací jsou v práci validovány experimentálním měřením na vytvořeném modelu konstrukce.

Diplomová práce je členěna na část rešeršní, teoretickou a experimentální. V úvodní části jsou uvedeny případy staveb, na kterých se tato degradace tepelného izolantu projevila a dosavadní získané poznatky o této problematice. Teoretická část popisuje základní fyzikální teorii, potřebnou kde zpracování práce, technické vlastnosti tepelných izolantů používaných ve skladbách plochých střech a normové požadavky pro tepelné izolace.

Další část se zabývá přípravou a hodnocením teoretických modelů konstrukce s cílem přiblížení se reálnému stavu budovy. Poslední část se zabývá popisem experimentálního modelu a analýzou získaných dat tepelného namáhání konstrukce ploché střechy. Součástí praktické části je také určení významu různých vlivů konfigurace stavby pomocí dynamických simulací. Praktické části je zakončena validací dosažených teoretických poznatků analýzou získaných dat z experimentálního modelu. V závěru budou uvedeny nejdůležitější faktory ovlivňující tepelné namáhání izolantu a návrh pro aplikaci těchto poznatků do stavební praxe.

## 1 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

O problému úbytku pěnového polystyrenu ve skladbách plochých střech v blízkosti prosklených ploch prvně informovalo Sdružení EPS ČR ve svém vydání *Izolační praxe* [3] s pořadovým číslem 3 z 10. února 2015. Na straně č. 7 v kapitole *Odolnost polystyrenu proti vysokým teplotám* uvádí případ degradace tepelného izolantu z pěnového expandovaného polystyrenu do vzdálenosti jednoho metru od velkých prosklených ploch. Tato zpráva uvádí jako důvod degradace tepelného izolantu zvýšeným tepelným namáháním způsobené odraženým slunečním zářením v blízkosti prosklených ploch. Je zde také uvedena nevhodnost použití šedého EPS s teplotní odolností +70 °C a běžně používaného extrudovaného pěnového polystyrenu (dále XPS) s teplotní odolností +75 °C. Sdružení EPS z důvodů vysokého tepelného zatížení izolantu v blízkosti velkých prosklených nebo lesklých ploch doporučuje pro snížení namáhání navrhnout například násyp z kačírku.



obr. 1.1 Příklad poškození EPS v blízkosti proskleného atria [3]

Detailněji o této problematice informoval Ing. Martin Voltner z kanceláře ATELIER DEK ve sborníku DEKTIME 2015 v kapitole *Kam zmizel ten polystyren? Aneb degradace EPS ve skladbách plochých střech zvýšeným teplotním namáháním* [4]. Na třech stranách je zde prezentováno celkem čtyři budovy, na kterých se degradace tepelného izolantu ve skladbách plochých střech projevila. U třech příkladů popsaných budov nastal problém v objemových změnách a struktuře tepelného izolantu z EPS v blízkosti prosklených ploch s orientací od jihovýchodu po jihozápad. K této degradaci u dvou uvedených budov došlo po instalaci povrchu z umělého trávníku na místo původně plánované betonové dlažby na podločkách. Ve sborníku je také popsán případ degradace EPS vlivem nevhodného skladování střešních polykarbonátových světlíků na střeše.

V níže uvedených subkapitolách uvedu blíže jednotlivé stavby a provedený pokus s polykarbonátovými deskami, u kterých se projeví objemové změny EPS. Tento popis dále doplním o další informace poskytnuté mým vedoucím diplomové práce. V praktické části této práce se nalézá popis namodelování jedné popsané stavby a provedení dynamické simulace v programu DesignBulder, pro určení teplotního namáhání skladby plochých střechy u této budovy.

V internetovém katalogu *ISOVER pro systémy plochých střech* [5] společnosti ISOVER uvádí případ degradace tepelného izolantu z EPS, nastávající během tropických dnů u skladeb plochých střech s klasickým pořadím vrstev v blízkosti velkých prosklených ploch. Je zde uvedeno zjištění, kdy po připočítání účinku odrazové složky slunečního záření od velkých prosklených ploch dochází k navýšení teplotního zatěžování skladby ploché střechy a k následné možné degradaci tepelného izolantu. V tomto katalogu je také uvedeno doporučení položit v blízkosti velkým prosklených nebo lesklých ploch ochrannou betonovou dlažbu či násyp z kačírku.

Ze zkušenosti získaných realizačními firmami ovšem vyplývá, že k degradaci tepelného izolantu dochází také po položení násypu z kačírku. Toto řešení tedy není vhodné a za určitých situací můžeme dojít také ke zhoršení situace po položení násypu.

## 1.1 Řadový rodinný dům, Lázně Bohdaneč

Prvním popisovaným případem budovy, u které se projevila degradace tepelného izolantu z EPS, je řadový rodinný dům v Lázních Bohdaneč. Jednotlivé rodinné domy mají fasády přiléhající k terasám orientovány na jihojihovýchod. U všech teras byla realizována jednoplášťová skladba s klasickým pořadím vrstev. Nášlapná vrstva ploché střechy tvořící terasu byla u většiny řadových domů betonová dlažba na podložkách. Pouze u jediné terasy byl místo dlažby položen na folii travní koberec z umělé hmoty. Pod hydroizolační folií z PVC-m byla položena separační textilie PE, pod ní EPS 200S a dále spádové klíny z pěnového polystyrenu.



Obr. 1.2 Pohled na řadové rodinné domy, Lázně Bohdaneč [4]

Zhruba metr před výplněmi otvorů se po několika letních slunečných dnech po pokládce trávníku začal povrch střechy propadat. Po otevření sondy se zjistilo, že polystyren se zkroutil a změnil strukturu povrchu. Pouze v místě překážky (v tomto případě květináč), postavené na jednom místě pod oknem, k poškození nedošlo. Poškozena byla pouze horní vrstva EPS 200. Spodní vrstva EPS byla v pořádku. Fólie z měkčeného PVC zůstala nepoškozena. [4]





Obr.1.3 Detail degradace EPS desky [4] Obr.1.4 Celková objemové změny EPS[4]

Celkem se u této terasy nalézají tři okna. Pro výplň stavebních otvorů bylo použito standartním dvojsklem. Geometrie okna: 1,0 x 2,1 m (ŠxV), parapet ve výšce 150mm na horním povrchu hydroizolace, hloubka venkovního ostění 160mm, viditelná šířka rámu ostění a nadpraží 50mm, u parapetu 80mm.

Funkce	Materiál	tl. [mm]	Stav
Povrchová	trávník koberec z umělé hmoty	30,0	nepoškozeno
Separáčn	separační textilie 100% PP	2,4	vložena až dodatečně, prokreslen spodního líce umělého trávníku
Hydroizolační	měkčená folie z PVC-P, DEKPLAN 77	1,5	nepoškozeno
Separáčn	separační textilie 100% PP	2,4	nepoškozeno
Tepelně izolační	deska EPS 200S	100	výrazné objemové a povrchové změny na horní části EPS
Spádová	stabilizovaný pěnový polystyren-spádové klíny, min. 20mm	neurčováno	beze změny
Parozábrana	Pás z SBS modifikovaného asfaltu	neurčováno	beze změny
Nosná	Nosná konstrukce	neurčováno	beze změny

Tab. 1.1 Skladba ploché střechy u řadového RD, Lázně Bohdaneč

## 1.2 Bytový dům, Zlín

Druhým příkladem je budova bytového domu ve Zlíně. Na terase toho objektu se projeví celkem tři defekty zborcení EPS v blízkosti prosklených ploch. Toto zborcení mělo za následek vytvoření prohlubně ve skladbě ploché střechy, kvůli které se na střeše tvořili ve vzdálenosti přibližně 1m od fasády kalužiny. I v tomto případě byl položen trvanlivý koberec u umělé hmoty na povlakovou střešní krytinu z PVC-m. Na této střeše byla provedena sonda do skladby, ve které byla objevena změna povrchové struktury a úbytek tloušťky EPS. Skladba ploché střechy má klasické pořadí vrstev. Umělý trávník byl na hydroizolaci položen bez jakékoli separační vrstvy v dobu přibližně před dvěma lety. Orientace přilehlé fasády terasy je na jihovýchod. [4]



Obr.1.5 Pohled na terasu BD, Zlín [4]



Obr.1.6 Pohled na západní fasádu budovy[70]

Instalace nové skladby byla součástí větší rekonstrukce bytového domu, při které bylo provedeno zateplení stěn, střech a byla provedena výměna oken s izolačními trojskly. Původní součástí nové skladby ploché střechy byl návrh provedení betonové dlažby, kterou si ostatní majitelé bytů nechali provést. U tohoto řešení k žádnému defektu nedošlo. Deformace EPS proběhla pouze u řešeného bytu, kde majitelé místo betonové dlažby položili na hydroizolaci travní koberec z umělého vlákna. Skladba ploché střechy je velice



Obr.1.7 Vznikající kalužiny u BD, Zlín [4]

podobná, jako tomu v předchozím případě. Jediným rozdílem je použití HI folie FATRAFOL. Jako tepelná izolace zde byl použit EPS 150S. Rozměr výplní otvorů: balkonové dveře 800 x 2100 mm, levé okno 1750 x 1500mm, pravé okno 2850 x 1500mm. Parapet oken nad střešní krytinou má 600 mm, ostění 200 mm.

### 1.3 Rodinný dům, Svinary

Třetím příkladem je rodinný dům ve Svinarech s jihojihozápadní orientací fasády přiléhající k terase. Jako nášlapná vrstva měla být realizována dřevěná palubová terasa na podložkách. Avšak skladba zůstala přes léto nezakrytá nášlapnou vrstvou. I zde se před velkou plochou prosklené výplně začala během léta spádová vrstva z perimetrického polystyren propadat.



Obr. 1.8 Náhled na degradaci EPS [4]

Obr. 1.9 Detail povrchové degradace EPS [4]

Vzdálenost poškození izolantu od přilehlé zasklené plochy činí přibližně 70 cm. V nejkritičtějším místě degradace došlo k úbytku tloušťky z původních 60 mm na 35 mm. U oken této terasy byly použity výplně otvoru s trojskly (Slavona MGT 4-18-4-18-4 SWSV). Na výše uvedené fotografie můžeme vidět velmi tmavý odstín použité povlakové hydroizolace z PVC-P. Taková to povrchová úprava vykazuje vysokou hodnotu emisivity. Vysoká emisivita povrchu a fakt, že během léta nebyla instalována dřevěná palubová terasa má nejspíše za následek nadměrné teplotní namáhání izolantu. [4]

Funkce	Materiál	tl. [mm]	Stav
Hydroizolační	měkčená folie z PVC-P	1,8	nepoškozeno
Separační	separační textilie 100% PP	2,4	nepoškozeno
Spádová	EPS Perimetr	60,0	úbytek tloušťky z původních 60mm na 35mm
Tepelně izolační	EPS 150S	neurčováno	nezměněno
Parozábrana	PE folie	neurčováno	nezměněno
Nosná	Nosná konstrukce	neurčováno	nezměněno

Tab. 1.2 Skladba ploché střechy u rodinného domu, Svinary



## 1.4 Rodinný dům 4

V dalším případě byla orientace přilehlé fasády k terase rodinného domu také jihojihozápadní. Plochá střecha byla realizována s klasickým pořadím vrstev a s hydroizolační PVC-P folií. Na fólii byl opět položen travní koberec z umělé hmoty.



Obr.1.10 Pohled na jihojihozápadní fasádu [4] Obr. 1.11 Deformace tvaru EPS [4]

V tomto případě došlo k poškození pouze místa přesně kopírující odraz slunce od skel, nikde jinde problém nebyl objeven, prokreslen byl dokonce i sloupek mezi skly jako místo bez poškození. K teplotnímu namáhání izolantu opět přispěla odražená sálavá složka slunečního záření. [4]

Ke zvýšenému namáhání přispívá též skutečnost, že koberec přijímá teplo velkou plochou vlasů. U umělého trávnicku použitého typu s výškou vlasů 20 mm a šířkou vlasů 2,5 mm se pohybuje množství vlasů na jeden metr čtvereční přibližně kolem 44 tisíc. Základní složkou pro výrobu umělého trávnicku je polypropylen nebo polyetylen. Tloušťka vlasu se pohybuje kolem 170  $\mu\text{m}$ . Plošná hmotnost vlasů se pohybuje kolem 2,05  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$  [6]. Při této konfiguraci je povrchová plocha umělého trávnicku **2,20  $\text{m}^2$**  na jeden metr čtvereční půdorysné plochy. Použitím širších a vyšších vlasů se může povrchová plocha trávnicku pohybovat až kolem hodnot **3,9 $\text{m}^2/\text{m}^2$** .

Vzhledem k vysoké hodnotě součinitele tepelné vodivosti Vlákná vedou přijatou energii dále do podložky, ve které se teplo koncentruje. Vlákná zároveň tvoří určitou tepelněizolační vrstvu, která brání ochlazení povrchu fólie (např. prouděním vzduchu).



Obr.1.12 Pohled na odraz slunečního záření [4] Obr.1.13 Detail umělého trávnicku [4]

## 1.5 Skladová hala, Moravské Budějovice

Kromě zvýšení teplotního namáhání EPS vlivem odraženého slunečního záření od velkých prosklených ploch může dojít k překročení tepelné odolnosti izolantu také nevhodným skladováním polykarbonátových světlíků či desek na střeše. S tímto problémem se zaměstnanci kanceláře Atelier DEK setkali na střeše skladové haly v Moravských Budějovicích. [4]



Obr. 1.14 Pohled na polykarbonátový světlík [4] Obr. 1.15 Vypálení EPS slun. zářením [4]

Došlo zde k poškození EPS, které se projevilo tvorbou prohlubní pod hydroizolační vrstvou. Poškozená místa byla nalezena před čelními stěnami světlíků a tvar poškození odpovídal tvaru dílů polykarbonátových desek. Nejpravděpodobnější příčinou tohoto poškození je navýšení teploty pod odloženými deskami na střeše při montáži světlíků. [4]

## 1.6 Experiment s polykarbonátovými deskami

V roce 2015 provedla kancelář Atelierem DEK experiment, simulující podobnou situaci, jako tomu je u předchozího případu. Byl sestaven model skladby ploché střechy s klasickým pořadím vrstev. Hydroizolace vrstvou skladby tvořila povlaková PVC-P folie. Ke skladbě pod pravým úhlem přilehala deska polykarbonátu. Z výsledku experimentu, kdy došlo k povrchovému poškození EPS, jasně vyplývá navýšení teplotního namáhání izolantu při částečném odrazu slunečního záření od přilehlé polykarbonátové desky. Po prověření tohoto faktu vzniklo doporučení, které doporučuje zvýšenou obezřetnost při manipulaci a skladování polykarbonátových desek a válcových světlíků na ploché střeše. Při montáži polykarbonátových desek je nutné si uvědomit, že desky položené bez zakrytí přímo na ploše střechy mohou při určitém úhlu slunečního záření toto záření koncentrovat a způsobit tak lokální nárůst teploty povrchu hydroizolační folie pod těmito deskami. Větší riziko poškození je pod vícevrstevnými deskami a dále u střech s tmavšími odstíny folií. [4]



Obr. 1.16 Experimentální model [4]



## 2 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem této práce je určit faktory ovlivňující průběh exteriérové povrchové teploty plochých střech, která má významný dopad na namáhání tepelné izolace. Zejména se jedná o analýzu vlivu koncentrace slunečního záření v blízkosti odrazivých a průsvitných ploch na zvýšení teploty přiléhajících konstrukcí. Klíčové je určení důležitosti konfigurace budovy na výsledné tepelné namáhání (orientace přilehlé fasády, geografické umístění budovy, velikost a typ odrazových nebo průsvitných ploch, skladba ploché střechy atd.). Analýza je zaměřena na ověření správnosti použití různých tepelněizolačních materiálů na bázi pěnových plastů v aplikacích plochých střech. Dosažení vytyčených cílů jsem se snažil docílit pomocí:

1. teoretické popsání problémů,
2. výběr správné metodiky pro hodnocení vlivu slunečního záření,
3. vyhodnocení vlivu slunečního záření na tepelné namáhání konstrukcí,
4. aplikace poznatků do stavební praxe

## 3 ZVOLENÁ METODIKA ZPRACOVÁNÍ

Pro dosažení výše uvedených cílů práce byly využívány tyto metody výzkumu:

- A. literární rešerše,
- B. analýza vlastností stavebních materiálů,
- C. analýza zabudování stavebních materiálů do skladeb plochých střech
- D. analýza vlivu slunečního záření,
- E. analýza fyzikálních dějů,
- F. analýza konstrukcí vycházející ze základních fyzikálních vztahů,
- G. podrobné dynamické simulace,
- H. experimentální měření v in-situ,
- I. syntéza dosažených výsledků,
- J. analýza chyb použitých metod a získaných výsledků.

### 3.1 Literární rešerše

Na začátku práce byla provedena literární rešerše dostupné literatury a informací, která pomohla k bližšímu porozumění zkoumané problematice. Tato práce navazuje na dostupné poznatky a rozšiřuje o vlastní poznatky.

### 3.2 Analýza vlastností stavebních materiálů

Pro správné pochopení chování stavebních materiálů bylo nutno nastudovat výrobní procesy, složení a vlastnosti stavebních materiálů používaných ve skladbách plochých střech. Tyto důležité informace jsou uvedeny v subkapitole kapitole 5.4 *Materiály používané ve skladbách plochých střech*.

### 3.3 Analýza zabudování tepelných izolací do skladeb plochých střech

Součástí této práce je popis a analýza běžného způsobu zabudování stavebních materiálů do skladby plochých střech. Tato problematika je řešena v subkapitole 5.3 *Zásady pro navrhování plochých střech*.

### 3.4 Analýza fyzikálních dějů

Pro popsání zkoumané problematiky byla provedena analýza fyzikálních dějů. Ty, které jsou důležité pro pochopení řešené problematiky, jsou uvedeny v kapitole 4. *Základní fyzikální teorie k řešené problematice*.

### **3.5 Analýza konstrukcí vycházející ze základních fyzikálních vztahů**

Pro porozumění souvislostí bylo nutné začít od zjednodušených fyzikálních modelů. Bylo nutné idealizovat okrajové podmínky okolního prostředí, aby bylo možné zkoumat pouze požadované parametry.

### **3.6 Podrobné dynamické simulace**

K získání přesnějších výsledků a zjištění reálnějšího vlivu jednotlivých faktorů ovlivňující povrchové teploty konstrukce ploché střechy, bylo nutné provést komplexní dynamické simulace jednak s virtuálními okrajovými podmínkami, tak s uvažováním reálných okrajových podmínek získaných experimentálním měřením.

### **3.7 Experimentální měření v in-situ**

Aby bylo možné porovnávat výsledky a ověřit správnost dynamického simulování, bylo provedeno experimentální měření v in-situ. Pro měření byly použity měřicí přístroje Atelieru DEK detailně popsané v subkapitole 8.4 *Měřicí zařízení*. V subkapitole 7.4.4 je uvedeno porovnání experimentálně naměřených dat intenzi slunečního záření s daty naměřenými permanentní GPS stanice TUBO.

### **3.8 Syntéza dosažených výsledků**

Syntéza dosažených výsledků propojuje výsledky teoretických výpočtů a experimentálního výzkumu. Poskytuje přehled a formuluje poznatky pro praxi.

### **3.9 Analýza chyb použitých metod a získaných výsledků**

V této části je provedena analýza metod. Hlavně se zaměřuji na přesnost experimentálního měření a podrobnou výstupů dynamických simulací.

## 4 ZÁKLADNÍ FYZIKÁLNÍ TEORIE K ŘEŠENÉ PROBLEMATICE

### 4.1 Způsoby přenosu tepla ve stavebních konstrukcích

Teplu se může šířit v libovolném prostředí pouze tehdy, pokud na různých místech tohoto prostředí jsou rozdílné teploty. Teplu potom postupuje z míst s vyšší teplotou do míst, kde je teplota nižší a dochází zde k vyrovnání teplot. Teplu se může šířit třemi základními způsoby [7] [8] [9] [10]:

- vedením (kondukcí),
- prouděním (konvekcí),
- sáláním (radiací).

Šíření tepla se obvykle nekoná pouze jedním ze způsobů, ale reálná výměna tepla je především jejich kombinací.

#### 4.1.1 Šíření tepla vedením

Přenos tepla vedením v pevných látkách je transportem tepelné energie ve směru klesající teploty. Děje se tak z toho důvodu, že teplejší, rychleji kmitající molekuly, předávají svou kinetickou energii sousedním, pomaleji kmitajícím molekulám. V procesu vyrovnávání teplot různě zahřátých částí tělesa vzniká tok tepla v důsledku tepelné vodivosti. Teplu se za určitých podmínek šíří také v kapalinách a plynech. Průběh vedení tepla určuje tzv. tepelnou vodivost [8] [11].

**Platí první Fourierův zákon:**

$$q = -\lambda \frac{dt}{dx} = -\lambda \text{grad}\theta \quad (4.1)$$

kde je:

$q$	hustota tepelného toku kolmá na směr proudění [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ],
$\lambda$	součinitel tepelné vodivosti [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ],
$\theta$	teplota [ $^{\circ}\text{C}$ ],
$t$	teplotní rozdíl [ $\text{K}$ ],
$x$	směr proudění tepelného toku (souřadnice) [ $\text{m}$ ].

Porovnat látky podle jejich tepelné vodivosti umožňuje veličina součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$ . Podle tohoto součinitele se látky dělí na:

- Tepelné vodiče - látky s vysokou rychlostí vedení tepla a velkým součinitelem  $\lambda$ ,
- Tepelné izolanty - látky s nízkou rychlostí vedení tepla a malým součinitelem  $\lambda$ .

Vedení tepla lze z hlediska dynamiky procesu rozdělit na:

- ustálené (stacionární) vedení tepla,
- neustálené (nestacionární) vedení.

#### 4.1.1.1 Ustálený teplotní stav

Pokud se teplota s časem nemění  $d\theta/dt=0$ , jedná se o teplotní pole ustálené – stacionární. Ustálený teplotní stav je zjednodušující předpoklad, který se používá v tepelně technických výpočtech. Tento předpoklad však nevystihuje skutečnou situaci. Vychází z předpokladu, kdy stavební konstrukce je oddělena dvěma prostředími s konstantními teplotami, které se v čase nemění a platí, že hustota tepelného toku je přímo úměrná rozdílu teplot vzduchu[9].

#### 4.1.1.2 Neustálený teplotní stav

Jestliže je teplota funkcí času  $\theta = f(t)$ , pak  $d\theta/dt \neq 0$  a teplotní pole je neustálené, což charakterizuje neustálený – nestacionární teplotní stav přenosu tepla, u kterého jsou teploty v jednotlivých bodech stavební konstrukce dané svou polohou a mění se v závislosti na čase. Pokud umístíme nějaké těleso s vyšší teplotou doprostřed prostoru, dochází k vzájemnému vyrovnání teplot. Postupně se zahřívají povrchové vrstvy ostatních částí konstrukce a pak i jejich vnitřní vrstvy. Po určitém čase se teploty vyrovnají teplotou prostředí a nastane teplotní rovnováha [8] [11].

#### 4.1.1.3 Tepelný tok

Tepelný tok  $\Phi$  je definován jako množství tepla přenesené látkou za jednotku času, je tedy definován vztahem:

$$\Phi = \frac{Q}{\tau} = q \cdot A = \lambda \cdot A \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (4.2)$$

kde je:	$\Phi$	tepelný tok [W],
	$Q$	teplo [J],
	$q$	hustota tepelného toku [ $W \cdot m^{-2}$ ],
	$\tau$	doba [s],
	$\lambda$	součinitel tepelné vodivosti [ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ],
	$A$	plocha [ $m^2$ ]
	$\Delta t$	rozdíl teplot [K]
	$\Delta x$	vzdálenost [m]



#### 4.1.1.4 Součinitel prostupu tepla

Součinitel prostupu tepla  $U$  udává celkovou výměnu tepla v ustáleném stavu mezi dvěma prostředími vzájemně oddělenými stavební konstrukcí o tepelném odporu  $R$  s přilehlými mezními vzduchovými vrstvami, které jsou součástí konstrukce. Je definován vztahem:

$$U = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_e + R + R_i} \quad (4.3)$$

kde je:

$U$	součinitel prostupu tepla [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ]
$R_T$	odpor konstrukce při prostupu tepla (z prostředí do prostředí) [ $\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ ],
$R_e$	odpor konstrukce při přestupu tepla na straně exteriéru [ $\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ ],
$R$	odpor konstrukce při prostupu tepla konstrukcí [ $\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ ],
$R_i$	odpor konstrukce při přestupu tepla na straně interiéru [ $\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ ].

#### 4.1.1.5 Newtonův zákon ochlazování

Experimentem bylo dokázáno, že na rozhraní mezi pevnou látkou a okolním fluidním prostředím není teplotní profil  $t(x)$  lineární. Je tedy zřejmé, že se na přenosu tepla z pevné látky do fluidního prostředí podílí i mechanismy proudění a záření. Isaac Newton tedy zavedl lineární aproximaci, díky které se výpočty teplotního profilu na rozhraní značně zjednodušily. Hustota tepelného toku na rozhraní může být vyjádřena vztahem:

$$q = \lambda_f \frac{\Delta t}{d} = h \cdot \Delta t \quad (4.4)$$

kde je:

$q$	hustota tepelného toku [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ],
$\lambda_f$	součinitel tepelné vodivosti se započtením vlivu konvekce [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ],
$\Delta t$	rozdíl mezi teplotou fluida (vzduchu) a teplotou povrchu [K],
$d$	tloušťka přechodové vrstvy [m],
$h$	součinitel přestupu tepla [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ].

Výše uvedená rovnice je známá pod názvem „Newtonův ochlazovací zákon“. Provedená linearizace nepředstavuje klasický mechanismus vedení tepla, jelikož zahrnuje v součiniteli prostupu tepla i přenos tepla konvekcí. Pro zahrnutí i záření se určí součinitel prostupu tepla  $h_{tot}$  vztahem:

$$h_{tot} = h + h_r \quad (4.5)$$

kde je  $h_{tot}$  součinitel přestupu tepla zahrnující vliv záření [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ],

$h$  součinitel přestupu tepla [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ],  
 $hr$  součinitel přestupu tepla vlivem radiace [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ].

Součinitel prostupu tepla  $U$  konstrukce vypočítáme s uvažováním přestupu tepla na vnějším a vnitřním povrchu ze vztahu:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_e} + \sum_{j=1}^n \left(\frac{d_j}{\lambda_j}\right) + \frac{1}{h_i}} \quad (4.6)$$

kde je:  $U$  součinitel prostupu tepla [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ],  
 $h_e$  součinitel přestupu tepla na straně exteriéru [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ],  
 $h_i$  součinitel přestupu tepla na straně interiéru [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ],  
 $d_j$  tloušťka  $j$ -té vrstvy [m],  
 $\lambda_j$  součinitel tepelné vodivosti  $j$ -té vrstvy [ $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ].

### 4.1.2 Šíření tepla prouděním

Šíření tepla prouděním není možné u pevných látek, uplatňuje se pouze u tekutin (kapalin a plynů), případně u plazmatu. Pohybem hmoty dochází k vzájemnému pohybu jednotlivých částí, které mají odlišnou teplotu. Přenášením tepla v pohybujícím se prostředí je složitější než v nepohyblivém prostředí [8] [11].

Volné proudění je pohyb kapaliny či plynu, který je způsoben pouze rozdíly v hustotě látky vyvolanými její rozdílnou teplotou. Nucené proudění je, pokud při výměně tepla je použit mechanický pohyb (např. pohyb vzduchu pomocí ventilátorů).

Rozlišují se dva případy proudění:

- laminární,
- turbulentní.

Laminární (neboli proudnicové) proudění je způsob viskózních kapalin, při kterém jsou dráhy jednotlivých částic kapaliny navzájem rovnoběžné. Částice se pohybují ve vzájemně rovnoběžných vrstvách, aniž by se navzájem mísily. Laminární proudění zůstává zachováno až do tzv. kritické rychlosti, kdy se mění na proudění turbulentní [11].

Turbulentní proudění je způsob, při kterém jednotlivé částice kapaliny přecházejí různými vrstvami kapaliny, čímž dochází k promíchávání těchto vrstev.

**Platí Newtonův zákon:**

$$q_k = h_k(\theta_s - \theta_a) \quad (4.7)$$

kde je:  $q_k$  hustota tepelného toku proudícího mezi vzduchem a povrchem konstrukce (W.m<sup>2</sup>),  
 $h_k$  součinitel přestupu tepla při proudění (W . m<sup>-2</sup> . K<sup>-1</sup>),  
 $\theta_s$  teplota povrchu tepla při proudění (°C),  
 $\theta_a$  teplota vzduchu (°C).

### 4.1.3 Šíření tepla zářením

Na rozdíl od šíření tepla vedením a prouděním představuje šíření tepla sáláním individuální druh šíření tepla. Při šíření tepla sáláním jde o přenos elektromagnetických vln s délkou 760 až 3000 nm, která se šíří v prostoru rychlostí světla. Tepelné sálání rozdílných těles je určované jejich teplotním stavem [11].

Ideální těleso, které má při dané teplotě maximální sálavou schopnost, se nazývá absolutně černé těleso. Pokud těleso odrazí veškerou dopadenou energii, má koeficient odrazivosti  $R = 1$  a nazýváme jej absolutně bílým tělesem. Sálavá energie všech skutečných těles představuje jen určitou část energie absolutně černého tělesa [8].

Převážná většina materiálů, včetně stavebních izolací, používaných ve stavebnictví disponuje povrchem s vysokou pohltivostí respektive emisivitou pro tepelné sálání. Skupina ušlechtilých kovů, měď, stříbro, zlato a dále hliník, prvek ze skupiny přechodných neželezných kovů, vykazují vysoké hodnoty odrazivosti tepelného sálání respektive velmi nízké hodnoty emisivity. Tyto kovy jsou v různých vhodných aplikacích využívány jako reflexní izolace. [11]

**Celkové sálání tepla dopadající na těleso je:**

$$Q_O = Q_A + Q_E + Q_T \quad (4.8)$$

kde je:  $Q_A$  část pohlcovaná tělesem,  
 $Q_R$  část odražená tělesem,  
 $Q_T$  část procházející tělesem.

#### 4.1.3.1 Zářivá energie

Zářivá energie  $W_e$  je energie přenášená zářením. Ze zdroje se šíří do všech směrů. Ve vakuu se pohybuje rychlostí světla. Jednotkou zářivé energie je joule [J]. [11]

$$W_e \quad [J] \quad (4.9)$$

### 4.1.3.2 Zářivý tok

Zářivý tok je zářivá energie, kterou vysílá povrch zářícího tělesa určitou plochou za jednotku času. Můžeme tedy říct, že se jedná o výkon přenášený zářením. Označován bývá  $\phi_e$ .

$$\phi_e = \frac{dW_e}{dt} \quad [\text{W}] \quad (4.10)$$

### 4.1.3.3 Spektrální zářivý tok

Spektrální zářivý tok je definován jako diferenciální podíl zářivého toku a vlnové délky. Udává zářivý tok daného intervalu vlnové délky.

$$\phi_{e\lambda} = \frac{d\phi_{e\lambda}}{d\lambda} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-1}] \quad (4.11)$$

### 4.1.3.4 Intenzita vyzařování

Intenzita vyzařování daného místa zdroje je definována jako diferenciální podíl zářivého toku a elementární plochy, ze které zářivý tok vyzařuje. Označována bývá  $H_e$  nebo také  $M_e$ .

$$H_e = \frac{d\phi_e}{dS} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (4.12)$$

### 4.1.3.5 Spektrální intenzita vyzařování

Spektrální intenzita vyzařování je definována jako diferenciální podíl intenzity vyzařování a vlnové délky. Udává intenzitu vyzařování daného intervalu vlnové délky.

$$H_{e\lambda} = \frac{dH_e}{d\lambda} = \frac{d\phi_{e\lambda}}{dS} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-3}] \quad (4.13)$$

### 4.1.3.6 Pohltivost (absorpce)

Pohltivost je poměr zářivého toku pohlceného povrchovou plochou k zářivému toku dopadajícího na tutéž plochu. Označuje se  $\alpha$  a nabývá hodnot od 0 do 1.

$$\alpha = \frac{\phi_a}{\phi_d} \quad [-] \quad (4.14)$$

### 4.1.3.7 Spektrální pohltivost (absorpce)

Spektrální pohltivost je definována jako podíl spektrálního zářivého toku pohlceného povrchovou plochou a spektrálního zářivého toku dopadajícího na tutéž plochu. Udává pohltivost materiálu pro danou vlnovou délku.

$$\alpha_\lambda = \frac{\phi_{a\lambda}}{\phi_{d\lambda}} \quad [-] \quad (4.15)$$

#### 4.1.3.8 Emisivita povrchu

Často je zaváděn poměr mezi intenzitami vyzařování černého a šedého tělesa. Tento poměr se označuje jako emisivita povrchu  $\varepsilon$ .

$$\varepsilon = \frac{H}{H_b} = A < 1 \quad [-] \quad (4.16)$$

kde je  $H$  integrální zářivá energie  
 $H_b$  integrální zářivá energie černého tělesa

Hodnota emisivity absolutně černého tělesa je 1, absolutně černé těleso je tedy jednak ideálním pohlcovačem tepelného záření, tak i ideálním zdrojem záření. Šedé tělesa jsou méně účinné zářiče.

#### 4.1.3.9 Odrazivost (reflexe)

Odrazivost je poměr odraženého zářivého toku povrchovou plochou k zářivému toku dopadajícímu na tutéž plochu. Označuje se  $\rho$  a nabývá hodnot od 0 do 1.

$$\rho = \frac{\phi_r}{\phi_d} \quad [-] \quad (4.17)$$

#### 4.1.3.10 Spektrální odrazivost (reflexe)

Spektrální odrazivost je definována jako podíl odraženého spektrálního zářivého toku povrchovou plochou a spektrálního zářivého toku dopadajícího na tutéž plochu. Udává odrazivost materiálu pro danou vlnovou délku.

$$\rho_\lambda = \frac{\phi_{a\lambda}}{\phi_{d\lambda}} \quad [-] \quad (4.18)$$

#### 4.1.3.11 Propustnost (transmitance)

Pohltivost je poměr propuštěného zářivého toku materiálem (prostředím) k dopadajícímu zářivému toku. Označuje se  $\tau$  a nabývá hodnot od 0 do 1.

$$\tau = \frac{\phi_t}{\phi_d} \quad [-] \quad (4.19)$$

#### 4.1.3.12 Spektrální propustnost (transmitance)

Spektrální propustnost je definována jako podíl propuštěného spektrálního zářivého toku materiálem (prostředím) a spektrálního zářivého toku dopadajícího. Udává propustnost materiálu pro danou vlnovou délku.

$$\tau_\lambda = \frac{\phi_{t\lambda}}{\phi_{d\lambda}} \quad [-] \quad (4.20)$$

### 4.1.3.13 Planckův vyzařovací zákon

Zahřátá tělesa vyzařují svoji energii po kvantech. Na základě kvantové teorie a v souladu se zákony pravděpodobnosti odvodil Planck svůj vyzařovací zákon, který konstatuje: „Záření o frekvenci  $f$  může být vyzařováno, nebo pohlcováno jen po kvantech energie o velikosti  $e = h \cdot f$ .“ [12].

V tomto zákoně představuje  $h$  Planckovu konstantu, která má hodnotu  $h = (6,6256 \pm 0,0005) \cdot 10^{-34}$  J.s. Z uvedeného vyjádření Planckova vyzařovacího zákona je možné pro dokonale černé těleso ve vakuu odvodit vztah pro spektrální hustotu zářivého toku dokonale černého tělesa  $E_{ol}$  jako funkci vlnové délky záření  $\lambda$  a teploty zářiče  $T$  [12] [13].

$$E_{o\lambda} = \frac{dE_o}{d\lambda} = f(\lambda, T) = c^2 h \frac{2\pi\lambda^{-5}}{e^{\frac{ch}{k\lambda T}} - 1} \quad (4.21)$$

kde je:

$E_o$	hustota zářivého toku dokonale černého tělesa,
$k$	Boltzmannova konstanta $k = (1,38054 \pm 0,00018) \cdot 10^{-23}$ J.K <sup>-1</sup> ,
$c$	rychlost světla,
$T$	termodynamická teplota.

### 4.1.3.14 Kirchhoffův zákon

Kirchhoff ve své práci došel v roce 1860 k důležitému zákonu, který říká, že poměr intenzity vyzařování  $H_e$  k pohltivosti  $\alpha$  závisí jen na absolutní teplotě tělesa. Tento Kirchhoffův zákon o úhrnném vyzařování lze vyjádřit rovnicí:

$$\frac{H_e}{\alpha} = f(T) \quad (4.22)$$

kteřá udává, že tento poměr je funkcí pouze jediné proměnné teploty  $T$  a tedy nezávislý na vlastnostech tělesa (např. chemické složení, úpravě povrchu apod.), na které je uplatňován.

Tento Kirchhoffův zákon platí pro každou vlnovou délku spektra zvlášť, tudíž i pro monochromatické vyzařování a monochromatickou pohltivost. Poměr těchto dvou veličin popisuje Kirchhoffův zákon pro monochromatické záření, který má tvar:

$$\frac{H_\lambda}{\alpha_\lambda} = F(T, \alpha) \quad (4.23)$$

a je funkcí dvou proměnných teploty a příslušné vlnové délky. Z tohoto zákona nám vyplývá velmi důležitá skutečnost, že těleso nejvíce pohlcuje záření o té vlnové délce, kterou samo nejsilněji vyzařuje.

## 4.2 Tepelně technické vlastnosti stavebních materiálů

### 4.2.1 Objemová hmotnost

Objemová hmotnost  $\rho$  je hmotnost materiálu v definovaném stavu, např. vlhkosti, stlačení, o objemu  $1 \text{ m}^3$ , je dle normy [13] definována vztahem:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (4.24)$$

kde je:

$\rho$	objemová hmotnost [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]
$m$	hmotnost materiálu v definovaném stavu vlhkosti, stlačení apod. [kg]
$V$	objem materiálu [ $\text{m}^3$ ]

### 4.2.2 Měrná tepelná kapacita

Měrná tepelná kapacita  $c$  je množství tepelné energie, kterou je třeba dodat při stálém tlaku, vzorku materiálu o definované vlhkosti a hmotnosti 1 kg, aby se jeho teplota zvýšila o 1 K; dle normy [13] je definována vztahem:

$$c = \frac{E}{m \cdot \Delta t} \quad (4.25)$$

kde je:

$E$	tepelná energie (množství přivedeného tepla) [J]
$m$	hmotnost materiálu [kg]
$\Delta t$	přírůstek teploty [K]

### 4.2.3 Součinitel tepelné vodivosti

Součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$  je materiálovou konstantou. Číselně je roven teplu, které projde materiálem za jednotku času jednotkou plochy při jednotkovém teplotním gradientu. Dle normy [13] Je dán vztahem:

$$\lambda = \frac{\vec{q}}{-grad t} \quad (4.26)$$

kde je:

$\lambda$	součinitel tepelné vodivosti
$q$	hustota tepelného toku [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ]
$grad t$	gradient změny teploty [K]

Látky dělíme dle součinitele tepelné vodivosti na dobré vodiče a izolanty. Jeho hodnoty se mohou lišit i o několik řádů, jak ukazuje tabulka seznamu použitých materiálů v příloze této diplomové práce. Nejlepšími vodiči jsou kovy, naopak nejlepšími izolanty

jsou plyny. Proto jsou dobrými izolačními materiály látky, které obsahují velké množství uzavřených dutinek vyplněných vzduchem nebo jinými plyny. Hodnota součinitel tepelné vodivosti závisí na vlhkosti a teplotě materiálu. Tepelná vodivost klesá se zvyšující se vlhkostí nebo teplotou.

#### 4.2.4 Součinitel teplotní vodivosti

Součinitel teplotní vodivosti  $a$  je schopnost stejnorodého materiálu o definované vlhkosti vyrovnávat rozdílné teploty při neustálém vedení tepla, dle normy [13] je dán vztahem:

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \quad (4.27)$$

kde je:

$a$	součinitel teplotní vodivosti [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]
$\lambda$	součinitel tepelné vodivosti [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ]
$c$	měrná tepelná kapacita [ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ]
$\rho$	objemová hmotnost ve stavu definované vlhkosti [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]

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

#### 4.2.5 Množství tepla

Tepelnou energii lze uchovávat v kapalných, plynných i pevných látkách. Množství tepla  $Q$  přijatého látkou je dle literatury [14] přímo úměrné jeho hmotnosti  $m$ , měrné objemové kapacitě  $c$  a rozdílu počáteční a koncové teploty  $\Delta t$ , lze jej tedy definovat vztahem:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta t \quad (4.28)$$

kde je:

$Q$	množství tepelné energie [J]
$m$	hmotnost [kg]
$c$	měrná tepelná kapacita [ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ]
$\Delta t$	rozdíl počáteční a koncové teploty [K]



## 4.3 Tepelně technické vlastnosti konstrukcí

### 4.3.1 Doba chladnutí

Doba chladnutí je čas, za který dojde při skokovém snížení teploty prostředí k ustálení teploty v celé konstrukci. Nejčastěji se počítá na symetrické homogenní konstrukci, kdy vnitřní povrch konstrukce je uprostřed symetrické konstrukce a teplota vzduchu na obou stranách konstrukce je skokově ochlazena. Je možné ji vypočítat analytickou metodou vedení tepla v 1D dle vztahu z literatury [15]:

$$\frac{T_{s\tau} - T_0}{T_a - T_0} = \frac{\theta_{s\tau}}{\theta_a} = \sum \frac{2 \sin \delta_i}{\delta_i + \sin \delta_i \cdot \cos \delta_i} \cdot \cos\left(\delta_i \cdot \frac{x}{0,5s}\right) \cdot e^{-\delta_i^2 \cdot F_0} \quad (4.29)$$

kde je:

- $T_{s\tau}$  teplota v obecné poloze  $s$  a čase  $\tau$  [K],
- $T_0$  teplota na počátku chladnutí [K],
- $T_a$  teplota okolního prostředí [K],
- $\tau$  posuzovaná doba chladnutí [s],
- $\delta$  kořeny transcendentní rovnice  $\text{tg}(\delta) = \frac{B_i}{\delta}$ ,
- $F_0$  Fourierovo číslo  $F_0 = \frac{\alpha \cdot \tau}{(\frac{s}{2})^2}$ ,
- $B_i$  Biotovo číslo  $B_i = \frac{\alpha \cdot \frac{s}{2}}{\lambda}$ .

### 4.3.2 Tepelná akumulace

Tepelná akumulace popisuje ukládání nebo uvolňování energie z konstrukcí, pokud je rozdílná teplota vzduchu a konstrukce.

### 4.3.3 Tepelná setrvačnost

Tepelná setrvačnost popisuje, jak rychle reaguje konstrukce na změnu teploty ve vnějším tak i ve vnitřním prostředí.

### 4.3.4 Teplotní stabilita

Teplotní stabilita popisuje stálost teploty vnitřního prostředí při časově proměnných okrajových podmínkách.

### 4.3.5 Fázový posun

Fázový posun neboli fázové posunutí teplotních kmitů  $\Delta t_f$  říká, s jakým zpožděním se projeví maximální teplota venkovního vzduchu na vnitřním povrchu konstrukce. Za okrajové podmínky se dle normy [16] uvažuje harmonicky proměnná teplota vzduchu v exteriéru dle funkce sinus a konstantní teplota vzduchu v interiéru.

### 4.3.6 Faktor útlumu při prostupu tepla (decrement factor)

Faktor útlumu popisuje tlumení teplotní vlny, které vzniká při průchodu z exteriéru do interiéru. Okrajové podmínky jsou uvažovány stejné jako pro výpočet fázového posunu. Pro tenké lehké konstrukce bez tepelné setrvačnosti se faktor útlumu  $f$  blíží hodnotě 1 [17].

### 4.3.7 teplotní útlum (thermal heat damping)

$v^*$  [-], schopnost konstrukce tlumit harmonické změny teploty venkovního vzduchu

$$v^* = \frac{A_v^*}{A_{si}} \quad (4.30)$$

kde je:

$v^*$	teplotní útlum [-],
$A_v^*$	výsledná teplotní amplituda venkovního prostředí v letním období,
$A_{si}$	teplotní amplituda na vnitřním povrchu konstrukce [K].

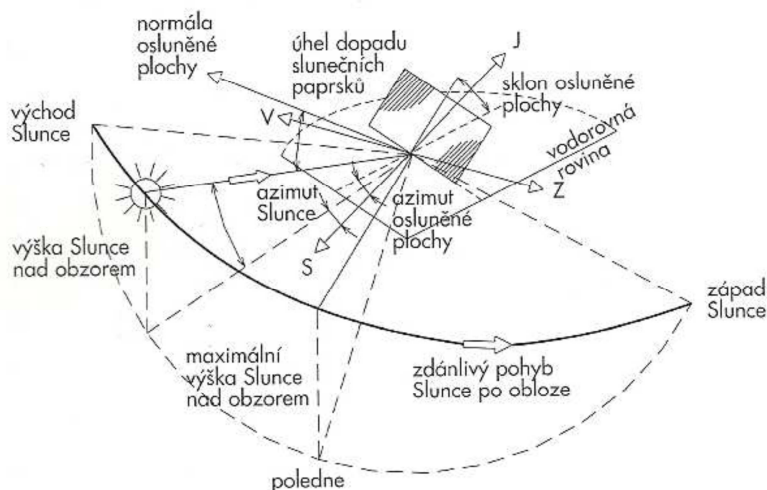
## 4.4 Slunce a sluneční záření

### 4.4.1 Obecně o Slunci

Slunce je hvězda obíhající okolo středu Mléčné dráhy. Hmotu Slunce tvoří převážně vodík, v menší míře helium a stopové množství dalších prvků. Slunce je koule žhavého plazmatu a neustále produkuje velké množství energie. Energie vyzařovaná Sluncem vzniká při termonukleárních reakcích v jeho jádru. Každou sekundu se přibližně 700 milionů tun přemění na 695 milionů tun hélia a zbylých cca 5 milionů tun hmotnosti se přemění na energii - 96% elektromagnetické záření, 4% odnášejí elektronová neutrina. Výkon Slunce je cca  $4 \times 10^{26} \text{W}$ , z toho na Zemi dopadne asi jen 45 miliardtin. Tok energie, který putuje ze Slunce na Zemi činí přibližně  $1,4 \text{kW/m}^2$ . Povrchová teplota Slunce je asi 5800K a proto je lidmi vnímáno jako žluté. Hustota hmoty uvnitř jádra je velmi vysoká je to cca až desetinásobek hustoty olova a směrem k povrchu klesá. Můžeme říct, že v průměru je Slunce o něco hustší než voda. Slunce se vyznačuje magnetickým polem do kterého je ponořena celá sluneční soustava. Jako povrch Slunce vidíme plochu, kterou nazýváme fotosféru. Je tvořena tenkou neprůhlednou vrstvou plynu v plazmatickém stavu, nad touto vrstvou se rozprostírá další avšak řídkší, rozměrnější vrstva chromosféry a koróny. [18]

### 4.4.2 Poloha Slunce na obloze

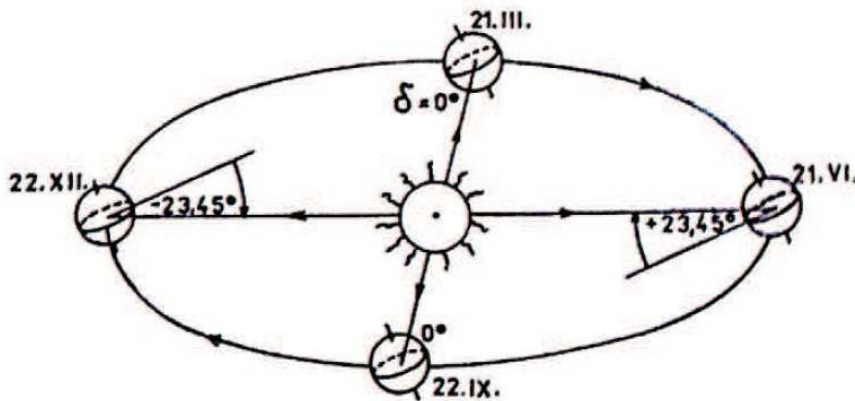
Polohu Slunce, která je nezbytná pro určení intenzity slunečního záření lze určit pomocí dvou základních slunečních souřadnic (výška Slunce nad horizontem a azimut)



Obr. 4.1: Sluneční souřadnice na obloze a osluněné plochy [8].

#### 4.4.2.1 Deklinace Slunce

Při pohybu Země okolo Slunce je rovina rovníku odkloněná od roviny oběžné dráhy o  $23,45^\circ$ , to zapříčiňuje v průběhu roku neustálou změnu polohy Slunce vzhledem na místo posuzování na zemském povrchu. Tuto roční změnu vyjadřujeme pomocí deklinace Slunce  $\delta$ . Deklinace Slunce se během roka mění od  $-23,45^\circ$  v den zimního slunovratu do  $+23,45^\circ$  v den letního slunovratu. Nulovou hodnotu dosahuje v jarní a podzimní rovnodennosti, kdy slunečné paprsky dopadají na zemský povrch rovnoběžně s rovinou rovníku – viz obrázek 4 [8] [19].



Obr. 4.2 Schematické znázornění roční změny deklinace Slunce [8].

Přesné hodnoty  $\delta$  se odvozují z astronomických pozorování. Na výpočet oslunění budov je možné s dostatečnou přesností určit deklinaci Slunce ze vztahu:

$$\delta = 23,45^\circ \sin(t - 109^\circ) \quad [^\circ] \quad (4.31)$$

$$t = 0,98^\circ D + 29,7^\circ M \quad [^\circ] \quad (4.32)$$

kde je:        D        číslo dne v době posuzování,  
                  M        číslo měsíce v době posuzování.

Vliv denní oblohy na změnu vzájemné polohy Slunce a místa posuzování na zemském povrchu, se vyjadřuje pomocí hodinového úhlu Slunce  $\tau$  [8].

Ve výpočtových vztazích sférické astronomie časový údaj o okamžité poloze Slunce se vyjadřuje v úhlové míře a vztahuje se na pravý slunečný čas PSČ. Pravý slunečný čas je odvozený rozdělením pravého slunečního dne na 24 hodin. Časový hodinový úhel je měřen v obloukových stupních od 12 hodin (poledne).

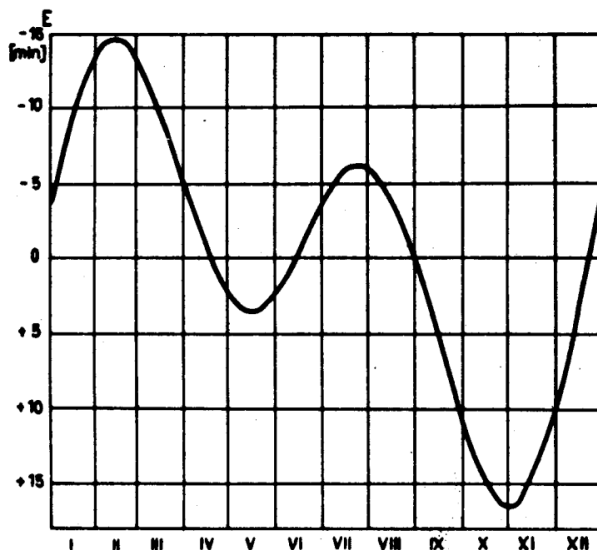
Pravý slunečný čas je vlastně časový interval mezi dvěma vrchními kulminacemi Slunce nad místem posuzování. Pravý sluneční čas v úhlové míře se určuje z podmínky  $24h = 360^\circ$ , kde začátek úhlové stupnice je v okamžiku kulminace Slunce.

Vztah vyjadřuje skutečnost, že se Země otočí o  $15^\circ$  každou hodinu. Takto vyjádřený časový údaj v úhlové míře se nazývá hodinový úhel Slunce  $\tau$  a vypočítá se ze vztahu:

$$\tau = 15^\circ(\text{PSC} - 12) \quad [^\circ] \quad (4.33)$$

Je nutné si uvědomit, že časový údaj podle našich hodin není shodný s pravým slunečním časem. Vyplývá to z toho, že v průběhu roku délka pravého slunečního dne není stejná. Tyto nerovnosti jsou vyvolané změnou vzdálenosti Země od Slunce a rychlosti pohybu Země po elipse. Přesto nemůže být pravý sluneční den základem jednotného času. Tyto nevýhody se dají vyloučit zavedením tzv. středního slunečního času SSČ. Vychází se přitom z idealizovaného předpokladu, že Země obíhá okolo Slunce po kruhové dráze s konstantní obvodovou rychlostí rovnající se průměrné rychlosti Země na skutečné oběžné dráze. Hodnoty časové rovnice se odvozují z astronomických pozorování a uvažují se pro jednotlivé roky v hvězdářských ročenkách. Změnu časové rovnice po jednotlivých dnech v průběhu roku lze pro výpočet oslunění budov vyjádřit vztahem [19]:

$$\eta = 0,125 \sin(t - 32^\circ) + 0,165 \sin(2t - 38^\circ) \text{ [min]} \quad (4.34)$$

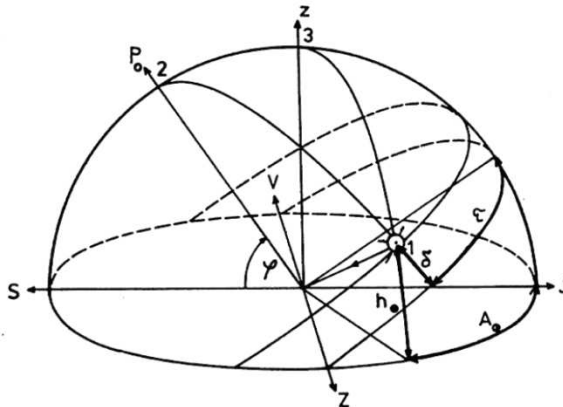


obr. 4.3 Časová rovnice  $E$ -průběh během roku. Záporné hodnoty udávají opoždění pravého Slunce za středním, kladné hodnoty jeho předstihu

#### 4.4.2.2 Výška Slunce

Polohu Slunce vzhledem na horizontální rovinu v místě posuzování definujeme výškou Slunce  $h_0$ . Je to úhel, který svírá slunečný paprsek s horizontální rovinou. Geografickou polohu místa posuzování definujeme jeho zeměpisnou šířkou  $\varphi$ , neboli úhlem, který svírá zenitová přímka s rovinou rovníku [8] [19].

$$\sin h_0 = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \tau \quad (4.35)$$

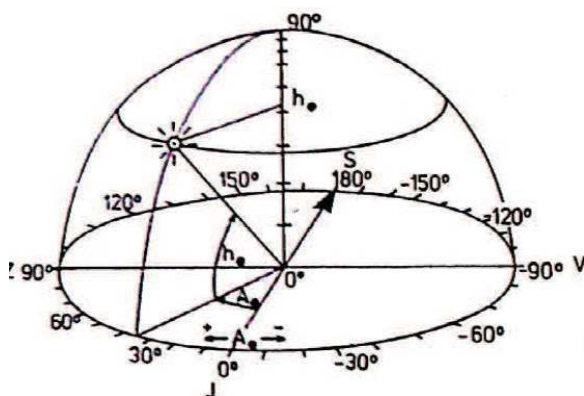


Obr. 4.4 Výpočtové schéma na odvození souřadnic Slunce [8].

#### 4.4.2.3 Azimut Slunce

Druhou souřadnicí Slunce je azimut Slunce  $A_0$ . Je to úhel, který svírá průmět slunečného paprsku na horizontální rovinu v místě posuzování s jižním směrem. Azimut Slunce směrem k východu má záporné znaménko a směrem k západu má znaménko kladné. Pro výpočet azimutu slunce jsem používal tento vztah [8]:

$$\cos A_0 = \frac{\tan \varphi}{\cos h_0} (\sin h_0 - \frac{\sin \delta}{\sin \varphi}) \quad (4.36)$$

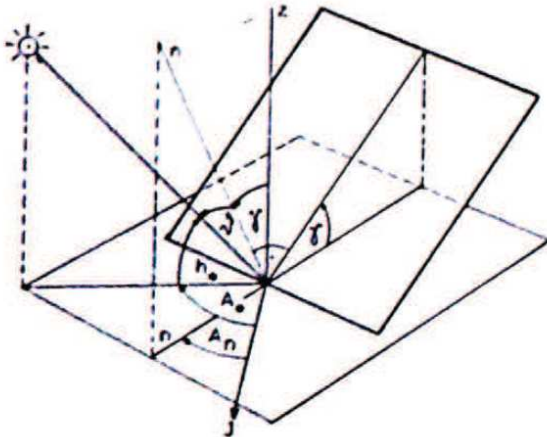


Obr.4.5 Určení polohy Slunce [8].

#### 4.4.2.4 Úhel dopadu

Úhel dopadu  $\vartheta$  je úhel, který svírá slunečný paprsek s normálou na rovinu posuzování. Polohu roviny posuzování udává sklon a orientaci roviny k světovým stranám. Sklon roviny  $\gamma$  udává úhel, který na vnitřní straně svírá jeho spádová přímka s vodorovnou rovinou [8] [19].

$$\cos \vartheta = \cos \gamma \sin h_o + \sin \gamma \cos h_o \cos(A_o - A_n) \quad (4.37)$$



Obr.4.6 Výpočtové schéma pro úhel dopadu slunečního paprsku na skloněnou rovinu [8].

#### 4.4.3 Sluneční záření

Sluneční záření je elektromagnetické záření. Částicí elektromagnetického záření je foton a proto můžeme říct, že sluneční záření je tok fotonů. Každý foton má energii E.

$$E = h \cdot f \quad [\text{J} \cdot \text{S}] \quad (4.38)$$

kde je:  $h$  Planckova konstanta ( $h=6,6252 \times 10^{-34}$  [J.s])  
 $f$  frekvence [Hz]

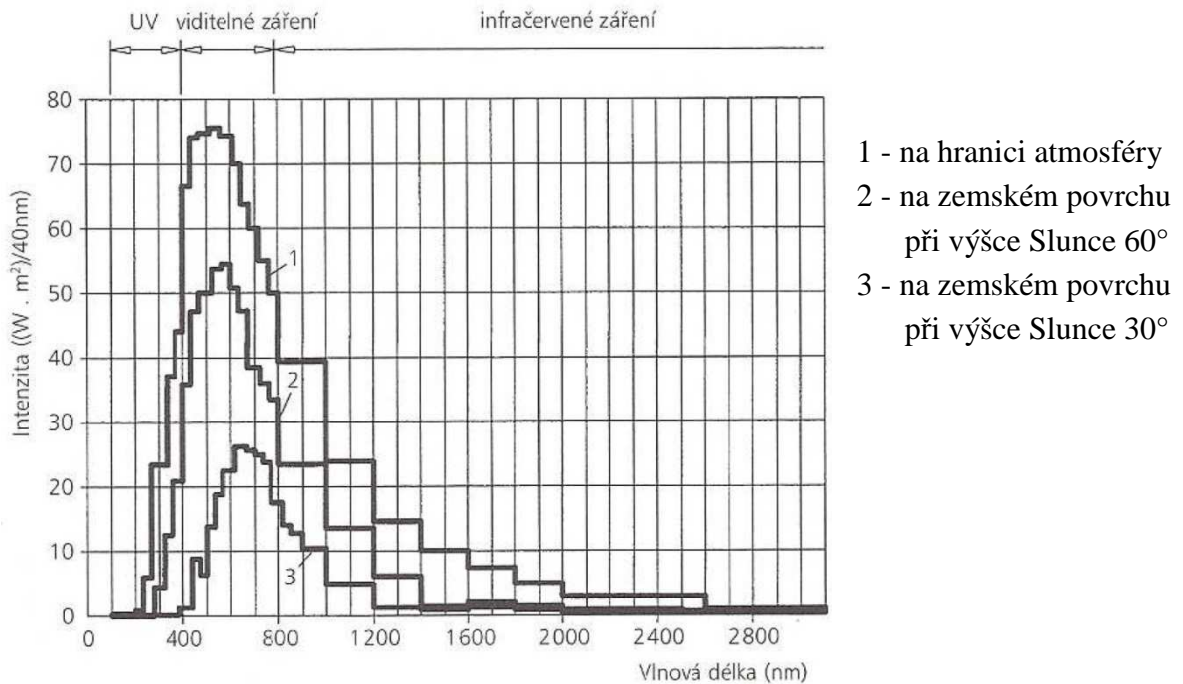
Sluneční záření dělíme dle vlnových délek na:

- ultrafialové záření: 100nm - 380nm,
- viditelné záření: 380nm - 780nm,
- infračervené záření: 780nm - 1mm.

Pro řešenou problematiku je nejdůležitější infračervené záření. Záření, které dopadne na zemský povrch je pohlceno a přeměněno v teplo, které se pak vyzařuje jako infračervené záření pro které je atmosféra nepropustná (skleníkový efekt), největší vliv na pohlcení má  $\text{CO}_2$  a vodní pára

Spektrální rozsah slunečního záření, které dopadá po průchodu atmosférou na zemský povrch je od 280nm do 3000nm.





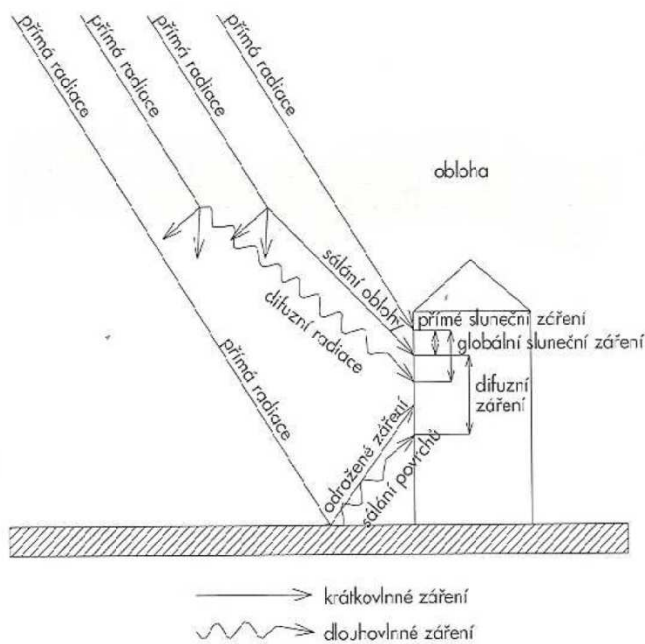
Obr. 4.7 Spektrální rozdělení energetického obsahu slunečního záření [20]

Sluneční energie dopadající na Zemi se dle zákona zachování energie, přeměňuje beze zbytku do jiné formy. Mezi projevy sluneční energie například patří energie fosilních paliv, zemní plyn, energie biomasy atd.

Intenzita slunečního záření je na hranici atmosféry Země v průměru  $1360 \text{ W/m}^2$  (sluneční konstanta). V atmosféře se část slunečního záření odrazí zpět do vesmíru, část se pohltí, část se rozptýlí a část dopadá na zemský povrch jako přímé sluneční záření.

Sluneční záření můžeme rozdělit na dvě části: přímé a rozptýlené (difuzní). Dalšími složitými přeměnami prochází sluneční záření v biosféře, která se nachází těsně u zemského povrchu. Ze slunečního záření dopadajícího na Zemi připadá 1 % na biologické reakce, které jsou nezbytné pro zachování života na Zemi.

Sluneční záření působící na objekt má různou intenzitu a dobu trvání. Množství dopadající energie je závislé na umístění objektu (zeměpisné šířce) a na orientaci ke světovým stranám.



Obr. 4.8 Dělení slunečního záření [20]

#### 4.4.3.1 Přímé sluneční záření

Přímé sluneční záření je energeticky nejefektivnější, protože se k zemskému povrchu dostává ve svazku rovnoběžných paprsků ze Slunce při jasné a bezmračné obloze. Pokud na objekt působí tato složka záření tak objekt vrhá vlastní ohraničené stíny.

Intenzita přímého záření dopadajícího na plochu kolmou ke směru paprsků  $I_{pn}$ :

$$I_{pn} = I_0 \cdot \exp\left(-\frac{Z}{\varepsilon}\right) \quad [\text{W}\cdot\text{m}^{-2}] \quad (4.39)$$

kde je:  $\varepsilon$  součinitel, který závisí na výšce Slunce nad obzorem a na nadmořské výšce daného místa [-],  
 $Z$  součinitel znečištění atmosféry.

Intenzita přímého slunečního záření  $I_p$  dopadající na obecně položenou plochu:

$$I_p = I_{pn} \cdot \cos \gamma \quad [\text{W}\cdot\text{m}^{-2}] \quad (4.40)$$

kde je:  $\gamma$  úhel svírající nakloněná dopadová plocha s plochou vodorovnou [°]

Intenzita přímého slunečního záření  $I_{ph}$  kolmo ke slunečním paprskům:

$$I_{ph} = I_{pn} \cdot \sin h_0 \quad [\text{W}\cdot\text{m}^{-2}] \quad (4.41)$$

#### 4.4.3.2 Rozptýlené (difuzní) záření

Rozptylem přímého záření molekulami vzduchu, v mracích a na částech prachu vzniká záření difuzní, které na Zemi přichází ze všech směrů. Difuzní záření může převládat nad přímým zářením při východu a západu Slunce, za větší oblačnosti a při větším znečištění atmosféry. Intenzita difuzního záření závisí i na výšce slunce nad obzorem  $h$ . Součástí difuzního záření je i sálání okolních ploch a terénu. [20]

Intenzita difuzního slunečního záření dopadající na vodorovnou rovinu:

$$I_{Dh} = \frac{1}{3}(I_0 - I_{Pn}) \cdot \sin h \quad [\text{W}\cdot\text{m}^{-2}] \quad (4.42)$$

kde je:  $I_{Pn}$  intenzita přímého slunečního záření na plochu kolmou ke slunečným paprskům  $[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}]$ ,  
 $I_0$  sluneční konstanta  $I_0 = 1358 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ .

Intenzita difuzního slunečního záření dopadající na obecnou rovinu:

$$I_D = 0,5(1 + \cos \alpha)I_{Dh} + 0,5r(1 - \cos \alpha)(I_{Ph} + I_{Dh}) \quad [\text{W}\cdot\text{m}^{-2}] \quad (4.43)$$

kde je:  $r$  reflexní schopnost okolních ploch pro sluneční paprsky [%],  
 $I_{Ph}$  intenzita přímého slunečního záření na vodorovnou plochu  $[\text{W}/\text{m}^2]$ ,  
 $I_{Dh}$  intenzita difuzního slunečního záření na vodorovnou plochu  $[\text{W}/\text{m}^2]$ .

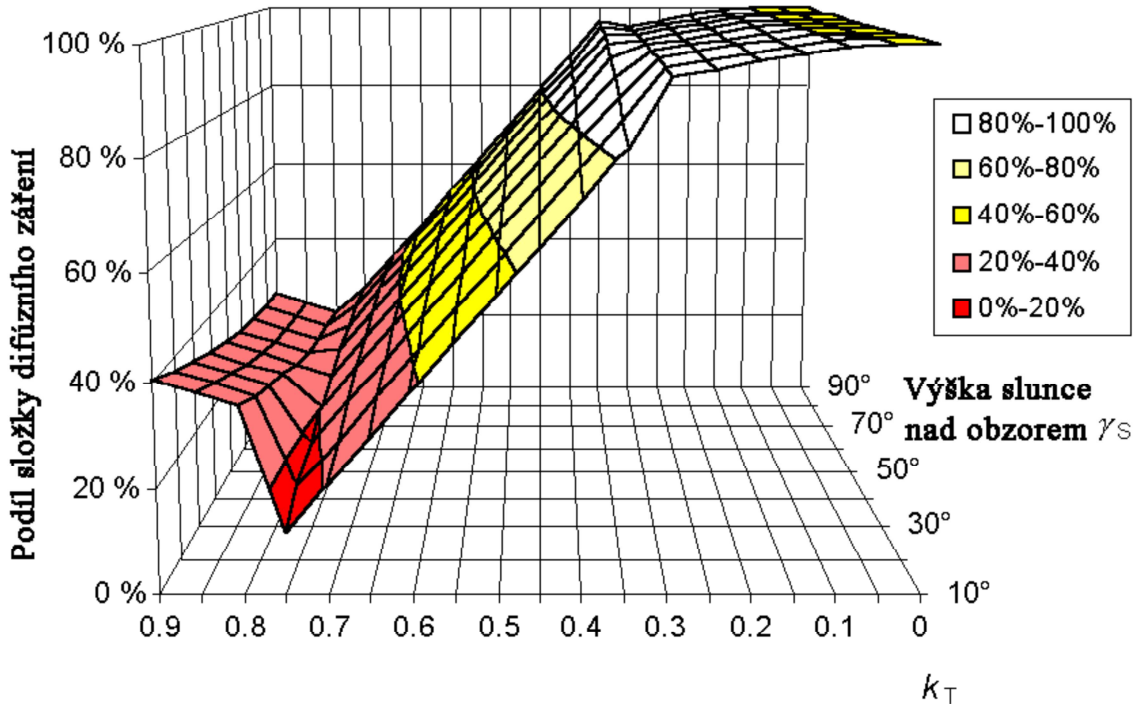
Mnoho meteorologických stanic stejně jako naše použité zařízení měří jen celkové záření. Pro naši dynamickou simulaci však potřebujeme záření rozdělit na složky přímého a difuzního záření. Empirické funkce nalezeny statistikami šetřeními mohou rozdělit celkové záření do přímého a difuzního záření, např. (Reindl et al, 1989). Hodinové hodnoty celkového záření  $E_{g, hor}$  mimozemského záření  $E_0$  a výšky Slunce  $h_0$  definuje koeficient  $k_T$  tímto způsobem:

$$k_T = \frac{E_{G,hor}}{E_0 \cdot \sin h_0} \quad [-] \quad (4.44)$$

S tímto koeficientem může být vypočteno difuzní záření  $E_{diff,hor}$  s použitím celkového záření  $E_{G,hor}$  a výšky Slunce nad obzorem  $h_0$ :

$$\begin{aligned} E_{diff,hor} &= E_{G,hor} \cdot (1,020 + 0,254 \cdot k_T + 0,0123 \cdot \sin h_0) && \text{pro } k_T \leq 0,3 && (4.45) \\ E_{diff,hor} &= E_{G,hor} \cdot (1,400 - 1,749 \cdot k_T + 0,1770 \cdot \sin h_0) && \text{pro } 0,3 < k_T < 0,78 \\ E_{diff,hor} &= E_{G,hor} \cdot (0,486 \cdot k_T - 0,182 \cdot \sin h_0) && \text{pro } k_T \geq 0,78 \end{aligned}$$

Na obrázku 3.9 je zobrazena tato korekce graficky. Je zřejmé, že difuzní složka záření je velmi nízká za jasných dnů, kdy jsou globální hodnoty záření vysoké ( $k_T \rightarrow 1$ ), ale i tak je difuzní složka záření zřídka pod 20%. Jestliže je velmi zamračený den a celkové záření je nízké ( $k_T \rightarrow 0$ ), difuzní složka záření může dosáhnout 100%.



obr. 4.9 Závislost poměru intenzity difuzního záření k záření globálnímu (celkovému) na výšce slunce  $h_o$  a koeficientu  $k_T$

#### 4.4.3.3 Odražené sluneční záření

Vzniká odrazem přímého i difuzního záření od okolních ploch. Toto záření je velmi špatně využitelné u vodorovných ploch.

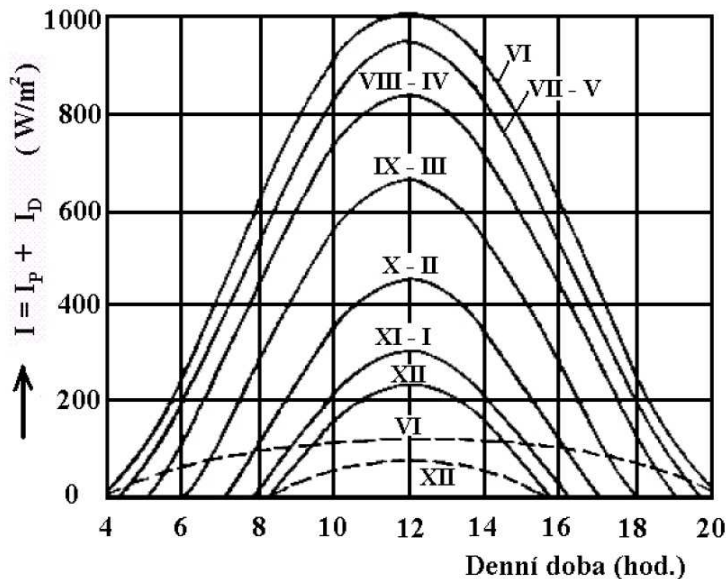
#### 4.4.3.4 Globální (celkové) záření

Globální záření je množství sluneční energie dopadající na vodorovnou plochu a je dáno součtem přímého, difuzního a odraženého záření. Difuzní záření za jasného počasí nepřekračuje hodnotu  $100 \text{ W/m}^2$  a to činí 10-15% z celkového záření.

Výsledný energetický účinek slunečního záření se vypočte podle vztahu:

$$I = I_p + I_D \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (4.46)$$

Existuje více způsobů výpočtu intenzity slunečního záření. Přesnější metody výpočtu zohledňují různé součinitele znečištění atmosféry, či zakřivení slunečního paprsku při průchodu atmosférou (tzv. refrakcí).

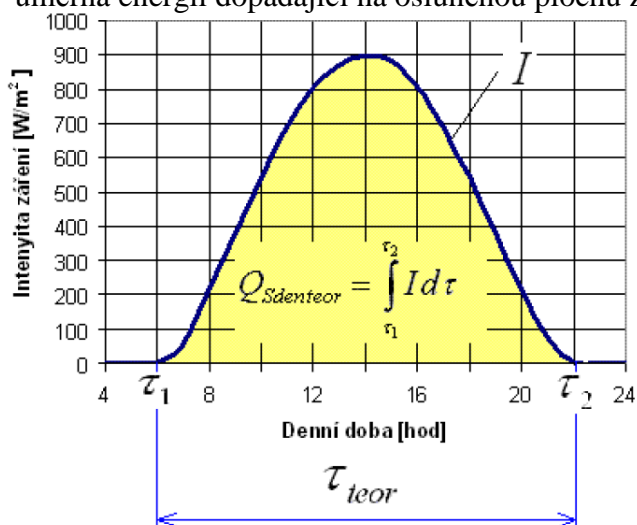


obr 4.10 intenzita celkového slunečního záření na vodorovnou plochu [21]

Na obrázku 4.10 je zobrazena celková intenzita slunečního záření na vodorovnou rovinu plochu v denní době při součiniteli znečištění atmosféry  $T = 3$ , pro oblast zeměpisné šířky  $50^\circ$ . Jednotlivé křivky znázorňují charakteristický den v měsíci za jasného a slunečné počasí. Čárkovaná čára představuje průběh intenzity difuzního záření v měsících červen a prosinec.

#### 4.4.3.5 Energie dopadající na osluněnou plochu

Plocha pod křivkou udávající denní průběh intenzity celkového slunečního záření je úměrná energii dopadající na osluněnou plochu za den  $Q_{Dden,teor} [W \cdot m^{-2}]$ . [22]



Obr. 4.11 Množství energie dopadající na plochu  $1m^2$  za den [21]

Pokud se křivka popíše vhodnou matematickou rovnicí, lze množství energie vypočítat integrováním dané rovnice.

$$Q_{sden,teor} = \int_{\tau_1}^{\tau_2} I dt \quad [\text{W}\cdot\text{m}^{-2}] \quad (4.47)$$

kde je:

$Q_{sden,teor}$	teoretické množství energie dopadající na $1\text{m}^2$ osluněné plochy $[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}]$
$I$	velikost intenzity slunečního záření vyjádřené jako $I=f(\tau)$
$\tau_1$ a $\tau_2$	teoretická astronomická doba slunečního svitu $\tau_{teor}$

Tento způsob výpočtu můžeme požit např. pro průběh intenzity záření charakteristického dne v měsíci. Po vynásobení denního množství energie počtem dní daného měsíce, získáme množství celkové energie dopadající na jednotkovou plochu za měsíc.

Skutečné množství energie dopadající na osluněnou plochu je dáno především oblačností. Oblačnost propouští jen část slunečního záření, které se rozptýlí do různých směrů (difuzní záření). Nejpřesnějším způsobem určení množství dopadající energie je spočítat skutečnou plochu pod křivkou skutečného průběhu intenzity solárního záření. Pro zjednodušení se dá skutečný průběh intenzity záření rozdělit podle časových fází na úseky jasné a zatažené oblohy.

V našem případě, kdy známe průměrné hodinové hodnoty intenzit slunečního záření v daném období, je způsob určení množství dopadající energie na jednotkovou plochu následující. Průměrná intenzita slunečního záření v každé hodině se počítala pomocí průměru v intervalu 60 minut. Tím se všemi naměřené hodnoty v daném intervalu nahradili jednou konstantní hodnotou. Za předpokladu konstantního záření po určitou dobu dopadne na osluněnou plochu množství energie úměrné této době. Při konstantním záření  $500\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  po dobu jedné hodiny dopadne na ozářenou plochu  $500\text{ Wh/m}^2$ . Známe-li tedy průměrné hodinové intenzity v jednotlivých dnech, můžeme stanovit množství energie dopadající na osluněnou plochu jejich součtem.

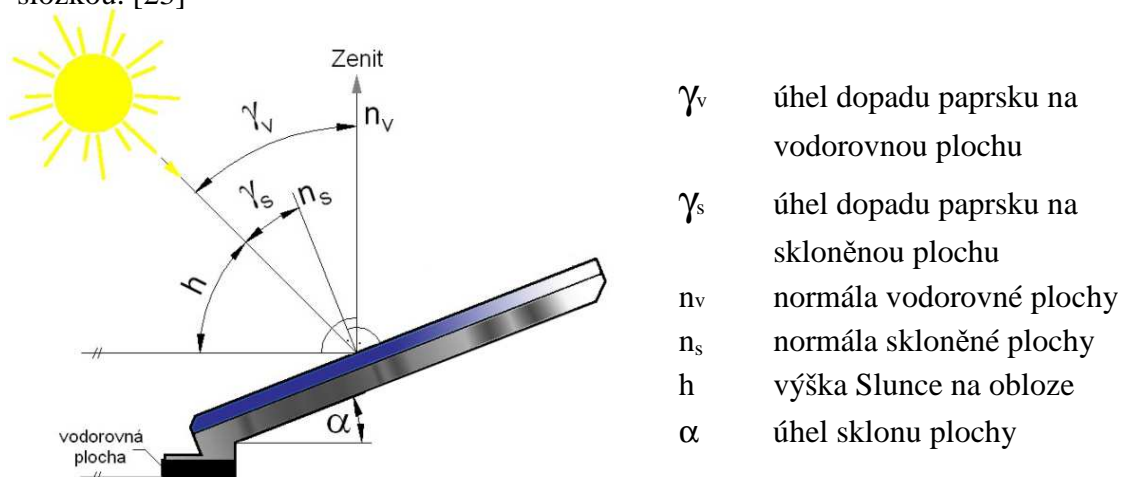
#### 4.4.3.6 Délka slunečního svitu

Délkou slunečního svitu rozumíme počet hodin, po které dopadalo na zemský povrch přímé sluneční záření. Dobou slunečního svitu označujeme časový interval působení přímého slunečního záření např. 12.00 až 15.30 hod. Sluneční záření od  $120\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  lze podle Světové meteorologické organizace (WMO) prohlásit za přímé. K měření slunečního svitu se používá zařízení zvané slunoměr, nebo také heliograf. Dlouhodobý roční průměr délky slunečního svitu pro Brno je 1677,4 hodin [23]

#### 4.4.3.7 Porovnání dopadajícího záření na vodorovnou na skloněnou plochu

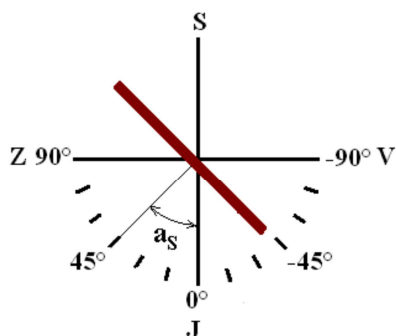
Velikost intenzity slunečního záření na vodorovné ploše je odlišná od velikosti intenzity slunečního záření na ploše šikmé. Tento rozdíl intenzit je dán odlišným úhlem dopadu paprsků slunečního záření na vodorovnou a šikmou plochu. Velikost intenzity přímé složky slunečního záření je úměrná kosinu úhlu  $\gamma$  od normály osluněné plochy ke slunečním paprskům (obr. 4.12).

Největší intenzity slunečního záření se dosáhne v okamžiku, kdy budou sluneční paprsky dopadat kolmo na osluněnou plochu. Intenzita slunečního záření bude s rostoucím úhlem  $\gamma$  klesat, až do okamžiku kdy bude směr dopadajících slunečních paprsků rovnoběžný s osluněnou plochou, kdy je intenzita slunečního záření dána pouze její difúzní složkou. [23]

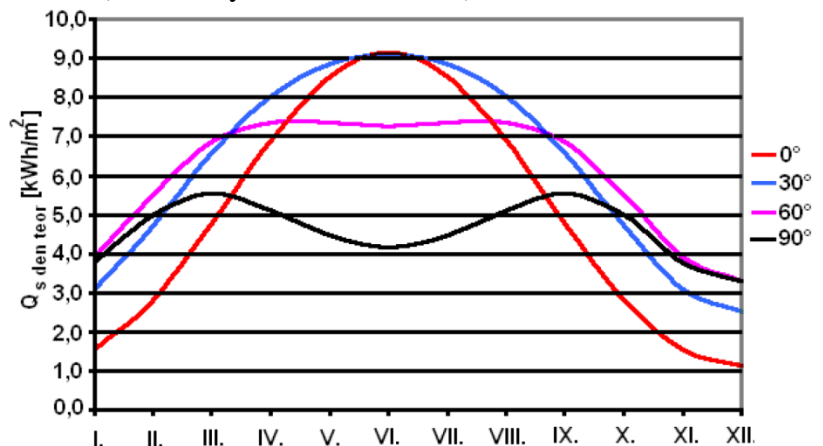


Obr. 4.12 Geometrie dopadu slunečního paprsku na osluněnou plochu [23]

Parametry osluněné plochy jsou dány její rozlohou, sklonem a orientací. Sklonem osluněné plochy rozumíme úhel, který svírá s vodorovnou rovinou. Orientace plochy je dána její pozicí vůči světovým stranám (azimutový úhel  $a_s$  obr. 4.13).



Obr. 4.13 Azimutový úhel plochy



Obr. 4.14 Teoretické množství slun. energie-jih [23]



#### 4.4.4 Přeměna slunečního záření při průchodu zasklením

Přímé sluneční záření o krátkých vlnových délkách dopadá na zasklení oken, které jej zčásti odrazí a zčásti pohltí a zbytek propustí dovnitř. Skla oken, stěny, předměty v interiéru a podlaha se pohlceným zářením ohřejí. Fyzikálně to tedy znamená, že pohlcené viditelné a infračervené krátkovlnné sluneční záření se promění v tělese na teplo. Tyto tělesa pak vyzařují dlouhovlnné tepelné záření. Zjednodušeně tedy řečeno probíhá změna krátkovlnného záření na dlouhovlnné záření se změnou amplitudy. [23]

#### 4.4.5 Součinitel znečištění atmosféry

Intenzita slunečního záření se při průchodu atmosférou snižuje, míra snížení je dána součinitelem znečištění atmosféry  $Z$ . Uvedený součinitel závisí na obsahu příměsí ve vzduchu a nadmořské výšce (atmosférickém tlaku). Hodnoty znečištění atmosféry se mění v denním i ročním cyklu. Pro číselné vyjádření míry znečištění atmosféry používáme Linkeho vztah:

$$Z = \frac{\ln I_0 - \ln I_n}{\ln I_0 - \ln I_\varepsilon} \quad (4.48)$$

kde je:

$Z$	Linkeho vztah [-]
$I_0$	sluneční konstanta ( $1360 \text{ W/m}^2$ ),
$I_n$	intenzita slunečního záření na plochu kolmou ke slunečním, paprskům při daném znečištění ovzduší [ $\text{W/m}^2$ ],
$I_\varepsilon$	intenzita slunečního záření na plochu kolmou ke slunečním, paprskům při dokonale čistém ovzduší [ $\text{W/m}^2$ ].

Linkeho vztah představuje počet ideálně čistých atmosfér, které by vyvolali stejné oslabení jako reálná atmosféra. Pro výpočet sluneční radiace, ve kterém zohledňujeme součinitel znečištění atmosféry  $Z$  použijeme průměrnou hodnotu podle ročního období bez ohledu na lokální znečištění, které je zahrnuto součinitelem  $c_0$ .

$$Z = z \cdot c_0 \quad (4.49)$$

kde je:

$z$	znečištění atmosféry [-]
$c_0$	lokální znečištění atmosféry [-]

Pro zajímavost uvádím pár příkladů součinitele znečištění, nejmenší hodnoty byly zjištěny na vrcholech velehor (cca  $z = 2$ ) a největší v průmyslových městech ( $z = 5 - 6$ ). Znečištění v blízkosti velkých měst vede ke vzniku vlastního mikroklimatu s vlastními teplotami a proudění vzduchu.

Součinitel Z	Charakteristická lokalita
2,0	místa nad 2 000 m n. m.
2,5	místa nad 1 000 m n. m.
3,0	venkov bez průmyslové činnosti
4,0 – 5,0	města s průmyslovou činností
krátkodobě až 8	při vysoké koncentraci exhalací

tab. 4.1 Hodnoty Linkeho součinitele znečištění atmosféry [23]

#### 4.4.6 Vliv oblačnosti a polohy Slunce na intenzitu záření

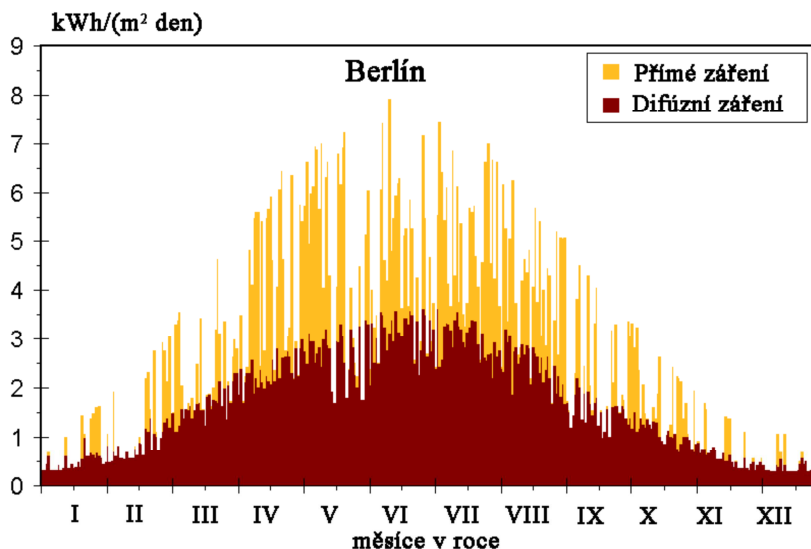
Oblačnost a počasí mají významný vliv na sluneční záření. Denní záření ve střední Evropě může dosáhnout hodnot nad  $7,5 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{den}^{-1}$  v létě, zatímco jednotlivé dny v zimě mohou mít méně než  $0,1 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{den}^{-1}$ . Roční záření se mění významně po celém světě. Například v Evropě jsou velké rozdíly mezi severem a jihem. Na severu jsou rozdíly mezi létem a zimou mnohem vyšší, než na jihu. V Bergenu (Norsko  $60,4^\circ$  severně) je poměr celkového záření (celkové záření na horizontálním povrchu na Zemi) v červnu k celkovému záření v prosinci 40:1 zatímco v Lisabonu (Portugalsko  $38,7^\circ$  severně) je tento poměr pouze 3,3:1. Centrální a severní Evropa má roční souhrn hodnot záření mezi  $700 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{rok}^{-1}$  a  $1000 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{rok}^{-1}$ . V jižní Evropě toto záření může být větší než  $1700 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{rok}^{-1}$  a v pouštních oblastech zemského slunečního pásu je kolem  $2500 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{rok}^{-1}$ .

Zeměpisná šířka určuje pouze hrubý odhad sumy ročního záření, protože místní faktory mají významnější na celkovou energii ze záření dopadajícího na zemský povrch. Například roční záření ve Stockholmu a Berlíně jsou téměř stejná, ačkoli zeměpisná šířka Stockholmu je o  $7^\circ$  vyšší než v Berlíně. Na druhé straně je roční záření v Londýně významně nižší, než v Berlíně, který leží více na jih.

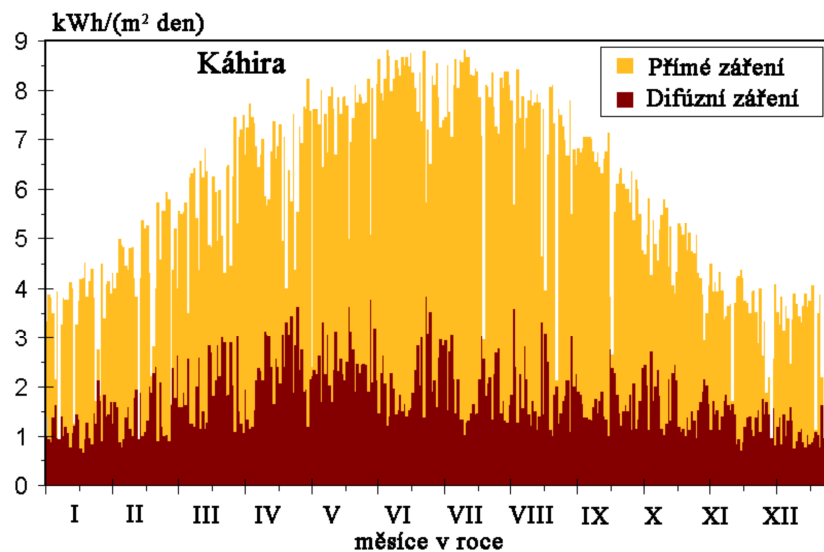
Upington v jižní Africe a Londýn mají stejné roční množství difúzního záření, třebaže roční celkové záření v Upingtonu je dvakrát větší než v Londýně. Regiony s vysokým znečištěním ovzduší nebo tropické regiony mají významně zvýšený příspěvek difúzního záření. Rozdíly mezi ročním přímým zářením jsou mnohem vyšší. Například roční přímé záření v Upingtonu je skoro pětkrát vyšší než v Londýně.

Dny s nízkým globálním zářením mají vysoké procento difúzního záření, blíží se někdy ke 100%, takže příspěvek difúzního záření se snižuje na méně než 20% ve dnech s velmi vysokými hodnotami celkového záření. Na obrázek 4.15 je uvedeno střídání přímého a difúzního záření během jednoho roku v Berlíně, který je místo s relativně nízkým ročním zářením. Oproti tomu jsou na obrázku 4.16 zobrazeny hodnoty záření v Káhiře, která je místo s relativně vysokým ročním zářením. Zde jsou průkazné rozdíly

mezi těmito lokalitami. V Berlíně je přes rok střídání jak přímého, tak difuzního záření mnohem častější než v Káhiře. [24]



Obr. 4.15 Denní záření přímé a difuzní v Berlín [24]



Obr. 4.16 Denní záření přímé a difuzní v Káhiře [24]

Oblačnost	Intenzita globálního záření [W/m <sup>2</sup> ]	Podíl difuzního záření [%]
Modré nebe	800 - 1000	10%
Zamlžené nebe	600- 900	Až 50%
Mlhavý podzimní den	100 - 300	100%
Zamračený zimní den	50	100%
Celoroční průměr	600	50 – 60%

tab. 4.2 Hodnoty Linkeho součinitele znečištění atmosféry [23]

#### 4.4.7 Sluneční záření v České republice

Radiační klima v České republice můžeme rozdělit do dvou oblastí:

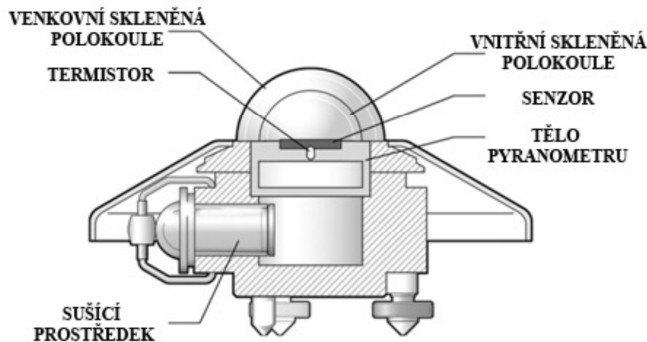
- a. Čechy, severní a střední Morava
- b. jižní Morava

Možný potenciál globálního slunečního záření při stále jasné obloze se mění od  $2025 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$  v nejnižnějších oblastech republiky do  $1895 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$  v severních Čechách. Oblačnost v severních a západních Čechách způsobuje, že se dosáhne jen 54 až 60 % z možného záření. Na jižní Moravě je tento poměr 65 až 68%. Maximum slunečního záření připadá na červen. Mapa slunečního svitu pro Českou republiku je v příloze A.1

#### 4.4.8 Měření solárního záření

##### 4.4.8.1 Měření globálního záření

K měření intenzity globálního solárního záření se používá přístroj zvaný pyranometr (obr. 4.17). Ten porovnává teplotu osluněné a neosluněné plochy, nebo teplotu černého a bílého povrchu pod skleněným krytem. Teplotní rozdíl je úměrný intenzitě dopadajícího záření. Přesné a kvalitní pyranometry obsahují velký počet sériově řazených termočlánků, pro zajištění dostatečně velkého výstupního napětí.



Obr. 4.17 Pyranometr Kipp&Zonen CM6B [25]

Mezi přední světové výrobce snímačů solárního záření patří holandská firma Kipp&Zonen, která vyrábí solární snímače od standardní kvality až po vysoce kvalitní snímače určené pro meteorologické a vědecké účely. Kvalitu pyranometru určuje třída přesnosti. Levnější variantu představují pyranometry českého výrobce firmy Tlust'ák, kde je požadované výstupní napětí zesíleno operačním zesilovačem. Použitím operačního zesilovače se zhorší parametry přístroje. Zhorší se jeho dynamické vlastnosti a zvýší se chyba měření. K provozu je nutný externí zdroj napájení operačního zesilovače.

Jinou levnější variantu představují pyranometry s čidlem na bázi křemíkového fotovoltaického článku, např. K&Z typ SP Lite2. Při dopadu slunečního záření se na fotovoltaickém čidle indukuje napětí, které je úměrné dopadajícímu záření. Intenzita záření se získá přepočtem pomocí kalibračního koeficientu.

#### 4.4.8.2 Měření difúzního záření

Pro měření difúzního záření je třeba zabránit přímému dopadu slunečních paprsků na snímač. Zábрана může být realizována pomocí pohyblivé kruhové clony (obr. 4.18), nebo pomocí stínítka na pohyblivém zařízení (obr. 4.19), které sleduje pohyb Slunce po obloze tzv. „Sun Tracker“.



Obr. 4.18 Měření difúzní složky záření pomocí kruhové clony [26]



Obr. 4.19 Pyrheliometr (měření přímého záření) [27]

#### 4.4.8.3 Měření přímého záření

K měření přímého slunečního záření se používá tzv. pyrheliometr (obr. 4.28). Ten je konstruován tak, aby odstínil difúzní složku záření. Pracuje na stejném principu jako pyranometr. Vzhledem k dennímu pohybu Slunce po obloze musí být pyrheliometr umístěn na pohyblivém zařízení sledující pohyb Slunce. Pokud chceme měřit přímé sluneční záření pouze na určitých vlnových délkách, musí být pyrheliometr vybaven vyměnitelnými filtry.



Obr. 2.6 Sun Tracker [4.28]

Přípevněné stínítko brání přímému slunečnímu svitu v dopadu na senzor pyranometru. V pravé části přístroje je připevněn pyrheliometr. Zařízení sleduje polohu Slunce v reálném čase.

## 4.5 Prostup, lom a odrazivost slunečního záření stavebním zasklením

### 4.5.1 Lom světla

Lom záření nastává při průchodu opticky nehomogenním prostředím (materiálem) nebo při průchodu rozhraním mezi dvěma prostředími s různými indexy lomu. Pokud dojde k lomu záření změní se směr a rychlost šíření záření. V opticky homogenním prostředí světelné paprsky zachovávají svůj směr (přímkový). Jak již je zmíněno výše v opticky nehomogenním prostředí je dráha paprsku různě zakřivena. [29]

#### 4.5.1.1 Index lomu

Index lomu prostředí je dán poměrem rychlosti šíření elektromagnetických vln ve vakuu k jeho fázové rychlosti v uvažovaném prostředí:

$$n(\lambda) = \frac{c_{vak}}{c} \geq 1 \quad [-] \quad (4.50)$$

kde je:  $c_{vak}$  rychlost šíření záření ve vakuu [m/s]  
 $c$  rychlost šíření záření v daném prostředí [m/s]

#### Příklad indexů lomu dle vybraných prostředí:

vakuum	$n=1,0000$
suchý vzduch, při normálním atmosférickém tlaku	$n=1,0003$
stavební sklo	$n=1,5200$

Index lomu světla můžeme také vyjádřit pomocí zákona lomu:

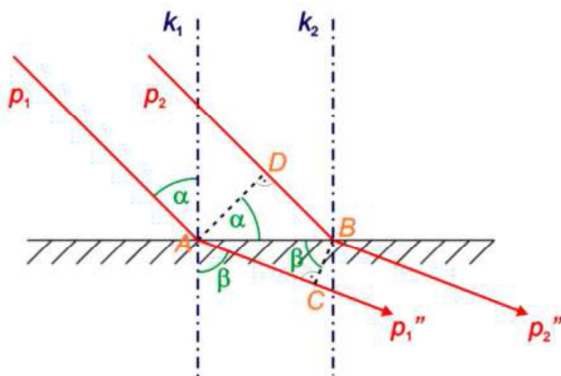
$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_1}{n_2}, \quad \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2} \quad [-] \quad (4.51)$$

kde je:  $\alpha$  úhel dopadu,  
 $\beta$  úhel lomu,  
 $n_1, n_2$  index lomu prostředí 1 a prostředí 2,  
 $v_1, v_2$  rychlost šíření světla v prostředí 1 a v prostředí 2.

#### Zákon lomu

Lom světla nastává při průchodu světla z jednoho prostředí do druhého za předpokladu, že obě prostředí byly průhledné nebo průsvitné. Zjednodušeně na rozhraní dvou prostředí (sklo-vzduch) dopadá svazek rovnoběžných paprsků, v okamžiku kdy paprsek  $p_1$  dopadne na rozhraní prostředí, je paprsek  $p_2$  teprve v bodě  $D$  a do bodu  $B$  dopadne za dobu  $t_1$ . Než ale paprsek  $p_2$  dopadne na rozhraní obou prostředí, paprsek  $p_1$  se

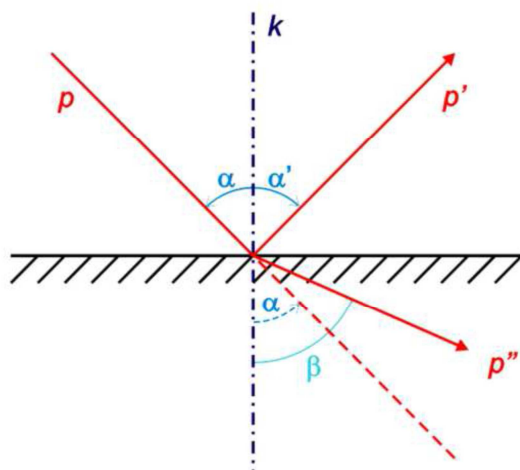
nemůže v bodě  $A$  samovolně zastavit a musí pokračovat do druhého prostředí a za dobu  $t_1$  se *rozšíří* do bodu  $C$ . Ve vzniklém trojúhelníku  $ABD$  najdeme úhel dopadu  $\alpha$  u vrcholu  $A$  a u vrcholu  $B$  je úhel lomu  $\beta$ . Navíc pokud si označíme rychlost světla  $v_1$  v prvním prostředí a ve druhém  $v_2$  pak získáme poměr vzdáleností a rychlostí. Z poměru zjistíme, že podíl  $\sin \alpha$  úhlu dopadu a  $\sin \beta$  úhlu lomu je roven podílu rychlostí, kterými se světlo šíří v prvním a druhém prostředí. Lomený paprsek zůstává v rovině dopadu.



Obr.4.29 Zákon lomu [29]

#### 4.5.2 Zákon odrazu

Zjednodušeně můžeme říct, že pokud světlo dopadá na rozhraní dvou prostředí pod úhlem  $\alpha$ , odrazí se pod úhlem  $\alpha'$ . Velikost úhlu odrazu  $\alpha'$  se rovná velikosti úhlu dopadu  $\alpha$ . ( $\alpha = \alpha'$ ) Paprsek, který prošel z prvního prostředí do druhého ( $p''$ ), nazýváme lomený paprsek a svírá s kolmicí dopadu úhel lomu  $\beta$ . Veškeré úhly dopadu, odrazu i lomu se odečítají ve směru od kolmice dopadu. Odražený paprsek leží v rovině dopadu.



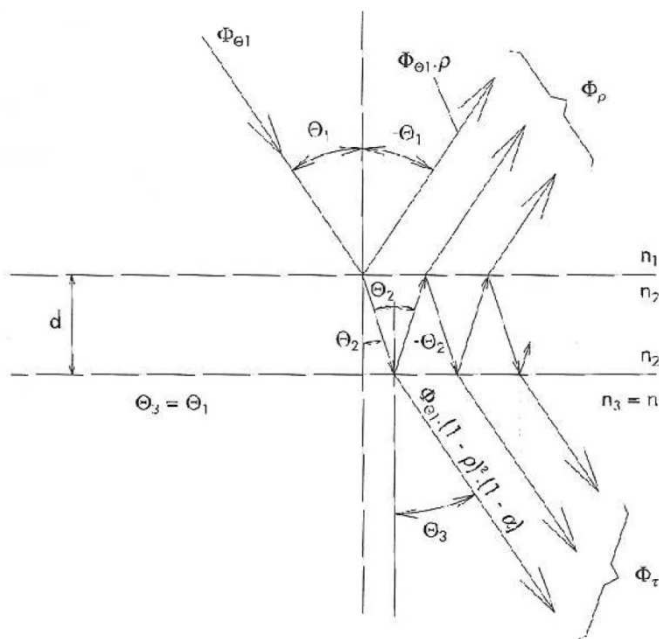
Obr.4.30 Zákon odrazu [29]

### 4.5.3 Prostup světla stavebními skly

Stavební sklo svými optickými vlastnosti ovlivňuje prostup denního světla z exteriéru do interiéru. Nejčastěji dochází k odrazu a lomu světla na rozhraní dvou různých optických prostředí, k absorpci světla uvnitř hmotného prostředí skla, rozptylu světla na rozhraní prostředí nebo ve hmotě skla, dvojlomu, polarizaci a interferenci.

#### 4.5.3.1 Přímý prostup jednovrstvým čirým sklem

Jednovrstvým čirým sklem světlo prostupuje skoro bez rozptylu. Částečný rozptyl můžeme zaznamenat z důvodu vnitřní nehomogenity a nedokonalosti povrchu. Ve výpočtech tento rozptyl zanedbáváme spolu s polarizací a interferencí. Množství světla, které pronikne sklem určíme pomocí činitele prostupu  $\tau$ . (Podíl prostupujícího světla a světla dopadajícího na povrch.) Projevuje se zde i závislost na odrazu světla na rozhraní vzduch-sklo a sklo-vzduch a na pohlcení světla sklem. Odraz světla závisí na úhlu dopadu a indexu lomu.

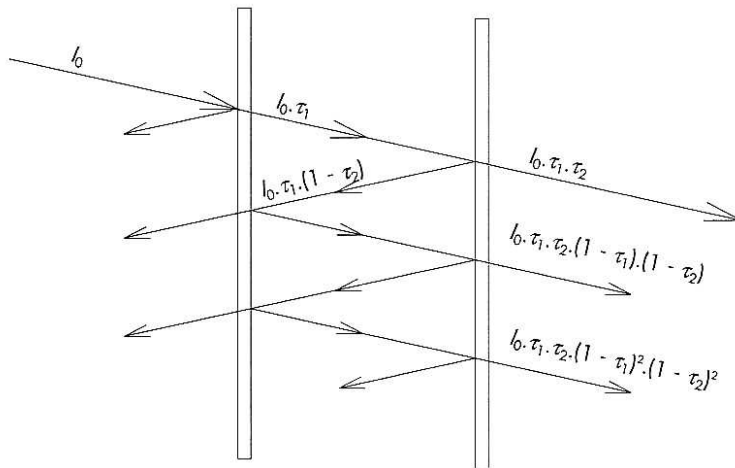


Obr.4.31 Odraz a prostup světla čirým sklem. [30]

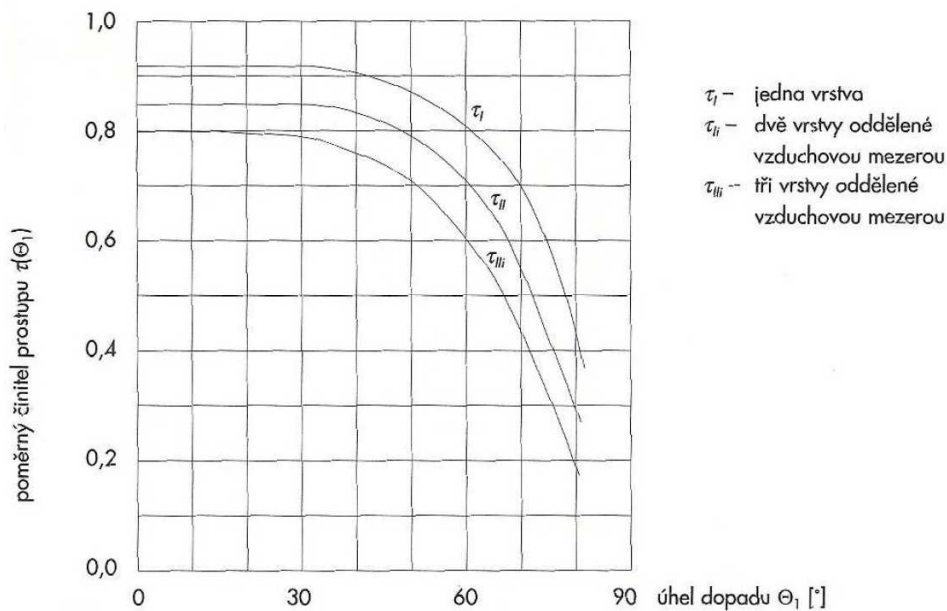
#### 4.5.3.2 Přímý prostup při dvojitým zasklení

V případě dvojitého zasklení, které se skládá ze dvou vrstev skel oddělených vzduchovou mezerou je prostup světla mnohem složitější než u jednoduchého zasklení, protože dochází k mnohonásobným odrazům mezi skly. Pro zjednodušení zde zanedbáváme pohltivost a uvažujeme, že obě vrstvy skel mají stejné optické vlastnosti.





Obr.4.32 Odraz a prostup světla přes dvojité zasklení. [30]



Obr.4.33 Závislost směrového přímého činitele prostupu světla. [30]

### 4.5.3.3 Tepelná zátěž okny

Tepelné zisky oken představují zisky oken konvekcí  $Q_{ok}$  a radiací  $Q_{or}$ . Výpočet tepelné zátěže okny je zde znázorněn dle normy ČSN 730548 Výpočet tepelné zátěže klimatizovaných prostorů.

#### 4.5.3.3.1 Prostup tepla oknem konvekcí

Prostup tepla konvekcí se určí pro plochu okna včetně rámu. Pro výpočet potřebujeme znát součinitel prostupu tepla okna.

$$Q_{ok} = U_o \cdot S_{ok} \cdot (t_{ev} - t_i) \quad [\text{W}] \quad (4.55)$$

kde je:

$U_o$	součinitel prostupu tepla okna [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ]
$S_{ok}$	plocha okna [ $\text{m}^2$ ]
$t_{ev}$	teplota vnějšího vzduchu pro danou hodinu [K]
$t_i$	teplota interiéru [K]

#### 4.5.3.3.2 Prostup tepla oknem radiací

Závisí zejména na úhlu dopadu slunečních paprsků a vlastnostech skla. Celková propustnost difuzní sluneční radiace standardního zasklení je stálá a nezávislá na poloze slunce.

#### Celková poměrná propustnost přímé sluneční radiace

$$T_D = 0,87 - 1,47 \left( \frac{\theta}{100} \right)^5 \quad [-] \quad (4.56)$$

kde je:  $\theta$  úhel mez normálou k oknu a slunečními paprsky [ $^\circ$ ].

#### Tepelné zisky okna radiací

$$Q_{or} = [S_{os} \cdot I_o \cdot c_o + (S_o - S_{os}) \cdot I_{odif}] \cdot s \quad [-] \quad (4.57)$$

kde je:

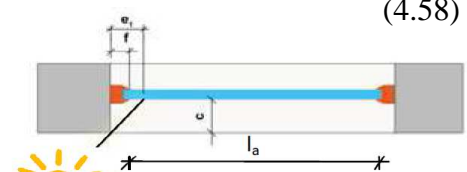
$I_o$	celková (globální) sluneční radiace procházející jednoduchým standardním zasklením [ $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ ]
$I_{odif}$	intenzita difuzní radiace procházející standardním jednoduchým zasklením [ $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ ]
$S_{os}$	osluňený povrch okna [ $\text{m}^2$ ]
$S_o$	plocha zasklení jednoho okna ( $S_o = 0,85 \cdot S_{ok}$ ) [ $\text{m}^2$ ]
$c_o$	korekce čistoty atmosféry (venkovská oblast: $c_o = 0,85$ )
$s$	stínící součinitel (vliv zasklení a stínících prostředků)

#### Osluňený povrch okna

$$S_{os} = [l_a - (e_1 - f)] \cdot [(l_b - (e_2 - g))] \quad [\text{m}^2] \quad (4.58)$$

kde je:

$l_a$	šířka zasklení [m]
$l_b$	výška zasklení [m]
$e_1$	vodorovný stín na okně [m]
$e_2$	svislý stín na okně [m]



Obr.4.34 Půdorys okna. [31]

## 5 KONTRUKČNÍ ŘEŠENÍ PLOCHÝCH STŘECH

V této kapitole popíší jednotlivé typy konstrukcí plochých střech, normové požadavky na tyto konstrukce a zaměřím se na materiály používané ve skladbách plochých střech.

### 5.1 Historie plochých střech

V našem klimatu mají ploché střechy poměrně krátkou tradici. Byly k nám přeneseny z oblastí s velmi mírným klimatem z jižní Evropy teprve na přelomu devatenáctého a dvacátého století, zejména v souvislosti s rozvíjející se výstavbou průmyslových hal a vícepodlažních průmyslových budov. Uplatnění plochých střech v našich drsnějších klimatických podmínkách tehdy umožnily nové materiály – zpočátku zejména povlakové izolace z dehtových nebo asfaltových lepenek s nezbytnými nátěry, později z natavitelných asfaltových pásů, nebo z hydroizolačních fólií. Při zvyšování nároků na tepelnou izolaci plochých střech se ve druhé polovině dvacátého století začal hromadně používat pěnový polystyren. K masivnímu rozšíření plochých střech v šedesátých letech dvacátého století napomohly u nás zejména tři důvody – jejich zdánlivá jednoduchost, snazší možnost zprůmyslnění s vysokou produktivitou práce a také jako významný prvek ovlivňující architektonický návrh moderních budov. [2]

### 5.2 Dělení plochých střech

Norma ČSN 73 1901:2011 „Navrhování střech – Základní ustanovení“ definuje ploché střechy jako střechy se sklonem vnějšího povrchu  $\alpha \leq 5^\circ$  (tj.  $\leq 8,75\%$ ).

**Ploché střechy lze rozdělit podle jejich technického provedení do dvou základních skupin:**

- střechy jednoplášťové
- střechy dvouplášťové (s větranou nebo nevětranou vzduchovou vrstvou), výjimečně se lze setkat se střechami tříplášťovými

#### 5.2.1 Jednoplášťové ploché střechy

Jednoplášťové ploché střechy jsou základním a v posledních desetiletích nejpoužívanějším druhem plochých střech. Norma ČSN 73 1901:2011 definuje jednoplášťovou střechu jako střechu zajišťující všechny její funkce jedním pláštěm. V nejjednodušším provedení ji tvoří vhodná nosná konstrukce ve sklonu a vodotěsná izolace, zpravidla se však používají s tepelnou izolací. [2]

### **Dle umístění tepelné izolace rozeznáváme:**

- jednoplášťové ploché střechy s klasickým pořadím vrstev
- jednoplášťové ploché střechy s opačným pořadím vrstev (tzv. obrácené střechy)
- jednoplášťové ploché střechy s kombinovaným pořadím vrstev (tzv. DUO)
- rekonstruovaná jednoplášťová plochá střecha s původní vyspravenou a s novou střešní krytinou (tzv. PLUS střecha)
- jednoplášťové ploché střechy kompaktní

#### **5.2.1.1 Jednoplášťové ploché střechy s klasickým pořadím vrstev**

Tepelnou izolaci může tvořit u jednoplášťových plochých střech s klasickým pořadím vrstev jak pěnový polystyren, tak výrobky z minerální vlny, z pěnového polyuretanu nebo z pěnového skla. V minulosti často tvořily tepelnou izolaci plochých střech i různé druhy lehčených betonů, heraklit, nebo dokonce i korek. [2]

#### **5.2.1.2 Jednoplášťové ploché střechy s opačným pořadím vrstev**

Tepelnou izolaci jednoplášťových plochých střech s opačným pořadím vrstev může tvořit jen extrudovaný polystyren XPS, který se volně pokládá na vodotěsnou izolaci. V tomto případě je stabilita střešního pláště vůči sání větru zajištěna jeho přitížením – stabilizační vrstvou zpravidla z drceného kameniva nebo z oblázků zrnitosti 16/32 mm o tloušťce min. 50 mm (dle statického výpočtu s ohledem na namáhání sáním větru), nebo provozním souvrstvím terasy (například dlažbou atp.) či střešní zahrady. [2]

V inverzní střeše se desky pokládají pouze v jedné vrstvě. Požadavek na tepelný odpor střechy, kterého nelze dosáhnout v jedné vrstvě XPS, se doporučuje splnit kombinováním jiné tepelné izolace pod hlavní vodotěsnicí vrstvou s XPS nad hlavní vodotěsnicí vrstvou. XPS musí být v inverzní střeše zabudován tak, aby vrstvy nad tepelněizolační vrstvou nezpůsobily kondenzaci vlhkosti v polystyrenu (zdrojem vodní páry je voda proniklá na hlavní hydroizolaci). [2].

#### **5.2.1.3 Jednoplášťové ploché střechy s kombinovaným pořadím vrstev**

Někdy se používá kombinace obou uvedených typů střech, tj. s umístěním tepelné izolace jak pod hydroizolací, tak na ní – tedy provedení tzv. DUO střechy. Zateplením nosné konstrukce minimalizuje její prochlazování podchlazenou dešťovou vodou (která se dostává pod tepelnou izolaci z extrudovaného polystyrenu), nebo u střech s provozním souvrstvím, kdy je extrudovaným polystyrenem min. tl. 50 mm zajištěno

roznášení bodového zatížení (např. od podložek pod dlažbou terasy nebo od nopové fólie u střešních zahrad). [2]

#### **5.2.1.4 Jednoplášťové ploché střechy s původní vyspravenou a s novou střešní krytinou**

U rekonstrukcí jednoplášťových plochých střech se uplatňují tzv. PLUS střechy, kdy je na stávající vyspravenou vodotěsnou izolaci střechy s klasickým pořadím vrstev položena nová dodatečná tepelná izolace s novou povlakovou vodotěsnou izolací (z asfaltových pásů nebo z hydroizolační fólie).

#### **5.2.1.5 Jednoplášťové ploché střechy kompaktní**

Nejvhodnějším podkladem pro kompaktní skladbu je silikátová monolitická nosná konstrukce napojená na přilehlé konstrukce s monolitickou spádovou vrstvou. Kompaktní skladbu lze vytvořit i na vrstvě z profilovaného plechu, který je ve spádu. Díky vlastnostem pěnového skla není nutné ve skladbě zřizovat samostatnou parotěsnicí vrstvu. [2]

### **5.2.2 Střechy dvouplášťové**

Dvouplášťovou plochou střechu definuje norma ČSN 73 1901:2011 jako střechu, zajišťující všechny funkce dvěma střešními pláštěmi (horní plášť s vodotěsnou izolací – dolní plášť s tepelnou izolací), mezi nimiž je vzduchová vrstva. Ve dvouplášťových střechách se však tepelná izolace z pěnového polystyrenu zpravidla nepoužívá. Se skladbou používanou u klasické jednoplášťové ploché střechy s povlakovou vodotěsnou izolací je možné se setkat i na šikmých střechách s velkými sklony, nebo na střechách se zakřivenými plochami. [2]

## **5.3 Zásady pro navrhování plochých střech**

**Návrh nové ploché střechy ovlivňují zejména tyto podmínky nebo požadavky:**

- druh nosné konstrukce,
- požadavek na provedení jednoplášťové nebo dvouplášťové střešní konstrukce,
- požadovaný sklon střešního pláště,
- požadavek na vytvoření sklonu povrchu jednoplášťové střechy,
- způsob odvodnění střechy,
- tepelně technické parametry vnitřního prostředí,

- tepelně technické parametry vnějšího vzduchu (ovlivněné umístěním objektu),
- požadavky na tepelně technické parametry střešního pláště,
- volba vhodné povlakové vodotěsné izolace (asfaltové pásy či hydroizolační fólie),
- požadavek na způsob provedení střešního pláště (lepené či mechanicky kotvené, nebo přitížené souvrství střešního pláště),
- požadavek na případné využití střešního pláště (klasická plochá střecha, provozní střecha využívaná jako terasa či střešní zahrada, nebo střecha jako parkoviště),
- požadavky požární bezpečnosti (požární odolnost střešní konstrukce).

### **Doporučené zásady návrhu plochých střech**

V souladu s požadavky normy ČSN 73 1901:2011 a na základě dlouhodobých zkušeností lze doporučit tyto zásady návrhu nové jednoplášťové ploché střechy:

- Nejspolehlivější je masivní nosná konstrukce střechy, která obvykle zajišťuje dostatečnou tepelnou akumulaci, a je zároveň spolehlivě vzduchotěsná.
- Minimální sklon ploché střechy norma ČSN 73 1901:2011 neurčuje. V zahraničí je doporučován jako minimální sklon 2 %, kaluže vody se obvykle netvoří při sklonu povrchu střechy nad 3 %.
- Parozábrana se umísťuje pod tepelnou izolaci, a pokud je na nosné konstrukci betonová spádová vrstva, umísťuje se na ni. Parozábrana musí zajišťovat i vzduchotěsnost střešního pláště – což je nezbytná podmínka jednoplášťových plochých střech s nosnou konstrukcí z dřevěného bednění nebo z trapézového plechu.
- Výběr vhodné parozábrany je nutno prověřit tepelně technickým výpočtem s přihlédnutím jak k vlastní realizaci její pokládky, tak ke způsobu provedení střešního pláště. Základním parametrem difúzních vlastností parozábrany je tzv. faktor difúzního odporu označovaný řeckým písmenem  $\mu$ . S ohledem na výběr vhodného výrobku, změny jeho parametrů v čase a standardní kvalitu pokládky na našich stavbách se však doporučuje snížit tuto hodnotu v tepelně technických výpočtech (zejména u mechanicky kotvených střešních pláštů) až 10krát.
- Jako tepelnou izolaci jednoplášťových plochých střech je dnes možné použít celou řadu velmi kvalitních výrobků na bázi pěnového či extrudovaného polystyrenu, minerální vlny, pěnového polyuretanu PIR či pěnového skla. Je jen nutné přihlídnout ke způsobu zabudování tepelné izolace, k jejímu namáhání v tlaku (zejména u provozních střech), k případným požadavkům na požární odolnost střešního pláště a samozřejmě k ceně tepelné izolace.
- Jako vodotěsnou izolaci lze samozřejmě použít celou řadu vhodných výrobků – jako jsou hydroizolační pásy z modifikovaného asfaltu nebo různé druhy

hydroizolačních fólií nabízených řadou výrobců na našem trhu. S výběrem konkrétní vodotěsné izolace souvisí i způsob její pokládky, který má často vliv i na parametry a provedení střešního pláště.

- Výška atiky má být v souladu s požadavky ČSN 73 1901:2011 nejméně 150 mm nad úrovní povrchu střechy, u střech s provozním souvrstvím je tedy ovlivněna výškou tohoto souvrství.
- Odvodnění plochých střech je zajišťováno v návaznosti na jejich tvar a provedení nejčastěji vnitřními vtoky nebo podokapními žlaby. Pokud je odvodnění zajišťováno vnitřními vtoky, měla by být jedna vnitřně odvodňovaná plocha střechy odvodněna vždy nejméně dvěma vtoky nebo vtokem a bezpečnostním přepadem. Dimenzování profilu a počtu vtoků nebo návrh profilu podokapních žlabů závisí na odvodňované ploše střechy v návaznosti na platné technické normy. Zaatikové a mezistřešní žlaby by se měly používat jen výjimečně.

## 5.4 Materiály používané ve skladbách plochých střech

V této subkapitole se zaměřím hlavně na materiálové charakteristiky a požadavky tepelných izolací používaných u skladeb plochých střech a na běžně používané povlakové hydroizolace. U ostatních používaných materiálů zmíním pouze základní materiálové charakteristiky, umístění v rámci skladby ploché střechy a jejich zabudování.

### 5.4.1 Tepelně izolační materiály

#### Definice tepelných izolací

Za tepelně izolační materiály jsou považovány všechny hmoty, které mají měrnou tepelnou vodivost v suchém stavu pod  $0,175 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . Tepelná vodivost izolačních materiálů se stoupající vlhkostí silně stoupá, a proto je nutné, aby tyto materiály byly stále co nejsušší. Velmi dobré jsou ty materiály, které jsou nenasákavé a během výroby, zabudování a během používání nepřijmou vlhkost. Materiály, které jsou vyráběny mokrou cestou (malty, betony), se musí ihned po zabudování nechat řádně vyschnout. V opačném případě by hrozil pokles tepelně izolačních vlastností. V běžných podmínkách však žádný materiál nevyschne úplně, vždy zůstane ve stavu tzv. ustálené vlhkosti a jeho tepelně izolační vlastnosti jsou horší, než se zjišťuje na vysušených vzorcích [1].

## Dělení tepelných izolací

Podle vlastního materiálu se tepelně izolační výrobky dělí na:

- lehké silikátové hmoty – lehká kameniva a lehké betony,
- pěnové anorganické hmoty – pěnové sklo,
- pěnové organické hmoty – pěnové plasty,
- vláknité hmoty – skleněná a minerální vlákna,
- tepelné izolanty z organického materiálu – celulóza, konopí, sláma, korek,
- vakuové izolace.

## Požadavky na tepelné izolace

Na úvod je třeba zmínit základní současně platné legislativní předpisy pro oblast stavebních tepelně izolačních materiálů. Tyto předpisy upravují požadavky na konstrukce i jednotlivé stavební materiály a jejich dodržování je všeobecně povinné. Materiál, nevyhovující daným požadavkům, nesmí být uveden na trh. Na jejich základě lze usuzovat na vlastnosti, které od izolačních materiálů budeme požadovat. Kromě základních požadavků na hygienickou nezávadnost a požární bezpečnost jsou to zejména na požadavky tepelně izolační vlastnosti a s ohledem na aplikaci v konstrukcích také vlastnosti mechanické.

## Legislativní předpisy v ČR pro oblast stavebních izolačních výrobků

Základními předpisy jsou jednotlivé zákony, jejichž obecné znění je dále specifikováno v souvisejících vyhláškách, případně nařízeních vlády. Konkrétní technické požadavky na výrobky obvykle nalezneme v příslušných technických normách. Jejich dodržování je pouze doporučeno, pokud se však na jejich znění odkazují zákony, vyhlášky či nařízení vlády, získávají statut těchto předpisů, tedy stávají se závaznými. Zmíněné normy nazýváme normami požadavkovými. Normy výrobkové jsou závazné například při výrobkové certifikaci. Dále specifikují požadavky na výrobky, upřesňují jejich specifické vlastnosti, označování jednotlivých parametrů apod. Posledním typem jsou normy zkušební, ve kterých nalezneme postup pro stanovování jednotlivých vlastností stavebních materiálů. Následuje výčet základních legislativních předpisů, postihujících zkoumanou problematiku, s citacemi nejvýznamnějších pasáží.

**Zákon č. 183/2006 Sb., o územním plánování a stavebním řádu (stavební zákon) ve znění pozdějších předpisů je základním předpisem** pro všechny činnosti týkající se stavebnictví, tudíž i pro výrobu stavebních hmot a určování požadovaných vlastností výrobků pro užití ve stavebních konstrukcích. V § 156 - Požadavky na stavby se hovoří o tom, že pro stavbu mohou být navrženy a použity jen takové výrobky, materiály a



konstrukce, jejichž vlastnosti zaručují, že stavba při správném provedení a běžné údržbě po dobu předpokládané existence splní požadavky. [33]

Definované požadavky jsou uvedeny ve **Vyhláše č. 268/2009 Sb. o technických požadavcích na stavby** (novelizovaná Vyhláškou č. 20/2012 Sb.), v § 8 - Základní požadavky. Jsou to:

- a. mechanická odolnost a stabilita,
- b. požární bezpečnost,
- c. ochrana zdraví, zdravých životních podmínek a životního prostředí,
- d. ochrana proti hluku,
- e. bezpečnost při užívání,
- f. úspora energie a ochrana tepla.

**Zákon č. 22/1997 Sb. o technických požadavcích na výrobky a o změně a doplnění některých zákonů ve znění pozdějších předpisů** patří k základním předpisům v oblasti stavební výroby. Definuje technické předpisy a technické normy, upravuje postup při certifikaci, akreditaci a autorizaci a popisuje postup při posuzování shody a uvádění na trh u tzv. stanovených výrobků. Těmi jsou podle § 12 výrobky, které představují zvýšenou míru ohrožení oprávněného zájmu (převážná většina stavebních výrobků). [11] Prováděcím předpisem tohoto zákona je Nařízení vlády č. 163/2002 Sb., kterým se stanoví technické požadavky na vybrané stavební výrobky (ve znění Nařízení vlády č.312/2005 Sb.). [42]

## **A. Požadavky tepelně izolační**

Abychom mohli definovat požadavky na tepelně izolační materiály, je třeba nejprve definovat tepelně technické požadavky na stavební konstrukce. Dle ČSN 73 0540-2 [33] musí konstrukce splňovat požadavek na maximální hodnotu součinitele prostupu tepla  $U$ . Je to veličina, udávající míru tepelné výměny v ustáleném stavu mezi dvěma prostředími s rozdílnou teplotou, oddělenými vyšetřovanou konstrukcí. Norma rozlišuje jednak hodnoty požadované, tedy hodnoty, zajišťující minimální tepelně technické vlastnosti konstrukce z hlediska její bezproblémové funkčnosti při užívání (těchto hodnot musí dle zákona 406/2000 Sb. ve znění pozdějších předpisů dosahovat veškeré nově zhotovované stavební konstrukce), a dále hodnoty doporučené, které zajišťují nadstandardní, technicky možnou a ekonomicky přijatelnou úroveň (viz příloha A). Dodržení těchto relativně přísných hodnot je bezpodmínečně nutným prvním krokem při návrhu a realizaci budov v pasivním standardu.

Základními veličinami, ovlivňujícími hodnotu součinitele prostupu tepla stavební konstrukcí, jsou tloušťka stavebního materiálu a jeho tepelná vodivost, reprezentovaná

součinitelem tepelné vodivosti  $\lambda$ . Z logiky věci vyplývá, že při nižší tepelné vodivosti materiálu postačí jeho menší tloušťka a naopak.

Vzhledem k tomu, že tepelná vodivost materiálu je při neměnných okrajových podmínkách konstantní, je jediným způsobem, jak snížit hodnotu součinitele prostupu tepla daným materiálem, zvětšení tloušťky tepelně izolační vrstvy. Tyto tloušťky mohou někdy dosahovat až extrémních hodnot. Například pro zmiňované pasivní domy se doporučuje cca 200 – 250 mm tepelné izolace v podlaze na terénu, 350 mm ve stěnách a 400 mm ve střeše. [33]

## **B. Požadavky na mechanické vlastnosti**

Základním požadavkem na stavební konstrukce, potažmo materiály, je dle vyhlášky č. 268/2009 Sb. mechanická odolnost a stabilita. Ačkoli tepelně izolační materiály jsou pouze zřídka materiály nosnými, určité zatížení obvykle přenášet musí, ať již je to zatížení od vlastní váhy, podlahové konstrukce či fasádního systému. Proto také s ohledem na plánovanou aplikaci těchto materiálů existuje celá řada zkušebních postupů, podrobujících materiály různému druhu zatížení v různých směrech. Každý z nich je samozřejmě zakotven v příslušné zkušební normě. Jsou to například zkouška ohybem (ČSN EN 12089), zkouška smykem (ČSN EN 12090), stanovení pevnosti v tahu v rovině desky (ČSN EN 1608) či stanovení odolnosti při bodovém zatížení (ČSN EN 12430). Pro obvyklou aplikaci vláknitých materiálů mají však největší význam stanovení napětí v tlaku při 10% deformaci (ČSN EN 826) a stanovení pevnosti v tahu kolmo k rovině desky (ČSN EN 1607).

### **B.1. Napětí v tlaku při 10% deformaci**

Napětí v tlaku stanovíme dle ČSN EN 826 [17] tak, že pravoúhlý zkušební vzorek tvaru kvádru zatěžíme danou rychlostí kolmo na jeho větší rovnoběžné povrchy tlakovou silou za současného zaznamenávání poměrného stlačení:

- a. do porušení (dosažení meze tečení materiálu) a určíme příslušnou deformaci, pokud je menší než 10 %, výsledkem je pevnost v tlaku,
- b. pokud nenastane porušení do okamžiku 10% deformace.

Současně se zatěžováním zaznamenáváme pracovní diagram materiálu. Výslednou pevnost v tlaku či napětí při 10% stlačení poté stanovíme jako podíl stanovené síly a původní zatěžovací plochy tělesa. Všechna přetvoření pro výpočet poměrného stlačení měříme od tzv. bodu nulové deformace, který získáme z pracovního diagramu prodloužením lineární nejstrmější části jeho křivky k ose procházející počátkem. Tato veličina je velice důležitá pro aplikaci izolačních materiálů do plovoucích podlah, popisuje

totiž chování materiálu při stlačení a jeho schopnost vzdorovat zatížení od nášlapné vrstvy a zatížení provoznímu.

## **B.2. Pevnost v tahu kolmo k rovině desky**

Pevnost kolmo k rovině desky stanovíme dle ČSN EN 1607 [48] jako podíl největší tahové síly, naměřené v průběhu tahového namáhání kolmo k povrchu výrobku a průřezové plochy zkoušeného vzorku, tvaru kolmého hranolu.

U vláknitých izolačních materiálů se jedná v podstatě o odpor proti rozvláknění a následnému odtržení horních vláknitých vrstev. V praktické aplikaci vyjadřuje například maximální hmotnost fasádního systému, kterou je materiál schopen přenést.

## **C. Požadavky na požární odolnost**

Obdobně jako při hodnocení požadavků tepelně izolačních, také v případě požární bezpečnosti musíme nejprve stanovit požadavky na stavební konstrukci. Dle normy ČSN 73 0810 [49] označujeme jako požární odolnost konstrukce dobu v minutách, po kterou posuzovaná konstrukce splňuje charakteristické vlastnosti – mezní stavy (např. nosnost, celistvost, tepelná izolace, hustota tepelného toku, kouřotěsnost, apod.). Dalším faktorem je druh konstrukční části. Na základě těchto kritérií dále norma rozděluje jednotlivé stavební materiály podle jejich hořlavosti do sedmi tříd reakce na oheň (A1, A2, B, C, D, E a F). Zabudovávané materiály musí vykazovat odpovídající třídu reakce na oheň (nebo být odpovídajícím způsobem chráněny), aby hotová konstrukce splňovala požadavky na požární odolnost podle svého druhu.

Klasifikací stavebních výrobků podle reakce na oheň se zabývá ČSN EN 13 501-1. [20] Odkazuje se na několik dalších zkušebních norem. V první řadě se jedná o ČSN EN ISO 11925-2 – zkouška malým zdrojem plamene. Pokud materiál po zkoušce nevyhoví v normě uvedeným parametrům, je zařazen do třídy F – hořlavé, v opačném případě do třídy E. O zařazení do vyšších skupin D, C či B se dále rozhoduje dle ČSN EN 13823 – vystavení tepelnému účinku jednotlivého hořícího předmětu. Materiály nehořlavé (tedy zařazené do třídy A2 či A1) musí splňovat stejné požadavky jako materiály třídy B, navíc se však ještě přidávají požadavky ČSN EN ISO 1182 – zkouška nehořlavosti a ČSN EN ISO 1716 – stanovení spalného tepla.

### **5.4.1.1 Pěnový expandovaný polystyren EPS**

Pěnový expandovaný polystyrén (EPS), je stále nejrozšířenějším tepelným izolantem, bez něhož není v současné době možné energeticky hospodárné stavění. Izolační desky z pěnového polystyrénu si v průběhu uplynulých několika desítek let získaly na stavbách své pevné místo. Pěnový polystyrén se dá lehce zpracovat, má výborné

tepelně izolační vlastnosti a je cenově dostupný. Aby bylo možné pěnový polystyren optimálně využít, je nutná znalost jeho vlastností, které jsou blíže popsány v následujících podkapitolách[51][52].

#### **5.4.1.1.1 Obecně o pěnových organických hmotách**

Možnost zpěňování některých plastů poskytla stavebnictví obrovské možnosti při jejich použití jako tepelně izolačních materiálů. Proti hutným plastům s objemovou hmotností kolem 1000 kg/m<sup>3</sup> se napěněním běžně dosahuje objemové hmotnosti pouze 15 až 30 kg/m<sup>3</sup>, již odpovídá pórovitosti 97 až 98 %. Protože technologické napěňovací postupy lze řídit tak, že se vytváří rovnoměrná pórovitá struktura s vhodnou velikostí pórů, jsou tyto materiály z hlediska tepelně izolační funkce bez konkurence [53]. Obecnou nevýhodou pěnových plastů bývá však hořlavost, nízká odolnost teplotě, objemové změny, někdy též otevřená pórovitost způsobující velkou nasákavost. Plasty jsou také málo odolné některým agresivním látkám, zvláště z oboru organické chemie, některé jsou málo odolné mikroorganismům a při jejich zpracování nebo i využívání se v některých případech uvolňují zdraví škodlivé anebo korozivní látky [51]. Pěnové plasty lze vyrobit z materiálů termoplastických i termosetických. Pěnové plasty vyráběné napěněním termosetů jsou déle známé, obecně levnější a snáze vyrobitelné.

Většinou však mají otevřené póry a jsou tedy silně nasákavé, mají nízkou pevnost, poměrně velké objemové změny, menší životnost a bývají i větším nebezpečím z hlediska zdravotní zavadnosti a koroze. Proto v poslední době jednoznačně převládají pěnové plasty z hmot termoplastických. Průmyslově je zvládnuta výroba pěnového PVC, pěnového polyethylénu, pěnového polyuretanu a pěnového polystyrenu [51] [53].

#### **5.4.1.1.2 Surovina**

Základní surovinou pro výrobu pěnového polystyrenu je zpěňovatelný polystyrén ve formě perli, obsahujících zpravidla 6–7 % nadouvadla. Perle se vyrábějí suspenzní polymerací monomeru styrenu a jsou dodávány výrobcům pěnového polystyrenu v několika velikostních skupinách od 0,3 do 2,8 mm, v závislosti na konkrétním použití.

Styren i pentan jsou látky, které se běžně vyskytují v přírodě – styren lze nalézt i v mnoha potravinách a pentan se v přírodě vytváří ve značném množství na příklad v zažívacích systémech zvířat nebo při rozkladu rostlinného materiálu působením mikroorganismů. Obě tyto látky se pro průmyslové využití vyrábějí z ropy [52].

### **5.4.1.1.3 Výroba**

Výroba pěnového polystyrénu probíhá v zásadě ve třech stupních:  
o předpěnění,  
o meziuskladnění,  
o výroba bloků, desek a tvarovek.

#### **A. Předpěnění**

Zpěňovatelný polystyrén se předpěňuje za pomoci syté vodní páry v předpěňovacích zařízeních. Při tomto procesu granule zvětší svůj objem na dvacet až padesáti násobek původního objemu. Výslednou sytnou hmotnost udává teplota vodní páry a doba jejího působení na perle. Tato sytná hmotnost musí být stejná jako požadovaná objemová hmotnost vyráběného EPS. Ta se zpravidla pohybuje mezi 10 a 35 kg/m<sup>3</sup> a má velký vliv na většinu vlastností konečného výrobku [52].

#### **B. Meziuskladnění**

Tento proces probíhá v provzdušňovaných sílech. V čerstvě vypěněných perlích se totiž během chlazení vytvoří podtlak, způsobující vysokou citlivost perlí na mechanické poškození a znemožňující jejich bezprostřední další zpracování. Difusí vzduchu do buněk perlí se podtlak vyrovnává, perle získávají větší mechanickou pružnost a zlepšuje se jejich další zpracovatelnost. Perle se současně i suší [52].

#### **C. Výroba bloků, desek a tvarovek**

Předpěněné a vyzrálé perle nyní mohou být různými způsoby zpracovány na konečné výrobky [52]. Jsou to především:

- výroba bloků, následně řezaných na desky (tepelně izolační, drenážní, elastifikované proti kročejovému hluku)
- výroba jednotlivých tvarovek pomocí automatů na výrobu tvarovaných dílců (desky perimetr, obaly, tvarovky pro ztracené bednění a podobně)

### **5.4.1.1.4 Vlastnosti pěnového polystyrénu**

V následujících subkapitolách uvedu některé vlastnosti pěnového polystyrénu, které mají vliv na zkoumanou problematiku. V příloze A.1 a A.2 uvádím nejdůležitějších deklarovaných vlastností střešních tepelně izolačních desek z bílého a šedého EPS .

## A. Teplotní odolnost EPS při vysokých teplotách

Významným rozdílem mezi jednotlivými druhy polystyrenu je hodnota jejich maximálního tepelného namáhání. Nejpoužívanější bílý pěnový polystyren EPS má hodnotu maximálního tepelného namáhání +80 °C, pro šedý EPS se zpravidla uvádí hodnota +70 °C, typická hodnota pro extrudovaný polystyren XPS je +75 °C (existují však i typy XPS s hodnotou +105 °C). Ve svých důsledcích to znamená, že ani šedý EPS ani běžný extrudovaný XPS nelze spolehlivě používat na klasických jednoplášťových plochých střeších bezprostředně pod povlakovou vodotěsnou izolací, protože její povrchová teplota může v létě dosáhnout +80 °C (při vyšší tepelné expozici dochází k nezvratným změnám a poškození těchto tepelně izolačních materiálů). Pokud by se ale mimořádně použily na vytvoření tepelné izolace výrobky z polystyrenu s uvedenou nižší teplotní odolností zabudované bezprostředně pod vodotěsnou izolací – například extrudovaný pěnový polystyren XPS v některých speciálních případech více zatížených jednoplášťových plochých střeš s provozním souvrstvím teras (například s dlažbou) nebo střešních zahrad, je nutné zvážit i významná rizika vyplývající z postupu stavebních prací před vlastním provedením provozního souvrství – které potom chrání vlastní střešní plášť před vyššími teplotami.

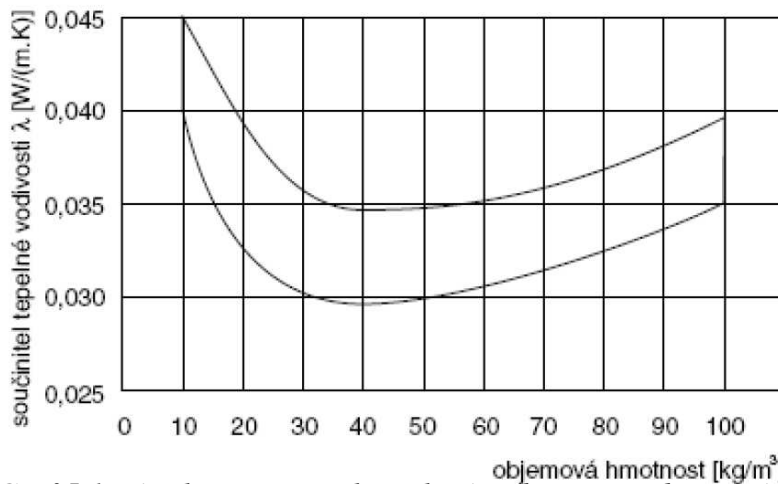
Speciálním případem namáhání polystyrenu vysokou teplotou jsou části střešního pláště těsně přiléhající k proskleným plochám, od kterých se sluneční záření odráží a zvyšuje tak tepelnou zátěž střešního pláště. Jedná se například o balkonové dveře, prosklená střešní atria, liniové světlíky apod. V částech střešy přiléhajícím k těmto plochám (do vzdálenosti cca 1 m od skel, nebo lesklých povrchů) se vyskytovaly pod povlakovou vodotěsnou izolací poruchy i bílého EPS způsobené vysokou teplotou. Z tohoto důvodu je třeba již v projektu navrhnout v těchto místech vhodná opatření proti možnému zvýšenému teplotnímu namáhání (například násyp z kačírku, dlažbu apod.). [52].

## B. Tepelná vodivost

Vynikající tepelně izolační vlastnosti EPS spočívají v tom, že jeho struktura je tvořena mnoha uzavřenými buňkami tvaru mnohostěnu, obsahujícími vzduch, který má, jak známo, pouze nepatrnou tepelnou vodivost. Pěnová hmota se skládá asi ze 2 % polystyrenu a 98 % vzduchu. Skutečnost, že buňky obsahují vzduch, způsobuje, že se tepelně izolační vlastnosti EPS s časem nezhoršují jako u řady jiných pěnových hmot, obsahujících jiné plyny [52].

### B.1. Závislost tepelné vodivosti na objemové hmotnosti

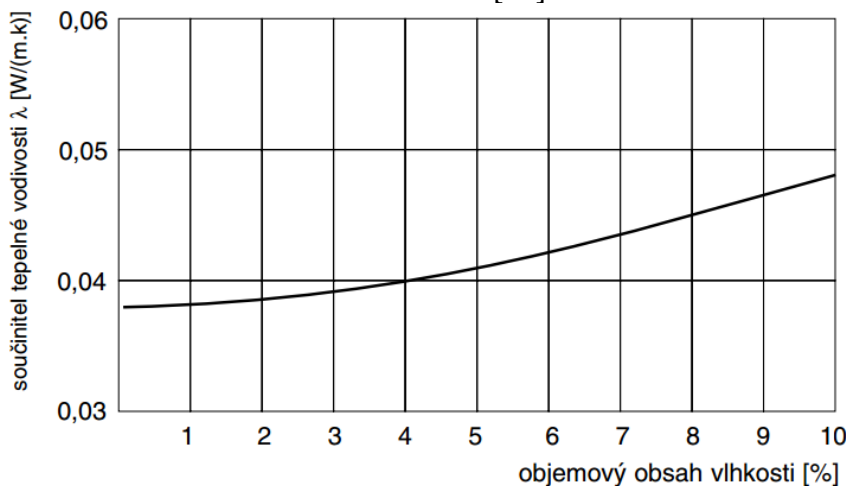
Součinitel tepelné vodivosti závisí kromě jiného na objemové hmotnosti. Nejnižší součinitel tepelné vodivosti je při objemové hmotnosti mezi 30 a 50 kg/m<sup>3</sup>, směrem k nižším i vyšším objemovým hmotnostem součinitel stoupá - viz *Graf 5.1*. Protože se v praxi používá EPS v rozsahu objemových hmotností 8 až 40 kg/m<sup>3</sup>, znamená to, že se vzrůstající objemovou hmotností součinitel tepelné vodivosti klesá [52].



*Graf 5.1* Závislost součinitele tepelné vodivosti na objemové hmotnosti EPS [52].

### B.2. Závislost tepelné vodivosti na vlhkosti

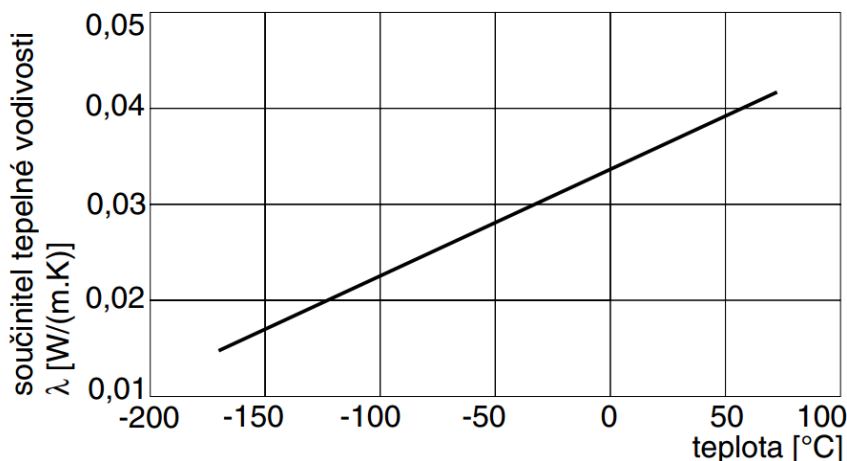
Na součinitel tepelné vodivosti EPS má vliv obsah vlhkosti. S každým objemovým % obsahu vlhkosti roste tepelná vodivost o 3 - 4 % (měřeno na zkušebních tělesech o objemové hmotnosti 16kg/m<sup>3</sup>). Tato závislost nemá pro praxi žádný význam, protože praktický obsah vlhkosti správně instalovaných polystyrenových desek je zohledněn ve výpočtové hodnotě součinitele tepelné vodivosti. Jak je uvedeno v text, nasákovost při dlouhodobém ponoření nepřesahuje 5 %. Z toho je zřejmé, že i když je v důsledku havárie izolace z EPS vystavena trvalému působení zatékání nebo kondenzující vody, její tepelně izolační vlastnosti se zásadně nenižují. [52]



*Graf 5.2* Závislost součinitele tepelné vodivosti na objemové vlhkosti EPS [52].

### B.3. Závislost tepelné vodivosti na teplotě

Naměřené hodnoty součinitele tepelné vodivosti EPS v závislosti na teplotě, měřeno na zkušebních tělesech o objemové hmotnosti  $20 \text{ kg/m}^3$ . [52]



Graf 5.3 Závislost součinitele tepelné vodivosti na teplotě pěnového polystyrénu EPS [52].

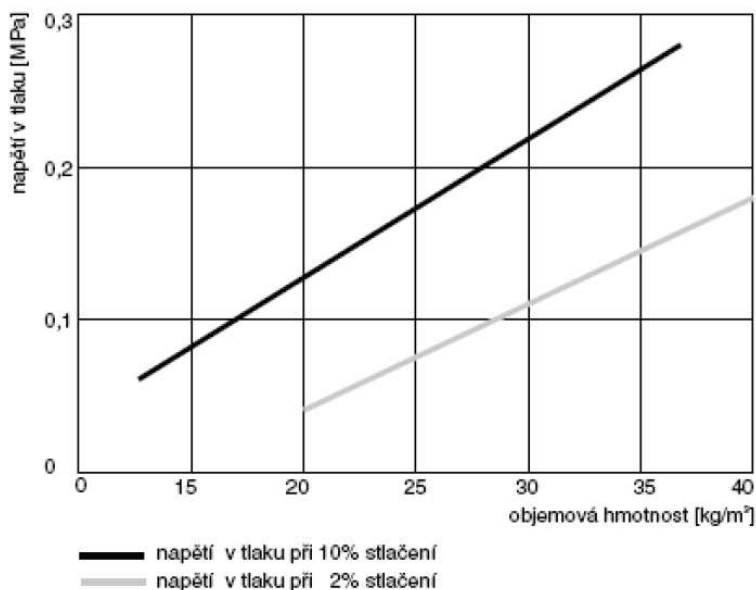
### C. Tvarová stabilita

Maximálně přípustné teploty pro použití pěnového polystyrenu závisí stejně jako u všech termoplastů na době a na velikosti působících teplot. Bez dodatečného mechanického zatížení snese pěnový polystyren krátkodobé teploty do  $100^\circ\text{C}$ . Vlivem nepatrné tepelné vodivosti polystyrenu zůstává hloubka průniku vysokých teplot relativně malá, což působí tím příznivěji, čím má EPS větší tloušťku. Pokud je mechanicky zatěžován, pak činí jeho dlouhodobá teplota pro použití v závislosti na objemové hmotnosti mezi  $75^\circ\text{C}$  a  $80^\circ\text{C}$ . Pěnový polystyren je materiál, u něhož nedochází za teplot mezi  $80^\circ\text{C}$  a  $-180^\circ\text{C}$  k žádným podstatným změnám struktury, proto mu nevádí ani velice nízké teploty pro trvalé využití [52].

### D. Pevnost v tlaku a tahu za ohybu

Důležitou vlastností EPS je jeho pružná a trvalá deformace při zatížení tlakem. Měřítkem toho je napětí v tlaku, potřebné ke stlačení zkušebního vzorku o 2 %, nebo o 10 %. Jako základní údaj o schopnosti EPS odolávat působení tlaku se používá hodnota napětí v tlaku při 10% stlačení, měřená dle ČSN EN 826. Hranice pružné deformace EPS je dosaženo při stlačení o 2–3 %, takže hodnota napětí při 2% stlačení udává maximální zatížení tlakem, pro které se materiál po odlehčení vrátí na původní rozměr. Jak napětí při 2%, tak při 10% stlačení roste se vzrůstající objemovou hmotností téměř lineárně - viz Graf 5.4 [52].





Graf 5.4 Vliv objemové hmotnosti na pevnost v tlaku při 2 % a 10 % zatížení [52].

Další důležitou mechanickou vlastností je pevnost v ohybu, stanovovaná podle ČSN EN 12089, důležitá pro manipulaci a zpracování desek EPS a dále pevnost v tahu kolmo k rovině desky, která se měří dle ČSN EN 1607 a je velmi důležitá při použití EPS ve fasádních zateplovacích systémech. Obě tyto vlastnosti rovněž rostou s objemovou hmotností [52].

## E. Dynamická tuhost

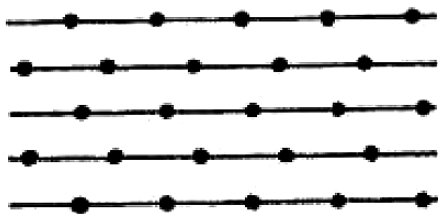
Desky z EPS mají ve srovnání s jinými izolačními materiály díky své buněčné struktuře značnou tuhost. Tato vlastnost je výhodná u aplikací, kde je vyžadována minimální deformace při zatížení, avšak stává se nevýhodou v případech, kdy jsou vyžadovány zvukově izolační vlastnosti, jako je útlum kročejového hluku u plovoucích podlah nebo vzduchová neprůzvučnost u fasád. V těchto případech je naopak žádoucí nízká dynamická tuhost. Dynamická tuhost se měří podle ČSN EN 29052-1 a závisí na tloušťce desky a na typu EPS [52].

Tloušťka mm	Dynamická tuhost MN / m³	Tepelný odpor m²K / W
15	≤30	0,33
20	≤20	0,44
25	≤15	0,55
30	≤15	0,66
35	≤10	0,77
40	≤10	0,88

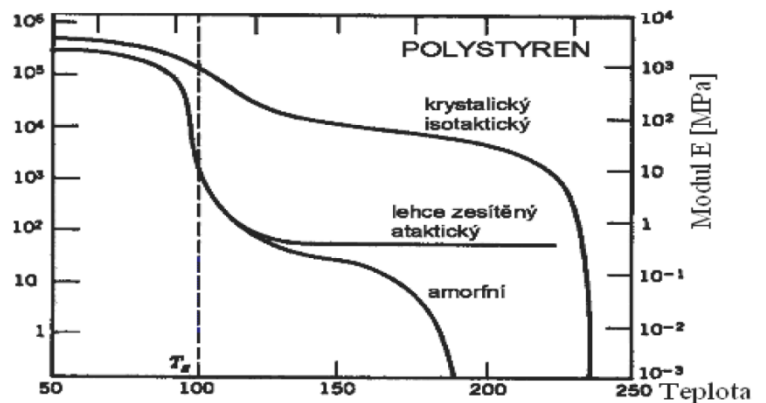
Tabulka 5.1 Závislost dynamické tuhosti EPS na tloušťce desky [52].

## F. Závislost mechanických vlastností EPS na teplotě

Mechanické vlastnosti pěnového expandovaného polystyrenu, při změně teploty, jsou zcela závislé na chování samotného polystyrenu. Polystyren se řadí mezi lineární polymery (termoplasty) s amorfni strukturou, které mají nezasířované molekuly. Při zahřívání měknou a jsou vratně neformovatelné. Existuje výrazná závislost mechanických vlastností termoplastů na teplotě (Obr.5.2). Teplota, při které dochází k výrazné ztrátě mechanických vlastností, se nazývá teplota skleného přechodu  $T_g$ , která činí u PS +90 °C.

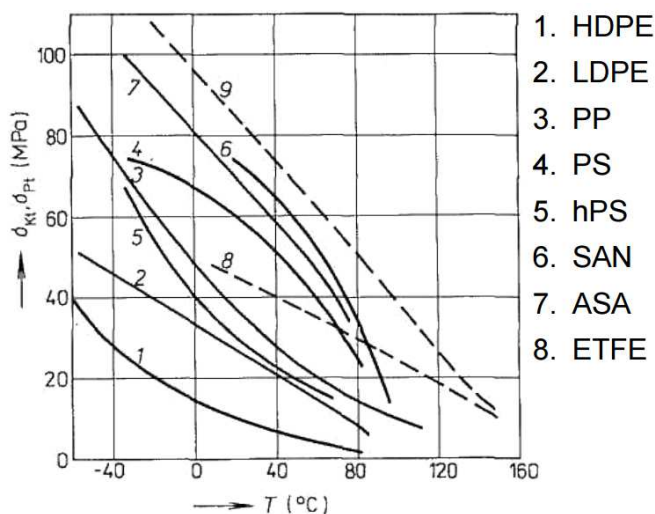


Obr. 5.1 Struktura lineárních termoplastů[52]

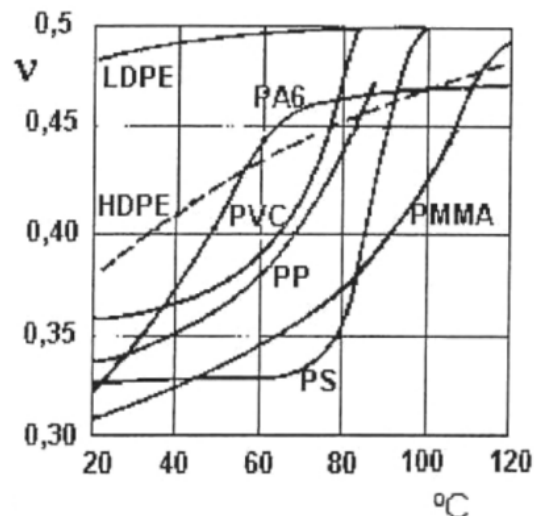


Obr.5.2 Závislost mechanických vlastností PS na teplotě [52]

Směrem k nižším teplotám u plastů obecně vzrůstá pevnost a klesá tažnost. Závislost krátkodobé meze pevnosti resp. kluzu na teplotě pro některé typy plastů jsou uvedeny níže na Obr. 5.3. Specifičnost v chování polystyrenu je výrazná závislost elastických konstant na teplotě. S rostoucí teplotou se obecně modul pružnosti snižuje, Poissonovo číslo naopak vzrůstá. Příklady těchto závislostí jsou uvedeny níže na Obr.5.4.



Obr. 5.3 závislost krátkodobé meze pevnosti termoplastů pevnosti na teplotě [52]



Obr. 5.4 závislost poissonova čísla termoplastů na teplotě [52]

## G. Změny rozměrů EPS

### G.1. Změna rozměrů vlivem dodatečného smrštění

Jako dodatečné smrštění se označuje kontrakce EPS působením zbytkového vnitřního pnutí v materiálu po jeho vypěnění. Tato dodatečná změna rozměru dosahuje celkem asi 0,2–0,4 % a závisí na technologických podmínkách při výrobě a na typu materiálu. Zpočátku probíhá rychle, pak stále více odeznívá, až se zastaví na konečné hodnotě rozměru. Větší část těchto změn proběhne ve výrobním závodě ještě před řezáním desek, takže desky opouštějící závod vykazují minimální změnu rozměrů [52].

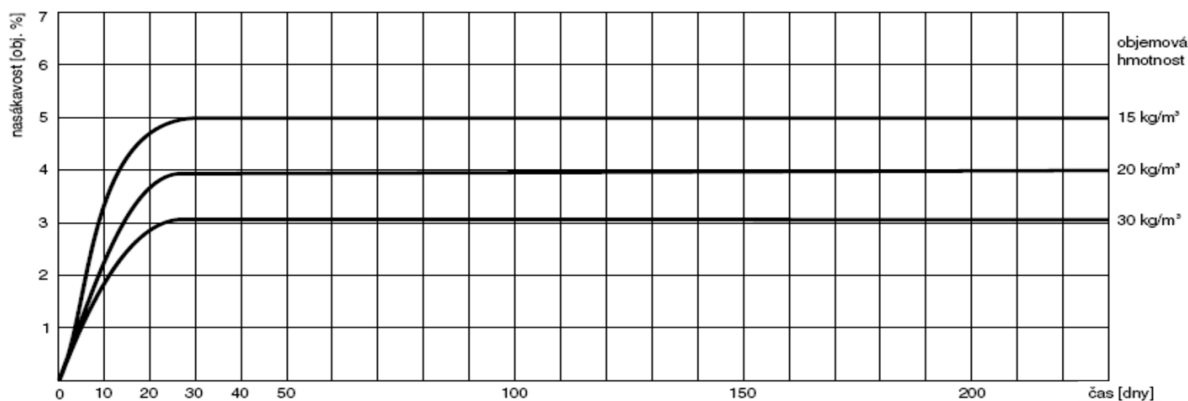
### G.2. Změna rozměrů vlivem teploty

Koeficient teplotní roztažnosti pěnového polystyrenu činí  $(50 - 70) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . Na teplotní roztažnost je třeba brát zřetel především při kotvení větších souvislých ploch jako jsou rozměrné střechy a fasády domů. Kotvení musí přenést smykové síly vzniklé teplotní roztažností tak, aby se roztažnost desek projevila pouze deformací buněčné struktury [52].

Z důvodů velkého kolísání povrchových teplot tepelné izolantu plochých střech a vzhledem k relativně veliké hodnotě koeficientu teplotní roztažnosti se tepelné izolace z EPS provádějí zásadně jako vícevrstvé, aby nedocházelo ke vzniku tepelných mostů. Jednovrstvé provedení je možné pouze v případě použití desek z EPS s polodrážkou po celém obvodu. [53]

### G.3. Nasákavost

Protože pěnový polystyren není rozpustný ve vodě a má uzavřenou buněčnou strukturu, nepohlcují buňky ve své struktuře téměř žádnou vodu. K tomu může docházet do určité míry jenom v pórech mezi vzájemně svařenými částicemi pěnové hmoty. Tento fakt způsobuje, že se tepelně izolační ani mechanické vlastnosti EPS významně nemění ani při dlouhodobém působení vody, navíc po vysušení se hodnoty vracejí na původní velikost, zatímco u řady jiných izolačních materiálů dochází i při krátkodobém působení vody k přechodné nebo nevratné ztrátě izolační schopnosti.



Graf 5.5 Průběh nasákavosti EPS o různé objemové hmotnosti při uložení pod vodou [52].

Na rozdíl od vody může vodní pára, která je obsažena ve vzduchu jako vlhkost, procházet stěnami buněk a tím i vrstvou izolace EPS. Rychlost difuze vodních par je dána difuzní tloušťkou, která závisí na tloušťce vrstvy a na faktoru difuzního odporu. Pěnový polystyren má v rozmezí objemové hmotnosti 15-30 kg/m<sup>3</sup> faktor difuzního odporu  $\mu$  od 20 do 100.

Pokud při prostupu vodní páry jakýmkoliv izolačním souvrstvím dojde k dosažení rosného bodu, začne vodní pára kondenzovat. Tímto způsobem může při nevhodně navržené skladbě dojít i ke kondenzaci vody uvnitř buněk EPS. Proto je třeba volit difuzní a tepelný odpor jednotlivých vrstev tak, aby rosného bodu uvnitř konstrukce nebylo dlouhodobě dosahováno [52].

## **H. Odolnost proti stárnutí**

### **H.1. UV záření a povětrnostní vlivy**

Používání pěnového polystyrenu po dobu více než 50 let ukazuje, že jeho vlastnosti zůstávají při správném použití nezměněny, a že jeho životnost uvnitř stavebních konstrukcí je stejná nebo vyšší než životnost ostatních částí stavby. Při delším působení ultrafialového záření přirozeného slunečního světla na nechráněné polystyrenové desky povrchová vrstvička zežloutne a degraduje. Z praktických stavebních důvodů se ale nikdy EPS neužívá bez krycích vrstev, takže toto působení je z hlediska konečného použití bezvýznamné, nehledě na to, že uvedený jev nemá vliv na základní fyzikální vlastnosti materiálu. Je však třeba mít na zřeteli, že dlouhodobé nevhodné skladování na slunci v letním období může způsobit v důsledku narušení povrchu problémy s přilnavostí lepidel [9]. Výrobky z pěnového polystyrenu by měly být uskladněny tak, aby na ně dlouhodobě nesvítilo Slunce. [52]

### **H.2. Odolnost vůči chemikáliím**

Pěnový polystyren je odolný vůči běžným stavebním hmotám jako cement, vápno, sádra, anhydritovým směsím a stavebním dílcům, které jsou vyrobeny pomocí těchto pojiv. Bez odpovídajícího technického řešení jej není možno kombinovat s materiály uvolňujícími organická rozpouštědla [52].

### **H.3. Biologické chování**



Pěnový polystyren nevytváří živnou půdu pro mikroorganismy. Nehnije, neplesniví, netrouchniví a neškodí mu ani půdní bakterie. EPS neškodí životnímu prostředí a neohrožuje vodu. Při dodržování příslušných místních předpisů může být ukládán společně s domácím odpadem nebo být spalován ve spalovnách odpadů. Hygienická nezávadnost polystyrenu pro vnější i vnitřní izolaci jasně vyplývá ze skutečnosti, že se ze stejného materiálu běžně vyrábějí i obaly pro potraviny [52].

## I. Odolnost proti ohni

Prudký rozvoj výroby a aplikací EPS si během krátké doby vynutil vývoj tzv. samozhášivého polystyrenu, který oproti původním lehce hořlavým typům odpovídá mnohem lépe přísným požadavkům na protipožární ochranu budov [52]. Třída reakce na oheň dle EN 13501–1 minimálně E. Dle ČSN 730862 je samozhášivý pěnový polystyren zařazen do stupně hořlavosti C1 – těžce hořlavé. Použití lehce hořlavých typů polystyrenu (stupeň hořlavosti C3) je pro stavebnictví velmi omezené, a proto jej členové Sdružení EPS již řadu let vůbec nevyrábějí. Z požárního hlediska je velmi vhodné široké využití EPS do sendvičových konstrukcí mezi nehořlavé materiály.

### 5.4.1.1.5 Značení polystyrénu

1. srpna 2015 došlo ke změně značení izolačních desek z pěnového polystyrenu. Nové značení odráží změny v normě ČSN EN 13 163 a modernější výrobní postupy, kdy se vyrábějí pouze izolační desky označované jako S. Z důvodu změny ČSN EN 13 163 a díky používání modernějších technologií ustupují výrobci izolačních desek z pěnového polystyrenu od rozdělení na základní (Z) a stabilizované (S) typy, neboť dnešní technologie už vyrábějí jen desky, které mají kvalitu na úrovni typů označovaných jako S. Nově se zavádí typ bez nároku na zatížení EPS S (nejblíže dřívějšímu typu EPS 50 Z) a typ elastifikovaný pro použití v ETICS s lepšími akustickými vlastnostmi, označený jako EPS EF. Stejným způsobem jako bílý EPS jsou nově značeny i tzv. šedé typy, které mají lepší hodnotou součinitele tepelné vodivosti. Touto změnou dochází k zjednodušení a zpřehlednění vyráběných typů. Níže uvádím tabulku s původním a novým značením pěnového polystyrenu. [54]

Původní značení	Nové značení	Barevný kód	Poznámka
EPS 50 Z	EPS S		pro aplikace bez zatížení (výplňový materiál)
EPS 70 Z EPS 70 S	EPS 70		základní typy, které nahrazují původní Z a S typy
EPS 100 Z EPS 100 S	EPS 100		
EPS 150 Z EPS 150 S	EPS 150		
EPS 200 Z EPS 200 S	EPS 200		
EPS 70 F EPS 100 F	EPS 70 F EPS 100 F EPS EF		
EPS P	EPS P	neznačí se	speciální typ pro použití pod úrovní terénu s nižší nasákavostí
EPS T	EPS T		speciální podlahový typ pro tlumení kročejového hluku

Tab. 5.2 přehled původního a nové značení pěnového polystyrenu [54]

### 5.4.1.2 Pěnový extrudovaný polystyren EXP

Je tepelná izolace, která se od standardního bílého expandovaného polystyrénu liší jak způsobem výroby a vlastnostmi, tak i vzhledem a barevně odlišením podle výrobce. Díky protlačení pěny má extrudovaný polystyrén na rozdíl od expandovaného uzavřenou strukturu bez mezer. To dává XPS velmi dobré vlastnosti co se týče pevnosti v tlaku, minimální nasákavosti [51] [53]. Okraje desek jsou obvykle opatřeny polodrážkou. XPS není určeno do skladby střech s klasickým pořadím vrstev, kde asfaltová vodotěsnicí vrstva je přímo spojena s tepelněizolační vrstvou. [2].

#### Obecně se XPS rozděluje podle:

- o pevnosti v tlaku (kPa) – XPS 200, 250, 300, 500, 700,
- o povrchu – hladký, protlačovaný,
- o profilu hran – rovný, polodrážka, pero + drážka.

### 5.4.1.3 Polyuretanová a Polyisokyanurátová pěna (desky)

Polyuretanová i polyisokyanurátová pěna se používá mimo lití a stříkání přímo na stavbě i pro výrobu deskových materiálů. Desky je možno vyrábět způsobem řezání z bloků vzniklých volným pěněním nebo ve formách.

Pokud mají být desky pevně spojeny s jinými materiály (například s hliníkovou fólií, plechem, skelnou tkaninou) vyrábí se výhradně napěňováním do finální tloušťky. Suroviny pro výrobu pěny se nalévají mezi tenké materiály tvořící budoucí povrch desek. Proběhne chemická reakce a prostor je vyplněn pěnou, zároveň dojde ke spojení pěny s vloženými materiály.

Kompozity z PUR a PIR pěny se užívají pro izolaci střech, podlah, stěn, popřípadě se vyrábějí jako hotové celostěnové panely s hliníkovým pláštěm (k montáži na průmyslové haly apod.). V České republice se používají pro nadkrokevní systémy šikmých střech, kde se využívá jejich pevnosti při zachování jejich tepelněizolačních charakteristik. [2].

Ve stavebnictví se používá především tvrdá polyuretanová pěna. Jedná se o velmi dobrou tepelnou izolaci. Používá se ve formě desek či tvarovek, nebo se může aplikovat přímo na místě. Polyuretanové desky se uplatňují především jako tepelně izolační vrstvy do krovů, do plochých střech, nebo jako izolační vrstvy stěn. Polyuretan má dobrou odolnost proti běžným chemickým látkám a při hoření neodkapává [52] [53] [55].

Desky se kladou v jedné nebo dvou vrstvách na sraz a na vazbu. V případě pokládky desek ve dvou vrstvách se styčné spáry desek prostřídají. Místa, kde není tepelněizolační vrstva souvislá (okolí prostupů, okraje střechy apod.), se vyplní nízkoexpanzní PUR pěnou. PIR je třeba chránit proti UV záření. [2].

Tepelná odolnost PUR pěny (pro  $r > 40 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) je pro chladové izolace do  $-200^\circ\text{C}$ , pro tepelné izolace do teploty  $110^\circ\text{C}$  trvale (krátkodobě do  $250^\circ\text{C}$ ). Tepelná odolnost PIR pěny (pro  $r > 40 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) je pro chladové izolace do  $-60^\circ\text{C}$ , pro tepelné izolace do  $180^\circ\text{C}$  trvalého zatížení [55].

#### **Základní fyzikální vlastnosti:**

součinitel tepelné vodivosti	$\lambda = 0,022\text{--}0,075 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ (dle složení kompozitu)
faktor difuzního odporu:	dle konkrétního složení kompozitu
objemová hmotnost	$\rho = 30\text{--}100 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (dle konkrétního složení kompozitu)
třída reakce na oheň	C–E dle konkrétního složení kompozitu

#### **5.4.1.4 Polyuretanová pěna – PUR (stříkaná, litá)**

Polyuretanová pěna existuje dvojího druhu – tvrdá a měkká. Měkká pěna je známá jako molitan, ve stavebnictví se využívá polyuretanová pěna tvrdá – zkratkou označovaná jako PUR pěna. Široké uplatnění má v detailech konstrukcí jako výplň a izolace spár apod. Lze ji využít i pro zateplení plošných konstrukcí, stropů, střech. Aplikuje se nástřikem nebo litím. Jelikož pěna na povrchu ulpívá, přizpůsobí se i složitě tvarovaným povrchům. [55]

#### **Základní fyzikální vlastnosti:**

součinitel tepelné vodivosti	$\lambda = 0,033 \text{ až } 0,045 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
faktor difuzního odporu	$\mu = 30\text{--}100$ (dle objemové hmotnosti)
objemová hmotnost	$\rho = 30\text{--}100 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$
třída reakce na oheň	C–E (dle konkrétního chemického složení)

#### 5.4.1.5 Polyisokyanurátová pěna PIR (stříkaná, litá)

Materiál je tvořen kombinací uretanových a isokyanurátových vazeb. Jde o velmi podobný materiál jako známější polyuretan (PUR), PIR má ale obecně vyšší pevnost v tlaku (PUR 100 kPa, PIR 170 kPa) a menší tepelnou vodivost. Aplikovat se může jak litím, tak stříkáním na povrch či do dutin. [55]

##### Základní fyzikální vlastnosti:

součinitel tepelné vodivosti	$\lambda = 0,021$ až $0,023 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
faktor difuzního odporu	$\mu = 35$
objemová hmotnost	$\rho = 30\text{--}100 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$
třída reakce na oheň	C–E (dle konkrétního chemického složení)

#### 5.4.1.6 Fenolická pěna

Fenolická pěna se vyrábí napěněním fenolformaldehydových pryskřic do bloků, které se následně řežou na desky a oboustranně opatřují skelným vláknem či reflexní hliníkovou fólií. Používá se pro zateplení fasád, s výhodou u rekonstrukcí či v detailech, kde není místo na velkou tloušťku izolantu pro její dobrou hodnotu součinitele tepelné vodivosti. Oproti materiálům PUR a PIR má lepší tepelněizolační vlastnosti a reakci na oheň. [55]

##### Základní fyzikální vlastnosti:

součinitel tepelné vodivosti	$\lambda = 0,024\text{--}0,021 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
faktor difuzního odporu	$\mu = 35$
objemová hmotnost	$\rho = 35 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$
třída reakce na oheň	C, speciální produkty B



### 5.4.1.7 Minerální izolace

Minerální izolace je u nás po pěnovém polystyrénu druhou nejrozšířenější tepelnou izolací. Vyrábí se tavením hornin, nejčastěji jde o čedič nebo křemen a další skelnou fázi vytvářející příměsi, kde může značný podíl tvořit také recyklát. Podle výchozích surovin se pak jedná o kamennou či skelnou vlnu. Díky čediči má kamenná vlna vysoký bod tání a proto dobře odolává ohni. Pojivem jsou nejčastěji fenol-formaldehydové pryskyřice, které někteří výrobci již nahrazují šetrnějšími a zdravotně nezávadnými alternativami. Desky jsou v celém objemu hydrofobizované, ale nelze je trvale vystavit vlhku [55] [56].

Předností je jednoznačně odolnost vůči vysokým teplotám - používají se například v kombinaci s polystyrénem u panelových budov nad požárně dovolenou výškou nebo pro vytvoření požárních pásů. Další výhodou minerální vlny je její nízký difúzní odpor a tím vysoká paropropustnost. Díky této vlastnosti se minerální vlna často úspěšně používá ve skladbách provětrávaných fasád, kde je požadována větší požární odolnost, nebo u dvoupříčkových střech [55] [57].

#### 5.4.1.7.1 Kamenná vlna – desky a role

Kamenná tepelná izolace je vyráběna za vysokých teplot rozvlákněním čediče bazaltu či gabra v peci a zformováním těchto vláken do rohoží či desek. Vyrábí se ve dvou základních variantách jako měkké rohože a tuhé desky. Měkké rohože se používají pro nezátížené stavební izolace, jako jsou např. půdní prostory, a také pro technické izolace.

Tuhé desky se používají pro zatížené izolace stavebních konstrukcí, do kontaktních zateplovacích systémů ETICS, provětrávaných fasád, jako výplňové izolace do rámových dřevostaveb, izolace šikmých střech s krovovými soustavami atd. Desky s vyšší objemovou hmotností (nad 100 kg/m<sup>3</sup>) lze využít i k tepelné izolaci podlah. Desky s tzv. kolmou orientací vláken se používají nejčastěji ve formě lamel pro zateplení zakřivených povrchů.

Kamenná vlna je nehořlavá, proto nachází uplatnění v konstrukcích se zvýšenými požadavky na požární bezpečnost – požárně dělicí pásy v kontaktních zateplovacích systémech, konstrukce s vyšší požární odolností atd. [58]

#### Základní fyzikální vlastnosti:

součinitel tepelné vodivosti	$\lambda = 0,035 - 0,045 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
faktor difuzního odporu	$\mu = 1 - 2$
objemová hmotnost	$\rho = 30 - 100 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$
třída reakce na oheň	A1

#### 5.4.1.7.2 Skelná vlna - desky a role

Skelná vlna se vyrábí jednak z nového skla nebo recyklací a rozvlákněním obalového skla. Roztavené sklo je rozfoukáváno na vlákna a formováno do desek nebo rohoží. Použití skelné vlny je obdobné jaké u vlny kamenné. Běžně se výrobky užívají k izolaci mezi krokve krovů či sloupky lehkých skeletových staveb, do stropů a podhledů i provětrávaných fasád. Jako nehořlavý materiál je lze užít i jako požární izolaci. [58]

##### Základní fyzikální vlastnosti:

součinitel tepelné vodivosti	$\lambda = 0,030 - 0,045 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
faktor difuzního odporu	$\mu = 1$
objemová hmotnost	$\rho = 15 - 35 \text{ kg.m}^{-3}$
třída reakce na oheň	A1

#### 5.4.1.7.3 Skelná vlna (rozvlákněná)

Základním materiálem může být nové či recyklované obalové sklo. Do materiálu nejsou používány žádné další příměsi ani pojiva. Rozdílem foukané skelné vlny oproti foukané izolaci z kamenných vláken je nižší objemová hmotnost, používaná pro dosažení stejných parametrů součinitele tepelné vodivosti. [58]

##### Základní fyzikální vlastnosti:

součinitel tepelné vodivosti	$\lambda = 0,035 - 0,045 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
faktor difuzního odporu	$\mu = 1 - 2$
objemová hmotnost	$\rho = 30 - 100 \text{ kg.m}^{-3}$
třída reakce na oheň	A1

#### 5.4.1.7.4 Kamenná vlna (rozvlákněná)

Jedná se o rozvlákněný materiál, aplikovaný stejně jako veškeré foukané izolace – potrubím hnaným vzduchem. Výhodou oproti deskám je rychlá aplikace i do tvarově složitých konstrukcí při zachování dobrých protipožárních vlastností. [58]

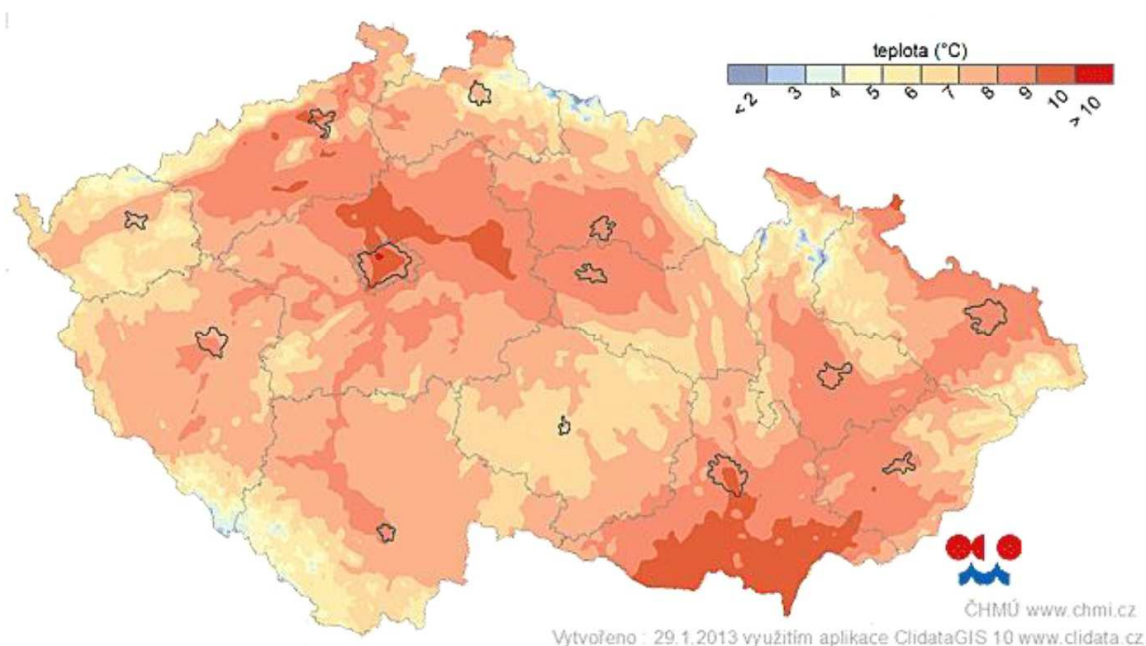
##### Základní fyzikální vlastnosti:

součinitel tepelné vodivosti	$\lambda = 0,040 - 0,050 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
faktor difuzního odporu	$\mu = 1$
objemová hmotnost	$\rho = 30 - 100 \text{ kg.m}^{-3}$
třída reakce na oheň	A1

## 6 FORMULACE OKRAJOVÝCH PODMÍNEK

### 6.1 Podnebí České republiky

Dle internetového zdroje [59] je podnebí na celém území České republiky mírné, přechodné mezi oceánským a kontinentálním s typickým střídáním 4 ročních období (stejně jako v celé střední Evropě). Pro podnebí České republiky je charakteristické západní proudění s převahou západních větrů, časté střídání jednotlivých frontálních systémů (ročně přes naše území přejde v průměru kolem 140 front) a poměrně hojné srážky. Dochází k mísení přímořského a kontinentálního podnebí. Přímořský vliv se projevuje hlavně v Čechách, na Moravě a ve Slezsku přibývá kontinentálních podnebních vlivů. Velký vliv na podnebí má nadmořská výška a rozmanitý reliéf. Průměrná roční teplota se v Česku pohybuje mezi 5,5 °C až 9 °C. Nejchladnějším měsícem roku je leden, kdy i v nížinách klesne průměrná měsíční teplota pod 0 °C. Nejteplejší měsíc roku je červenec v průměru o 20 °C teplejší než leden.



Obr. 6.1 – Mapa průměrné roční teploty vzduchu mezi roky 1961 a 2000 [59]

### 6.2 Klimatické podmínky ve stavební tepelné technice

Klimatické podmínky pro výpočty ve stavební tepelné technice uvažují pro návrh budov v České republice dvě období. V zimním období se ověřují konstrukce dle normy [60] z hlediska prostupu tepla, teplotního faktoru vnitřního povrchu, kondenzace vodní

páry v konstrukci a další. V letním období se neposuzují jednotlivé konstrukce, ale hodnotí nejvyšší teplota vzduchu v kritické místnosti.

## 6.3 Návrhové parametry venkovního vzduchu

### 6.3.1 Návrhová teplota venkovního vzduchu v letním období

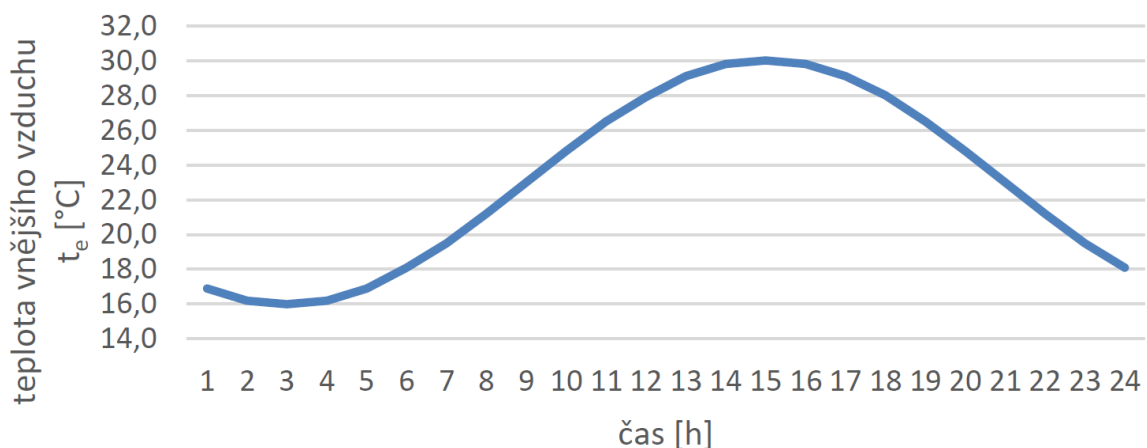
Návrhová teplota venkovního vzduchu  $t_{em}^*$  se stanoví podle místa budovy a je dle normy [61] rovna:

$t_{em}^* = 20,5^{\circ}\text{C}$  v letní teplotní oblasti A;

$t_{em}^* = 18,2^{\circ}\text{C}$  v letní teplotní oblasti B.

Teplotní oblast B se nachází na území Moravskoslezského kraje a je zeměpisně vymezena státními hranicemi mezi obcemi Horní Lideč a Třinec a dále spojnicemi mezi městy Třinec, Valašské Meziříčí a Horní Lideč. Teplotní oblast a je ostatní území České republiky.

Denní průběh návrhové teploty vnějšího vzduchu byl převzat z normy [61].



Graf 6.1 průběh hodnoty návrhové teploty vnějšího vzduchu

### 6.3.2 Návrhová střední intenzita globálního slunečního záření v letním období

Návrhová střední intenzita globálního slunečního záření  $I$  a s tím související amplituda intenzity globálního slunečního záření  $AJ$  a doba jejího maxima v celodenním průběhu na svislé a vodorovné rovině jsou uvedeny v příloze v tabulce A.2.

### 6.3.3 Součinitel při přestupu tepla na vnějším povrchu konstrukce

Součinitel při přestupu tepla na vnějším povrchu konstrukce byl uvažován pro letní období  $h_e = 13,5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ . Hodnota byla převzata z normy [61].

### 6.3.4 Sluneční teplota

Teplota vzduchu není zdaleka jediný klimatický činitel, který působí teplotně na vnější povrch. Mezi nejdůležitější činitele tedy patří dle článku [62]:

- denní kolísání teploty vnějšího vzduchu  $t_e$  [ $^{\circ}\text{C}$ ];
- denní průběh intenzity slunečního záření  $I$  [ $\text{W}/\text{m}^2$ ];
- proudění vzduchu;
- relativní vlhkost vzduchu.

Jejich souhrnné působení je poměrně složité. Tepelný tok pohlcovaný vnějším povrchem konstrukce vlivem dopadajícího slunečního záření je:

$$q_s = \varepsilon \cdot I \quad (6.1)$$

kde je	$q_s$	tepelný tok [W]
	$\varepsilon$	pohltivost slunečního záření vnějšího povrchu [-]
	$I$	intenzita globálního slunečního záření [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ]

Pohlcená energie se šíří neprůsvitnou konstrukcí k jejímu vnitřnímu povrchu podle Fourierova zákona. Pohltivost slunečního záření závisí především na barvě a charakteru povrchu. Množství tepla, které je předáno vnějšímu povrchu, je výsledkem působení tepelných toků šířených krátkovlnným slunečním zářením, konvekcí, dlouhovlnným zářením povrchu a sáláním oblohy. Platí rovnice rovnováhy tepelných toků:

$$q_{es} = h_e(t_e - t_{ep}) + \varepsilon \cdot I + \Phi \quad (6.2)$$

kde je:	$q_{es}$	hustota tepelného toku předaná z nebo do vnějšího prostředí přiléhajícího ke konstrukci [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ]
	$t_e$	teplota vnějšího vzduchu [ $^{\circ}\text{C}$ ]
	$t_{ep}$	teplota vnějšího povrchu konstrukce [ $^{\circ}\text{C}$ ]
	$\Phi$	tepelný tok vlivem sálání oblohy a povrchu konstrukce [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ]
	$h_e$	součinitel při přestupu tepla na vnější straně [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ]

Vztah můžeme zjednodušit zavedením sluneční teploty vzduchu  $t_{es}$ . Definuje se jako fiktivní teplota vzduchu při daném povrchu konstrukce (s uvažováním slunečního záření, sálání konstrukce a oblohy a konvekční výměny tepla), se kterou si bude povrch konstrukce vyměňovat stejné množství tepla:

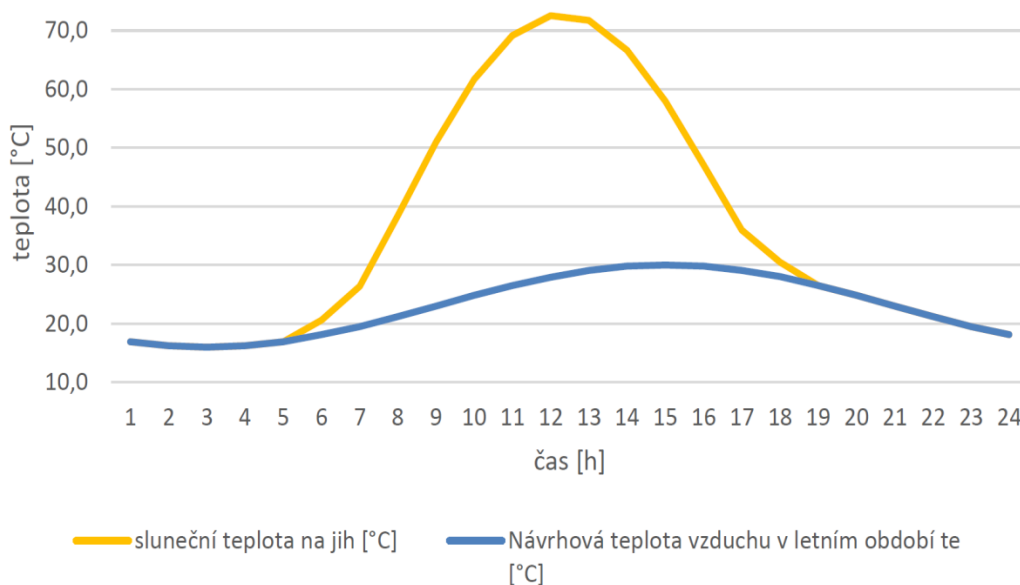
$$h_e(t_{es} - t_{ep}) = h_e(t_e - t_{ep}) + \varepsilon \cdot I + \Phi \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (6.3)$$

Vyjádřením  $t_{es}$  z rovnice získáme výraz:

$$t_{es} = t_e + \frac{\varepsilon \cdot I}{h_e} - \frac{\Phi}{h_e} \quad [^\circ\text{C}] \quad (6.4)$$

Sluneční teplota vzduchu tedy vyjadřuje integrální vliv teplot vnějšího vzduchu, slunečního záření, proudění a sálání na vnějším povrchu konstrukce. Výraz  $\varepsilon \cdot I / h_e$  se nazývá ekvivalentní teplota. Vyskytuje se v něm intenzita globálního slunečního záření, takže závisí na orientaci k světovým stranám. Pro svislé povrchy se hodnota výrazu  $\Phi / h_e$  zanedbává, nebere se do úvahy vliv dlouhovlnného záření atmosféry.

Pro simulace v této diplomové práci byl vypočítán průběh sluneční teploty pro jižní stranu.



Graf 6.2 Průběh sluneční teploty pro jižní stěnu a návrhové teploty vzduchu v letním období (pro emisivitu fasády  $\varepsilon = 0,9$ )

## 7 POČÍTAČOVÉ DYNAMICKÉ SIMULACE

V této subkapitole budu popisovat způsob vytvoření a analýzy dynamických simulací. Výsledky z těchto simulací byly použity při optimalizaci návrhu experimentálního modelu. Pro vytvoření výpočtových modelů pro podrobné tepelně technické simulaci jsem použil program DesignBuilder. Simulace v tomto programu mi umožnili kvantifikovat vliv různých vlivů na nárůst povrchové teploty krytiny ploch střechy v blízkosti prosklených či lesklých ploch. Program DesignBulder umožňuje rozčlenit jednotlivé plochy konstrukcí na dílčí části (tzv. subsurface) pro které lze určit povrchovou teplotu a energetické toky. Tento program jsem zvolil z důvodů přesnosti a komplexnosti výpočtového jádra EnergyPlus, který mimo jiné dokáže vypočítat odrazové složky slunečního záření od konstrukcí a toto záření započítat k celkovým energetickým tokům na konstrukci. Pro doplnění některých výpočtů jsem použil také program TEPLO z balíčku stavební fyziky Svoboda Software a software WUFI Pro 1D, pro dynamické modelování jednorozměrného šíření tepla a vlhkosti.

### 7.1 Použitý software

Pro výpočty tepelných charakteristik a pro dynamické simulace byly v této diplomové práci používány čtyři výpočetní programy:

1. Design Builder      dynamická simulace povrchových teplot konstrukce,
2. WUFI PRO            dynamické simulace průběhu teplot v konstrukci,
3. Teplo 2010            výpočet dle metodiky norem [16] a [63],

#### 7.1.1 Design Builder

Design Builder je komplexní software pro dynamické simulování budov. Tvoří ho intuitivní grafické prostředí a výpočetní jádro EnergyPlus, které je založeno na bilančním výpočtu tepelných zisků a ztrát. Program se nejčastěji používá k dynamickému simulování budov, k hodnocení tepelné pohody, k výpočtu denního osvětlení, k certifikaci budov a k CFD analýze vnějších a vnitřních prostor budov, jak říká internetový zdroj [64].

#### EnergyPlus

EnergyPlus je samostatný program, ale kvůli pohodlnější práci, se používá spíše jako výpočetní jádro pro provádění energetických analýz a simulací budov. Je založen na popisu budovy z pohledu jejího fyzikálního chování, přidružených mechanických a jiných systémů, které upravují vnitřní prostředí. Počítá potřebu energie na vytápění a chlazení, která je nezbytná k udržení požadovaných hodnot a zadaných podmínek prostředí, spotřebu paliva a spotřebu primární energie. Současné použití těchto a dalších podrobností zaručuje,

že simulace EnergyPlus věrně reprezentuje reálnou budovu, jak uvádí internetový zdroj [65].

### **Práce v programu**

Zadání konstrukce a tvaru budovy je jednoduché a intuitivní, namodeluje se v 3D prostředí jako v běžně známých CAD programech. Vymodelovaná budova se rozdělí na jednotlivé zóny, kterým se přiřadí provoz a další parametry. Pro zadání vlastností program používá stromovou strukturu zadávání, což práci velmi urychluje. Použitím šablony na úrovni budovy nebo zóny program nastaví výchozí vlastnosti na nižších úrovních pro provoz nebo jednotlivé konstrukce a okna. Nastavení všech vlastností jednotlivých konstrukcí a zón lze samozřejmě měnit i individuálně na nižších úrovních.

Výsledky jsou přehledně zobrazeny v grafech a tabulkách číselných hodnot, které je možné exportovat a dále zpracovávat.

#### **7.1.2 WUFI PRO**

Software modelující jednorozměrné šíření tepla, vlhkosti a energie ve stavebních konstrukcích a materiálech. Vyhodnocuje rizika spojená s nadměrnou akumulací vlhkosti, kondenzací vodní páry nebo růstem plísní na površích konstrukcí.

Výpočet používá diferenciálních rovnic a tím zahrnuje do modelování jevy, jako jsou orientace vůči světovým stranám, vliv barvy vnějšího povrchu konstrukce na šíření tepla, akumulace tepla v konstrukci a mnohé další. Software je mezinárodní a díky tomu využívá databázi vnějších a vnitřních okrajových podmínek naměřených po celém světě. Další databází v programu je databáze materiálů, která je rovněž velmi obsáhlá. Nachází se v ní přes 600 stavebních materiálů naměřených ve výzkumných ústavech po celém světě. Do jednotlivých databází je možné přidávat své vlastní okrajové podmínky i materiály.

Modelování v programu je nestacionární dle nastaveného kroku. Program běžně modeluje jevy vyskytující se ve stavebních konstrukcích a materiálech, jako jsou:

- riziko kondenzace na vnitřním povrchu,
- riziko růstu plísní,
- vliv větrem hnaného deště na chování obvodové konstrukce,
- riziko kondenzace a akumulace vodní páry uvnitř stavební konstrukce,
- chování konstrukce při zatékání dešťové vody,
- porovnání odlišných skladeb při rekonstrukci stávající konstrukce.



Software WUFI Pro splňuje požadavky normy ČSN EN 15026 na simulační software, který umožňuje dynamické simulace šíření vlhkosti a tepla ve stavebních konstrukcích [68].

### **7.1.3 Teplo 2010**

Teplo 2010 je český program z rodiny programů Svoboda software pro stavební fyziku. Dle informace z internetového zdroje [66] je určen pro jednodimenzionální tepelné technické výpočty stavebních konstrukcí z hlediska prostupu tepla a bilance vodních par. Mimo základních parametrů, kterými jsou např. tepelný odpor konstrukce  $R$ , součinitel prostupu tepla  $U$ , povrchové teploty, oblasti kondenzace a množství zkondenzované vodní páry, počítá i dynamické tepelné charakteristiky konstrukcí dle normy [16], které budu posuzovat v této diplomové práci [67].

## **7.2 Počáteční model pro dynamické simulace**

Pro prvotní simulaci jsem vytvořil počáteční model reprezentující běžné řešení současné výstavby rodinných domů. Skladby obvodových konstrukcí modelu byly navrženy dle platných norem, tak aby splňovali doporučené hodnoty součinitele prostupu tepla. Tento model budu postupně upravovat v závislosti na výše popsaném postupu práce s kombinacemi různých vlivů.

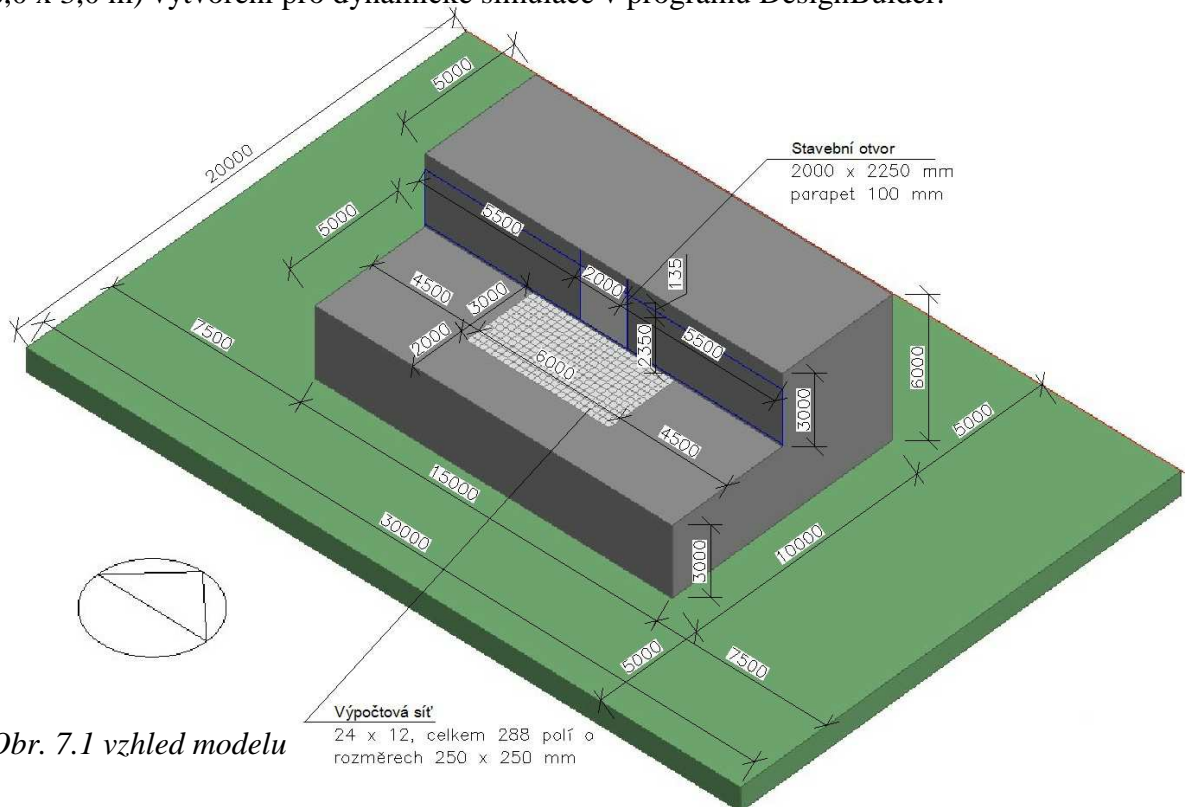
### **7.2.1 Požadavky na model**

- umístění ploché zateplené střechy s přilehlou stěnou, ve které se nalézají zasklené výplně stavebních otvorů,
- velikost a tvar modelu odpovídající běžnému standartu současné výstavby,
- použití standartní stavebních materiálů, skladeb a zasklení,
- dosažení doporučených hodnot součinitele prostupu tepla u obvodových konstrukcí, dle ČSN 73 0540-2:2011 Tepelná ochrana budov - Část 2: Požadavky,
- umístění modelu stavby na území České republiky
- v první verzi modelu potlačit vliv jiných překážek (okolní zástavbu, vegetace atd.),
- jednoduchost modelu pro snadnější interpretaci dosažených výsledků simulací,
- snadná změna konfigurace modelu, pro možnost posouzení různých vlivů na teplotní namáhání jednotlivých konstrukcí, zejména na skladbu ploché střechy přiléhající ke stěně se zasklenou či lesklou plochou

## 7.2.2 Návrh počátečního modelu:

### 7.2.2.1 Tvar budovy:

Pro lepší představu o vzhledu počátečního výpočtového modelu níže přikládáním axonometrii s okótovanými rozměry a popisem základních prvků modelu. Na tomto snímku si lze všimnout umístění a rozměrů výpočtové sítě (světle šedá síť o rozměrech 6,0 x 3,0 m) vytvoření pro dynamické simulace v programu DesignBulder.



Obr. 7.1 vzhled modelu

- zastavěná plocha modelu: 10 x 15m
- dva nadzemní podlaží o výšce 3,0 m
- ustupující podlaží vytvářející terasu s plochou střechou o rozměrech 5 x 15 m

### 7.2.2.2 Použité materiály

Pro prvotní výpočtový model jsem upravil katalogové hodnoty (programu DesignBulder) fyzikálních vlastností použitých stavebních materiálů, tak aby odpovídaly standardům stavebních materiálů dostupných v naší zemi. Podrobný seznam použitých materiálů se všemi vlastnostmi naleznete v příloze B spolu s uvažovanými skladbami. Níže uvádím tabulku 7.1 s fyzikálními veličinami, které se zadávají v DesignBulderu u jednotlivých materiálů, spolu s originálním anglickým názvem veličin. Pro řešení naší problematiky bylo stěžejní správné zadání povrchových vlastností střešní krytiny ploché střechy a povrchové úpravě přilehlé fasády. Důležitým faktorem je také teplotní jímavost a kapacita povrchových materiálů, vycházejících z hodnoty součinitele prostupu tepla  $\lambda$  [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ ], měrné tepelné kapacity  $c$  [ $\text{J}\cdot\text{Kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ] a objemové hmotnosti  $\rho$  [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ].

Záložka	Kategorie	Veličina	Značka	Jednotka
General Obecné	Therm Properties Tepelně technické vlastnosti	Conduction Součinitel tepelné vodivosti	$\lambda$	$W \cdot m^{-1} K^{-1}$
		Specific Heat Měrná tepelná kapacita	$c$	$J \cdot Kg^{-1} K^{-1}$
		Density Objemová hmotnost	$\rho$	$kg \cdot m^{-3}$
	Vapour Resistance Difuzní odpor	Factor Faktor difuzního odporu	$\mu$	-
Surface properties Povrchové vlastnosti	Surface properties Povrchové vlastnosti	Thermal absorptance (emissivity) Emisivita	$\varepsilon$	-
		Solar absorptance Pohltivost slunečního záření	$\alpha$	-
		Visible absorptance Pohltivost viditelného světla	$\alpha_{\text{visible}}$	-
		Roughness Drsnost	$\tau$	Veryrough Verysmooth

tab. 7.1 fyzikální veličiny stavebních materiálů zadávaných do programu DesignBuilder

### 7.2.2.3 Výplně otvorů

Pro prosklenou výplň stavebního byly vybrány parametry standardního dnes používané výplně s izolacím trojsklem s nízkou emisivitou a vysokým tepelným odporem. Mezi základní charakteristiky použitého zasklení v počátečním modelu patří:

- zasklené výplně otvorů umístěno centricky na podélné stěně přilehlé k terase
- velikost zasklení 2 x 2,5 m (Š x V)
- parapetem o výšce 0,1 m nad střešní krytinou
- osazení na vnější líc zdiva, 120mm od vnějšího povrchu
- výška a šířka rámu rámu 100 mm, bez instalovaných žaluzií
- zasklení trojsklem,
- Součinitel tepelné vodivosti  $U_g = 0,70 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
- Činitel úplné propustnosti energie slunečního záření  $g = 0,48 - 0,50$
- výplň mezer mezi skly: Argon
- celková tloušťka zasklení 35 mm ( 3 / 13 / 3 / 13 / 3mm)
- součinitel tepelné vodivosti použitého skla:  $0,90 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$

Bližší popis spektrálních vlastností zasklení přikládám v příloze C. Níže v tabulce 7.2 uvádím výčet spektrálních a tepelně technických vlastností uvažovaných pro dynamické simulace prováděných v programu DesignBuilderu.

Záložka	Kategorie	Veličina	Značka	Jednotka	
Panes Data Vlastnosti skel	<b>Solar properties</b> Vlastnosti pro celé spektrum slunečního záření	<b>Solar transmittance</b> Činitel prostup slunečního záření	$g$	-	
		<b>Outside solar reflectance</b> Činitel odrazu slunečního záření na exteriérové straně	$\rho_{\text{solar,in}}$	-	
		<b>Inside solar reflectance</b> Činitel odrazu slunečního záření na interiérové straně	$\rho_{\text{solar,out}}$	-	
	<b>Visible Properties</b> Vlastnosti pro viditelnou složku slunečního spektra (světla)	<b>Visible transmittance</b> Činitel prostup viditelného světla	$\tau_v$	-	
		<b>Outside visible reflectance</b> Činitel odrazu světla na exteriérové straně	$\rho_{V,\text{in}}$	-	
		<b>Inside visible reflectance</b> Činitel odrazu světla na interiérové straně	$\rho_{V,\text{out}}$	-	
	<b>Infra-Red Properties</b> Vlastnosti pro infračervenou složku slunečního spektra (tepla)	<b>Infra red transmittance</b> Činitel prostup infračerveného záření	$\tau_{\text{infra}}$	-	
		<b>Outside emissivity</b> Činitel odrazu infračerveného záření na exteriérové straně	$\epsilon_{\text{in}}$	-	
		<b>Inside emissivity</b> Činitel odrazu infračerveného záření na interiérové straně	$\epsilon_{\text{out}}$	-	
	<b>Thermal Tepelně</b> technické vlastnosti	<b>Thickness</b> Tloušťka skla			mm
		<b>Conduction</b> Součinitel tepelné vodivosti			$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$

tab. 7.2 fyzikální veličiny zasklení zadávaných do programu DesignBuilder

**Výsledné spektrální hodnoty uvažované výplně s izolačním trojsklem:**

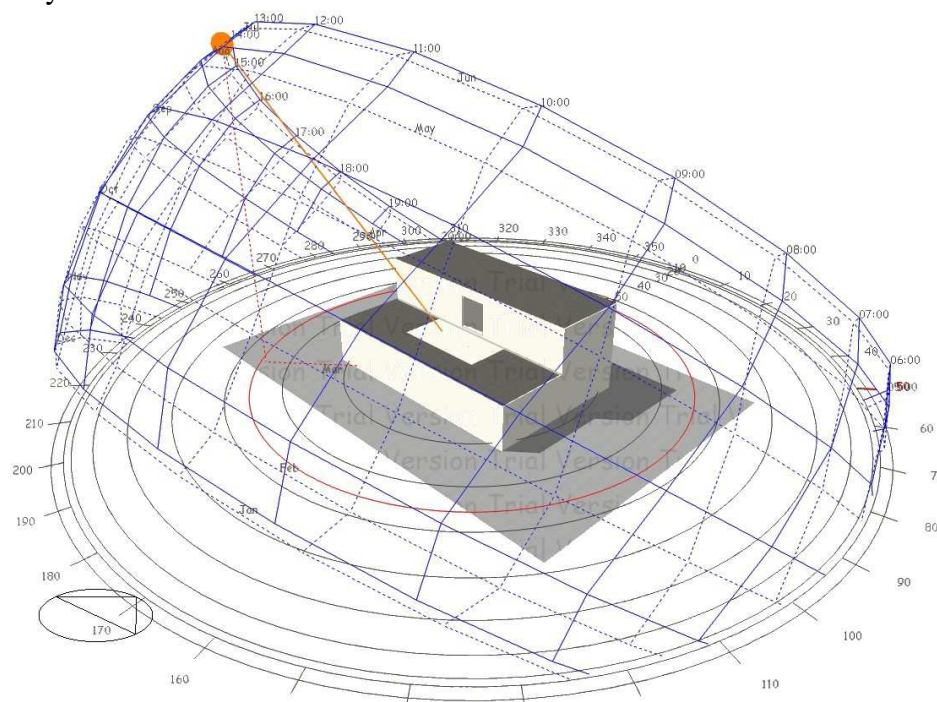
- Činitel úplné propustnosti energie slunečního záření  $g = 0,474$
- Činitel prostupu přímého slunečního záření  $\tau_{\text{infra,cel}} = 0,358$
- Činitel prostupu viditelné složky slunečního spektra  $\tau_{v,\text{cel}} = 0,661$

#### 7.2.2.4 Umístění budovy

- umístění stavby v Brně, 49°12' s. z. š., 16°37' v. z. d.
- nadmořská výška 246m
- uvažováno bez okolních překážek bez okolních překážek (překážky řešeny v kapitole 7.3.9 *Vliv překážek*)
- přílehlý terén byl vytvořen prostřednictvím prvku s původním označením: *Component block - 2 Ground*, tento komponent má za cíl simulovat okrajové podmínky chování zeminy
- komponent vytvářející přílehlý terén má rozměry 30 x 20 x 1 m
- model budovy je na tomto zemním komponentu umístěn centricky

#### 7.2.2.5 Klimatické podmínky

- výpočet prováděn pro letní období od 1. května do 31. srpna
- pro prvotní model použita katalogová referenční klimatická dat pro Brno (později byl vytvořen vlastní soubor s klimatickými daty viz. kapitola 7.4)
- při použití původních referenčních klimatických dat pro Brno vyšel 9. červenec jako nejkritičtější den v roce, z hlediska teplotního namáhání skladby ploché střechy
- níže je přiložen *obrázek 7.2* s vizualizací praktického modelu se zobrazením pozice Slunce v jednotlivé hodiny a měsíce v roce, při uvažování jižní orientace přílehlé fasády



Obr. 7.2 vizualizace prvotního počítačového modelu

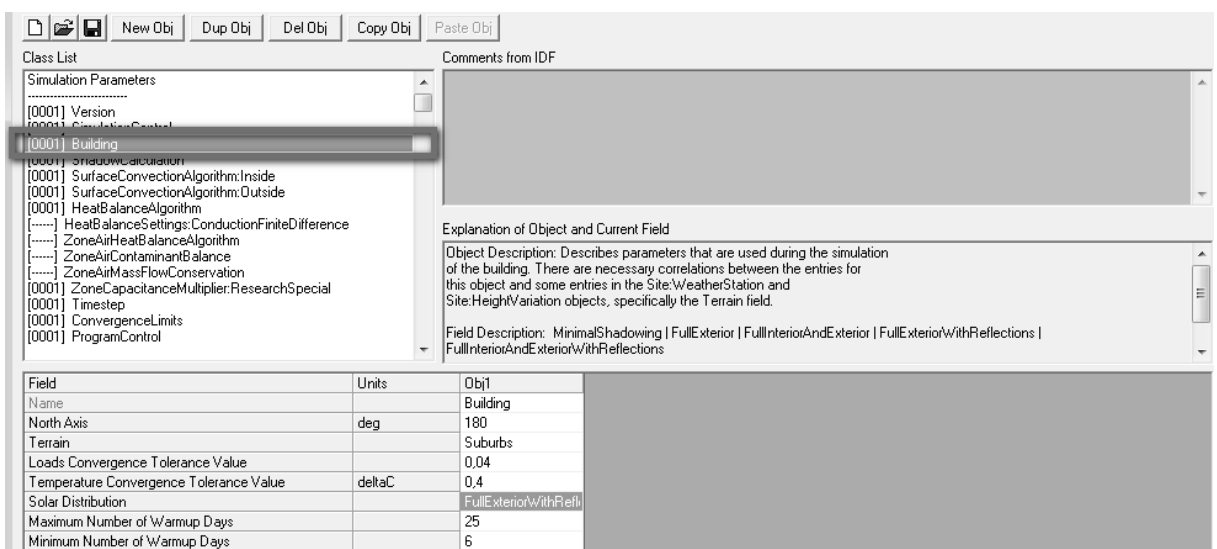
### 7.2.2.6 Nastavení výpočtu

Před zahájením výpočtu dynamických simulací bylo třeba provést úpravu nastavení programu DesignBulder tak, aby co možná nejlépe zpracoval úlohu řešící exteriérový odraz slunečního záření od stavebních konstrukcí a zasklených nebo lesklých ploch. Nejprve bylo potřeba v programu DesignBulder zaškrtnout v sekci Outputs možnost pro výpočet povrchových teplot konstrukcí, která v základním nastavení není vybrána.



Obr. 7.3 Úprava nastavení programu DesignBulder

Dalším krokem, pro zpřesnění výsledků simulací bylo potřeba model exportovat do formátu EnergyPlus – simulation. Soubor byl následně otevřen ve výpočtovém jádru EnergyPlus-Launch. Zde změnit v sekci Edit-IDF Editor, v položce Building původní volbu Solar Distribution na **FullExteriorWithReflections**, poté bude výpočet již korektní.



Obr. 7.4 Úprava nastavení programu EnergyPlus-Launch

### 7.2.2.7 Výpočtová síť modelu

V program DesignBulder je možné rozčlenit jednotlivé plochy konstrukcí na dílčí části (tzv. subsurface) pro které lze určit povrchovou teplotu a energetické toky. Pomocí tohoto prvku byla vytvořena výpočtová síť pro zachycení průběhu povrchových teplot při horním povrchu ploché střechy. Na výše uvedeném *obrázku 7.1* lze tuto výpočtovou síť spatřit umístěnou na výpočtovém modelu.

#### Specifikace výpočtové sítě:

- rozměr jedné dílčí části (subsurface) 0,25 x 0,25 m s plochou 0,0625 m<sup>2</sup>
- rozdělení výpočtové sítě: 24x12 bodů; celkem 288 bodů
- celkový rozměr výpočtové sítě: 6,0 x 3,0 m s plochou 18,0 m<sup>2</sup>
- níže uvádím obrázek s umístěním a označením jednotlivých dílčích ploch uvažované výpočtové sítě, toto označení výpočtových ploch je použito v následující kapitole 7.3 *Řešené vlivy konfigurace budovy na teplotní namáhání stavebních konstrukcí*

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47
48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95
96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119
120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143
144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167
168	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	191
192	193	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210	211	212	213	214	215
216	217	218	219	220	221	222	223	224	225	226	227	228	229	230	231	232	233	234	235	236	237	238	239
240	241	242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253	254	255	256	257	258	259	260	261	262	263
264	265	266	267	268	269	270	271	272	273	274	275	276	277	278	279	280	281	282	283	284	285	286	287

Obr. 7.5 Označení polí ve výpočtové síti

### 7.2.2.8 Navržené skladby obvodových konstrukcí modelu

Pro výpočtový model jsou uvažovány celkem čtyři skladby ploché střechy (viz. kapitola 7.3.4 *Vliv emisivity střešní krytiny*) a jedna skladba přilehlé fasády se třemi variantami povrchové úpravy (viz kapitola 7.3.6. *vliv emisivity přilehlé fasády*). U první konfigurace modelu je uvažováno s asfaltovou střešní krytinou (viz příloha B.3) a tmavou povrchovou úpravou přilehlé fasády (viz příloha B.1). U všech variant výpočtů je uvažováno s masivní nosnou stropní konstrukcí ploché střechy se skladbou o klasickém pořadí vrstev. Vnější stěna je uvažována jako zděná z keramických THERM tvárnic o tl. 240mm s provedením konstantního zateplovacího systému ETICS z EPS o tl. 120mm.

### **7.3 Řešené vlivy konfigurace budovy na teplotní namáhání stavebních konstrukcí**

Celkem bylo určeno 10 vlivů, které by měli mít dopad na výslednou vypočtenou povrchovou teplotu skladby ploché střechy posuzovaného modelu. Tyto vlivy jsou seřazeny dle předpokládaného významu na nárůst povrchové teploty:

1. Vliv orientace přilehlé fasády
2. Vliv umístění stavby dle souřadnice zeměpisné šířky
3. Vliv velikosti a členění přilehlých zasklených ploch
4. Vliv emisivity krytiny ploché střechy
5. Vliv emisivity zasklení (počtu a druhu skel)
6. Vliv emisivity povrchu přilehlé fasády
7. Vliv skladby konstrukce ploché střechy
8. Vliv tepelného odporu konstrukce
9. Vliv překážek (přesah střechy, přilehlé stěny)
10. Vliv složitějšího tvaru budovy v závislosti na orientaci

Každý vliv krátce popíši a porovnám výsledky navržených variant. Při deseti řešených vlivech s průměrným množstvím pět variant se počet celkových možných kombinací pohybuje v řádech sta milionu. Přepokládám však synergii jednotlivých vlivů. Z tohoto důvodu vyberu u každého vlivu variantu, při které je výsledná povrchová teplota nejvyšší. Tuto variantu poté použiji jako výchozí stav pro řešení následujícího vlivu. Při tomto postupu se celkové množství kombinací zredukuje přibližně na 90. V subkapitole řešící poslední vliv tedy dostaneme nejnepříznivější možnou kombinaci.

Při klasickém pořadí vrstev ve skladbách plochých střech je tepelná izolace chráněná před vysokými povrchovými teplotami pouze vrstvou hydroizolace. Tato vrstva má však minimální tepelně izolační vlastnosti a malou tepelnou kapacitu. Tloušťka hydroizolace plochých střech se pohybuje u povlakové krytiny z měkčeného PVC v dimenzích od 1,2 do 2,0 mm a u dvouvrstevých živičných izolace kolem 8 mm. Vzhledem k malé tloušťce a vysoké hodnotě součiniteli tepelné vodivosti hydroizolací je svrchní vrstva tepelné izolace zatěžována přibližně stejnou teplotou, jaká je povrchová teplota střešní krytiny. Z tohoto důvodu lze použít vypočtené hodnoty povrchových teplot z dynamických simulací prováděných v programu DesignBuilder.



### 7.3.1 Vliv orientace přilehlé fasády

Při určování vlivu orientace přilehlé fasády na vzestup povrchové teploty jsem prováděl výpočty v letní den 9. července. V tento den dle databáze klimatických dat pro Brno byla nulová oblačnost a maximální podíl přímého slunečního svitu. Z tohoto důvodu budou následující simulace vypočítávané s těmito klimatickými daty.

Pro tuto část simuluji celkem osm variant. U varianty číslo 1 je fasáda orientována na sever. Každá následující varianta je natočena o 45° ve směru chodu hodinových ručiček k jihu.

#### Výběr posuzované části výpočtové sítě

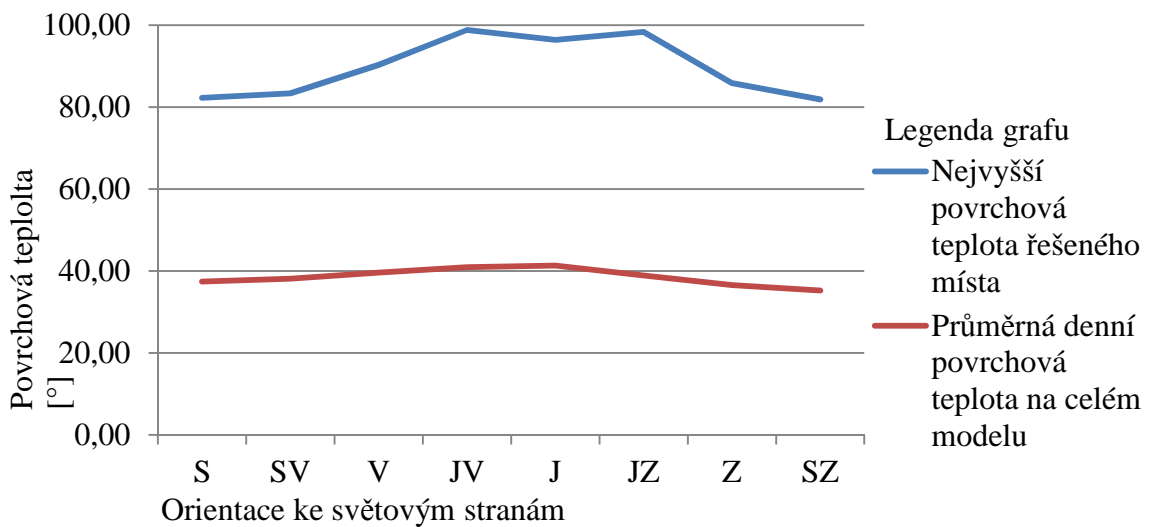
Z níže uvedené přehledové tabulky *tab.7.3* můžeme zjistit vliv orientace přilehlé fasády se zasklenou výplní stavebního otvoru na nárůst povrchové teploty krytiny ploché střechy převážně v blízkosti přilehlé fasády. V této subkapitole jsou použity vždy vypočtené hodnoty části výpočtové sítě (označení bodů, viz schéma výpočtové sítě), u kterých byla dosažena nejvyšší povrchová teplota. U variant 7.3.1.2 až 7.3.1.7 (orientace severovýchod až západ) jsou nejvíce namáhané části umístěny v první řadě výpočtové sítě v bezprostřední vzdálenosti k přilehlé fasádě. Tato maxima jsou způsobena odrazovou složkou slunečního záření. U variant 9.4.1.1 a 9.4.1.8 (orientace sever, severozápad) jsou nejvíce teplotně namáhané části od fasády vzdálenější. Tento fakt je způsoben částečným stíněním ploché střechy vlastní hmotou druhého patra modelové budovy.

Označení varianta	Popis varianty	Označení bodu s nejvyšší dosaženou teplotou [-]	Nejvyšší povrchová teplota řešeného místa [°C]	Průměrná denní povrchová teplota na řešeném bodě [°C]	Průměrná denní povrchová teplota na celém modelu [°C]	Časový interval překročení teploty 80°C [-]	Časový interval překročení teploty 80°C [hod]	Časový interval překročení teploty 90°C [-]	Časový interval překročení teploty 90°C [hod]
7.3.1.1	S	120	82,26	41,08	37,46	12:00-12:30	0,50	x	x
7.3.1.2	SV	17	83,34	35,49	38,10	09:00-09:30	0,50	x	x
7.3.1.3	V	16	90,31	39,00	39,64	09:30-12:00	2,50	10:00-10:30	0,5
7.3.1.4	JV	15	<b>98,84</b>	41,48	40,95	10:00-13:00	3,00	11:00-12:30	1,5
7.3.1.5	J	13	96,37	<b>42,60</b>	<b>41,30</b>	10:30-14:00	<b>3,50</b>	11:00-12:30	1,5
7.3.1.6	JZ	6	98,32	38,31	38,93	11:30-13:30	2,00	12:00-12:30	0,5
7.3.1.7	Z	5	85,81	35,01	36,54	12:00-13:30	1,50	x	x
7.3.1.8	SZ	168	81,87	36,77	35,21	12:00-12:30	0,50	x	x

*tab. 7.3 Přehled povrchových teplot v oblasti s nejvyšší dosaženou povrchovou teplotou*

## Nejvyšší povrchová teplota

Z provedených simulací jasně vyplývá významný vliv orientace přilehlé fasády. Rozdíl mezi nejvyšší a nejnižší hodnotou maximálních dosažených povrchových teplot činí 16,97 K. Nejvyšší vypočítaná hodnota povrchové teploty přesahuje dlouhodobou teplotní odolnost EPS (80°C) o 18,74 K a je pouze o 1,36 K nižší než teplotní odolnost krátkodobá (100°C). Navzdory předpokladům nevychází maximální hodnota nejvyšší povrchové teploty u varianty s orientací na jih, ale na jihovýchod. Rozdíl v nejvyšší teplotě mezi orientací na čistý jih a na jihovýchod činí 2,47 K. Tento fakt může být způsoben zvoleným datem výpočtu. Z výše uvedených důvodů výběru klimatických dat byl zvolen den 9. července a ne den letní rovnodennosti připadající na 21. června.



Graf 7.1. Vliv orientace přilehlé fasády na povrchové teploty ploché

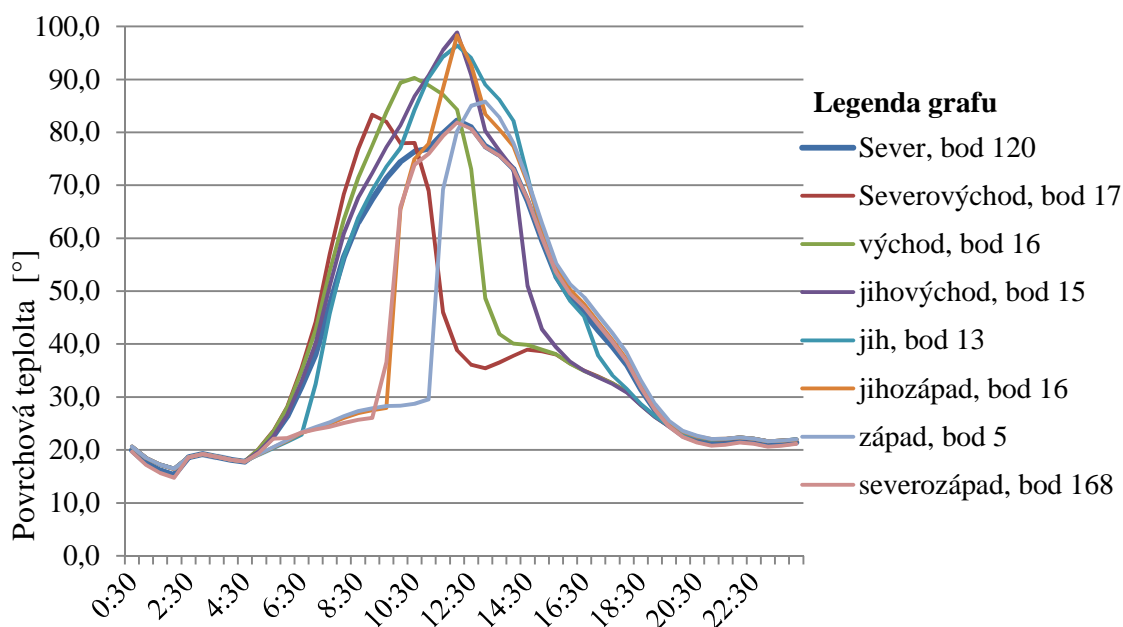
Na výše uvedeném grafu 7.1 lze spatřit závislost nejvyšší povrchové teploty a průměrné povrchové teploty na orientaci. Maxima těchto dvou veličin se ovšem nevyskytují ve stejném časovém úseku.

## Časový interval expozice krytiny povrchovým teplotám nad 80 °C

Z výše uvedené tabulky 7.3 lze vyčíst překročení dlouhodobé teplotní odolnosti EPS činící 80°C u všech řešených variant. Teplota nad 80°C však je u varianty s orientací sever, severovýchod a severozápad překročena pouze na dobu přibližně půl hodiny. U varianty 7.3.1.3 až 7.3.1.6 (orientace fasády východ, jihovýchod, jih a jihozápad) je již teplotní odolnost EPS překročena déle než na dvě hodiny. U orientace fasády na jih toto překročení již trvá tři a půl hodiny. Delší expozice střešní krytiny teplotám nad 90°C se projeví pouze u varianty 7.3.1.4 (jihovýchod) a 7.3.1.5 (jih), zde byla tato hranice překročena po dobu 90 minut.

### Nejkritičtější varianta pro dosažení maximálního teplotního namáhání

Z hodnot uvedených v *tabulce 7.3* nelze zcela jasně určit nejkritičtější variantu orientace přilehlé fasády vzhledem k tomu, že nejvyšší teplota nebyla dosažena u varianty s nejdelší expozicí teplotám přesahující hranici dlouhodobé teplotní odolnosti EPS. Také nejvyšší hodnoty průměrné povrchové teploty v řešené části nebylo dosaženo u varianty s maximální povrchovou teplotou. Vodítkem pro určení nejkritičtější varianty je právě hodnota průměrné povrchové teploty a délka expozice. Nejvyšší povrchová teplota může být dosažena pouze ve velice krátkém intervalu, zatímco hodnota průměrné teploty udává rozložení teploty v rámci celého dne a je tedy významnější.

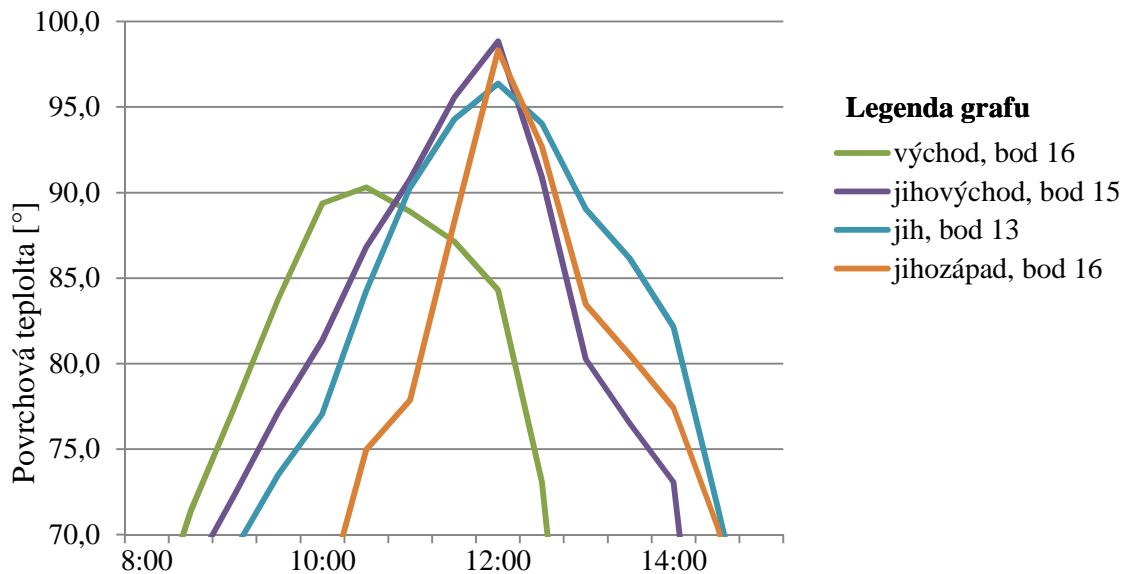


Graf 7.2. Vliv orientace přilehlé fasády na povrchové teploty ploché střechy v průběhu modelové dne 9. července, bezmračná obloha

Na výše uvedeném grafu lze jasně spatřit časový posun teplotního namáhání nejkritičtějšího pole výpočtové sítě v závislosti na orientaci přilehlé fasády. Na nejvyšší povrchovou teplotu nejdříve dosáhne střešní krytina s přilehnutou fasádou orientovanou na severovýchod, poté varianta s východní orientací fasády. U variant 7.3.1.4 až 7.3.1.6 (orientace jihovýchod až jihozápad) je maxima dosaženo v pravé poledne. Časový posun průběhu povrchových teplot odpovídá předpokladu o pohybu Slunce a odrazu slunečního záření od zasklené výplně otvoru.

Pro volbu nejkritičtější varianty orientace je nutno kvantifikovat celkový vliv výše povrchové teploty v závislosti na délce trvání. U níže uvedeného detailu *grafu 7.3* lze spatřit nejasnost ve významu průběhu teplot u orientací fasády východ, jihovýchod, jih a jihozápad. Maximální teploty (98,84°C) je dosaženo u orientace jihovýchod. Druhá nejvyšší teplota (98,32°C) je dosažena u varianty s orientací fasády na jihozápad.

Nejdéle je ovšem překročen dlouhodobá teplotní odolnost u varianty s jižní orientací fasády (3,5 hodin).



Graf 7.3. Detail grafu průběhu povrchových teplot

Pro kvantifikaci dopadu tepelného zatížení povrchu střešní krytiny jsem zvolil porovnání sumy tepelného zatížení. Pro postup jsem zvolil vypočet založený na určení plochy pod křivkou průběhu povrchových teplot s dolní hranicí 80°C. Pro výpočet byly vybrány varianty s nejdéle trvajících vysokými povrchovými teplotami (varianta 7.3.1.5 až 7.3.1.8). Přiřadil jsem rozměrovou jednotku [m] k čase [hod] a k teplotě [°C]. Výsledná plocha má jednotku m<sup>2</sup> nebo °C · hod. Také by bylo možno vypočítané body proložit křivkou vyššího řádu a vypočítat plošný integrál z této křivky. Vzhledem k charakteru výpočtu usuzuji, že zjednodušená metoda určení celkového tepelného zatížení bude dostatečně přesná.

#### Výsledné plochy pod křivkou

$\Omega_{\text{východ}}$	24,47m <sup>2</sup> (°C · hod)
$\Omega_{\text{jihovýchod}}$	39,34m <sup>2</sup> (°C · hod)
$\Omega_{\text{jih}}$	37,58m <sup>2</sup> (°C · hod)
$\Omega_{\text{jihozápad}}$	24,47m <sup>2</sup> (°C · hod)

Vzhledem k získaným hodnotám z dynamických simulací a malému rozdílu mezi výslednou plochou tepelné zátěže u varianty jih a jihovýchod (rozdíl 4,5%), který může být způsoben velkým časovým intervalem výpočtu volím za **nejkritičtější variantu 7.3.1.5 s orientací přilehlé fasády na jih.**

### Zobrazení průběhu teplot při různých orientacích fasády a ve stejný čas

Pro grafické zobrazení průběhu povrchových teplot v rámci celého dne je vybral po ukázkou dvou variant orientace fasády při stejné hodině s diametrálně jinými výsledky. Nejlepším způsobem prezentace různých vlivů na průběh povrchových teplot je zajištění série snímků nebo vytvoření videa. V této tištěné práci uvedu pouze pár snímků s popisem.

32,2	32,1	31,9	31,9	31,9	31,9	31,9	31,5	31,6	31,3	31,4	31,1	31,0	31,0	31,3	31,4	31,8	31,8	31,9	32,2	32,2	32,2	32,2	32,2
37,0	37,0	37,0	37,0	37,0	37,1	36,9	36,9	36,9	36,5	36,5	36,5	36,4	36,4	36,6	36,6	36,8	36,9	36,9	37,0	37,2	37,2	37,2	37,2
56,5	56,5	56,5	56,5	56,6	56,5	56,3	56,3	56,3	56,0	56,0	56,0	56,2	56,1	56,1	56,2	56,4	56,4	56,4	56,4	56,5	56,6	56,6	56,6
67,7	67,7	67,7	67,7	67,7	67,5	67,5	67,5	67,5	67,4	67,2	67,2	67,3	67,5	67,4	67,3	67,4	67,5	67,5	67,5	67,5	67,5	67,7	67,7
67,6	67,6	67,6	67,6	67,6	67,4	67,4	67,5	67,5	67,3	67,2	67,3	67,4	67,4	67,4	67,4	67,4	67,5	67,5	67,5	67,5	67,5	67,5	67,5
67,4	67,4	67,4	67,4	67,3	67,3	67,3	67,3	67,3	67,2	67,1	67,2	67,2	67,2	67,2	67,2	67,2	67,3	67,3	67,3	67,3	67,3	67,2	67,2
67,4	67,4	67,4	67,3	67,2	67,2	67,2	67,2	67,2	67,2	67,1	67,2	67,2	67,2	67,2	67,2	67,2	67,3	67,3	67,2	67,2	67,2	67,2	67,2
67,3	67,3	67,3	67,1	67,1	67,1	67,1	67,1	67,1	67,1	67,1	67,1	67,1	67,1	67,1	67,0	67,0	67,1	67,2	67,2	67,1	67,1	67,1	67,1
67,1	67,1	67,0	67,0	67,0	67,0	67,0	67,0	67,0	67,1	67,0	67,0	67,0	66,9	66,9	66,9	66,9	67,0	67,1	67,1	67,1	67,0	67,0	67,0
67,1	67,0	66,9	66,9	66,9	66,9	66,9	66,9	66,9	67,1	67,0	66,9	66,9	66,9	66,9	66,9	66,9	67,0	67,0	67,0	67,0	67,0	67,0	66,9
67,0	66,9	66,9	66,9	66,9	66,9	66,9	66,9	67,0	67,0	66,9	66,9	66,9	66,9	66,9	66,9	66,9	67,0	67,0	67,0	67,0	67,0	67,0	66,9
66,9	66,9	66,9	66,9	66,8	66,8	66,8	66,9	66,9	66,9	66,9	66,8	66,8	66,8	66,8	66,8	66,8	66,8	66,9	66,9	66,9	66,9	66,9	66,9

Obr. 7.6 varianta 7.3.1.1 Orientace fasády sever, 9:00

Na prvním obrázku 7.6 můžeme spatřit vliv stínění přilehlé části budovy. Při severní orientaci fasády a výšce fasády 3m od vnějšího povrchu střešního pláště dosahuje zastínění v 9 hodin dopoledne do vzdálenosti 0,75m. Teplotní rozdíl mezi zastíněnou a osluněnou plochou činí 36,5°C.

75,9	75,9	75,9	75,9	75,5	74,2	74,7	80,1	80,5	79,6	78,7	79,1	80,0	79,7	74,5	72,3	72,8	74,3	74,3	74,3	74,7	75,6	75,9	75,9
75,1	75,1	75,1	74,0	73,7	74,0	76,5	81,0	80,0	80,0	78,9	79,6	79,3	78,6	72,2	72,9	72,3	73,5	74,0	74,0	74,0	74,0	74,3	74,9
74,6	74,4	73,7	73,4	73,6	74,4	79,8	80,3	79,9	80,8	80,2	79,3	78,6	74,7	71,9	72,8	72,8	73,0	73,9	73,7	73,7	73,7	73,7	73,7
73,1	72,5	72,5	72,6	73,3	73,5	80,8	79,5	80,3	80,3	80,3	78,1	77,9	70,4	72,1	72,1	72,1	72,1	73,3	73,4	73,2	72,8	72,8	72,8
72,3	72,3	72,3	73,1	73,3	77,0	80,5	80,0	80,0	79,9	79,5	78,3	75,7	70,0	71,6	71,6	71,6	71,6	72,0	73,1	73,1	73,1	72,9	72,6
71,4	71,4	71,7	72,4	72,6	76,9	76,3	75,6	75,6	75,3	74,6	74,6	71,6	70,4	71,0	71,0	71,0	71,0	71,0	71,0	72,2	72,2	72,2	72,2
70,8	71,2	72,0	72,3	72,7	72,7	71,5	71,5	71,5	70,5	70,5	70,5	69,9	70,2	70,5	70,5	70,5	70,5	70,5	71,0	71,6	71,6	71,6	71,6
70,3	70,9	71,3	71,7	71,8	71,7	70,6	70,6	70,3	70,0	70,0	70,0	69,7	70,2	70,2	70,2	70,2	70,2	70,2	70,2	70,2	71,2	71,2	71,2
69,9	70,2	70,2	70,1	70,2	70,1	69,8	69,8	69,8	69,8	69,8	69,8	70,0	70,0	69,8	69,8	69,8	69,8	69,8	69,8	69,8	70,2	70,6	70,6
69,8	69,8	69,8	69,7	69,7	69,1	69,0	69,3	69,4	69,4	69,4	69,4	69,8	70,0	69,4	69,4	69,4	69,4	69,4	69,4	69,4	70,2	70,2	70,2
69,5	69,5	69,5	69,5	69,6	68,7	68,7	68,7	68,7	69,0	69,1	69,1	69,7	69,9	69,3	69,1	69,1	69,1	69,1	69,1	69,1	69,5	69,9	69,5
69,2	69,2	69,2	69,2	68,9	68,3	68,3	68,3	68,3	68,3	68,3	68,3	68,4	69,4	69,4	69,2	68,7	68,7	68,7	68,7	68,7	68,6	68,9	68,9

Obr. 7.7 varianta 7.3.1.4 Orientace fasády jihovýchod, 9:00

Z obrázku 7.7 můžeme vyčíst dosah vlivu odraženého slunečního záření od zasklené plochy. Při výšce výplně otvoru 2,25m a jihovýchodní orientaci fasády činí tento dosah 1,50m. Rozdíl povrchové teploty mezi částí s dopadajícím odraženým slunečním zářením a bez vlivu odrazu od zasklené výplně činí 11,9°C. Maximální povrchová teplota při této konfiguraci dosahuje hodnoty 81,0°C.

**Zobrazení průběhu teplot v různém čase při stejné orientaci fasády**

71,3	71,3	71,3	71,3	70,8	69,6	71,7	75,7	75,1	74,1	73,2	73,6	74,5	73,3	67,8	67,7	68,2	69,6	69,6	69,6	70,1	70,9	71,3	71,3	
70,5	70,5	70,5	69,4	69,2	70,2	74,1	75,5	74,6	74,6	73,4	74,0	72,9	69,8	67,5	68,2	67,7	68,9	69,4	69,4	69,4	69,4	69,6	70,2	
70,0	69,7	69,1	68,9	69,9	73,0	75,4	74,9	74,4	75,3	74,7	73,7	70,7	68,0	67,2	68,2	68,2	68,3	69,2	69,0	69,0	69,0	69,0	69,0	
68,5	68,0	68,1	68,1	71,2	72,2	75,4	74,1	74,9	74,8	74,7	70,2	69,1	65,8	67,5	67,5	67,5	67,5	68,7	68,8	68,6	68,2	68,2	68,2	
67,8	67,9	67,9	71,0	72,0	73,6	75,1	74,6	74,4	74,4	72,4	69,6	68,0	65,5	67,0	67,0	67,0	67,0	67,4	68,5	68,5	68,5	68,3	68,0	
67,0	67,0	68,1	71,1	71,3	73,6	72,9	72,1	72,1	71,1	68,0	68,0	66,0	65,8	66,5	66,5	66,5	66,5	66,5	67,6	67,6	67,6	67,6	67,6	
66,4	67,6	70,8	71,0	71,4	71,4	70,1	70,1	70,1	65,9	65,9	65,9	65,3	65,6	65,9	65,9	65,9	65,9	65,9	66,5	67,1	67,1	67,1	67,1	
65,9	68,1	68,5	68,9	69,0	68,8	67,7	67,7	66,6	65,5	65,5	65,5	65,2	65,7	65,7	65,7	65,7	65,7	65,7	66,7	66,7	66,7	66,7	66,7	
65,6	65,8	65,8	65,7	65,7	65,6	65,3	65,3	65,3	65,3	65,3	65,3	65,5	65,5	65,3	65,3	65,3	65,3	65,3	65,3	65,3	65,7	66,1	66,1	66,1
65,3	65,3	65,3	65,2	65,2	64,6	64,5	64,8	64,9	64,9	64,9	64,9	65,3	65,5	64,9	64,9	64,9	64,9	64,9	64,9	64,9	65,7	65,7	65,7	65,7
65,1	65,1	65,1	65,1	65,1	64,2	64,2	64,2	64,2	64,5	64,6	64,6	65,2	65,4	64,8	64,6	64,6	64,6	64,6	64,6	64,6	65,0	65,4	65,0	65,0
64,7	64,7	64,7	64,7	64,5	63,8	63,8	63,8	63,8	63,8	63,8	63,8	63,9	64,9	64,9	64,7	64,2	64,2	64,2	64,2	64,2	64,2	64,1	64,4	64,4

*Obr. 7.8 varianta 7.3.1.4 Orientace fasády jihovýchod, 8:30*

83,8	83,8	83,8	83,8	83,4	82,2	82,2	82,0	86,7	90,4	89,6	90,0	90,8	89,9	86,8	83,4	82,3	82,3	82,3	82,7	83,5	83,8	83,8	83,8
83,1	83,1	83,1	82,1	81,8	81,8	81,9	81,2	86,2	88,5	89,8	90,4	90,4	91,0	85,8	83,0	81,7	82,1	82,1	82,1	82,1	82,1	82,3	82,8
82,6	82,4	81,8	81,5	81,5	81,5	81,7	80,6	86,1	88,0	88,7	87,9	87,9	87,8	88,4	83,4	83,4	81,2	81,9	81,8	81,8	81,8	81,8	81,8
81,2	80,7	80,7	80,7	80,8	80,8	81,0	82,8	86,4	86,4	86,4	85,1	85,1	84,9	86,3	80,4	80,4	80,4	81,4	81,5	81,3	81,0	81,0	81,0
80,5	80,5	80,5	80,6	80,6	80,7	80,7	80,3	80,3	80,3	80,3	79,6	78,9	78,6	79,9	79,9	79,9	79,9	80,3	81,2	81,2	81,2	81,0	80,8
79,7	79,7	79,7	79,8	79,9	80,6	80,1	79,5	79,5	79,5	79,5	79,5	78,4	78,9	79,5	79,5	79,5	79,5	79,5	80,4	80,4	80,4	80,4	80,4
79,1	79,3	79,4	79,6	80,0	80,0	79,0	79,0	79,0	78,9	78,9	78,9	78,4	78,7	78,9	78,9	78,9	78,9	78,9	79,4	79,9	79,9	79,9	79,9
78,7	78,8	79,2	79,5	79,6	79,6	78,6	78,6	78,6	78,6	78,6	78,6	78,3	78,7	78,7	78,7	78,7	78,7	78,7	79,6	79,6	79,6	79,6	79,6
78,4	78,6	78,6	78,6	78,7	78,6	78,3	78,3	78,3	78,3	78,3	78,3	78,5	78,5	78,3	78,3	78,3	78,3	78,3	78,7	79,1	79,1	79,1	79,0
78,3	78,3	78,3	78,3	78,3	77,7	77,7	77,9	78,0	78,0	78,0	78,0	78,4	78,5	78,0	78,0	78,0	78,0	78,0	78,0	78,0	78,7	78,7	78,7
78,1	78,1	78,1	78,1	78,1	77,4	77,4	77,4	77,4	77,6	77,7	77,7	78,3	78,4	77,9	77,7	77,7	77,7	77,7	77,7	77,7	78,1	78,4	78,1
77,8	77,8	77,8	77,8	77,6	77,0	77,1	77,1	77,1	77,1	77,1	77,2	78,0	78,0	77,8	77,4	77,4	77,4	77,4	77,4	77,4	77,3	77,5	77,5

*Obr. 7.9 varianta 7.3.1.4 Orientace fasády jihovýchod, 10:30*

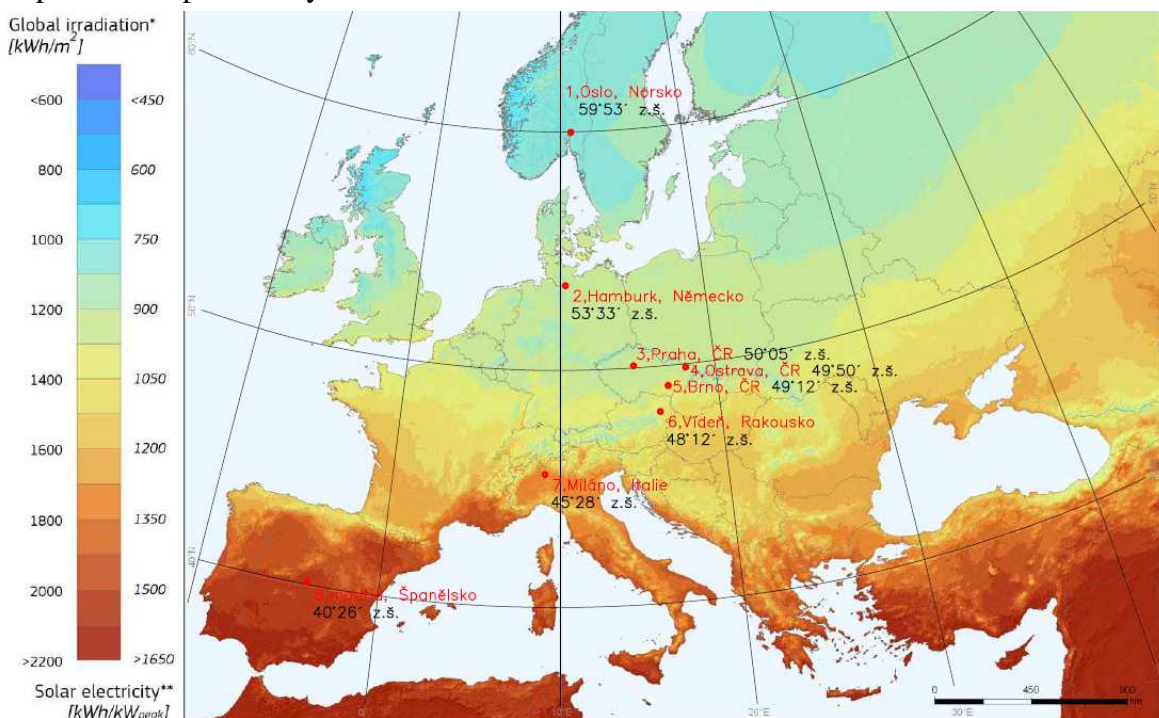
86,9	86,9	86,9	86,9	86,6	85,8	85,8	85,6	84,8	85,6	85,1	94,9	98,5	98,5	98,1	98,8	98,5	98,8	89,2	85,9	86,2	86,7	86,9	86,9
86,4	86,4	86,4	85,7	85,5	85,5	85,5	85,0	84,5	85,2	85,2	85,6	85,6	85,6	86,1	86,4	85,4	85,5	85,7	85,7	85,7	85,7	85,9	86,2
86,1	85,9	85,5	85,3	85,3	85,3	84,5	84,4	85,3	85,3	84,8	84,7	84,7	85,3	85,7	85,7	85,1	85,6	85,5	85,5	85,5	85,5	85,5	85,5
85,1	84,8	84,8	84,8	84,8	84,8	84,0	84,6	84,6	84,6	83,7	83,7	83,7	84,7	84,6	84,6	84,6	85,2	85,3	85,2	85,0	85,0	85,0	85,0
84,7	84,7	84,7	84,7	84,7	84,6	84,3	84,3	84,3	84,3	83,8	83,4	83,4	84,3	84,3	84,3	84,3	84,5	85,1	85,1	85,1	85,1	85,0	84,9
84,1	84,1	84,1	84,1	84,2	84,6	84,2	83,8	83,8	83,8	83,8	83,2	83,5	83,9	83,9	83,9	83,9	83,9	84,6	84,6	84,6	84,6	84,6	84,6
83,7	83,8	83,9	84,0	84,3	84,3	83,6	83,6	83,6	83,6	83,6	83,2	83,4	83,6	83,6	83,6	83,6	83,6	83,9	84,2	84,2	84,2	84,2	84,2
83,4	83,5	83,7	83,9	84,0	84,0	83,3	83,3	83,3	83,3	83,3	83,1	83,4	83,4	83,4	83,4	83,4	83,4	83,4	84,0	84,0	84,0	84,0	84,0
83,2	83,3	83,4	83,3	83,4	83,3	83,1	83,1	83,1	83,1	83,1	83,3	83,3	83,1	83,1	83,1	83,1	83,1	83,1	83,1	83,4	83,6	83,6	83,6
83,1	83,1	83,1	83,1	83,1	82,7	82,7	82,8	82,9	82,9	82,9	82,9	83,2	83,3	82,9	82,9	82,9	82,9	82,9	82,9	83,4	83,4	83,4	83,4
83,0	83,0	83,0	83,0	83,0	82,5	82,5	82,5	82,5	82,7	82,7	82,7	83,1	83,2	82,9	82,7	82,7	82,7	82,7	82,7	83,0	83,2	83,0	83,0
82,8	82,8	82,8	82,8	82,6	82,3	82,3	82,3	82,3	82,3	82,3	82,4	82,9	82,9	82,8	82,5	82,5	82,5	82,5	82,5	82,5	82,4	82,6	82,6

*Obr. 7.10 varianta 7.3.1.4 Orientace fasády jihovýchod, 12:00*



### 7.3.2 Vliv umístění stavby dle souřadnice zeměpisné šířky

V této subkapitole bude řešen vliv umístění modelové stavby v rámci České republiky a také vybraná zahraniční města. Byla vybrána čtyři evropská zahraniční města a dva města tuzemská. Komplexní klimatická data jsou zpracována pouze pro dva česká města: Praha a Ostrava. Při zjišťování vlivu orientace fasády byly použity klimatická data s označením Brno. Po bližším prostudování těchto dat bylo ovšem zjištěno zavádějící označení těchto klimatických dat, ve skutečnosti se jedná o bratislavská klimatická data, která se používají v DesignBuilderu pro výpočet jihomoravských měst. Výběr měst byl proveden v rámci rovnoměrného rozložení hodnot souřadnic zeměpisné šířky mezi 40 a 60 stupněm zeměpisné šířky.



Obr. 7.11 Mapa globální zářeni se zobrazením posuzovaných měst [69]

Geometrie budovy, skladby konstrukcí i prosklená výplň stavebního otvoru zůstává stejná. Vzhledem k velkému nároku na počítačový výkon při dlouhodobé dynamické simulaci (v tomto případě čtyři měsíce) jsem se rozhodl snížit počet řešených ploch výpočtové sítě z původních 288 na 32. Tyto body mají v původní výpočtové sítě označení 4 až 19 a 28 až 43 jsou umístěny v první a druhé řadě výpočtové sítě přiléhající k fasádě a prosklené ploše. V těchto bodech jsou dle předchozí subkapitoly při jižní orientaci fasády předpokládány maximální hodnoty povrchové teploty.

Ze získaných informací v kapitole 9.4.1 bude nastavena orientace přilehlé fasády na jih. V první řadě bude společně posouzen oblast výpočtové sítě označený bod 13. Na tomto bodu byla dosažena maximální povrchová teplota a nejdelší časový interval překročení dlouhodobé teplotní odolnosti EPS.

Vzhledem k rozličným klimatickým podmínkám pro každé řešené město bude simulace provedena v intervalu předpokládaného největšího teplotního zatížení. Tento interval byl zvolen pro letní období od 1. května do 31. srpna. U každé posuzované varianty bude vybrán den s největším tepelným namáháním zvolené oblasti ploché střechy s přihlédnutím k výši průměrné teploty zvolené oblasti a doby trvání intervalu s překročením teplotní odolnosti.

Označení varianty	Popis varianty	Severní zem. šířka	Datum dosažení maximální povrchové teploty	Nejvyšší povrchová teplota řešeného místa	Průměrná denní povrchová teplota na řešeném bodě	Průměrná čtyřměsíční povrchová teplota na řešeném bodě	Časový interval překročení teploty 80°C	Délka časového intervalu překročení teploty 80°C	Časový interval překročení teploty 90°C	Délka časového intervalu překročení teploty 90°C
	[-]	[°]	[-]	[°]	[°]	[°]	[-]	[hod]	[-]	[hod]
7.3.2.1	Oslo	59,88	20.6.	79,12	37,57	24,22	x	x	x	x
7.3.2.2	Hamburk	53,55	2.6.	89,44	39,35	22,57	10:00-12:30	2,50	x	x
7.3.2.3	Praha	50,08	6.6.	<b>91,83</b>	<b>39,46</b>	23,00	11:30-15:00	<b>3,50</b>	12:30-13:30	1,0
7.3.2.4	Ostrava	49,83	6.6.	89,79	38,31	<b>24,53</b>	11:30-14:00	2,50	x	x
7.3.2.5	Bratislava	48,13	9.7.	96,33	42,49	29,13	10:30-14:00	<b>3,50</b>	11:00-12:30	1,5
7.3.2.6	Vídeň	48,20	29.6.	92,52	42,04	27,28	9:30-13:00	<b>3,50</b>	10:30-11:00	0,5
7.3.2.7	Milano	45,47	17.6.	97,54	37,20	30,17	11:30-14:30	3,00	12:00-14:00	1,0
7.3.2.8	Madrid	40,43	18.7.	<b>109,60</b>	<b>43,76</b>	<b>34,67</b>	11:00-14:30	<b>3,50</b>	12:00-13:30	<b>1,5</b>

Tab. 7.4 Shrnutí výsledných povrchových teplot s vlivem umístění modelu

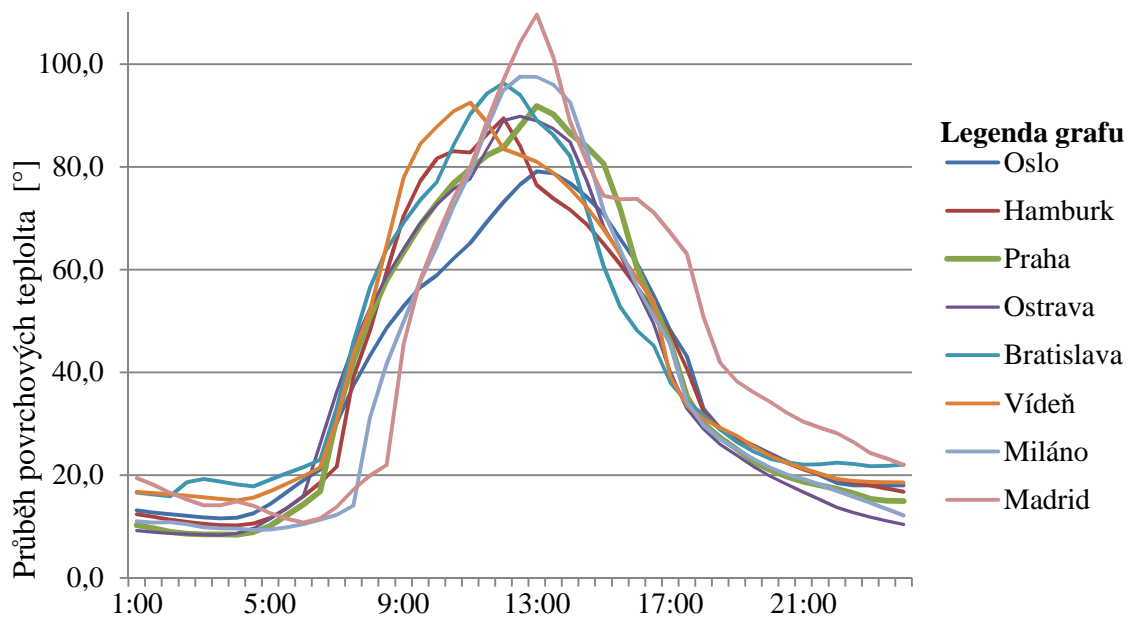
Popis varianty	Nejvyšší povrchová teplota řešeného místa	Absolutní rozdíl oproti maximální povrchové teplotě	Procentuální rozdíl oproti maximální povrchové teplotě	Průměrná denní povrchová teplota na řešeném bodě	Absolutní rozdíl oproti průměrné denní povrchové teplotě	Procentuální rozdíl oproti průměrné povrchové teplotě
[-]	[°]	[°]	[%]	[°]	[°]	[%]
Oslo	79,12	<b>30,48</b>	<b>38,52</b>	37,57	6,19	16,47
Hamburk	89,44	20,17	22,55	39,35	4,41	11,20
Praha	91,83	17,77	19,35	39,46	4,29	10,88
Ostrava	89,79	19,81	22,07	38,31	5,45	14,22
Bratislava	96,33	13,28	13,78	42,49	1,27	2,98
Vídeň	92,52	17,08	18,47	42,04	1,71	4,08
Milano	97,54	12,06	12,37	37,20	<b>6,56</b>	<b>17,63</b>
Madrid	<b>109,60</b>	x	x	<b>43,76</b>	x	x

Tab. 7.5 Porovnání dosažených povrchových nejvyšších a průměrných teplot

Z výše uvedené tabulky lze vyčíst jasnou závislost mezi vzrůstající vzdáleností od rovníku a poklesem dosažené maximální a průměrné povrchové teploty. Teplotní rozdíl mezi nejseverněji umístěným modelem (v Oslu) a nejjížnějším umístěním (v Madridu) činí 30,48°C. Maximální procentuální rozdíl mezi maximálními teplotami činí 38,5%.



Při reálném umístění této stavby do jižnějších částí Evropy, v tomto příkladu do Madridu by došlo dokonce k překročení krátkodobé teplotní odolnosti EPS, která činí 100 °C. Překvapivým zjištěním je fakt, že v případě varianty 9.4.2.7 (Milano), u které došlo k dosažení druhé nejvyšší povrchové teploty (97,54°C) bylo dosaženo nejnižší průměrné denní povrchové teploty. Tento fakt je vyvolán mírnou oblačností pro výpočtový den 17. června. Tento fakt lze vyčíst z níže uvedeného grafu denních průběhů povrchových teplot.

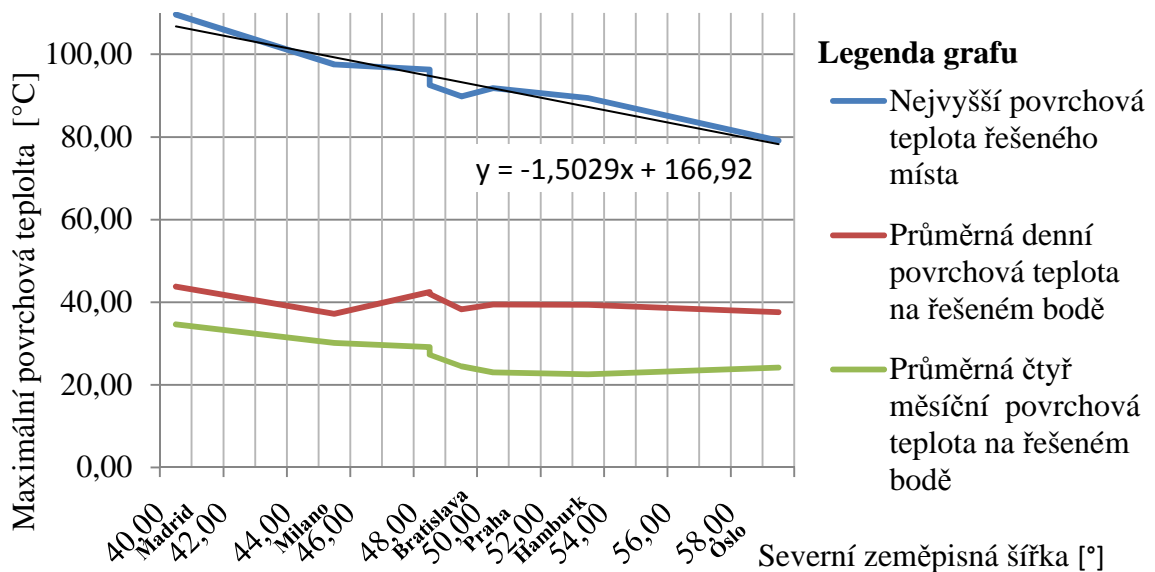


Graf 7.4 Vliv geografického umístění stavby na průběhu povrchové teploty ploché střechy

Na výše uvedeném grafu 7.4 lze pozorovat časový posun maximálních povrchových teplot. Tento posun je způsoben různou pozicí Slunce pro jednotlivá města ve vybraných výpočtových dnech. Výpočtové dny byly vybrány jako nejkritičtější z období mezi 1. květnem a 31. srpnem.

Z grafu 7.4 lze také vyčíst rozdíl povrchových teplot v nočních a brzkých ranních hodinách, před východem Slunce. Tento rozdíl činí při porovnání povrchové teploty v nočních hodinách u modelu umístěného v Ostravě a v Madridu až 12°C. Tento významný počáteční rozdíl se projeví vlivem akumulace tepla do střešní krytiny na průběhu povrchových teplot v rámci dne.

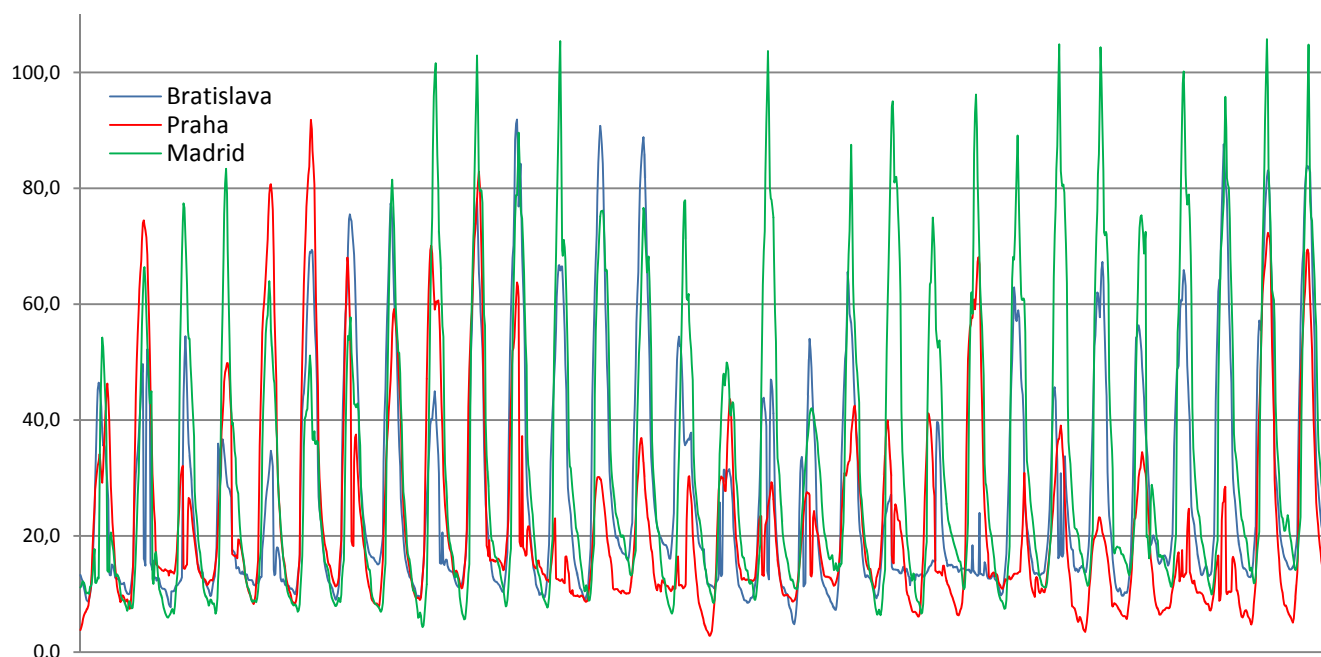
Na níže uvedeném grafu 7.5 lze sledovat závislost nejvyšší dosažené povrchové teploty na geografickém umístění modelu. Konkrétně na hodnotě severní zeměpisné šířky. Dle předpokladu lze pozorovat pokles maximální dosažené povrchové teploty při vzdalování modelu od zemského rovníku.



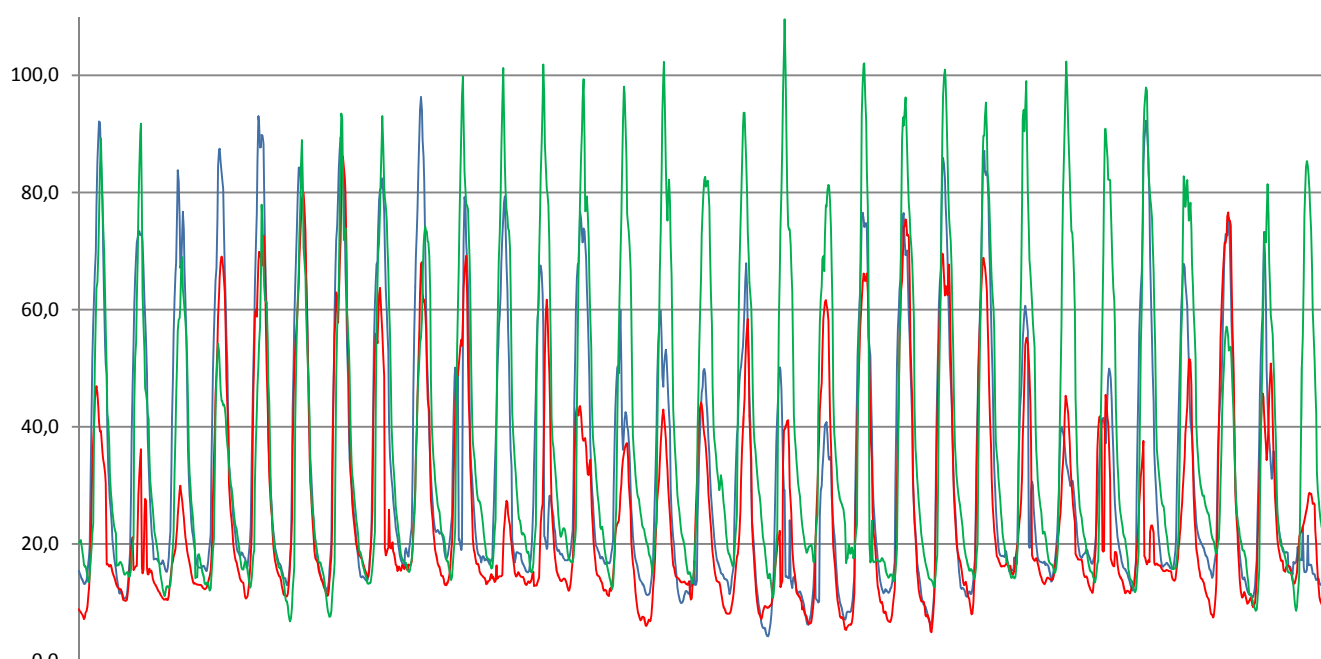
Graf 7.5. Závislost průběhu maximální a průměrné povrchové teploty na hodnotě severní zeměpisné šířky

Na grafu 7.5 může vidět přibližně lineární závislost mezi umístěním stavby a maximální výší povrchové teploty. Vypočítané body lze proložit lineární funkcí se vztahem zapsaným v grafu. Při použití toho vztahu pro interval 40° a 60° severní zeměpisné šířky zjistíme závislost odpovídající poklesu maximální povrchové teploty o 1,5°C při navýšení zeměpisné šířky o 1°. Zjednodušeně můžeme vypočítat přibližnou hodnotu nejvyšší povrchové teploty pro většinu Evropy. Při použití výše uvedeného vztahu vychází předpokládaná nejvyšší povrchová teplota pro nejsevernější české město Šluknov (51° s.z.š.) 90,3°C a pro nejjižnější české město Vyšší Brod (48°33') 94,0°C. Při umístění stejné modelu budovy (stejná geometrie, konstrukce a orientace) v rámci území České republiky může docházet přibližně k rozdílu v nejvyšší dosažené povrchové teplotě až 3,7°C. Při použití této lineární závislosti by měla být hodnota maximální povrchové teploty krytiny při umístění modelu do Brna (49°12') přibližně 93°C. Při použití klimatických dat pro Bratislavu, které používá DesignBulder při výpočtech pro Brno dosahuje maximální povrchová teplota hodnoty 96,33°C. Tento rozdíl je příliš významný a proto jsem se rozhodl používat při dalších simulacích pražská klimatická data, která ve výpočtový den 6. června vykazují největší teplotní namáhání pro střešní krytinu.

Závislost mezi průměrnými povrchovými teplotami a geografickým umístěním není natolik významný, jako je tomu v případě maximálních povrchových teplot. Průměrná povrchová teplota je významně ovlivněna teplotou vzduchu, výškou Slunce i malou oblačností. Nelze přesněji kvantifikovat vliv geografického umístění stavby na výši průměrné povrchové teploty konstrukce. Pouze obecně lze říci, že mezi 40° a 60° severní zeměpisné šířky se může průměrná povrchová teplota ploché střechy při dané konfiguraci modelu od 37,2°C (Milano) až po 43,8°C (Madrid).



graf 7.6 Průběhu povrchových teplot za měsíc červen



graf 7.7 Průběhu povrchových teplot za měsíc červenec

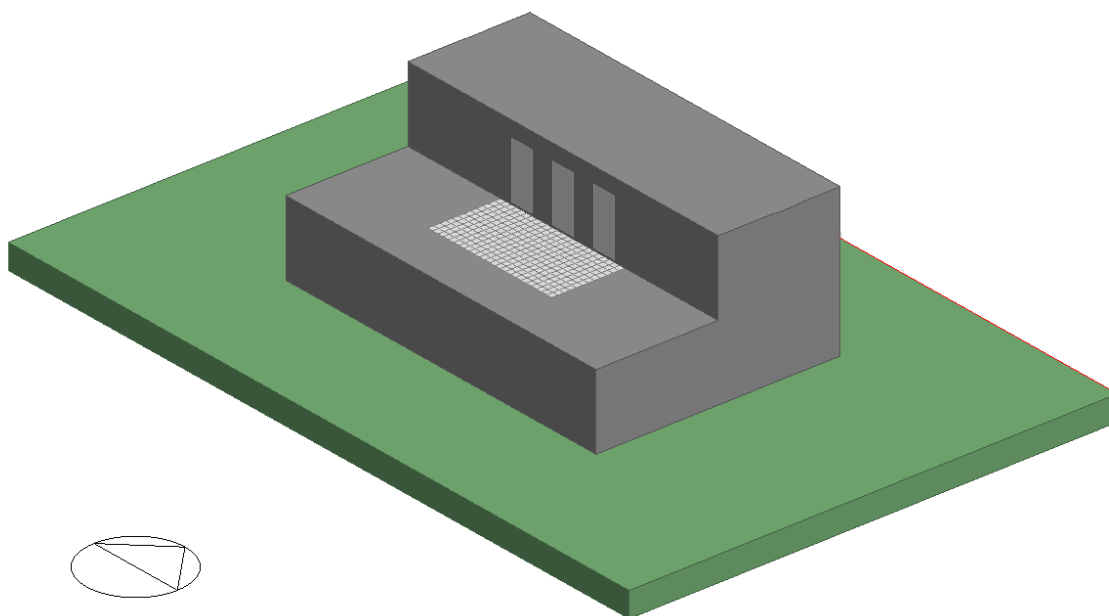
Na výše uvedených *grafech 7.6 a 7.7* je vykreslen průběh povrchových teplot nejkritičtějšího bodu. U města Bratislava se jedná o *bod 13*, u Ostravy *bod 36* a u Madridu *bod 8*. Z toho grafu lze dobře vyčíst počet dnů, při kterém byla překročena hranice dlouhodobé teplotní odolnosti EPS ( $80^{\circ}\text{C}$ ) v intervalu červen-červenec. Při umístění modelu budovy do Bratislavy je tato hranice překročena během 15 dnů, v Praze během pouhých 4 dnů a v Madridu během 42 z celkových 61 dní. Z důvodů malého počtu překročení teplotní odolnosti EPS u klimatických dat pro Prahu jsem se rozhodl vytvořit klimatická data pro Brno z naměřených dat z experimentálního modelu s doplněním některých údajů z permanentní GPS stanice TUBO fakulty stavební VUT.

### 7.3.3 Vliv velikosti a členění přilehlých zasklených ploch

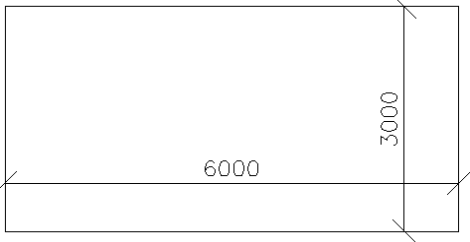
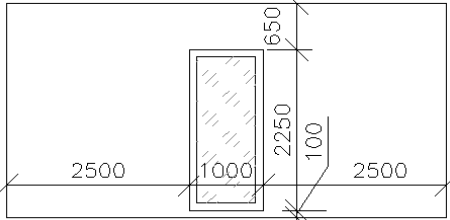
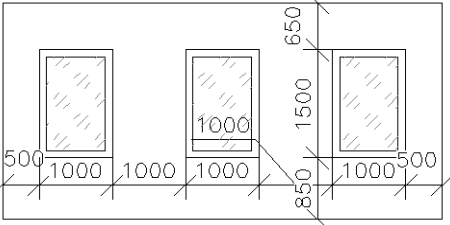
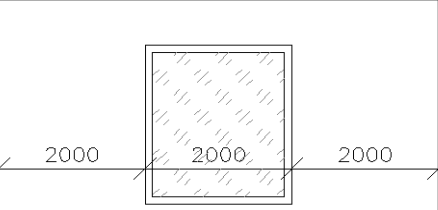
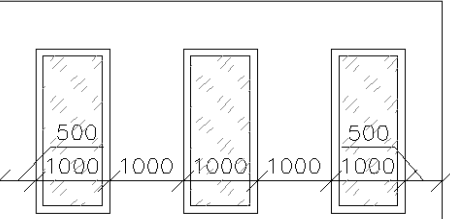
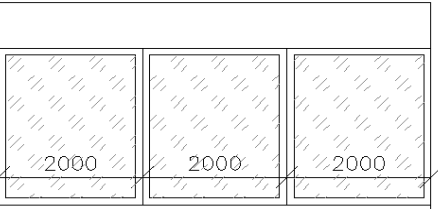
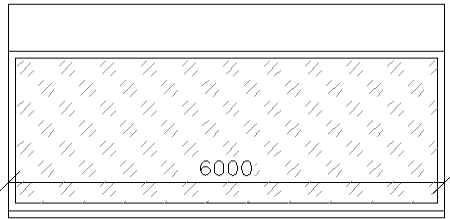
V této subkapitole budu posuzovat vliv velikosti zasklených výplní stavebního otvoru na maximální a průměrné povrchové teploty krytiny ploché střechy v blízkosti prosklení. Dle analýzy klimatických dat stanice TUBO za měsíc červenec, provedené v subkapitole 7.4.3 *Analýza sumy dopadající sluneční energie*, bylo za výpočtový den zvoleno datum 4. července. V tento den bylo zcela bezmračné počasí a suma dopadající sluneční energie dosáhla maxima za celý měsíc červenec. Pro tuto simulaci byly vypočítávané teploty na všech částech výpočtové plochy (288 bodů).

Typ zasklení a příčné rozměry rámu zůstávají stejné, jako v předchozích simulacích. Okna jsou osazena na vnější líc obvodového zdiva, na které je provedeno kontaktní zateplení ETICS tloušťky 120mm. Tato tepelná izolace tvoří vnější šířku ostění, která má vliv na množství odraženého slunečního záření od zasklených ploch a následně také na průběhu povrchových teplot střešního pláště ploché střechy. Pro řešení tohoto vlivu bylo vybráno celkem sedm variant rozměrů a členění výplní otvorů.

Na následující straně se nalézá *tabulku 7.6* s popisem posuzovaných variant a schéma velikosti a umístění zasklení.



Obr. 7.12 Vzhled modelu var. 7.3.3.5

Označení varianty	Popis varianty, rozměry ŠxV	Plocha oken	Schéma velikosti a umístění zasklených ploch
7.3.3.1	Bez zasklení	0,00 m <sup>2</sup>	
7.3.3.2	1ks 1,0x2,25m parapet 0,10m rám 0,1m	2,25 m <sup>2</sup>	
7.3.3.3	3 ks 1,0x1,5m parapet 0,85m rám 0,1m	4,50 m <sup>2</sup>	
7.3.3.4	1ks 2,0x2,25m parapet 0,10m rám 0,1m	4,50 m <sup>2</sup>	
7.3.3.5	3ks 1,0x2,25m parapet 0,10m rám 0,1m	6,75 m <sup>2</sup>	
7.3.3.6	3ks 2,0x2,25m parapet 0,10m rám 0,1m	13,5 m <sup>2</sup>	
7.3.3.7	1ks 6x2,25m parapet 0,1m rám 0,1m	13,5m <sup>2</sup>	

Tab. 7.6 schéma prosklených ploch

Označení varianta	Označení bodu s nejvyšší dosaženou teplotou [-]	Nejvyšší povrchová teplota řešeného místa [°C]	Průměrná denní povrchová teplota na řešeném bodě [°C]	Průměrná denní povrchová teplota na celém modelu [°C]	Časový interval překročení teploty 80°C [-]	Časový interval překročení teploty 80°C [hod]	Časový interval překročení teploty 90°C [-]	Časový interval překročení teploty 90°C [hod]
7.3.3.1	21	84,61	38,01	37,71	11:30-12:30	1,0	x	x
7.3.3.2	11	93,51	38,23	37,65	11:00-12:30	1,5	11:30-12:00	0,5
7.3.3.3	11	94,76	38,90	37,70	10:30-13:00	2,5	11:30-12:30	1,0
7.3.3.4	39	92,95	38,61	37,57	11:30-13:30	2,0	12:00-12:30	0,5
7.3.3.5	11	93,51	38,31	37,68	11:00-12:30	1,5	11:30-12:00	0,5
7.3.3.6	17	92,59	38,53	37,59	10:30-12:30	2,0	11:30-12:00	0,5
7.3.3.7	47	92,31	38,57	37,31	11:30-13:30	2,0	12:00-13:00	1,2

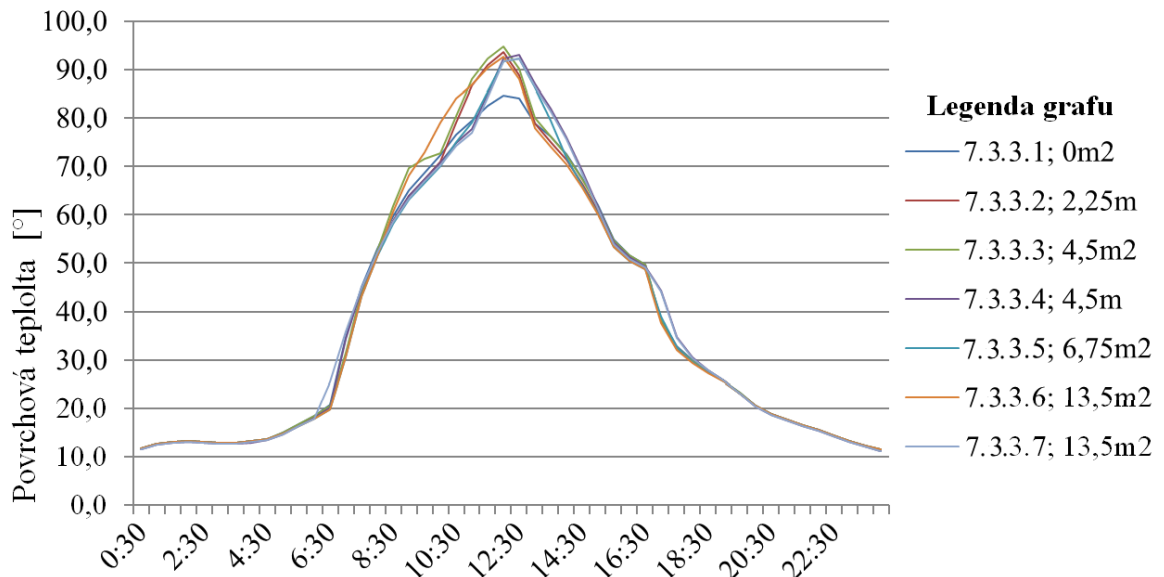
Tab. 7.7 Přehledová tabulka vlivu variant velikosti zasklení na průběhu povrchových teplot

Z výše uvedené přehledové tabulky 7.7 výsledků maximální povrchových teplot lze vyčíst hned několik překvapivých faktů. Nejvyšší povrchová teplota nebyla dosažena u varianty 7.3.3.7, ve které je uvažováno s největší prosklenou plochou, ale u varianty 7.3.3.3 s nízkými okny a s výškou parapetu 850mm. Stejně tak tomu bylo u průměrné povrchové teploty v této variantě. Dle očekávání vyšla nejnižší povrchová teplota u varianty 7.3.3.1, kde nebylo počítáno s žádným zasklením. Také u průměrné teploty na řešeném kritickém bodě bylo dosaženo právě u varianty 7.3.3.1. Velmi překvapující je ovšem dosažení maximální průměrné teploty na celé výpočtové u varianty bez zasklení.

Z těchto zjištění je jasné, že neexistuje přímá úměra mezi nejvyšší dosaženou povrchovou teplotou a velikostí zasklení. U průměrných celodenních povrchových teplot na celé výpočtové síti je maximální rozdíl 0,40°C, což činí pouze 1,06%. Tento minimální rozdíl je způsoben pouze malým a krátkodobým dosahem odraženého slunečního záření v rámci celé výpočtové sítě. Dosah vlivu odraženého záření dosahuje do druhého řádku výpočtové sítě. Tomu odpovídá vzdálenost 0,5m od přilehlé stěny a prosklených ploch. Šířka zvolené výpočtové sítě činí 3,0m. To znamená, že rozdíl ve vlivu velikosti a členění prosklených ploch se projeví pouze na přibližně 17% výpočtové plochy. Z toho důvodu uvádím ještě jednu přehledovou tabulku s uvedenými průměrnými teplotami pouze z prvních dvou řádků výpočtové sítě. Zde již průměrné teploty odpovídají předpokladu, že se zvětšující prosklenou plochou se zvyšuje úměrně průměrná povrchová teplota.

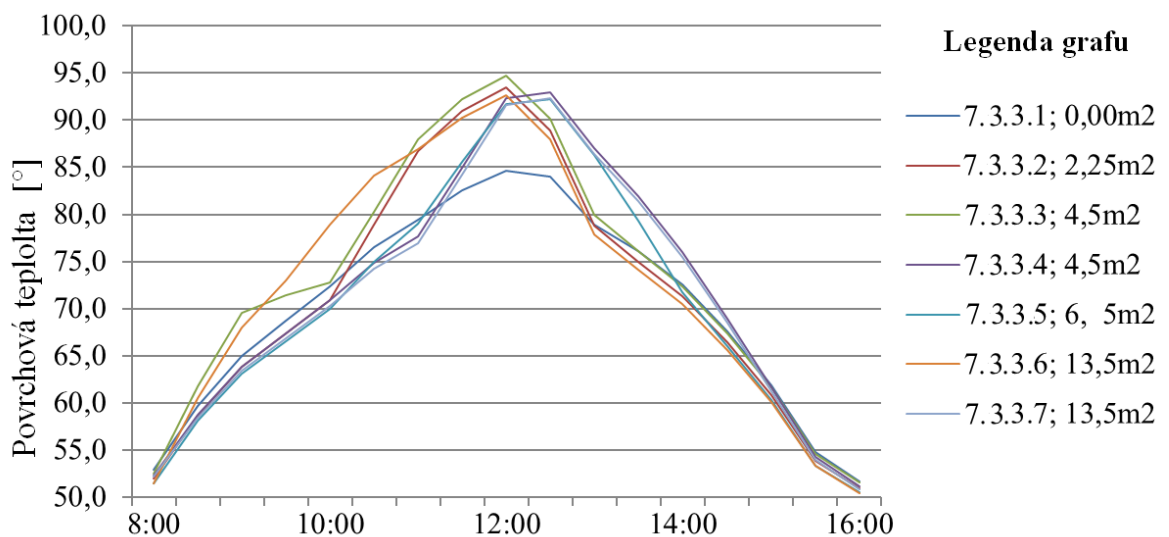
Varianta	7.3.3.1	7.3.3.2	7.3.3.3	7.3.3.4	7.3.3.5	7.3.3.6	7.3.3.7
Průměrná denní povrch. teplota na bodech 0-47	37,98	38,07	38,50	38,17	38,17	38,38	38,52

Tab. 7.8 Přehledová tabulka průměrných denních povrchových teplot na bodech 0-47



Graf. 7.8 Průběh povrchových teplot u modelu s různou velikostí prosklených ploch

Na výše uvedeném grafu jsou uvedeny jednotlivé průběhy povrchových teplot u sedmi variant velikosti a členění zasklených ploch. Lze si všimnout velmi podobných průběhů povrchových teplot u všech variant. Hodnoty se výrazně rozcházejí až mezi 9. až 15. hodinou. Tento průběh je způsoben dvěma fakty. Prvním faktem je to, že do 9. hodiny, respektive od 15. hodiny dopadají sluneční paprsky na zasklenou plochu pod takovým velkým úhlem, že se vliv jednotlivých variant neprojeví. Druhým faktorem zapříčiňující tento velmi podobný průběh teplot je relativně malá intenzita slunečního záření v těchto hodinách. Níže uvádím detail grafu průběhu povrchových teplot v časovém intervalu 8:00 až 16:00. Zde již můžeme sledovat patrné rozdíly mezi jednotlivými variantami modelu.

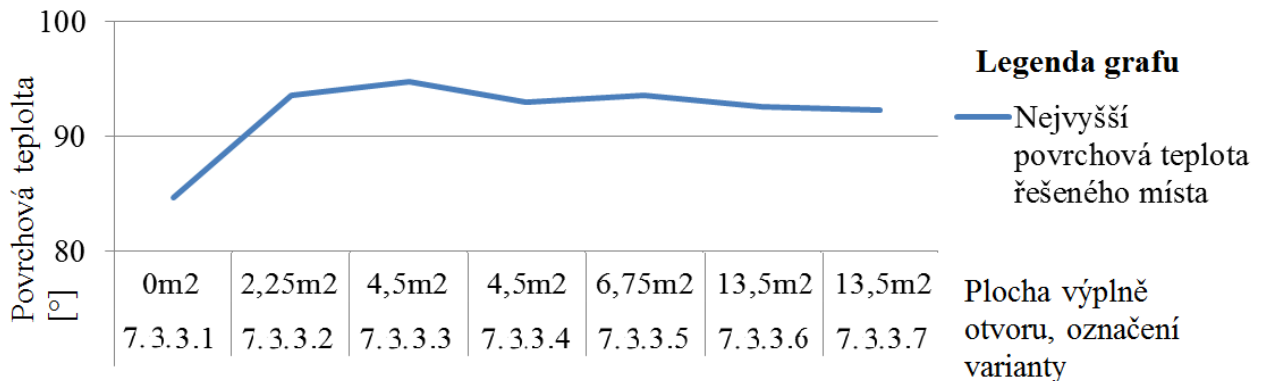


Graf. 7.9 Detail průběh povrchových teplot mezi 8:00 až 16:00

Na tomto grafu si můžeme povšimnout očekávaného průběhu povrchové teploty s nejnižší maximální teplotou u varianty 7.3.3.1 bez uvažovaných prosklených ploch. Tato teplota je závislá pouze na intenzitě slunečního záření a na mále vyzařované energii přilehlou stěnou způsobenou relativně vysokou emisivitou povrchu stěny (barva okrová, emisivita 0,90). Lze pozorovat velmi podobný průběh teplot u varianty 7.3.3.4 a 7.3.3.7.

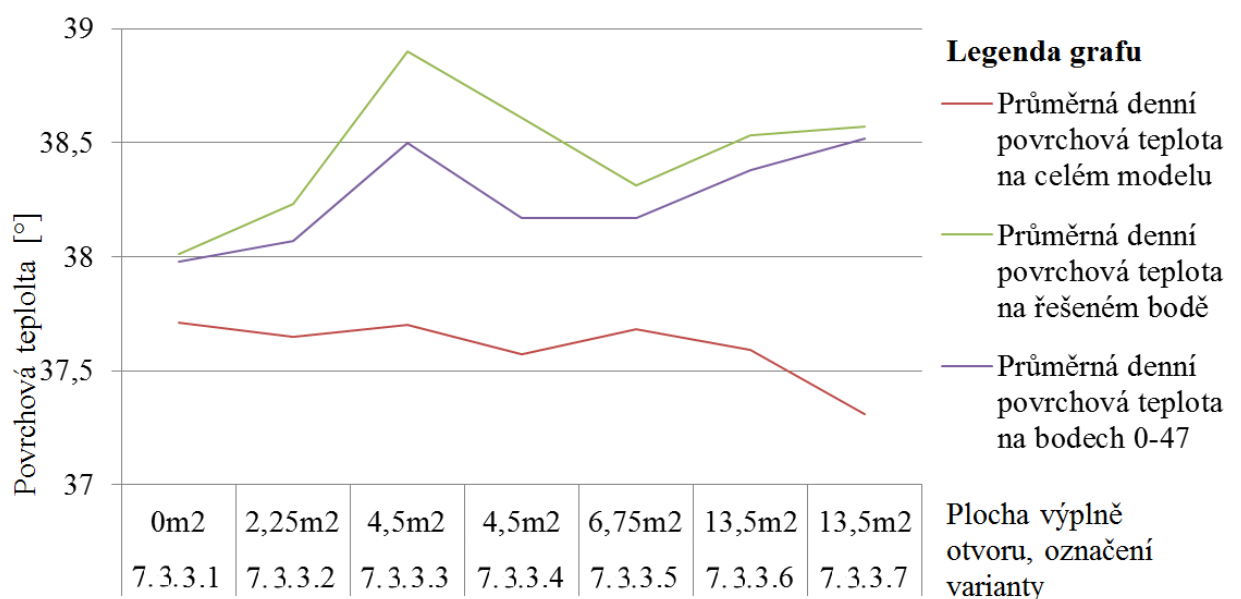


Podobnost průběhu povrchových teplot těchto variant je způsobena obdobným charakterem zasklených ploch (výška 2,25m, pouze jeden kus zasklení) a blízkými výpočtovými body s nejvyšší dosaženou povrchovou teplotou.



Graf. 7.10 Závislost maximálních povrchových teplot na velikosti prosklených ploch

Na grafu 7.10 jsou graficky zobrazeny nejvýše dosažené povrchové teploty u jednotlivých variant výpočtu. Dle předpokladů má nejmenší dosaženou hodnotu varianta bez zasklení. Avšak předpoklad přímé závislosti mezi zvětšováním zasklené plochy způsobující nárůst maximální povrchové teploty nebyl z našich dat potvrzen. Dokonce lze můžeme sledovat nepřímou závislost mezi velikostí zasklení a povrchovou teplotou. Z tohoto zjištění vyplývá překvapivý fakt, že nemůžeme předpokládat při zvětšení plochy zasklení automaticky nárůst maximálních povrchových teplot přilehlých konstrukcí. Je to způsobenou určitou synergií mezi poměrem průsvitných a neprůsvitných částí zasklení. Pro dosažení maximálního tepelného namáhání konstrukce je v určitou denní dobu vhodnější ozáření aby na konstrukci dopadala odražená složka slunečního záření a v jinou dobu byla konstrukce osálávána přilehlými konstrukcemi (přilehlou stěnou).



Graf. 7.11 Závislost průměrných povrchových teplot na velikosti prosklených ploch





84,6	84,6	84,6	84,6	84,6	84,6	84,6	84,6	83,6	83,3	84,5	88,1	93,5	91,7	88,0	83,2	84,6	84,3	84,1	83,7	83,7	84,2	84,6	84,6	84,6
84,0	84,0	84,0	84,0	84,0	84,0	83,2	82,9	83,5	84,6	88,6	93,1	91,6	92,3	82,7	83,0	84,0	84,0	84,0	83,8	83,5	83,3	83,5	83,7	83,7
83,6	83,6	83,6	83,6	83,3	82,8	82,5	82,5	83,3	82,9	82,3	82,3	82,3	82,3	82,3	82,3	83,3	83,6	83,6	83,6	83,6	83,6	83,6	83,3	83,2
82,9	82,9	82,9	82,7	82,1	82,1	82,3	82,7	82,9	82,3	81,7	81,7	82,3	82,4	81,8	81,8	82,1	82,9	82,9	82,9	82,9	82,9	82,9	82,9	82,9

Obr 7.14 povrchové teploty u varianty 7.3.3.2 (2,25m<sup>2</sup> zasklení) ve 12:00, do 1m od fasády

84,6	84,6	85,3	89,8	94,8	93,7	89,0	84,2	84,1	85,3	89,8	94,8	93,7	89,0	84,2	84,3	83,9	84,9	89,2	94,2	93,5	89,0	84,2	84,6	84,6
84,0	84,0	84,9	89,4	93,8	92,8	93,1	83,1	84,0	84,9	89,4	93,8	92,8	93,1	83,1	83,0	84,0	84,9	89,4	93,6	92,3	92,6	83,1	83,4	83,4
83,6	83,6	83,6	83,6	83,4	83,0	82,8	82,8	83,4	83,3	83,0	83,0	82,8	82,2	82,0	82,0	83,2	83,3	83,0	83,0	83,0	82,8	82,6	82,5	82,5
82,9	82,9	82,9	82,8	82,4	82,4	82,6	84,1	82,9	82,6	82,1	82,2	82,3	82,1	81,9	82,2	82,6	82,4	82,3	82,3	82,6	82,6	82,3	82,3	82,3

Obr 7.15 povrchové teploty u varianty 7.3.3.3 (4,50m<sup>2</sup> zasklení) ve 12:00, do 1m od fasády

84,6	84,6	84,6	84,6	84,6	83,7	83,3	84,5	87,9	92,2	91,2	91,2	91,5	92,5	91,5	87,5	82,2	83,7	83,7	83,7	83,7	83,7	84,2	84,6	84,6
84,0	84,0	84,0	84,0	83,2	82,9	83,5	83,8	87,5	92,2	91,6	91,8	92,1	91,8	91,0	92,3	82,7	82,8	83,5	83,3	83,3	83,3	83,3	83,3	83,3
83,6	83,6	83,3	82,8	82,5	82,5	82,5	81,8	81,2	81,2	82,0	80,9	80,9	80,9	80,9	82,3	82,3	82,3	83,3	83,6	83,3	83,2	83,0	83,0	
83,0	82,7	82,1	82,1	82,1	82,1	82,1	81,5	81,1	81,5	81,7	81,2	80,6	80,6	81,9	81,9	81,2	81,9	83,0	83,0	82,1	83,0	83,0	82,8	82,8

Obr 7.16 povrchové teploty u varianty 7.3.3.4 (4,50m<sup>2</sup> zasklení) ve 12:00, do 1m od fasády

82,7	83,0	85,1	88,9	92,2	90,4	87,2	85,1	83,7	85,1	88,9	92,2	90,4	87,2	85,1	84,0	85,1	88,9	92,2	90,4	87,2	85,1	84,0	84,0
82,4	83,1	85,6	88,6	88,9	93,0	86,7	85,9	83,4	85,6	88,6	88,9	93,0	86,7	85,9	83,1	85,6	88,6	88,9	93,0	86,7	85,9	83,4	83,4
82,7	82,3	81,7	81,7	81,7	81,7	81,7	81,7	82,7	83,0	83,0	83,0	83,0	83,0	82,7	82,6	82,4	82,6	82,9	83,0	83,0	83,0	83,0	83,0
82,3	81,7	81,1	81,1	81,3	81,3	81,8	81,7	82,3	82,3	82,3	82,3	81,5	82,3	82,3	82,3	82,0	82,2	82,3	82,0	82,3	82,2	82,2	82,3

Obr 7.17 povrchové teploty u varianty 7.3.3.5 (6,75m<sup>2</sup> zasklení) ve 12:00, do 1m od fasády

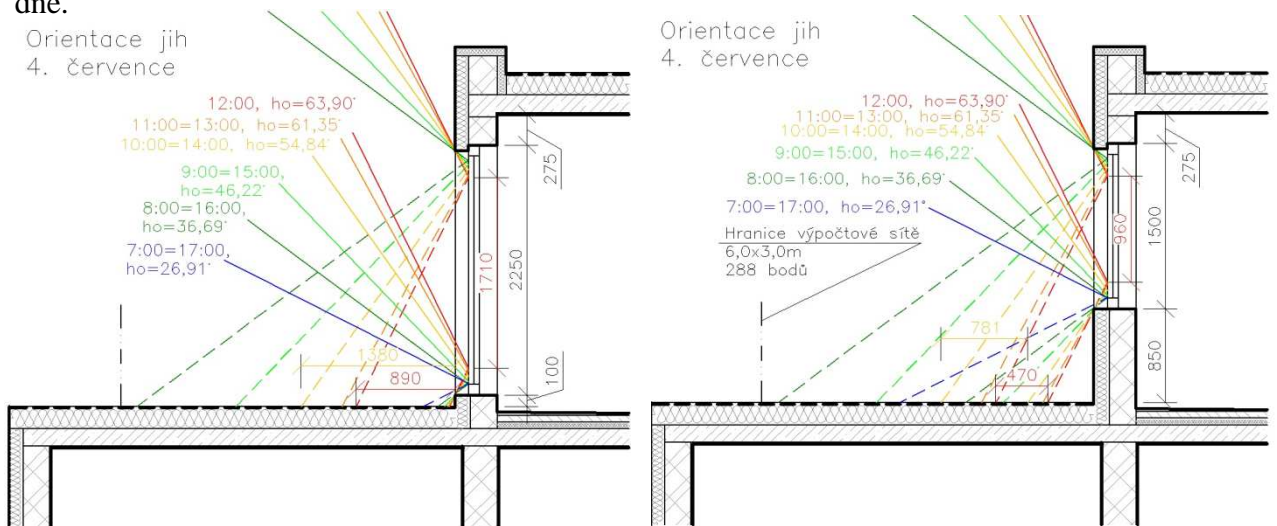
92,6	91,6	91,3	91,5	92,2	92,3	91,6	82,3	92,6	91,6	91,3	91,5	92,2	92,3	91,6	91,6	83,8	92,6	91,6	91,3	91,5	92,2	92,3	91,6	91,6
92,2	91,9	91,2	92,1	92,1	91,0	91,7	84,0	92,2	91,9	91,2	92,1	92,1	91,0	91,7	91,7	82,8	92,2	91,9	91,2	92,1	92,1	91,0	91,7	91,7
83,6	83,6	83,6	83,6	83,6	83,6	83,6	83,6	83,6	83,6	83,6	83,6	82,8	82,5	82,5	82,5	81,2	81,2	81,5	81,6	80,9	80,9	80,9	82,3	82,3
83,0	83,0	83,0	83,0	83,0	83,0	83,0	83,0	83,0	83,0	82,6	82,1	82,1	82,1	82,1	82,1	80,9	81,3	81,7	81,7	80,6	80,6	80,6	81,9	81,9

Obr 7.18 povrchové teploty u varianty 7.3.3.6 (12,5m<sup>2</sup> zasklení) ve 12:00, do 1m od fasády

87,9	92,3	91,3	91,3	91,3	91,3	91,0	90,8	90,4	90,4	90,4	90,4	90,4	90,4	90,4	90,4	90,4	90,3	90,3	90,3	90,6	91,6	90,8	87,1	87,1
87,5	92,2	91,6	91,0	91,0	91,0	91,0	91,0	90,8	90,4	90,3	90,3	90,3	90,3	90,3	90,3	90,3	90,3	90,3	90,3	91,1	91,4	91,1	90,3	91,6
81,2	81,2	81,2	79,8	79,8	79,8	79,8	79,8	79,8	79,8	79,8	79,8	79,8	79,8	79,5	79,3	79,2	79,2	79,2	79,2	80,0	80,3	80,3	80,3	81,7
80,9	80,9	80,9	80,3	79,8	79,8	79,8	79,8	79,8	79,8	79,8	79,8	79,8	79,8	79,8	79,8	79,8	79,6	79,6	80,1	80,3	80,3	80,3	80,9	81,5

Obr 7.19 povrchové teploty u varianty 7.3.3.7 (12,50m<sup>2</sup> zasklení v jednom kuse) ve 12:00, do 1m od fasády

Pro lepší představu dosahu odražené složky slunečního záření vkládám na následující stranu schéma zobrazující teoretický obrazec odrazu záření od prosklených ploch. Vyobrazené schéma odpovídá situaci s jižně orientovanou přilehlou fasádou, osazení okna na vnější líc zdiva s pře-izolováním rámu fasádní tepelnou izolací. Vkládám zde dva příklady zobrazující případ. V prvním případě výška prosklené výplně otvoru 2,25m se 100mm parapetem nad horním povrchem střešní krytiny (odpovídá variantám 3.2, 3.4, 3.5 a 3.6). Ve druhém případě se jedná o výplň výšky 1,50m s parapetem 850mm nad povrchem střešní krytiny (odpovídá variantě 3.3). V půdorysném schéma je vykreslena pouze situace od 8:00 do 12:00. Je to způsobeno faktem, že v 7:00, respektive v 18:00 dopadá sluneční záření pod tak vysokým vodorovným úhlem, kdy samotný přesah tepelné izolace stíní na prosklenou plochu. Důvodem, proč je vykresleny pouze situace do 12:00 spočívá v tom, že odrazový obraz ve 13:00 bude mít stejný tvar, umístění i velikost jako je tomu v 11:00, ale bude pouze zrcadlově převrácen. Stejně tak tomu bude po zbytek dne.

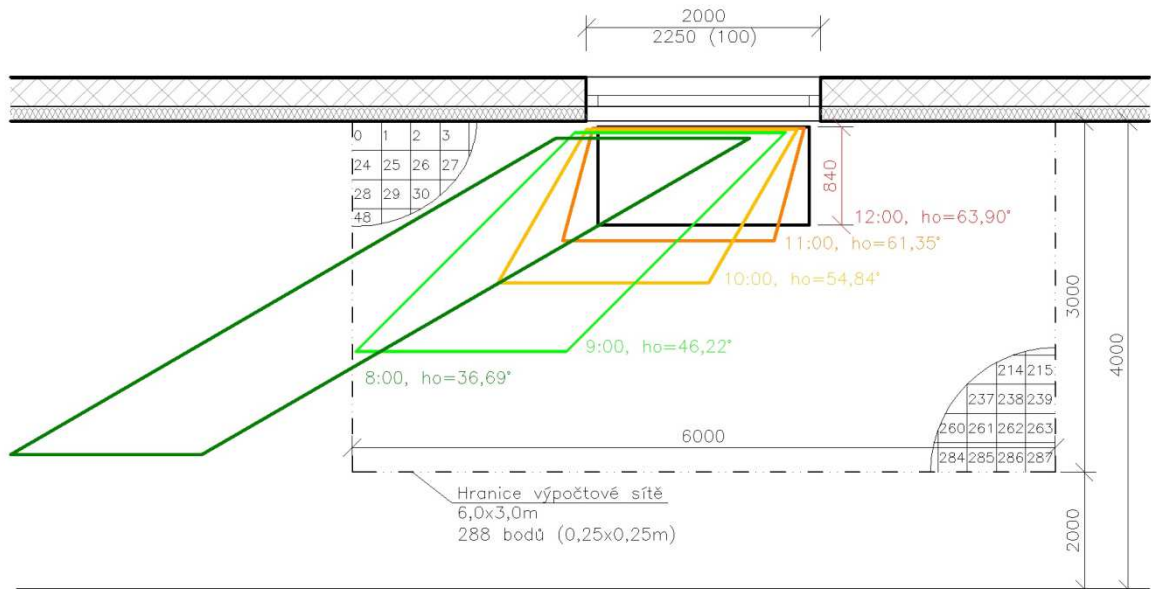


Obr 7.20 Zobrazení výška Slunce a dosahu odrazu slunečního záření, řez-orientace jih

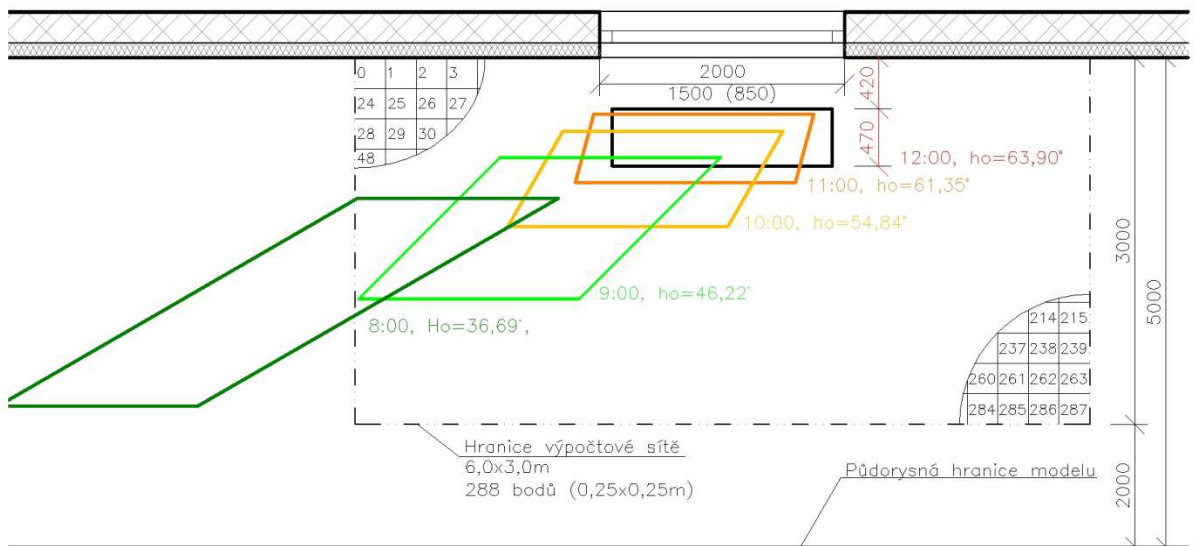
Čas	Šířky zasklení odrážející sluneční záření na střešní krytinu	Výšky zasklení odrážející sluneční záření na střešní krytinu	Zasklená plocha odrážející sluneční záření	Procentuální podíl osluněné části zasklení	Plocha odrazového obrazce	Vodorovný dopadový úhel slunečních paprsků (hodinový úhel)	Svislý dopadový úhel slunečních paprsků (výška slunce)	Skutečný úhel dopadu s normálou roviny zasklení	Procent. podíl odražené sluneč. záření od zasklení
[hodiny]	[m]	[m]	[m <sup>2</sup> ]	[%]	[m <sup>2</sup> ]	[°]	[°]	[°]	[%]
8:00 (16:00)	1,723	2,010	3,463	93,9	4,434	60,00	36,69	66,36	25,8
9:00 (15:00)	1,800	1,950	3,510	95,1	3,366	45,00	46,22	60,71	21,4
10:00 (14:00)	1,800	1,860	3,348	90,7	2,358	30,00	54,84	60,09	21,1
11:00 (13:00)	1,800	1,761	3,170	85,9	1,728	15,00	61,35	62,41	22,5
12:00	1,800	1,710	3,078	83,4	1,512	0,00	63,9	63,90	23,6

Tab. 7.9 Dosah odraženého sluneční záření

Tato schémata odrazového obrazce je pouze teoretické, vzhledem k nízkým intenzitám slunečního záření v ranních hodinách ( $300-400 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ) a proměnné odrazivosti prosklení závislé na dopadovém úhlu slunečního záření. S rostoucím dopadovým úhlem procentuální složka odraženého záření stoupá. Na obrázcích je zohledněn vliv hloubky osazení výplně otvorů a výška příčného rozměru rámu okna.

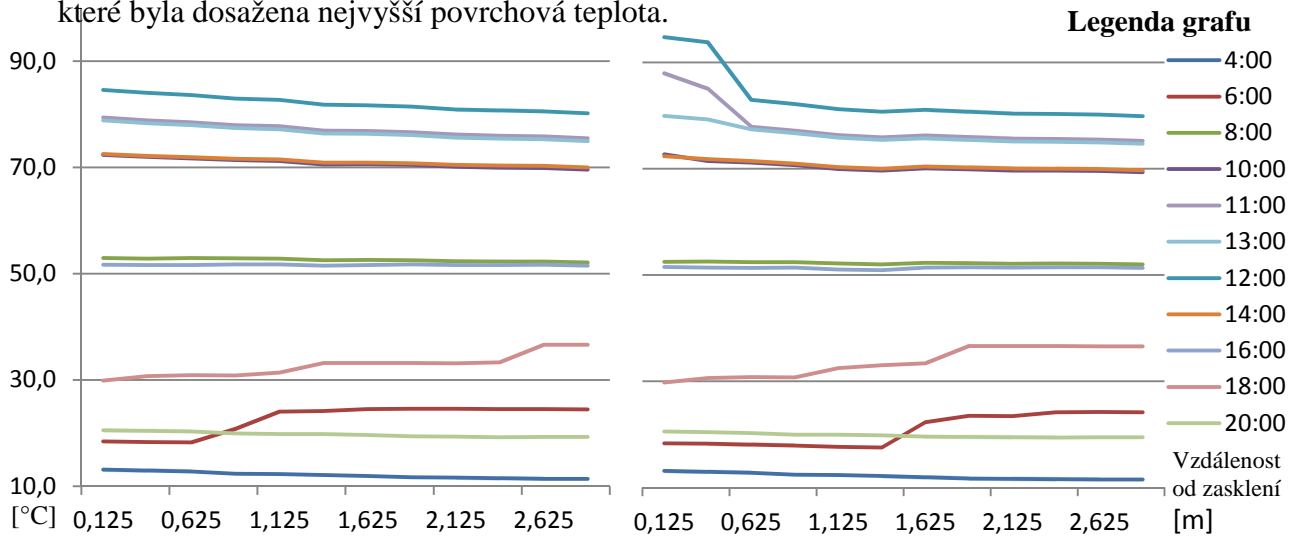


Obr 7.21 Zobrazení dosahu odrazu slunečního záření, půdorys terasy, výška otvoru 2,25m



Obr 7.22 Zobrazení dosahu odrazu slunečního záření, půdorys terasy, výška otvoru 1,50m

Níže vkládám vypočtený průběh teplot v rámci celého dne v kolmém řezu k přilehlé stěně. Jedná se o vykreslení vypočtených dat z konkrétní řady výpočtové sítě, ve které byla dosažena nejvyšší povrchová teplota.



Graf. 7.12 průběh teplot u varianty 7.3.3.1 Graf. 7.13 průběh teplot u varianty 7.3.3.3

Průběh povrchových teplot v rámci jednoho sloupce výpočtové sítě je u obou variant (7.3.3.1 – 0m<sup>2</sup> zasklení a 7.3.3.3-4,5m<sup>2</sup> zasklené) velice podobný. Grafy se začínají významně lišit v časovém intervalu mezi 11. až 13. hodinou. V těchto hodinách se nejvíce projeví vliv odrazové složky slunečního záření. Výrazné skokové změny u vykreslení průběhu teplot pro 6. a 18. hodinu jsou způsobeny částečným zastíněním výpočtové sítě samotným modelem (konkrétně jeho nad přízemní částí). Rozdílné umístění této skokové změny v rámci vzdálenosti od přilehlé fasády je způsobeno rozdílným výběrem posuzovaného sloupce výpočtové sítě. U varianty 7.3.3.1 se jedná o 22 sloupec (v blízkosti praveného okraje modelu) a u varianty 7.3.3.3 je to 12 sloupec (uprostřed modelu).

Ozn. varianta	Plocha oken	Nejvyšší povrchová teplota řešeného místa	Absolutní rozdíl od max. nejvyšší teploty	Procen. rozdíl od max. nejvyšší teploty	Průměrná denní povrchová teplota na řešeném bodě	Absolutní rozdíl od max. průměrné teploty	Procen. rozdíl od maximální průměrné teploty	Průměrná denní povrch. teplota na bodech 0-47	Absolutní rozdíl od maxim. průměrné teploty	Procen. rozdíl od max. průměrné teploty
	[m <sup>2</sup> ]	[°C]	[°C]	[%]	[°C]	[°C]	[%]	[°C]	[°C]	[%]
7.3.3.1	0,00	<b>84,61</b>	<b>10,15</b>	10,71	<b>38,01</b>	<b>0,89</b>	<b>2,29</b>	<b>37,98</b>	<b>0,54</b>	<b>1,40</b>
7.3.3.2	2,25	93,51	1,25	1,32	38,23	0,67	1,72	38,07	0,45	1,17
7.3.3.3	4,50	<b>94,76</b>	0,00	0,00	<b>38,90</b>	0,00	0,00	38,50	0,02	0,05
7.3.3.4	4,50	92,95	1,81	1,91	38,61	0,29	0,75	38,17	0,35	0,91
7.3.3.5	6,75	93,51	1,25	1,32	38,31	0,59	1,52	38,17	0,35	0,91
7.3.3.6	13,50	92,59	2,17	2,29	38,53	0,37	0,95	38,38	0,14	0,36
7.3.3.7	13,50	92,31	2,45	2,59	38,57	0,33	0,85	<b>38,52</b>	0,00	0,00

Tab. 7.10 Souhrnná tabulka zjištěného vlivu velikosti zasklení na povrchové teploty

## 7.4 Vytvoření vlastního souboru klimatických dat pro Brno

Pro vytvoření klimatických dat byly použity naměřené hodnoty z permanentní GPS stanice TUBO. Z těchto dat využiji hodnoty teploty vzduchu a globálního slunečního záření měřených po jedné minutě. Tato data byla přepočítána do hodinových klimatických dat tak, aby nejlépe odpovídala skutečným hodnotám. Tento přepočet bylo nutno provést vzhledem k možnostem zadání klimatických dat do výpočtového jádra EnergyPlus, které umožňuje zadat pouze hodinová klimatická data.

### 7.4.1 Přepočet minutových klimatických dat na data hodinová

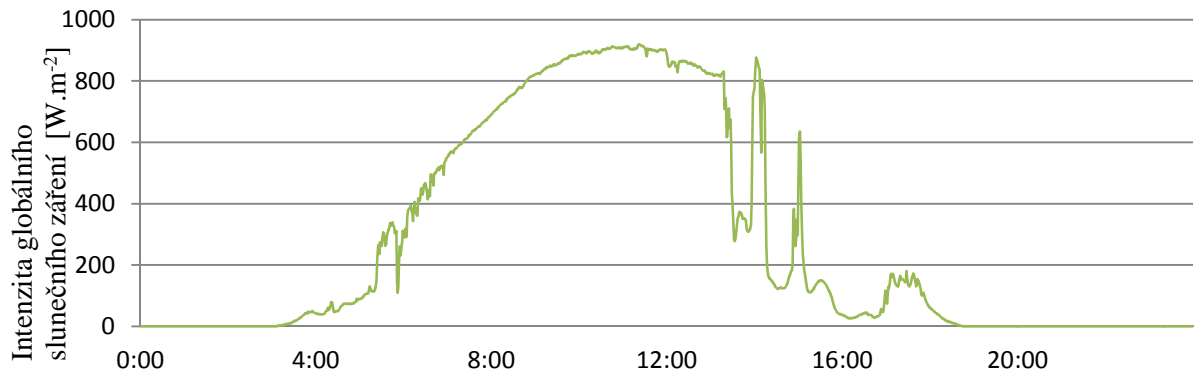
Hlavní důraz byl kladen na minimalizování procentuálního rozdílu celkové dopadající sluneční energie. Zcela nevhodné by bylo použití pouze klimatických dat naměřených v celé hodiny a tato data použít jako hodinová klimatická data. Tímto postupem by došlo k významným chybám ve výpočtu zapříčiněných místními extrémními hodnotami například u intenzity slunečního. Příkladem může být situace, kdy po většinu dne byla obloha zatažena, ale během krátké chvíle došlo k protržení mračen a skokovému nárůstu slunečního záření dopadající na měřické zařízení. K tomuto skokovému nárůstu může dojít například v časový úsek připadající na celou hodinu (např. 12:00). Tento získaný hodinový údaj by potom výrazně znehodnotil dynamickou simulaci vlivu slunečního záření na stavební konstrukce. Druhým příkladem může být slunečný den, během kterého na krátkou chvíli dojde k zakrytí Slunce malá oblačnost. V tuto chvíli dojde ke skokovému poklesu intenzity slunečního záření.

Výpočet průměrných hodnot pro hodinová klimatická data byl proveden ve dvou fázích. V první fázi byl (viz níže *tabulka 7.11, sloupec OZN 1*) proveden přepočet na 15 minutová klimatická data, tak aby mohli být výsledné průměrné hodnoty porovnány s naměřenými klimatickými daty získaných při měření experimentálního modelu. Například pro výpočet průměrné hodnoty pro čas 13:30 byl proveden aritmetický průměr z 15 naměřených minutových klimatických dat naměřených od 13:23 do 13:37. Stejným mechanismem byl proveden přepočet na hodinová klimatická data. Kdy při výpočtu pro čas 13:00 bylo průměrováno celkem 5 hodnot z již průměrovaných 15 minutových hodnot (*sloupec VAR 2*). Ve třetí fázi bylo provedeno průměrování přímo minutových klimatických dat (*VAR 3*). V poslední fázi (*VAR 4*) byl zjišťován procentuální vliv na vybrané veličiny při zohlednění přímo konkrétní hodnot pro celou hodnu (např. 13:00). Tato část má za cíl simulovat vliv měření, kdy jsou zjišťována pouze klimatická data jednou za hodinu.

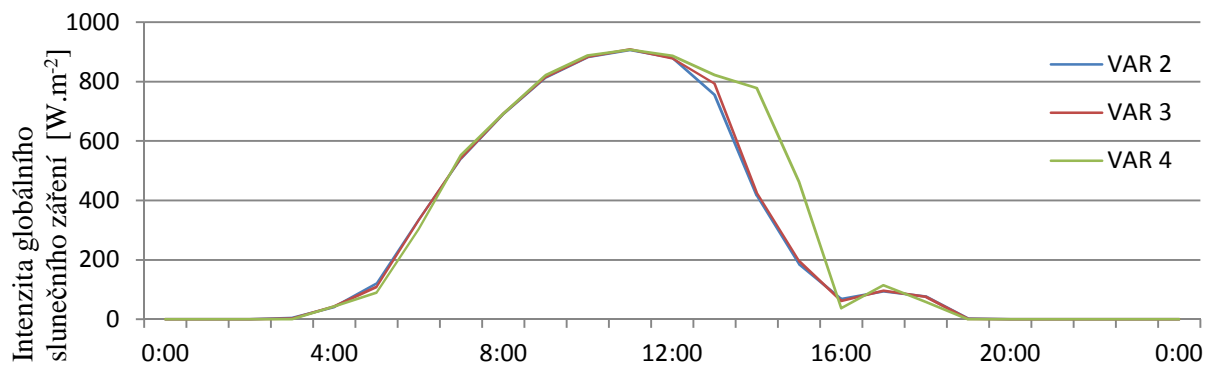
Na následujících dvou stranách jsou vloženy tabulky a grafy shrnující vliv varianty přepočtu minutových klimatických dat. V prvním případě je uveden slunečný den 18. 7. 2015 a ve druhém případě den s rychle se střídající oblačností 27.7.2015.

Sluneční den Brno 18.7.2015 Stanice TUBO		Klimatická data:					Procentuální vliv převodu z jednominutových klimatických dat			
Veličina	Jednotka	původní minutová	VAR 1 přepočtena na 15 min. z 1 min.	VAR 2 přepočtena na 60 min. z 15 min.	VAR 3 přepočtena na 60 min. z 1 min.	VAR 4 vybraná pro konkrétní hodinu	VAR 1 [%]	VAR 2 [%]	VAR 3 [%]	VAR 4 [%]
Suma dopadající energie	kWh·m <sup>-2</sup>	6,862	6,862	6,813	6,862	7,458	0,00	0,71	0,00	-8,69
Maximální intenzita	W·m <sup>-2</sup>	919,0	909,7	905,9	908,5	907,0	1,01	1,43	1,14	1,31
Průměrná intenzita	W·m <sup>-2</sup>	285,9	285,9	283,9	285,9	310,8	0,00	0,71	0,00	-8,69
Průměr od 3:00-19:00	W·m <sup>-2</sup>	428,4	422,3	400,8	403,6	438,7	1,44	6,45	5,78	-2,40

Tab 7.11 Přehled vlivu přepočtu klimatických dat ve slunečný den 18. 7. 2015



Graf 7.14 Průběh intenzity slunečního záření vykreslen minutovými daty 18. 7. 2015



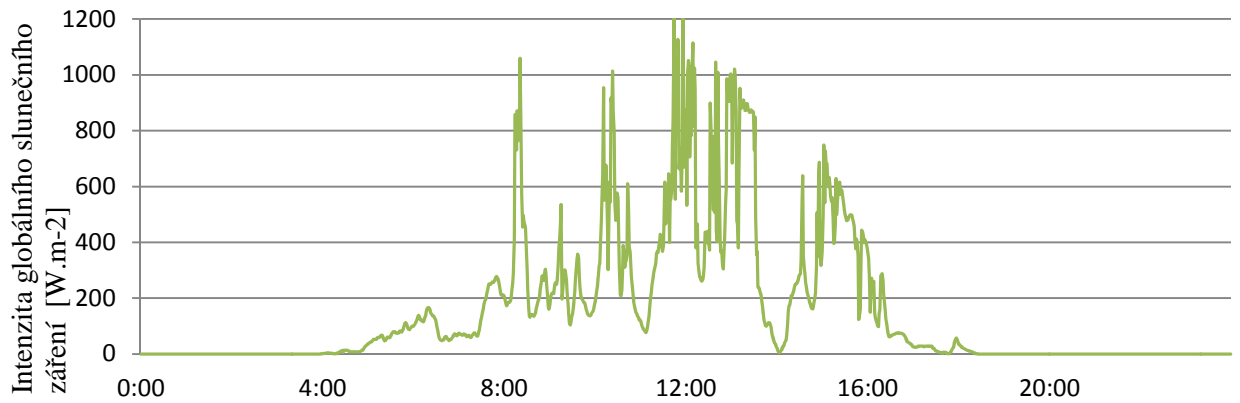
Graf 7.15 Průběh intenzity slunečního záření vykreslen z přepočítaných hodinových dat

Z výše uvedené tabulky vyplývá, že nejpodobnějších výsledků dosáhneme při průměrování na 15 minutová data. Tato data však nemůžeme použít a slouží pouze pro porovnání se získanými daty na experimentálním modelu. Dle předpokladů nejhůře dopadlo prostý výběr klimatických dat bez jakéhokoli přepočtu či průměrování. Při průměrování minutových dat (VAR 1) došlo v tomto případě k nejlepším výsledkům. Rozdíl mezi minutovými daty a vypočtenými hodinovými se pohybuje kolem 1%.

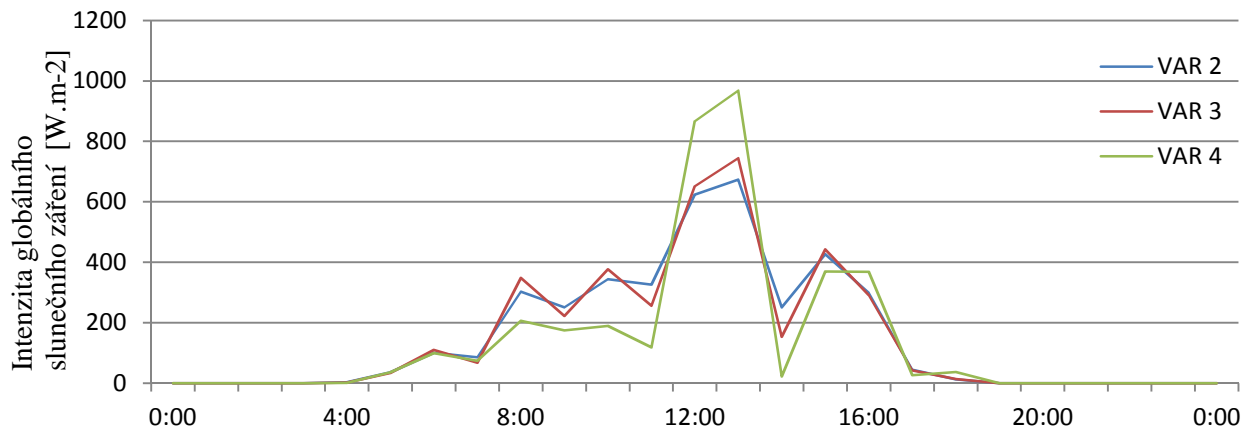


Veličina	Jednotka	původní minutová	Klimatická data:				Procentuální vliv převodu z jednodominutových klimatických dat			
			VAR 1 přepočtena na 15 min. z 1 min.	VAR 2 přepočtena na 60 min. z 15 min.	VAR 3 přepočtena na 60 min. z 1 min.	VAR 4 vybraná pro konkrétní hodinu	VAR 1 [%]	VAR 2 [%]	VAR 3 [%]	VAR 4 [%]
Suma dopadající energie	kWh·m <sup>-2</sup>	3,755	3,755	3,779	3,755	3,554	0,00	-0,65	0,00	5,35
Maximální intenzita	W·m <sup>-2</sup>	1227,0	880,4	673,9	744,3	968,0	28,25	45,07	39,34	21,11
Průměrná intenzita	W·m <sup>-2</sup>	156,5	156,5	157,5	156,5	148,1	0,00	-0,65	0,00	5,35
Průměr od 3:00-19:00	W·m <sup>-2</sup>	234,4	231,1	222,3	220,9	209,1	1,44	5,18	5,78	10,83

Tab 7.12 přehled vlivu přepočtu klimatických dat v oblačný den 27.7 2015



Graf 7.16 Průběh intenzity slunečního záření vykreslen minutovými daty 27. 7. 2015



Graf 7.17 Průběh intenzity slunečního záření vykreslen z přepočítaných hodinových

Při přepočtech intenzity slunečního záření ve dnech se střídavou oblačností jsou vzniklé chyby způsobené převodem značně vyšší, než tomu bylo u slunečného dne. Nejpodstatnější rozdíl mezi původními a přepočtenými hodnotami je ve výši maximální intenzity slunečního záření, kde chyba dosahuje až 45%. Jako nejvhodnější variantu přepočtu dat pro dosažení nejpresnějších výsledků sledávám variantu VAR 3.



### 7.4.2 Výpočtu difuzní složky slunečního záření

Pro korektní výpočet dynamických simulací s využitím výpočtového jádra EnergyPlus je zapotřebí zvláště zadat jednotlivé složky slunečního záření. Jedná se o rozdělení globálního záření na složku přímého a difuzního záření. V převážné většině je na meteorologických stanicích v České republice měřeno pouze globální záření. Stejně tak tomu je u permanentní GPS stanice TUBO a u měření prováděném na experimentálním modelu. Jednotlivé složky slunečního záření jsem detailně popsal v subkapitole 4.3 *Sluneční záření*.

Pro výpočet jednotlivých složek je potřeba provést výpočet pozice Slunce, která je blíže popsána v subkapitole 4.2 *Poloha Slunce*. Pro rozdělení globální intenzity slunečního záření bude použit vztah pro určení globální složky záření, který je uveden a popsán v subsubkapitole 4.3.2 *Rozptýlené (difuzní) záření*.

Uvádím zde algoritmus výpočtu difuzní složky slunečního záření z intenzity globálního záření pro dva případy. V prvním řadě se bude jednat o dnes minimálního oblačností, kde je předpokládána minimální složka difuzního záření a převládající složka záření přímého. V druhém případě bude výpočet proveden pro sluneční den. Pro výpočet budou použita průměrná hodinová data globálního záření, dle postupu uvedeného v předchozí subkapitole. Pro možnost porovnání jsou vybrány sejné dny jako při určování závislosti přepočtu minutových klimatických dat na data hodinová. Jedná se o dny 18. července (minimální oblačnost) a 27. července (velká oblačnost). Určení difuzní složky bude provedeno pro stejnou geografickou oblast a pro stejnou hodinu. Výpočtový algoritmus bude dále zpracován v tabulkovém procesoru programu excel. Tyto vypočtené složky slunečního záření poté budou vloženy do klimatických dat pro výpočty dynamických simulací v programu DesignBuilder.

#### Algoritmus výpočtu:

##### 1. Zadání pro výpočet:

- a. geografického umístění: Brno, 49,2° severní zeměpisné šířky
- b. datum:
  - 1.b.1. 18.7.2015
  - 1.b.2. 22.7.2015
- c. čas: 11:00
- d. globální intenzita slunečního záření:
  - 1.d.1. 908,5 W·m<sup>-2</sup>
  - 1.d.2. 255,9 W·m<sup>-2</sup>

2. Časový úhel:  $t = 0,98 \cdot D + 29,7 \cdot M$  [°] (4.32)

- a.  $t_a = 0,98 \cdot 18 + 29,7 \cdot 7 = 225,54^\circ$
- b.  $t_b = 0,98 \cdot 22 + 29,7 \cdot 7 = 229,46^\circ$

$$3. \text{ Sluneční deklinace: } \delta = 23,45^\circ \sin(t - 109^\circ) \quad [^\circ] \quad (4.31)$$

$$a. \quad \delta_a = 23,45^\circ \sin(225,54 - 109^\circ) = 20,99^\circ$$

$$b. \quad \delta_a = 23,45^\circ \sin(229,46 - 109^\circ) = 20,21^\circ$$

$$4. \text{ Hodinový úhel slunce: } \tau = 15^\circ(\text{PSČ} - 12) \quad [^\circ] \quad (4.33)$$

$$a. = \quad b. \quad \tau = 15^\circ(11 - 12) = -15^\circ$$

$$5. \text{ Výška Slunce: } \sin h_o = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \tau \quad [^\circ] \quad (4.35)$$

$$a. \quad \sin h_{o,a} = \sin(49,2) \cdot \sin(20,99) + \cos(49,2) \cdot \cos(20,99) \cos(-15) = 0,860$$

$$h_{o,a} = 59,37^\circ$$

$$b. \quad \sin h_{o,b} = \sin(49,2) \cdot \sin(20,21) + \cos(49,2) \cdot \cos(20,21) \cos(-15) = 0,854$$

$$h_{o,b} = 58,63^\circ$$

$$6. \text{ Součinitel } k_T: \quad k_T = \frac{E_{G,hor}}{E_o \cdot \sin h_o} \quad [-] \quad (4.44)$$

$$a. \quad k_{T,a} = \frac{908,5}{1358 \cdot \sin 59,37} = 0,78$$

$$b. \quad k_{T,b} = \frac{255,9}{1358 \cdot \sin 58,63} = 0,22$$

#### 7. Difuzní složka slunečního záření:

$$E_{diff,hor} = E_{G,hor} \cdot (1,020 + 0,254 \cdot k_T + 0,0123 \cdot \sin h_o) \quad \text{pro } k_T \leq 0,3 \quad (4.45)$$

$$E_{diff,hor} = E_{G,hor} \cdot (1,400 - 1,749 \cdot k_T + 0,1770 \cdot \sin h_o) \quad \text{pro } 0,3 < k_T < 0,78$$

$$E_{diff,hor} = E_{G,hor} \cdot (0,486 \cdot k_T - 0,182 \cdot \sin h_o) \quad \text{pro } k_T \geq 0,78$$

$$a. \quad E_{diff,hor,a} = 908,5 \cdot (1,400 - 1,749 \cdot 0,78 - 1,770 \cdot \sin 59,37) = 174,1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

$$c. \quad E_{diff,hor,b} = 255,9 \cdot (1,020 + 0,254 \cdot 0,22 - 0,012 \cdot \sin 58,63) = 272,6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

Při použití vztahu pro výpočet difuzní složky z globálního slunečního záření se můžeme stát, že v případě velmi nízké hodnotě globálního záření (velké oblačnosti či znečištění ovzduší) může vycházet složka difuzního záření větší, než hodnota globálního záření. Tyto vztahy byly odvozeny z vyhodnocení statistických hodnot současného měření jednotlivých složek slunečního záření. Při strojním výpočtu difuzní složky slunečního záření bude brán na tento fakt ohled a v případě, kdy by intenzita difuzního záření vycházela větší než globální intenzita, výsledek bude upraven tak, aby odpovídal maximálně intenzitě globálního záření.

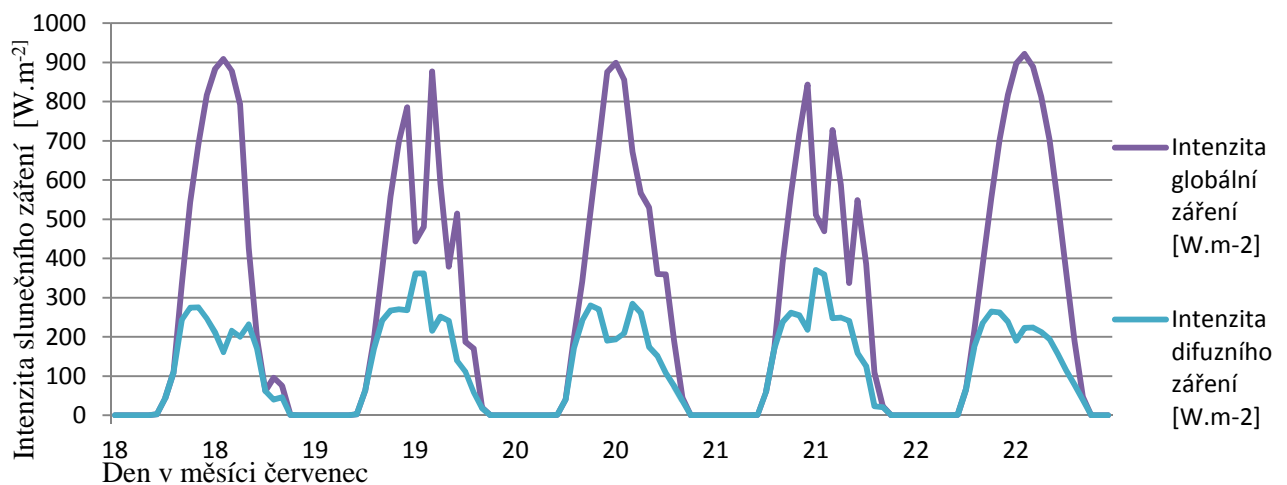
Z výsledku vyplývá, že při slunečném dni v místě s určitým znečištěním ovzduší v 11 hodin dopoledne bude vycházet difuzní složka velmi nízká, v našem případě se jedná o 19,2% z globálního záření připadající na difuzní složku. Oproti tomu v zatažený den může nabývat složka difuzního záření až hodnoty 100% tak jako tomu je v našem případě.

Při použití výše uvedené metodiky výpočtu difuzní složky je třeba ošetřit záporné hodnoty zmenšujícího součinitele  $k_T$ . V případě kdy výška Slunce  $h_o$  nabývá záporných hodnot (Slunce zašlo za obzor), a stále jsou měřeny nenulové hodnoty globálního slunečního záření, nabývá součinitel  $k_T$  záporné hodnoty. Při záporné hodnotě  $k_T$  potom také vychází záporná složka difuzního záření. Je proto třeba vložit do metodiky výpočtu podmínku, kdy zmenšující součinitel může nabývat pouze kladných hodnot od nuly.

Ze studia letošních klimatických dat naměřených stanicí TUBO, zejména dat intenzit slunečního záření, byl zjištěn velkým počet oblačných dní v měsíci květen (20 dní) a v měsíci červen (15 dní) v porovnání s měsícem červenec s celkem 11 zataženými dny. Z tohoto důvodu byly zpracovány červencová klimatická data. Zpracování červencových klimatických dat bylo provedeno také pro možnost porovnání získaných klimatických dat ze stanice instalované u experimentálního modelu s daty naměřenými stanicí TUBO.

Při práci s naměřenými klimatickými daty ze stanice TUBO je třeba dávat pozor na časový údaj dat. Stanice TUBO, používá koordinovaný světový čas UTC. Místní čas v České republice je dán jako UTC+1:00 (v zimním období) a jako UTC+2:00 v období letního času. To znamená, že je-li čas čehokoliv udán například na „16:00 UTC“, v ČR to je v 17:00 místního času (v zimě) nebo 18:00 (v letním čase). Z toho vyplývá metodika postupu s těmito daty. V našem případě kdy řešíme maximální tepelné namáhání ploché střechy nás zajímá pouze letní čas. Pokud je v našem případě (měsíc červenec) přiřazen k datům časový údaj např. 12:00 hodin, budou tato data používaná pro čas 14:00.

Níže vkládám pro příklad tabulku a graf s výpočtem difuzní složky slunečního záření. Pro přehlednost uvádím stejný den jako u předchozího výpočtu: 18. července (minimální oblačnost)



Graf 7.18 Podíl složky intenzity difuzního záření na intenzitě globálního slunečního záření

Časový úhel: 225,54° Sluneční deklinace: 20,98°	Intenzita globální záření [W.m <sup>-2</sup> ]	Hodinový úhel Slunce [°]	ho [°]	kT [-]	Intenzita difuzního záření [W.m <sup>-2</sup> ]	Podíl difuzní složky
18.7.15 5:00	3	-105	6,5	0,02	3	100,0%
18.7.15 6:00	43	-90	15,7	0,12	43	100,0%
18.7.15 7:00	109	-75	25,4	0,19	109	100,0%
18.7.15 8:00	335	-60	35,2	0,43	243	72,7%
18.7.15 9:00	543	-45	44,6	0,57	274	50,6%
18.7.15 10:00	692	-30	53,1	0,64	275	39,7%
18.7.15 11:00	816	-15	59,4	0,70	246	30,2%
18.7.15 12:00	884	0	61,8	0,74	211	23,9%
18.7.15 13:00	908	15	59,4	0,78	161	17,8%
18.7.15 14:00	879	30	53,1	0,81	216	24,6%
18.7.15 15:00	793	45	44,6	0,83	200	25,3%
18.7.15 16:00	426	60	35,2	0,54	232	54,3%
18.7.15 17:00	196	75	25,4	0,34	171	87,0%
18.7.15 18:00	62	90	15,7	0,17	62	100,0%
18.7.15 19:00	96	105	6,5	0,62	40	42,1%
18.7.15 20:00	75	120	-2,0	0,00	46	60,6%
18.7.15 21:00	1	135	-9,2	0,00	1	100,0%
<b>Maximum</b>	<b>908</b>	-	61,8	0,83	<b>275</b>	100,0%
<b>Minimum</b>	0	-	-	0,00	0,0	17,8%
<b>Průměr</b>	286	-	-	0,31	106	60,5%

Tab. 7.13 Ukázka strojního výpočtu složky difuzního slunečního záření

Z výše uvedené tabulky a grafu lze vyčíst lze vyčíst procentuální zastoupení difuzního záření z globálního slunečního záření. Zvolená metoda výpočtu je založena pouze na statistickém měření a není tedy naprosto exaktní. Přesnost toho výpočtu bude pro naše účely dostatečná. Ze statistického posouzení vypočtených dat pro červenec byla zjištěna maximální intenzita globálního záření 978 W.m<sup>-2</sup>, která byla dosažena 30. července. Nízké hodnoty průměrných měsíčních intenzit záření jsou způsobeny započítáním také nulových intenzit záření během nočních hodin. Z toho důvodu jsou uvedeny průměrné hodnoty záření během slunečního svitu. V červenci se jedná o 5. až 21. hodinu.

Statistické údaje o intenzitě slunečním záření v červenci 2015	Intenzita globální záření [W.m <sup>-2</sup> ]	Intenzita difuzního záření [W.m <sup>-2</sup> ]	Intenzita přímého záření [W.m <sup>-2</sup> ]	Podíl difuzního záření [%]	Podíl přímého záření [%]
Maximální hodnota	978	374	783	100%	98%
Minimální hodnota	0	0	0	0%	0%
Průměrná hodnota	281	113	168	42%	28%
Průměr.hod. od 5:00-21:00	394	170	224	57%	43%

Tab 7.14 Statistické údaje o slunečním záření v červenci 2015

### 7.4.3 Analýza sumy dopadající sluneční energie

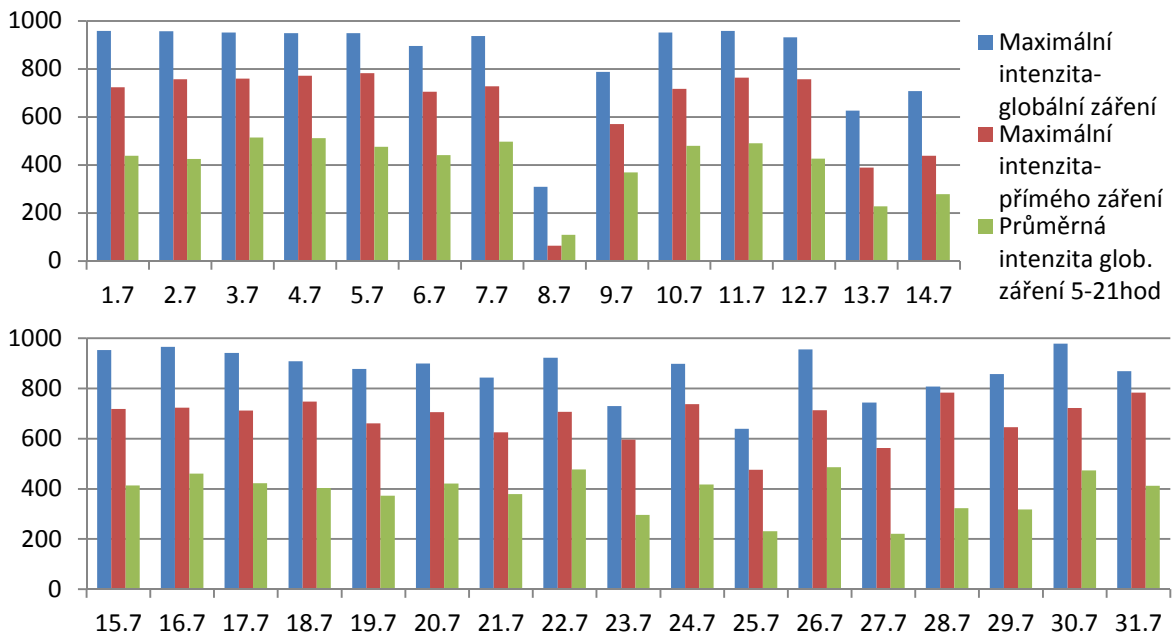
Pro volbu výpočtových dní pro dynamické simulace budou použita analýza sumy celkového dopadající sluneční energie. Suma dopadající energie mnohem lépe vykresluje skutečné tepelné namáhání stavebních konstrukcí například oproti maximální intenzitě globálního slunečního záření. Pro sumaci byl opět vybrán měsíc červenec, tak aby získaná data mohla být porovnána s naměřenými klimatickými daty na experimentálním modelu a také aby bylo možno porovnat skutečný průběh povrchových teplot na střešní krytině praktického modelu. Pro sumaci měsíce červenec budou použita již přepočtená hodinová klimatická data stanice TUBO.

Denní sluneční energie:	1.7.	2.7.	3.7.	4.7.	5.7.	6.7.	7.7.	8.7.	9.7.	10.7.	11.7.	12.7.	13.7.	14.7.	15.7.
Suma glob. záření	7,46	8,71	<b>8,76</b>	<b>8,76</b>	8,09	7,51	8,46	<b>1,87</b>	6,27	8,17	8,34	7,25	3,87	4,75	7,02
Suma přím. záření	4,31	5,92	5,98	<b>6,00</b>	5,39	4,60	5,70	<b>0,09</b>	3,17	5,12	5,68	4,55	1,05	1,83	4,30
Suma dif. energie	<b>3,15</b>	2,79	2,78	2,75	2,70	2,92	2,76	<b>1,78</b>	3,10	3,05	2,67	2,70	2,82	2,92	2,73
Maximální intenzita-glob. záření	958	958	951	950	950	896	937	<b>310</b>	788	952	959	932	626	709	953
Maximální intenzita-přím. záření	724	758	760	772	783	705	728	<b>64</b>	570	718	764	758	389	438	718
Průměrná intenzita glob. 5-21hod	439	426	515	<b>512</b>	476	442	497	<b>110</b>	369	481	491	426	228	279	413

16.7.	17.7.	18.7.	19.7.	20.7.	21.7.	22.7.	23.7.	24.7.	25.7.	26.7.	27.7.	28.7.	29.7.	30.7.	31.7.	Max
7,84	7,18	6,86	6,33	7,15	6,44	8,11	5,03	7,09	3,92	8,26	3,76	5,48	5,41	8,06	7,02	<b>8,76</b>
5,14	4,59	4,33	3,29	4,46	3,44	5,44	2,34	4,64	1,45	5,58	1,57	2,73	2,88	5,46	3,99	<b>6,00</b>
2,70	2,59	2,53	3,04	2,69	3,00	2,68	2,69	2,44	2,48	2,68	2,19	2,75	2,53	2,59	3,02	<b>3,15</b>
966	941	908	877	899	843	922	729	897	640	955	744	808	857	<b>978</b>	868	<b>978</b>
724	711	747	661	705	625	707	596	737	477	714	563	<b>783</b>	645	722	<b>783</b>	<b>783</b>
461	422	404	372	421	379	477	296	417	231	486	221	322	318	474	413	<b>515</b>

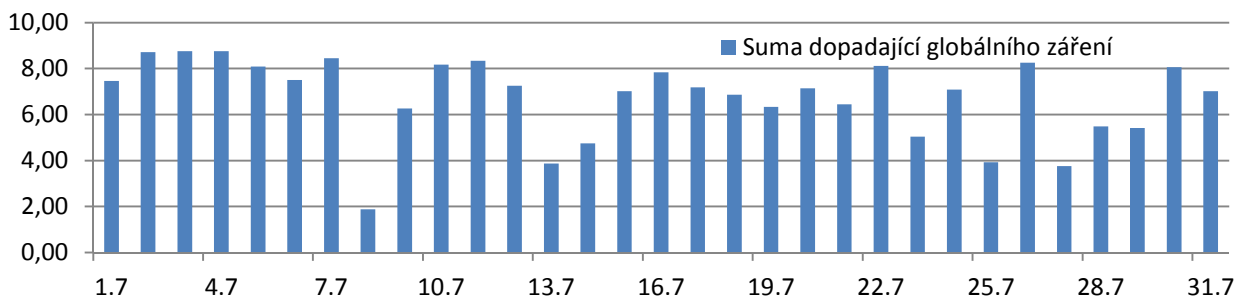
Tab 7.15 Přehled celkové dopadající sluneční energie v měsíci červenec 2015

Z výše uvedené přehledové tabulky 7.15 se sumací celkové dopadající sluneční energie jasně vyplývá nevhodnější volba na výpočtový den pro dynamické simulace. Jedná se o 4. červenec, kdy bylo dosaženo nejvyšší hodnoty sumy dopadající slunečního globálního a difuzního energie. V tento den bylo také dosaženo nejvyšší průměrné intenzity globálního záření během dne (od 5:00 do 21:00). Klimatická data toho dne budou použita pro určení jednotlivých vlivů na průběhu povrchových teplot krytiny ploché střechy, která jsou řešena v rámci subkapitoly 9.4 *Podrobné dynamické simulace*. Pro možnost porovnání klimatických dat naměřených stanicí TUBO s klimatickými daty naměřenými u experimentálního modelu byla vybrána vypočtená klimatická data od 18. do 31. července.



Graf 7.19 Přehled maximálních a průměrných intenzit slunečního záření pro červenec

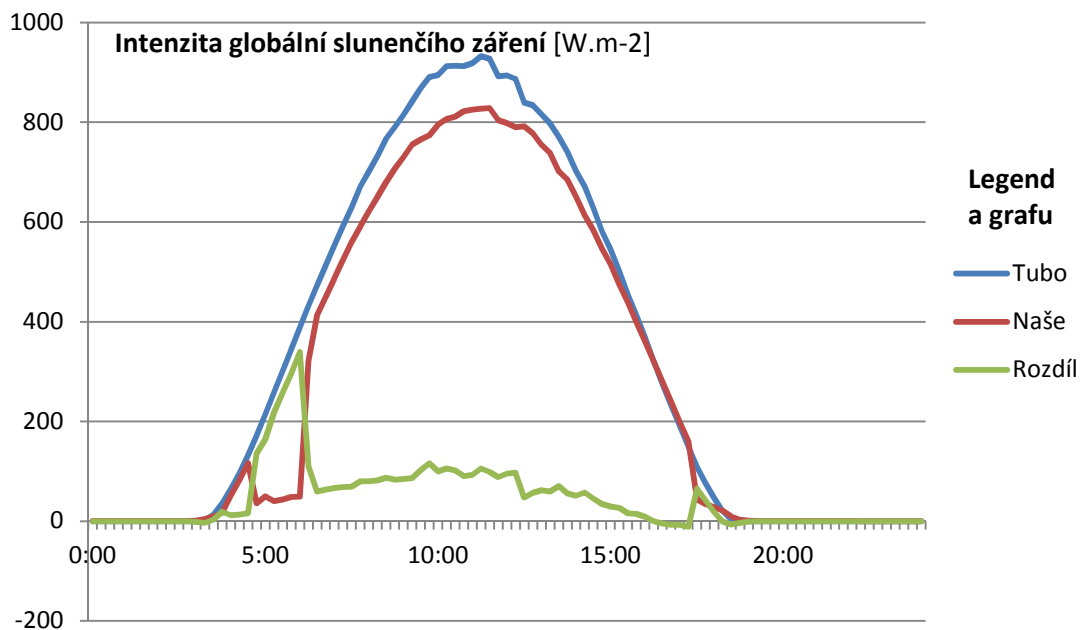
Z výše uvedeného můžeme vyčíst, že grafu 7.19 můžeme vyčíst fakt, že maximální intenzity slunečního záření neodpovídají průběhu průměrných hodnot intenzit záření. Z tohoto jasně vyplývá potřeba vybírat klimatická data pro naši problematiku podle průměrné intenzity slunečního záření anebo lépe podle celkové sumy dopadené sluneční energie za celý den. Tyto sumy jsou vykresleny na níže uvedeny na grafu 7.20.



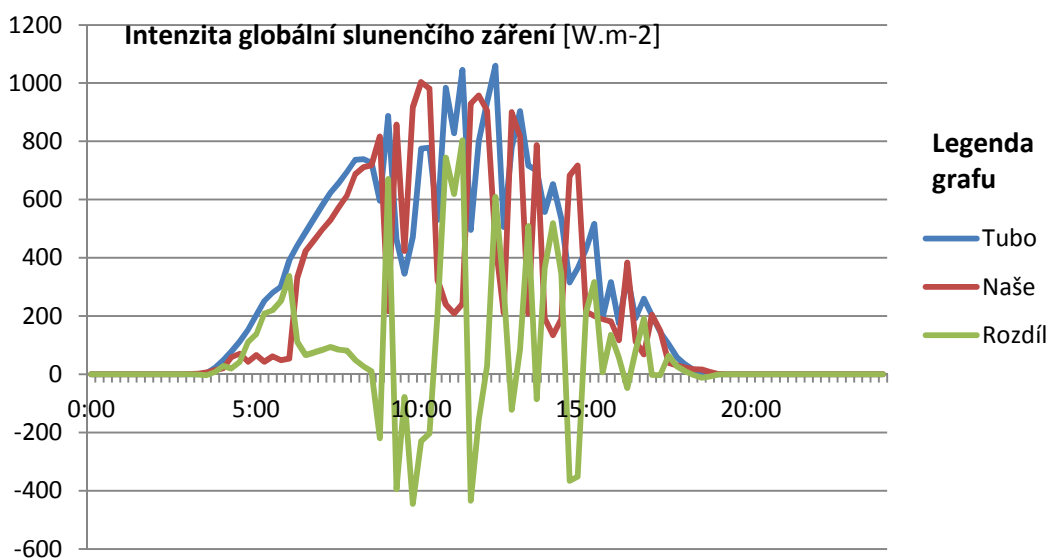
Graf 7.20 přehled sum dopadající sluneční energie jednotlivých dní července [ $\text{kWh}\cdot\text{m}^{-2}$ ]

### 7.4.4 Porovnání naměřených klimatických dat

V této Pro validaci rozdílů mezi měřeními intenzity globálního slunečního záření mezi permanentní GPS stanicí TUBO a naším experimentálním měřením pyrometrem EMS 11, zde uváděním na *grafu 7.21* s průběhem intenzity záření při slunečném počasí (22. července) a na *grafu 7.22* průběhem intenzity záření během dne s výrazným střídáním oblačnosti (30. července). Z *grafu 7.21* můžeme vyčíst rozdíl v hodnotě intenzity slunečního záření dosahující v maximu  $102 \text{ W.m}^{-2}$ . Větší rozdíl  $340 \text{ W.m}^{-2}$  nastává během brzkých ranních hodin, je to ovšem způsobeno stíněním pyrometru mezi 4:30 až 6:00.



Graf 7.21 Průběh intenzity slunečního záření během slunečného dne 22. 07.



Graf 7.21 Průběh intenzity slunečního záření během dne se střídavou oblačností 30.07.

## 8 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ V IN-SITU

Součástí výzkumu vlivu slunečního záření na průběhu povrchových teplot střešní krytiny ploché střechy a následného teplotního namáhání izolantu z EPS bylo sestavení experimentálního modelu. Experimentální model byl sestaven z důvodů ověření získaných poznatků z dynamických simulací provedených v programu DesignBuilder. Na modelu bylo provedeno experimentální měření povrchové teploty [°C] tepelného izolantu (bezprostředně pod hydroizolací), teploty vzduchu [°C] a měření globálního solárního záření [ $W \cdot m^{-2}$ ]. Změřené okrajové podmínky byly použity pro rozšíření a zpřesnění výpočtů v simulačním programu DesignBulder, tak aby bylo možné porovnat chování modelu při výpočtech s referenčními a naměřenými okrajovými podmínkami.

### 8.1 Kritéria pro sestavení modelu

Hlavní důraz, při návrhu experimentálního modelu, byl kladen na reálné chování modelu v rámci teplotního namáhání konstrukcí, zejména na namáhání způsobené přímou a odraženou složkou slunečního záření. Pro návrh tohoto modelu byly použity získané poznatky z dynamických simulací provedených v programu DesignBuilder. Jedná se zejména o rozhodující kritéria teplotního namáhání povrchu střešního pláště ploché střechy. Mezi tyto kritéria patří orientace přilehlé fasády, geografické umístění, velikost a typ prosklené výplně stavebního otvoru, emisivita povrchů a minimální velikost samotné experimentálního modelu. Dle dynamických simulací byla vybrána jižní orientace přilehlé fasády a pro výplň stavebního otvoru izolační trojsklo. Také bylo zapotřebí ověřit vybranou lokalitu pro instalaci experimentálního modelu z hlediska případného zastínění a zkreslení výsledků.

### 8.2 Vybraná lokace pro instalaci modelu

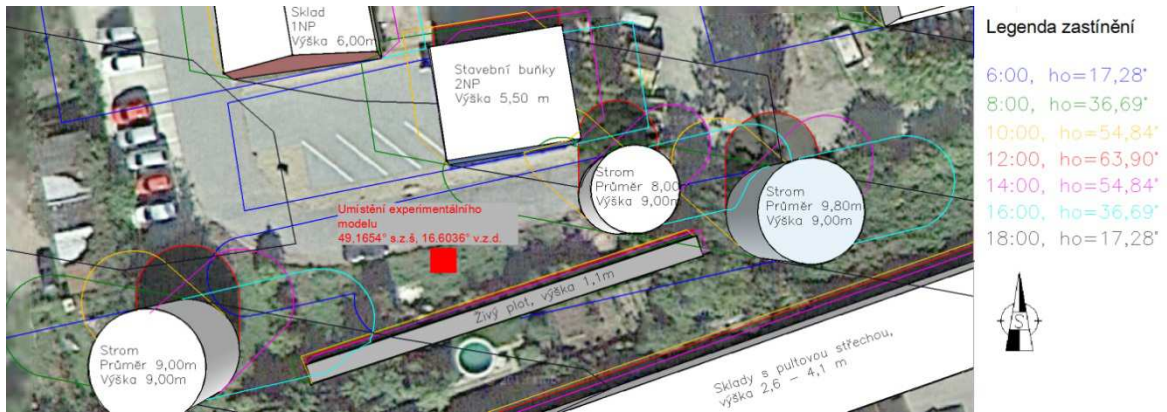
Za vhodné místo pro instalaci experimentálního modelu byl vybrán pozemek společnosti DEK v Brně-Horní Heršpice na ulici Pražákova 625/52a. Vzhledem k vyšším průměrným intenzitám slunečního záření a celkové sumě dopadající sluneční energie na území jižní Moravy, v porovnání s ostatními částmi České republiky, bylo velmi vhodné praktický model umístit právě v Brně.



Obr. 8.1 Umístění modelu (označeno červeným bodem) na pozemku společnosti DEK [70]



Pro určení vhodnosti vybraného místa bylo potřeba provést studii zastínění od okolních překážek. Severně od plánovaného umístění modelu se nachází budova složená ze stavebních buněk o celkové výšce 5,50 m. Východně a západně od posuzovaného umístění se nalézají tři vzrostlé stromy. Poslední výraznou překážkou je budova skladu s výškou od 2,60 do 4,10 metrů ležící jižně od ležícího místa.



Obr. 8.2 Studie stínění modelu okolními překážkami v rámci celého dne

Na výše uvedeném obrázku studie stínění lze spatřit zastínění plánovaného umístění modelu, od vzrostlých stromů umístěných východně, pouze v brzké ranní hodiny (od 6:00 do 7:00) a poté od až od 19:00 od budovy, umístěné severozápadně od modelu. Vzhledem k nízké intenzitě slunečního záření v tyto brzké ranní a pozdní odpolední hodiny bylo shledáno posuzované místo umístění experimentální budovy za vyhovující.

### 8.3 Sestavení modelu

Samotná realizace modelu probíhala od 18. června, kdy byl sestaven skelet modelu, do 17. července, kdy byla položena skladba ploché střechy a nainstalovány měřící zařízení. Demontáž experimentálního modelu proběhla 14. září, to odpovídá celkem 58 dnů, kdy byly na modelu měřeny povrchové teploty polystyrenu, teplota vzduchu a intenzita sluneční radiace. V tomto období bylo celkem 22 slunečných dnů s minimální oblačností, 24 dnů s výrazně střídavou oblačností a 12 velmi oblačných dní. V období od 31. července do 11. srpna nastal pouze jeden velmi oblačný den, zbylé dny byly slunečné.

První den realizace byl postaven skelet modelu se základnou z dřevěných EURO palet a skeletovou konstrukcí stěny a zavětrování z dřevěných latí profilu 40 x 60 mm. Do připraveného modelu byla osazena bezrámová výplň s izolačním trojsklem o šířce 1 820 mm a výšce 1 280 mm s distančním rámečkem vysokým 10 mm. Pro zatížení modelu byly použity betonové dlaždice formátu 500 x 500 x 50 mm. Po osazení zasklení a zatížení modelu bylo provedeno vyrovnání stěnové konstrukce do svislé roviny. Stěnová konstrukce byla vytvořena tak, aby po osazení skladby modelové ploché střechy byla výška parapetu 60 mm.

V pátek 17. července byla provedena pokládka skladby ploché střecha a instalace měřicí zařízení. Na jižní části modelu byla vytvořena spádová vrstva o sklonu 2 % přidáním jedné řady betonové dlažby v blízkosti prosklené plochy a položením OSB desky tl.18mm, na kterou byly následně položeny čtyři kusy EPS 150S o rozměrech 500 x 1 000 x 100 mm.

Níže uvádím pro lepší představu fotografii rozpracovaného experimentálního modelu. Na fotografii můžeme vidět skelet modelu s již instalovaným zasklením z izolačního trojskla.



Obr. 8.3 Dřevěný skelet experimentálního modelu

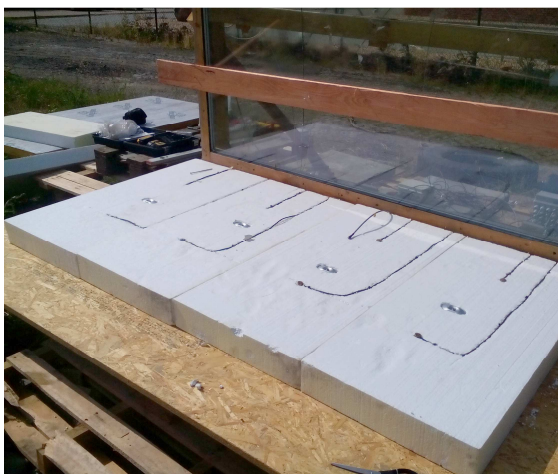
Na horním povrchu desek EPS byly vytvořeny drážky a prohlubně pro následnou instalaci měřících zařízení. Pro kotvení izolačních desek byly použity dva kusy plochých ocelových podložek EJOT mechanicky kotvených do podkladní OSB desky. Následovalo umístění měřících senzorů a jejich stabilizace.

Následovalo položení povlakové hydroizolační krytiny. Pro náš experiment byly vybrány dva typy v Česku nejpoužívanějších střešních povlakových krytin pro ploché střechy. V prvním případě se jednalo o hydroizolační folii z měkčeného PVC DEKPLAN 77 v tloušťce 1,8 mm, která byla naistalována na levou část experimentálního modelu (z pohledu od jihu). Pod PVC krytinu byla položena separační PE textilie. Za druhou krytinu byla zvolena dvouvrstvá živičná hydroizolační krytina, kdy první vrstvu tvořil SBS modifikovaný asfaltový pás se skelnou nosnou vložkou GLASTEK 30 STICKER PLUS se samolepící vrstvou při spodním okraji na kterou byla aplikovaná druhá vrstva hydroizolačního pásu ELASTEK 40 SPECIAL DEKOR s nosnou vložkou



z PE rohože a s hrubozrnným břidlicovým ochranným posypem kotveným pomocí plamene k první vrstvě hydroizolace.

Níže uvádím fotografii rozpracovaného modelu s již mechanicky kotvenými polystyrenovými deskami a uloženými teplotními senzory. Na druhé uvedené fotografii hotového experimentálního modelu lze spatřit obě osazené střešní krytiny a vykreslení odrazové složky slunečního záření dosahující do vzdálenosti přibližně 60 cm od roviny zasklené výplně otvoru. Měřicí moduly jsou chráněny před povětrnostními vlivy stavební zakrývací plachtou.



*Obr. 8.4 osazení desek EPS*



*Obr. 8.5 hotový experimentální model*

Měření na těchto dvou skladbách probíhalo do 5. srpna, kdy na polovinu obou střešních krtin byl ve 12 hodin položen travní koberec z umělé hmoty. V této části pokusu se měl ověřit vliv zvýšeného teplotního namáhání a následné degradace EPS při položení umělého trávníku na skladbu ploché střechy s povlakovou krytinou.



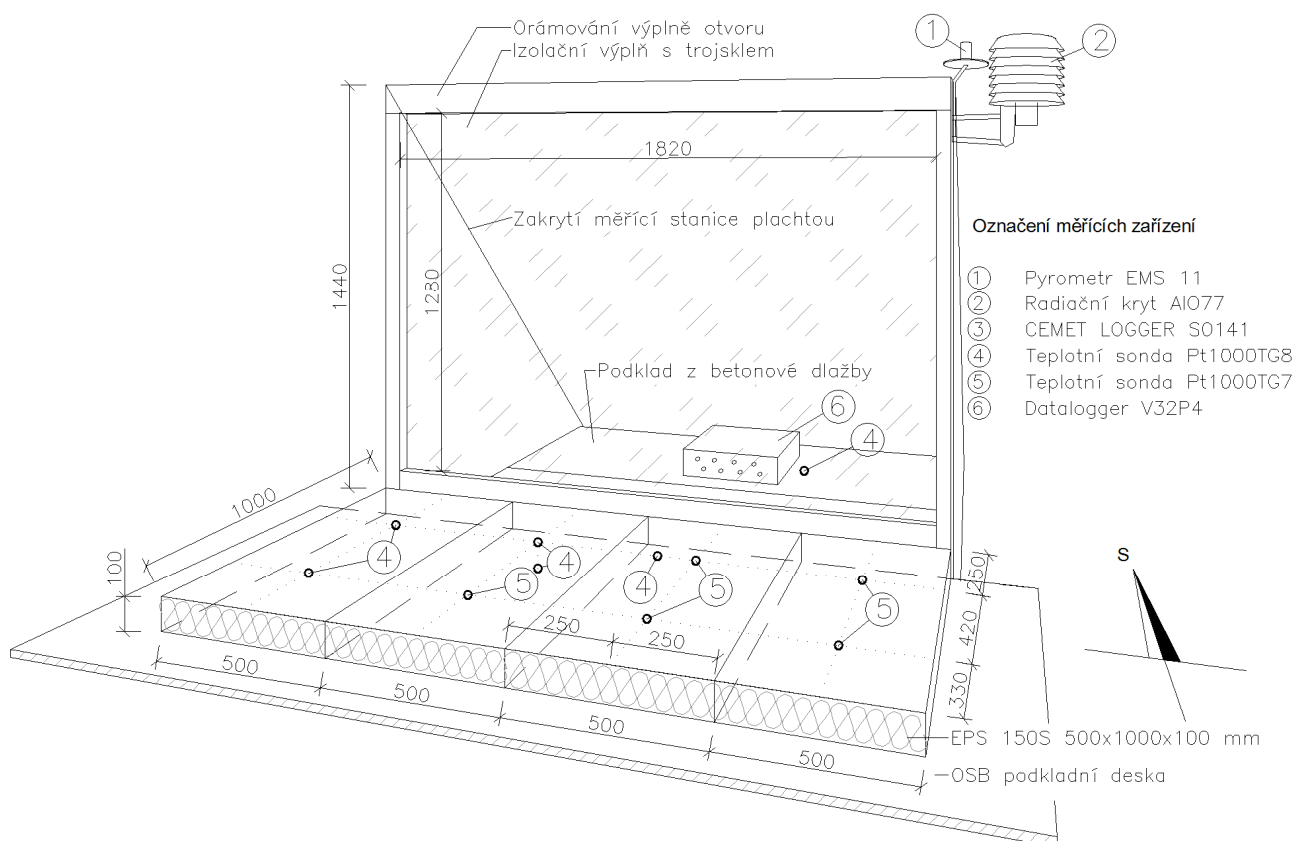
*Obr. 8.5 položení travního koberce z umělé hmoty na povlakovou PVC a asfaltovou krytinu*

Po položení umělého trávníku na skladbu modelové ploché střechy pokračovalo měření teplot a sluneční radiace až do 14. září, kdy byl model demontován.

V následujících subkapitolách detailně popíší použité měřicí zařízení, nejdůležitější stavební materiály a v poslední části analyzují získaná data z měření průběhu povrchových teplot jednotlivých použitých variant střešního pláště modelové ploché střechy.

## 8.4 Měřicí zařízení

Na experimentální model byly instalovány celkem čtyři typy měřících senzorů. Prvním senzorem je pyrometr EMS 11 měřící intenzitu slunečního záření, teplota vzduchu je měřena druhým senzorem, který je instalován do radiačního krytu AIO77. Na modelu se dále nalézají odporové měřicí sondy Pt1000TG7 pro určení povrchové teploty EPS a kontrolní teplotní senzory Pt1000TG8 měřící teplotu vzduchu na různých místech modelu. Tyto měřicí zařízení jsou napojeny do datové schránky Datalogger V32P4. Detailní popis jednotlivých měřících zařízení je uveden v následujících subkapitolách. Všechny měřicí zařízení byly instalovány 17. července v odpoledních hodinách. Analyzována získaných dat, naměřených instalovanými zařízeními, bude prováděna pro hodnoty naměřené od 18. července. Níže přikládám schéma umístění jednotlivých senzorů na experimentálním modelu.



Obr. 8.6 Schéma umístění měřících zařízení

### 8.4.1 Pyrometr, čidlo globální radiace EMS 11

Intenzita slunečního globálního záření byla na modelu měřena pomocí pyrometru s označením EMS 11, jehož hlavní součástí je polovodičový křemíkový diodový senzor. Pyrometr byl namontován poblíž radiačního krytu v levém horním stěnovém rohu (při pohledu od jihu, viz *obrázek 8.7* uvedený níže) experimentálního modelu. [71]



#### Technický specifikace zařízení:

- typická citlivost 20 mV na 1 000 W.m<sup>-2</sup>,
- odchylka ± 9 % intenzity slunečního záření,
- lineární nárůst napětí 1 %,
- kosinová chyba < 10 % při uhlu dopadu do 85 °, *Obr. 8.7 pyrometr EMS 11 [71]*
- rozsah měření: -20 °C až +60 °C,
- Ø 22 mm, výška 39 mm.

### 8.4.2 Radiační kryt AI077

Pro měření venkovní teploty byla použita radiační clona AI077 výrobce EMS Brno, chránící teplotní čidlo před působení sálavého teplotního záření a před deštěm. Clona je tvořena UV odolnými plastovými lamelami s malou tepelnou vodivostí a vysokou odrazivostí. Konstrukce krytu je vytvořena tak, aby kladla minimální odpor proudění vzduchu k teplotnímu snímači, ale zároveň tak, aby bránila průniku slunečního záření k snímači. [71]



*Obr. 8.8 radiační kryt AI077 a  
a pyrometr EMS 11*

#### Technický specifikace zařízení:

- 7 kusů plastových lamel tl. 3mm,
- Ø 150 mm, výška 170 mm,
- vnitřní prostor pro snímač Ø 32mm, výška 130mm,
- rozsah měření: -50 °C až +80 °C,
- odchylka měření ± 0,3 °C.

### 8.4.3 COMET LOGGER S0141

Pro měření povrchové teploty byly použity dva kusy čtyřkanálového záznamníku teploty a vlhkosti COMET LOGGER S0141. První čtyři teplotní čidla použitého záznamníku označeného *logger bez displeje* byla umístěna rovnoměrně na horní povrch dvou desek EPS, na které byla položena separační PE textilie a povlaková střešní krytina z měkkého PVC DEKPLAN 77. Druhý záznamník s označením *logger s displejem* měl další čtyři teplotní sondy umístěné pod povlakovou střešní krytinou z modifikovaných asfaltových pásů. Zařízení obsahuje kalibrační list, s deklarovanými metrologickými návaznostmi etalonů, vychází z požadavků normy ČSN EN ISO / IEC 17025. [72]



Obr. 8.9 COMET  
LOGGER S014 [72]

#### Technický specifikace zařízení:

- rozsah provozní teploty přístroje: -30 °C až +70 °C,
- rozsah provozní vlhkosti přístroje: 0 % RV až 100 % RV.

### 8.4.4 Teplotní sonda Pt1000TG8/E

U experimentálního modelu bylo použito celkem čtyř kusů této sondy pro měření teploty vzduchu na kontrolních místech. Jedná se o odporový nerezový snímač teploty plyných a kapalných látek. Pro nenarušení rovinnosti povrchu střešní krytiny byla vytvořena drážka na horním povrchu desky EPS pro umístění sondy a přívodního vodiče. Před mechanickým ukotvením EPS byla pod desky instalována dva kontrolní teplotní čidla. Po ukotvení došlo k instalaci dalších čidel na horní povrch desek EPS. Sonda je pevně spojena se silikátovým kabelem s konektorem ELKA. Stínění kabelu není spojeno s pouzdrem. [72]



Obr. 8.10 Pt1000TG8  
[72]

#### Technický specifikace zařízení:

- rozsah měření (teplota): -90 °C až +260 °C, 3850ppm / °C
- rozsah měření:(vlhkost): 10 % RV až 100 % RV
- rozsah měření (atm.tlak): 70 až 106 kPa
- odchylka  $\pm 0,2$  °C v rozsahu -50 °C až +100 °C,
- průměr pouzdra  $5,7 \pm 0,1$  mm
- odpor přívodních vodičů  $0,105 \Omega / 1$  m při teplotě 25 °C



### 8.4.5 Teplotní sonda Pt1000TG7/E

Tato sonda byla u experimentálního modelu použita celkem v pěti kusech, k měření povrchové teploty izolantu EPS. Pro instalaci sondy do desky EPS byla vytvořena prohlubeň hloubky 6 mm. [72]

#### Technický specifikace zařízení:

- rozsah měření (teplota): - 30 °C až + 200 °C, 3850ppm / °C,
- rozsah měření:(vlhkost): 10 % RV až 100 % RV,
- rozsah měření (atm.tlak): 70 až 106 kPa,
- odchylka  $\pm 0,15 + 0,002 \times (t)$  °C v rozsahu -50 °C až +100 °C,
- průměr sondy  $19,5 \pm 0,1$  mm, šířka  $6,5 \pm 0,1$  mm,
- odpor přívodních vodičů  $0,162 \Omega / 1$  m při teplotě 25 °C.



Obr. 8.11 Pt1000TG7  
[72]

### 8.4.6 Datalogger V32P4

Všechny výše popsané měřicí zařízení byly napojeny na datová stanice zkompletovanou na zakázku firmou EMS Brno. Stanice pro naše experimentální měření byla nastavena tak, aby zaznamenávala měření po 15 minutách. Stanice byla napájena celkem osmi 1,5 V bateriemi. Jsou zde osazeny čtyři moduly záznamového zařízení Datalogger V32. [71]

#### Technický specifikace zařízení:

- jeden modul má kapacitu 220 000 hodnot
- jeden vstup pro měření teploty Pt100 / Pt1000



Obr. 8.12 Datalogger V32P4

## 8.5 Materiály použité na experimentálním modelu

V přílohách E1 – E6 jsou vloženy detailní tabulky se všemi dostupnými fyzikálními vlastnostmi stavebních materiálů a zasklení použitým na experimentálním modelu. Pro přehlednost níže vkládám pouze stěžejní informace ohledně hlavních použitých materiálů, způsob zabudování a konkrétní specifiky chování těchto materiálů při užití na našem experimentálním modelu.

### 8.5.1 Pěnový polystyren EPS 150S

V obou skladbách experimentálního modelu byl použit deskový EPS 150S v dimenzi 100 mm. Celková instalovaná plocha EPS činila 2 m<sup>2</sup> s rozměry 2,0 x 1,0 m. Deklarovaná hodnota součinitele tepelné vodivosti toho izolantu je 0,034 W.m<sup>-1</sup>.k<sup>-1</sup>, výpočtová hodnota po započítání vlivu vlhkosti činí 0,035 W.m<sup>-2</sup>.k<sup>-1</sup>. Při posuzování našeho modelu ovšem musíme brát v potaz závislost součinitele tepelné vodivosti na teplotě. Z výsledků provedených dynamických simulací vyplývá, že povrchová teplota krytiny může dosahovat až k 95 °C. Vzhledem k hodnotě dlouhodobé tepelné odolnosti EPS, která činí pouze 80 °C, musíme prověřit dosah prostupu nadlimitních teplot v rámci tepelného izolantu skladby ploché střechy. Při použití vztahu:

$$\lambda_i = \lambda_o \cdot (1 + 0,0025 \cdot t) \quad [\text{W.m}^{-1}.\text{k}^{-1}] \quad (8.1)$$

kde je	$\lambda_i$	součinitel tepelné vodivosti závislý na teplotě,	[W.m <sup>-1</sup> .k <sup>-1</sup> ]
	$\lambda_o$	výpočtová hodnota tepelné vodivosti,	[W.m <sup>-1</sup> .k <sup>-1</sup> ]
	t	teplota materiálu,	[°C]

získáme skutečnou tepelnou vodivost použitého izolantu z EPS při teplotě 100 °C podstatně vyšší, než je hodnota výpočtová, v tomto případě je  $\lambda_{100^\circ\text{C}} = 0,044 \text{ W.m}^{-1}.\text{k}^{-1}$ . Zvýšení tepelné vodivosti činí více než 25%. Touto skutečností je dosah prostupu nadměrných teplot v rámci skladby konstrukce ploché střechy vyšší, než bychom předpokládali při nezapočítání tohoto vlivu. V dynamických simulacích prováděných v programu WUFI Pro je tento fakt zohledněn, stejně jako závislost součinitele tepelné vodivosti na vlhkosti materiálu. Vzhledem k velmi malé tepelné jímavosti EPS dochází vlivem změn povrchových teplot k téměř okamžité proměně průběhu teploty v rámci skladby ploché střechy. Důležitým faktem je také závislost změny mechanických vlastností EPS při nárůstu její teploty. U výrobků z polystyrenu dochází k náhlé ztrátě pevnosti při teplotě 100 °C, kdy dochází k tzv. skelnému přechodu.

### 8.5.2 Povlaková hydroizolační krytina z PVC-m

Na levé části skladby (při pohledu z jihu) ploché střechy modelu byla instalována povlaková střešní krytina z měkčeného PVC tl. 1,8 mm DEKPLAN 77. Stěžejními vlastnostmi střešní krytiny, při řešení naší problematiky, je odrazivost, respektive pohltivost krytiny a její tepelný odpor. Vybraná střešní krytina má velmi světlou barvu (světle šedou), přesto jsem jí vybral pro náš experiment a to hlavně z důvodů projevu degradace EPS právě u plochých střech s touto střešní krytinou po položení travního koberce z umělé hmoty. Degradace EPS s touto kombinací vrstev skladby ploché střechy se projevila hned u třech uvedených případech z pěti (*kapitola 1 Současný stav řešené problematiky*). Výše hodnoty emisivity se u stavebních materiálů většinou pohybuje



v rozmezí 0,85 – 0,95. Stejně tak tomu je u použité PVC střešní krytiny, kdy hodnota emisivity činí 0,90. Ovšem v porovnání s asfaltovou krytinou má PVC menší hodnotu pohltivosti slunečního záření  $\alpha$  a pohltivosti viditelného záření  $\alpha_{visible}$ , obě tyto fyzikální vlastnosti mají hodnotu 0,70. Součinitel tepelné vodivosti  $\lambda_d$  této krytiny má hodnotu  $0,20 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ , při tloušťce 1,80 mm činí tepelný odpor této vrstvy  $R_i$  pouze  $0,009 \text{ m}\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$ , při započítání separační geotextilie z PP činí tepelný odpor těchto dvou vrstev pouze zanedbatelných  $0,023 \text{ m}\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$ . Tomuto tepelnému odporu odpovídá ekvivalent 0,81 mm tlustého pěnového polystyrenu. Vzhledem k malé celkové plošné hmotnosti těchto vrstev, činící  $2,5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$  a dobré tepelné vodivosti je měrná akumulace energie velmi nízká. Tyto fyzikální vlastnosti střešní krytiny způsobují velmi rychlé předávání tepelné energie z povrchu do hlubších vrstev skladby konstrukce. To znamená, že použitá střešní krytina nechrání tepelně izolační vrstvu, umístěnou bezprostředně pod hydroizolační folii, před vysokými povrchovými teplotami.

### 8.5.3 Povlaková hydroizolační asfaltová krytina

Na pravou část skladby (při pohledu z jihu) ploché střechy byla položena živičná střešní krytina, z hydroizolačního pásu z SBS modifikovaného asfaltu s nosnou vložkou z polypropylenové rohože podélně vyztužené skleněnými vlákny s břídlícovým ochranným posypem ELASTEK 40 SPECIAL DEKOR. Pod touto finální vrstvou se nacházela první vrstva hydroizolačního souvrství, tvořená asfaltovým pásem z SBS modifikovaného asfaltu s nosnou vložkou ze skleněné rohože, GLASTEK 30 STICKER. První hydroizolační vrstva byla k podkladu (mechanicky kotvené EPS desky) přilepena pomocí samolepícího pruhu umístěného při spodním okraji. Druhá vrstva byla na první natavena plamenem. Detailní výpis všech vlastností těchto hydroizolačních materiálů nalezne v příloze C. *Materiály použité na experimentálním modelu.*

Zde popíši pouze stěžejní vlastnosti finální hydroizolační vrstvy modelové ploché střechy. Stejně jako v předchozím případě tvoří hydroizolační vrstva pouze malou teplotní ochranu před prostupem vysokých teplot probíhající při horním povrchu ploché střechy. Tepelný odpor použitého hydroizolačního souvrství činí pouze  $0,038 \text{ m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$ , to je o 65% vyšší tepelný odpor než tomu je u krytiny z měkčeného PVC. Také vzhledem k vyšší plošné hmotnosti této varianty hydroizolace, jež dosahuje hodnoty  $9,90 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$  (skoro čtyřnásobná hodnota oproti DEKPAN 77) dosahuje lepší tepelné ochrany před průnikem vysokých teplot níže do vrstev skladby ploché střechy, oproti PVC krytiny. Pořád se ovšem jedná o velmi malou tepelnou ochranu o ekvivalentu pouhých 1,3 mm pěnového polystyrenu.

Velmi důležitou vlastností této asfaltové krytiny, pro náš řešený problém, je pohltivost slunečního záření. Stejně jako u PVC má tato krytina je hodnota emisivity rovnu 0,90, což odpovídá běžným stavebním materiálům. Významný rozdíl mezi krytinou z PVC a asfaltu je hodnota pohltivosti slunečního záření  $\alpha$  a pohltivosti viditelného záření  $\alpha_{visible}$ . Asfaltová krytina má hodnotu pohltivosti slunečního  $\alpha$  rovnu 0,85 (o 21% vyšší hodnota než u PVC) a hodnotu pohltivosti viditelného záření  $\alpha_{visible}$  dokonce 0,90 (o 29 % vyšší hodnota než u PVC). Z tohoto zjištění předpokládám podstatně extrémnější průběh povrchových teplot na krytině z asfaltového pásu než ve variantě s PVC krytinou.

#### 8.5.4 Travní koberec z umělé hmoty

Vzhledem k případům degradace tepelného izolantu z EPS, uvedených v kapitole 1 *Současný stav řešené problematiky*, projevující se po pokládce travního koberce z umělé hmoty, jsme se rozhodli otestovat vliv položení tohoto trávnicku na skladbu ploché střechy s krytinou z měkčeného PVC a z modifikovaného asfaltu. Umělý koberec byl položen tak, aby zakryl vždy polovinu ze dvou již zabudovaných střešních krytin viz. *obrázek 8.5* uvedený výše. Při tomto umístění snímaly dva teplotní čidla skladbu s PVC krytinou, dva čidla PVC krytinu s umělým trávnickem, další dva senzory snímaly asfaltovou krytinu a poslední dva asfaltovou krytinu s umělým trávnickem. Umělý trávník byl aplikován 5.srpna.

Hlavním specifikem této povrchové úpravy ploché střechy má být navýšení teplotní pohltivosti povrchu ploché střechy. Před zhodnocením experimentálně naměřených hodnot byl tento fakt pouhou hypotézou, kterou bylo nutno ověřit.

Jak již bylo uvedeno výše v kapitole 1, umělý trávník přijímá energii ze slunečního záření prostřednictvím velké plochy jednotlivých umělých vlasů (stébel). Při použití vlasů o výšce 20 mm a šířkou vlasů 2,5 mm se pohybuje množství vlasů na jeden metr čtvereční přibližně kolem 44 tisíc. [6] Při této konfiguraci je povrchová plocha umělého trávnicku **2,20 m<sup>2</sup>** na jeden metr čtvereční půdorysné plochy. Tato vypočtená plocha je ovšem pouze při započítání jedné strany vlasce, při uvažování obou stran (rub a líc vlasce) je hodnota velikosti plošného povrchu dvojnásobná. Použitím širších a vyšších vlasů se může povrchová plocha trávnicku pohybovat až kolem hodnot **3,9 m<sup>2</sup> / m<sup>2</sup>** (7,8 m<sup>2</sup> / m<sup>2</sup> z obou stran vlasů). Umělý trávník se převážně vyrábí z polypropylenu nebo polyetylenu. Vzhledem k vysoké hodnotě součinitele tepelné vodivosti vlákna vedou přijatou energii velice rychle dále do podložky, ve které se teplo koncentruje.

Je možné, že umělý trávník v našem případě funguje podobně jako transparentní tepelná izolace, která propustí pod určitým úhlem sluneční záření do své struktury, ale získanou tepelnou energii nevyzáří zpět do exteriéru, tak jako tomu je při odrazu slunečního záření u běžných stavebních materiálů, kde je důležitá hlavně emisivita povrchu.

### 8.5.5 Výplň otvoru s izolačním trojsklem

Pro zasklení připraveného stavebního otvoru experimentálního modelu byl vybrán jeden kus bezrámového izolačního trojskla, o rozměrech 1,84 x 1,27 m, s dutinami vyplněnými inertním plynem Argonem. Dodavatelem tohoto zasklení je polský výrobce Press-Glass. [74]

Stěžejní vlastnosti pro náš experiment jsou fyzikální vlastnosti odrazu, prostupu a pohltivosti slunečního záření. Použitá skla mají velmi nízkou hodnotu emisivity  $\varepsilon = 0,03$  zajišťující snížení ztráty způsobené sáláním mezi protilehlými povrchy zasklení. [74]

Nízké emisivity se dosáhne tak, že se povrch skel pokryje velmi tenkou vrstvou ze stříbra a oxidů kovů. To způsobí, že povrch skla odráží zpět dlouhovlnné tepelné záření, takže teplo zůstává v místnosti. Kvůli své nízké emisivitě jsou tyto produkty nazývány jako "Low-E". Tloušťka kovové vrstvy je od 0.01 do 0.10 mikrometrů, což způsobuje, že téměř všechno odražené záření je omezeno na dlouhovlnné infračervené spektrum. Pro většinu viditelného světla je kovová vrstva průhledná. Takže zasklení dosahuje velmi vysoké světelné propustnosti  $\tau$ , která dosahuje u toho typu zasklení hodnot 70 až 71%. Součinitel odrazu slunečního světla  $\rho_v$  má hodnotu 17%. Hodnota součinitele propustnosti celkové energie slunečního záření  $g$  se pohybuje od 48 do 50%. Z uvedených hodnot vyplývá, že se jedná o standardní izolační výplň běžně používanou v tuzemské výstavbě. Další technické vlastnosti zasklení jsou uvedeny v příloze C6. [73]

**Složení výplně:** Thermofloat 4mm / 12 / Float 4mm / 12 / Thermofloat 4mm Argon

## 8.6 Analýza získaných dat u jednotlivých variant středních krytin

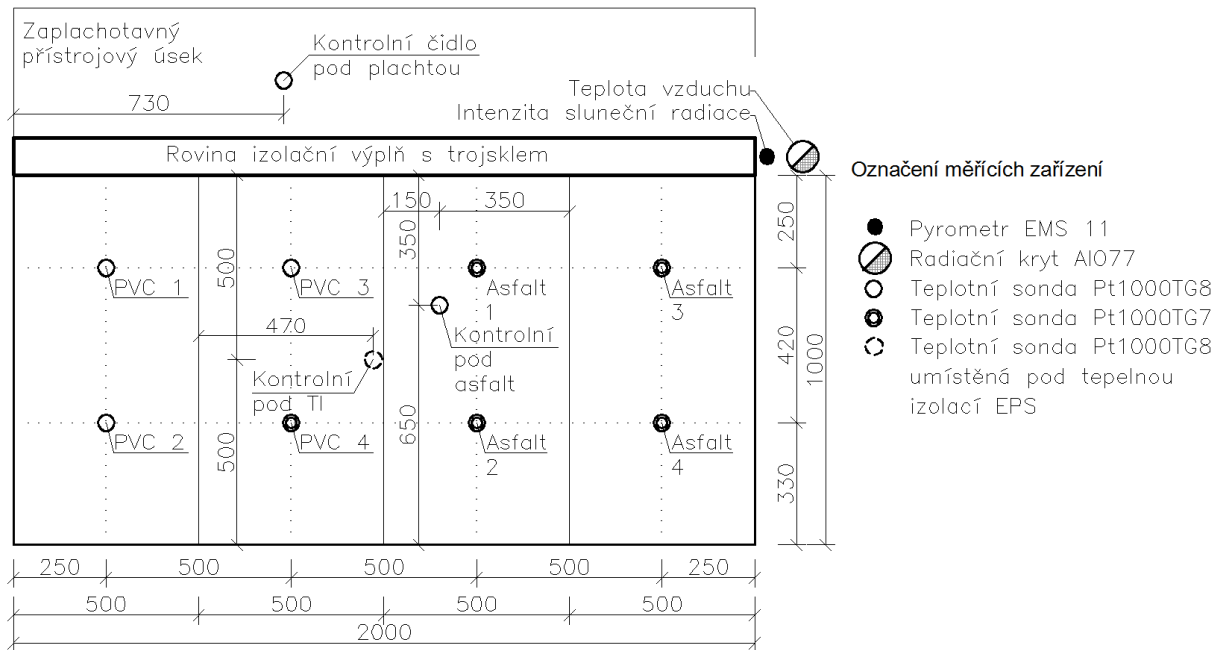
V následujících subkapitolách popíši průběh povrchových teplot experimentálně naměřených u jednotlivých skladeb ploché střechy. V prvních dvou subkapitolách (8.6.1 a 8.6.2) budou popsány naměřené hodnoty z celého modelu z období od 18. července do 4. července., kdy nebyl na střešní krytinu položen travní koberec z umělé hmoty. V dalších dvou subkapitolách (8.6.3 a 8.6.4) již bude řešena situace po položení umělého trávníku. Získaná data, jednotlivých povrchových úprav ploché střechy, jsou vzájemně porovnána v kapitole 8.7 *Syntéza dosažených výsledků u všech střešních skladeb*. V jednotlivých kapitolách se budu odkazovat na přehledné výsledky, za jednotlivé měřené dny, které jsem umístil do přílohy F: *Souhrn data z experimentálního měření*. V těchto přílohách jsou pro uvedeny dosažené hodnoty za jednotlivé dny experimentálního měření. Pro představu zde vkládám pouze část sumace těchto dat ze dne, kdy bylo dosaženo nejvyšší povrchové teploty pod asfaltovou krytinou:

Datum	Veličina	Intenzita slunečního záření	Teplota vzduchu	Povrchová teplota			
				Asfalt 1	Asfalt 2	Asfalt 3	Asfalt 4
	Jednotka	[W]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
22.7	Maximální hodnota	828,4	37,4	97,4	82,2	97,2	80,3
	Minimální hodnota	0,1	20,6	17,1	16,1	16,9	16,2
	Průměrná celodenní hodnota	292,3	29,7	45,9	42,4	44,3	41,4
	Průměr 10:00-16:00	755,7	34,7	91,7	77,0	87,1	75,2
	Suma sluneční energie	7,016	kWh.m <sup>-2</sup>				
	Maximální povrchová teplota	97,4	°C				

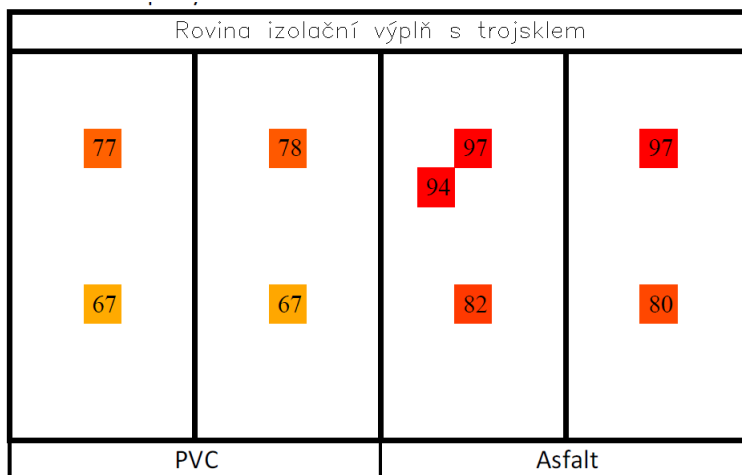
Tab. 8.1 sumace naměřených dat 22. 7. 2015

Z tohoto náhledu sumace dat byly odstraněny teploty z kontrolního měření tří teplotních čidel, také byly odstraněny data o teplotách pod krytinou z měkčeného PVC. Pro vzájemné porovnání jednotlivých míst měření a měřících dní mezi sebou, shledávám jako nejdůležitější hodnotu maximální povrchovou teplotu a průměrnou povrchovou teplotu v časovém intervalu mezi 10:00 až 16:00 kdy bylo dosahováno povrchových teplot na 70 °C.

Níže přikládám schéma s umístěním a označením jednotlivých měřících zařízení. Toto označení budu dále používat u analýzy získaných dat. Pod tímto schématem je umístěn obrázek obr. 8.13 s grafickým vyobrazením rozložení teplot 22. července v 13:00.



Obr. 8.13 schéma s umístěním a označením jednotlivých měřících zařízení



Obr. 8.14 rozložení povrchových teplot 22.07. ve 13:00

Již na obrázku 8.14 můžeme vidět podstatný rozdíl v rozložení povrchových teplot pod krytinou z měkčeného PVC a pod asfaltovým hydroizolačním souvrstvím. Potvrzuje se zde předpoklad významného vlivu emisivity a pohltivosti střešní krytiny na výši teploty na horním povrchu tepelné izolace.

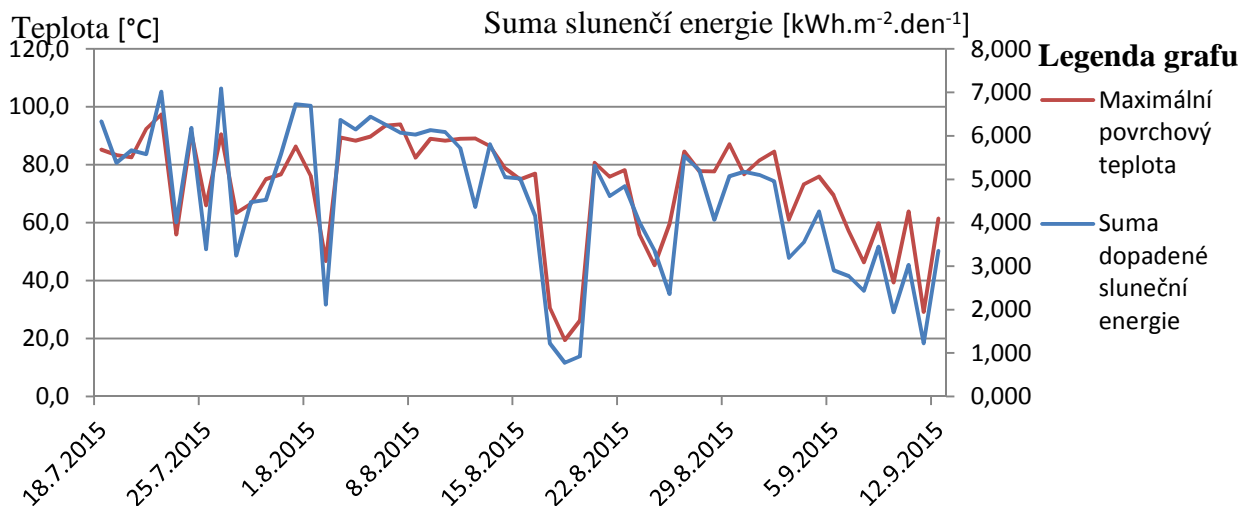
Níže je provedena analýza získaných dat pro jednotlivé povrchové varianty ploché střechy. V analýze se zaměřuji hlavně na data naměřené ve slunečné dny. Dobrým ukazatelem pro zjištění kritického dne je suma dopadené sluneční energie v kWh.m<sup>2</sup>/den a průměrná hodnota intenzity slunečního záření mezi 10. a 16. hodinou, kdy jsou dosahovány nejvyšší povrchové teploty. V níže uvedených subkapitolách můžeme vyčíst, že k překročení tepelné odolnosti EPS (+ 80°C) došlo během 22 dní z 58 měřeních.

### 8.6.1 Vztah mezi sumou sluneční energie a maximální teplotou

Tato subkapitola má za cíl zhodnotit korelaci mezi dosaženou nejvyšší povrchovou a sumou dopadené sluneční energie v kWh.m<sup>-2</sup>/den.

Datum	Suma slunen. energie	Max. povr. tepl.	Datum	Suma slunen. energie	Max. povr. tepl.	Datum	Suma slunen. energie	Max. povr. tepl.	Datum	Suma slunen. energie	Max. povr. tepl.
18.7	6,333	85,2	2.8	2,115	46,8	17.8	1,228	30,6	1.9	4,955	84,6
19.7	5,380	83,3	3.8	6,368	89,4	18.8	0,775	19,5	2.9	3,188	61,0
20.7	5,666	82,6	4.8	6,145	88,3	19.8	0,920	26,2	3.9	3,555	73,3
21.7	5,580	92,4	5.8	6,445	89,8	20.8	5,313	80,7	4.9	4,260	76,0
22.7	7,016	97,4	6.8	6,257	93,5	21.8	4,615	75,8	5.9	2,902	69,4
23.7	4,009	55,9	7.8	6,070	94,0	22.8	4,841	78,2	6.9	2,770	57,2
24.7	6,181	91,0	8.8	6,031	82,5	23.8	4,009	55,9	7.9	2,433	46,3
25.7	3,388	66,0	9.8	6,131	89,0	24.8	3,363	45,3	8.9	3,446	59,8
26.7	7,092	90,5	10.8	6,086	88,3	25.8	2,358	59,6	9.9	1,940	39,4
27.7	3,241	63,3	11.8	5,718	89,0	26.8	5,537	84,6	10.9	3,028	63,9
28.7	4,471	66,6	12.8	4,362	89,1	27.8	5,212	77,8	11.9	1,221	29,2
29.7	4,523	75,1	13.8	5,808	86,5	28.8	4,069	77,7	12.9	3,354	61,5
30.7	5,577	76,7	14.8	5,049	78,8	29.8	5,068	87,1	Nad 4,5 kWh/d 80 °C		
31.7	6,730	86,3	15.8	5,017	75,0	30.8	5,172	76,7	Nad 5,2 kWh/d 90 °C		
1.8	6,689	76,2	16.8	4,159	76,9	31.8	5,100	81,5	Nad 6,0 kWh/d 95 °C		

Tab. 8.2 vztah mezi maximální dosaženou povrchovou teplotou a sumou sluneční energie



Graf. 8.1 vztah mezi maximální dosaženou povrchovou teplotou a sumou sluneční energie

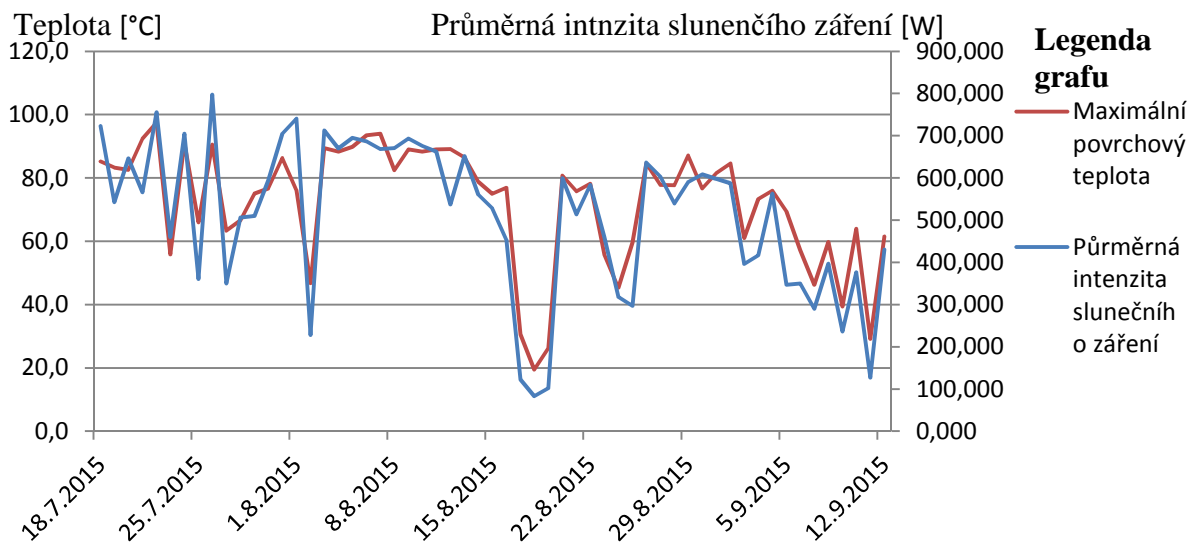
Z uvedené tabulky a grafu je jasné vidět přímá spojitost mezi celkovou dopadenou sluneční energií a doženou nejvyšší teplotou. Jsou zde ovšem i výjimky. Například 31. srpna, kdy úhrn sluneční energie činí 6,73 kWh.m<sup>-2</sup>/den, ovšem povrchová teplota dosáhla hodnoty pouze 86,3 °C. O den později je tento rozdíl ještě výraznější, 1. srpna 6,69 kWh.m<sup>-2</sup>/den, ovšem maximální povrchová teplota činila pouhých 76,2°C.

## 8.6.2 Vztah mezi průměrnou intenzitou záření a teplotou

V této subkapitole jsem zjišťoval, zda vztah mezi intenzitou slunečního záření, v časovém intervalu mezi 10. a 16. hodinou, a hodnotou dosažené nejvyšší povrchové teploty bude výraznější nebo než tomu bylo v přechodím případě.

Datum	Prům. intenz. záření	Max. povr. tepl.	Datum	Prům. intenz. záření	Max. povr. tepl.	Datum	Prům. intenz. záření	Max. povr. tepl.	Datum	Prům. intenz. záření	Max. povr. tepl.
18.7	723,4	85,2	2.8	228	46,8	17.8	123	30,6	1.9	587	84,6
19.7	542,5	83,3	3.8	712	89,4	18.8	83	19,5	2.9	396	61,0
20.7	646,8	82,6	4.8	670	88,3	19.8	102	26,2	3.9	417	73,3
21.7	565,9	92,4	5.8	695	89,8	20.8	600	80,7	4.9	563	76,0
22.7	755,7	97,4	6.8	687	93,5	21.8	514	75,8	5.9	347	69,4
23.7	459,6	55,9	7.8	669	94,0	22.8	583	78,2	6.9	350	57,2
24.7	704,9	91,0	8.8	671	82,5	23.8	460	55,9	7.9	290	46,3
25.7	360,8	66,0	9.8	693	89,0	24.8	318	45,3	8.9	397	59,8
26.7	797,0	90,5	10.8	676	88,3	25.8	297	59,6	9.9	237	39,4
27.7	349,6	63,3	11.8	663	89,0	26.8	636	84,6	10.9	376	63,9
28.7	506,0	66,6	12.8	537	89,1	27.8	603	77,8	11.9	127	29,2
29.7	510,1	75,1	13.8	652	86,5	28.8	539	77,7	12.9	430	61,5
30.7	593,7	76,7	14.8	561	78,8	29.8	590	87,1	Nad 550 W		80 °C
31.7	704,6	86,3	15.8	528	75,0	30.8	609	76,7	Nad 625 W		90 °C
1.8	740,7	76,2	16.8	454	76,9	31.8	598	81,5	Nad 700 W		95 °C

Tab. 8.3 vztah mezi průměrnou intenzitou slunečního záření a maximální povrch. teplotou



Graf. 8.2 vztah mezi průměrnou intenzitou slunečního záření a maximální povrch. teplotou

Z výše uvedeného a tabulky lze vyčíst lepší korelace mezi průměrnou intenzitou slunečního záření a dosaženou maximální teplotou, než tomu bylo v přechodím případě. Výrazně lepší korelace se projevuje hlavně v období od 20.8. do konce měření 14.září.

### 8.6.3 Skladba s asfaltovou střešní krytinou

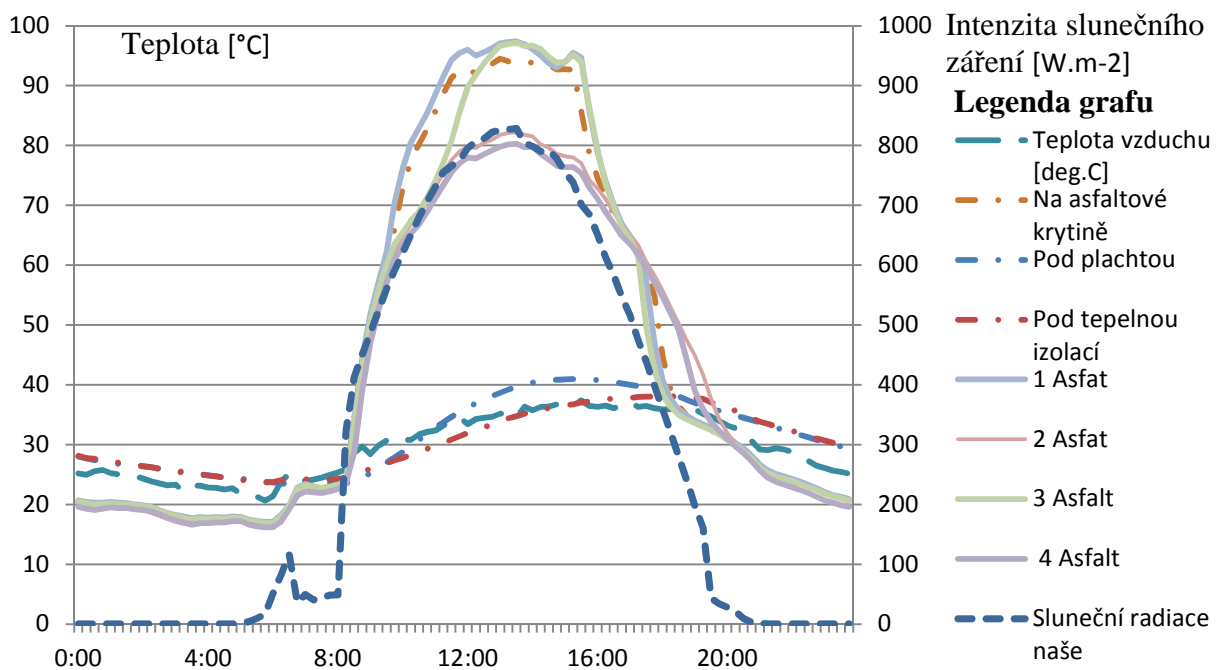
Tato skladba byla umístěna na pravé části modelu (při pohledu z jihu) a bylo na ní umístěno celkem 5 měřících sond (jedna sonda kontrolní). Vzhledem k velmi tmavému odstínu krytiny bylo předpokládáno dosažení podstatně vyšších povrchových teplot na této krytině, než u krytiny z měkčeneho PVC. Avšak jak bylo uvedeno v kapitolách 8.5.2 a 8.5.3, má hydroizolační souvrství tvořené dvěma vrstvami modifikovaného SBS asfaltu větší tepelný odpor (o 65 %) a vyšší plošnou hmotnost (o 300 %), než tomu je v případě krytiny z PVC.

Dle výše uvedené přehledové *tabulky 8.3* jsem si vybral, pro popis průběhu povrchových teplot pod asfaltovou krytinou, den s dosaženou nejvyšší povrchovou teplotou 22. července 2015 a den s nejvyšší průměrnou intenzitou slunečního záření v časovém intervalu od 10. do 16. hodiny: 26. července. V tento den dopadlo také nejvíce slunečního záření, avšak nebylo dosaženo celkově maximální povrchové teploty pod asfaltovou krytinou. Pro analýzu získaných dat je taky zajímavé datum 1. srpna kdy dochází k velké narušení korelace mezi průměrnou intenzitou slunečního záření, celkovou dopadenou sluneční energií a maximální dosaženou povrchovou teplotou.



### 8.6.3.1 Skladba s asfaltovou střešní krytinou 22. července

Za celou délku experimentálního měření bylo 22. července v 13:30 dosaženo, na bodě s označením *Asfalt 1* (světle modrá barva), nejvyšší povrchové teploty **97,4 °C**. Na vedlejším bodě s označením *Asfalt 3* byla ve stejnou hodinu naměřena teplota 97,2 °C. Dlouhodobá teplotní odolnost EPS (80 °C) byla překročena v místě sondy *Asfalt 1* v době od 10:15 až 15:45 (celkem **5,50 hodin**), teplota nad 90 °C pak od 11:15 až 15:30 (celkem 4,25 hodin) a nakonec teplota nad 95 °C byla překročena mezi 11:45 a 14:15 (2,30 hodin). Tento den byla tepelná izolace EPS pod největším teplotním namáháním za celou dobu fungování experimentálního modelu. Po velmi dlouhou dobu byla překročena dlouhodobá teplotní odolnost EPS a v 13:30 se dosažená povrchová teplota přiblížila krátkodobé teplotní odolnosti EPS činící dle výrobce 100 °C.



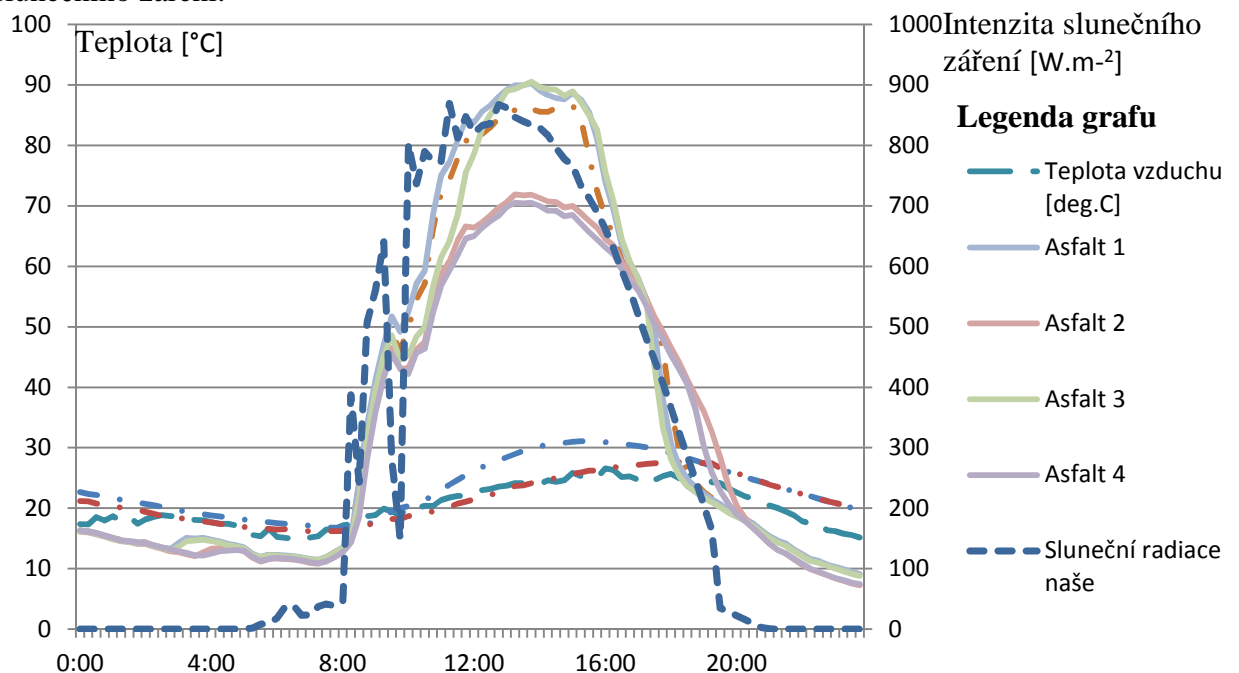
Graf. 8.3 průběh naměřených teplot a slunečního záření ze dne 22. 07. u asfaltové krytiny

Datum	Veličina	Intenzita slunečního záření	Teplota vzduchu	Povrchová teplota			
				Asfalt 1	Asfalt 2	Asfalt 3	Asfalt 4
	Jednotka	[W]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
22.7	Maximální hodnota	828,4	37,4	<b>97,4</b>	<b>82,2</b>	<b>97,2</b>	<b>80,3</b>
	Minimální hodnota	0,1	20,6	17,1	16,1	16,9	16,2
	Průměrná celodenní hodnota	292,3	29,7	45,9	42,4	44,3	41,4
	Průměr 10:00-16:00	755,7	34,7	<b>91,7</b>	77,0	<b>87,1</b>	75,2
	Suma sluneční energie	7,016kWh.m-2					
	Maximální povrchová teplota	97,4°C					

Tab. 8.4 Souhrnná tabulka s naměřenými hodnotami z 22. 07. pod asfaltovou krytinou

### 8.6.3.2 Skladba s asfaltovou střešní krytinou 26. července

Dne 26. července bylo dosaženo nejvyšší průměrné intenzity slunečního záření v časovém intervalu od 10. do 16. hodiny, dopadlo také nejvíce slunečního záření. Dle těchto informací bych předpokládal, že v tento den bude dosaženo maximální povrchové teploty, to se ovšem nestalo a nejvyšší povrchová teplota byla pouze 90,5 °C. Z níže uvedeného grafu a tabulky lze vyčíst, že hodnota sluneční radiace během dne byla vyšší, než tomu bylo dne 26. července, ovšem 8:30 a poté v 9:30 se objevila drobná oblačnost, která měla okamžitý vliv na pokles povrchové teploty krytiny přibližně o 3 °C. Na tomto příkladu lze vidět relativně velikou závislost mezi malou oblačností a výší maximální povrchové teploty. Je také možné, že se čidlo pyrometru špatně přizpůsobilo náhlé změně intenzity slunečního záření (z 640 W.m<sup>-1</sup> na 150 W.m<sup>-1</sup>) a naměřilo nereálnou hodnotu intenzity slunečního záření v 10:00 (803 W.m<sup>-1</sup>) a v 11:15 (869 W.m<sup>-1</sup>) tyto špičky pak měly vliv na výpočet celkové dopadené sluneční energie a průměrné intenzity slunečního záření.



Graf. 8.4 průběh naměřených teplot a slunečního záření ze dne 26. 07. u asfaltové krytiny

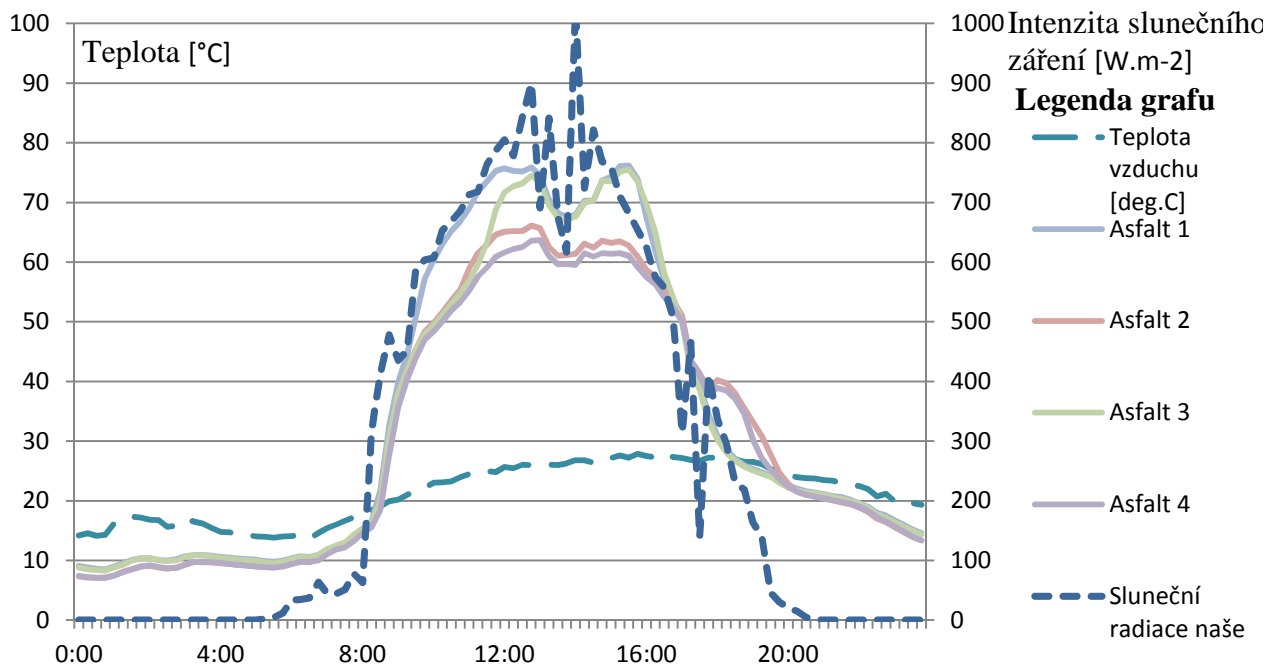
Datum	Veličina	Intenzita slunečního záření	Teplota vzduchu	Povrchová teplota			
				Asfalt 1	Asfalt 2	Asfalt 3	Asfalt 4
		[W]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
26.7	Maximální hodnota	869,0	26,6	<b>90,3</b>	71,9	<b>90,5</b>	70,5
	Průměr 10:00-16:00	797,0	23,3	81,1	64,7	77,5	63,3
	Suma sluneční energie	7,092 kWh.m <sup>-2</sup>					
	Maximální povrchová teplota	90,5 °C					

Tab. 8.5 souhrnná tabulka s naměřenými hodnotami z 26. 07. pod asfaltovou krytinou

### 8.6.3.3 Skladba s asfaltovou střešní krytinou 1. srpna

Tento den je zajímavý tím, že dochází k velkému narušení korelace mezi průměrnou intenzitou slunečního záření, celkovou dopadenou sluneční energií a maximální dosaženou povrchovou teplotou. Po prostudování níže uvedeného grafu a souhrnné tabulky jsem dospěl k závěru, že se jedná o podobný případ zkreslení hodnot intenzity slunečního záření, tak jako tomu byla v přechozí subkapitole. Dva vrcholy v intenzitách slunečního záření (v 12:45  $900 \text{ W.m}^{-2}$  a v 14:00  $1024 \text{ W.m}^{-2}$ ) výrazně zkruslují výsledné hodnoty průměrné sluneční intenzity a celkové dopadené sluneční energií. V tento den se povrchové teploty pod asfaltovou izolací pohubují pouze do  $75 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Výsledné souhrnné hodnoty maximálních a průměrných intenzit slunečního záření musíme brát pouze jako informativní, vzhledem ke zkruslujícím hodnotám intenzity slunečního záření. Proto je lepší v našem případě se řídit naměřenými max. teplotami.



Graf. 8.5 průběh naměřených teplot a slunečního záření ze dne 1. 8. u asfaltové krytiny

Datum	Veličina	Intenzita slunečního záření	Teplota vzduchu	Povrchová teplota			
				Asfat 1	Asfat 2	Asfalt 3	Asfalt 4
	Jednotka	[W]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
1.8	Maximální hodnota	1024,2	28,0	76,2	66,1	75,5	63,7
	Minimální hodnota	0,1	13,6	8,5	7,1	8,3	7,1
	Průměrná celodenní hodnota	278,7	21,3	33,8	31,1	32,4	30,2
	Průměr 10:00-16:00	740,7	25,8	71,1	61,2	67,0	59,0
	Suma sluneční energie	6,689 kWh.m-2					
	Maximální povrchová teplota	76,2 °C					

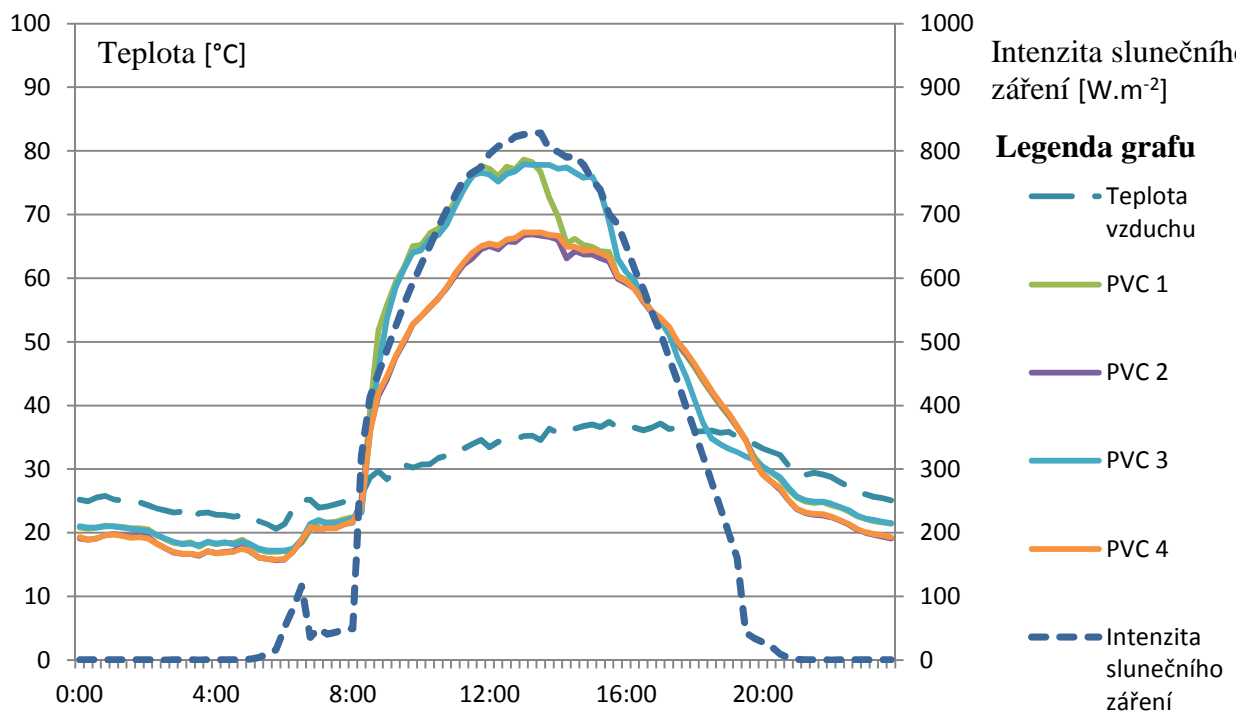
Tab. 8.6 souhrnná tabulka s naměřenými hodnotami z 1. 8. pod asfaltovou krytinou

### 8.6.4 Skladba s PVC střešní krytinou

Na výše uvedených příkladech byla provedena analýza závislosti mezi intenzitou slunečního záření a průběhem povrchových teplot. Byly zjištěny určité nedostatky v měřicím zařízení pro určení intenzity slunečního záření. Proto se v této a následujících subkapitolách budu řídit hodnotou maximální povrchové teploty a pouze informativně naměřenou maximální intenzitou slunečního. Statistická hodnota průměrné povrchové teploty v časovém intervalu od 10:00 do 16:00 je v našem případě směrodatnější, než je tomu u statistických hodnot založených na měření intenzity slunečního záření.

Použitá střešní krytina z měkčeného PVC má podstatně světlejší povrchovou úpravu, hladší povrch a menší hodnotě pohltivosti slunečního záření, než je tomu u krytiny z asfaltových pásů. Z tohoto důvodu je předpokladem pro průběh povrchových teplot pod střešní krytinou z měkčeného PVC podstatně mírnější průběh s menší amplitudou maximálních naměřených hodnot povrchové teploty.

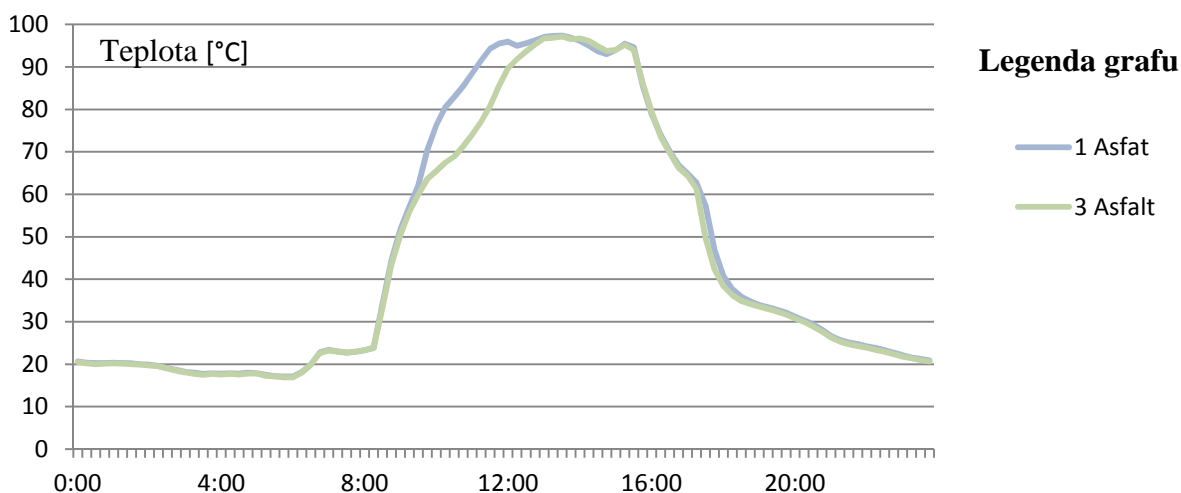
Nejvyšší povrchová teplota (78,60 °C) pod krytinou z PVC byla naměřena ve stejný den, jako tomu bylo u asfaltové krytiny, tedy 22. července. To znamená, že teplota pod krytinou z PVC nikdy nepřesáhla dlouhodobou teplotní odolnost EPS. Ve stejný den bylo dosaženo také nejvyšší průměrné povrchové teploty (73,18 °C) v intervalu od 10:00 do 16:00 po krytině z PVC. Již z této informace vyplývá podstatně jiný průběh povrchových teplot pod krytinou z PVC a asfaltu. Absolutní rozdíl v maximální naměřené hodnotě mezi PVC a asfaltem činí **18,8 °C**, což odpovídá poklesu o 19,3 %. U průměrné teploty mezi 10. a 16. hodinu tento rozdíl činí **18,52 °C**, odpovídající poklesu o 20,2 %.



Obr. 8.6 průběh naměřených teplot a slunečního záření ze dne 22. 7. u PVC krytiny

### 8.6.5 Skladba s asfaltovou střešní krytinou a položeným umělým trávničkem

Travní koberec z umělé hmoty byl položen na povrch střešní krytiny modelové ploché střechy ve středu 5. srpna 2015. Před analýzou naměřených dat nebylo zcela jisté, zda průběh povrchových teplot pod asfaltovou krytinou s aplikovaným umělým travním kobercem dozná změn, zda aplikace umělého trávničku navýší anebo sníží povrchové teploty. Nejsme schopni zcela korektně porovnat variantu před a po položení umělého trávničku. Je to dáno rozdílem klimatických podmínkami v jednotlivé měřené dny a pouze jedním experimentálním modelem. Z analýzy předchozích dat ovšem vyplývá to, že průběh povrchových teplot u bodů označených *Asfalt 1* a *Asfalt 3* je velice podobný. Výraznější rozdíl při slunečném dni (jako tomu bylo 22. července) nastává mezi 9:45 a 12:45, v tuto dobu se projevu rozdíl v průběhu povrchových teplot, způsobený dopadem odraženého slunečního záření od přilehlé prosklené plochy. Na místo, kde je umístěno teplotní čidlo *Asfalt 1* dopadá oproti místu s čidlem *Asfalt 3*, v této době dopadá odražená složka slunečního záření. Tento rozdíl lze spatřit na níže uvedeném grafu:



Graf. 8.7 rozdíl v průběhu naměřených teplot ze dne 22. 07. u asfaltové krytiny

Na grafu 8.7 lze spatřit fakt, že od 12:45 jsou již povrchové teploty naměřené senzory *Asfalt 1* a *Asfalt 3* již srovnatelné. Toto zjištění využije při následném porovnání naměřených dat a při validaci účinku položení umělého trávničku na asfaltovou krytinu.

Maximální povrchová teplota (94,0 °C), pod umělým trávničkem a asfaltovou krytinou, byla naměřena 7. srpna, tedy hned třetí den po položení trávničku. V tento den byla také naměřena nejvyšší průměrná povrchová teplota v intervalu od 10. do 16. hodiny. Z níže uvedené *tabulky 8.7* lze vyčíst, že dlouhodobá teplotní odolnost byla překročena během 14 dní od 5.8. do 12.9. Teplota nad 90 °C byla překročena pouze ve dvou dnech: 6. a 8. srpna.

Datum	Suma slunen. energie	Bod	Max. povr. tepl.	Datum	Suma slunen. energie	Bod	Max. povr. tepl.
5.8	6,445	Asfalt 1	89,8	25.8	2,358	Asfalt 1	48,6
6.8	6,257	Asfalt 1	93,5	26.8	5,537	Asfalt 1	84,6
7.8	6,070	Asfalt 1	94,0	27.8	5,212	Asfalt 1	77,5
8.8	6,031	Asfalt 1	82,5	28.8	4,069	Asfalt 1	77,7
9.8	6,131	Asfalt 1	89,0	29.8	5,068	Asfalt 1	87,1
10.8	6,086	Asfalt 1	88,3	30.8	5,172	Asfalt 1	76,7
11.8	5,718	Asfalt 1	89,0	31.8	5,100	Asfalt 1	81,5
12.8	4,362	Asfalt 1	89,1	1.9	4,955	Asfalt 1	84,6
13.8	5,808	Asfalt 1	86,5	2.9	3,188	Asfalt 1	57,8
14.8	5,049	Asfalt 1	78,8	3.9	3,555	Asfalt 1	70,2
15.8	5,017	Asfalt 1	75,0	4.9	4,260	Asfalt 1	75,5
16.8	4,159	Asfalt 1	75,7	5.9	2,902	Asfalt 1	63,5
17.8	1,228	Asfalt 2	26,1	6.9	2,770	Asfalt 1	53,8
18.8	0,775	Asfalt 1	19,4	7.9	2,433	Asfalt 1	44,7
19.8	0,920	Asfalt 2	21,7	8.9	3,446	Asfalt 1	58,5
20.8	5,313	Asfalt 1	80,7	9.9	1,940	Asfalt 1	37,2
21.8	4,615	Asfalt 1	75,8	10.9	3,028	Asfalt 1	59,1
22.8	4,841	Asfalt 1	78,2	11.9	1,221	Asfalt 2	22,6
23.8	4,009	Asfalt 1	54,6	12.9	3,354	Asfalt 1	61,2
24.8	3,363	Asfalt 1	41,8				

Tab. 8.7 Maximální povrchové teploty pod umělým trávničkem a asfaltem 5.8 – 12.9.

Na níže uvedeném obrázku 8.15 je graficky zobrazeno rozložení naměřených povrchových teplot v den dosažení maximální povrchové teploty pod umělým trávničkem na asfaltové krytině (7. srpna v 13:30).

Zasklení			
75	92	94 91	91
67	81	82	79
PVC	trávniček+PVC	trávniček+asfalt	asfalt

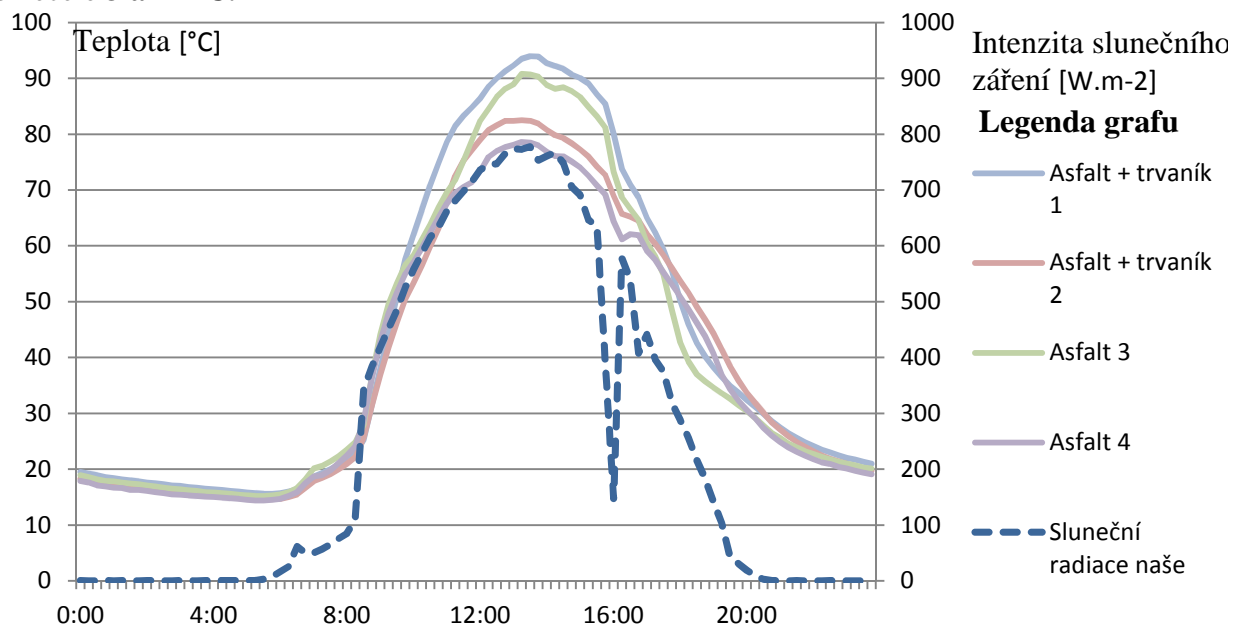
Obr.8.15 rozložení povrchových teplot 7.8. ve 13:30

Dne 7. srpna byla překročena hranice 80 °C pod umělým trávnickem a asfaltovou krytinou po dobu 4,75 hodin (od 11:15 do 16:00). Teplota nad 90 °C byla překročena v časovém intervalu od 12:30 až 15:00 hodin. Z výše zjištěného faktu o vzájemné podobnosti průběhu povrchových teplot v místě umístění senzorů s označením *Asfalt 1* (v tomto případě ozn. *Asfalt + trávník 1*) a *Asfalt 3* od 12:45 můžeme validovat rozdíl mezi variantou, kdy je na asfaltové krytině položen travní koberec z umělé hmoty a kdy ne. V 13:45 bylo na senzoru *Asfalt 1* povrchová teplota 93,9 °C, zatímco na senzoru *Asfalt 3* 90,3 °C, to činí absolutní rozdíl 3,6 °C. Pro kontrolu přikládám ještě jedno porovnání, tentokrát pro čas 15:00, kdy na senzoru *Asfalt 1* byla naměřena teplota 90,1 °C a na senzoru *Asfalt 3* 86,7 °C, to činí rozdíl 3,4 °C. Pokud porovnáme stejným postupem měření z předchozího dne 6. srpna, kdy bylo dosaženo maximální povrchové teploty (93,5 °C) pouze 0,5 °C nižší ne 7. srpna, tak zjistíme tyto rozdíly:

<b>6. srpna</b>	13:00	13:30	14:00	14:30	15:00	15:30	16:00
Asfalt + trávník 1	92,6	93,5	91,8	93,3	91,2	86,8	74,3
Asfalt 3	88,9	90,4	89,4	90,9	87,4	79,5	70,1
rozdíl	<b>3,7</b>	<b>3,1</b>	<b>2,4</b>	<b>2,4</b>	<b>3,8</b>	<b>7,3</b>	<b>4,2</b>
<b>7. srpna</b>	13:00	13:30	14:00	14:30	15:00	15:30	16:00
Asfalt + trávník 1	92,3	94	92,7	91,7	90,1	87,1	80,1
Asfalt 3	88,9	90,7	88,8	88,4	86,7	83,2	73,3
rozdíl	<b>3,4</b>	<b>3,3</b>	<b>3,9</b>	<b>3,3</b>	<b>3,4</b>	<b>3,9</b>	<b>6,8</b>

Tab. 8.8 porovnání asfaltové krytiny s a bez aplikace umělého trávnicku

Průměrný rozdíl mezi naměřenými teplotami u části s aplikovaným trávnickem a bez něho činí 3,92 °C. Z těchto výsledků lze usoudit, že aplikací umělého trávnicku na asfaltovou střešní krytinu se povrchová teplota pod hydroizolací zvýší průměrně o necelé 3 až 4 °C.

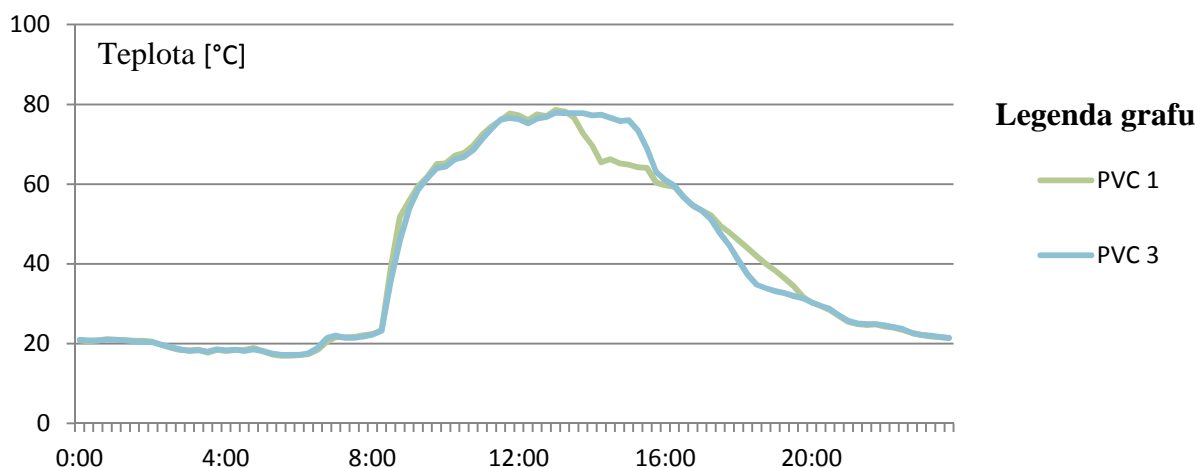


Graf. 8.8 průběh teplot ze dne 7. 8. u asfaltu s částečnou aplikací umělého trávnicku



### 8.6.6 Skladba s PVC střešní krytinou a položeným umělým trávníkem

Před položením umělého trávníku, na střešní krytinu z foliové hydroizolace z měkčeného PVC, se předpokládalo navýšení průběhu teplot pod hydroizolací po aplikaci umělého trávníku. Pro porovnání varianty s a bez položení umělého trávníku jsem použil stejnou metodu, jako u zjištění vztahů mezi změnou povrchové teploty pod asfaltovou hydroizolací po aplikaci trávníku. Prvně bylo nutno ověřit, zda v určitou denní dobu, během slunečného dne, je průběh povrchových teplot u senzoru označeného *PVC 1* a *PVC 3* srovnatelný. Pro porovnání jsem si vybral stejný den (22. července), který jsem analyzoval v kapitole 8.6.4. Na níže uvedeném grafu můžeme vyčíst stejnou podobnost, jako tomu bylo u asfaltové krytiny u senzorů *Asfalt 1* a *Asfalt 3*. V tomto případě je ovšem podobnost *mezi* dopoledními a brzkými odpoledními hodinami. Tento fakt je způsoben pohybem Slunce na obloze a odrazem slunečního záření zasklené plochy. Průběh povrchových teplot u senzorů *PVC 1* a *PVC 3* je prakticky identický od 19:45 do 13:00.



Obr. 8.9 průběh naměřených teplot a slunečního záření ze dne 22. 7. u PVC krytiny

Nejvyšší povrchová teplota pod umělým trávníkem a PVC krytinou byla naměřena ve stejný den (7. července) jako v případě asfaltové krytiny s trávníkem. Maximální povrchová teplota (92 °C) byla dosažena v 13:30.

Datum	Veličina	Intenzita slunečního záření	Teplota vzduchu	Povrchová teplota			
				PVC 1	PVC 2	PVC + trávník 3	PVC + trávník 4
	Jednotka	[W]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
7.8	Maximální hodnota	777,3	37,1	76,2	70,9	92,0	81,1
	Průměr 10:00-16:00	668,5	34,6	67,2	62,4	83,6	75,1
	Suma sluneční energie	6,070 kWh.m <sup>-2</sup>					
	Max. povrchová teplota	92,0 °C					

Tab. 8.9 Soudné informace ze 7. 8. PVC krytina s umělým trávníkem

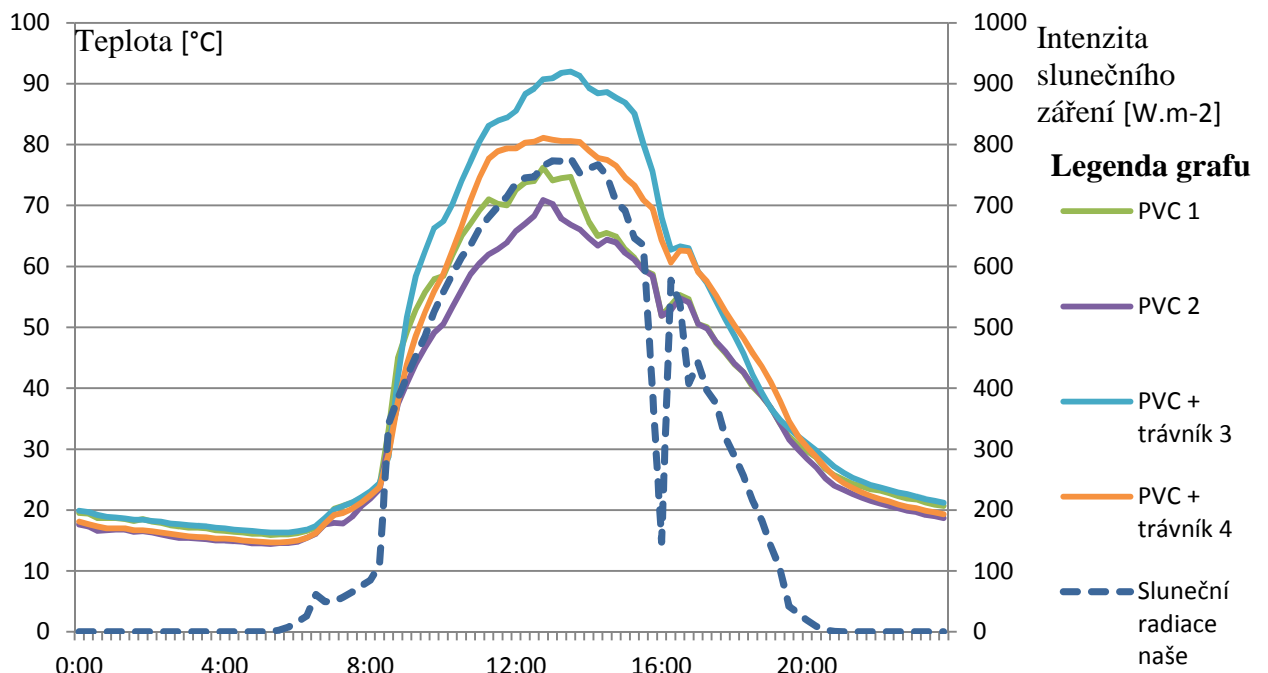


V níže uvedené *tabulce 8.10* můžeme vidět výrazné odchylky v průběhu povrchových teplot mezi variantou krytiny, kde není položen umělý trávník (PVC 1) a kde trávník položen je (PVC + trávník 3). Lze spatřit přibližně lineární nárůst rozdílu mezi průběhem povrchové teploty v časovém intervalu mezi 10. a 13. hodinou. Tento rostoucí trend pokračuje i po 13. hodině, zde jsou už povrchové teploty ovlivněny odrazovou slunečního záření. Například v 13:30 dosahuje teplota na senzoru *PVC 1* hodnoty 74,7 °C, u *PVC 3* (*PVC + trávník 3*) je to 92,0 °C rozdíl zde činí dokonce **17,3 °C**. Teplotní rozdíl mezi senzorem *PVC 3* a *PVC 2* v 13:30 činí dokonce **25,2 °C**. Průměrný rozdíl vypočtený ze dvou dnů (6. a 7. srpna) v časovém intervalu 11:00 až 13:00 činí 12,62 °C.

Z dosažených výsledků jasně vyplývá, že po položení travního koberce z umělé hmoty na střešní krytinu z měkčeného PVC podstatně stoupne teplotní namáhání střešní krytiny stejně jako materiálů umístěných pod hydroizolační střešní krytinou. Povrchová teplota dle naměřených dat může stoupnout po položení umělého trávniku až o 16,8 °C (srovnatelné podmínky měřících senzorů).

<b>6. srpna</b>	10:00	10:30	11:00	11:30	12:00	12:30	13:00
PVC 1	59,7	64,6	67,3	71,6	72,9	73,5	75,4
PVC + trávník 3	68,2	73,9	79,9	83,8	87,8	88,9	91,4
rozdíl	<b>8,5</b>	<b>9,3</b>	<b>12,6</b>	<b>12,2</b>	<b>14,9</b>	<b>15,4</b>	<b>16,0</b>
<b>7. srpna</b>	10:00	10:30	11:00	11:30	12:00	12:30	13:00
PVC 1	58,4	65,0	69,2	70,3	72,6	74,0	74,1
PVC + trávník 3	67,4	74	80,5	83,9	85,5	89,2	90,9
rozdíl	<b>9,0</b>	<b>9,0</b>	<b>11,3</b>	<b>13,6</b>	<b>12,9</b>	<b>15,2</b>	<b>16,8</b>

Tab. 8.10 porovnání PVC krytiny s a bez aplikace umělého trávniku



Graf. 8.10 průběh teplot ze dne 7. 8. u PVC krytiny s částečnou aplikací umělého trávniku

## 8.7 Syntéza dosažených výsledků u všech střešních skladeb

Z výše uvedených analýz průběhu povrchových teplot pod jednotlivými střešními krytinami a povrchovými úpravami můžeme vyvodit následující poznatky:

### 8.7.1 Vliv odražené složky slunečního záření

Velmi významným vliv je rozdíl průběhu teplot měřených u teplotních senzorů, na které dopadá odražená složka slunečního záření od přilehlého zasklení a na které ne. Na teplotní senzory v první řadě (blíže k zasklení) odraz od zasklení dopadá a pro jsou v tomto místě měřeny vyšší teploty, než tomu je u vzdálenějších senzorů. Tento rozdíl činí u asfaltové krytiny až 15°C, u PVC 11°C, u asfaltové krytiny s položeným umělým trávničkem 11°C a u PVC krytiny až 12°C.

### 8.7.2 Vliv volby střešní krytiny na průběh povrchových teplot

Na průběh povrchových teplot má ještě zásadnější vliv emisivita a pohltivost povrchu střešní krytiny ploché střechy. Pod střešní krytinou z PVC nebyla během celého měřeného období překročena dlouhodobá teplotní odolnost EPS, přestože na polovinu teplotních čidel dopadala také odražená složka slunečního záření od přilehlého zasklení. Z tohoto vyplývá vhodnost použití povlakové střešní krytiny z měkčeného PVC i do oblasti s přiléhajícími prosklenými plochami. Maximální teplota dosažená pod PVC krytinou dosáhla pouze **78,60 °C** v nejslunečnější den z celého měření (22. července 2015). Střešní krytina z asfaltového souvrství, vlivem vysoké pohltivosti slunečního záření, velmi výrazně teplotně zatěžuje izolační vrstvu z EPS. 22. července byla naměřena nejvyšší dosažená povrchová teplota pod asfaltovou krytinou **97,4 °C**. Rozdíl v maximálních naměřených teplotách pod asfaltovou a PVC krytinou činí **18,8 °C**

### 8.7.3 Vliv položení travního koberce z umělé hmoty

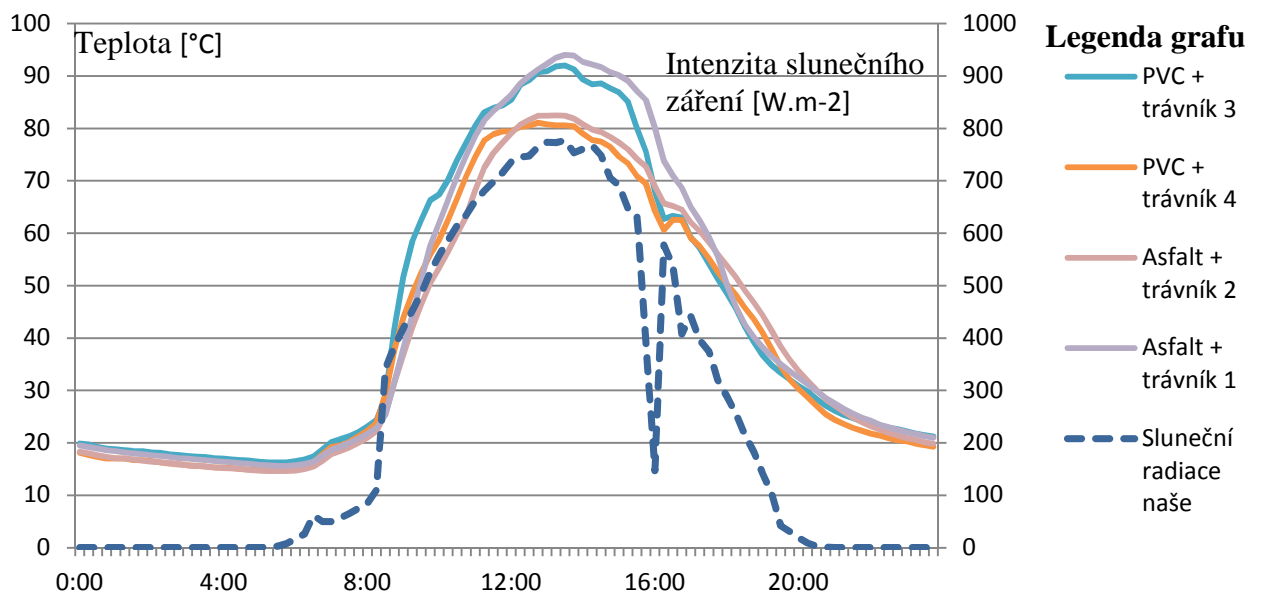
Z výše uvedených analýz vlivu položení umělého trávničku na střešní krytinu s asfaltovým hydroizolačním souvrstvím (*subkapitola 8.6.5*) a z měkčeného PVC (*subkapitola 8.6.6*) je jasně vidět, že po položení umělého trávničku se povrchové teploty pod krytinou zvýšily. U asfaltové krytiny toto navýšení povrchové teploty činilo od 2,4 °C do 7,3 °C. Průměrné navýšení teploty ze dvou po sobě následujících slunečných dnech dosáhlo necelých **4 °C**. U PVC krytiny byl tento rozdíl mnohem podstatnější. Dosažený teplotní rozdíl se pohyboval od 8,5 °C do 16,8 °C s dvoudenním průměrem **12,6 °C**. Z těchto hodnot je patrný výrazný vliv položení umělého trávničku na PVC krytinu. 8. srpna byla naměřena nejvyšší povrchové teploty pod PVC krytinou a umělým trávničkem **92,0 °C**. V porovnání s maximální teplotou pod PVC krytinou bez položení umělého trávničku (22.7. maximální povrchová teplota 78,6°C) činí rozdíl **13,4 °C**.

### 8.7.4 Délka expozice tepelného izolantu vysokým teplotám

Vysokou teplotou v tomto případě je myšlená dlouhodobá teplotní odolnost EPS činící + 80 °C. Jak již bylo uvedeno výše, tato teplota nebyla během celého měření pod PVC krytinou překročena.

Oproti tomu pod krytinou z asfaltu byla překročena tato teplota během **22 dnů** z celkových 58 měřicích dnů. Maximální povrchová teplota EPS byla dokonce během **5 dnů** vyšší než 90 °C a nakonec během jednoho dne překročila povrchová teplota výši 95 °C. Při analýze dat z měření pod asfaltovou krytinou bylo zjištěno, že v nejasnější den měření (22. července) byla teplota 80 °C překročena po dobu **5,50 hodin**, teplota nad 90 °C po dobu **4,25 hodin** a nakonec teplota nad 95 °C trvala **2,50 hodin**. Po velmi dlouhou dobu byla tedy překročena dlouhodobá teplotní odolnost EPS a v 13:30 se dosažená povrchová teplota (97,4 °C) přiblížila krátkodobé teplotní odolnosti EPS činící dle výrobce 100 °C.

Po aplikaci umělého trávníku došlo k vyrovnání v průběhu povrchových teplot u krytiny z PVC a z asfaltu. Například průběh teplot naměřených 7. srpna na senzorech označených *PVC 3 (PVC + travník 3)* a *Asfalt 1 (Asfalt + travník 1)* jsou již velmi podobné. Tato podobnost je dobře viditelná na níže uvedeném grafu.



Graf. 11 průběh teplot ze dne 7. 8. u senzorů pod umělým trávníkem

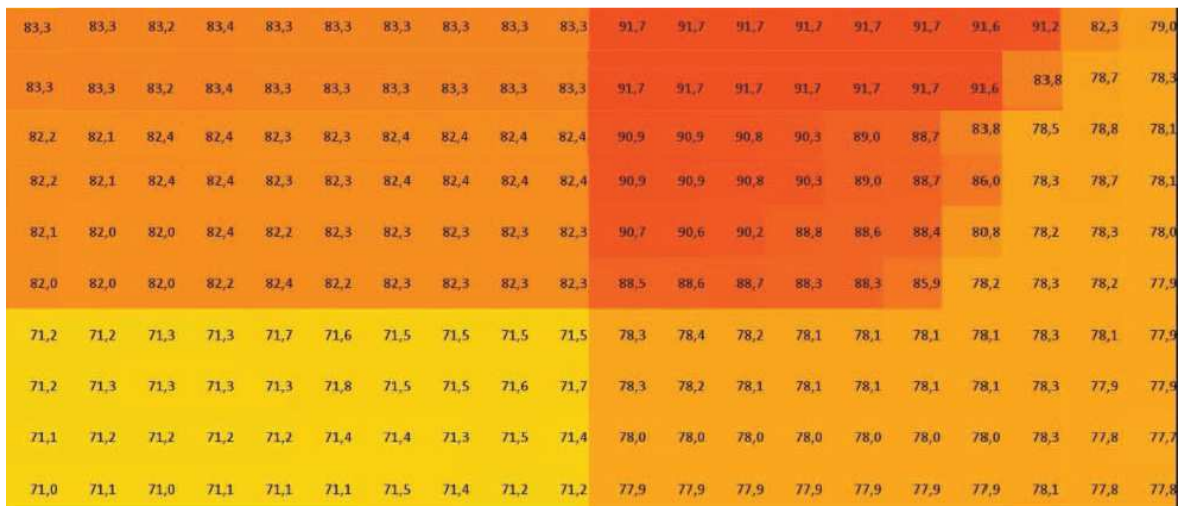
Maximální teplotní rozdíl mezi dosaženými hodnotami po PVC a asfaltem s položeným umělým trávníkem činí pouze 2,6 °C a ne 18,8 °C, tak jako tomu bylo před položením trávníku. V tento den byla teplota 80 °C u PVC překročena mezi 11:00 a 15:30 (**4,50 hodin**), u asfaltové krytiny od 11:15 od 16:00 (**4,75 hodin**). Teplota nad 90 °C byla překročena u PVC po dobu **1,25 hodiny** a u asfaltové krytiny po dobu **2,50 hodin**.

## 9 VALIDACE TEORETICKÝCH MODELŮ EXPERIMENTEM

Pro možnost zjištění přesnosti výsledků získaných z prováděných dynamických simulací popsanych v subkapitole 7.3 *Řešené vlivy konfigurace budovy*, byl vytvořen počítačový model odpovídající našemu experimentu. Důraz byl kladen na správnou geometrii počítačového modelu, správné nastavení parametrů jednotlivých materiálů kontraktí a použití experimentálně naměřených klimatických dat.

Byly vytvořeny celkem dva modely odpovídající situaci od 18. července do 4. srpna (před položením umělého trávníku - model 1) a od 5. srpna do 14. září. (po položení umělého trávníku – model 2).

Níže přikládám pro porovnání průběh povrchových teplot u dynamické simulace na modelu 1 (*obrázku 8.16*) a s experimentálně naměřenými hodnotami (*obrázku 8.17*)



Obr. 8.16 Průběh povrchových teplot v dynamické simulaci

18.7.2015 11:15:00 zasklení: 1,84x1,27m plocha: 2,34m <sup>2</sup> počet skel: trojsklo krytina PVC, vlevo krytina asfalt, vpravo orientace: jih sít: 0,1x0,1m EPS 4ks 0,5x1,0x0,1m	61,9	60,4	74,2	70,6
	55,8	56,1	70,9	66,8

Obr. 8.17 Průběh povrchových teplot na experimentálním modelu

## 10 ZÁVĚRY PRO TECHNICKOU PRAXI

### 10.1 Překročení teplotní odolnosti EPS

Z analýzy získaných experimentálních dat je patrné, že pod střešní krytinou s asfaltovým souvrstvím nastává překročení dlouhodobé teplotní odolnosti EPS při každém letním slunečním dni. Pokud se v blízkosti skladby ploché střechy nalézají velká prosklená nebo lesklá plocha, nastává podstatné zvýšení teplotního namáhání střešní krytiny a následného souvrství ploché střechy. V den s nejvyšší intenzitou slunečního záření a bez jakékoli oblačnosti (22. července) byla naměřena maximální povrchová teplota 97,4 °C, pod asfaltovou střešní krytinou. V tento den bylo naměřeno překročení 90 °C v časovém intervalu čtyři a čtvrt hodiny.

Bylo zjištěno, že pod povlakovou krytinou z měkčeného PVC nenastane k překročení teplotní odolnosti EPS ani během velmi slunečního letního dne, kdy se připočítává účinek odrazové složky slunečního záření od přilehlé prosklené plochy.

Po provedení analýzy naměřených dat, pod asfaltovou i PVC střešní krytinou na kterou byl položen travní koberec z umělé hmoty, byl zjištěn výrazný vliv mezi průběhem povrchových teplot pod takto upraveným povrchem oproti původnímu stavu bez položení umělého trávniku. Umělý trávník svými geometrickými a fyzikálními vlastnostmi navýšil průměrně teplotu pod asfaltovou krytinou o necelé 4 °C a pod PVC krytinou o 12,6 °C. Po položení umělého trávniku na obě varianty střešní krytiny se zásadně vyrušil výrazný dosavadní rozdíl v průběhu povrchových teplot pod asfaltkou a PVC krytinou. Po aplikaci umělého trávniku na PVC krytinu již běžně byla překročena dlouhodobá teplotní odolnost EPS. Po položení umělého trávniku na PVC byla naměřena dokonce povrchová teplota na EPS 92 °C, kdy teplota nad 80 °C trvala čtyři a půl hodiny.

Vzhledem k relativně pozdnímu instalování experimentálního modelu dne 18. července a aplikaci umělého trávniku dne 5. srpna můžeme předpokládat, že u podobné konfigurace stavby (obdobné skladby, materiály, povrchové úpravy, orientace, typ a velikost prosklené plochy atd.) nastane během nejteplejších dnů k překročení krátkodobé teplotní odolnosti EPS, která činí 100 °C. Tento předpoklad by bylo ovšem ověřit dlouhodoběji prováděným experimentem.

## 10.2 Návrh úpravy skladby ploché střechy v blízkosti ploché střechy

### 10.2.1 Změna povrchové úpravy ploché střechy

Vzhledem k dosaženým výsledkům experimentálního měření a provedených dynamických simulacemi doporučuji upravit povrchovou úpravu ploché střechy v blízkosti prosklených ploch. Dosah odražené složky slunečního záření při standardně vysoké zasklené výplni stavebního otvorů (od 2,0 do 2,50 m) činí přibližně 0,70 - 1,00 metrů. V této vzdálenosti od prosklených ploch je vhodné umístit například betonovou dlažbu, která má vysokou hodnotu tepelné akumulace a nedovolí přílišnému vzrůstu povrchové teploty a následné možné degradaci tepelného izolantu.

Další možností je provedení dřevěné terasy s provětrávanou dutinou, která odvede přebytečné teplot pryč. Možnou variantou řešení je také provedení páskového násypu v pásu kolem prosklených ploch.

Nejjednodušší a nejlevnější variantou je umístit v pásu kolem oken střešní krytinu s malou emisivitou, respektive s malou pohltivostí slunečního záření. U ploché střechy se nabízí aplikovat povlakovou střešní krytinu z měkčeného PVC v co možná nejsvětlejší úpravě.

### 10.2.2 Změna materiálu tepelné izolace

Pokud bude požadavek aplikovat tmavou střešní krytinu travní koberec z umělé hmoty, je zapotřebí v blízkosti prosklených ploch změnit typ tepelné izolace. Tak aby měla teplotní odolnost vyšší, než je tomu u EPS. Nabízí se možnost použít minerální tuhou tepelnou izolaci s teplotní odolností kolem 200 °C. U tohoto řešení však musíme brát na vědomí mechanické vlastnosti minerální desek, kdy u minerální desky se pevnost pohybuje kolem 70kPa. Pro nepochozí střechu, je tato pevnost dostatečná, ovšem pro pochozí plochou střechu je zcela nedostatečná.

Jako vhodný materiál, pro zateplení pochozích plochých střech, který splňuje vysoké nároky na teplotní odolnost a na pevnost, se nabízí položit minimálně v jedné vrstvě desky na bázi polyuretanu (PUR) nebo polyisokianurátu (PIR). Tepelně izolační panely PIR mají trvalou teplotní odolnost + 180 °C s mechanické pevnosti 150 kPa při stlačení 10%. Teplotní odolnost desek PIR se pohybuje do + 110 °C trvalého teplotního zatížení a do + 250 °C při krátkodobém teplotním zatížení.

Další možností je změnit skladbu střechy například na kompaktní s tepelnou izolací z pěnového skla. Další možností je vytvořit monolitickou vrstvu pod střešní krytinou.

### 10.2.3 Nevhodné povrchové úpravy

Zcela nevhodné je v blízkosti prosklených ploch aplikovat na střešní krytinu povrchovou úpravu z travního koberce z umělé hmoty. Tato úprava výrazně navýší teplotní namáhání střešní krytiny i materiálů pod ní, v našem případě tepelnou izolaci s omezenou teplotní odolností.

Výběr střešní krytiny s tmavou povrchovou úpravou, jako je tomu například u asfaltových modifikovaných pásů s hrubozrnným násypem, může být také problematický. Teplota pod touto krytinou může během léta překročit teplotu 100 °C.

## 11 DALŠÍ MOŽNOSTI VÝZKUMU

### Vyzkoušet na experimentálním modelu

- dlouhodobě měřeny povrchové teploty pod více typy střešních krytin a povrchových úprav experimentální ploché střechy
- určit vliv různých skladeb konstrukce ploché střechy
- určit vliv různých typů zasklení na průběh povrchových teplot
- určit vliv jiných lesklých povrchů (kovové obložení, polykarbonát, atd.)
- určit vliv žaluzií nebo rolet na průběh povrchových teplot střešní krytiny
- provést mechanické zkoušky na skladbě ploché střechy během nejintenzivnějšího teplotního namáhání
- využít termovizního zařízení pro analýzu průběhu teplot
- provést přesná měření rozměrových změn tepelného izolantu po delším časovém období

### Laboratorní měření

- provést laboratorní zkoušky v experimentální klimatizační komoře na tepelných izolacích na bázi pěnových organických hmot
- provedení spektrální zkoušky na umělém trávniku, určení závislosti typu a velikosti a množství umělých stébel na emisivitu a pohltivost
- využít termovizního zařízení pro analýzu průběhu teplot

## 12 ZHODNOCENÍ VYTÝČENÝCH CÍLŮ

Cílem diplomové práce bylo zhodnocení účinku slunečního záření na průběh povrchových teplot na ploché střeše. Tento cíl byl dosažen provedením dynamických počítačových simulací, při kterých se určoval vliv různé konfigurace budovy na průběhu povrchových teplot modelové ploché střechy. Tyto výsledky byly následně validovány výstavbou experimentálního modelu, na kterém se během 58 dní mezi 18. červencem a 14. zářím měřily povrchové teploty pod dvěma typy střešního pláště, respektive pod čtyřmi při započítání položeného umělého trávníku. U experimentálního modelu byly dále měřeny intenzity globálního slunečního záření, teploty vzduchu a kontrolní teploty měřené pod tepelnou izolací a v přístrojovém úseku modelu. Z analýzy získaných dat z dynamických počítačových simulací a z experimentálně naměřených dat byla určena závislost mezi průběhem povrchových teplot na ploché střeše a:

- intenzitou slunečního záření
- geografickým umístěním budovy
- orientací, velikostí a typem přilehlé prosklené plochy
- povrchovou úpravu střešního pláště ploché střechy
- dosahem odrazové složky slunečního záření
- oblačností

Z experimentálního měření vzešly velice důležitá zjištění ohledně průběhu povrchových teplot pod jednotlivými typy povrchové úpravy střešní krytiny. Tato zjištění mohou být v praxi využita a tím předcházet defektům ploché střechy v blízkosti prosklených ploch.

Tímto zadané cíle této diplomové práce byly splněny. Je ovšem možné na danou práci navázat a dále prohloubit získané znalosti. Možnosti navázání a doplnění jsem popsal v předchozí kapitole *11 Další možnosti výzkumu*.



## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] SVOBODA, Luboš. Stavební hmoty. 1. české vyd. Bratislava: Jaga, 2004, 471 s. ISBN 80-8076-007-1.
- [2] CHALOUPKA, Karel a Zbyněk SVOBODA. Ploché střechy: praktický průvodce. 1. vyd. Praha: Grada, 2009, 259 s. Stavitel. ISBN 978-80-247-2916-9.
- [3] IZOLAČNÍ PRAXE: PLOCHÉ STŘECHY A PĚNOVÝ POLYSTYREN [online]. [cit. 2016-10-15]. Dostupné z: [http://www.epscr.cz/obj/232/Izolacni\\_praxe\\_3\\_-\\_PLOCHE\\_STRECHY\\_A\\_EPS\\_\\_25\\_2\\_15\\_.pdf](http://www.epscr.cz/obj/232/Izolacni_praxe_3_-_PLOCHE_STRECHY_A_EPS__25_2_15_.pdf)
- [4] VOLTNAR, Martin. Kam zmizel ten polystyren? Aneb degradace eps ve skladbách plochých střech zvýšeným teplotním namáháním [online]. , 3 [cit. 2015-11-02].
- [5] ISOVER pro systémy plochých střech: Informace pro projektanty a realizační firmy [online]. ISOVER SAINT-GOBAIN [cit. 2016-01-15]. Dostupné z: <http://www.isover.cz/data/files/prospekt-ploche-strechy-200.pdf>
- [6] JUTAgrass: Příručka s všeobecnými a technickými informacemi [online]. [cit. 2016-01-15]. Dostupné z: [http://www.spzlin.cz/uploads/20140930\\_pirucka\\_k\\_umelym\\_travnikum\\_-\\_verze\\_11.pdf](http://www.spzlin.cz/uploads/20140930_pirucka_k_umelym_travnikum_-_verze_11.pdf)
- [7] KAŠÍK, B a Karásek, B. Polystyrénové plasty. místo neznámé : Institut pro výchovu vědeckých pracovníků Ministerstva průmyslu ČSR, 1982.
- [8] HALAHYJA, M. Stavebná tepelná technika, akustika a osvetlenie. Bratislava : ALFA, 1985.
- [9] VAVERKA, J. Stavební tepelná technika a energetika budov. Brno : Nakladatelství VUTIUM, 2006. ISBN 80-214-2910-0.
- [10] ŠŤASTNÍK, S. Problémy šíření tepla a vlhkosti ve stavebních látkách. Brno : VUTIUM, 2009. ISBN 978-80-214-3907-8.
- [11] ŠŤASTNÍK, S. Fyzika stavebních látek. Brno : VUT Brno, 2009.
- [12] PLANCKŮV VYZAŘOVACÍ ZÁKON. Fakulta strojního inženýrství. [Online] [Citace: 19. 12 2015.] <http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/optika/0202.htm>.
- [12] Absolutně černé těleso Planckův vyzařovací zákon,. Aldebaran. [Online] [Citace: 20. 12 2015.] <http://aldebaran.cz/~blahova/F1KME/30.pdf>.
- [13] ČSN 73 0540-1. Tepelná ochrana budov – Část 1: Terminologie. Praha: Český normalizační institut, 2005. Třídící znak 730540.
- [14] BARTUŠKA, K. a E. SVOBODA. Fyzika pro gymnázia: Molekulová fyzika a termika. 5. vyd. dotisk. Praha: Prometheus, 2010, 244 s.. ISBN 978-80-7196-383-7.

- [15] ŠIKULA, O. Manuál k softwaru CalA. V Tribunu EU vyd. 1. Brno: Tribun EU, 2009, 43 s. [cit. 2014-01-14]. ISBN 978-80-7399-879-0. Dostupné z: [http://www.researchgate.net/publication/47124995\\_Manul\\_k\\_softwaru\\_CalA\\_/file/72e7e5212193f9abac.pdf](http://www.researchgate.net/publication/47124995_Manul_k_softwaru_CalA_/file/72e7e5212193f9abac.pdf)
- [16] ČSN EN ISO 13786. Tepelné chování stavebních dílců - Dynamické tepelné. Praha: Český normalizační institut, 2008. Třídící znak 13786.
- [17] ASTE, N. A. ANGELOTTI a M. BUZZETTI. The influence of the external walls thermal inertia on the energy performance [dokument]. Milano: Elsevier, 2009 [cit. 2013-12-17]. ISSN 0378-7788. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/>
- [18] Slunce [online]. [cit. 2016-01-15]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Slunce>
- [19] HALAHYJA, M. Stavebná tepelná, osvetlenie a akustika. Bratislava : Alfa, 1970.
- [20] VANĚK, J.; KŘIVÍK, P.; NOVÁK, V. Alternativní zdroje energie. ELEKTRONICKÉ SKRIPTUM VUT Brno 2006
- [21] KLECZEK, Josip. Sluneční energie : úvod do helioenergetiky. 1. vyd. Praha : SNTL, 1981. 192 s.
- [22] CIHELKA, Jaromír. Sluneční vytápěcí systémy. Praha : SNTL, 1984. 206 s.
- [23] Český hydrometeorologický ústav : Dlouhodobé normály klimatických hodnot za období 1961-1190 [online]. 2010, [2015-8-28]. Dostupné z WWW : <http://www.chmu.cz/meteo/ok/okdata12.html>
- [24] QUASCHNING, V., Understanding renewable energy systems USA 2007; ISBN 978-1-84407-136-4
- [25] Kipp & Zonen B.V. : Gebrauchsanleitung CM6B, CM7B [online]. 2003, [2015-8-22]. Dostupné z: [http://www.kippzonen.com/?download/661/CM+6B+++7B+Pyranometer++Manual+\(German\).aspx](http://www.kippzonen.com/?download/661/CM+6B+++7B+Pyranometer++Manual+(German).aspx)
- [26] Project Energie Solara : Prezentație stație [online]. 2009, [2015-8-27]. Dostupné z WWW: <http://solar.physics.uvt.ro/srms/index.php?target=info&lang=ro>.
- [27] EKO Instruments co., ltd. : Pyrheliometer MS-54 [online]. 1996, [2015-8-27]. Dostupné z WWW: <http://www.eko-usa.com/products/am/pyrheliometer/MS-54/index.html>
- [28] EKO Instruments co., ltd. : Sun Trackers STR 21 [online]. 1996, [2010-4-27]. Dostupné z WWW : <http://www.eko-usa.com/products/am/STR/STR-2x/index.html>

- [29] Základy optického zobrazení [online]. [cit. 2016-01-15]. Dostupné z: [http://www.fch.vutbr.cz/~zmeskal/obring/prednasky\\_2005/02\\_geometriccka\\_optika.pdf](http://www.fch.vutbr.cz/~zmeskal/obring/prednasky_2005/02_geometriccka_optika.pdf)
- [30] ČSN EN 410 Sklo ve stavebnictví: Stanovení světelných a slunečních charakteristik zasklení. 2000.
- [31] Oslunění/zastínění okenní plochy [online]. [cit. 2015-10-15]. Dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/54-osluneni-zastineni-okenni-plochy>
- [32] ČSN 73 0540-2. Tepelná ochrana budov: Požadavky. Praha: ÚNMZ, 2011.
- [33] Zákon č. 183/2006 Sb. o územním plánování a stavebním řádu (stavební zákon). In: 63. 2006.
- [34] Zákon č. 183/2006 Sb. o územním plánování a stavebním řádu (stavební zákon). In: 63.2006.
- [35] Vyhláška č. 268/2009 o technických požadavcích na stavby. In: 81. 2009.
- [36] Vyhláška č. 23/2008 Sb., o technických podmínkách požární ochrany staveb. In: 10. 2008.
- [37] Zákon č. 258/2000 Sb. o ochraně veřejného zdraví a o změně některých souvisejících zákonů. In: 74. 2000.
- [38] Zákon č. 102/2001 Sb. o obecné bezpečnosti výrobků a o změně některých zákonů. In: 41. 2001.
- [39] Zákon č. 406/2000 Sb. o hospodaření energií ve znění pozdějších předpisů. In: 115. 2000.
- [40] Vyhláška č. 78/2013 Sb. o energetické náročnosti budov. In: 36. 2013.
- [41] Zákon č. 22/1997 Sb. o technických požadavcích na výrobky a o změně a doplnění některých zákonů. In: 6. 1997.
- [42] Nařízení č. 163/2002 Sb., kterým se stanoví technické požadavky na vybrané stavební výrobky. In: 67. 2002.
- [43] Energetický informační systém [online]. 2006 [cit. 2013-08-27]. Dostupné z: <http://www.eis.cz/>
- [44] Wienerberger [online]. © 2013 [cit. 2013-08-27]. Dostupné z: <http://www.wienerberger.cz/>
- [45] Ytong [online]. © 2011 [cit. 2013-08-27]. Dostupné z: <http://www.ytong.cz>

- [46] ŠŤASTNÍK, Stanislav a Jiří ZACH. Zkoušení izolačních materiálů. Brno: CERM, 2002, 95 s. ISBN 80-214-2253-X.
- [47] ČSN EN 826. Tepelněizolační výrobky pro použití ve stavebnictví: Zkouška tlakem. Praha: ÚNMZ, 2013.
- [48] ČSN EN 1607. Tepelněizolační výrobky pro použití ve stavebnictví: Stanovení pevnosti v tahu kolmo k rovině desky. Praha: ÚNMZ, 2013.
- [49] ČSN 73 0810. Požární bezpečnost staveb: Společná ustanovení. Praha, 2009.
- [50] ČSN EN 13 501-1. Požární klasifikace výrobků a konstrukcí staveb: Klasifikace podle výsledků zkoušek reakce na oheň. Praha: ÚNMZ, 2010.
- [51] Pasivní domy - tepelné izolace. Pasivní domy. [Online] [Citace: 20. 12 2015.] <http://www.pasivnidomy.cz/tepelna-ochrana/tepelne-izolace.html?chapter=typytepelných-izolací>.
- [52] DROCHYTKA, R. Plastické látky. Brno : VUT Brno, 2007.
- [53] TOBOLKA, Z. Materiály pro stavební izolace. Praha : Vydavatelství ČVUT, 1994. ISBN 80-01-00924-6.
- [54] Izolačních desky z pěnového polystyrenu mají nové značení [online]. [cit. 2016-01-02]. Dostupné z: <http://www.epscr.cz/izolacnich-desky-z-penoveho-polystyrenu-maji-nove-znacení.html?id=26>
- [55] Tepelné izolace. Stavebnictví 3000. [Online] 1. 10 2012. [Citace: 9. 12 2015.] <http://www.stavebnictvi3000.cz/clanky/tepelne-izolace-prehled-materialy-druhyzpusoby-po/>.
- [56] Izolační materiály. Izolace-info. [Online] [Citace: 9. 12 2015.] <http://www.izolaceinfo.cz/katalog/foukana-a-sypka-izolace/materialy-na-bazi-papiru-a-celulozy/>.
- [57] ZACH, J. Speciální izolace. Brno : VUT Brno, 2006.
- [58] Minerální izolace [online]. [cit. 2016-01-15]. Dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/tepelne-izolace/298-mineralni-izolace>
- [59] Počasí - předpověď počasí, aktuální informace | In-pocasí. Klima České republiky, podnebí | In-pocasí [online]. 2013 [cit. 2014-01-09]. Dostupné z: <http://www.in-pocasi.cz/archiv/klima.php>
- [60] ČSN 730540-2. Tepelná ochrana budov – Část 2: Požadavky. Praha: Český normalizační institut, 2011. Třídící znak 730540-2.

- [61] ČSN 730540-3. Tepelná ochrana budov – Část 3: Návrhové hodnoty veličin. Praha: Český normalizační institut, 2005. Třídící znak 730540-3.
- [62] HALAHYJA, M. I. CHMÚRNÝ a Z. STERNOVÁ. Stavebná tepelná technika: tepelná ochrana budov.. Bratislava: Jaga, 1998, 253 s.. ISBN 8088905044.
- [63] ČSN 730540-4. Tepelná ochrana budov – Část 4: Výpočtové metody. Praha: Český normalizační institut, 2005. Třídící znak 730540-4.
- [64] Přehled | designbuilder.cz. DesignBuilder - software pro komplexní dynamickou simulaci budov | designbuilder.cz [online]. verze 2012 [cit. 2015-12-09]. Dostupné z: <http://designbuilder.cz/o-programu/prehled-24>
- [65] EnergyPlus Energy Simulation Software: About EnergyPlus. Office of Energy Efficiency & Renewable Energy | Department of Energy [online]. 2013, verze 15. 10. 2013 [cit. 2015-12-09]. Dostupné z: [http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/energyplus\\_about.cfm](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/energyplus_about.cfm)
- [66] Stavební fyzika - Teplo 2011 | K-CAD, spol. s r.o. Software pro stavební fyziku | K-CAD, spol. s r.o. [online]. 2011, verze 2011 [cit. 2015-12-09]. Dostupné z: <http://kcad.cz/cz/stavebni-fyzika/tepelna-technika/teplo/>
- [67] Setrvačnost vnitřní povrchové teploty obvodových konstrukcí | Stavebnictví3000.cz. Nejvíce informací o stavebnictví v ČR | Stavebnictví3000.cz [online]. 2001, verze 2/2001 [cit. 2015-12-09]. Dostupné z: <http://www.stavebnictvi3000.cz/clanky/vnitri-povrchove-teploty-obvodovych-konstrukci/>
- [68] Petr Slanina. WUFI Software. WUFI Pro [online]. Praha: 2010 – 2014 [cit. 2015-12-17]. Dostupné z: [http://www.wufi.cz/wufi\\_pro/](http://www.wufi.cz/wufi_pro/)
- [69] CLIME from space [online]. [cit. 2015-12-15]. Dostupné z: <http://climateblog.eumetsat.int/2014/10/turning-data-into-information/>
- [70] Letecké snímky [online]. [cit. 2015-12-15]. Dostupné z: <https://mapy.cz/zakladni?x=15.6252330>
- [71] EMS Brno: Environmental Measuring Systems [online]. [cit. 2015-12-15]. Dostupné z: <http://www.emsbrno.cz/p.axd/en/Main.Page.htm>
- [72] COMET: dataloggery, teploměry, vlhkoměry [online]. [cit. 2015-12-15]. Dostupné z: <http://www.cometsystem.cz/>
- [73] Energetická bilance oken, solární zisky a ztráty v pasivních domech [cit. 2015-12-15]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/4695-energeticka-bilance-oken-solarni-zisky-a-zraty-v-pasivnich-domech>
- [74] PRESS-GLASS: Our glass [online]. [cit. 2015-12-15]. Dostupné z: <http://www.pressglass.eu/?lang=en>

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

$a$	součinitel teplotní vodivosti	$[\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$
$A$	plocha	$[\text{m}^2]$
$A_o$	azimut Slunce	$[\text{°}]$
$b$	tepelná jímavost	$[\text{W}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{m}^4 \cdot \text{K}^{-2}]$
$b$	šířka	$[\text{m}]$
$c$	měrná tepelná kapacita	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$
$c$	rychlost světla	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
$c_o$	lokální znečištění atmosféry	$[-]$
$f$	frekvence	$[\text{Hz}]$
$g$	činitel prostup slunečního záření	$[-]$
$h$	součinitel přestupu tepla	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$
$h_{tot}$	součinitel přestupu tepla zahrnující vliv záření	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$
$hr$	součinitel přestupu tepla vlivem radiace	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$
$h_k$	součinitel přestupu tepla při proudění	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$
$h_o$	výška Slunce	$[\text{°}]$
$k$	Boltzmannova konstanta	$[\text{J} \cdot \text{K}^{-1}]$
$E_m$	měrná akumulovaná energie	$[\text{MJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}]$
$f$	faktor úbytku	$[-]$
$I$	intenzita globálního slunečního záření	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-2}]$
$I_o$	sluneční konstanta	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-2}]$
$I_p$	intenzita přímého slunečního záření	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-2}]$
$I_D$	intenzita difuzního slunečního záření	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-2}]$
$l$	délka	$[\text{m}]$
$m$	hmotnost	$[\text{kg}]$
$q$	hustota tepelného toku	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-2}]$
$Q_{Dden}$	celková dopadená denní sluneční energie	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-2}]$
$Q$	teplo	$[\text{J}]$
$Q_o$	dopadající sálavého tělesem	$[\text{J}]$
$Q_A$	část sálavého pohlcovaná tělesem	$[\text{J}]$
$Q_R$	část sálavého odražená tělesem	$[\text{J}]$
$Q_T$	část sálavého procházející tělesem	$[\text{J}]$
$R_t$	odpor konstrukce při prostupu tepla	$[\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}]$
$R_e$	odpor kce při přestupu tepla na ext.	$[\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}]$
$R_e$	odpor kce při přestupu tepla na int.	$[\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}]$
$t$	tloušťka	$[\text{m}]$
$T$	doba periodického opakování	$[\text{s}]$

$T$	termodinamická teplota	[W]
$U$	součinitel prostupu tepla	[W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
$Y_{mn}$	periodický prostup tepla	[W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
$Y_{nn}$	admitance tepla	[W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
$Z$	Linkeho vztah	[-]
$\alpha$	pohltivost slunečního záření	[-]
$\alpha_{visible}$	pohltivost viditelného světla	[-]
$\Delta_t$	rozdíl teplot	[°C nebo K]
$\Delta_{tf}$	fázový posun	[h]
$\varepsilon$	pohltivost (emisivita)	[-]
$\theta$	teplota	[°C nebo K]
$\theta_a$	teplota vzduchu	[°C]
$\lambda$	součinitel tepelné vodivosti	[W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
$\lambda_f$	součinitel tepelné vodivosti se započtením vlivu konvekce	[W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
$\rho$	objemová hmotnost	[kg·m <sup>-3</sup> ]
$\mu$	faktor difuzního odporu	[-]
$\tau$	čas	[s nebo hod]
$\tau$	propustnost	[-]
$\tau$	drsnost	[-]
$\tau_{v,cel}$	činitel prostupu slunečního záření	[-]
$\tau_0$	relaxační doba	[s nebo hod]
$\mathcal{K}$	úhel dopadu paprsku na vod.rovinu	[°]
$\mathcal{K}_s$	vodorovnou plochu na skl. rovinu	[°]
$\delta$	sluneční deklinace	[°]
$\Phi$	tepelný tok	[W]
$\Phi_e$	zářivý tok	[W]
$\nu$	teplotní útlum	[-]

## SEZNAM POUŽITÝCH INDEXŮ

$i$	vnitřní strana, interiér
$e$	vnější strana, exteriér
$p$	povrch
$O$	počáteční
$\Delta$	změna/rozdíl
$\lambda$	závislost na vlnové délce
<i>grad</i>	gradient

## **PŘÍLOHY**

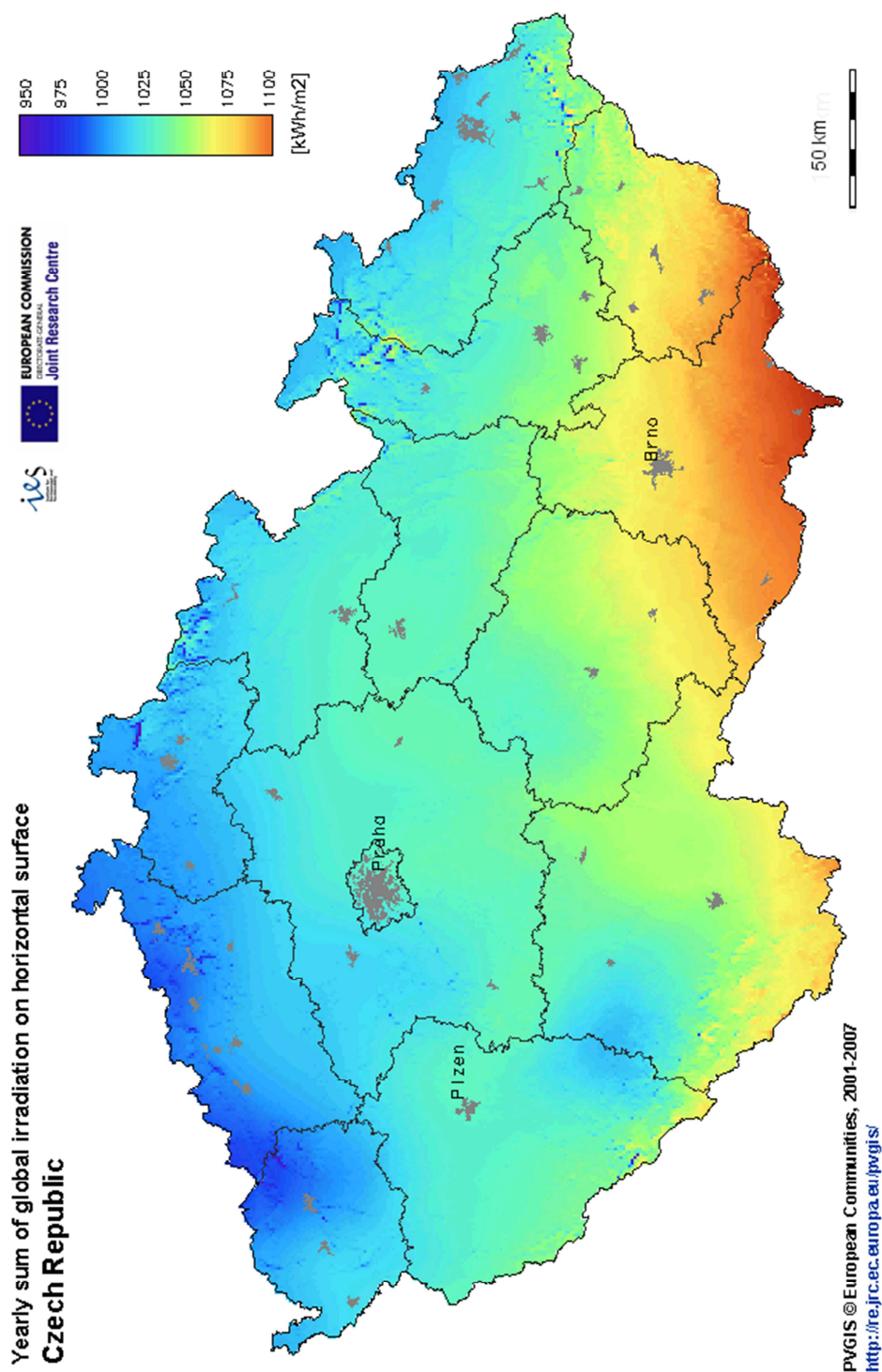
- A. Přílohy k teorii
- B. Skladby konstrukcí použitých u dynamických simulací
- C. Spektrální a tepelně technické vlastnosti zasklení u dynamických simulací
- D. Materiály použité na experimentálním modelu
- E. Souhrn data z experimentálního měření
- F. Fotodokumentace



## Příloha A Přílohy k teorii

### Příloha A.1 Roční úhrn slunečního záření pro ČR

Mapa průměrných ročního úhrnu celkového slunečního záření dopadajícího na horizontální plochu v ČR.



Zdroj: Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS)

## PŘÍLOHA B MATERIÁLY POUŽÍVANÉ VE SKLADBÁCH PLOCHÝCH STŘECH

### PŘÍLOHA B.1 PĚNOVÝ EXPADOVANÝ POLYSTYREN BÍLÝ

			EPS 70 S	EPS 100 S	EPS 150 S	EPS 200 S
Deklarovaná hodnota součinitele tepelné vodivosti	$\lambda_D$	W/(m.K)	0,039	0,037	0,035	0,034
Návrhová hodnota součinitele tepelné vodivosti (informativně)	$\lambda_u$	W/(m.K)	0,04	0,038	0,036	0,035
Faktor difuzního odporu	$\mu$	-	20 - 40	30 - 70	30 - 70	40 - 100
Napětí v tlaku při 10% stlačení		kPa	70	100	150	200
Objemová hmotnost	$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	14 - 18	18 - 23	23 - 28	28 - 32
Výhřevnost		MJ/kg	39			
Dlouhodobé tepelné namáhání max.		°C	80			
Koeficient lineární tepelné roztažnosti		mm/(m.K)	0,05 - 0,07			

### PŘÍLOHA A.2 PĚNOVÝ EXPADOVANÝ POLYSTYREN ŠEDÝ

			EPS 70 S	EPS 100 S	EPS 150 S	EPS 200 S
Deklarovaná hodnota součinitele tepelné vodivosti	$\lambda_D$	W/(m.K)	0,032	0,031	0,031	Nevyrábí se
Návrhová hodnota součinitele tepelné vodivosti (informativně)	$\lambda_u$	W/(m.K)	0,033	0,032	0,032	
Faktor difuzního odporu	$\mu$	-	20 - 40	30 - 70	30 - 70	
Napětí v tlaku při 10% stlačení		kPa	70	100	150	
Objemová hmotnost	$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	14 - 18	18 - 23	23 - 28	
Výhřevnost		MJ/kg	39			
Dlouhodobé tepelné namáhání max.		°C	<b>+70</b>			
Koeficient lineární tepelné roztažnosti		mm/(m.K)	0,05 - 0,07			

## PŘÍLOHA B: SKLADBY KONSTRUKCÍ POUŽITÝCH U DYNAMICKÝCH SIMULACÍ

### PŘÍLOHA B.1 SKLADBA OBVODOVÉ STĚNY S01

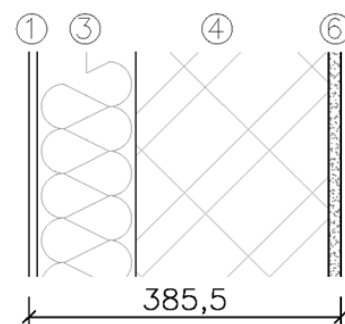
Ozn.	Funkce vrstvy	Popis	tl. [mm]	$\lambda_d$ [W/m·K]	$R_i$ [m <sup>2</sup> ·K/W]	c [J/Kg·K]	$\mu$ [-]	hmot. [kg/m <sup>2</sup> ]
1	Povrchová	Tenkovrstvá omítka na silikátové bázi	2,0	0,700	0,003	850	40	3,6
2	Výztužná	Stěrkový tmel s výztužnou tkaninou	4,0	0,800	0,005	840	20	6,0
3	Tepelně izolační	Fasádní pěnový polystyren	120,0	0,039	3,077	1270	30	1,8
4	Nosná	Keramický Therm blok	240,0	0,370	0,649	960	8	204,0
5	Podkladní	Jádrová omítka vápenocementová	15,0	0,760	0,020	840	19	25,5
6	Povrchová	Vnitřní štuková omítka vápenná	1,5	0,560	0,003	840	6	2,3
			<b>382,5</b>	-	<b>3,756</b>	-		<b>243,2</b>

#### Tepelně technické vlastnosti a požadavky skladby S01:

Název veličiny	Ozn.	Hodnota	Jednotka
Tepelný odpor při přestupu tepla na vnitřní straně konstrukce	$R_{si}$	0,13	m <sup>2</sup> KW <sup>-1</sup>
Tepelný odpor při přestupu tepla konstrukcí	$\sum R_i$	3,76	m <sup>2</sup> KW <sup>-1</sup>
Tepelný odpor při přestupu tepla na vnější straně konstrukce	$R_{se}$	0,04	m <sup>2</sup> KW <sup>-1</sup>
<b>Výsledný součinitel prostupu tepla</b>	<b>U</b>	<b>0,25</b>	<b>Wm<sup>-2</sup>K<sup>-1</sup></b>
Normová hodnota prostupu tepla	$U_{N,20}$	0,30	Wm <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
Doporučená hodnota prostupu tepla	$U_{rec,20}$	0,25	Wm <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
Doporučená hodnota prostupu tepla pro pasivní budovy	$U_{pas,20}$	0,18-0,12	Wm <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>

#### Spektrální vlastnosti povrchové úpravy skladby S01:

Varianta	Barevná úprava	HBW index	Barva a RGB	$\epsilon$ [-]	$\alpha$ [-]	$\alpha_{visible}$ [-]
S01a	BI00 bílá	75,6	255,255,255	0,90	0,24	0,24
S01b	MO3C modrá	50,1	116,208,221	0,90	0,50	0,50
S01c	OK2A okrová	25,0	171,112,54	0,90	0,75	0,75



## PŘÍLOHA B.2 SKLADBA PLOCHÉ STŘECHY S PVC KRYTINOU S02A

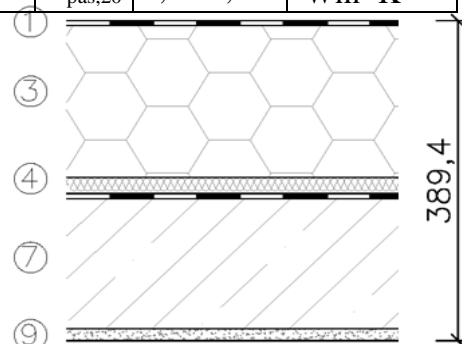
Ozn.	Funkce vrstvy	Popis	tl. [mm]	$\lambda_d$ [W/m·K]	$R_i$ [m <sup>2</sup> ·K/W]	c [J/Kg·K]	$\mu$ [-]	h <sub>mot.</sub> [kg/m <sup>2</sup> ]
1	Hydro-izolační	Měkčená folie z PVC-P	1,8	0,200	0,009	960	15000	2,2
2	Separáčn	Separáčn	3,0	0,220	0,014	960	-	0,3
3	Tepelně izolační	Izolační desky, EPS 150S	190,0	0,035	5,429	1270	50	4,8
4	Spádová+TI	Spádové klíny, EPS 100S	20,0	0,037	0,541	1270	50	0,4
5	Parotěsná	SBS modifi. asfaltový pás	4,0	0,200	0,020	1470	29000	4,5
6	Penetrační	Penetrační asfaltová emulze	-	-	-	-	8000	-
7	Nosná	Monolitická ŽB stropní deska	160,0	1,580	0,101	1020	29	384,0
8	Podkladn	Jádrová omítka vápenocementová	15,0	0,760	0,020	840	19	25,5
9	Povrchová	Vnitřn	1,5	0,560	0,003	840	6	2,3
			<b>395,3</b>	-	<b>6,135</b>	-		<b>423,9</b>

### Tepelně technické vlastnosti a požadavky skladby S02a:

Název veličiny	Ozn.	Hodnota	Jednotka
Tepelný odpor při přestupu tepla na vnitřn	$R_{si}$	0,17	m <sup>2</sup> KW <sup>-1</sup>
Tepelný odpor při přestupu tepla konstrukcí	$\sum R_i$	6,14	m <sup>2</sup> KW <sup>-1</sup>
Tepelný odpor při přestupu tepla na vnějšn	$R_{se}$	0,04	m <sup>2</sup> KW <sup>-1</sup>
<b>Výsledn</b>	<b>U</b>	<b>0,16</b>	<b>Wm<sup>-2</sup>K<sup>-1</sup></b>
Normová hodnota prostupu tepla	$U_{N,20}$	0,24	Wm <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
Doporučená hodnota prostupu tepla	$U_{rec,20}$	0,16	Wm <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
Doporučená hodnota prostupu tepla pro pasivn	$U_{pas,20}$	0,15-0,10	Wm <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>

### Spektráln

Ozn.	Barevná úprava	Barva a RGB	$\epsilon$ [-]	$\alpha$ [-]	$\alpha_{visible}$ [-]
S02a	Světle šedá	190,190,190	0,90	0,70	0,70



## PŘÍLOHA B.3 SKLADBA PLOCHÉ STŘECHY S ASFALTOVOU KRYTINOU S02B

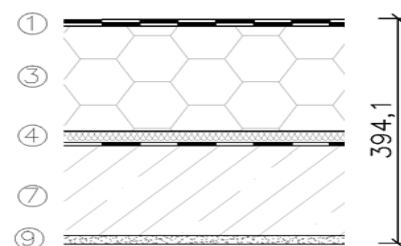
Ozn.	Funkce vrstvy	Popis	tl. [mm]	$\lambda_d$ [W/m·K]	$R_i$ [m <sup>2</sup> ·K/W]	c [J/Kg·K]	$\mu$ [-]	hmot. [kg/m <sup>2</sup> ]
1	Hydroizolační	SBS modif. asfaltový pás s břidlicovým posypem	4,5	0,200	0,023	1470	30000	6,4
2	Hydroizolační	SBS modif. asfaltový pás	3,0	0,200	0,015	1470	20000	3,5
3	Tepelně izolační	Izolační desky, EPS 150S	190,0	0,035	5,429	1270	50	4,8
4	Spádová+TI	Spádové klíny, EPS 100S	20,0	0,037	0,541	1270	50	0,4
5	Parotěsná	Penetrační asfaltová emulze	4,0	0,200	0,020	1470	29000	4,5
6	Penetrační	Penetrační asfaltová emulze	-	-	-	-	8000	-
7	Nosná	Monolitická ŽB stropní deska	160,0	1,580	0,101	1020	29	384,0
8	Podkladní	Jádrová omítka vápenocementová	15,0	0,760	0,020	840	19	25,5
9	Povrchová	Vnitřní štuková omítka vápenná	1,5	0,560	0,003	840	6	2,3
			<b>398,0</b>	-	<b>6,150</b>	-		<b>431,3</b>

### Tepelně technické vlastnosti a požadavky skladby S02b:

Název veličiny	Ozn.	Hodnota	Jednotka
Tepelný odpor při přestupu tepla na vnitřní straně konstrukce	$R_{si}$	0,17	m <sup>2</sup> KW <sup>-1</sup>
Tepelný odpor při přestupu tepla konstrukcí	$\sum R_i$	6,15	m <sup>2</sup> KW <sup>-1</sup>
Tepelný odpor při přestupu tepla na vnější straně konstrukce	$R_{se}$	0,04	m <sup>2</sup> KW <sup>-1</sup>
<b>Výsledný součinitel prostupu tepla</b>	<b>U</b>	<b>0,16</b>	<b>Wm<sup>-2</sup>K<sup>-1</sup></b>
Normová hodnota prostupu tepla	$U_{N,20}$	0,24	Wm <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
Doporučená hodnota prostupu tepla	$U_{rec,20}$	0,16	Wm <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
Doporučená hodnota prostupu tepla pro pasivní budovy	$U_{pas,20}$	0,15-0,10	Wm <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>

### Spektrální vlastnosti povrchové úpravy skladby S02a:

Ozn.	Barevná úprava	Barva a RGB	$\epsilon$ [-]	$\alpha$ [-]	$\alpha_{visible}$ [-]
S02b	Tmavě šedá	49,79,79	0,90	0,85	0,90



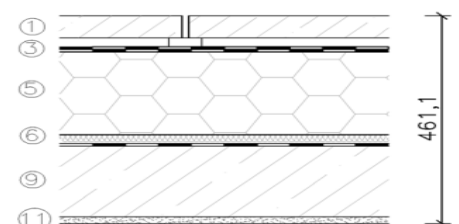
## PŘÍLOHA B.4 SKLADBA PLOCHÉ STŘECHY S BETONOVOU DLAŽBOU S02C

Ozn.	Funkce vrstvy	Popis	tl. [mm]	$\lambda_d$ [W/m·K]	$R_i$ [m <sup>2</sup> ·K/W]	c [J/Kg·K]	$\mu$ [-]	hmot. [kg/m <sup>2</sup> ]
1	Nášlapná	Betonová dlažba na podločkách	50,0	-	-	1300	-	110,0
2	Provětrávací	Vzduch. dutina	20,0	-	-	-	-	-
3	Hydroizolační	SBS modif. asfaltový pás	4,5	0,200	0,023	1470	30000	6,4
4	Hydroizolační	SBS modif. asfaltový pás	3,0	0,200	0,015	1470	20000	3,5
5	Tepelně izolační	Izolační desky, EPS 150S	190,0	0,035	5,429	1270	50	4,8
6	Spádová+TI	Spádové klíny, EPS 100S	20,0	0,037	0,541	1270	50	0,4
7	Parotěsná	Penetrační asfaltová emulze	4,0	0,200	0,020	1470	29000	4,5
8	Penetrační	Penetrační asfaltová emulze	-	-	-	-	8000	-
9	Nosná	Monolitická ŽB stropní deska	160,0	1,580	0,101	1020	29	384,0
10	Podkladní	Jádrová omítka vápenocementová	15,0	0,760	0,020	840	19	25,5
11	Povrchová	Vnitřní štuková omítka vápenná	1,5	0,560	0,003	840	6	2,3
			<b>468,0</b>	-	<b>6,150</b>	-		<b>431,3</b>

### Tepelně technické vlastnosti a požadavky skladby S02c:

Název veličiny	Ozn.	Hodnota	Jednotka
Tepelný odpor při přestupu tepla na vnitřní straně konstrukce	$R_{si}$	0,17	m <sup>2</sup> KW <sup>-1</sup>
Tepelný odpor při přestupu tepla konstrukcí	$\sum R_i$	6,15	m <sup>2</sup> KW <sup>-1</sup>
Tepelný odpor při přestupu tepla na vnější straně konstrukce	$R_{se}$	0,04	m <sup>2</sup> KW <sup>-1</sup>
<b>Výsledný součinitel prostupu tepla</b>	<b>U</b>	<b>0,16</b>	<b>Wm<sup>-2</sup>K<sup>-1</sup></b>
Normová hodnota prostupu tepla	$U_{N,20}$	0,24	Wm <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
Doporučená hodnota prostupu tepla	$U_{rec,20}$	0,16	Wm <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
Doporučená hodnota prostupu tepla pro pasivní budovy	$U_{pas,20}$	0,15-0,10	Wm <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>

### Spektrální vlastnosti povrchové úpravy skladby S02c:



## PŘÍLOHA C: SPEKTRÁLNÍ A TEPELNÉ VLASTNOSTI ZASKLENÍ U DYNAMICKÝCH SIMULACÍ

### PŘÍLOHA C.1 VÝPLŇ SE STANDARTNÍM IZOLAČNÍ TROJSKLEM

Záložka	Kategorie	Veličina	Značka	Jednotka	Exter.	Mezi.	Int.
Panes Data Vlastnosti skel	<b>Solar properties</b> Vlastnosti pro celé spektrum slunečního záření	<b>Solar transmittance</b> Činitel prostup slunečního záření	g	-	0,630	0,837	0,630
		<b>Outside solar reflectance</b> Činitel odrazu slunečního záření na exteriérové straně	$\rho_{\text{solar,in}}$	-	0,190	0,075	0,220
		<b>Inside solar reflectance</b> Činitel odrazu slunečního záření na interiérové straně	$\rho_{\text{solar,out}}$	-	0,220	0,075	0,190
	<b>Visible Properties</b> Vlastnosti pro viditelnou složku slunečního spektra (světla)	<b>Visible transmittance</b> Činitel prostup viditelného světla	$\tau_v$	-	0,850	0,898	0,850
		<b>Outside visible reflectance</b> Činitel odrazu světla na exteriérové straně	$\rho_{V,\text{in}}$	-	0,056	0,081	0,079
		<b>Inside visible reflectance</b> Činitel odrazu světla na interiérové straně	$\rho_{V,\text{out}}$	-	0,079	0,081	0,056
	<b>Infra-Red Properties</b> Vlastnosti pro infračervenou složku slunečního spektra (tepla)	<b>Infra red transmittance</b> Činitel prostup infračerveného záření	$\tau_{\text{infra}}$	-	0,000	0,000	0,000
		<b>Outside emissivity</b> Činitel odrazu infračerveného záření na exteriérové straně	$\epsilon_{\text{in}}$	-	0,840	0,840	0,100
		<b>Inside emissivity</b> Činitel odrazu infračerveného záření na interiérové straně	$\epsilon_{\text{out}}$	-	0,100	0,840	0,840
	<b>Thermal Tepelně</b> technické vlastnosti	<b>Thickness</b> Tloušťka skla	d	mm	3,00	3,00	3,00
		<b>Conduction</b> Součinitel tepelné vodivosti	$\lambda$	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$	0,90	0,90	0,90

## PŘÍLOHA C.2 VÝPLŇ SE STANDARTNÍM IZOLAČNÍM DVOJSKLEM

Záložka	Kategorie	Veličina	Značka	Jednotka	Exter.	Int.
Panes Data Vlastnosti skel	<b>Solar properties</b> Vlastnosti pro celé spektrum slunečního záření	<b>Solar transmittance</b> Činitel prostup slunečního záření	g	-	0,630	0,837
		<b>Outside solar reflectance</b> Činitel odrazu slunečního záření na exteriérové straně	$\rho_{\text{solar,in}}$	-	0,190	0,075
		<b>Inside solar reflectance</b> Činitel odrazu slunečního záření na interiérové straně	$\rho_{\text{solar,out}}$	-	0,220	0,075
	<b>Visible Properties</b> Vlastnosti pro viditelnou složku slunečního spektra (světla)	<b>Visible transmittance</b> Činitel prostup viditelného světla	$\tau_v$	-	0,850	0,898
		<b>Outside visible reflectance</b> Činitel odrazu světla na exteriérové straně	$\rho_{v,\text{in}}$	-	0,056	0,081
		<b>Inside visible reflectance</b> Činitel odrazu světla na interiérové straně	$\rho_{v,\text{out}}$	-	0,079	0,081
	<b>Infra-Red Properties</b> Vlastnosti pro infračervenou složku slunečního spektra (tepla)	<b>Infra red transmittance</b> Činitel prostup infračerveného záření	$\tau_{\text{infra}}$	-	0,000	0,000
		<b>Outside emissivity</b> Činitel odrazu infračerveného záření na exteriérové straně	$\epsilon_{\text{in}}$	-	0,840	0,840
		<b>Inside emissivity</b> Činitel odrazu infračerveného záření na interiérové straně	$\epsilon_{\text{out}}$	-	0,100	0,840
	<b>Thermal Tepelné technické vlastnosti</b>	<b>Thickness</b> Tloušťka skla	d	mm	3,00	3,00
		<b>Conduction</b> Součinitel tepelné vodivosti	$\lambda$	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$	0,90	0,90



## PŘÍLOHA D: VLASTNOSTI POUŽITÝCH MATERIÁLŮ POUŽITÝCH NA EXPERIMENTÁLNÍHO MODELU

### PŘÍLOHA D. 1 DEKPAN 77

Parametry	Jednotka	Zkušební předpis	DEKPLAN 77
			1,8 mm
Šířka	m	EN 1848-2	2,05 -0,5% / +1%
Délka	m	EN 1848-2	20 -0% / +5%
Plošná hmotnost	kg/m <sup>2</sup>	EN 1849-2	2,15 -5% / +10%
Účinná tloušťka	mm	EN 1849-2	1,8 -5% / +10%
Přímost	mm	EN 1848-2	30
Rovinnost	mm	EN 1848-2	10
Zjevné vady	–	EN 1850-2	vyhovuje
Rozměrová stálost	%	EN 1107-2	0,2
Faktor difúzního odporu ( $\mu$ )	–	EN 1931	15000 $\pm$ 4500
Odolnost proti krupobití	m/s	EN 13583	17
Účinek kapalných chemikálií včetně vody	–	EN 1847	vyhovuje
Chování při vnějším požáru	třída	EN 13501-5	NPD
Reakce na oheň	třída	EN 13501-1	E
Vodotěsnost	kPa	EN 1928 metoda B	vyhovuje
Největší tahová síla podélně příčně	N/50 mm	EN 12311-2 metoda A	500 500
Odolnost proti statickému zatížení	kg	EN 12730	20
Odolnost proti nárazu	mm	EN 12691	300
Odolnost proti protrhávání podélně příčně	N	EN 12310-2	100 100
Odolnost proti odlupování ve spoji	N/50 mm	EN 12316-2	150
Smyková odolnost ve spoji podélně příčně	N/50 mm	EN 12317-2	400 400
Expozice UV zářením	vizuálně	EN 1297	vyhovuje
Ohebnost za nízkých teplot	°C	EN 495-5	- 25

## PŘÍLOHA D.2 ELASTEK 40 SPECIAL DEKOR

Vlastnost	Zkušební metoda	Požadavek ČSN 73 0605-1	Deklarovaná hodnota
délka	EN 1848-1	-	7,5 m
šířka	EN 1848-1	-	1,0 m
tloušťka	EN 1849-1	4,2 mm ( $\pm 5\%$ max. 0,2 mm)	4,5 ( $\pm 0,1$ ) mm
zjevné vady	EN 1850-1	Bez zjevných vad	bez zjevných vad
přímost	EN 1848-1	vyhovuje	vyhovuje
rozměrová stálost	EN 1107-1	0,30%	0,3 %
přilnavost posypu	EN 12039	MDV (max. 30) %	25 (-25, +0) %
reakce na oheň	EN 13501-1	-	třída E
vodotěsnost	EN 1928	100 kPa	vyhovuje
tahové vlastnosti – největší tahová síla	EN 12311-1	500 N/50 mm	podélně 900 ( $\pm 250$ ) N/50 mm příčně 800 ( $\pm 250$ ) N/50 mm
tahové vlastnosti – tažnost	EN 12311-1	30%	podélně 50 ( $\pm 10$ ) % příčně 50 ( $\pm 10$ ) %
odolnost proti nárazu (metoda A)	EN 12691	-	900 mm
odolnost proti statickému zatížení	EN 12730	-	10 kg
odolnost proti protrhávání (dřík hřebíku)	EN 12310-1	-	podélně 300 ( $\pm 100$ ) N příčně 400 ( $\pm 100$ ) N
odolnost proti stékání při zvýšené teplotě	EN 1110	90 °C	100 °C
ohebnost za nízkých teplot	EN 1109	-15 °C	-25 °C
trvanlivost – odolnost proti stékání při zvýšené teplotě po umělém stárnutí	EN 1296, EN 1110	-	95 (-0, +5) °C
trvanlivost – ohebnost za nízkých teplot po umělém stárnutí	EN 1296, EN 1109	-	-15 (-10, +0) °C
nebezpečné látky	REACH (1907/2006)	-	neobsahuje
Množství asfaltové hmoty	ČSN 73 0605-1	2500 g/m <sup>2</sup>	2800 g/m <sup>2</sup>
Harmonizovaná technická specifikace: EN 13707:2004+A2:2009			

## PŘÍLOHA D.3 GLASTEK 30 STICKER

Vlastnost	Zkušební metoda	Deklarovaná hodnota
šířka	EN 1848-1	1,0 m
délka	EN 1848-1	10 m
tloušťka	EN 1849-1	3,0 mm ±0,2 mm
vodotěsnost	EN 1928:2000	vyhovuje
reakce na oheň	EN 13501-1	třída E
maximální tahová síla	EN 12311-1	podélně 400 N/50 mm ±100 N příčně 300 N/50 mm ±100 N
tažnost	EN 12311-1	podélně i příčně 3 %
ohebnost za nízkých teplot	EN 1109	-20 °C
odolnost proti stékání při zvýšené teplotě	EN 1110	100 °C
faktor difúzního odporu	ČSN EN 1931	20000

## PŘÍLOHA D.4 FILTEK 300

Parametr	Zkušební norma	Deklarovaná hodnota
plošná hmotnost	EN ISO 9864	300 g/m <sup>2</sup>
šířka role	-	2,0 m
pevnost v tahu v: – podélné směru – příčném směru	EN ISO 10319	20 kN/m (-2 kN/m) 11,5 kN/m (-1,0 kN/m)
tažnost v: – podélném směru – příčném směru	EN ISO 10319	70 % (±20 %) 115 % (±25 %)
odolnost proti dynamickému protržení	EN ISO 13433	10 mm (+3 mm)
odolnost proti statickému protržení	EN ISO 12236	2300 N (-300 N)
velikost otvorů	EN ISO 12956	95 μm (±20 μm)
propustnost vody kolmo k rovině	EN ISO 11058	5,2 · 10 <sup>-2</sup> m/s (-0,5 · 10 <sup>-2</sup> m/s)
Propustnost vody v rovině při 200 kPa, Gradient=1	EN ISO 12958	-
základní vlastnosti geotextilie	-	
materiálové složení	-	

## PŘÍLOHA D.5 ISOVER EPS 150S

Parametr	Jednotka	hodnota	norma
Délka	mm	1000	-
Šířka	mm	500	-
Tloušťka	mm	100	-
Deklarovaný tepelný odpor RD	$m^2.K.W^{-1}$	2,9	-
Deklarovaný součinitel tepelné vodivosti $\lambda_D$ (stanovený na základě série měřených hodnot podle ČSN EN 12667)	$W.m^{-1}.K^{-1}$	0,035	ČSN EN 13163
Charakteristický součinitel tepelné vodivosti $\lambda_{k10}$	$W.m^{-1}.K^{-1}$	0,034	-
Objemová hmotnost	$kg.m^{-3}$	23-28	ČSN EN 1602
Dlouhodobá nasákavost při úplném ponoření WL(T)	%	5	ČSN EN 12 087
Pevnost (napětí) v tlaku při 10% lin. def. CS(10)	kPa	150	ČSN EN 826
Trvalá zatížitelnost (při 2% lin. def.)	$kg.m^{-2}$	3000	-
Třída reakce na oheň	-	E	ČSN EN 13 501-1
Teplotní odolnost dlouhodobě	°C	80	-
Faktor difuzního odporu ( $\mu$ ) MU	-	30-70	ČSN EN 12 086

## PŘÍLOHA D. 6 IZOLAČNÍ ZASKLENÍ PRESS-GLAS

### Thermofloat 4 mm / 12 / Float mm / 12 / Thermofloat 4 mm Argon

Parametry	Symbol	Jednotka	Zkušební norma	Deklarovaná hodnota
Reakce na oheň		-	EN-13501-2	NPD
Působení ohně vnějšího		-	EN-13501-1	NPD
Odolnost proti úderu náboje		-	-	NPD
Odolnost proti výbuchu		-	EN 1063	NPD/NPD/NPD *
Odolnost proti vloupání		-	EN 13541	NPD/NPD/NPD *
Odolnost proti kmitací úderu		-	EN 356	NPD/NPD/NPD *
Odolnost proti náhlým změnám teplot a rozdílům teplot		-	EN 12600	NPD/NPD/NPD *
Odolnost proti větru, sněhu a klidové a přidané zátěži		o	EN 572	40/40/40 *
Přímá izolační schopnost proti vzdušným zvukům		mm	-	4/4/4 *
Přímá izolační schopnost proti vzdušným zvukům	Rw (C,Ctr)	dBA	EN 12758	NPD (NPD; NPD)
Tepelné vlastnosti – Součinitel tepelného prostupu	Ug	W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup>	EN 673 EN 674	0,7 -
Součinitel tepelné vodivosti zasklení				
Součinitel propustnosti světla	τV (LT)	%	EN 410	70-71
Součinitel prostupu světla	ρV(LR) ρ'V(L'R)	%	EN 410	17 NPD
Vlastností záření světelné energie				
Součinitel přímé propustnosti slunečního záření	τe (ET)	%	EN 410	NPD
Součinitel přímé odrazivosti slunečního záření	ρe (ER) ρ'e(E'R)	%	EN 410	NPD NPD
Součinitel úplné propustnosti energie slunečního záření	g	%	EN 410	48-50

#### Značky:

NPD Neurčená pracovní vlastnost

\* Hodnota určená dle dalších vrstev

\*\* včetně veškerých druhů distančních rámků

**Příloha E SOUHRN DAT Z EXPERIMENTÁLNÍHO MĚŘENÍ**  
**Příloha E.1 SOUHRN MĚŘENÝCH DAT 18.7.2015-22.7.2015**

Datum	Veličina	Intenzita slunečních o záření [W]	Teplota vzduchu [°C]	Kontrolní teplota			Povrchová teplota										
				Na asfaltové krytině [°C]	Pod plachtou [°C]	Pod tepelnou izolací [°C]	PVC 1 [°C]	PVC 2 [°C]	PVC 3 [°C]	PVC 4 [°C]	Asfalt 1 [°C]	Asfalt 2 [°C]	Asfalt 3 [°C]	Asfalt 4 [°C]			
18.7	Jednotka		[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
	Maximální hodnota	837,0	37,1	85,7	38,5	32,6	69,0	61,5	68,7	63,9	85,2	78,0	84,0	74,4			
	Minimální hodnota	0,1	18,4	16,0	21,3	20,7	16,2	15,0	16,4	15,0	16,2	15,3	16,2	15,6			
	Průměrná celodenní hodnota	263,9	26,2	39,5	28,7	25,8	34,2	31,6	34,5	32,3	39,3	37,3	38,4	36,0			
	Průměr 10:00-16:00	723,4	33,5	79,8	34,2	27,3	62,2	56,8	63,0	58,4	77,7	72,1	75,0	68,3			
	Suma sluneční energie	6,333 kWh.m-2															
	Maximální povrchová teplota	85,2 °C															
19.7	Maximální hodnota	799,7	35,6	82,7	36,9	33,5	62,9	59,9	68,3	62,3	83,3	74,5	81,8	70,4			
	Minimální hodnota	0,1	19,7	16,4	22,2	22,8	16,7	15,6	17,0	15,5	16,6	15,6	16,5	15,8			
	Průměrná celodenní hodnota	224,2	27,1	37,2	28,8	27,5	33,4	31,6	33,6	32,4	37,1	36,0	36,5	34,9			
	Průměr 10:00-16:00	542,5	32,0	66,1	32,7	28,5	53,1	50,2	53,9	51,9	65,1	61,9	63,0	59,1			
	Suma sluneční energie	5,380 kWh.m-2															
	Maximální povrchová teplota	83,3 °C															
20.7	Maximální hodnota	1062,6	31,8	84,0	34,5	32,9	61,6	56,8	67,6	61,2	82,6	73,6	81,7	73,0			
	Minimální hodnota	0,1	21,9	17,9	23,1	22,8	18,9	17,9	19,1	17,8	18,1	17,6	18,1	17,8			
	Průměrná celodenní hodnota	236,1	26,7	37,8	28,3	27,5	32,8	30,8	33,4	31,9	37,8	35,9	37,2	35,5			
	Průměr 10:00-16:00	646,8	29,7	70,6	32,0	29,6	53,1	48,6	55,9	52,0	69,4	63,2	68,0	63,0			
	Suma sluneční energie	5,666 kWh.m-2															
	Maximální povrchová teplota	82,6 °C															
21.7	Maximální hodnota	955,9	35,8	89,9	36,1	35,2	73,7	62,8	74,6	63,8	92,4	77,7	89,1	75,9			
	Minimální hodnota	0,1	18,9	14,6	21,5	21,4	15,0	13,8	15,1	13,8	14,8	13,9	14,5	14,0			
	Průměrná celodenní hodnota	232,5	27,0	38,8	28,9	28,2	35,1	32,3	35,0	32,5	39,5	37,0	37,8	36,3			
	Průměr 10:00-16:00	565,9	32,1	73,9	33,8	31,2	59,6	53,8	61,1	54,3	76,4	66,0	71,7	64,8			
	Suma sluneční energie	5,580 kWh.m-2															
	Maximální povrchová teplota	92,4 °C															
22.7	Maximální hodnota	828,4	37,4	94,5	41,0	38,0	78,6	66,9	77,9	67,2	97,4	82,2	97,2	80,3			
	Minimální hodnota	0,1	20,6	16,9	23,4	23,7	17,0	15,7	17,2	15,8	17,1	16,1	16,9	16,2			
	Průměrná celodenní hodnota	292,3	29,7	45,0	31,6	30,6	40,1	36,7	40,2	36,9	45,9	42,4	44,3	41,4			
	Průměr 10:00-16:00	755,7	34,7	88,7	37,3	33,4	70,6	62,7	73,2	63,2	91,7	77,0	87,1	75,2			
	Suma sluneční energie	7,016 kWh.m-2															
	Maximální povrchová teplota	97,4 °C															

**Příloha E.2 SOUHRN MĚŘENÝCH DAT 23.7.2015-27. 7. 2015**

Datum	Veličina	Intenzita slunečních o záření [W]	Teplota vzduchu [°C]	Kontrolní teplota		Povrchová teplota											
				Na asfaltové krytině [°C]	Pod plachtou [°C]	Pod tepelnou izolací [°C]	PVC 1 [°C]	PVC 2 [°C]	PVC 3 [°C]	PVC 4 [°C]	Asfat 1 [°C]	Asfat 2 [°C]	Asfat 3 [°C]	Asfalt 4 [°C]			
23.7	Jednotka	[W]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
	Maximální hodnota	936,2	24,3	53,3	26,2	24,9	50,3	49,8	55,1	55,2	54,6	53,5	55,9	54,0			
	Minimální hodnota	0,2	11,7	8,0	15,4	14,5	8,1	6,1	8,4	6,4	7,8	6,5	7,4	6,4			
	Průměrná celodenní hodnota	167,1	18,4	24,3	20,5	19,6	22,3	21,6	24,5	23,7	24,7	23,8	24,1	23,6			
	Průměr 10:00-16:00	459,6	22,2	45,1	23,6	22,7	38,5	38,9	44,6	44,8	46,1	44,9	44,8	44,3			
	Suma sluneční energie	4,009 kWh.m-2															
	Maximální povrchová teplota	55,9 °C															
24.7	Maximální hodnota	802,8	34,1	88,3	38,3	35,4	74,9	63,7	74,4	63,7	91,0	77,9	89,5	75,3			
	Minimální hodnota	0,2	20,5	15,9	22,1	22,0	15,9	14,8	16,1	14,8	16,0	15,1	15,8	15,3			
	Průměrná celodenní hodnota	257,5	26,8	40,9	29,3	28,4	36,5	33,8	36,8	33,9	41,7	38,7	40,2	37,9			
	Průměr 10:00-16:00	704,9	31,3	80,0	34,5	31,5	64,9	58,1	66,6	58,3	82,5	71,1	78,0	69,0			
	Suma sluneční energie	6,181 kWh.m-2															
	Maximální povrchová teplota	91,0 °C															
25.7	Maximální hodnota	976,3	32,2	64,8	32,4	32,2	56,8	53,8	56,5	53,7	66,0	62,2	65,5	60,8			
	Minimální hodnota	0,1	17,3	16,4	22,6	21,5	16,5	16,1	16,8	16,3	16,4	16,2	16,3	16,3			
	Průměrná celodenní hodnota	141,2	24,7	29,6	26,5	26,7	27,5	26,8	27,8	27,0	30,1	29,5	30,0	29,4			
	Průměr 10:00-16:00	360,8	28,2	43,9	27,7	28,4	38,8	38,4	39,2	38,7	44,8	44,3	44,7	43,5			
	Suma sluneční energie	3,388 kWh.m-2															
	Maximální povrchová teplota	66,0 °C															
26.7	Maximální hodnota	869,0	26,6	86,5	31,1	27,6	68,8	56,2	70,3	57,4	90,3	71,9	90,5	70,5			
	Minimální hodnota	0,1	15,0	9,1	16,7	16,2	9,6	7,2	9,8	7,3	9,1	7,3	8,8	7,5			
	Průměrná celodenní hodnota	295,5	20,4	35,9	23,3	21,4	29,9	26,6	30,8	27,3	36,9	33,0	35,5	32,1			
	Průměr 10:00-16:00	797,0	23,3	77,5	27,4	22,8	57,3	49,7	62,6	51,5	81,1	64,7	77,5	63,3			
	Suma sluneční energie	7,092 kWh.m-2															
	Maximální povrchová teplota	90,5 °C															
27.7	Maximální hodnota	1023,5	21,9	63,4	23,7	23,9	47,7	47,5	53,7	46,4	63,1	55,4	63,3	52,4			
	Minimální hodnota	0,2	13,2	8,2	16,0	16,7	8,7	6,7	8,9	6,6	8,1	6,5	7,7	6,6			
	Průměrná celodenní hodnota	135,0	16,8	20,6	19,0	19,8	18,3	18,0	18,4	18,0	20,5	20,6	20,0	20,2			
	Průměr 10:00-16:00	349,6	19,4	34,3	20,1	21,2	27,3	27,6	27,7	27,1	34,9	33,7	34,2	32,6			
	Suma sluneční energie	3,241 kWh.m-2															
	Maximální povrchová teplota	63,3 °C															

**Příloha E.3 SOUHRN MĚŘENÝCH DAT 28.7.2015-1. 8. 2015**

Datum	Veličina	Intenzita slunečních o záření [W]	Teplota vzduchu [°C]	Kontrolní teplota		Povrchová teplota										
				Na asfaltové krytině [°C]	Pod plachtou [°C]	Pod tepelnou izolací [°C]	PVC 1 [°C]	PVC 2 [°C]	PVC 3 [°C]	PVC 4 [°C]	Asfat 1 [°C]	Asfat 2 [°C]	Asfalt 3 [°C]	Asfalt 4 [°C]		
28.7	Jednotka	[W]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
	Maximální hodnota	1016,6	26,5	65,4	28,1	26,5	53,5	47,5	55,1	48,1	66,6	57,7	65,8	55,4		
	Minimální hodnota	0,1	12,9	9,6	15,8	16,0	9,7	7,9	10,0	8,0	9,7	8,4	9,6	8,5		
	Průměrná celodenní hodnota	186,3	19,7	29,1	21,3	21,0	25,4	24,0	25,8	24,4	29,6	27,8	28,5	27,3		
	Průměr 10:00-16:00	506,0	24,1	54,4	24,6	23,5	43,5	41,0	44,8	41,6	55,9	50,6	52,7	49,1		
	Suma sluneční energie	4,471 kWh.m-2														
	Maximální povrchová teplota	66,6 °C														
29.7	Maximální hodnota	1021,3	23,4	74,4	27,6	25,5	62,8	54,3	61,8	54,9	75,1	65,1	74,8	61,5		
	Minimální hodnota	0,1	14,5	13,5	17,7	17,9	13,5	13,0	13,7	13,4	13,2	13,2	13,3	13,3		
	Průměrná celodenní hodnota	188,5	18,8	28,7	21,7	21,5	24,8	23,9	25,1	24,2	29,0	27,7	28,2	27,1		
	Průměr 10:00-16:00	510,1	21,1	53,7	24,0	23,0	41,5	39,4	42,5	39,7	54,7	49,7	52,6	48,0		
	Suma sluneční energie	4,523 kWh.m-2														
	Maximální povrchová teplota	75,1 °C														
30.7	Maximální hodnota	1004,1	25,3	73,6	27,2	25,7	60,7	51,1	62,2	53,0	76,7	62,6	74,8	61,1		
	Minimální hodnota	0,2	11,3	7,5	15,0	15,1	7,7	5,6	8,0	5,7	7,6	6,0	7,2	6,2		
	Průměrná celodenní hodnota	232,4	19,0	31,0	21,2	20,1	25,9	23,6	26,6	24,2	31,9	28,6	30,5	28,1		
	Průměr 10:00-16:00	593,7	22,4	63,1	24,7	21,9	47,2	42,1	51,0	43,8	65,8	54,6	62,2	53,7		
	Suma sluneční energie	5,577 kWh.m-2														
	Maximální povrchová teplota	76,7 °C														
31.7	Maximální hodnota	957,6	27,4	83,3	30,9	28,4	67,0	55,2	68,2	56,6	86,3	69,7	85,1	67,6		
	Minimální hodnota	0,1	13,7	9,4	15,5	15,0	9,6	7,4	9,9	7,5	9,5	7,6	9,2	7,8		
	Průměrná celodenní hodnota	280,4	19,9	34,9	22,8	21,2	29,4	26,1	30,5	26,8	36,0	31,9	34,3	31,3		
	Průměr 10:00-16:00	704,6	24,4	75,2	27,5	23,6	56,4	49,4	61,2	51,1	78,7	63,5	74,4	62,4		
	Suma sluneční energie	6,730 kWh.m-2														
	Maximální povrchová teplota	86,3 °C														
1.8	Maximální hodnota	1024,2	28,0	74,8	32,3	29,8	61,2	54,0	60,9	53,9	76,2	66,1	75,5	63,7		
	Minimální hodnota	0,1	13,6	8,6	15,5	16,3	9,2	7,1	9,4	7,2	8,5	7,1	8,3	7,1		
	Průměrná celodenní hodnota	278,7	21,3	33,1	23,4	23,0	29,3	26,6	29,4	26,8	33,8	31,1	32,4	30,2		
	Průměr 10:00-16:00	740,7	25,8	69,1	28,8	26,2	54,8	49,8	56,4	50,3	71,1	61,2	67,0	59,0		
	Suma sluneční energie	6,689 kWh.m-2														
	Maximální povrchová teplota	76,2 °C														



**Příloha E.4 SOUHRN MĚŘENÝCH DAT 2.8.2015-6. 8. 2015**

Datum	Veličina	Intenzita slunečního záření [W]	Teplota vzduchu [°C]	Kontrolní teplota		Povrchová teplota											
				Na asfaltové krytině [°C]	Pod asfaltovou plachtou [°C]	Pod tepelnou izolací [°C]	PVC 1 [°C]	PVC 2 [°C]	PVC 3 [°C]	PVC 4 [°C]	Asfat 1 [°C]	Asfat 2 [°C]	Asfat 3 [°C]	Asfalt 4 [°C]			
2.8	Jednotka		[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
	Maximální hodnota	495,9	24,6	45,7	23,7	24,4	39,5	39,3	40,3	40,3	46,7	46,3	46,8	45,8			
	Minimální hodnota	0,2	17,6	13,3	18,9	19,8	13,5	11,8	13,7	12,0	13,3	12,5	13,2	12,5			
	Průměrná celodenní hodnota	88,1	20,4	21,6	21,2	22,0	20,4	19,7	20,5	19,9	21,9	21,5	21,8	21,5			
	Průměr 10:00-16:00	227,8	22,9	32,0	22,1	23,2	28,5	28,8	28,8	29,1	32,6	33,0	32,6	33,0			
	Suma sluneční energie	2,115 kWh.m-2															
	Maximální povrchová teplota	46,8 °C															
3.8	Maximální hodnota	782,2	31,0	85,2	35,7	32,4	69,9	62,1	72,7	62,2	89,4	75,5	89,3	73,9			
	Minimální hodnota	0,1	16,5	13,0	18,1	18,3	13,4	12,2	13,4	12,2	13,0	12,2	12,8	12,2			
	Průměrná celodenní hodnota	265,3	23,9	39,1	26,0	25,0	34,2	31,6	34,7	31,8	39,9	37,0	38,6	36,1			
	Průměr 10:00-16:00	712,5	28,8	79,3	31,6	28,0	63,1	57,0	65,7	57,7	82,1	70,1	78,1	67,7			
	Suma sluneční energie	6,368 kWh.m-2															
	Maximální povrchová teplota	89,4 °C															
4.8	Maximální hodnota	849,8	33,3	86,1	36,1	34,2	73,4	65,8	72,1	64,0	88,3	77,9	86,2	74,5			
	Minimální hodnota	0,2	16,8	13,5	19,6	20,3	14,0	12,6	14,1	12,5	13,6	12,6	13,3	12,5			
	Průměrná celodenní hodnota	256,1	25,3	38,3	27,6	26,9	34,4	31,7	34,5	31,9	39,0	36,5	37,6	35,5			
	Průměr 10:00-16:00	670,1	30,8	76,3	32,9	29,7	62,3	56,9	63,7	57,5	78,6	69,0	74,5	66,6			
	Suma sluneční energie	6,145 kWh.m-2															
	Maximální povrchová teplota	88,3 °C															
5.8	Maximální hodnota	800,4	34,3	86,8	38,4	35,9	70,4	63,9	87,3	73,5	89,8	75,4	88,6	73,1			
	Minimální hodnota	0,1	20,3	16,5	22,0	22,3	17,2	15,7	17,2	15,8	16,6	15,6	16,3	15,6			
	Průměrná celodenní hodnota	268,5	26,9	42,0	29,3	28,3	35,9	33,6	40,2	36,8	43,1	39,4	41,1	37,9			
	Průměr 10:00-16:00	694,6	30,6	79,3	33,4	30,5	62,0	56,6	74,5	64,2	82,5	70,1	78,7	67,5			
	Suma sluneční energie	6,445 kWh.m-2															
	Maximální povrchová teplota	89,8 °C															
6.8	Maximální hodnota	832,9	36,2	90,5	41,3	36,4	75,4	69,4	91,7	80,4	93,5	81,6	90,9	77,9			
	Minimální hodnota	0,1	19,0	16,0	22,6	22,4	16,2	14,7	16,6	15,0	16,0	15,0	15,5	14,9			
	Průměrná celodenní hodnota	260,7	28,0	42,3	30,9	29,0	37,5	34,7	42,9	39,5	43,1	39,9	41,0	38,7			
	Průměr 10:00-16:00	686,6	33,6	82,0	36,2	31,7	66,5	60,9	83,0	73,5	84,7	73,5	79,5	70,8			
	Suma sluneční energie	6,257 kWh.m-2															
	Maximální povrchová teplota	93,5 °C															

**Příloha E.5 SOUHRN MĚŘENÝCH DAT 7.8.2015-11. 8. 2015**

Datum	Veličina	Intenzita slunečních o záření [W]	Teplota vzduchu [°C]	Kontrolní teplota		Povrchová teplota										
				Na asfaltové krytině [°C]	Pod plachtou [°C]	Pod tepelnou izolací [°C]	PVC 1 [°C]	PVC 2 [°C]	trávník+ PVC 3 [°C]	trávník+ PVC 4 [°C]	trávník+ asfalt 1 [°C]	trávník+ asfalt 2 [°C]	asfalt 3 [°C]	asfalt 4 [°C]		
7.8	Jednotka	[W]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
	Maximální hodnota	777,3	37,1	90,9	41,7	37,5	76,2	70,9	92,0	81,1	94,0	82,5	90,8	78,6		
	Minimální hodnota	0,1	19,3	15,6	21,7	22,1	15,9	14,4	16,3	14,7	15,6	14,6	15,2	14,4		
	Průměrná celodenní hodnota	252,9	28,4	42,5	30,8	29,3	37,8	35,2	43,2	39,9	43,4	40,1	41,3	38,9		
	Průměr 10:00-16:00	668,5	34,6	82,6	36,5	32,2	67,2	62,4	83,6	75,1	85,2	74,7	80,4	71,8		
	Suma sluneční energie	6,070 kWh.m-2														
	Maximální povrchová teplota	94,0 °C														
8.8	Maximální hodnota	813,7	36,4	80,2	40,6	37,8	68,7	66,8	80,9	73,6	82,5	74,7	80,7	72,3		
	Minimální hodnota	0,1	19,8	16,5	22,8	23,1	16,8	15,5	17,1	15,8	16,6	15,6	16,2	15,5		
	Průměrná celodenní hodnota	251,3	28,8	40,0	31,1	30,2	36,5	34,6	40,6	38,2	40,8	38,1	39,5	37,6		
	Průměr 10:00-16:00	670,9	34,7	73,8	36,3	33,8	62,2	59,4	74,3	68,7	76,0	67,9	73,2	66,6		
	Suma sluneční energie	6,031 kWh.m-2														
	Maximální povrchová teplota	82,5 °C														
9.8	Maximální hodnota	760,4	36,6	85,7	41,2	37,6	72,4	69,6	87,2	78,1	89,0	79,3	87,2	75,4		
	Minimální hodnota	0,1	19,3	15,3	22,4	22,2	15,6	14,3	15,9	14,4	15,3	14,2	14,8	14,2		
	Průměrná celodenní hodnota	255,4	27,9	40,3	30,8	29,5	36,0	33,9	40,9	38,0	41,1	38,0	39,4	37,0		
	Průměr 10:00-16:00	693,2	34,2	78,4	36,3	32,8	64,4	61,4	79,1	72,7	80,8	71,4	76,9	69,0		
	Suma sluneční energie	6,131 kWh.m-2														
	Maximální povrchová teplota	89,0 °C														
10.8	Maximální hodnota	756,9	36,1	85,5	40,8	36,5	71,4	67,2	86,8	80,4	88,3	80,4	87,1	75,3		
	Minimální hodnota	0,1	18,8	14,8	21,5	22,3	14,9	13,4	15,3	13,6	14,8	13,6	14,3	13,4		
	Průměrná celodenní hodnota	253,6	27,8	40,8	30,3	28,9	36,3	34,0	41,4	38,6	41,6	38,6	39,8	37,3		
	Průměr 10:00-16:00	675,9	34,0	79,7	35,8	31,8	65,1	62,1	80,8	74,3	82,3	72,9	78,1	69,8		
	Suma sluneční energie	6,086 kWh.m-2														
	Maximální povrchová teplota	88,3 °C														
11.8	Maximální hodnota	744,6	37,5	86,5	41,4	37,4	71,4	69,3	87,1	81,9	89,0	82,0	86,3	77,7		
	Minimální hodnota	0,1	20,0	16,5	22,8	22,4	16,2	14,6	16,7	15,1	16,5	15,5	16,0	15,2		
	Průměrná celodenní hodnota	238,3	28,8	41,5	30,9	29,1	36,8	35,2	41,8	39,7	42,4	39,7	40,8	38,4		
	Průměr 10:00-16:00	662,6	34,5	78,4	35,7	31,9	64,8	62,4	79,8	74,7	80,9	73,0	77,5	70,0		
	Suma sluneční energie	5,718 kWh.m-2														
	Maximální povrchová teplota	89,0 °C														

**Příloha E.6 SOUHRN MĚŘENÝCH DAT 12.8.2015-16. 8. 2015**

Datum	Veličina	Intenzita slunečního záření [W]	Teplota vzduchu [°C]	Kontrolní teplota			Povrchová teplota									
				Na asfaltové krytině [°C]	Pod plachtou [°C]	Pod tepelnou izolací [°C]	PVC 1 [°C]	PVC 2 [°C]	trávník+ PVC 3 [°C]	trávník+ PVC 4 [°C]	trávník+ asfalt 1 [°C]	trávník+ asfalt 2 [°C]	asfalt 3 [°C]	asfalt 4 [°C]		
12.8	Jednotka		[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
	Maximální hodnota	810,6	36,7	86,2	41,4	36,2	72,0	70,0	87,2	83,1	89,1	83,6	86,6	78,9		
	Minimální hodnota	0,2	23,5	20,6	25,6	24,3	20,3	19,3	20,6	19,6	20,6	20,1	20,2	19,8		
	Průměrná celodenní hodnota	181,8	28,3	38,7	30,9	28,6	35,3	33,9	39,2	37,7	39,5	37,6	37,8	36,4		
	Průměr 10:00-16:00	537,3	34,1	73,1	36,5	32,3	60,2	58,0	72,8	69,8	75,2	69,6	69,6	65,4		
	Suma sluneční energie	4,362	kWh.m-2													
13.8	Maximální povrchová teplota	89,1	°C													
	Maximální hodnota	727,3	35,6	84,2	40,5	36,6	72,1	69,2	85,9	82,0	86,5	82,5	82,0	77,8		
	Minimální hodnota	0,2	20,9	16,5	23,0	21,9	16,6	15,2	16,9	15,6	16,6	15,6	16,2	15,4		
	Průměrná celodenní hodnota	242,0	28,7	41,2	30,7	28,6	37,2	35,4	41,9	39,7	42,1	39,4	40,2	38,3		
	Průměr 10:00-16:00	651,9	33,5	77,4	35,8	31,5	64,5	61,5	78,8	73,7	79,6	71,7	74,8	68,3		
	Suma sluneční energie	5,808	kWh.m-2													
14.8	Maximální povrchová teplota	86,5	°C													
	Maximální hodnota	848,4	36,0	76,7	38,7	36,9	66,7	65,4	78,0	77,0	78,8	75,9	77,0	74,2		
	Minimální hodnota	0,1	20,8	17,0	23,8	23,8	17,2	15,5	17,5	15,8	17,1	15,8	16,7	15,6		
	Průměrná celodenní hodnota	210,4	29,0	38,2	31,0	30,0	35,2	33,9	38,7	37,2	39,0	37,0	37,8	36,4		
	Průměr 10:00-16:00	560,9	33,6	68,2	35,2	32,9	58,3	57,3	68,5	66,6	70,0	65,1	67,0	63,1		
	Suma sluneční energie	5,049	kWh.m-2													
15.8	Maximální povrchová teplota	78,8	°C													
	Maximální hodnota	707,2	34,2	72,5	36,4	35,3	65,2	64,0	75,0	74,3	74,5	71,4	73,9	67,0		
	Minimální hodnota	0,1	20,8	17,0	23,2	23,5	17,3	15,7	17,6	16,0	17,0	16,0	16,8	15,8		
	Průměrná celodenní hodnota	209,0	27,6	37,1	29,8	29,2	33,8	32,5	37,4	36,0	37,8	36,0	36,5	35,1		
	Průměr 10:00-16:00	528,1	31,5	63,1	33,5	31,9	53,6	52,9	63,1	61,6	64,8	60,9	61,8	58,7		
	Suma sluneční energie	5,017	kWh.m-2													
16.8	Maximální povrchová teplota	75,0	°C													
	Maximální hodnota	751,8	30,1	73,6	33,5	30,0	61,1	57,9	75,6	69,9	75,7	65,5	76,9	68,1		
	Minimální hodnota	0,2	19,2	17,5	22,8	21,9	17,4	16,5	17,8	16,9	17,6	17,1	17,1	16,8		
	Průměrná celodenní hodnota	173,3	24,3	31,8	26,9	25,3	29,7	29,0	32,1	31,1	32,2	31,2	33,2	32,0		
	Průměr 10:00-16:00	453,5	27,0	50,1	27,9	26,1	46,4	45,3	52,2	49,8	51,3	48,1	56,7	53,3		
	Suma sluneční energie	4,159	kWh.m-2													
	Maximální povrchová teplota	76,9	°C													

Příloha E.7 SOUHRN MĚŘENÝCH DAT 17.8.2015-21. 8. 2015

Datum	Veličina	Intenzita slunečních o záření [W]	Teplota vzduchu [°C]	Kontrolní teplota		Povrchová teplota										
				Na asfaltové krytině [°C]	Pod plachtou [°C]	Pod tepelnou izolací [°C]	PVC 1 [°C]	PVC 2 [°C]	trávník+ PVC 3 [°C]	trávník+ PVC 4 [°C]	trávník+ asfalt 1 [°C]	trávník+ asfalt 2 [°C]	asfalt 3 [°C]	asfalt 4 [°C]		
17.8	Jednotka		[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
	Maximální hodnota	271,9	23,4	25,2	25,6	24,1	24,8	25,7	26,1	27,0	25,3	26,1	29,7	30,6		
	Minimální hodnota	0,1	17,9	18,2	21,7	19,7	17,7	17,5	18,2	17,9	18,2	18,2	17,7	17,9		
	Průměrná celodenní hodnota	51,2	20,8	21,1	22,9	21,9	20,6	20,5	21,3	21,2	21,2	21,2	21,2	21,2		
	Průměr 10:00-16:00	122,7	21,0	22,9	22,4	22,2	22,0	22,2	23,2	23,4	23,0	23,4	23,8	24,0		
	Suma sluneční energie	1,228 kWh.m-2														
18.8	Maximální povrchová teplota	30,6 °C														
	Maximální hodnota	166,6	17,8	19,3	21,6	19,5	17,9	18,0	19,4	19,4	19,4	19,3	19,5			
	Minimální hodnota	0,1	15,2	13,4	16,5	14,8	13,4	13,0	13,5	13,1	13,4	13,2	13,2			
	Průměrná celodenní hodnota	32,3	15,9	16,2	18,0	16,5	15,7	15,5	16,2	16,0	16,2	16,1	16,0			
	Průměr 10:00-16:00	83,4	15,6	17,1	17,2	16,4	16,2	16,1	17,2	16,9	17,3	17,1	17,1			
	Suma sluneční energie	0,775 kWh.m-2														
19.8	Maximální povrchová teplota	19,5 °C														
	Maximální hodnota	241,8	18,9	21,0	18,2	18,3	21,3	22,3	21,4	22,0	21,1	21,7	25,2			
	Minimální hodnota	0,2	14,6	13,2	16,3	14,9	13,1	12,5	13,3	12,7	13,2	12,8	13,0			
	Průměrná celodenní hodnota	38,3	16,6	16,7	17,4	16,7	16,3	16,2	16,8	16,7	16,8	16,8	17,0			
	Průměr 10:00-16:00	102,2	17,2	19,1	17,9	17,5	18,2	18,3	19,1	19,2	19,3	19,4	20,4			
	Suma sluneční energie	0,920 kWh.m-2														
20.8	Maximální povrchová teplota	26,2 °C														
	Maximální hodnota	807,6	24,9	78,2	29,8	23,0	64,9	64,5	79,7	78,5	80,7	76,3	78,8			
	Minimální hodnota	0,1	13,4	10,5	15,4	12,7	10,1	9,0	10,5	9,3	10,4	9,6	10,0			
	Průměrná celodenní hodnota	221,4	18,7	30,8	21,1	17,2	27,2	26,0	30,8	29,3	31,4	29,3	31,0			
	Průměr 10:00-16:00	599,6	22,4	64,6	25,6	18,7	54,3	52,8	66,1	62,5	66,5	60,4	65,8			
	Suma sluneční energie	5,313 kWh.m-2														
21.8	Maximální povrchová teplota	80,7 °C														
	Maximální hodnota	720,0	26,3	73,7	29,4	23,9	61,3	60,7	74,8	74,1	75,8	73,7	72,7			
	Minimální hodnota	0,2	12,9	8,0	14,4	12,3	7,8	6,5	8,2	6,7	7,8	6,7	7,6			
	Průměrná celodenní hodnota	192,3	19,2	29,6	21,0	17,7	25,5	24,2	29,7	28,1	30,2	28,3	28,6			
	Průměr 10:00-16:00	513,6	23,2	61,9	25,4	20,5	50,1	48,9	62,5	60,0	63,6	59,4	60,1			
	Suma sluneční energie	4,615 kWh.m-2														
	Maximální povrchová teplota	75,8 °C														

**Příloha E.8 SOUHRN MĚŘENÝCH DAT 22.8.2015-26. 8. 2015**

Datum	Veličina	Intenzita slunečních o záření [W]	Teplota vzduchu [°C]	Kontrolní teplota			Povrchová teplota									
				Na asfaltové krytině [°C]	Pod plachtou [°C]	Pod tepelnou izolací [°C]	PVC 1 [°C]	PVC 2 [°C]	trávník+ PVC 3 [°C]	trávník+ PVC 4 [°C]	trávník+ asfalt 1 [°C]	trávník+ asfalt 2 [°C]	asfalt 3 [°C]	asfalt 4 [°C]		
22.8	Jednotka	[W]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
	Maximální hodnota	850,4	26,7	76,2	30,7	26,2	64,3	63,2	77,5	77,1	78,2	77,0	75,3	75,0		
	Minimální hodnota	0,1	10,9	6,5	14,3	12,0	6,6	4,6	6,9	5,1	6,4	5,1	6,2	5,1		
	Průměrná celodenní hodnota	201,7	19,2	29,9	21,6	18,5	26,1	24,6	30,1	28,4	30,7	28,4	28,8	27,3		
	Průměr 10:00-16:00	583,1	24,0	65,2	26,7	21,5	53,3	51,6	65,3	63,3	67,0	62,4	61,5	58,7		
	Suma sluneční energie	4,841	kWh.m-2													
23.8	Maximální povrchová teplota	78,2	°C													
	Maximální hodnota	936,2	24,3	53,3	26,2	24,9	50,3	49,8	55,1	55,2	54,6	53,5	55,9	54,0		
	Minimální hodnota	0,2	11,7	8,0	15,4	14,5	8,1	6,1	8,4	6,4	7,8	6,5	7,4	6,4		
	Průměrná celodenní hodnota	167,1	18,4	24,3	20,5	19,6	22,3	21,6	24,5	23,7	24,7	23,8	24,1	23,6		
	Průměr 10:00-16:00	459,6	22,2	45,1	23,6	22,7	38,5	38,9	44,6	44,8	46,1	44,9	44,8	44,3		
	Suma sluneční energie	4,009	kWh.m-2													
24.8	Maximální povrchová teplota	55,9	°C													
	Maximální hodnota	557,5	27,7	40,4	26,9	27,6	37,7	39,0	40,5	41,2	41,8	40,9	45,3	42,9		
	Minimální hodnota	0,2	15,7	12,2	17,0	16,3	12,4	11,4	12,4	11,3	12,2	11,4	12,2	11,6		
	Průměrná celodenní hodnota	140,1	21,4	24,5	21,7	21,5	23,4	23,0	24,7	24,3	24,7	24,3	24,7	24,7		
	Průměr 10:00-16:00	318,2	23,8	35,6	23,2	23,8	32,8	33,6	35,4	36,3	36,2	36,2	36,3	37,1		
	Suma sluneční energie	3,363	kWh.m-2													
25.8	Maximální povrchová teplota	45,3	°C													
	Maximální hodnota	739,8	23,4	40,9	22,9	24,0	49,6	46,9	55,4	36,4	48,6	37,1	59,6	57,6		
	Minimální hodnota	0,1	12,5	9,5	17,1	15,3	9,0	7,1	9,5	7,9	9,4	8,3	8,8	8,0		
	Průměrná celodenní hodnota	98,2	18,9	20,8	20,5	19,4	19,8	18,8	21,3	18,8	21,5	19,2	21,9	20,8		
	Průměr 10:00-16:00	297,1	21,2	30,2	20,9	20,7	29,5	29,1	32,3	27,5	32,1	27,7	35,7	33,7		
	Suma sluneční energie	2,358	kWh.m-2													
26.8	Maximální povrchová teplota	59,6	°C													
	Maximální hodnota	708,5	27,0	81,7	31,9	23,7	66,8	65,6	81,7	80,9	84,6	81,7	81,3	78,3		
	Minimální hodnota	0,1	9,8	6,3	12,9	11,5	6,6	4,5	6,7	4,8	6,2	4,7	6,0	4,5		
	Průměrná celodenní hodnota	230,7	17,9	32,4	21,1	17,4	26,9	24,9	32,4	28,9	33,3	29,3	31,1	28,6		
	Průměr 10:00-16:00	636,3	24,1	73,8	26,5	19,4	58,5	56,5	74,6	68,4	76,3	67,3	71,6	66,0		
	Suma sluneční energie	5,537	kWh.m-2													
	Maximální povrchová teplota	84,6	°C													

**Příloha E.9 SOUHRN MĚŘENÝCH DAT 29.8.2015-31. 8. 2015**

Datum	Veličina	Intenzita slunečních o záření [W]	Teplota vzduchu [°C]	Kontrolní teplota			Povrchová teplota									
				Na asfaltové krytině [°C]	Pod plachtou [°C]	Pod tepelnou izolací [°C]	PVC 1 [°C]	PVC 2 [°C]	trávník+ PVC 3 [°C]	trávník+ PVC 4 [°C]	trávník+ asfalt 1 [°C]	trávník+ asfalt 2 [°C]	asfalt 3 [°C]	asfalt 4 [°C]		
27.8	Jednotka	[W]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
	Maximální hodnota	766,6	28,8	75,3	32,6	27,9	67,5	66,9	77,5	77,4	77,5	76,1	77,8	75,0		
	Minimální hodnota	0,1	10,5	7,0	13,6	13,2	7,4	5,5	7,5	5,6	7,0	5,5	6,8	5,4		
	Průměrná celodenní hodnota	217,2	19,9	31,1	22,4	20,3	27,3	25,6	31,4	29,4	31,8	29,3	30,4	28,6		
	Průměr 10:00-16:00	603,5	26,1	67,1	27,5	23,2	54,7	53,7	67,3	65,2	69,0	64,4	65,8	62,5		
	Suma sluneční energie	5,212 kWh.m-2														
	Maximální povrchová teplota	77,8 °C														
28.8	Maximální hodnota	680,3	29,9	75,6	33,3	28,5	62,4	61,5	76,7	76,5	77,7	76,4	75,5	74,0		
	Minimální hodnota	0,1	15,8	12,6	18,5	18,1	13,1	11,1	13,3	11,4	12,7	11,3	12,5	11,2		
	Průměrná celodenní hodnota	169,5	22,4	32,2	24,6	23,0	28,4	27,4	32,3	31,1	32,7	31,6	31,7	30,7		
	Průměr 10:00-16:00	539,1	26,0	60,9	27,5	24,5	51,0	49,8	62,6	60,7	62,5	60,5	62,0	58,9		
	Suma sluneční energie	4,069 kWh.m-2														
	Maximální povrchová teplota	77,7 °C														
29.8	Maximální hodnota	670,4	33,3	84,6	37,3	30,1	70,9	68,5	85,5	84,7	87,1	85,4	84,3	82,2		
	Minimální hodnota	0,1	18,8	15,9	20,6	20,0	16,1	14,7	16,2	14,9	16,0	15,1	15,5	14,9		
	Průměrná celodenní hodnota	211,2	25,6	39,1	27,6	24,6	34,3	32,8	39,2	37,4	40,0	37,7	38,1	36,3		
	Průměr 10:00-16:00	590,0	30,3	76,6	32,6	26,2	62,5	60,7	77,4	74,5	78,9	74,2	74,9	70,6		
	Suma sluneční energie	5,068 kWh.m-2														
	Maximální povrchová teplota	87,1 °C														
30.8	Maximální hodnota	705,8	34,7	74,7	37,1	32,4	64,0	63,7	75,4	75,6	76,7	75,3	76,2	74,9		
	Minimální hodnota	0,1	17,1	14,3	20,2	19,8	14,8	13,1	14,9	13,3	14,4	13,2	14,1	13,1		
	Průměrná celodenní hodnota	215,5	25,5	36,0	27,8	25,7	32,4	31,0	36,2	34,3	36,8	34,5	35,6	34,0		
	Průměr 10:00-16:00	608,9	31,6	69,3	32,3	28,5	58,7	57,7	69,8	67,7	71,2	67,0	69,3	66,2		
	Suma sluneční energie	5,172 kWh.m-2														
	Maximální povrchová teplota	76,7 °C														
31.8	Maximální hodnota	671,1	34,4	79,4	36,9	32,5	67,9	65,8	79,5	79,4	81,5	80,0	79,6	78,4		
	Minimální hodnota	0,1	16,5	13,1	19,3	19,1	13,6	12,0	13,7	12,1	13,2	12,0	13,0	11,9		
	Průměrná celodenní hodnota	212,5	25,1	35,3	27,3	25,2	31,7	30,1	35,5	33,7	36,1	33,7	34,8	33,2		
	Průměr 10:00-16:00	598,0	31,7	70,9	32,3	27,9	59,7	58,5	71,2	69,4	72,9	68,8	70,3	67,4		
	Suma sluneční energie	5,100 kWh.m-2														
	Maximální povrchová teplota	81,5 °C														

**Příloha E.10 SOUHRN MĚŘENÝCH DAT 1.9.2015-5.9. 2015**

Datum	Veličina	Intenzita slunečních o záření [W]	Teplota vzduchu [°C]	Kontrolní teplota			Povrchová teplota									
				Na asfaltové krytině [°C]	Pod plachtou [°C]	Pod tepelnou izolací [°C]	PVC 1 [°C]	PVC 2 [°C]	trávník+ PVC 3 [°C]	trávník+ PVC 4 [°C]	trávník+ asfalt 1 [°C]	trávník+ asfalt 2 [°C]	asfalt 3 [°C]	asfalt 4 [°C]		
1.9	Jednotka	[W]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
	Maximální hodnota	660,0	33,2	82,1	36,7	30,8	68,6	67,7	82,6	82,2	84,6	82,9	81,7	80,0		
	Minimální hodnota	0,1	16,2	13,0	19,1	19,3	13,4	11,9	13,6	12,1	13,0	11,9	12,7	11,8		
	Průměrná celodenní hodnota	206,4	24,2	36,1	26,8	24,4	32,0	30,5	36,4	34,6	37,0	34,8	35,4	33,8		
	Průměr 10:00-16:00	587,0	30,2	73,7	31,6	26,0	60,9	59,3	74,5	72,3	75,9	72,0	72,6	69,5		
	Suma sluneční energie	4,955	kWh.m-2													
	Maximální povrchová teplota	84,6	°C													
2.9	Maximální hodnota	864,1	24,9	56,0	26,4	25,0	47,4	46,3	58,1	57,1	57,8	54,5	61,0	56,5		
	Minimální hodnota	0,2	15,3	14,5	19,6	16,8	14,4	13,9	14,8	14,2	14,5	14,2	14,1	14,1		
	Průměrná celodenní hodnota	132,8	20,3	26,8	22,7	21,2	24,5	23,9	26,9	24,8	27,4	25,3	27,0	26,2		
	Průměr 10:00-16:00	396,1	21,6	44,7	23,4	22,4	38,3	37,6	45,7	39,6	46,8	39,8	46,5	44,5		
	Suma sluneční energie	3,188	kWh.m-2													
	Maximální povrchová teplota	61,0	°C													
3.9	Maximální hodnota	762,3	24,4	67,4	25,4	23,0	61,3	60,6	73,3	69,9	70,2	61,0	71,7	69,5		
	Minimální hodnota	0,1	12,9	9,9	15,6	13,0	9,7	8,5	10,2	9,3	9,9	9,3	9,7	9,3		
	Průměrná celodenní hodnota	148,1	18,4	25,3	20,2	17,8	23,5	22,8	25,7	23,8	26,1	24,0	25,8	25,2		
	Průměr 10:00-16:00	416,5	22,4	47,7	22,6	20,0	43,5	42,7	49,8	44,4	50,1	43,8	50,5	49,1		
	Suma sluneční energie	3,555	kWh.m-2													
	Maximální povrchová teplota	73,3	°C													
4.9	Maximální hodnota	835,6	24,5	72,6	27,1	22,7	56,7	54,1	72,8	70,3	75,5	72,6	76,0	72,2		
	Minimální hodnota	0,1	13,8	10,5	17,3	15,7	10,2	8,4	10,6	8,9	10,4	9,3	10,0	9,0		
	Průměrná celodenní hodnota	177,5	18,2	27,7	20,6	18,0	24,0	23,2	27,3	25,9	28,4	26,9	28,8	27,1		
	Průměr 10:00-16:00	563,2	21,7	53,8	22,8	20,1	45,3	44,1	54,4	51,2	55,9	52,3	59,5	54,9		
	Suma sluneční energie	4,260	kWh.m-2													
	Maximální povrchová teplota	76,0	°C													
5.9	Maximální hodnota	889,2	23,2	61,4	23,4	23,3	57,7	56,0	69,4	69,2	63,5	61,2	68,1	65,9		
	Minimální hodnota	0,1	13,4	10,0	15,7	14,5	10,2	8,1	10,4	8,5	10,0	8,7	9,6	8,5		
	Průměrná celodenní hodnota	120,9	17,0	22,2	18,5	17,6	20,0	19,4	22,2	21,2	22,6	21,5	22,3	21,7		
	Průměr 10:00-16:00	346,7	20,8	41,3	20,7	20,4	35,4	35,3	41,9	40,2	43,0	40,2	42,9	41,8		
	Suma sluneční energie	2,902	kWh.m-2													
	Maximální povrchová teplota	69,4	°C													



**Příloha E.11 SOUHRN MĚŘENÝCH DAT 6.9.2015-10.9. 2015**

Datum	Veličina	Intenzita slunečních o záření [W]	Teplota vzduchu [°C]	Kontrolní teplota		Povrchová teplota										
				Na asfaltové krytině [°C]	Pod plachtou [°C]	Pod tepelnou izolací [°C]	PVC 1 [°C]	PVC 2 [°C]	trávník+ PVC 3 [°C]	trávník+ PVC 4 [°C]	trávník+ asfalt 1 [°C]	trávník+ asfalt 2 [°C]	asfalt 3 [°C]	asfalt 4 [°C]		
6.9	Jednotka	[W]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
	Maximální hodnota	926,5	17,3	51,9	20,4	19,6	49,1	47,2	52,2	50,9	53,8	51,0	57,2	53,1		
	Minimální hodnota	0,2	11,4	7,8	13,8	12,2	6,8	5,5	7,5	6,3	7,7	6,9	7,3	6,7		
	Průměrná celodenní hodnota	115,4	14,4	19,6	16,2	15,2	17,2	16,6	19,2	18,5	19,9	19,0	19,6	19,0		
7.9	Průměr 10:00-16:00	350,0	16,2	38,6	18,2	17,6	30,0	29,6	36,5	35,6	39,7	37,3	38,7	37,3		
	Suma sluneční energie	2,770	kWh.m-2													
	Maximální povrchová teplota	57,2	°C													
	Maximální hodnota	877,6	17,2	43,4	18,0	18,7	38,6	37,7	44,1	44,6	44,7	42,4	46,3	43,4		
8.9	Minimální hodnota	0,1	9,1	5,0	11,3	10,1	4,8	3,0	5,4	4,8	3,7	4,5	4,6	3,7		
	Průměrná celodenní hodnota	101,4	13,0	15,3	14,5	13,7	13,6	12,9	15,1	14,3	15,5	14,7	15,1	14,4		
	Průměr 10:00-16:00	290,1	15,5	29,5	16,4	16,7	23,9	24,0	27,6	27,8	30,1	29,1	29,2	28,5		
	Suma sluneční energie	2,433	kWh.m-2													
9.9	Maximální povrchová teplota	46,3	°C													
	Maximální hodnota	773,4	19,2	56,2	21,5	20,4	46,3	43,3	55,2	54,9	58,5	55,7	59,8	56,6		
	Minimální hodnota	0,1	9,0	5,9	11,1	9,1	5,4	4,0	6,0	4,5	5,7	4,5	5,3	4,4		
	Průměrná celodenní hodnota	143,6	13,3	21,0	15,4	13,7	17,2	16,2	20,2	18,9	21,6	19,5	20,9	19,5		
10.9	Průměr 10:00-16:00	396,9	17,4	46,2	18,2	16,6	35,9	35,1	44,3	42,7	48,0	43,4	47,1	44,1		
	Suma sluneční energie	3,446	kWh.m-2													
	Maximální povrchová teplota	59,8	°C													
	Maximální hodnota	439,2	17,1	35,5	17,3	18,1	33,7	33,4	37,4	28,9	37,2	28,1	38,4	39,4		
10.9	Minimální hodnota	0,1	10,9	7,8	12,7	11,8	8,2	7,3	8,6	7,5	7,6	6,8	7,7	7,2		
	Průměrná celodenní hodnota	80,9	13,1	15,5	14,4	14,0	14,5	14,2	15,6	14,5	15,8	14,6	15,6	15,6		
	Průměr 10:00-16:00	236,5	15,2	24,8	15,3	15,8	23,4	23,5	25,6	22,7	26,1	22,4	26,5	26,8		
	Suma sluneční energie	1,940	kWh.m-2													
10.9	Maximální povrchová teplota	39,4	°C													
	Maximální hodnota	799,0	21,9	57,5	22,6	20,4	58,5	56,3	62,8	63,9	59,1	56,8	61,7	59,1		
	Minimální hodnota	0,1	10,5	7,0	12,4	10,4	6,6	5,4	6,9	5,8	6,9	6,4	6,4	6,0		
	Průměrná celodenní hodnota	126,2	15,5	22,5	16,7	15,1	19,8	18,8	22,4	21,3	23,1	21,6	22,2	21,4		
10.9	Průměr 10:00-16:00	376,4	18,9	44,7	19,1	17,3	37,9	36,4	45,0	43,8	46,1	43,4	44,5	43,5		
	Suma sluneční energie	3,028	kWh.m-2													
10.9	Maximální povrchová teplota	63,9	°C													



Příloha E.12 SOUHRN MĚŘENÝCH DAT 11.9.2015-14.9. 2015

Datum	Veličina	Intenzita slunečních o záření [W]	Teplota vzduchu [°C]	Kontrolní teplota		Povrchová teplota										
				Na asfaltové krytině [°C]	Pod plachtou [°C]	Pod tepelnou izolací [°C]	PVC 1 [°C]	PVC 2 [°C]	trávník+ PVC 3 [°C]	trávník+ PVC 4 [°C]	trávník+ asfalt 1 [°C]	trávník+ asfalt 2 [°C]	asfalt 3 [°C]	asfalt 4 [°C]		
11.9	Jednotka		[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
	Maximální hodnota	339,2	17,1	22,0	16,8	17,4	28,2	29,2	22,8	24,2	22,1	22,6	28,8	25,1		
	Minimální hodnota	0,1	12,8	11,5	15,0	14,8	10,5	9,3	11,3	9,9	11,5	10,9	10,9	10,5		
	Průměrná celodenní hodnota	50,9	14,8	14,9	16,0	15,9	15,5	15,4	15,0	14,8	14,9	14,9	15,8	15,9		
	Průměr 10:00-16:00	127,0	15,9	18,0	16,2	16,3	19,5	20,0	17,8	18,2	18,0	18,3	20,6	20,6		
	Suma sluneční energie	1,221	kWh.m-2													
	Maximální povrchová teplota	29,2	°C													
12.9	Maximální hodnota	772,6	23,2	59,6	25,3	21,5	51,2	50,6	59,2	60,7	61,2	60,8	61,5	61,1		
	Minimální hodnota	0,1	12,7	9,7	14,8	14,5	9,6	7,7	10,2	8,0	9,6	8,3	9,2	8,1		
	Průměrná celodenní hodnota	139,8	16,9	23,9	18,4	17,4	21,1	20,7	23,4	22,9	24,4	23,5	24,2	23,7		
	Průměr 10:00-16:00	430,0	19,9	43,1	20,1	19,2	37,3	37,2	43,2	43,4	44,3	43,3	45,4	45,2		
	Suma sluneční energie	3,354	kWh.m-2													
	Maximální povrchová teplota	61,5	°C													
13.9	Maximální hodnota	0,3	13,1	9,5	17,2	15,8	51,1	50,3	54,3	57,0	58,2	56,9	60,1	59,5		
	Minimální hodnota	0,2	12,4	8,9	16,3	15,0	7,5	5,6	7,7	5,7	7,1	5,6	7,0	5,6		
	Průměrná celodenní hodnota	0,2	12,7	9,2	16,7	15,5	23,0	22,1	24,4	24,0	25,3	23,9	25,0	24,1		
	Průměr 10:00-16:00	x	x	x	x	x	42,9	42,5	46,9	48,6	50,6	48,7	50,1	49,0		
	Suma sluneční energie	x	kWh.m-2													
	Maximální povrchová teplota	60,1	°C													
14.9	Maximální hodnota	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	45,3	45,4	46,4	48,8	48,2	46,5	49,7	45,7		
	Minimální hodnota	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	11,7	10,5	12,4	10,8	12,1	11,2	11,9	11,1		
	Průměrná celodenní hodnota	x	x	x	x	x	23,0	22,5	23,4	23,3	23,7	23,1	23,6	23,3		
	Průměr 10:00-16:00	x	x	x	x	x	30,5	30,9	31,9	33,1	34,1	33,5	33,3	33,3		
	Suma sluneční energie	x	kWh.m-2													
	Maximální povrchová teplota	49,7	°C													

## Příloha F FOTODOKUMENTACE



*Obr. F.1 Montáž prosklené výplně s izolačním trojsklem 18. června 2015*



*Obr. F.2 Celkový pohled na model 5. srpna 2015*





*Obr. F.3 Poškození povrchu asfaltové krytiny 14. září 2015*



*Obr. F.4 Strhnutí asfaltové hydroizolace z EPS 14. září 2015*





*Obr. F. 5 Výrazná akumulace tepla v místě umístění teplotní sondy Asfalt 1 14. září 2015*



*Obr. F. 6 Vzhled desek EPS po stržení asfaltového pásu 14. září 2015*