



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV POZEMNÍHO STAVITELSTVÍ

INSTITUTE OF BUILDING STRUCTURES

VLIV VEGETAČNÍ STŘECHY NA TEPELNOU STABILITU V OBJEKTU

THE EFFECTS OF VEGETATIVE ROOFS ONTO THE THERMAL STABILITY OF A
BUILDING OBJECT

DIZERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Michal Majsniar

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Prof. RNDr. Ing. Stanislav Šťastník,
CSc.

BRNO 2017

Abstrakt

Disertační práce se zabývá tepelně technickým posouzením skladby vegetační střechy s vlivem vlhkosti, přesněji vlivem vegetační střechy na tepelnou stabilitu objektu. Cílem této práce je prokázat příznivý účinek vegetační střechy, přesněji vegetačního souvrství, z tepelně-technického hlediska na příznivé teplotní poměry ve stavbě. Takový projev lze zachytit pouze tehdy, jestli-že se posuzuje teplotní průběh dynamicky za denního chodu reálných okrajových klimatických teplot. Použitím stacionárních nebo quasi-stacionárních okrajových klimatických teplot, které se obvykle využívají pro stanovení energetické náročnosti budov, uvedený účinek zachytit nelze. Náročný simulační výpočet, v němž se uplatní materiálové vlastnosti - součinitel tepelné vodivosti, objemová hmotnost i tepelná kapacita, však poskytuje reálný obraz o teplotních pochodech probíhajících nejen ve střešní konstrukci objektu, nýbrž ve všech plošných konstrukcích celého stavebního objektu.

V rámci zpracování disertační práce byl sestaven strojový program, který pracuje s toky energií mezi jednotlivými místnostmi v budově a mezi okolním prostředím. Dále počítá teplotní zisky z pobytu osob, vnitřním osvětlením a slunečním zářením. Hodnoty vnitřního prostředí jsou počítány z povrchových teplot, relativní vlhkosti, výměny vzduchu a samozřejmě z vnitřní teploty vzduchu pomocí hodinových klimatických dat. V sestrojeném programu byl zahrnut i výpočet solární radiace jak na rovinném, tak na nakloněném povrchu. Výstupem jsou energetické hodnoty a teplotní stav v jednotlivých místnostech, které zahrnují nejen tepelně-izolační, nýbrž také tepelně-akumulační vlastnosti objektu.

Pomocí experimentálních měření se podařilo prokázat, že výpočtové hodnoty těsně korelují reálné tepelné pochody, a tak lze prokázat, díky vypočteným výsledkům, že vegetační střecha má příznivý vliv na teplotní stav zejména v podstřešních místnostech.

Klíčová slova

Vegetační střecha, tepelná stabilita, strojový program, teplota interiéru, klimatické podmínky, objekt.

Abstract

Dissertation deals with thermal technical assessment songs vegetation roof with moisture, the more the influence of vegetation on the roof thermal stability of the structure. The aim of this work is to demonstrate the beneficial effect of vegetation roofs, specifically growing Formation of thermo-technical point of view on the favorable temperature conditions in the building. Such speech can be captured only if it is judged-temperature profile dynamically daily operation of real marginal climatic temperatures. Using a stationary or quasi-stationary boundary climatic temperatures which are usually used for the determination of the energy

performance of buildings, said effect can not be collected. Demanding simulation calculation, which apply material properties - thermal conductivity, density and thermal capacity, but gives a realistic picture of the thermal processes in progress not only in the roof structure of the building, but also across the entire circuit construction of a building.

During the preparation of the dissertation was assembled machine program that works with the energy flow between rooms in the building and the surrounding environment. Furthermore calculates temperature gain of residence of persons, internal lighting and sunlight. The values of the internal environment are calculated from surface temperature, relative humidity, air exchange and, of course, the indoor air temperature with hourly weather data. In constructing the program was included in the calculation of the solar radiation both on flat and on an inclined surface. The output of the energy value and temperature conditions in individual rooms, which include not only thermal insulation but also thermal storage properties of an object.

Using experimental measurements were able to demonstrate that the calculated values closely correlate real thermal processes, so it can be demonstrated through the calculated results of the vegetation roof has a favorable effect on the thermal state especially in the attic rooms.

Keywords

Vegetation roof, thermal stability, machine program, interior temperature, climatic conditions, object..

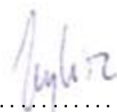
Bibliografická citace VŠKP

Ing. Michal Majšniar *Vliv vegetační střechy na tepelnou stabilitu v objektu*. Brno, 2017
110 s., Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemního
stavitelství. Vedoucí práce Prof. RNDr. Ing. Stanislav Šťastník, CSc.

Prohlášení:

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

V Brně dne 3.2.2017



.....
podpis autora
Ing. Michal Majšniar

Vliv vegetační střechy na tepelnou stabilitu v objektu

The effect of vegetative roofs onto the thermal stability of a
building object

OBSAH

1	ÚVOD	6
2	KONSTRUKČNÍ TYPY STŘECH	8
2.1	Ploché střechy.....	8
2.2	Šikmé a strmé střechy.....	11
3	ZELENÉ STŘECHY	14
3.1	Historie zelených střech.....	14
3.2	Skladba zelených střešních pláštěů.....	16
3.2.1	Způsob zajištění střešního substrátu proti sesuvu	18
3.3	Typ ozelenění s použitím zeminy	19
3.3.1	Biotopní zeleň (samovolné ozelenění).....	19
3.3.2	Extenzivní zeleň.....	20
3.3.3	Polointenzivní zeleň.....	22
3.3.4	Intenzivní zeleň.....	23
3.4	Zelené střechy bez použití zeminy	24
3.4.1	Další výhody hydrofilních minerálních vln	24
3.4.2	Základní skladba střešní zahrady systému s hydrofilní minerální vlnou.....	26
3.5	Rostliny zelených střech	27
3.5.1	Kritéria výběru vhodných druhů	27
3.5.2	Rostliny vhodné na zelené střechy	28
3.5.3	Rozdělení dle výšky substrátu	30
3.5.4	Rostliny vhodné pro střechy o malých plochách	31
3.6	Zatížení střešní konstrukce vegetační vrstvou.....	32
4	DOMY S MALOU SPOTŘEBOU ENERGIE	35
4.1	Nízkoenergetický dům	35
4.1.1	Volba pozemku (umístění stavby)	36
4.1.2	Tvarové řešení budovy.....	38
4.1.3	Tepelné mosty a vazby budovy.....	38

4.1.4	Vnitřní dispozice s ohledem na tepelné zóny a orientaci místností ke světovým stranám.....	39
4.1.5	Akumulace tepla	40
4.1.6	Výplně otvorů	41
4.1.7	Požadavky na vzduchotěsnost.....	43
4.2	Pasivní dům	44
4.3	Nulový dům	47
5	SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY	49
5.1	Vymezení pojmu „tepelná pohoda“.....	50
5.2	Tepelná stabilita v zimním období.....	51
5.3	Tepelná stabilita v letním období	54
6	CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE.....	56
7	ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ	57
7.1	Oslunění	57
7.1.1	Sluneční záření na zemském povrchu	58
7.1.2	Interpolace polohy slunce	59
7.1.3	Geometrie dopadu slunečního záření.....	60
7.2	Šíření tepla rovinnou stěnou (s vnitřním tepelným zdrojem)	62
7.3	Numerické řešení pdr vedení tepla.....	62
7.4	Charakteristika strojového programu	65
7.4.1	Popis modelu objektu.....	65
7.4.2	Tepelná rovnováha zóny	66
7.4.3	Vlhkostní rovnováha zóny	67
7.4.4	Přenos tepla v konstrukci.....	67
7.4.5	Formální popis vazebného tepelného toku v budově.....	68
8	POČÁTEČNÍ VÝPOČTY SIMULAČNÍM PROGRAMEM	71
8.1	Nestacionární výpočet průběhu teplot ve střešní konstrukci	71
8.1.1	Průběh teplot v klasické ploché střeše	72
8.1.2	Průběh teplot v klasické ploché střeše se 100mm zeminy	73

8.1.3	Průběh teplot v klasické ploché střeše se 300mm zeminy	74
8.2	Nestacionární výpočet tepelné stability objektu	75
8.2.1	Objekt s plochou střechou bez zeminy	75
8.2.2	Objekt s vegetační střechou o mocnosti 100mm zeminy	78
8.2.3	Objekt s vegetační střechou o mocnosti 300mm zeminy	78
9	DOPLNĚNÍ SIMULAČNÍHO MODELU O VNITŘNÍ TEPELNÉ ZDROJE	80
9.1	Tepelné zisky od osob	80
9.2	Tepelné zisky od svítidel	80
10	EXPERIMENTÁLNÍ DŮM	82
10.1	Parametry experimentálního domu	82
10.2	Výpočet v sestaveném strojovém programu	88
10.3	Způsob měření V experimentálním domě	90
11	EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ.....	92
11.1	Výsledky měření	93
11.2	Analýza shody vypočtených a naměřených hodnot	94
11.3	Výpočet průběhu teplot ve střešní konstrukci s různou mocností zeminy	94
11.3.1	Střešní konstrukce s mocností zeminy 100MM.....	95
11.3.2	Střešní konstrukce s mocností zeminy 200MM.....	96
11.3.3	Střešní konstrukce s mocností zeminy 300MM.....	97
11.3.4	Střešní konstrukce bez zeminy	98
11.3.5	Střešní konstrukce se 100mm šterku místo zeminy	99
11.3.6	Střešní konstrukce se 200mm šterku místo zeminy	100
11.3.7	Střešní konstrukce se 300mm šterku místo zeminy	101
11.4	Shrnutí kapitoly 11 – experimentální měření	102
12	ZÁVĚR PRÁCE	103
	Abstract.....	105
	Poděkování:	106

13	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	107
14	SEZNAM NEJDŮLEŽITĚJŠÍCH UŽITÝCH SYMBOLŮ	108
15	SEZNAM PUBLIKACÍ AUTORA	110

1 ÚVOD

Už odjakživa potřeboval člověk střechu nad hlavou, kam by se uchýlil v době nepříznivého počasí. Ovšem oproti ostatním tvorům, kteří byli lépe tělesně uzpůsobeni pro život v drsné přírodě, měl jednu velkou výhodu, mohl dobře využívat svůj mozek. Dá se říci, že netrvalo dlouho a člověk se z jeskyní přesídlil do objektu, který byl tvořen podlahou, obvodovými stěnami a střechou. V dnešní době člověk obývá budovy od rodinných domů, dvojdomků, až po vysoké bytové domy.

Jako rodinný dům si představujeme menší samostatnou budovu o jednom nebo několika podlažích (nejvýše dvě nadzemní a jedno podzemní podlaží a podkroví - dle ČSN 73 4301) určená k bydlení, v níž je více než polovina podlahové plochy místností a prostorů určena k bydlení. Obvykle ji obývá jedna rodina nebo skupina osob, která tvoří společně jednu domácnost. Rodinný dům nejčastěji obsahuje jeden nebo několik málo bytů (podle ČSN 73 4301 nejvýše 3 byty) a má jediného vlastníka.



Obr. 1 Rodinný dům v Polici nad Metují.

Pod pojmem bytový dům si zaprvé představujeme stavbu pro bydlení, ve které převažuje funkce bydlení; přitom do posuzovaných ploch se nepočítá plocha společných prostor, jako jsou např. chodby, schodiště, půda, prostory domovního vybavení např. kočárkárna, prádelna, sušárna, úklidová komora, (vyhláška č. 26/1999 Sb. hl. m. Prahy, o obecných technických požadavcích na výstavbu v hlavním městě Praze, ve znění pozdějších předpisů). A zadruhé je to stavba pro bydlení, v níž více než polovina podlahové plochy odpovídá požadavkům na trvalé bydlení a je k tomuto účelu určena (vyhláška č. 501/2006 Sb., o obecných požadavcích na využívání území, ve znění vyhlášky č. 269/2009 Sb.)



Obr. 2 Obytný (panelový) dům v Polici nad Metují

Abychom byli chráněni od povětrnostních vlivů, musí být nedílnou součástí stavby střešní konstrukce. Osobně mě tato konstrukce zaujala svou rozmanitostí, co se týče tvaru. Dle mého názoru je právě střecha tím, co dodává patřičný vzhled budově. Další důvod, proč je pro mě tato konstrukce významnou, je ten, že se na ní dá vysadit zeleň a díky tomu můžeme mít kousek přírody i nad hlavou.

V disertační práci se věnuji zeleným střechám a jejich vlivu na tepelnou stabilitu v objektu. Toto téma jsem si zvolil nejen proto, že mám rád přírodu a zajímají mne konstrukční systémy vegetačních střech, ale také proto, že v dnešní době chce každý ušetřit na spotřebě energie. Zajímá mne tedy projevy vegetační střechy, zda v zimním období dokáže snížit tepelné ztráty, tím ušetřit náklady na vytápění, a naopak v létě ochladit střešní konstrukce, a tím udržovat tepelnou pohodu, která je blíže rozvedena v kapitole 5.1.

Ohledně úspor energie v budovách se věnuji problematice domů se spotřebou energie blízkou nule, která je v poslední době často diskutována, podrobněji v kapitole 4.

2 KONSTRUKČNÍ TYPY STŘECH

Základním kritériem dělení střech je jejich sklon, viz tabulka 1.

Tab. 1. Typy střech dle sklonu

Typ střechy	Sklon[°]	Sklon [%]
Plochá	do 5	do 8,75
Šikmá s mírným sklonem	5 - 20	8,75 - 36,40
Šikmá s velkým sklonem	20 - 45	36,40 - 100
Strmá	45 - 90	nad 100

Dělení dle sklonu se v různých podkladech liší. Výše uvedené dělení vychází z ČSN 73 1901 – Navrhování střech. Šikmé střechy jsou v tabulce rozděleny ještě na další dva typy.

Sklon střechy ovlivní návrh zeleně na vegetační střeše, a jaké stabilizační zařízení bude použito. Ozelenit můžeme jakýkoliv typ plochých střech, a to i s obráceným pořadím vrstev. Šikmé střechy lze v dnešní době ozelenit pouze do sklonu cca 60°.

Za optimální sklon pro zelené střechy považujeme sklon 2-5%. Menší sklon tvoří problém s odvodněním. Jak lze logicky dovodit, tak při sklonech do 5 % klesá potřeba akumulace vody (tedy tloušťka hydroakumulační vrstvy), naopak se zvětšuje tloušťka drenážní vrstvy. Při sklonech nad 5 % je situace opačná, klesá požadavek na odvodnění a roste potřeba hydroakumulační vrstvy. Při sklonech nad 30 % je třeba řešit ozelenění zcela individuálně. Musíme zde řešit nejen zavlažování, ale i stabilizaci zeminy.

2.1 PLOCHÉ STŘECHY

Ploché střechy dělíme dle různých kritérií:

Dělení plochých střech dle počtu pláštů

Jednoplášťové ploché střechy

Jedná se o nejrozšířenější typ plochých střech. Jednoplášťová plochá střecha neobsahuje ve své skladbě větranou vzduchovou mezeru, tudíž tvoří jeden nosný plášť oddělující vnitřní prostředí od vnějšího. Proto musí být konstrukčně a zejména materiálově navržena tak, aby byla funkční nejen z hlediska hydroizolačního, ale zejména z hlediska tepelně-technického (zjednodušeně řečeno, aby nezavlhala vlivem kondenzace a nesnižovala se tak účinnost tepelné izolace nebo se neprojevovaly defekty jako například plísně a tepelné mosty ze strany interiéru). Jednoplášťová plochá střecha tedy musí obsahovat velmi účinnou

parozábranu, která zabrání pronikání vodních par do tepelné izolace. Dříve se tyto střechy navrhovaly se systémem větracích kanálků, který byl však často nefunkční.

Dvouplášťové ploché střechy

Dvouplášťové ploché střechy jsou tvořeny dvěma nosnými pláštěmi, mezi nimiž je provětrávaná vzduchová vrstva. Navrhuje se tak, aby byl horní plášť plnil funkci hydroizolační a spodní tepelně izolační. Pohyb vzduchu ve vzduchové mezeře zajišťuje únik vlhkosti, která se do konstrukce dostala difuzí z interiéru, nebo byla do konstrukce již zabudována. Díky tomuto odvodu vlhkosti nemusí být kladen takový důraz na použití špičkových parozábran, ale mohou být užity parozábrany s nižší účinností. Používají se zejména u budov s vnitřním prostředím s vysokou relativní vlhkostí vzduchu (nad 80 %), tj. např. plaveckými bazény apod. Jejich ozeleňování za účelem zlepšení tepelně izolačních vlastností střechy nemá vzhledem k odvětrávané vzduchové vrstvě větší význam.

Víceplášťové ploché střechy

Jsou tvořeny více než dvěma nosnými pláštěmi, oddělenými od sebe vzduchovými vrstvami. Stejně jako u dvouplášťových střech nemá jejich ozeleňování za účelem zlepšení tepelně izolačních vlastností střechy větší význam.

Dělení plochých střech podle umístění vrstev střešního pláště

a) Ploché střechy bez tepelné izolace

- střechy bez tepelně technických požadavků,
- jsou to střechy navrhované například nad samostatně stojícími garážemi, kůlnami aj.

b) Střechy s klasickým pořadím vrstev

- hydroizolační vrstva je na vrchním líci střešního pláště,
- jsou vhodné pro ozeleňování.

c) Obrácené (s opačným pořadím vrstev, tzv. intenzivní)

- hydroizolační vrstva je umístěna pod tepelnou izolací,
- jako tepelně izolačního materiálu se užívá výhradně extrudovaného polystyrenu (má dobré tepelně izolační vlastnosti, jako nasákavost je do 0,5%),
- oproti střechám s klasickým pořadím vrstev jsou nákladnější kvůli použití dražšího extrudovaného polystyrenu,
- prodlužují životnost střešního pláště, tepelná izolace nad hydroizolací zajišťuje její menší namáhání (ochranu před teplotními výkyvy), zmenšuje rizika jejího mechanického

poškození (z hlediska ozelenování střech je možno dosáhnout stejného efektu i u klasického pořadí vrstev, kdy je hydroizolace chráněna vegetačním souvrstvím),

- výrazně omezují vznik kondenzace ve střešním pláště,
- umožňují urychlení výstavby (tepelně izolační materiál se pokládá bez ohledu na počasí, odpadá tak potřeba provizorní hydroizolace během realizace stavby),
- u inverzních střech (včetně střech bez plánovaného ozelenění) je třeba vždy počítat s náletovou zelení. Buď tomu přizpůsobíme hydroizolaci tím, že bude odolná vůči kořenům rostlin, nebo musíme střechu pravidelně kontrolovat a náletovou zeleň z ní odstraňovat – mechanicky, či chemicky

d) DUO střechy

Na stávající hydroizolaci na střeše s klasickým pořadím vrstev se přidá (po výměně či opravě hydroizolace) další vrstva tepelné izolace (extrudovaný polystyren). Tepelná izolace z původního střešního souvrství pak slouží jako doplňková tepelná izolace. Tento typ střechy se využívá zejména u rekonstrukcí. I ozeleněné střechy spadají mezi střechy duo, protože substrát a vegetace nad hlavní hydroizolací rovněž fungují jako přídavná tepelná izolace.

e) PLUS střechy

Na stávající hydroizolaci na střeše s klasickým pořadím vrstev se přidá (po výměně či opravě hydroizolace) další vrstva tepelné izolace a na ní nová hydroizolační vrstva. Původní hydroizolace pak obvykle slouží jako parozábrana. Používá se rovněž zejména u rekonstrukcí.

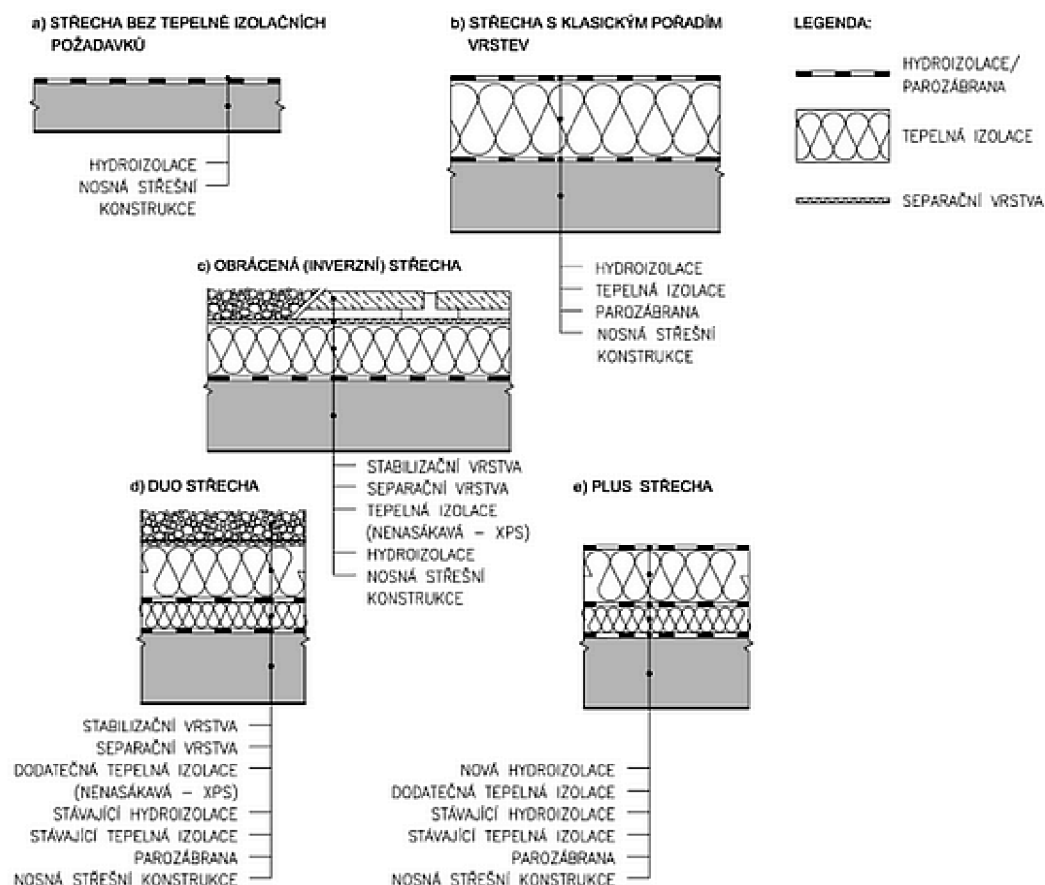
Dělení plochých střech podle funkce

a) Nepochozí

- umožňují přístup pouze pro kontrolu stavu střešního pláště a zařízení na střeše a pro nezbytnou údržbu.

b) Pochozí (provozní)

- určené pro účely dopravy, rekreace, sportu, speciálního technického vybavení objektů, některé ozeleněné střechy (obvykle intenzivní) atd.



Obr. 3 Dělení plochých střech dle pořadí vrstev střešního pláště podle [3]

Dělení plochých střech podle plošné hmotnosti

(plošnou hmotností se rozumí hmotnost 1 m^2 konstrukce střešního pláště)

a) Lehké

- plošná hmotnost je menší než 100 kg/m^2 , mají malou tepelnou setrvačnost.

b) Těžké

- plošná hmotnost je rovna nebo vyšší než 100 kg/m^2 , obvykle mají dostatečnou tepelnou setrvačnost.

2.2 ŠIKMÉ A STRMÉ STŘECHY

Jak je známo, tak v historii se budovaly šikmé střechy (nejčastěji sedlové) tam, kde panovali horší klimatické podmínky.

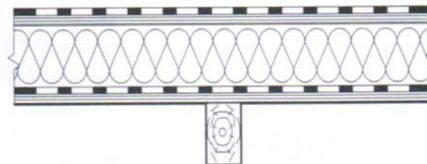
Dříve se podkroví v šikmých střechách užívalo jako půdy, skladiště, prostor pro sušení pádla, dokonce i pro uzení masa (komín byl vyveden do půdního prostoru a ve štítech pak byly instalovány odváděcí otvory, bohužel hrozil vznik požáru) aj. Střecha tedy „dýchala“, byla přístupná a snadněji opravitelná. V dnešní době tyto prostory slouží často pro bydlení, je

tedy nutné řešit jejich kvalitní návrh, nejen dostatečnou tepelnou izolaci, ale i použití vhodné difúzní fólie a parozábrany.

Dělení šikmých střech podle počtu jejich pláštů

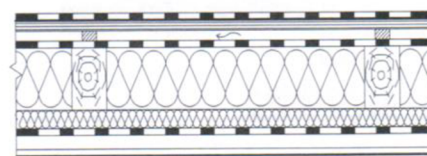
a) Jednoplášťové

- tvořeny jedním střešním pláštěm,
- tato střecha neobsahuje žádné vzduchové vrstvy,
- v historii nejvíce používaná.



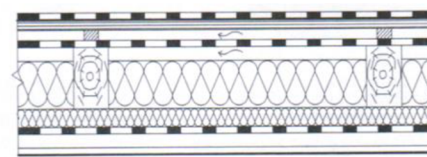
b) Dvouplášťové

- tvořeny dvěma střešními plášti, mezi nimiž je vzduchová vrstva,
- ve spodním plášti je navržena tepelná izolace,
- důležité je použít kontaktní difúzně otevřenou pojistnou hydroizolaci



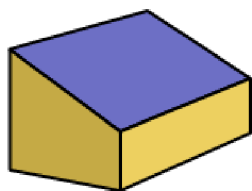
c) Víceplášťové

- tvořeny více než dvěma plášti oddělenými od sebe vzduchovými vrstvami

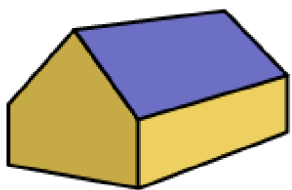


Tvar šikmých střech

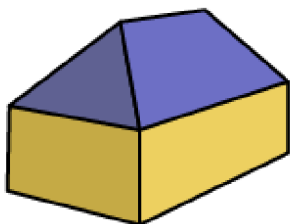
Existuje velké množství různých tvarů šikmých střech. K nejpoužívanějším patří pultová, sedlová, valbová, mansardová, stanová a pilová nebo také šedová. Všechny zmíněné typy lze obvykle ozelenit, jen pilovou střechu jsem nikdy ozeleněnou neviděl, ale to neznamená, že by to nešlo. V případě ozeleňování sedlové střechy necháme její hřeben buď ostrý, a tedy bez ozelenění, nebo jej zaoblíme tak, aby jej bylo možno snáze ozelenit. V případě hrozící silné větrné eroze je lépe zeleň na hřbetu vynechat.



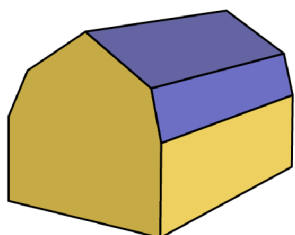
- **Pultová** střecha má jen jednu střešní rovinu s hřebenem a okapem. Dá se říci, že tato střecha má tři štíty (dva boční a jeden hřebenový). Používá se především na stavby na hranici pozemku, na přístavky, na části činžovních domů přiléhající podélně k sousedním domům a v ekologické architektuře na tzv. aktivní solární domy. V dnešní době se často navrhuje i na rodinné domy.



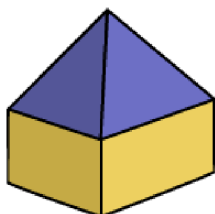
- **Sedlová** střecha je historicky nejběžnější typ střechy používaný v ČR, velmi rozšířená v řadové zástavbě rodinných i bytových domů. Má dvě střešní roviny s přímočarým hřebenem, dvěma okapy a dvěma štíty. Variantami této střechy je střecha křížová a polokřížová, používané na stavbách se složitým půdorysem.



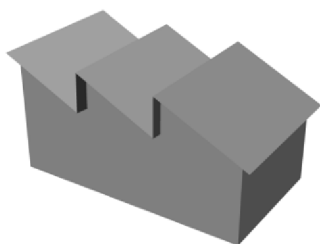
- **Valbová** střecha se od sedlové liší tím, že má na obou koncích místo štítů šikmé střešní roviny čili valby. Pokud jsou okapy těchto rovin ve stejné výšce jako okapy sedlové střechy, je to střecha valbová, pokud jsou výš, nazývá se taková střecha polovalbová. Obojí se používá u volně stojících budov obdélného půdorysu.



- **Mansardová** střecha je variantou střechy sedlové. Každá její polovina mezi hřebenem a okapem se skládá ze dvou střešních rovin odlišného sklonu. V současné době je rozšířena i tzv. falešná mansardová střecha. Jedná se o střechu sedlovou, kterou doplňuje mansardový obklad na svislé stěně horního podlaží.



- **Stanová** střecha (někdy též jehlanová) má zpravidla čtyři střešní roviny, které se sbíhají do středového vrcholu a tvoří tak čtyř- nebo i víceboký jehlan. Používá se na samostatně stojících budovách přibližně čtvercového půdorysu.



- **Pilová** nebo také šedová střecha vzniká opakováním střešních pultových nebo asymetrických sedlových; používala se historicky na rozlehlých továrních halách, dílnách apod.; svislé části střechy zároveň často sloužily jako světlíky. V současnosti se dává přednost střechám z předpjatých či lepených konstrukcí.

Bez potíží lze ozelenit střechy se sklonem do 30° . Všechny střechy s větším sklonem jsou prakticky vhodné jen pro extenzivní zeleň a vyžadují použití systémů proti sesuvu vegetačního souvrství. Se zvětšujícím se sklonem střechy tedy narůstají pořizovací náklady na ozelenění. [3]

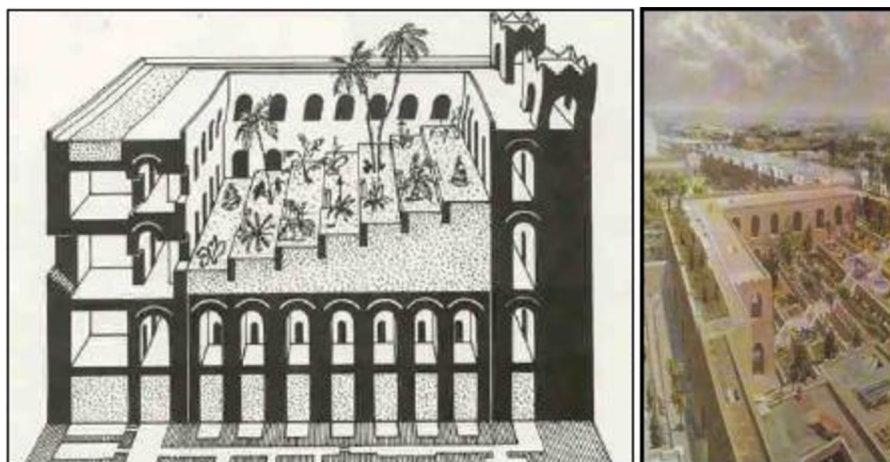
3 ZELENÉ STŘECHY

Zelená vegetační střecha je střecha částečně nebo zcela pokrytá vegetací a půdou, nebo pěstebním substrátem vysazovaným nad hydroizolační membránu[3]. Tento typ střechy může obsahovat další vrstvy, jako například kořenovou bariéru, odvodnění a zavlažování. Ještě před několika lety se na zelené střechy pohlíželo s určitými pochybnostmi, i když jejich užívání je známé už po staletí. Tyto pochybnosti u některých lidí přežili doposud. V posledních letech ovšem došlo k obratu a tyto střechy dnes nacházejí řadu aplikací. Jedná se jak o nejjednodušší formy zeleně, tak i o náročné zahrady, které lze uspořádat na střechách domů i ve velkoměstech. Investoři, kteří si přejí ve velkoměstech takovéto zahrady na střeše navrhout, většinou nevládní venkovské obydlí a chybí jim relaxační možnost v přírodě. Zelené střechy, včetně dalších výhod, tuto možnost nahrazují. Jedná se ovšem o ploché zelené střechy, v dnešní době s vyspělými technologiemi lze navrhovat i šikmé zelené střechy, avšak jen do určitého sklonu.

Ozeleněné střechy se navrhují jak na plochých tak na šikmých střechách, ovšem do určitého sklonu. Z větší části se jedná o ploché střechy, zde je lze totiž navrhovat i jako pochozí a tudíž mohou sloužit jako střešní zahrady.

3.1 HISTORIE ZELENÝCH STŘECH

Jedním z nejstarších příkladů střech osázených vegetací byl jeden ze sedmi divů světa - Semiramidiny visuté zahrady. Byly založeny již v 8. st. před n. l. na klenbách paláců v Babylonu. Již tehdy stavitelé zakládali zavodňovací systémy trvale zabezpečující vegetaci vláhou.



Obr. 4 Semiramidiny visuté zahrady podle [2].

Pád Mezopotámie naštěstí neznamenal konec výstavby zelených střech. Ozelenění střech se postupně přeneslo do Evropy, především do řecké a římské říše. V Římě se střešní zahrada stala nezbytnou součástí patricijských domů (domy plnoprávných občanů Říma). Už tenkrát byly stavitelé velice vyspělí a dokázali na těchto střeších navrhovat jak ovocné stromy, tak i nádrže na vodu a někdy i téměř dokonalá jezírka s rybami. Ve starověku si Římané a ve středověku i staří Čechové vysazovali na střechy svých obydlí rostlinu z rodu *Sempervivum*. Jedná se o rostlinu známou pod názvem netřesk. Tato rostlina jim měla přinést ochranu před povětrím a blesky. Dnes už je známo, že je tato rostlina, díky svým minimálním nárokům na závlahu a údržbu, je vděčnou okrasou střech s minimální výškou substrátu.



Obr. 5 *Sempervivum tectorum* – netřesk střešní.

Zhruba v polovině 11. století začalo přibývat střešních a terasových zahrad v Itálii, ve Francii a dalších zemích Evropy. Období minulého století byly důležité pro rozvoj stavebnictví, ale i pro rozvoj střešních zahrad. Od druhé poloviny 19. století se i u nás začínají budovat střešní zahrady současného stylu. Realizace se prováděla většinou na objektech s plochou střechou majetnějších vrstev.

Na začátku 20. století se střešní zahrady začali stávat nedílnou součástí urbanistické koncepce moderních měst. Mezi průkopníky patřil švýcarský architekt, urbanista, teoretik a malíř Le Corbusier, vlastním jménem Charles-Édouard Jeanneret [3]. Svým radikálním dílem i výtvarným citem výrazně ovlivnil vývoj moderní architektury. Tento architekt byl zcela mimořádný a měl silný vliv jak na architekturu, tak i na architekty po celém světě. Mnohé jeho nápady a principy jsou používány dodnes. Architektura Le Corbusiera je osobitá a nelze ji přímo přiřadit žádnému ze slohových období.

Některá díla střešních a terasových zahrad z 20. století se i u nás dochovaly dodnes, např. střešní zahrada u jižního průčelí zámku Konopiště nebo konírna zámku v Lipníku nad

Bečvou. Ta byla založena roku 1911 a má rozlohu přibližně 600 m²[8]. Postupem času ztratila svůj původní účel okrasné zahrady a začala sloužit k pěstování ovoce a zeleniny. Dnes, po rekonstrukci v roce 2006, slouží střecha konírny opět jako okrasná střešní zahrada.



Obr. 6 Unikátní střešní zahrada na střeše bývalé konírny zámku v Lipníku nad Bečvou podle [9]

V současné době je snaha o zlepšení životního prostředí pomocí vegetačních střech zejména ve větších městech. Široká nabídka materiálů a výrobků na trhu nám umožňuje vegetační střechy navrhovat a realizovat v širokém měřítku. Nejčastěji jsou navrhovány v administrativních, obchodních a zábavních centrech, ale také stavby pro rodinné bydlení ve městech a na venkově. Budování vegetačních střech je i nástrojem rozšiřování zelených ploch v hustě zastavěných územích při tvorbě územního plánu.

3.2 SKLADBA ZELENÝCH STŘEŠNÍCH PLÁŠŤŮ

Po představení typů zelených střech a seznámení s různými variantami střešních rovin je na čase si říci něco ke skladbě pláště zelené střechy.

Střecha (střešní plášť) je složena z mnoha vrstev. Správný návrh tohoto souvrství je založen na řadě faktorů (na očekávané funkci střechy, charakteru ostatních vrstev, sklonu střechy, předpokládaném provozu, technologii realizace, klimatických podmínkách atd.).

V souvrství zelené střechy lze uvést:

- vegetační souvrství,
- souvrství střešního (nosného) pláště.

Skladba vrstev – směrem z exteriéru k interiéru

Souvrství vegetační/pěstební:

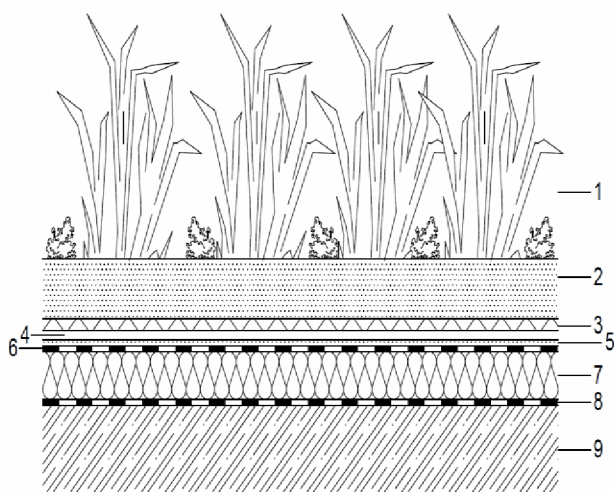
- vegetační vrstva = vhodně zvolené rostliny,
- mulčovací vrstva – například mulčovací kůra, štěpka, kamenná drť aj.,
- substrát,

- hydroakumulační vrstva (vrstva zadržující vodu) – například rašelina, hydrofilní desky, role z minerálních vláken, nehydrofobizovaná křemičitá vata,
- filtrační/separační vrstva – například skelné rohože, sklotextilie, geotextilie, kamenivo či kamenná drť aj.,
- drenážní vrstva – například nopové fólie, kamenná drť, strukturované rohože z plastu nebo pryže aj.

Souvrství střešního pláště klasické jednoplášťové střechy:

- ochranná vrstva hydroizolace,
- hydroizolační vrstva (souvrství) odolná vůči prorůstání kořenů rostlin (atest FLL),
- tepelná izolace,
- parozábrana,
- spádová vrstva,
- nosná konstrukce.

Výše uvedené pořadí vrstev má pouze orientační charakter. Některé vrstvy mohou plnit i více funkci, některé mohou být úplně vynechány a pořadí může být také různé. Stále přežívá názor, že na hydroizolaci musí být položen pás odolný vůči prorůstání kořenů rostlin. Ten se však používá zcela výjimečně (obvykle se jedná o speciální PE fólii), a to při rekonstrukcích, kde se pokládá na původní vodotěsnou izolaci z asfaltových pásů. Jako HI ozeleněných střech se dnes zpravidla používají modifikované asfaltové pásy s aditivou proti prorůstání kořenů rostlin nebo hydroizolační fólie, přičemž oba typy jsou již testované proti prorůstání kořenů rostlin.



Obr. 7 Obecná skladba střešního pláště zelené střechy

1. VEGETACE, 2. SUBSTRÁT, 3. FILTRAČNÍ VRSTVA (geotextilie, kamenivo,...), 4. DRENÁŽNÍ A HYDROAKUMULAČNÍ VRSTVA (nopová fólie), 5. OCHRANNÁ VRSTVA HYDROIZOLACE (textilie), 6.

3.2.1 ZPŮSOB ZAJIŠTĚNÍ STŘEŠNÍHO SUBSTRÁTU PROTI SESUVU

Stabilizační (protiskluzová) vrstva zajišťuje substrát proti sesuvu ze střechy. Potřeba této vrstvy závisí na sklonu a délce střechy, soudržnosti a mocnosti substrátu a na míře prokořenění substrátu rostlinami. Největší riziko sesuvu je před výsadbou a krádce po výsadbě, kdy kořenový systém není dostatečně rozvinut. Po určité době je substrát rostlinami dostatečně prokořeněn a je tedy stabilizovaný. Z tohoto důvodu se některá stabilizační opatření substrátu na střeších s menšími sklony instalována jako dočasné (například dřevěné latě instalované ne pod, ale na hydroizolaci).

Při sklonech nad 15° je nutné zvážit stabilizaci substrátu, při sklonech nad 20° substrát každopádně zajistit proti sesuvu. Lze se setkat s názorem, že stabilizační opatření by měla být realizována již při sklonech nad 5° (což nelze brát doslovně, neboť je nutné zohlednit specifické podmínky konkrétního staveniště). [3]

V souvislosti s možným sesuvem musí být nad okapem všech střech se sklonem nad 5° umístěn opěrný nosník, nad 8° (10°) i hranoly proti sesuvu. Při sklonech do 5° není opěrný nosník nad okapem nutný, postačuje tzv. substrátová kapsa (= přehrnutá geotextilie nejlépe nepodléhající rozkladu/vyplněná substrátem, keramzitem či jiným materiálem). [3]

Dle umístění stabilizačního prvku se stabilizační vrstva dělí na:

- vrchní (prvek je umístěn na povrchu substrátu)
- střední (prvek je umístěn do substrátu)
- spodní (prvek je umístěn pod vrstvou substrátu)

Při použití vrchní stabilizace chráníme substrát pouze proti splavování. Tato stabilizace bývá často jen dočasná, než je substrát stabilizován kořeny rostlin. Používají se mřížkové geotextilie a sítě z jutových vláken, a to až do sklonu 40° a více.

Nejlepším řešením je umístění prahů pod hydroizolaci a pevně je spojit s konstrukcí pod nimi. Prahy tím přenášejí zatížení na celou střešní plochu. Prahy lze umístit i nad hydroizolaci, a to nad okapní nosník. Zde ale projektant nesmí zapomenout na návrh ochranné tkaniny mezi prahy a izolaci a vhodně dimenzovat zatížení okapní konstrukce.

Ozelenění střech se sklonem nad 40° se provádí pomocí speciálního řešení. Jestliže použijeme rohože proti sesuvu je nutné tyto rohože spojit na hřebenu a následně upevnit horizontálními lany. Rohože bývají vyztuženy a to i dvojnásobně. Vhodný materiál pro lana je nerez či ocel, případně i dráty potažené slitinou zinku a hliníku.

Další možnost zajištění substrátu proti sesuvu je použití skládaného roštu z profilů z recyklovatelné umělé hmoty. Rošty (PE) jsou umísťovány do substrátu. Používají se při sklonech 25° - 40 (45°). Jelikož se rošty opírají o okapovou fošnu, musí být tento prvek dostatečně ukotven.

U střech se sklonem 15 – 25° je pro udržení substrátu o malé mocnosti postačující rohož pevná v tahu (tzv. trojrozměrné rohože), či nopové fólie.

Ochrana proti sesuvu při tloušťce substrátu do 200 mm mohou být tvrzené profilované pěnové plasty, rošty (plastové či ze střešních latí). Dalším řešením je použití tvrzených profilovaných pěnových plastů. Tyto plasty jsou původně určeny pro vytvoření drenážní vrstvy, díky své profilaci však mohou sloužit i pro stabilizaci substrátu. [3]

Při zajišťování substrátu o mocnosti nad 200 mm je nutné použít speciální konstrukční zařízení a to vyžaduje vypracování speciálního projektu.

Systémy zajištění proti sesuvu:

- hranoly pod vrstvou substrátu,
- hrubé rohože pod vrstvou substrátu,
- rošty ze střešních latí, příčná žebra,
- tvrzené pěnové plasty,
- plastové rošty,
- hvězdicové rohože,
- mřížkové geotextilie a sítě,
- prahy pod hydroizolací.

3.3 TYP OZELENĚNÍ S POUŽITÍM ZEMINY

Zelené střechy se zpravidla dělí na dva druhy, na extenzivní a intenzivní. Takto to uvádí i norma ČSN 73 1901. Ovšem toto dělení lze rozšířit ještě o další dva druhy. A to o biotopní a polointenzivní.

3.3.1 BIOTOPNÍ ZELENĚ (SAMOVOLNÉ OZELENĚNÍ)

Už z názvu vyplývá, že se zde nepočítá se zakládáním zeleně. Tento typ střech se nechává volný pro přirozený nálet semínek a tak volný růst rostlin. Biotopní zeleň je tak jednou z nejekologičtějších variant vysazení vegetace. Rostliny zde mají svoje přirozené prostředí. Jedná se o přirozenou symbiózu rostlinných společenstev schopných samostatného přežití a případné samoobnovy. Biotopní rostlinný pokryv se skládá ze sukulentů, mechů a některých

druhů trav a bylin, kterým vyhovují konkrétní stanovištní podmínky a jsou schopny přežít jak extrémní sucha, tak občasná přemokření. [10]

- Tloušťka substrátu: (2)6 - 12 cm (poznámka: 2 cm je extrém, běžně se neprovádí, ale lze),
- plošná hmotnost v plně nasyceném stavu: 60 - 200 kg/m²,
- údržba: 1 - 2 krát ročně kontrola a odstranění náletů,
- pochozí: zpravidla ne,
- automatická závlaha: není,
- střechy: zejména ploché, lze i šikmé,
- filtrační vrstva: většinou geotextilie o plošné hmotnosti 100 - 150 g/m².



Obr. 8 Příklad biotopní zeleně podle [3]

Pro vznik biotopní zeleně je tedy postačující „substrát“ v podobě štěrku. Pro urychlení jeho osidlování náletovými rostlinami se do štěrku vmíchává zemina, písek, kůra, větvičky slámy, řezanka a jiné materiály. Ozelenění lze někdy urychlit vysazením několika jedinců nenáročných rostlin (sukulentů, mechů, travin aj.) [3]

Druhové složení biotopní zeleně se spolu s měnícími se podmínkami stanoviště (bez zásahu člověka) mění.

3.3.2 EXTENZIVNÍ ZELENĚ

Jak udává spousta literatury, extenzivní zeleň plní funkci zejména ekologickou estetickou a psychologickou. Na rozdíl od biotopního pokryvu je zeleň vysazována a vyžaduje určitou péči, byť zcela minimální. Jedná se především o dosev a dosadbu mezer, které vznikají, doplňování živin malými dávkami hnojiv, závlaze v době extrémního sucha, doplňování substrátu v určitých cyklech a občasném kosení.

- Tloušťka substrátu: (2) 6 - 20 cm (poznámka: 2 cm je extrém, běžně se neprovádí, ale lze),
- plošná hmotnost v plně nasyceném stavu: 60 - 300 kg/m²,

- údržba: jednou za 1 - 2 měsíce, 1 - 2 krát ročně kontrola a odstranění náletů,
- pochozí: zpravidla ne,
- automatická závlaha: většinou není,
- střechy: ploché i šikmé,
- filtrační vrstva: většinou geotextilie 100 - 200 g/m².



Obr. 9 Příklad extenzivní střechy podle [6]

Extenzivní zeleň lze dle mocnosti substrátu dělit na:

- a) Zeleň na tenké vrstvě (2 - 6 cm) = tzv. nenáročná extenzivní zeleň,
- b) zeleň na středně silné vrstvě (6 - 15 cm) = tzv. středně náročná extenzivní zeleň,
- c) zeleň na silné vrstvě (15 - 20 cm) = tzv. náročná extenzivní zeleň.

Na tento typ střechy se volí rostliny, které jsou dlouhodobě schopny snášet extrémní podmínky, jako jsou dlouhodobé sucho, ale i krátkodobé přemokření. Vhodné jsou rostliny odolné větru, dobře regenerující, schopné plošného rozrůstání a rozmnožující se vegetativní i generativní cestou a rostliny vyžadující jen minimální péči.

Tyto rostliny se většinou sázejí na jaře, aby měli dostatek času na aklimatizaci a zakořenění a měli šanci na přežití následné zimy. Za nejvhodnější lze považovat rostliny tučnolisté, suchomilné a skalničky, tedy rostliny nenáročné na vláhu. Lze se setkat i s polokeři a velmi nízkými a nenáročnými keři. Ze dřevin lze doporučit nízké kručinky a kaliny, vrbu zakrslou, poléhavé jalovce aj. V Německu mají vytipováno zhruba 200 vhodných druhů, z nichž 120 je pěstováno ve školkách a zbylé rostou jen volně v přírodě [3]

Sklon střechy by měl být alespoň 2%. Extenzivní zeleň na střeších s velmi malým sklonem (pod 2%) je totiž vystavena dlouhodobě velké vlhkosti, takže původní suchomilné

rostliny jsou postupně v těchto místech vytěšňovány mechem. Při sklonu nad 5° (8,8%) se obvykle musí provést další stabilizující opatření [13]

Při minimalistickém řešení extenzivního ozelenění může ve skladbě zcela chybět hydroakumulační či drenážní vrstva. Důvodem je malý sklon střechy (absence hydroakumulační vrstvy) nebo naopak velký sklon střechy (absence drenážní vrstvy) a tím i zpomalený či zrychlený odtok vody.

Extenzivní střecha je velice často označována jako bezúdržbová. To ovšem není zcela pravda. Zeleň, která nepotřebuje žádnou údržbu, totiž neexistuje. Čím se tyto rostliny liší, tak je frekvence údržby. Extenzivní střecha se v této frekvenci velice blíží obyčejné ploché střeše. Údržba se tedy provádí 1 - 2 ročně. Při kontrole musí být odstraněn nepatřičný nálet, který se na střeše usadil a mohl by poškodit střechu svým rozrůstajícím kořenovým systémem. Dále je třeba odstranit uhynulé rostliny a provést klasickou kontrolu střechy, do které patří vyčištění střešních vtoků, okapových žlabů apod.

Při zakládání zeleně musí bezprostředně po osázení plochy následovat závlaha. Tu je třeba opakovat 1 - 2 krát týdně po dobu několika následujících měsíců až do doby, než rostliny řádně zakoření. [3]

3.3.3 POLOINTENZIVNÍ ZELEŇ

Polointenzivní zeleň tvoří přechod mezi zelení extenzivní a intenzivní. Při výsadbě jsou uplatňovány zejména trvalky a nízké keře v podobě jalovců, kručinek, brslenů, hlohyní, mochen aj. Oproti extenzivní výsadbě má polointenzivní zeleň vyšší nároky na mocnost substrátu, vláhu a udržovací péči. Stále se však jedná o poměrně nenáročnou zeleň [3].

Polointenzivní zeleň bývá při hrubším dělení řazena buď do kategorie extenzivních střech jako „náročná extenzivní“, či do sekce intenzivní zeleň jako „jednoduchá“ neboli „primitivní intenzivní“.

- Tloušťka substrátu: 15 - 30 cm,
- plošná hmotnost v plně nasyceném stavu: 120 - 350 kg/m²,
- údržba: na nízké úrovni,
- pochozí: zpravidla ano,
- automatická závlaha: většinou není,
- střechy: ploché,
- filtrační vrstva: většinou geotextilie 200 - 300 g/m².

3.3.4 INTENZIVNÍ ZELENĚ

Intenzivní zeleň potřebuje stálou údržbu a péči. Je totiž totožná s klasickou zahradou či zelení na rostlém terénu. Projektant, který navrhuje tento druh střechy, nesmí zapomenout na zázemí pro zahradní nářadí, techniku a jiné pomůcky. Nezkoušení projektanti na toto většinou zapomínají a pak se dostávají do velmi složité situace.

- Tloušťka substrátu: 30 (15) a více cm,
- plošná hmotnost v plně nasyceném stavu: 300 (150) a více kg/m^2 ,
- údržba: odpovídá údržbě běžné zahrady/veřejné zeleně na rostlém terénu,
- pochozí: ano,
- automatická závlaha: ano,
- střechy: ploché,
- filtrační vrstva: většinou geotextilie o plošné hmotnosti $> 300 \text{ g/m}^2$.

Dle péče, kterou intenzivní střecha potřebuje, se dělí na:

- a) Intenzivní jednoduchou = primitivní intenzivní = polointenzivní (mocnost substrátu 15 - 30 cm) – přechod mezi extenzivní a intenzivní zelení,
- b) Intenzivní nákladnou (mocnost substrátu 300 mm více).



Obr. 10 Vzhled intenzivních vegetačních střech ve velkoměstech podle [3].

Intenzivní zeleň potřebuje pravidelnou závlahu s živinami. Většinou srážky nestačí, proto se používá zavlažovací potrubí, třeba plně automatické, které jsou schopny i dopravovat potřebné množství živin.

Na střechách s intenzivním ozeleněním se předpokládá rekreační pohyb osob. Používají se zpravidla pro rozšíření užitného nebo obytného prostoru. Mohou se zde pěstovat i náročnější

rostliny jako růže, nízké křovinaté rostliny, nízké keře a při odpovídajícím zvýšení vegetační vrstvy i střední a vyšší keře.

3.4 ZELENÉ STŘECHY BEZ POUŽITÍ ZEMINY

Nevýhodou vegetačních střech, kde vegetační substrát tvoří zemina, je jejich objemová hmotnost, ta je cca 1700 kg/m^3 . Při návrhu nového objektu se s touto skutečností počítá, a tak jsou nosné konstrukce na vyšší zatížení naddimenzované. U rekonstrukcí je to však složitější. Pokud investor chce navrhnout zelenou střechu na konstrukci, která při jejím návrhu nebyla dimenzována na vyšší zatížení, musí se tato konstrukce vyztužit pomocí přídavných ztužujících prvků a to stojí nemalé další finance. Už před několika lety vědci přišli s návrhem pěstování rostlin v hydrofilních minerálních vlnách (minerální vlny schopné vázat vodu). Tento materiál, i po nasáknutí vodou, má až 20krát nižší objemovou hmotnost, ta činí cca $70 - 80 \text{ kg/m}^3$. Jsou tedy vhodné jak pro rekonstrukce, tak pro střechy s nižší únosností.

Zelené střechy jsou krásné, moderní, nelze je ale použít na každou střechu. Zvláště u rekonstrukcí jsme omezení statikou nosných konstrukcí. Lehké hydrofilní minerální vlny posouvají hranice použitelnosti i pro tyto konstrukce. Mohou nahradit klasickou zeminu v systému zelené střechy a zlepšit tak navíc její tepelně-izolační vlastnosti. Tento materiál lze použít pro střechy ploché a nově i pro střechy pultové, s patřičnou stabilizací bez tepelných mostů [1]

3.4.1 DALŠÍ VÝHODY HYDROFILNÍCH MINERÁLNÍCH VLN

- Výsadbu vegetace je možné provést na dílcích už předem a pak je vyskládat na připravenou střechu,
- při poruše lze poškozený díl minerální vlny, bez problémů, vyjmout a nahradit novým dílem,
- minerální vlna umožňuje ozelenění i při větším sklonu střechy, desky se totiž nesesouvají a neodplavují se jednotlivé částice, jako je tomu při použití klasické zeminy,
- jednodušší realizace konstrukčních detailů střech z důvodu jiného počtu použitých vrstev a nahrazení zeminy minerální vlnou,
- střední součinitel tepelné vodivosti desek je ve vlhkém stavu cca $0,14 \text{ W/(m.K)}$, běžná vlhká zemina vede teplo 10x více než středně vlhká minerální vlna,
- je odolná vůči UV záření,
- tvoří protipožární izolaci střechy a zlepšuje i akustické vlastnosti střech.

System lze použít jak pro střechu s extenzivní zelení tak i pro náročnější intenzivní ozelenění.

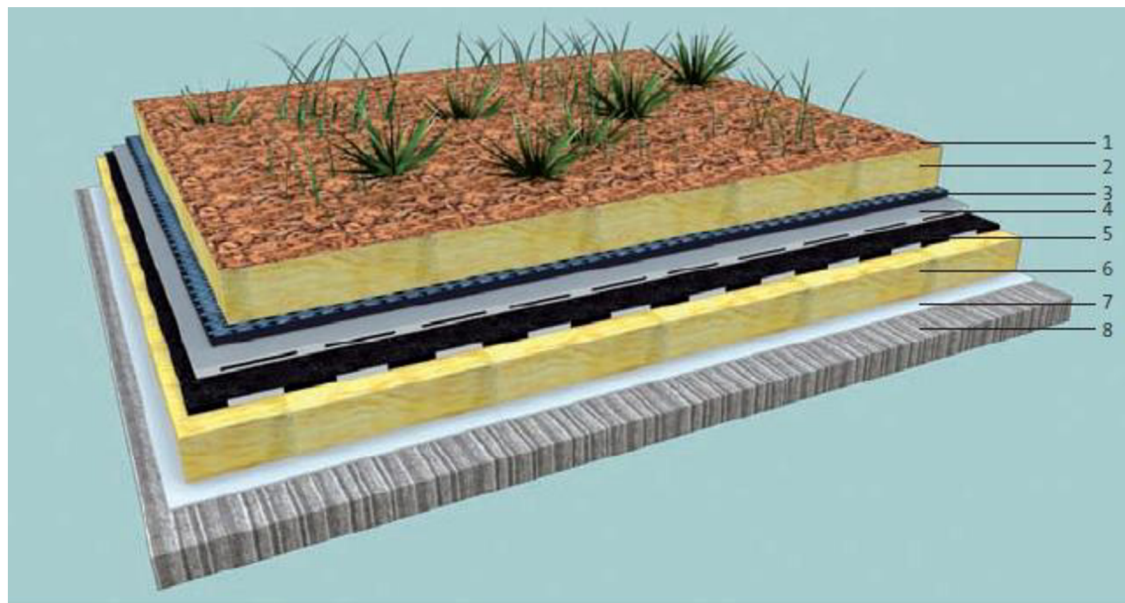


Obr. 11 Desky lze vrstvit na sebe a tak vytvořit nejen extenzivní vegetační skladbu, ale i náročnější intenzivní podle [1].

Při použití desek vyšších gramáží je možné vrstvení na sebe a tím dát podmínky rostlinám s mohutnějším kořenovým systémem. Tento druh zeleně již umožňuje běžný pobyt na střeše a kompoziční zásady řešení takovéto střechy se téměř neliší od zásad, podle kterých se budují zahrady na přirozeném půdním profilu na zemi. Škála květin, keřů, nízkých stromů, ale také palem, které lze v rámci intenzivního ozelenění uplatnit, je velmi široká [1].

Jedinou značnou nevýhodou těchto hydrofilních minerálních vln je pak to, že neobsahují živiny potřebné k růstu rostlin. Je tedy nutné živiny uměle dodávat. Toto lze řešit zavedením závlahového potrubí, kde se do dopravované vody přidá potřebné množství živin. Lze použít automatické zavlažovací systémy, které si množství, jak živin, tak vody, hlídají samy.

3.4.2 ZÁKLADNÍ SKLADBA STŘENÍ ZAHRADY SYSTÉMU S HYDROFILNÍ MINERÁLNÍ VLNOU



Obr. 12 Skladba střešní zahrady s hydrofilní minerální vlnou místo zeminy podle [1].

Poznámka: - skladebné uspořádání vrstev uvedeno v následujícím textu.

1. Krycí vrstva

Zajišťuje funkci stabilizační a tvoří počáteční ochranu při zakořeňování zejména travin. Tuto vrstvu může tvořit zahradnický substrát nebo mulčovací kůra, doplněná kačírkovým stabilizačním prvkem. Tloušťka tohoto substrátu se většinou pohybuje okolo 20 mm.

2. Vegetační vrstva

Je tvořena hydrofilními minerálními vlnami, které nahrazují zeminu, a zajišťuje růst rostlin. Semínka rostlin nebo předpěstované sazenice se vkládají do předem připravených otvorů, nebo do otvorů vytvořených po položení těchto desek.

3. Drenážní vrstva

Zadržuje vodu po nasycení minerálních desek a zároveň přebytečnou vodu odvádí na hydroizolaci. Tuto vrstvu tvoří většinou nopová polyetylenová fólie s drenážně-akumulační funkcí, nebo drenážní kamenivo.

4. Separáční vrstva

Plní i funkci dilatační a pokládá se na hydroizolaci střešního pláště. Nejčastěji ji tvoří PES (polyesterová) geotextilie 300 g/m², nebo geotextilie s vyšší gramáží a akumulační funkcí.

5. Hydroizolační souvrství

Tvoří hydroizolační pás na bázi asfaltu nebo fólie, který musí mít speciální atest proti prorůstání kořinek (atest FLL). V případě použití fólie z měkčeného PVC na EPS je nutná separace.

6. Tepelná izolace

Jedna z nejdůležitějších vrstev střešního pláště. Omezuje nežádoucí tepelná ztráty či zisky objektu. Na betonových deskách se zpravidla používají tepelné izolace z pěnového, nebo extrudovaného polystyrenu. Pro lehké střechy na trapézovém plechu je vhodnější použít minerální izolace, které mají dále funkci akustickou a protipožární.

7. Parozábrana

Vrstva, která zamezuje pronikání vodní páry do střešního pláště ze strany interiéru.

8. Nosná konstrukce

Nosným podkladem střešního pláště může být betonový stropní panel, železobetonová nosná deska, trapézové plechy či dřevěná nosná konstrukce. Nosnost střešní konstrukce je závislá na typu ozelenění a je daná statickým výpočtem.

3.5 ROSTLINY ZELENÝCH STŘECH

Pro extenzivní zelené střechy se hodí pouze ty rostliny, které se dokáží přizpůsobit extrémním teplotám a dobře snášejí sucho. Vegetaci můžeme dostat na střechu v různých formách: jako osivo, řízky (části rostlin), sazenice s plochým kořenovým balem nebo vegetační rohože. Podle situace je třeba zvolit vhodnou možnost. U ozeleněných šikmých střech je například nutné použít předpěstované vegetační rohože na pevném nosiči. Dle požadavku investora je možné za pomoci odborníka vybrat vhodnou vegetaci z připravených seznamů rostlin. Pro intenzivní zeleň připadají v úvahu různé druhy trvalek, keřů, půdopokryvných rostlin, a dřevin, které jsou obvyklé i v zahradách na rostlém terénu. S ohledem na podmínky stanoviště by však měly být použity nevymrzající druhy.[7]

3.5.1 KRITÉRIA VÝBĚRU VHODNÝCH DRUHŮ

Je známo, že hlavní faktory ovlivňující volbu rostlin na zelených střechách jsou teplotní odolnost, hloubka substrátu a požadavky na zavlažování. Nejdůležitější se však ukazuje faktor závlahy. Společně s vysokou odolností rostlin je také vyžadován nárok na co nejméně

náročnou údržbu. Níže je uveden seznam základních požadavků, které jsou kladeny na rostliny na zelených střechách:

- Odolnost v suchém období – extenzivní střechy většinou nemají instalovanou závlahu
- Odolnost v extrémním horku a mrazu – typické podmínky na střechách
- Malá výška vzrůstu – odolnost rostlin vůči větru
- Velká schopnost akumulovat vodu - například listy sukulentů
- Hustý a malý kořenový systém – maximální využití substrátu o malé mocnosti
- Stálezelenost – kvůli plnění svých funkcí
- Malé nároky na údržbu – nízké nároky na péči a hnojení, dlouhá doba života

Výběr vegetace, při daných klimatických podmínkách, je dán hlavně dvěma faktory.

- Rozhodnutím, zda použijeme trvalý závlahový systém, či nikoliv. Pokud se ho rozhodneme použít, máme mnohem větší možnosti při návrhu zeleně. Cenou jsou pak pořizovací náklady a náklady na údržbu vyšší.
- Výškou substrátu, kde platí, čím je výška substrátu větší, tím se vytváří větší volnost při výběru druhu rostlin. Větší tloušťka substrátu poskytuje zvýšenou akumulaci vody, i když nevýhodou může být zvýšené plošné zatížení střešní konstrukce.

3.5.2 ROSTLINY VHODNÉ NA ZELENE STŘECHY

V této části jsou popisovány rostliny vhodné pro střechy extenzivní nebo polointenzivní. Na intenzivních střechách jsou pěstební možnosti široké a nejsou nijak omezeny.

Rostliny se obvykle rozdělují na jednoleté (letničky), dvouleté a trvalky, a to dle vegetačního cyklu. Jednoleté rostliny vyrostou, vykvetou a vysemení se v průběhu jedné vegetační sezóny. Dvouleté v první sezóně vyklíčí a vytvoří vegetativní orgány. Druhý rok se pak vysemení a uhynou. Trvalky jsou pak rostliny, které na zelené střeše mohou růst několik roků.

Jednoleté rostliny by na zelených střechách neměly být dominantně zastoupeny. Jejich role v porostu je hlavně estetická. Jednoleté rostliny neboli letničky jsou rostliny, které přežívají pouze jeden vegetační cyklus. V něm vyklíčí, vyrostou, vykvetou, vytvoří semena pro další sadbu a poté odumírají. Výhodou letniček je, že kvetou v podstatě po celé své vegetační období, tedy od jara až do podzimu a při správné péči nás odmění bohatými a pestrými květy [7].

Publikace Snoddgrass et Snoddgrass (2006) doporučuje například *Phacelia campanula*, nebo *Townsendia eximia*. Jejich výhodou je, že se mohou na střeše během roku bez pěstebního zásahu samy udržovat vysemeněním, aniž by se staly invazivními [4].

Bylinné trvalky jsou pro zelené střechy hlavně estetickým přínosem. Nabízejí největší variabilitu tvarů, rozmanitost barev a sezónní variabilitu. Je známo mnoho druhů, které potřebují hluboce zakořenit, proto je pro ně nezbytná vyšší vrstva substrátu i zvýšená zvlaha.

Publikace Snoddgrass et Snoddgrass (2006) doporučuje například *Dianthus*, *Phlox*, *Campanula*, *Teucreum*, *Allium*, *Potentilla*, *Achillea*, *Prunella*, *Viola* a *Origanum*. Vždy se musí jednat o druhy odolné suchu, mělce kořenicí s nižším vzrůstem. Dále je třeba respektovat to, že pouze relativně malý počet druhů bylinných trvalek je stálezelených. Vždy je proto potřeba tyto druhy doplňovat stálezelenými trvalkami, aby střecha byla vizuálně atraktivní celoročně [4].

Sukulenty jsou nejvhodnější pro použití na střeších se substráty do výšky 100 mm a bez zvlahového systému.

Hlavní skupiny vhodných sukulentů jsou například *Sedum*, *Sempervivum*, *Talium*, *Jovibarba* a *Delosperma*. [4]

Trávy bez pochyb potřebují více zvlahy než sukulenty. Zpravidla vyžadují vyšší vrstvu substrátu přibližně 150 mm a více. I když nekvetou a nejsou stále zelené, jsou velice zajímavé a mnoha lidem se zamlouvají. Pomáhají vytvořit estetické prostředí, blízcí se přirozenému ekosystému. Travinné porosty lépe zadržují vodu a lépe chladí a podle některých poznatků nabízí lepší podmínky pro živočichy. Musíme ale zvážit fakt, že v zimě nebude porost zelený.

Obecně publikace Snoddgrass et Snoddgrass (2006) doporučuje používat nižší trávy, například *Festuca*, *Carex* a *Deschampsia* pro střechy s nižšími substráty. Pokud se použije substrát vyšší, lze použít druhy *Andropogon*, *Bouteloua*, *Carex*, *Sesleria* a *Sporobolus* [4].

Byliny bývají v dospělosti dostatečně odolné, ale kritická je pro ně první fáze usazení. Některé jsou schopny růstu na substrátech o výšce již 10 cm, na nižších substrátech lze použít například *Thymus*, *Origanum*, *Salvia* a *Allium* [4].

Geofity jsou svým způsobem zvláštní rostliny, jejichž možnosti jsou omezeny díky menší odolnosti v horkých slunečných dnech.

Mezi odolné odzkoušené cibuloviny patří některé *Iridaceae*, *Allium*, *Tulip*, *Daffodil*, *Muscari* a *Crocus*. Dále je uveden seznam druhů, doporučených v publikaci Snoddgrassem,

jako vybrané, nejodolnější druhy pro použití na zelených střeších, bez ohledu na lokalitu. Druhy jsou uvedeny bez doporučené výšky substrátu, jde ale o extenzivní střechy, tzn. výška substrátu do 10 cm. Autor seznamu realizuje zelené střechy 15 let a je majitelem farmy produkující kompletní nabídku rostlin pro zelené střechy. Realizace provádí převážně na severovýchodě USA. Jde o nejnovější seznam z jara 2012: *Allium 'Summer Beauty'*, *Allium cernuum*, *Allium schoenoprasum*, *Allium senescens ssp. montanum var. glaucum*, *Delosperma 'Lavender Ice'*, *Delosperma cooperi*, *Delosperma dyeri*, *Delosperma nubigenum 'Basutoland'*, *Phedimus takesimensis 'Golden Carpet'*, *Sedum album*, *Sedum album f. murale*, *Sedum ellacombianum*, *Sedum hybridum 'Immergrüchen'*, *Sedum kamtsch. var. flor. 'Weihenstephaner Gold'*, *Sedum kamtschaticum*, *Sedum middendorffianum var. diffusum*, *Sedum montanum ssp. orientale*, *Sedum reflexum 'Blue Spruce'*, *Sedum rupeste 'Angelina'*, *Sedum sexangulare*, *Sedum spurium 'Album Superbum' aka. 'White form'*, *Sedum spurium 'Fuldaglut'*, *Sedum spurium 'John Creech'*, *Sedum spurium 'Schorbuser Blut'*, *Sedum spurium 'Summer Glory'*, *Sedum ternantum* a *Talinum calycinum syn. Phemeranthus calycinus*. [4]

3.5.3 ROZDĚLENÍ DLE VÝŠKY SUBSTRÁTU

EXTENZIVNÍ VEGETACE 40 - 60 mm

Do „bezúdržbové“ extenzivní střechy o mocnosti 40 – 60 mm se nejčastěji používají tyto rostliny:

CIBULNATÉ - *Allium a Muscari*,

TRAVINY - *Carex, Corynephorus* a *Festuca*,

TRVALKY - *Acaena, Acinos, Carlina, Chiastophyllum, Euphrobia, Fascicularia, Herniaria, Jovibarba, Mazus, Petrographia, Raoulia, Rosularia, Sagina, Saxifraga, Scutellaria, Sedum, Sempervivella* a *Sempervivum*.

EXTENZIVNÍ VEGETACE 60 - 100 mm

Do extenzivní střechy o mocnosti 60 – 100 mm se nejčastěji používají rostliny jako jsou:

CIBULNATÉ - *Allium, Anemone, Crocus, Hyacinthoides, Ixia, Narcissus, Nerine, Scilla* a *Tulipa*,

TRAVINY - *Bouteloua, Buchloë, Carex, Festuca, Koeleria* a *Melica*,

TRVALKY - *Alyssum, Antennaria, Anthericum, Anthyllis, Armeria, Asplenium, Astragalus, Aubrieta, Babiana, Centaurium, Cerastium, Coronilla, Corydalis, Cymbalaria, Dianthus, Draba, Duchesnia, Echeveria, Erinus, Hieracium, Hypochaeris, Iris, Leontodon, Leptinella*,

Lysimachia, Minuartia, Oxalis, Paronychia, Polypodium, Potentilla, Primula, Prunella, Saponaria, Serratula, Sisyrinchium, Teucrium, Thymus, Vancouveria a Verbascus.

POLOINTENZIVNÍ VEGETACE 100 - 150 mm

Polointenzivní střechy obsahují již náročnější rostliny. Do substrátu o mocnosti 100 – 150 mm vysazujeme nejčastěji tento druh rostlin:

TRAVINY - *Briza, Carex, Festuca, Helictotrichon, Koeleria, Sesleria a Stipa,*

TRVALKY - *Achillea, Aethionema, Ajuga, Alchemilla, Anacyclus, Anaphalis, Anthemis, Aquilegia, Arabis, Artemisia, Asarum, Aster, Bergenia, Billbergia, Calamintha, Campanula, Carlina, Centaurea, Centranthus, Cheilanthes, Daucus, Davallia, Delosperma, Dryas, Edraianthus, Epimedium, Erigeron, Eriophyllum, Erodium, Eryngium, Euphorbia, Filipendula, Fragaria, Galium, Gentiana, Geranium, Glechoma, Globularia, Gypsophila, Hedera, Helianthemum, Horminum, Hypericum, Inula, Iris, Jasione, Leucanthemum, Limonium, Linaria, Linum, Liriope a Ophiopogon, Lychis, Malva, Nepeta, Oenothera, Ononis, Onosma, Opuntia, Origanum, Pachysandra, Penstemon, Phlox, Pulsatilla, Ranunculus, Rhodiola, Sanguisorba, Saxifraga, Scabiosa, Sedum, Silene, Solidago, Tanacetum, Tiarella, Verbascum, Veronica, Vinca a Viola.*

POLOINTEZIVNÍ VEGETACE 150 - 200 mm

Do polointenzivní střechy se zeminou o tl. 150 – 200 mm se hodí rostliny jako:

TRAVINY - *Calamagrostis, Carex, Deschampsia, Festuca, Luzula, Sporobolus a Stipa,*

TRVALKY - *Aloe, Betula, Brachyglottis, Buddleja, Bupthalmum, Calluna, Ceanothus, Ceratostigma, Cichorium, Cistus, Cotoneaster, Cytisus, Echium, Eriogonum, Erysimum, Genista, Hebe, Heuchera, Jasminum, Juniperus, Knautia, Kniphofia, Lavandula, Libertia, Lonicera, Omphalodes, Perovskia, Phlomis, Pinus, Potentilla, Prunus, Rosa, Rosmarinus, Rumex, Salix, Salvia, Santolina, Sorbus, Spiraea, Stephanandra, Tellima, Tradescantia, Trifolium a Zauschneria.*

3.5.4 ROSTLINY VHODNÉ PRO STŘECHY O MALÝCH PLOCHÁCH

Níže jsou uvedeny druhy rostlin doporučované Dunnettem et al. (2011) pro použití na malých objektech. Může se jednat například o zahradní domky, garáže nebo i autobusové zastávky. Na těchto objektech lze díky méně extrémním podmínkám očekávat snadnější adaptaci místních druhů. Rozdělení je uvedeno pro substrát do 100 mm a přes 100 mm.

EXTENZIVNÍ VEGETACE 60 - 100 mm

Na extenzivní střeše o malé ploše a mocnosti zeminy 60 – 100 mm jsou vhodné tyto rostliny:

Allium schoenoprasum, Alyssum maritimum, Anthoxanthum odoratum, Armeria maritima, Briza media, Campanula rotundifolia, clinopodium vulgare, Delosperma cooperi, Dianthus carthusianorum, Dianthus deltoides, Echium vulgare, Euphorbia cyparissias, Galium verum, Hieracium pilosella, Koeleria glauca, Koeleria macrantha, Linaria maroccana, Lotus corniculatus, Orostachys boehmeri, Petrorhagia saxifraga, Primulas veris, Prunella vulgaris, Saponaria ocymoides, Sedum acre, Sedum album, Sedum floriferum, Sedum hybridum 'Immergrünchen', sedum kamtschaticum, Sedum reflexum, Sedum rupestre, Sedum sexangulare, Sedum spurium, Talium calycinum, Teucrium chamaedris, Thymus pulegioides a Thymus serpyllum.

POLOINTENZIVNÍ VEGETACE 100 - 200 mm

Níže jsou uvedeny rostliny vhodné pro polointenzivní střechy o malé ploše a mocnosti zeminy 100 – 200 mm:

Achillea millefolium, Bupthalmum salicifolium, Calamintha nepeta, Campanula glomerata, Centaurea scabiosa, Coreopsis tinctoria, Lavandula angustifolia, Leontodon autumnalis, Origanum vulgare, Papaver rhoeas a Pulsatilla vulgaris.

3.6 ZATÍŽENÍ STŘEŠNÍ KONSTRUKCE VEGETAČNÍ VRSTVOU

Návrh vegetační vrstvy sebou přináší riziko ve formě velkého zatížení na střešní konstrukci. U novostaveb to není zas tak veliký problém, protože projektant s touto skutečností uvažuje již dopředu a připočte jej ke stálému zatížení. Jak bylo již zmíněno výše, problém nastává u rekonstrukcí. V původním návrhu střešní konstrukce nebylo totiž s touto variantou počítáno a tak projektant musí tento problém vysvětlit investorovi a s pomocí statika zjistit únosnost stávající střešní konstrukce. Po zjištění této důležité informace se může přejít k předběžnému návrhu vegetačního souvrství.

Jak již bylo zmíněno výše, důležitou volbou pro návrh zelené střechy je druh substrátu. Pokud investor, při rekonstrukci, chce použít zeminu, bude se muset střešní konstrukce vyztužit pomocí přídavných ztužujících prvků, což může být velice nákladné. V tomto případě by bylo vhodnější volit substrát tvořený hydrofilní minerální vlnou místo zeminy.

Pro předběžné návrhy lze použít pro výpočet zatížení střešním substrátem v plně nasyceném stavu hodnotu 12 - 14 kg/10 mm tloušťky substrátu. Je však nutné upozornit, že při použití běžné zeminy s organickou příměsí ve stavu vlhkém, velmi vlhkém až nasyceném

vodou může být hmotnost 16,5 - 18 kg/10 mm tloušťky vrstvy. Podrobné informace o zatížení drenážními vrstvami ze sypkých materiálů a o zatížení substrátu (obojí v plně nasyceném stavu) je uváděno v následujících tabulkách 1 a 2 [2].

Tab. 2. Zatížení drenážními vrstvami (v plně nasyceném stavu) dle [2].

Materiál	Velikost zrna	Plošné zatížení na 10 mm tloušťky vrstvy		Uvažovaná objemová hmotnost
	[mm]	[kg/m ²]	[kN/m ²]	[kg/m ³]
šterkopísek	4/8-8/16	16-18	0,16-0,18	1600-1800
Láva	1/5-4/12	11-14	0,11-0,14	1100-1400
pemza čištěná	2/4-4/12	7-8	0,07-0,08	700-800
pemza nečištěná	2/4-4/12	11-12	0,11-0,12	1100-1200
keramzit nedrcený	4/8-8/16	5-6	0,05-0,06	500-600
expandovaná břidlice nedrcená	4/8-8/16	6-8	0,06-0,08	600-800
keramzit drcený	2/4-4/8	6-8	0,06-0,08	600-800
expandovaná břidlice drcená	2/4-4/11	6-8	0,06-0,08	600-800
desky z minerální vlny		8-10	0,08-0,10	800-1000

Tab. 3. Zatížení substráty (v plně nasyceném stavu) dle [2].

Druh substrátu	Plošné zatížení na 1 cm tloušťky vrstvy		Uvažovaná objemová hmotnost
	[kg/m ²]	[kN/m ²]	[kg/m ³]
jílovitominerální substrát	9	0,09	900
rašelina	9-11	0,09-0,11	900-1100
zemina	16,5-18	0,17-0,18	1650-1800
hydrofilní minerální vlna	0,7-0,9	0,01	70-90

4 DOMY S MALOU SPOTŘEBOU ENERGIE

Rozhodnutí o stavbě vlastního domu většina lidí učiní pouze jednou za život. Na rozhodnutí s tak velkým trvalým účinkem je proto třeba se dobře připravit, neboť by mělo vést k osobnímu pohodlí a vysoké spokojenosti s bydlením. V posledních letech se u nás staví čím dál více objektů s malou spotřebou energie. V případě, že zvolíte takovýto dům, budou to pro Vás nejlépe investované peníze. Stále rostoucích cen paliv se pak nemusíte bát.

Pro srovnání, běžná novostavba dnes ročně spotřebuje mezi 80 – 140 kWh/m² tepla a náklady na vytápění se tak každou zimu pohybují v řádech desítek tisíc korun (v závislosti na typu používaného paliva). [15]

Jelikož se v mé práci zabývám tepelnou stabilitou, považuji za vhodné se zmínit i o domech s malou spotřebou energie.

Tyto objekty dělíme do tří skupin. Hlavním kritériem je roční spotřeba energie na vytápění.

Tab. 4. Základní rozdělení budov s malou spotřebou energie

Kategorie	Spotřeba tepla na vytápění
Nízkoenergetický dům	≤ 50 kWh/m ² za rok
Pasivní dům	≤ 15 kWh/m ² za rok
Nulový dům	≤ 5 kWh/m ² za rok

4.1 NÍZKOENERGETICKÝ DŮM

Jak vyplývá z tabulky 4, nízkoenergetický dům je definován jako budova s roční spotřebou energie na vytápění maximálně 50 kWh/m².

Než dojde k vlastnímu návrhu objektu, musíme nejprve vypracovat tzv. stavebně energetickou koncepci, to znamená, že projektant musí optimalizovat řešení jak stavební části (situování a osazení objektu do terénu, dispoziční řešení, jaký bude použit materiál při výstavbě), tak technologie (vytápění, větrání, rekuperace, atd.). Po této fázi se začne se zpracováním vlastního projektu.

Důležité je provést návrh nízkoenergetického domu tak, aby jednotlivé části energetické bilance byly co nejmenší. Jak je známo, potřebu energie na vytápění ovlivňuje:

- volba pozemku (umístění stavby),
- osazení objektu do terénu,

- orientace objektu vůči světovým stranám,
- zastínění objektu od okolní zástavby, terénu či vegetace,
- převládající směr větru,
- faktor budovy A až V – vyjadřuje tvarové řešení objektu, členitost, kompaktnost,
- minimalizace, nejlépe úplné vyloučení telených mostů a výrazných tepelných vazeb,
- dispoziční řešení s ohledem na tepelné zóny,
- velikost prosklených ploch v obvodových stěnách a ve střešním plášti,
- velikost přímo a nepřímo vytápěných místností,
- tepelné zisky od vnitřních zdrojů,
- hodnota součinitele obvodových konstrukcí.

4.1.1 VOLBA POZEMKU (UMÍSTĚNÍ STAVBY)

I taková maličkost jako je volba pozemku může ovlivnit tepelné ztráty budovy, resp. tepla na vytápění. Vhodné místo pro stavbu posoudíme dle následujících čtyř veličin, které mají vliv na tepelné ztráty budovy:

- a) teplota venkovního vzduchu,
- b) rychlost a směr větru,
- c) vlhkost vzduchu,
- d) intenzita slunečního záření.

Teplota venkovního vzduchu

Jak vyplývá ze souvislostí, čím nastane nižší teplota venkovního vzduchu, tím jsou tepelné ztráty budovy vyšší a naopak. Přibližně platí, že při rozdílu teplot o 1K se změní tepelné ztráty cca o 3%. Teplota venkovního vzduchu je závislá na nadmořské výšce. Čím je nadmořská výška vyšší, tím je teplota venkovního vzduchu nižší. Tato skutečnost je zohledněna také při stanovení návrhové teploty venkovního vzduchu v zimním období dle ČSN 73 0540 – 3.

Teplota vzduchu nezávisí jen na nadmořské výšce, ale také na členitosti terénu, jeho poloze ke světovým stranám (na severním svahu jsou teploty venkovního vzduchu menší než na jižním), na okolní zástavbě (na volném terénu jsou teploty vzduchu nižší, než v zastavěné aglomeraci).

I osazení objektu do terénu souvisí s problematikou teploty venkovního vzduchu. Jak je uvedeno v ČSN 73 0540 – 3, u konstrukcí osazených pod úroveň terénu, či na terénu (části obvodových stěn a podlahy v nejnižším podlaží) působí na jejich venkovních stranách

v důsledku přilehlé zeminy podstatně vyšší teploty. Ty při výpočtech uvažujeme, v závislosti na hloubce pod terénem, v rozmezí od -6°C do $+5^{\circ}\text{C}$. Z toho plyne, že tepelné ztráty u těchto konstrukcí jsou podstatně nižší. Další příznivou podmínkou je schopnost tepelné akumulace zeminy.

Rychlost a směr větru

Norma ČSN 73 0540 – 3 také uvádí, proč jsou vyšší tepelné ztráty budovy při vyšším větru:

- 1) Se vzrůstající rychlostí větru se zvyšuje také hodnota součinitele přestupu tepla na venkovní straně obvodových konstrukcí a střešních plášťů, čímž dochází ke snížení jejich tepelného odporu a zvýšení součinitele prostupu tepla.
- 2) Se vzrůstající rychlostí větru se zvyšují tepelné ztráty infiltrací. Z tohoto hlediska je rozdílné, zda je budova situována v oblasti s normálním či zvýšeným zatížením větrem. Dále hraje významnou roli, jestli je poloha budovy v krajině chráněna, nechráněná či velmi nepříznivá. Návrhové nejvyšší průměrné rychlosti převládajících větrů v České republice jsou uvedeny v již zmiňované normě ČSN 73 0540 – 3 a pohybují se v rozmezí od 3 do 6 m/s.

Vlhkost vzduchu

Zvýšené hodnoty vlhkosti v obvodových konstrukcích zapříčiňuje nejen dešťová voda, ale i vlhkost vzduchu. Díky faktu, že voda má největší hodnotu měrné tepelné kapacity, dochází při zvýšení jejího obsahu ve stavební konstrukci i ke zvýšení součinitelů tepelné vodivosti daných konstrukcí. To má samozřejmě i negativní vliv na součinitele prostupu tepla a tím i na tepelné ztráty budovy.

Intenzita slunečního záření

Krom letního období má sluneční záření pozitivní vliv na energetickou bilanci budovy. V letním období totiž díky slunečnímu záření dochází k nadměrným tepelným ziskům a tím i přehřívání objektu. Energie, která je dodávána díky slunečnímu záření, je ovlivněna místními klimatickými a geografickými podmínkami a nadmořskou výškou. K tomu přistupuje také míra případného znečištění ovzduší.

Orientace budovy má zásadní vliv na velikost tepelných zisků budovy. Nejmenší intenzita sluneční energie je na severní stěně a nejvyšší naopak na jižní stěně. Jak uvádí norma ČSN 73 0540 – 3 dopadá následující energie globálního slunečního záření za otopné období: na jižně orientovanou stěnu $416,99 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$, na jihovýchodně či jihozápadně orientovanou stěnu $348,32 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$, na vodorovnou plochu $343,35 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$, na východně či západně

orientovanou stěnu 211,23 kWh.m⁻², na severovýchodně či severozápadně orientovanou stěnu 103,65 kWh.m⁻² a na severně orientovanou stěnu 77,02 kWh.m⁻².

4.1.2 TVAROVÉ ŘEŠENÍ BUDOVY

Tvarové řešení objektu je hodnoceno tzv. faktorem tvaru. Je důležité, aby tento faktor tvaru byl co nejmenší. Hodnota této veličiny se vyjádří vztahem:

$$\frac{A}{V} < 0,7 \quad (1),$$

kde:

$A [m^2]$ – celková plocha (součet vnějších ploch) ochlazovaných konstrukcí ohraničujících objem budovy,

$V [m^3]$ – objem budovy (vnější objem vytápěné zóny budovy, který nezahrnuje atiky, lodžie, římsy a základy).

Protože velikost celkové tepelné ztráty budovy závisí na velikosti plochy ochlazovaných konstrukcí ohraničující objem budovy. Proto čím nižší je tato plocha, tím jsou nižší i tepelné ztráty budovy a naopak. Z logiky vyplývá, že ideálním tělesem z tohoto hlediska je koule. Ve stavebnictví je však tvar koule téměř nepoužitelná.

Zjednodušeně jde o to, aby byl objekt co, se týče tvaru, co nejjednodušší s kompaktním tvarem, bez zbytečných lomů stěn, výstupků či úskoků.

4.1.3 TEPELNÉ MOSTY A VAZBY BUDOVY

Tepelný most

Jedná se o konstrukci či její část, která má tepelný odpor výrazně nižší než okolní konstrukce. Následkem tohoto dochází v tomto místě k vyššímu tepelnému toku. Tepelný most za následek dva negativní důsledky:

- 1) v daném místě dochází ke zvýšení tepelných ztrát,
- 2) v interiéru dochází v daném místě k nižším povrchovým teplotám v interiéru. Pokud je tato teplota nižší než teplota rosného bodu, pak dochází k povrchové kondenzaci vodní páry, která má při dlouhodobé kondenzaci za následek výskyt plísní.

Známe dva druhy tepelných mostů a to tepelné mosty bodové (např. ocelová kotva zateplovacího systému) nebo lineární (např. krokv při zateplování podkroví). Pokud dochází k periodickému opakování tepelného mostu, pak bývají označovány jako tzv. systematické tepelné mosty (např. krokve v zatepleném podkroví, pokud je izolace mezi nimi).

Tepelná vazba

Jedná se o styk dvou nebo více konstrukcí, které mají odlišné součinitele prostupu tepla (přesněji tepelného odporu). Dochází tedy k ovlivnění tepelného toku (např. ostění v kontaktu s oknem, atd.).

Zjednodušeně jde o minimalizaci tepelných mostů a vazeb u nízkoenergetických domů a to tak, aby tepelná izolace obvodových stěn, střechy a podlahy v nejnižším podlaží byla vzájemně propojena bez přerušení. Nejčastější problematická místa jsou:

- návaznost střechy na obvodovou zeď,
- napojení železobetonových konzolových desek (balkóny, římsy, ...),
- napojování oken v místě ostění,
- kotvení venkovních tepelně izolačních systémů.

4.1.4 VNITŘNÍ DISPOZICE S OHLEDEM NA TEPELNÉ ZÓNY A ORIENTACI MÍSTNOSTÍ KE SVĚTOVÝM STRANÁM

Tato fakta nemusí být zcela nutně dodržena. Dokážeme tak vytvořit teplotní spád od prostorů, které jsou vytápěny na vyšší teploty přes prostory s nižší teplotou až k prostorům, které nevytápíme, avšak v případě návrhu obvodových konstrukcí s nízkými hodnotami součinitele prostupu tepla, nedochází k tak výrazným tepelným ztrátám. Toto zónování je vhodné využít hlavně z důvodu orientace obytných místností na osluněné světové strany, což má nejen energetický význam, ale také hygienický a psychologický význam. Zároveň však musíme uvážit denní dobu, ve které budou využívány. Proto například obývací pokoje, které bývají využívány spíše v odpoledních až večerních hodinách, umístíme na jižní, jihovýchodní a západní straně. Naproti tomu ložnice je vhodné, z důvodu ranního oslunění orientovat na severovýchod až jihovýchod. Na severní stranu orientujeme místnosti, které jsou pro pobyt osob méně využívány (např. zádveří, WC, garáže, sklady apod.). Uvedené místnosti mají také podstatně menší nároky na intenzitu denního osvětlení, a tudíž zde můžeme minimalizovat velikost okenních otvorů, čímž snižujeme velikost tepelných ztrát. Místnosti situované na severní straně vytváří tedy jakousi „nárazníkovou“ zónu. „Přechodovou zónu“ pak vytvářejí místnosti situované uvnitř dispozice (např. chodby, schodiště apod.). Na jih, jihovýchod a jihozápad pak umístíme místnosti s nejvyššími teplotami vnitřního vzduchu.

4.1.5 AKUMULACE TEPLA

Akumulací tepla rozumíme uchování jeho přebytku do doby, kdy je třeba teplo do objektu znovu dodat. U nízkoenergetických domů rozlišujeme v zásadě dvojí možnost akumulace tepla:

- 1) akumulace tepla do stavebních konstrukcí,
- 2) akumulace tepla do samostatných akumulčních zásobníků.

Akumulace tepla do stavebních konstrukcí

Jedná se o akumulaci bez technologického zařízení tzv. pasivní akumulaci v důsledku uspořádání stavebních konstrukcí vzhledem k jejich tepelně technickým vlastnostem. Schopnost tepelné akumulace materiálu je závislá na jeho tepelné jímavosti b [$\text{W}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-4} \cdot \text{K}^{-2}$]. Potažmo na hodnotách jeho tepelné vodivosti λ [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$], měrné tepelné kapacity c [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$] a na objemové hmotnosti ρ_v [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]. Pro tepelnou jímavost tedy platí vztah:

$$b = \lambda \cdot c \cdot \rho_v \quad (2).$$

Tepelná jímavost vyjadřuje schopnost daného materiálu přijímat a uvolňovat teplo. Čím vyšší je hodnota tepelné jímavosti materiálu, tím více tepla je schopen materiál přijmout a tím je větší jeho akumulční schopnost a naopak.

S tepelnou jímavostí úzce souvisí také součinitel teplotní vodivosti a [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]. Součinitel teplotní vodivosti vyjadřuje schopnost materiálu vyrovnávat rozdílné teploty při neustálém vedení tepla. Určuje se dle vztahu:

$$a = \frac{\lambda}{\rho_v \cdot c} \quad (3).$$

Pokud nastane stav, kdy má materiál vysokou hodnotu tepelné jímavosti b , ale nízkou hodnotu teplotní vodivosti a , znamená to, že materiál se pomaleji ohřeje a také teplo pomaleji předává okolí, tedy pomaleji se ochladí a naopak.

Malou tepelnou jímavost mají například tepelně izolační materiály (pěnové polystyrény, vláknité materiály, pěnový polyuretan), nebo moderní cihelné zdicí materiály, tvárnice z lehkých betonů, dřevo apod. Velkou tepelnou jímavost mají materiály o velké objemové hmotnosti, například kovy, kámen, beton, zdivo z plných pálených cihel.

Nejvíce teplo do stavebních konstrukcí proniká díky slunečnímu záření. Po dopadu slunečních paprsků na plochu konstrukce se konstrukce ohřeje, část tepla se naakumuluje do konstrukce, a část odchází do okolí. Dále se teplo do konstrukce dostává v důsledku proudění

teplého vzduchu, který se ohřál sáláním slunečních paprsků. Tímto způsobem se do konstrukce dostane podstatně méně tepelné energie než přímým slunečním zářením.

Množství akumulovaného tepla do stavební konstrukce závisí na třech faktorech:

- 1) hodnota tepelné jímavosti,
- 2) intenzita slunečního záření,
- 3) době oslunění konstrukce, resp. době proudění okolního vzduchu o vyšší teplotě.

Musíme si ovšem uvědomit, že tepelná akumulace stavebních konstrukcí nenahrazuje jejich tepelné izolační vlastnosti.

Akumulace tepla do samostatných akumulčních zásobníků

Akumulační zásobníky, jak už sám název napovídá, slouží k akumulaci tepla od různých zdrojů, např. kotlů na tuhá paliva, tepelných čerpadel, či solárních systémů. Jedná se o tlakové nádrže vhodného objemu, které uchovávají teplo od těchto zdrojů až do doby, kdy bude potřeba k vytápění objektu. V současné době převládají požadavky na kombinaci různých zdrojů, jako jsou tepelná čerpadla, solární systémy, kotle na tuhá paliva popř. na biomasu, elektro ohřev a další. Existují již i nádrže, pro provoz s několika zdroji, které se stávají jakýmsi centrem celé technologie, soustředí energii od všech zdrojů a dodává energii jak pro vytápění, tak pro přípravu teplé vody určené k okamžité spotřebě.

4.1.6 VÝPLNĚ OTVORŮ

Dalším významným vlivem na objekt jsou výplně otvorů obvodové konstrukce a to zejména okna a dveře. Významné jsou jejich tepelné technické vlastnosti, velikost a umístění. Ovlivňují ne jen estetický, architektonický, dispoziční a funkční hledisko, ale i hledisko energetické a to proto, že výplně otvorů z energetického hlediska (tepelných ztrát) nejslabšími články v obvodové konstrukci objektu. Z tohoto důvodu je dobré dbát na to, aby jejich plocha byla co nejmenší, ale je třeba dodržet požadavky na denní osvětlení dané místnosti. Důležitý je i vhodný výběr konstrukce výplně otvorů vzhledem k jejich izolačním schopnostem. Požadavek na minimální tepelné ztráty vyžaduje, aby hodnota součinitele prostupu tepla byla u výplní otvorů co nejmenší. Velikost součinitele prostupu tepla pak závisí na:

- typu zasklení (hodnotě součinitele tepla zasklení) a velikosti plochy vzhledem k celkové ploše okna,
- typu okenního rámu (hodnotě součinitele tepla rámu) a jeho velikosti plochy vzhledem k celkové ploše okna,

- typu distančního rámečku (hodnotě součinitele tepla rámečku) a jeho velikosti plochy vzhledem k celkové ploše okna,
- konstrukčním řešením vazby mezi oknem a ostěním,
- skutečným provedení vazby mezi oknem a ostěním.

Je dobré dodržovat vyváženost výše uvedených parametrů. Tím je myšleno to, aby například zasklení s nízkou hodnotou součinitele prostupu tepla nebylo osazeno do rámu o vysoké hodnotě součinitele prostupu tepla.

Typ zasklení

Rozhodujícím prvkem z hlediska hodnoty součinitele prostupu tepla U zasklené plochy okna je mezera, resp. mezery mezi skly a jejich výplň. Čím více je v okně skel (resp. mezer mezi skly) tím má okno větší tepelně izolační schopnosti - z tohoto důvodu se vyrábějí okna s dvěma či třemi skly. Pro zvýšení tepelně izolačních schopností se prostor mezi skly vyplňuje vhodnými plyny s nižší tepelnou vodivostí, než má vzduch (např. argon, krypton, xenon atd.). V praxi se více uplatňují okna s dvojskly než s trojskly. A to z důvodu vyšší hmotnosti oken s trojskly, s čímž souvisí také požadavek na masivnější konstrukci rámu, a také z důvodu vyšší ceny trojskel. [14]

Vyrábějí se také okna, kde namísto vnitřního skla je osazena tenká fólie, která je opatřena vrstvou s o nízké hodnotě emisivity, tzv. heat mirror. Tato fólie je průhledná pro viditelné světlo, avšak odráží tepelné a ultrafialové záření. Takto vznikne třívrstvý izolační systém se dvěma dutinami. Při osazení dvou fólií pak vzniká čtyřvrstvý systém se třemi dutinami. V obou případech je výhodou nižší hmotnost okenního křídla, než při použití skel. [14]

Typ okenního rámu

V dnešní době se vyrábějí okna, která mají nízké hodnoty součinitele prostupu tepla a platí, že součinitele prostupu tepla rámu je vyšší než u zasklení. Z tohoto důvodu je vhodné, pokud je to možné, volit okna, která mají rám pouze po obvodě a nejsou dělená v ploše.

Dle konstrukčního řešení jsou okna dělena na:

- jednoduchá,
 - jednoduše zasklená,
 - s izolačním dvojsklem,
 - s izolačním trojsklem,
- dvojitá,
- zdvojená,

- střešní okna.

Dle materiálu rámu jsou okna dělena na:

- plastová – jsou vyrobena platových rámu, které mají pět, šest, a dokonce i osm vzduchových komor a jsou vyztuženy kovovými profily,
- dřevěná – vyrábějí se u masivu nebo z lepených dřevěných profilů,
- kovová – jsou buď ocelová, nebo hliníková. Rám je zpravidla složen ze dvou profilů, které jsou mezi sebou spojeny tepelnou izolací. Tato okna mají podstatně vyšší hodnoty součinitele prostupu tepla.
- Kombinovaná – jedná se nejčastěji o kombinaci dřeva a hliníku. Využívá se zde hlavně předností jednotlivých materiálů (pevnost hliníku a tepelně izolační vlastnosti dřeva).

Typ distančního rámečku

Jak je známo, distanční rámeček je umístěn v místech krajů zasklení a vymezuje šířku dutiny mezi skly. Vedle distančního rámečku je pak osazen těsnicí profil, který zajišťuje vzduchtěsnost zmíněné dutiny. Distanční rámečky jsou vyrobeny buď z plastických hmot, ušlechtilých ocelí nebo hliníku.

Řešení vazby mezi oknem a ostěním

Řešení a provedení detailu v místě kontaktu rámu okna a ostění není jednoduchou záležitostí a přesto je ve stavební praxi hodně podceňováno. Z hlediska stavební tepelné techniky je třeba, aby součinitel prostupu tepla nebyl větší, než součinitel prostupu tepla vlastního okna a aby byla vyloučena kondenzace vodní páry v daném místě.

4.1.7 POŽADAVKY NA VZDUCHOTĚSNOST

Nízkoenergetický dům má být pokud možno vzduchtěsný. To proto, že jakékoliv nežádoucí proudění venkovního vzduchu do interiéru nebo do stavebních konstrukcí má velmi výrazný vliv na tepelné ztráty. To se týká i větracích průduchů z kuchyňské digestoře, spíže, garáže, kotelny apod. Požadavek na vzduchtěsnost je však v rozporu s hygienickými požadavky na větrání interiéru. Problém bývá řešen zpravidla nuceným větráním s rekuperací. Pokud jde o konstrukce, zde může být příčinou zvýšených tepelných ztrát, například pokud není zajištěna vzduchtěsnost tepelné izolace v šikmé střeše (např. z dolní strany vhodným typem parotěsné vrstvy a z horní strany pojistnou hydroizolací se vzájemně slepenými spoji).

[14]

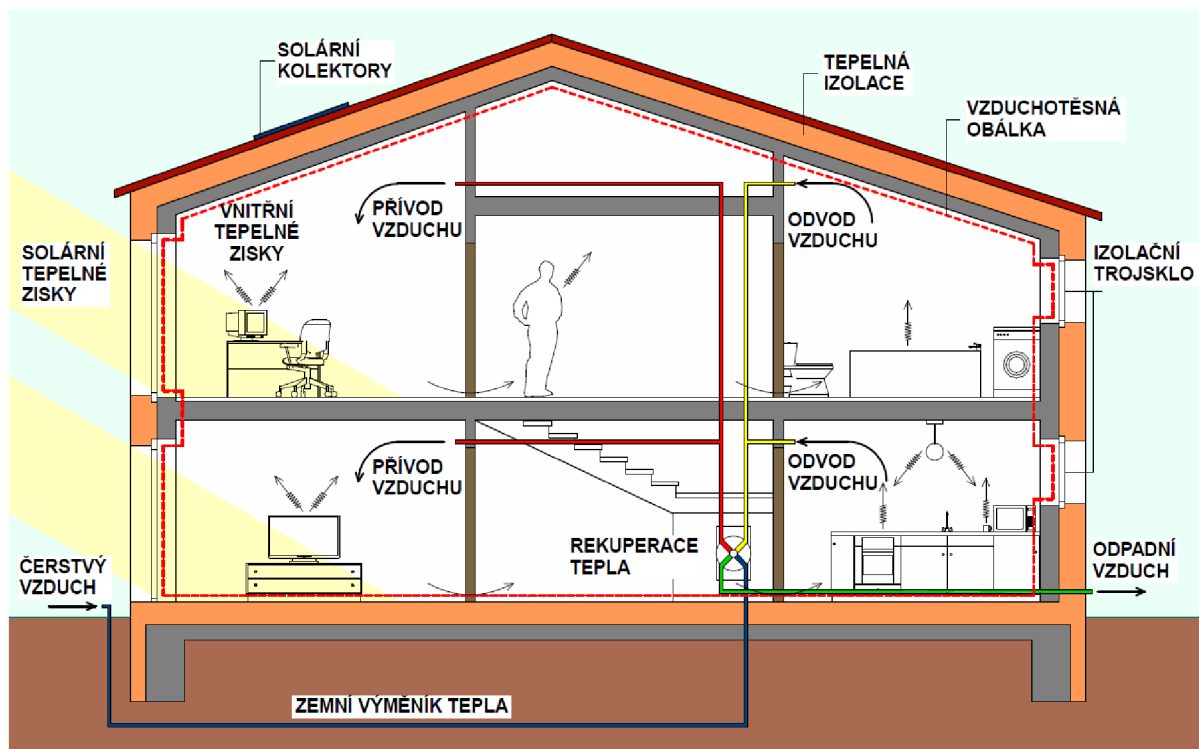
4.2 PASIVNÍ DŮM

Jako pasivní dům označujeme budovu, s komfortním vnitřním prostředím jak v zimním, tak v letním období, která má tak nízkou spotřebu tepla, že se zde nepoužívají standardní vytápěcí systémy. Potřeba tepla na vytápění tohoto typu budovy nepřesahuje 15kWh/m^2 za rok.

Při návrhu takového objektu je třeba dbát na zateplení objektu, díky kterému se tepelné ztráty snižují natolik, že k udržení teploty v místnostech stačí minimální množství tepla. Stejně jako u nízkoenergetického domu, je zvláštní důraz kladen na vzduchotěsnost všech částí objektu. Čerstvý vzduch je do obytných místností vháněn pomocí automatického větracího zařízení s rekuperací tepla. Z odváděného odpadního vzduchu se odebírá teplo, kterým se ohřívá přiváděný čerstvý vzduch. Jak je uvedeno v literaturách, tak ve srovnání se standardními budovami, je potřeba tepla na vytápění objektu snížena až o 90%.

K udržení teploty postačí malé topné těleso, které může být umístěno kdekoliv v bytě a příjemně vyzařovat teplo. V mnoha případech lze od jeho instalace zcela upustit. Pak je pomocí dohřívajícího registru teplo přiváděno do predehřátého čerstvého vzduchu. Dohřev vzduchu většinou postačí jako jediný zdroj tepla. Výsledkem je vytápění čerstvým vzduchem v zimě a ochlazování v létě. Úsporami nákladů za výkonný kotel, topná tělesa, termostatické ventily, rozvodové potrubí apod. se z části pokryjí zvýšené náklady na důkladnou tepelnou izolaci. [15]

Je důležité v těchto objektech myslet i na minimalizaci ostatních potřeb energií v objektu. Vhodným příkladem je snížení spotřeby elektrické energie na provoz domácích spotřebičů. Doporučuje se pořizovat tzv. efektivní domácí spotřebiče (to jsou spotřebiče v minimální energetické třídě A).



Obr. 13 Koncepce pasivního domu.

Pro naplnění parametrů pasivního domu je třeba respektovat následující parametry:

1) Umístění stavby

Jako nejvhodnější se jeví orientace obytných místností k jihu.

2) Pasivní solární zisky

Jižně orientovaná nezastíněná budova, je současně solárním domem. Pasivní solární zisky mohou pokrýt až 40% tepla na vytápění objektu při minimalizovaných tepelných ztrátách. Pro dosažení těchto výsledků jsou používána okna s nízkou emisivitou trojitého zasklení plněné argonem nebo kryptonem a superizolovaným rámem. Tepelné zisky těchto skel při jižní orientaci a při malém zastínění jsou dokonce i od prosince do února vyšší než tepelné ztráty – součinitel prostupu tepla je nižší než $0,8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. [15]

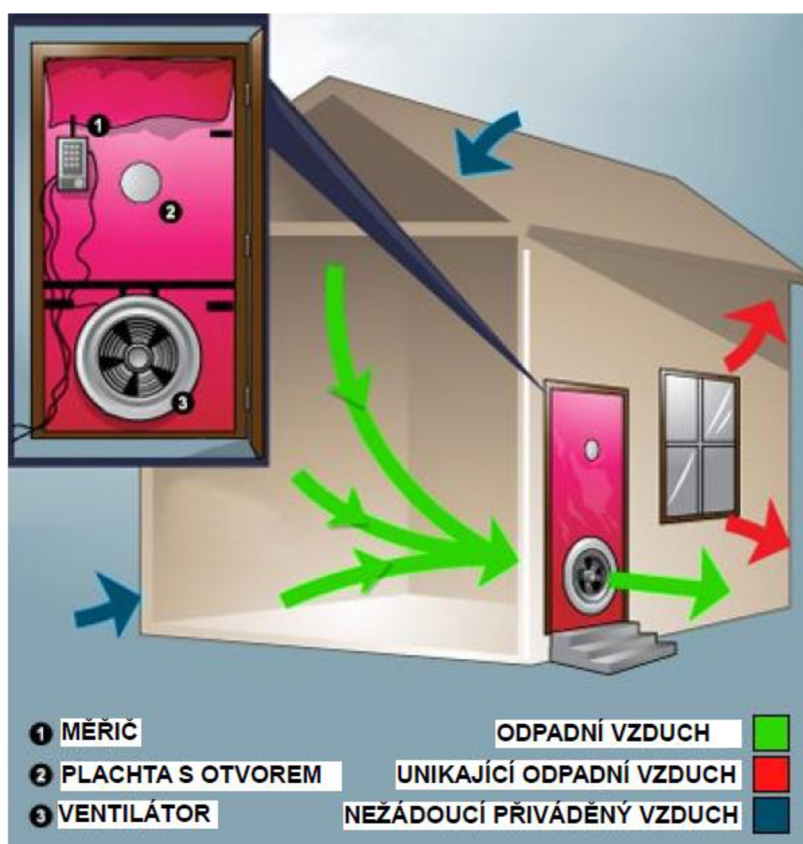
3) Tepelná izolace

Troufám si říci, že nejdůležitější kritérium pasivního domu je kompaktní tepelně izolační obálka bez tepelných mostů v konstrukci s optimálním poměrem prosklení. Všechny stavební dílce tvořící vnější plášť objektu musí mít hodnotu součinitele prostupu tepla nižší než $0,15 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

4) Vzduchotěsnost

Pasivní domy musí být postaveny vzduchotěsně. Celý dům obklopuje vzduchotěsný plášť, spoje mezi stavebními dílci musí být velmi pečlivě utěsněny. Zamezuje se tím nechtěnému proudění vzduchu a snižuje nebezpečí poškození stavby z důvodu vniknutí vlhkosti a kondenzace vodních par v konstrukci.

Netěsnost v plášti budovy se identifikují při tlakovém testu n_{50} prováděné např. metodou Blower Door. K tomu je v budově vytvořen tlakový rozdíl o velikosti 50 Pa. Při tomto zkušebním tlaku může netěsnosti uniknout za hodinu maximálně 60 % z celkového objemu vzduchu v daném prostoru. Důležité je, aby tlakový test byl proveden ihned po provedení konstrukčních prací v takovém stádiu stavby, kdy ještě lze provést dodatečné opravy. Pasivní dům má hodnotu n_{50} maximálně $0,6 \text{ h}^{-1}$. [15]



Obr. 14 Schéma zkoušky Blower Door testu podle [16]

5) Ventilace a vytápění

V prve řadě, větrání není energetickým problémem, nýbrž hygienickou nutností. Má omezit koncentraci CO_2 v interiéru, regulovat relativní vlhkost vzduchu a odstranit nežádoucí pachy a škodlivé látky. Pro omezení obsahu CO_2 na hygienicky přístupné minimum 0,1% je dostačující objemový tok vzduchu 20 až 30 m^3 vzduchu na osobu za hodinu (v dětském pokoji až 35 m^3). [15]

Jelikož je výměna vzduchu při větrání okny závislá na směru proudění vzduchu, rozdílu teplot, rychlosti větru a na chování uživatelů, je doporučeno zajistit spolehlivou výměnu vzduchu v místnostech pomocí mechanických ventilačních zařízení.

Protože pasivní domy spotřebují na vytápění až o 80% méně energie, postačí na jeho vytápění distribuovat teplo pomocí větrací jednotky s rekuperací, která v domě již beztak existuje. Přicházející čerstvý vzduch je za tímto účelem v chladných dnech po průchodu rekuperátorem ohřívám. Teplo pro dohřívání příchozího vzduchu může pocházet například ze systému pro ohřev teplé užitkové vody. Další z možností je také použít malého tepelného čerpadla, které odebírá teplo z odpadního vzduchu poté, co projde rekuperátorem. Ten je v tomto okamžiku stále ještě teplejší než venkovní vzduch a obsahuje také latentní teplo vodní páry uvolňované z různých zdrojů v domě. [15]

Díky zabudovaným filtrům ve větrací jednotce, je přiváděný vzduch zbaven nežádoucí pylů a ostatních alergenů, které nám mohou škodit. V oblastech, s vysokou koncentrací dopravy, neproniká hluk do domu a přesto je uvnitř objektu bezprašný čerstvý vzduch. Jednotka také zajišťuje výměnu vzduchu v interiéru i při nepřítomnosti obyvatel nebo v noci. Samozřejmě lze i v pasivních domech kdykoli v případě potřeby otevírat okna.

Pro dosažení ještě větší úspory, je doporučena instalace solárních systémů pro podporu vytápění a ohřevu teplé užitkové vody.

6) Rozvody a instalace

Potrubí pro přívod teplé vody je nutné instalovat pokud možno co nejkratší, celé vést uvnitř vytápěné části budovy a použít pro něj dobrou izolaci. Je třeba použít izolovaný nosník koupelňové vany a instalovat armatury šetřící vodu. Zásobník na teplou vodu pak umístit ve vytápěné části domu a velice dobře zaizolovat. Všechny domácí spotřebiče musí být minimálně v energetické třídě A. V případě myčky a pračky zvolit modelovou řadu, do které je možné napojit teplou vodu. Instalovat kuchyňskou digestoř pouze s cirkulačním provozem s kovovými lapači tuku. [15]

4.3 NULOVÝ DŮM

Jako nulový dům je označován takový dům, jehož potřeba tepla pro vytápění se blíží nule, konkrétně je menší než $5,0 \text{ kWh/m}^2$ za rok. Takovýto objekt je tedy ještě méně náročný na energii, než nízkoenergetický a pasivní dům.

Dosažením nulové potřeby energie u objektu většinou není dosaženo pomocí velkého množství tepelné izolace, ale díky využití moderních technologií, jako například solárních

panelů, které vyrábějí energii. Jako u nízkoenergetického a pasivního domu, je u nulového domu předpokládána správná orientace vůči světovým stranám, klimatické podmínky a tvar domu.

Jak již bylo řečeno, běžnou součástí nulových domů jsou fotovoltaické panely, které vyrábějí energii, resp. solární kolektory, které mohou být využity například pro ohřev vody, případně pro přitápění. Pokud tyto solární panely vyrobí více energie, než nulový dům spotřebuje, tak takovýto objekt bývá označován jako aktivní neboli plusový dům. V tomto případě je možné dodávat nadbytek elektřiny do sítě.

Zmíněný nadbytek energie si nulový dům vyrobí především v létě ze solárního zařízení. Tuto energii lze uchovávat v akumulacích zásobnících a uchovat si ji na zimní období. Tuto energii lze skladovat například ve speciálních akumulátorech. Již zde je patrné, že nulové domy ke svému provozu potřebují nákladné moderní technologie.

5 SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

Již odedávna se snaží obyvatelé vytvořit v interiérech budov takové prostředí (samozřejmě úměrně potřebám a úrovni znalostí v dané době), které se v technické terminologii vyjadřuje pojmem vnitřní tepelná pohoda. Tento subjektivně příjemný stav nastává, pokud prostředí umožňuje udržení stálé teploty těla na úrovni blízké 35°C až 37°C, bez mimořádných nároků na termoregulaci. To znamená, že člověku není ani chladno ani příliš teplo – cítí se příjemně a spokojeně. Optimální teplota vzduchu v interiéru budovy závisí na vnitřní produkci tepla, na stáří a zdraví jedince, na jeho schopnosti aklimatizovat se na určité klimatické podmínky, na druhu oděvu a také na regionálních zvyklostech v jednotlivých geografických oblastech.

Ve druhé polovině 20. století se začaly používat jak výpočtové metody pro hodnocení vnitřní tepelné pohody, později také technické prostředky pro zabezpečení příslušných interiérových parametrů.

V dnešní moderní době, tráví člověk nejvíce času právě ve vnitřním prostoru budov, proto musíme dbát na to, aby podmínky v těchto prostorách splňovali určité kritéria, která zabraňují negativním vlivům na lidské zdraví.

V letním období přicházejí na řadu známé problémy s přehříváním místností v prostorách pod střechou, kdy bez nějakého opatření, je pobyt v těchto prostorách velmi nepříjemný a obtěžující. Tento problém vzniká v letním období hlavně u domů s plochou a pultovou střechou, kde je na střeše použita asfaltová krytina tmavé barvy. V letním období v přehřátých místnostech pod střechou není možné teplo vyvětrat, takže pokud si obyvatelé těchto domů přejí v poklidu bydlet je nutné tuto situaci vhodným způsobem řešit. Problém nastává u pultových a plochých střech také v zimě, kdy teplo prostupuje stropem obráceně a ohřívá tak střešní konstrukci. Na střeše těchto domů odtává sníh, který stéká k okraji okapu a na fasádu. Nejenže trpí krytina, která se musí následně často opravovat, ale zároveň se objevují i problémy s rampouchy, protože voda, která odtaje, nám následně u okapu zmrzne. Při použití zelené střechy, která dokážeme navrhnout na střechy se sklonem až cca 60° při použití vhodných stabilizačních zařízení, se přehřívání místnosti v letním období výrazně zmenšuje a v zimním období snižuje teplotní výkyvy ve střešním prostoru, v důsledku toho snižuje náklady na vytápění. Pomocí tepelné stability v zimním a letním období dokážeme zjistit, zda se může místnost v létě přehřívát nebo zda se musí v zimě více topit. Podrobněji v kapitolách 5.2 a 5.3.

Kvalitu vnitřního prostředí (vnitřní tepelnou pohodu) lze hodnotit dvěma způsoby: subjektivně (na základě vlastních pocitů) a objektivně (dle provedených měření či výpočtů). Stanovení hodnotících kritérií pro subjektivní vnímání tepelné pohody je obtížné a tyto nebudou nikdy vyhovovat všem osobám, pobývajícím v daném prostředí (vždy se najde určitý podíl osob nespokojených). Jedním z objektivních faktorů, které ovlivňují vnitřní tepelnou pohodu je tepelná stabilita místnosti, která se hodnotí zvláště v zimním a zvláště v letním období [11].

5.1 VYMEZENÍ POJMU „TEPELNÁ POHODA“

Jak již bylo zmíněno výše, abychom mohli posoudit vnitřní tepelné podmínky v budově, byla zavedena charakteristika „tepelná pohoda vnitřního prostředí“. Jedná se o veličinu, která se tepelnou pohodou zabývá, ale neumožňuje příliš kvantifikovat její výstupy. Jinými slovy, nelze nijak přesně určit interval teplot, kdy lidé pocítují příjemný či nepříjemný teplotní stav v místnosti. Veškeré výsledky jsou založeny na subjektivních pocitech a opírá se o statistická vyhodnocení.

Tepelná pohoda je stav, kdy je dosaženo rovnováhy mezi tepelnou produkcí člověka a okolního prostředí. Vnímání tepelné pohody je pro každého člověka velice individuální, proto se jedná o subjektivní stav. Můžeme říci, že se jedná o stav, kdy je daná osoba spokojena s vnitřním prostředím, ve kterém se nachází. Tepelná rovnováha je jedním z výchozích bodů pro zajištění tepelné pohody, ale ne vždy vyjadřuje její míru. Rovnice tepelné rovnováhy vyjadřuje tepelné toky ve watttech a má tvar:

$$M - W_m = C + R_s + E_{res} + C_{res} \quad (4),$$

kde: M energetický výdej [W/m^2],

W_m mechanická práce [W/m^2],

C tepelný tok konvekcí [W/m^2],

R_s výdej tepla sáláním [W/m^2],

E_{res} výdej tepla odpařováním vody v plicích [W/m^2],

C_{res} teplo odevzdané ohříváním vdechovaného vzduchu [W/m^2].

Na levé straně je teplo produkované člověkem a na pravé straně teplo vydávané do prostředí.

Existuje mnoho dalších vlivů, které ovlivňují vnímání tepelné pohody či nepohody, jako například geografické vlivy, vlivy sociálně-kulturní, zvyky a očekávání. Závisí také na tepelných podmínkách, do kterých posuzovaná osoba adaptována.

Hranice tepelné pohody mohou být zjišťovány několika způsoby. Nejčastěji se jedná o dotazníkovou metodu, kdy testované osoby reagují na dotazy ohledně tepelných vlastností vzduchu v místnosti a zároveň jsou zaznamenávány parametry vzduchu. Dalším způsobem je měření fyziologických změn člověka (pocení, teplota a vlhkost pokožky). Tato pozorování se provádí v klimatických komorách.

5.2 TEPELNÁ STABILITA V ZIMNÍM OBDOBÍ

Kritérium tepelné stability místnosti v zimním období se zavedlo na základě požadavku, aby i v nejvíce ochlazované místnosti budovy (tzv. kritická místnost) byl během otopné přestávky při přerušovaném vytápění (např. v noci) dodržen tepelný komfort, a zároveň aby na vnitřních površích jednotlivých konstrukcí nedocházelo ke kondenzaci vodních par a tím ke vzniku plísní (hygienická kritéria).

Poznámka 1: *Je to však i energetické kritérium – čím větší je pokles teploty během otopné přestávky, tím větší je potom spotřeba tepla na zátap a naopak.*

Poznámka 2: *Pokud je potřeba zajistit shodné chladnutí místností v rámci objektu, stanovuje se tzv. ekvivalentní tepelná stabilita místností, což je výhodné s ohledem na možnost jednotného režimu vytápění. Tento přístup se uplatní např. při řešení místností nad sebou a napojených na jednu větev ústředního vytápění.*

Tepelná stabilita místnosti v zimním období (její tepelná setrvačnost) se hodnotí poklesem výsledné teploty v místnosti $\Delta\theta_v(t)$ [°C] na konci doby chladnutí t [s]. Doba chladnutí se obvykle uvažuje 8 h, pokud provozní podmínky nevyžadují hodnocení pro jinou dobu. Pro hodnocení se vybere tzv. kritická místnost, tedy místnost s největší tepelnou ztrátou. Nejčastěji to bývá rohová místnost pod střechou. Maximální pokles výsledné teploty v kritické místnosti $\Delta\theta_v(t)$ na konci doby chladnutí t musí být menší než požadovaná hodnota $\Delta\theta_{v,N}(t)$ [11].

Po zadání geometrických parametrů místnosti a stavebně fyzikálních vlastností konstrukcí se stanoví okrajové podmínky a kritéria pro posouzení. Pokud je budova vytápěna nepřetržitě, místnosti se z hlediska tepelné stability neposuzují (může se ale na přání investora jejich

tepelná stabilita ověřit pro případ havárie nebo opravy otopné soustavy – aby nedošlo k poškození technologie vlivem nízké teploty apod.).

Pokud je vytápění přerušované, vypočte se pokles teploty v kritické místnosti pro zvolenou dobu chladnutí. Je-li kritérium splněno, provede se ještě energetické vyhodnocení, které ověří, zda přerušovaný otopný režim je úspornější, než režim nepřerušovaný (tj. zda spotřeba tepla na přerušované vytápění Q_p [GJ] je menší, než spotřeba tepla na nepřerušované vytápění Q_n [GJ]) v opačném případě nemá smysl přerušované vytápění vůbec navrhovat [11].

V případě, že vypočítaný pokles výsledné teploty v místnosti je větší, než požadovaná hodnota, musí se navrhnout patřičné úpravy:

- snížení výměny vzduchu, ne však pod hygienicky nutné minimum,
- zmenšení plochy průsvitných výplňových konstrukcí, musí však zůstat splněny požadavky na denní osvětlení,
- zvýšení hmotnosti akumulčního jádra,
- zvětšení tepelné jímavosti první vnitřní vrstvy konstrukce,
- zvýšení tepelného odporu konstrukce (snížení hodnoty součinitele prostupu tepla).

Podrobný výpočet vychází z energetické bilance vnitřního prostoru místnosti a výstupem je průběh výsledné teploty místnosti ve zvoleném časovém intervalu. Pro různé venkovní teploty lze určit přípustnou dobu otopné přestávky během roku. Výpočet je však rozsáhlý a bez patřičného programového vybavení dosti pracný [11].

1) Stanoví se množství tepla W [J], akumulovaného v konstrukcích místnosti:

$$W = \sum_l^m A_m \cdot \sum_l^j (c_{m,j} \cdot \rho_{m,j} \cdot d_{m,j} \cdot \theta_{m,m,j}) \quad (5),$$

kde: $\sum_l^m A_m$ součet ploch vnitřních povrchů konstrukcí místnosti [m^2],

$c_{m,j}$ měrná tepelná kapacita j -té vrstvy a m -té konstrukce [$J/(kg \cdot K)$],

$\rho_{m,j}$ objemová hmotnost j -té vrstvy a m -té konstrukce [kg/m^3],

$d_{m,j}$ tloušťka j -té vrstvy a m -té konstrukce [m],

$\theta_{m,m,j}$ střední teplota j -té vrstvy a m -té konstrukce na počátku chladnutí [$^{\circ}C$],

pro vnitřní konstrukce platí:

$$\theta_{m,m,j} = \theta_{ai} \quad (6),$$

pro vnější konstrukce platí:

$$\theta_{m,m,j} = \theta_{ai} - U_m \cdot \left(R_{m,si} + \sum_l^j R_{m,j} \right) \cdot (\theta_{ai} - \theta_e) \quad (7),$$

nebo zjednodušeně (pro jednovrstvou konstrukci):

$$\theta_{m,m} = \theta_{ai} - \frac{\theta_{ai} - \theta_e}{2} \quad (8),$$

kde: θ_{ai} teplota vnitřního vzduchu na počátku chladnutí (v čase ustáleného teplotního stavu) [°C],

U_m součinitel prostupu tepla m -té konstrukce [W/m².K],

$R_{m,si}$ odpor při přestupu tepla na vnitřní straně m -té konstrukce [m².K/W],

$\sum_l^j R_{m,j}$ součet tepelných odporů vnitřních vrstev m -té konstrukce až do poloviny její j -té vrstvy [m².K/W],

θ_e návrhová teplota venkovního vzduchu v zimním období [°C].

Do výpočtu množství akumulovaného tepla se zahrnou pouze vrstvy s vysokou akumulací schopností. Vrstvy s nízkou akumulací schopností (např. výplňové konstrukce, tepelné izolace apod.) a vrstvy do tl. 20 mm (např. vnitřní omítky) se zanedbají.

2) Stanoví se teplota vnitřního vzduchu $\theta_{ai}(t)$ [°C] v době chladnutí t [s]:

$$\theta_{ai}(t) = \theta_e + (\theta_{ai} - \theta_e) \cdot e^{-\frac{\phi_c \cdot t}{W}} \quad (9),$$

kde: ϕ_c celková tepelná ztráta místnosti [W].

3) Stanoví se výsledná teplota $\theta_v(t)$ [°C] v době chladnutí t [s]:

$$\theta_v(t) = \theta_{ai}(t) + 650 \cdot V_{LV} \cdot \frac{\theta_{ai}(t) - \theta_e}{\sum (A_m \cdot h_{m,si})} \quad (10),$$

kde: $h_{m,si}$ součinitel přestupu tepla na vnitřní straně m -té konstrukce: $h_{m,si} = \frac{1}{R_{si}}$ [m³],

V_{LV} objemový tok vzduchu proudícího do místnosti při větrání:

$$V_{LV} = n \cdot \frac{V}{3600} [\text{m}^3/\text{s}],$$

kde: V objem vnitřního prostoru místnosti [m^3],

n intenzita výměny vzduchu v místnosti [h^{-1}] (pro obytné místnosti se obvykle uvažuje $n = 0,5 \text{ h}^{-1}$).

4) Stanoví se výsledný pokles teploty místnosti v zimním období $\Delta\theta_v(t)$ [$^{\circ}\text{C}$] v době

chladnutí t [s]:

$$\Delta\theta_v(t) = \theta_i - \theta_v(t) \quad (11),$$

kde: θ_v výsledná teplota na počátku chladnutí ($t=0$): odpovídá návrhové vnitřní teplotě

θ_i dle ČSN 73 0540-3: 2005.

5.3 TEPELNÁ STABILITA V LETNÍM OBDOBÍ

Vnitřní prostory se z hlediska tepelné stability v letním období hodnotí na základně podmínek neustáleného teplotního stavu, který je definován výpočtovými hodnotami:

- průmětné letní denní teploty vnějšího vzduchu,
- výsledné teplotní amplitudy vnějšího prostředí,
- amplitudy intenzity globálního slunečního záření,
- střední intenzitou slunečního záření,
- intenzitou výměny vzduchu v místnosti,
- tepelnými zisky z vnitřních zdrojů tepla,
- odporů při přestupu tepla na vnitřní a vnější straně konstrukce.

V letním období se tepelná stabilita místnosti hodnotí pomocí nejvyšší denní teploty vzduchu v místnosti $\theta_{ai,max}$.

Stejně jak u stability v zimním období, tak i zde pro stabilitu v letním období platí, že hodnocení provádíme pro kritickou místnost v budově, což je z hlediska letního období místnost s největší plochou přímo osluněných výplňových konstrukcí orientovaných na západ, jihozápad, jih, jiho-východ a východ. Pro posuzování tepelné stability v zimním a letním období tedy mohou být v budově různé kritické místnosti.

Kritická místnost musí vykazovat:

- nejvyšší denní teplotu vzduchu v místnosti v letním období $\theta_{ai,max}$ [°C], dle vztahu:

$$\theta_{ai,max} \leq \theta_{ai,max,N} \quad (12),$$

kde: $\theta_{ai,max,N}$ požadovaná hodnota nejvyšší denní teploty vzduchu v místnosti [°C], stanovená z tabulky 3.

Budovy vybavený strojním chlazením musí splnit podmínku nejvyšší denní teploty vzduchu v místnosti v letním období $\theta_{ai,max} \leq 32^\circ\text{C}$, přičemž se do výpočtu pro tento účel nezahrnuje ani chladicí výkon klimatizace ani tepelné zisky od technologických zařízení a kancelářského vybavení. Nesplnění požadavku se připouští výjimečně, prokáže-li se, že jeho splnění není technicky možné nebo ekonomicky vhodné s ohledem na životnost budovy a její provoz [5].

Tab. 5. Požadované hodnoty nejvyšší denní teploty vzduchu [5].

Druhy budovy	Nejvyšší denní teplota vzduchu v místnosti v letním období $\theta_{ai,max,N}$ [°C]
Nevýrobní ¹⁾	27,0
Ostatní s vnitřním zdrojem tepla do 25 W.m ⁻³ včetně	29,5
Ostatní s vnitřním zdrojem tepla nad 25 W.m ⁻³	31,5
¹⁾ U obytných budov je možné připustit překročení požadované hodnoty nejvíce o 2°C na souvislou dobu nejvíce 2 hodin během normového dne, pokud s tím investor (stavebník, uživatel) souhlasí.	

Pro zvýšení tepelné stability místnosti v letní období je možné aplikovat některé z následujících opatření:

- vhodný architektonický návrh objektu,
- zvýšení akumulační schopnosti jak obálkových tak vnitřních konstrukcí,
- vhodná povrchová úprava obalových konstrukcí,
- vhodný návrh a skladba obalových konstrukcí,
- návrh odvětrávané vzduchové vrstvy,
- redukce zasklených ploch,
- užití stínících prvků,
- instalace klimatizačního zařízení.

6 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Ve smyslu studované problematiky byly vymezeny tři cíle disertační práce následujícími body:

1) Sestavení dynamického tepelného modelu budovy

Sestavení dynamického tepelného modelu budovy, který pracuje s nestacionárními klimatickými okrajovými podmínkami včetně výpočtu trajektorie pohybu slunce po obloze. Tento simulační nástroj nepočítává tepelnou stabilitu jen pro posuzovanou kritickou místnost, ale započítává celý posuzovaný objekt jako tepelný systém. Uvažuje s vazebnými tepelnými toky, jak je blíže rozvedeno v kapitole 5.1.

Pomocí výsledků výpočtové simulace tepelného modelu může být odvozena potřebná mocnost vegetačních střech pro určitý typ budovy.

2) Upřesnění dynamického tepelného modelu budovy, započtení vnitřních zdrojů tepla

Metodika určení vnitřních zdrojů tepla je popsána blíže v kapitole 9. Pomocí této metodiky bude tepelný model upřesněn o vliv vnitřních zdrojů, přesněji osob, svítidel a dalších zdrojů tepla, na teplotní stav objektu.

3) Prokázání účinnosti vegetační střechy na tepelnou stabilitu u bytové výstavby z hlediska klimatických podmínek České republiky

Prokázání účelnosti vegetační střechy pomocí naměřených reálných teplot v objektu s vegetační střechou. Takový objekt byl numericky simulován v prostředí tepelného modelu budovy a porovnán s experimentálními výsledky pořízenými na reálném stavebním objektu. Důkaz účelnosti vegetační střechy pro stavební objekt vyplývá v porovnání s vlastnostmi objektu s klasickou střešní konstrukcí.

Optimalizaci typů vegetačních střech a konstrukčního uspořádání stavebních částí budov, které se odlišují materiálovou skladbou, lze provádět tímto způsobem pouze při explicitním vymezení místních klimatických podmínek.

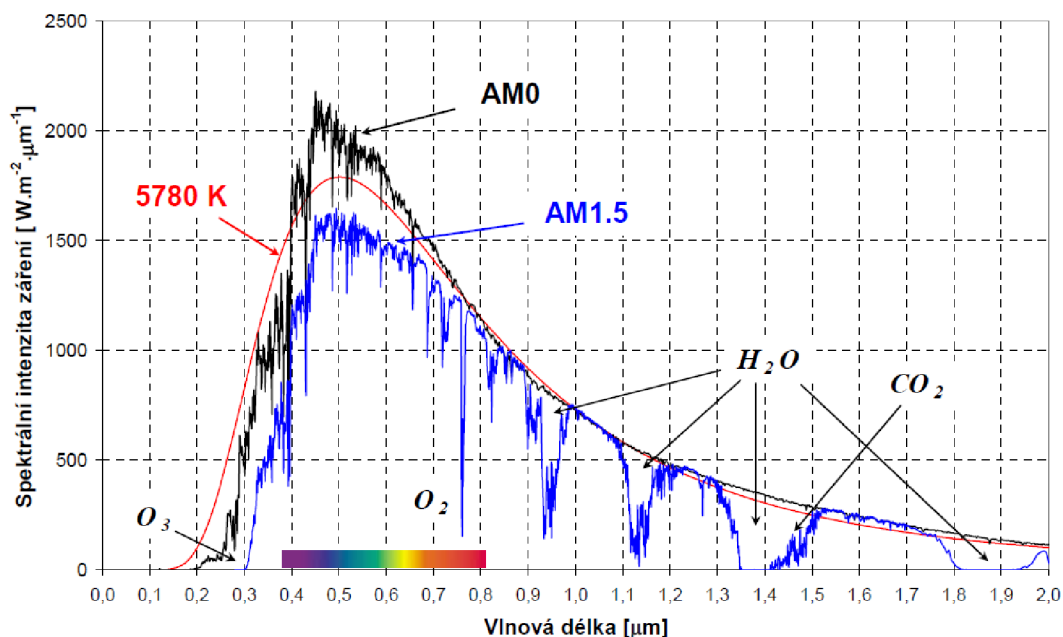
7 ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ

7.1 OSLUNĚNÍ

Vzdálenost mezi Sluncem a Zemí není po celý rok stálá, mění se mezi $1,47 \cdot 10^8$ km a $1,52 \cdot 10^8$ km. Toto způsobuje změnu záření I_e mezi 1325 W/m^2 a 1420 W/m^2 , průměrná hodnota je označována sluneční konstanta I_0 je $I_0 = 1367 \pm 2 \text{ W/m}^2$. Tato hodnota platí mimo zemskou atmosféru. Hodnoty záření na zemském povrchu jsou ovlivněny disperzí při průchodu atmosférou a jsou zejména způsobené:

- odrazem od atmosféry,
- absorpcí v atmosféře (hlavně O_3 , H_2O , O_2 , CO_2 aj.),
- Rayleighovým rozptylem,
- Mieovým rozptylem.

Pohltivost slunečního záření v atmosféře plyny (vodní pára, ozón a kyslík uhličitý) je vysoce selektivní. Obrázek 15 ukazuje spektrum vně atmosféry (AM 0 podle „Air Mass“) a na povrchu Země (AM 1,5). Spektrum popisuje složení světla a příspěvek různých vlnových délek k celkovému záření. Podíl 7 % z mimozemského spektra (AM 0) připadá na ultrafialové pásmo, 47 procent do viditelného pásma a 46 procent zbývá na infračervené spektrum. Pozemské spektrum AM 1,5 vykazuje energetické ztráty způsobené pohlčením záření v jistých vlnových délkách atmosférickými plyny.



Obr. 15 Průběh spektrální intenzity záření AM0, AM1.5 a černého tělesa 5780 K podle

vlnové délky

Molekuly plynu s průměry menšími než je vlnová délka světla způsobí Rayleighův rozptyl. Míra Rayleighova rozptylu se zvyšuje se zmenšující se vlnovou délkou světla. Částičky prachu a další nečistoty ovzduší způsobí Mieův rozptyl. Průměr těchto složek je větší než vlnová délka světla. Mieův rozptyl významně závisí na geografické poloze, ve vysokohorských oblastech je relativně nízký, zatímco v průmyslových oblastech je obvykle vysoký. Tabulka 3.4 ukazuje příspěvky Mieova a Rayleighova rozptylu a pohlcení pro různé výšky Slunce h_0 . Přírodní vlivy, jako jsou mraky, sníh, déšť nebo mlha, mohou způsobit dodatečné ztráty. Znalost přesného záření v daném místě je důležitým požadavkem pro plánování energetických systémů. Je výhodné používat odhady z již existujících databází.

7.1.1 SLUNEČNÍ ZÁŘENÍ NA ZEMKŠÉM POVRCHU

Část sluneční záření se při průchodu atmosférou rozptyluje a odráží, kdežto sluneční paprsky mimozemského slunečního světla jsou prakticky paralelní. Pozemské sluneční světlo se skládá z přímé a difúzní složky. Přímé sluneční záření přicházející rovnou ze Slunce je směrově orientované, kdežto difúzní záření nemá definovaný směr. Celkové záření na horizontálním zemském povrchu se označuje globální záření $I_{G,hor}$ jako součet přímého záření $I_{dir,hor}$ a difúzního záření $I_{diff,hor}$ na horizontálním povrchu:

$$I_{G,hor} = I_{dir,hor} + I_{diff,hor} \quad (13)$$

Většina kalkulací pro solární systémy potřebuje složky rozdělit na přímé a difúzní záření. Empirické funkce nalezeny statistickým šetřeními mohou rozdělit celkové záření do přímého a difúzního záření, např. (Reindl et al, 1989). Hodinové hodnoty celkového záření $I_{G,hor}$ mimozemské záření I_0 a výška Slunce h_0 se vyjadřuje koeficientem k_T :

$$k_T = \frac{I_{G,hor}}{I_0 \sin h_0} \quad (14)$$

Pomocí tohoto koeficientu lze odhadovat složku difúzního záření $I_{diff,hor}$ s použitím celkového záření $I_{G,hor}$ a výšky Slunce nad obzorem h_0 :

$$I_{diff,hor} = I_{G,hor}(1,020 + 0,254k_T + 0,0123 \sin h_0) \quad \text{pro } k_T \leq 0,3 \quad (15)$$

$$I_{diff,hor} = I_{G,hor}(1,400 - 1,749k_T + 0,177 \sin h_0) \quad \text{pro } 0,3 < k_T \leq 0,78 \quad (16)$$

$$I_{diff,hor} = I_{G,hor}(0,486k_T - 0,182 \sin h_0) \quad \text{pro } k_T > 0,78 \quad (17)$$

Difúzní složka záření bývá za jasných dnů nízká, kdy jsou globální hodnoty záření vysoké, pak $k_T \rightarrow 1$, ale i tak nabývá difúzní složka záření zřídka pod 20 %. Pokud nastane zamračený den a celkové záření je nízké, kdy $k_T \rightarrow 0$, difúzní složka záření může nabývat až 100 %.

7.1.2 INTERPOLACE POLOHY SLUNCE

Poloha slunce je významná pro kalkulaci energetických systémů. Okamžitá poloha slunce se označuje výškou slunce nad horizontem h_0 a slunečním azimutem A_s . Výška slunce nad horizontem h_0 definuje svislý úhel mezi středem slunce a vodorovnou rovinou pozorovatele. Sluneční azimut A_s popisuje úhel mezi zeměpisným severem a kolmým průmětem středu slunce do vodorovné roviny pozorovatele. Podle EN ISO 9488 se sluneční azimut uvádí jako úhel mezi postavením slunce a jižním směrem ve směru chodu hodinových ručiček na severní polokouli a mezi postavením slunce a severem měřeného proti směru hodinových ručiček na jižní polokouli (CEN 1999).

Poloha Slunce je ovlivňována solární deklinací jako úhlem mezi plochou procházející světovým rovníkem a rotační plochou Země kolem Slunce. Ta kolísá během roku mezi $\delta \in [-23^\circ 26,45'; 23^\circ 26,45'] \equiv [-23,4408; 23,4408]$, neboť oběžná dráha země kolem slunce není kruhová, mění se během roku délka dne. V úvahu se bere časová korekce podle časové rovnice *eqt* (equation of time). Pro výpočet polohy slunce na obloze je známa řada algoritmů.

Algoritmus podle DIN 1985

Relativně jednoduchý algoritmus je popsán vztahy:

$$\text{Denní úhel } \vartheta = 360^\circ \cdot \frac{\text{pořadový den v roce}}{\text{počet dnů v roce}} \quad [^\circ] \quad (18),$$

Solární deklinace $\delta(\vartheta)$

$$\delta(\vartheta) = 0,3948 - 23,559 \cos(\vartheta + 9,1^\circ) - 0,3915 \cos(2\vartheta + 5,4^\circ) - 0,1764 \cos(3\vartheta + 26,0^\circ) \quad [^\circ] \quad (19),$$

Časová korekce *eqt*

$$\text{eqt}(\vartheta) = 0,0066 + 7,3525 \cos(\vartheta + 85,9^\circ) + 9,9359 \cos(2\vartheta + 108,9^\circ) + 0,3387 \cos(3\vartheta + 105,2^\circ) \quad [\text{min}] \quad (20)$$

Započtení místního čas, (čas na nultém poledníku v Greenwich ($GMT = 0$), centrálním evropským časem $CET = 1h$, pacifickým standardním časem $PST = -8h$) a zeměpisnou délkou λ se místní čas MLT vyjádří:

$$MLT = \text{místní čas} - \text{časové pásmo} + 4\lambda / 60. \quad (21)$$

Sloučením s časovou korekcí eqt platí vztah: $\text{solární čas} = MLT + eqt/60$ (22)

Mezi zeměpisnou šířkou φ daného místa a hodinovým úhlem ω platí:

$$\omega = (12 \text{ hod} - \text{solární čas}) \cdot \frac{15^\circ}{h} \quad [\text{hod}] \quad (23)$$

Podle toho se obdrží hledané úhly výšky slunce nad horizontem h_0 a sluneční azimut a_s :

$$h_0 = \arcsin(\cos \omega \cdot \cos \varphi \cdot \cos \delta + \sin \varphi \cdot \sin \delta) \quad [\text{rad}] \quad (24)$$

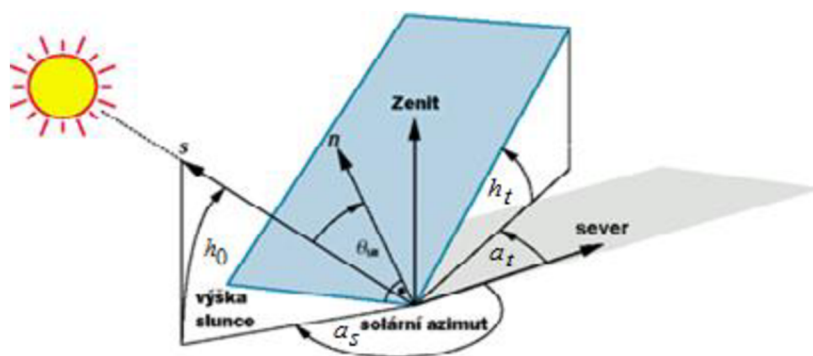
$$a_s = 180^\circ - \arccos\left(\frac{\sin h_0 \cdot \sin \varphi - \sin \delta}{\cos h_0 \cdot \cos \varphi}\right) \quad \text{pro solární čas} < 12:00 \text{ hod} \quad (25)$$

$$a_s = 180^\circ + \arccos\left(\frac{\sin h_0 \cdot \sin \varphi - \sin \delta}{\cos h_0 \cdot \cos \varphi}\right) \quad \text{pro solární čas} \geq 12:00 \text{ hod} \quad (26)$$

Činitel propustnosti atmosféry závisí na jejím znečištění prachem a podle oblasti se většinou pohybuje pro slunný den mezi hodnotami 0,7 až 0,9.

7.1.3 GEOMETRIE DOPADU SLUNEČNÍHO ZÁŘENÍ

Situace úhlů dopadu slunečního záření na obecně orientovanou rovinu je patrná na obrázku



Obr. 16 Schéma označení úhlů při dopadu slunečního záření na skloněnou plochu

Předmětem je výpočet úhlu dopadu θ_{ilt} na obecně nakloněnou plochu. Ten je dán mezi vektorem s dopadajících paprsků od slunce a normálou nakloněné plochy n . Poloha slunce je dána ve sférických souřadnicích a ty je potřeba převést do karteziánských souřadnic s hlavními osami vektorů na východ, jih a ve směru zenitu. Vektory s a n jsou určeny:

$$s = (\sin a_s \cdot \cos h_0, \quad -\cos a_s \cdot \cos h_0, \quad \sin h_0) \quad (27)$$

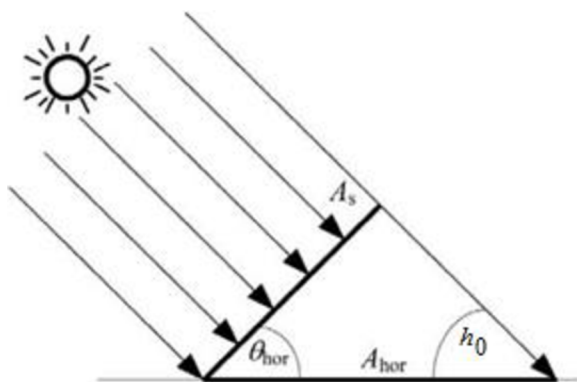
$$n = (\sin a_t \cdot \sin h_t, -\cos a_t \cdot \sin h_t, \cos h_t) \quad (28)$$

Vektory jsou v normalizovaném tvaru, tak úhel dopadu na nakloněnou plochu je skalárním součinem obou vektorů:

$$\begin{aligned} \theta_{tilt} &= \arccos(s \cdot n) = \\ &= \arccos(\sin a_s \cdot \cos h_0 \cdot \sin a_t \cdot \sin h_t + \cos a_s \cdot \cos h_0 \cdot \cos a_t \cdot \sin h_t + \sin h_0 \cdot \cos h_t) = \\ &= \arccos(\cos h_0 \cdot \sin h_t \cdot \cos(\sin a_s \cdot \sin a_t - \cos a_s \cdot \cos a_t) + \sin h_0 \cdot \cos h_t) \end{aligned} \quad (29)$$

Celkové záření $I_{G,tilt}$ na nakloněný solární panel je složeno z přímého záření $I_{dir,tilt}$, záření odraženého od atmosféry $I_{diff,tilt}$ a taky ze záření $I_{refl,tilt}$ odraženého od země (složka která při horizontálním umístění neexistuje):

$$I_{G,tilt} = I_{dir,tilt} + I_{diff,tilt} + I_{refl,tilt} \quad (30)$$



Obr. 17 Geometrické schéma záření dopadajícího na vodorovnou oblast A_{hor} a oblast A_s orientovanou kolmo ke slunci

S použitím θ_{tilt} z rovnice výše se vyjádří intenzita záření dopadající na nakloněnou plochu:

$$I_{dir,s} = \frac{I_{dir,tilt}}{\cos \theta_{tilt}} \quad (31)$$

Přímá složka záření na nakloněnou se vyjádří z přímé složky záření na vodorovnou plochu:

$$I_{dir,tilt} = I_{dir,hor} \frac{\cos \theta_{tilt}}{\sin h_0} \quad (32)$$

Pro výpočet difúzní složky záření $I_{diff,tilt}$ se použije úhlu sklonu nakloněné plochy γ_t a složky přímého záření na vodorovnou plochu $I_{dir,hor}$:

$$I_{diff,tilt} = \frac{1}{2} \cdot I_{diff,hor} (1 + \cos \gamma_t) \quad (33)$$

Odraženou složku záření na skloněnou plochu, která je nastavena pod úhlem γ_t lze vyjádřit pomocí hodnoty albeda A a celkového záření na vodorovnou plochu vztahem:

$$I_{refl,tilt} = \frac{1}{2} \cdot A \cdot I_{G,hor} (1 - \cos h_t) \quad (34)$$

Kde albedo je míra odrazivosti povrchu tělesa. Jde o poměr odraženého elektromagnetického záření k dopadajícímu záření. Poměr, obvykle vyjádřený od 0 % do 100 %, je důležitým pojmem v klimatologii i astronomii. Poměr závisí na vlnové délce záření: pokud není uvedeno, vztahuje se na spektrum viditelného světla. Závisí také na úhlu dopadu záření, a pokud není specifikováno jinak, uvažuje se při kolmém dopadu záření. Albedo čerstvého sněhu bývá vysoké: až 90 %, hladina oceánu má albedo nízké. Průměrné albedo povrchu země činí 37–39 %. Typickým příkladem albedo efektu je zpětná vazba teploty sněhu. Pokud se v oblasti pokryté sněhem oteplí a sníh taje, albedo se sníží, je absorbováno více slunečního záření, což přispívá k dalšímu oteplování. Obráceně to platí také: při vytváření sněhu se uplatňuje ochlazovací cyklus. Intenzita albedo efektu závisí na velikosti změny albeda a na množství slunečního záření; z toho důvodu je v tropických oblastech albedo efekt velmi výrazný.

7.2 ŠÍŘENÍ TEPLA ROVINNOU STĚNOU (S VNITŘNÍM TEPELNÝM ZDROJEM)

K formulaci úlohy nestacionárního vedení tepla se využívá Fourierova rovnice doplněná funkcí vnitřního tepelného zdroje ve tvaru:

$$\begin{aligned}\frac{\partial t}{\partial \tau} &= a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{q_v}{\rho \cdot c} \\ \frac{\partial t}{\partial \tau} &= \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{q_v}{\rho \cdot c} \\ \rho \cdot c \frac{\partial t}{\partial \tau} &= \lambda \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + q_v\end{aligned}\tag{35}$$

7.3 NUMERICKÉ ŘEŠENÍ PDR VEDENÍ TEPLA

Pro numerické řešení PDR (parciální diferenciální rovnice) se používají dvě metody, a to metoda konečných diferencí a metoda konečných prvků. Metoda konečných diferencí je v principu jednodušší.

Analogicky jako u ODR (obyčejná diferenciální rovnice) se začíná tím, že oblast Ω , na které se provádí řešení, se rozdělí na elementy (čtverce, kostky, atd.) o straně h , kde vrcholy tvoří síť uzlů $\Delta x_{i,j}$. Někdy je problematické rozdělit oblast Ω , neboť má její hranice obecný tvar. V jednom rozměru těžkost s dělením nevzniká, interval se rozdělí na n část. Často se síť modifikujeme tak, aby elementy co nejlépe vyplňovaly oblast Ω . Z důvodů lepšího pokrytí obrazců se používají nejen sítě čtvercové, ale také trojúhelníkové. Pak nastává těžkost se

správnou aproximací derivace. Lze využít síť ortogonální s nestejnými kroky, zjemnění sítě pomáhá přesně vystihnout okraje oblasti, přitom uprostřed lze síť zředit.

Hledané řešení teplot t se aproximuje množinou hodnot $t(x_{i,j}) \approx t_{i,j}$ v uzlech sítě, přitom s co nejmenší chybou. Proto se použije daná rovnice, v níž všechny derivace se nahradí diferencemi. Pak dostáváme pro (skoro) každý uzlový bod rovnici. Dále je předložen převod pro funkci jedné proměnné, předpokládá se síť organizovaná podle řad a sloupců značená $(x_{i,j})$.

Pro dané řešení je oblast Ω jednorozměrná, pak lze interval rozdělit na jednotkové úseky. Pro PDR eliptického tvaru předpokládejme například Dirichletovu úlohu na intervalu $\langle 0,1 \rangle$, s podmínkami $t(\tau, 0) = t(\tau, 1) = 0$ (okrajová) a $t(0, x) = g(x)$ (počáteční). Dále se rozdělí interval $\langle 0,1 \rangle$ na n stejných částí o délce $h = \Delta x$ a časový interval intervalu $\langle 0,T \rangle$ na m stejných intervalů o délce $k = \Delta \tau$. Označíme $t_i^k = t(\tau_k, x_i)$. Z počáteční podmínky platí $t_i^0 = g(x_i)$ a $t(0, x_1) = t(0, x_n) = 0$.

Zvolíme-li dopřednou časovou diferenci a symetrické difference pro pozici, dostáváme vyčíslení operátoru $\frac{\partial^2 t}{\partial x^2}$ a obou časových kroků τ_{k+1} a τ_k s užitím váhového průměrování vztah:

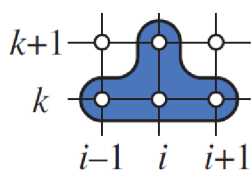
$$\frac{t_i^{k+1} - t_i^k}{\Delta \tau} = a \left[\theta \left(\frac{t_{i-1}^{k+1} - 2t_i^{k+1} + t_{i+1}^{k+1}}{\Delta x^2} \right) + (1-\theta) \left(\frac{t_{i-1}^k - 2t_i^k + t_{i+1}^k}{\Delta x^2} \right) \right], \quad (36)$$

kde váhová hodnota $0 \leq \theta \leq 1$,

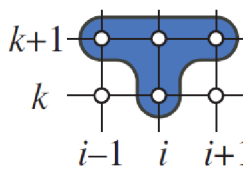
$\theta = 0 \Leftrightarrow$ metoda FTCS

$\theta = 1 \Leftrightarrow$ metoda BTCS

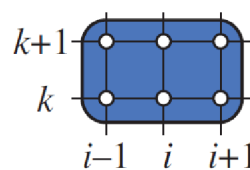
a materiálová vlastnost (ve Fourierově rovnici $a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c}$).



Explicitní metoda (FTCS)



Implicitní metoda (BTCS)

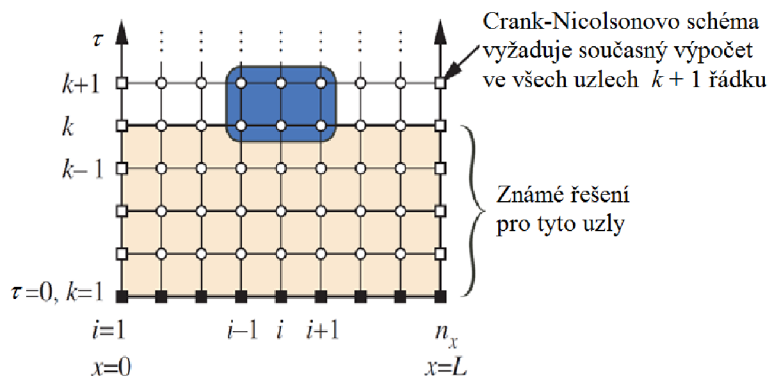


Crank Nicolsonova metoda

(Forward Time Centred Space)

(Back Time Centred Space)

Obr. 18 Schéma nejčastěji používaných metod pro řešení PDR metodou konečných diferencí



Obr. 19 Schéma evolučního principu řešení PDR Crank Nicolsonovou metodou

Crank – Nicolsonova aproximace Fourierovy rovnice šíření tepla:

$$-\frac{a}{2\Delta x^2}t_{i-1}^{k+1} + \left(\frac{1}{\Delta\tau} + \frac{a}{\Delta x^2}\right)t_i^{k+1} - \frac{a}{2\Delta x^2}t_{i+1}^{k+1} = \frac{a}{2\Delta x^2}t_{i-1}^k + \left(\frac{1}{\Delta\tau} - \frac{a}{\Delta x^2}\right)t_i^k + \frac{a}{2\Delta x^2}t_{i+1}^k \quad (37)$$

System rovnice má stejnou strukturu jako BTCS:

$$\begin{bmatrix} b_1 & c_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_2 & b_2 & c_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_3 & b_3 & c_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & \ddots & \ddots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{n-2,x} & b_{n-2,x} & c_{n-2,x} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{n-1,x} & b_{n-1,x} & c_{n-1,x} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{n,x} & b_{n,x} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} t_1^{k+1} \\ t_2^{k+1} \\ t_3^{k+1} \\ \vdots \\ t_{n-2,x}^{k+1} \\ t_{n-1,x}^{k+1} \\ t_{n,x}^{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ \vdots \\ d_{n-2,x} \\ d_{n-1,x} \\ d_{n,x} \end{bmatrix}, \quad (38)$$

kde pro koeficienty vnitřních uzlů intervalu $i = 2,3,\dots,n_x$ platí:

$$b_i = \frac{1}{\Delta\tau} + \frac{\alpha}{\Delta x^2} = \frac{1}{\Delta\tau} - (a_i + c_i),$$

$$a_i = c_i = -\frac{a}{2\Delta x^2},$$

$$d_i = -c_i \cdot t_{i-1}^k + \left(\frac{1}{\Delta\tau} + a_i + c_i\right)t_i^k - b_i t_{i+1}^k.$$

Podle důkazu [17] lze k Crank Nicolsonově metodě shrnout:

- Výsledky výpočtu Crank Nicolsonovou metodou jsou přesnější než FTCS nebo BTCS.
- Všechny metody mají jistou zaokrouhlovací chybu, avšak nepříznivější chybu poskytuje Crank-Nicolsonova metoda, která je nejčastěji používána.
- Metoda BTCS a Crank-Nicolsonovo schéma jsou bezpodmínečně stabilní pro řešení rovnice vedení tepla.

- U metody BTCS a Crank-Nicolsonova schématu musí být v každém časovém kroku vyřešen systém rovnic pro všechny neznámé. Na řešení matice se využívá řešič pro třídiagonální matici jednorozměrného vedení tepla.
- Crank-Nicolsonovo schéma je upřednostňováno před metodami FTCS i BTCS.

Při tvorbě programu byla zvolena nejpřesnější metoda a to Crank-Nicolsonova metoda. Problémem se ukázala doba výpočtu, která byla příliš dlouhá. Proto jsme zvolili jednodušší a méně náročnou Implicitní (BTCS) metodu, díky které probíhá výpočet o mnoho rychleji.

7.4 CHARAKTERISTIKA STROJOVÉHO PROGRAMU

Navržený výpočetní program pracuje s toky energií mezi jednotlivými místnostmi v budově a mezi okolním prostředím. Výstupem jsou energetické hodnoty, jako ztráty ventilací, vedením a infilrací. Dále počítá teplotní zisky z pobytu osob, vnitřním osvětlením a slunečním zářením. Hodnoty vnitřního prostředí jsou počítány z povrchových teplot, relativní vlhkosti, výměny vzduchu a samozřejmě z vnitřní teploty vzduchu pomocí hodinových klimatických dat. V sestrojeném programu byl zahrnut i výpočet solární radiace jak na rovinném, tak na nakloněném povrchu.

Průběh teplot lze stanovit i v jiných programech. Nejčastěji je používán program Teplo. Tento program počítá na základě technické normy ČSN 73 0540. Celý výpočetní postup je za standardizovaných stacionárních exteriérových i interiérových podmínek, které jsou dány v legislativě. Získané výsledky teplotního pole jsou pak rozdílné od skutečného stavu za reálných podmínek, protože ve skutečnosti jsou tyto okrajové podmínky proměnné v čase. Proto byl v grafickém vývojovém prostředí vytvořen strojový program, který počítá průběh teplot Schmidovou metodou s proměnnými exteriérovými okrajovými podmínkami, které jsou proměnné v čase. Zohledňuje tedy pohyb slunce po obloze. Hodnoty exteriérových teplot byly poskytnuty meteorologickou stanicí z letiště Brno Tuřany. Statisticky upravená data mají charakter referenčního klimatického roku.

7.4.1 POPIS MODELU OBJEKTU

Budova je složena z jednotlivých místností, v našem případě zón, které jsou ohraničeny různým počtem a druhem povrchů. Do programu je třeba zadat vstupní hodnoty, což jsou právě geometrické pozice jednotlivých zón a povrchů, které na sebe navazují. Dalším vstupem jsou hodnoty venkovního vzduchu, které, jak bylo řečeno výše, jsou již nestacionární a jsou zde naprogramovány, ale to neznamená, že jej můžeme změnit.

Pod pojmem prvek systému si lze představit objem vzduchu v jednotlivých místnostech, pro který se vypočte teplota v daném čase.

K výpočtu šíření tepla byla využita implicitní (BTCS) metoda. Jednotlivé konstrukce jsou složeny z jedné či několika vrstev, kde předpokládáme jejich homogennost a složení z jednoho, který je popsán tepelně technickými vlastnostmi. Aby byl výpočet co nejpřesnější, je nutné jednotlivé materiálové vrstvy dále rozdělit do několika dílčích vrstev. Uzel vnější vrstvy je vždy definován ve dvou površích konstrukce. Každý povrch zastupuje dílčí vrstva, s jejíž polovinou šířky je počítáno. Z tohoto důvodu je každá konstrukce tvořena alespoň třemi uzly.

7.4.2 TEPELNÁ ROVNOVÁHA ZÓNY

Jelikož se teplota vzduchu v místnosti vyrovnává v závislosti na změnách v jeho okolí, neuvažujeme s využitím měrné tepelné kapacity vzduchu.

Navržený program rozlišuje tyto vlivy na teplotní stav vzduchu v místnosti:

- tepelné toky otvory (okny a dveřmi),
- tepelné toky z přilehlých konstrukcí,
- tepelné zisky od tepelných zdrojů,
- sluneční záření okny a dveřmi,
- mísení vzduchu z ostatních místností,
- vzduch přivedený pomocí větrání, infiltrací či ventilací.

V programu je vždy nastavena vzduchová rovnováha, což znamená, že stejné množství přiváděného vzduchu je i v rámci jedné zóny odvedeno. Pokud uživatel vloží data, která by vedla k nerovnováze, dojde ke změně objemu vzduchu infiltrací nebo exfiltrací, aby byla rovnováha opět nastavena.

Tepelnými zisky od tepelných zdrojů myslíme tepelné zisky od výskytu osob, umělého osvětlení či tepelná zátěž od vytápění či chladových systémů.

Aby byla dodržena celková rovnováha zóny, je součet všech výše uvedených zisků roven nule.

7.4.3 VLNKOSTNÍ ROVNOVÁHA ZÓNY

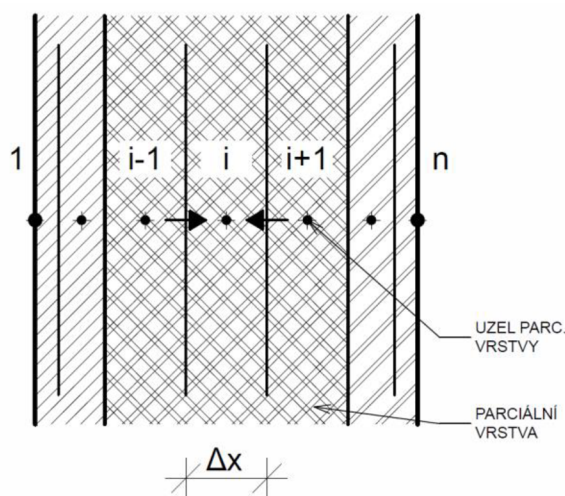
Vlhkostní rovnováha zóny je založena na stejném principu jako rovnováha tepelná, ovšem s menším počtem veličin. Vlhkost jednotlivých zón spočívá na přítomnosti osob a jejich vlhkostních zátěžích, stejně jako vlhkostní zisky z následujících forem vedení vzduchu:

- infiltrací,
- ventilací,
- proudění.

Míšením vzduchu z jednotlivých zón se mísí i vlhkostní obsah. Neuvažuje se s úbytkem vlhkosti při kondenzaci, ani s šířením vlhkosti v rámci jednotlivých materiálů konstrukce.

7.4.4 PŘENOS TEPLA V KONSTRUKCI

V rámci jedné konstrukce je brán přenos tepla jako nestacionární, je tedy brána tepelná kapacita jednotlivých vrstev. Konstrukce je složena z jedné a více materiálových vrstev, které jsou rozděleny do několika dílčích. Tyto parciální vrstvy jsou označeny písmenem i .



Obr. 20 Schématické rozdělení konstrukce na jednotlivé materiálové a parciální vrstvy s jednotlivými uzly.

Pro danou dílčí vrstvu i je spočteno množství přijatého tepla ze sousední vrstvy $i-1$ pomocí Fourierovy rovnice. Abychom mohli vytvořit obecný předpis, je důležité, aby každý ze dvou materiálů měl vlastní hodnotu součinitele tepelné vodivosti a vlastní tloušťku. Poté získáme hodnotu hustoty tepelného toku na dělicím povrchu mezi dvěma parciálními vrstvami pro jeden časový krok z času τ do času $\tau+1$:

$$q_i^{\tau+1} = \frac{\theta_i^{\tau+1} - \theta_{i-1}^{\tau+1}}{\frac{\Delta x_{i-1}}{2\lambda_{i-1}} + \frac{\Delta x_i}{2\lambda_{i-1}} + R_i}, \quad (39)$$

kde: q hustota tepelného toku [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$],

- Δxtloušťka parciální vrstvy [m],
 λsoučinitel tepelné vodivosti [W/(m.K)],
 R tepelný odpor mezi parciálními vrstvami [m²K/W],
 idolní index, polohová lokalizace elementu v konstrukci,
 τ horní index, lokalizace časové roviny.

7.4.5 FORMÁLNÍ POPIS VAZEBNÉHO TEPELNÉHO TOKU V BUDOVĚ

Vazebným prvkem mezi jednotlivými místnostmi je časově závislý tepelný tok, přesněji vazebný tepelný tok. Při šíření tepla stěnami mezi místnostmi lze popsat jednotlivé složky:

a) přestup tepla mezi vzduchem a povrchem stěny:

$$\dot{Q}^{ij}(\tau) = S^{ij} \cdot \alpha_s^{ij} \cdot (t_s^{ij}(0, \tau) - t_i(\tau)) \quad (40),$$

- kde: S plocha stěny [m²],
 α_s součinitel přestupu tepla stěny [W/(m².K)],
 t_s teplota povrchu stěny [°C],
 t_i teplota vzduchu [°C].

b) šíření tepla stěnou. Jde o Fourierovu rovnici vedení tepla pro jednorozměrný případ:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \cdot \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \mid \tau \geq 0 \wedge 0 \leq x \leq d \quad (41),$$

kde: a součinitel teplotní vodivosti [m².s⁻¹],

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} \quad \text{časová změna teploty.}$$

Počáteční a okrajové podmínky:

- počáteční: $t(x,0) = t_0 = konst$ (42)

- okrajové: $-\lambda \cdot \frac{\partial t(0, \tau)}{\partial x} = q_1$, resp. $\lambda \cdot \frac{\partial t(d, \tau)}{\partial x} = q_2$ (43),

kde: λ součinitel tepelné vodivosti [W/(m.K)],

$q_1; q_2$ hustota tepelného toku [W/m²].

šíření mezi okolním vzduchem a povrchem stěny: $\dot{Q}^{ij}(\tau) = S^{ji} \cdot \alpha_s^{ji} \cdot (t_s^{ji}(d, \tau) - t_j(\tau))$ (44),

d) toky ventilačního vzduchu a spárová netěsnost: $\dot{Q}_v^i(\tau) = V^i \cdot c_{vzd} \cdot (t_i(\tau) - t_x(\tau))$ (45),

kde: V objemový tok vzduchu [m^3/s],
 c_{vzd} objemová tepelná kapacita vzduchu [obvykle $1\,300\text{ J}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$].

e) tepelná radiace mezi vnitřními povrchy v místnosti: $\dot{Q}_r^i(\tau) = S^i \cdot c_\varepsilon \cdot A \cdot \left(\frac{T_p^{i4}}{100} - \frac{T_p^{j4}}{100} \right)$ (46),

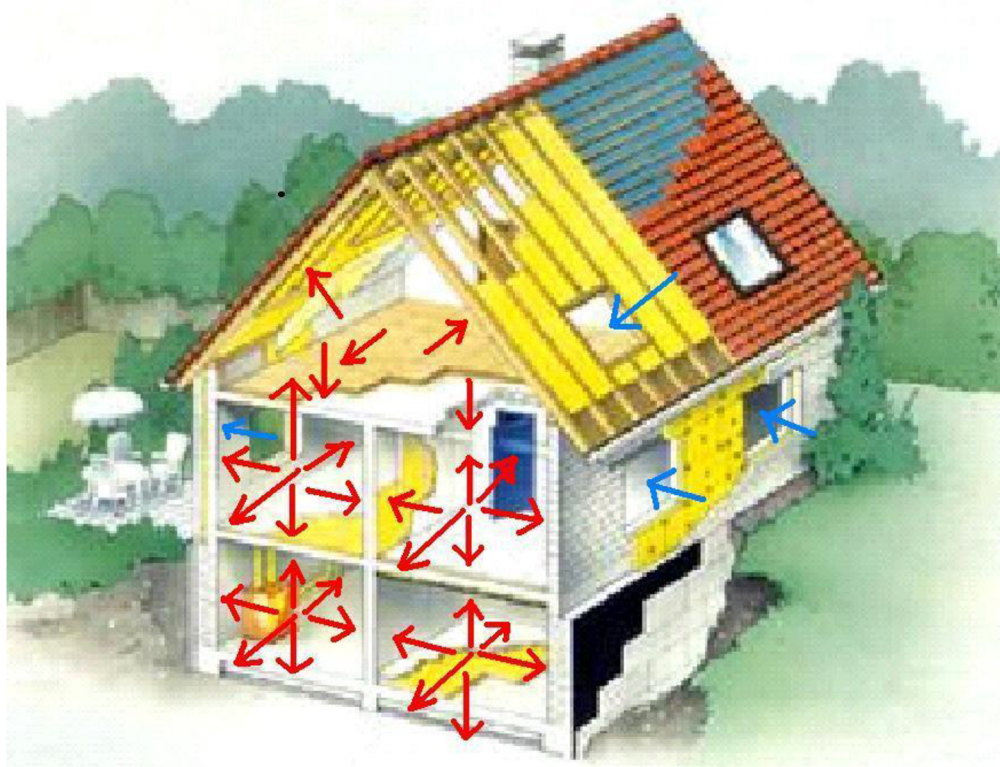
kde: c_ε součinitel sáání absolutně černého tělesa [$\approx 5,67\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K}^4)$],
 A součinitel pohltivosti povrchu [-],
 T_p termodynamická teplota sálajících ploch [K].

Vyčíslením rovnice b) stanovíme povrchové teploty konstrukce $t(x, \tau)$, pro i -tou místnost $t^{ij}(0, \tau)$, resp. $t^{ji}(d, \tau)$ na opačném povrchu stěny. Odsud lze tak určit časově závislé vazebné tepelné toky mezi jednotlivými místnostmi $Q^{ij}_s(\tau)$. Původně J. ŘEHÁNEK navrhnul řešení tepelných vazeb vztahem odvozeným z Fourierovy metody řešení Fourierovy rovnice vedení tepla, které však platí pouze pro jednovrstvé stěny [8].

Pro každou místnost systému platí bilanční rovnice:

$$\int_{\tau_1}^{\tau_2} \left(\dot{Q}^M(\tau) + \sum_j \dot{Q}_{ztr}^j(\tau) + \sum_i \dot{Q}_{zisk}^i(\tau) \right) d\tau = 0 \quad (47),$$

kde: \dot{Q}^M tepelný tok v místnosti [W],
 \dot{Q}_{ztr} tepelný tok vyvolaný vnitřními ztrátami [W],
 \dot{Q}_{zisk} tepelný tok vyvolaný vnitřními zisky [W].



Obr. 21 Uspořádání vazebných tepelných toků uvnitř a vně budovy.

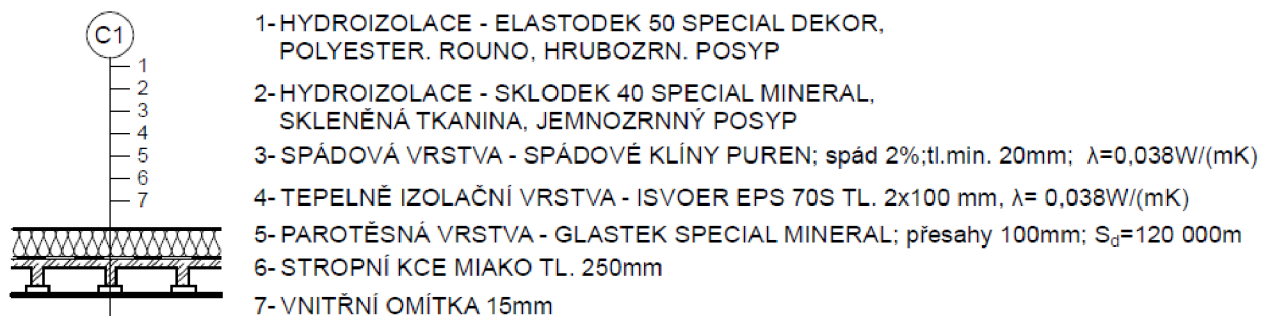
Udržení stabilní úrovně teploty v místech stavebních objektů je silně ovlivňováno nestacionárním tepelným chováním stavebních konstrukcí. Z materiálového hlediska se často prokazuje úroveň tepelně akumulční schopnosti konstrukce, která závisí na fyzikálních vlastnostech zabudovaných materiálů.

8 POČÁTEČNÍ VÝPOČTY SIMULAČNÍM PROGRAMEM

Nejprve byl sestaven průběh teplot pro konstrukce dle vztahů, které jsou uvedeny v kapitole 7.1.4. Dle vztahů v kapitole 7.1. byl poté sestaven strojový program, který pracuje s toky energií mezi jednotlivými místnostmi v budově a mezi okolním prostředím. Jak bylo zmíněno výše, výstupem jsou energetické hodnoty, jako ztráty ventilací, vedením a infiltrací. Dále počítá teplotní zisky slunečním zářením. Hodnoty vnitřního prostředí jsou počítány z povrchových teplot, relativní vlhkosti, výměny vzduchu a samozřejmě z vnitřní teploty vzduchu pomocí hodinových klimatických dat. V sestrojeném programu byl zahrnut i výpočet solární radiace jak na rovinném, tak na nakloněném povrchu.

8.1 NESTACIONÁRNÍ VÝPOČET PRŮBĚHU TEPLŮ VE STŘEŠNÍ KONSTRUKCI

V sestaveném strojovém programu byla namodelována skladba jednoplášťové ploché střešní konstrukce. V prvním výpočtu byla uvažována klasická skladba ploché střechy a do druhého výpočtu byla započítána i zemina a to jednou o mocnosti 100mm a podruhé o mocnosti 300mm. Podrobnější skladba střešní konstrukce je uvedena na obrázcích 22 a 23.



Obr. 22 Skladba střechy bez vegetační vrstvy.

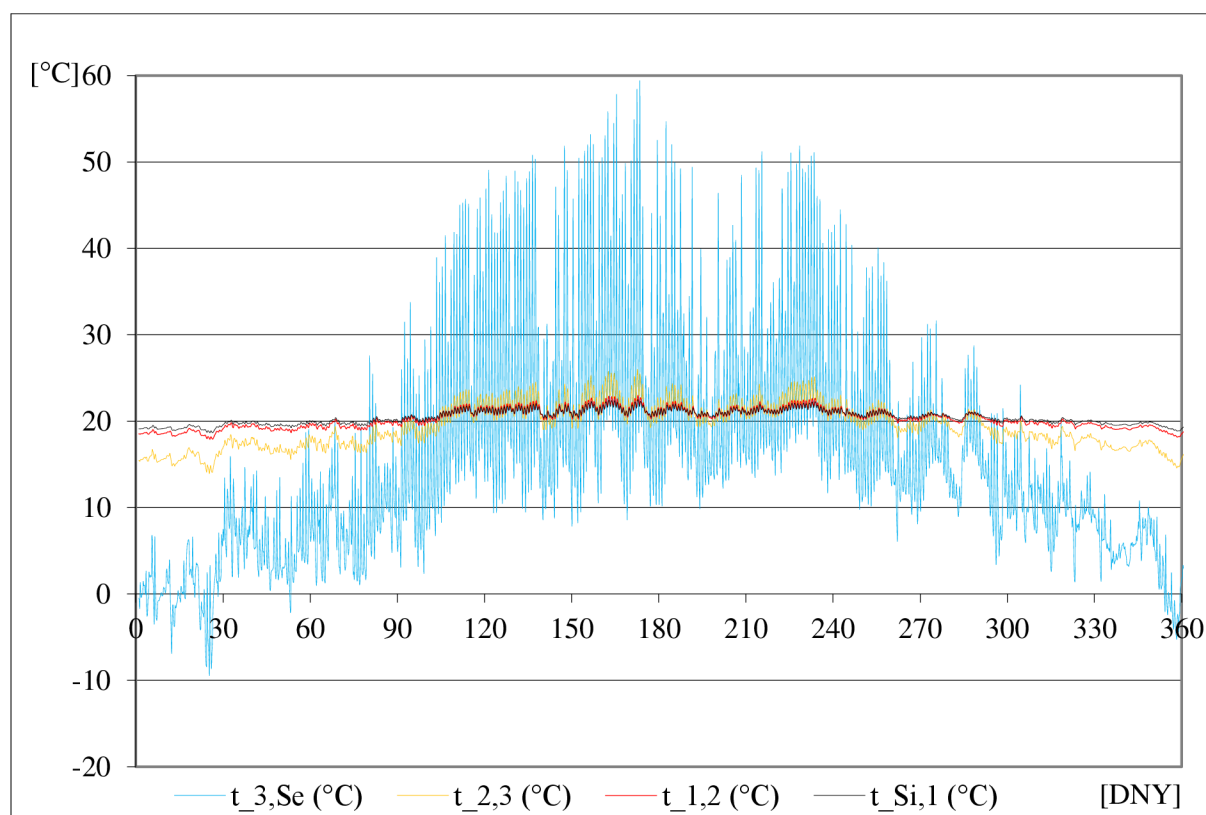


Obr. 23 Skladba střechy s vegetační vrstvou.

8.1.1 PRŮBĚH TEPLŮT V KLASICKÉ PLOCHÉ STŘEŠE

Maximální vypočtená povrchová teplota na této konstrukci byla 59,4°C a to 22. června ve 12 hodin odpoledne. Nejnižší teplota byla vypočtena 25. ledna v 8 hodin ráno a to -9,3°C. Podrobnější průběh teplot je znázorněn níže v grafu 1.

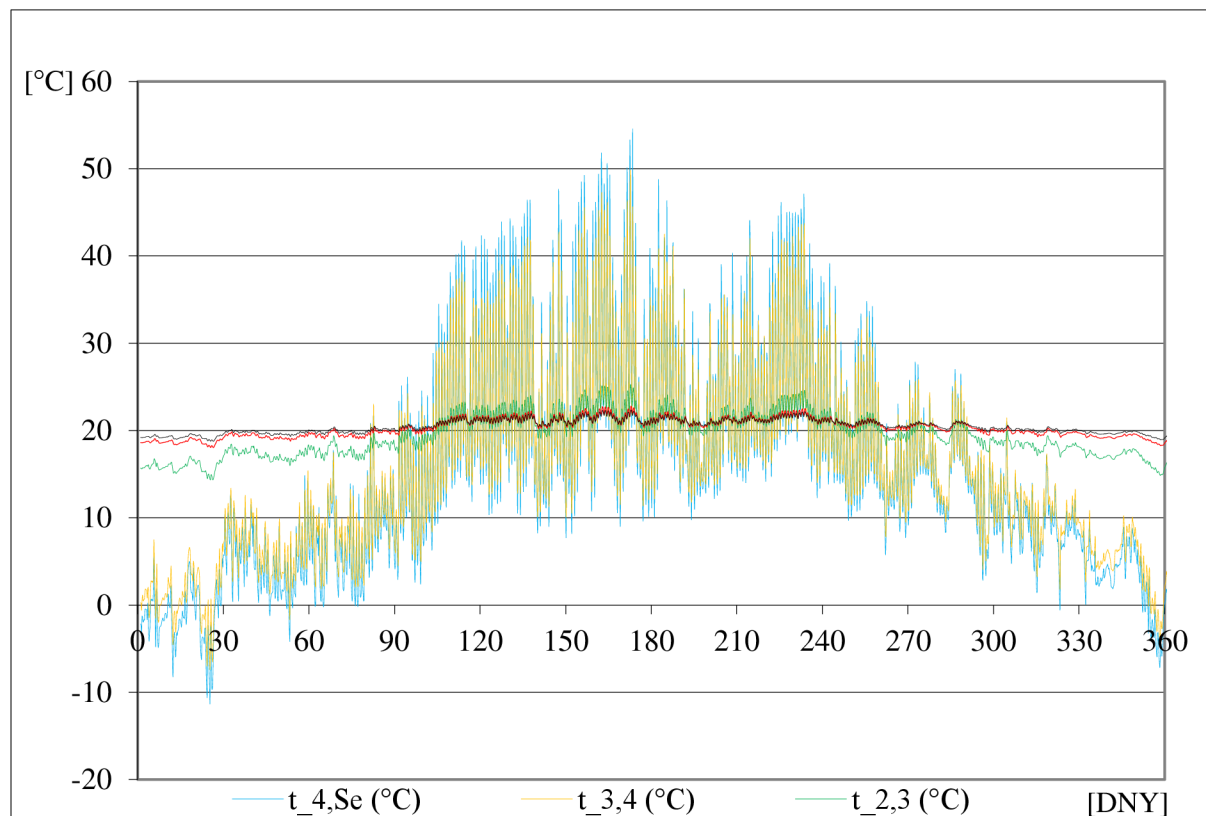
V grafu 1 hodnoty $t_{3,Se}$ až $t_{Si,1}$ zobrazují teploty na povrchu a rozhraní materiálů v daném dni. Hodnota $t_{3,Se}$ je teplota na venkovním povrchu konstrukce, hodnota $t_{2,3}$ je teplota na rozhraní tepelné izolace a stropní konstrukce, $t_{1,2}$ znázorňuje teplotu na přechodu stropní konstrukce a vnitřní omítky a hodnota $t_{Si,1}$ je povrchová teplota vnitřní omítky.



Graf 1 Průběh teplot v klasické ploché střeše.

8.1.2 PRŮBĚH TEPLOT V KLASCKÉ PLOCHÉ STŘEŠE SE 100MM ZEMINY

Výpočtem jsme zjistili maximální teplotu 22. června ve 12:00 a to 54,5°C. Zde je vidět zlepšení o necelých 5K oproti ploché střeše bez zeminy. Nejnižší teplota byla naměřena - 11,1°C 25. ledna v 8:00. Graf 2 znázorňuje průběh teplot této konstrukce v celém roce.

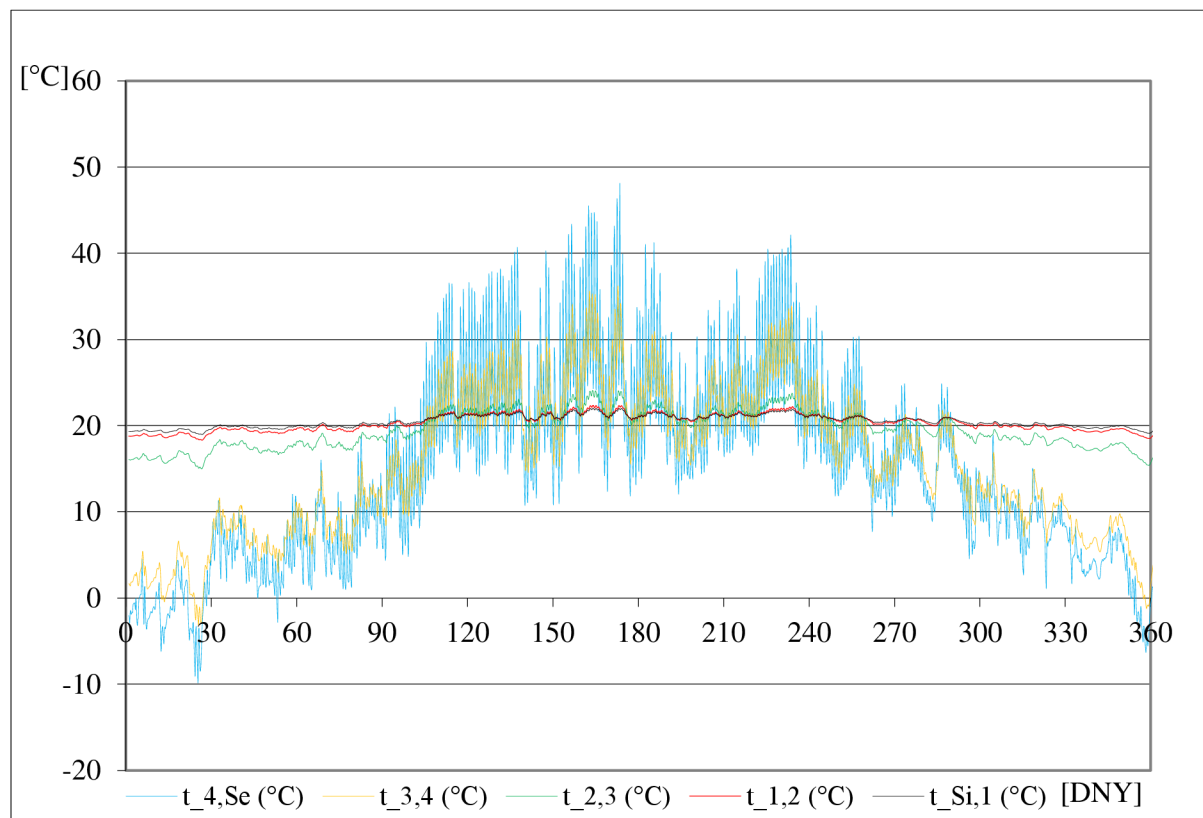


Graf 2 Průběh teplot v ploché vegetační střeše s 100mm zeminy.

8.1.3 PRŮBĚH TEPLOT V KLASCKÉ PLOCHÉ STŘEŠE SE 300MM ZEMINY

Dne 22. června byla vypočtena nejvyšší teplota na povrchu střešní konstrukce za celý rok a to 48,1°C. Od střešky bez zeminy se tato teplota liší o 11K a od střešky s mocností zeminy 100mm o 6K. Záleží tedy i na mocnosti vrstvy zeminy použité ve skladbě střešního pláště. Nejnižší naměřená teplota činí -9,7°C a to 25. ledna v 8 hodin ráno. Podrobnější průběh je uveden v grafu 3.

U grafu 2 a 3 hodnota $t_{4,Se}$ je teplota na venkovním povrchu konstrukce, hodnota $t_{3,4}$ je teplota na rozhraní zeminy a tepelné izolace, kde jsme zanedbali vliv hydroizolace, která by nám ovlivnila výslednou teplotu jen minimálně, $t_{2,3}$ znázorňuje teplotu rozhraní tepelné izolace a stropní konstrukce, $t_{1,2}$ znázorňuje teplotu na přechodu stropní konstrukce a vnitřní omítky a hodnota $t_{Si,1}$ je povrchová teplota vnitřní omítky.



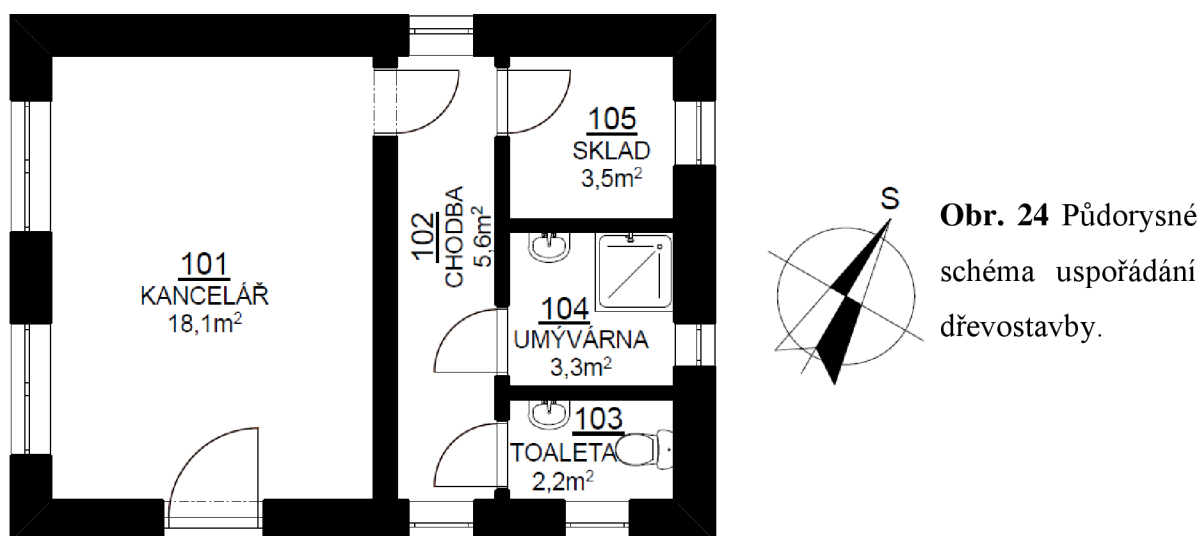
Graf 3 Průběh teplot v ploché vegetační střeše s 300mm zeminy.

Zde bylo cílem prokázat reálnější pohled na účinnost konstrukce vegetační střešky z hlediska snížení účinku exteriérové povrchové teploty díky vrstvě zemině umístěné na střeše. Tuto skutečnost se podařilo výpočtově prokázat díky velké tepelné jímavosti zeminy. Ovšem vypočtené hodnoty se mohou od reality lišit, neboť teplotu na povrchu konstrukce

ovlivní i volba vysazené zeleně, závlahové poměry, zhutnění zeminy aj. Ve skutečnosti lze očekávat, že zjištěné teploty výrazně příznivější oproti výpočtové simulaci.

8.2 NESTACIONÁRNÍ VÝPOČET TEPELNÉ STABILITY OBJEKTU

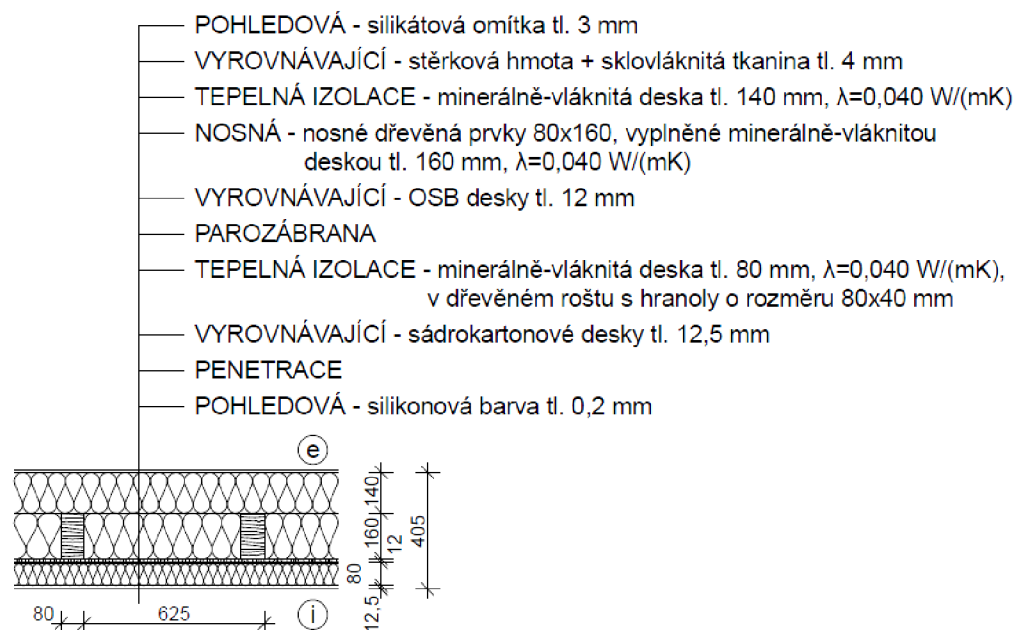
Simulačním programem byly posouzeny teplotní projevy menšího objektu dřevostavby o jednom nadzemním podlaží s pěti místnostmi. Zde je prokázán projev vegetační střechy umístěné na objektu tak, že je posouzen objekt s klasickou plochou střechou, se střechou doplněnou o vegetační vrstvu o mocnostech vrstvy zeminy 100mm a 300mm. Při výpočtech bylo uvažováno s vytápěním některých vnitřních místností. Jde o kancelář o ploše 18,1m² s teplotou vnitřního vzduchu 21°C, umývárny o ploše 3,3m² s teplotou 22°C, toaletou o ploše 2,2m² temperovanou na teplotu 21°C. Chodba zaujímající výměru 5,6m² a sklad o ploše 3,5m² vytápěny nejsou. V letním období je zohledněna výluka vytápění. Půdorysné schéma a orientace objektu ke světovým stranám je vyobrazeno na obrázku 24.



Obr. 24 Půdorysné schéma uspořádání dřevostavby.

8.2.1 OBJEKT S PLOCHOU STŘECHOU BEZ ZEMINY

Posuzovaný objekt je koncipován jako dřevostavba sestávající z dřevěné nosné konstrukce v roli tuhého rámu. Vrstva tepelné izolace je navržena jako minerálně-vláknitá desky o tloušťce 160 mm, mezi jednotlivými nosnými dřevěnými prvky 80x160 mm. Ze strany exteriéru je takto konstrukce obvodové stěny doplněna o další vrstvu tepelné izolace z minerálně-vláknitých desek tl. 140 mm a fasády o celkové tloušťce 7 mm. Ze strany interiéru jsou navrženy OSB desky tl. 12 mm, parozábrana a tepelná izolace tl. 80mm z minerální vlny, v roštu z dřevěných hranolů o rozměru 80x40 mm. Jako vyrovnávací vrstva jsou použity sádkokartonové desky tl. 12,5mm. Přesněji obrázek 25.



Obr. 25 Skladba obvodové stěny.

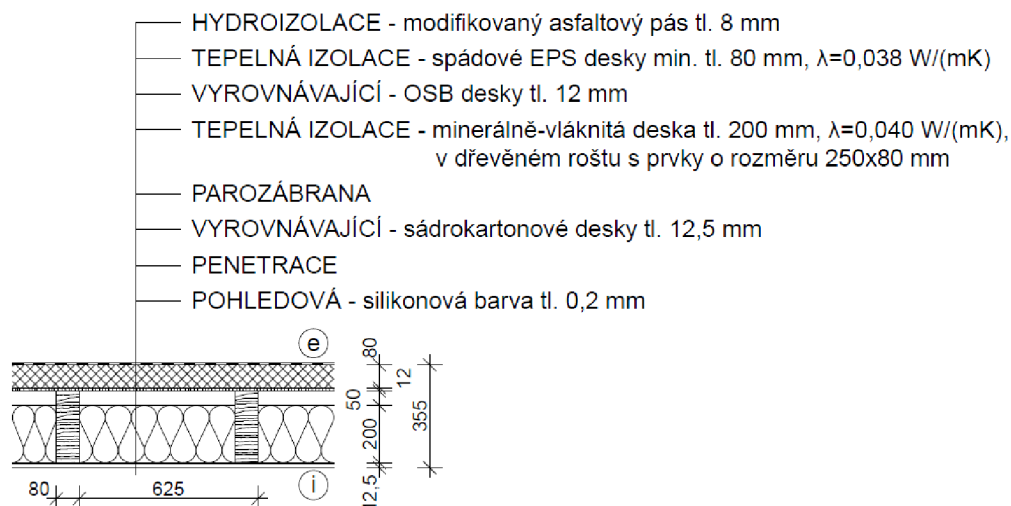
Podlaha je tvořena podkladní železobetonovou deskou o tloušťce 100 mm, hydroizolací z asfaltových pásů o tl. 4 mm, tepelnou izolací podlahy z EPS tl. 100 mm, separační fólií, roznášející betonovou mazaninou tl. 60 mm a nášlapnou vrstvou.

Střešní konstrukce je tvořena, od strany interiéru, sádrokartonovou deskou tl. 12,5 mm, parozábranou, tepelnou izolací tl. 200 mm mezi dřevěnými nosnými prvky o rozměru 250x80 mm, bedněním z OSB desek, spádovými klíny z EPS s minimální tloušťkou 80 mm a hydroizolací z asfaltových pásů o celkové tloušťce 8 mm. Bližší popis viz obrázek 26.

Jako okenní výplně jsou použita dřevěná okna s izolačním dvojsklem $U_g = 1,1 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ a součinitel prostupu tepla rámu smrku $U_f = 0,70 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$. Stanovení součinitele prostupu tepla jednotlivého okna U_w se stanoví dle vztahu:

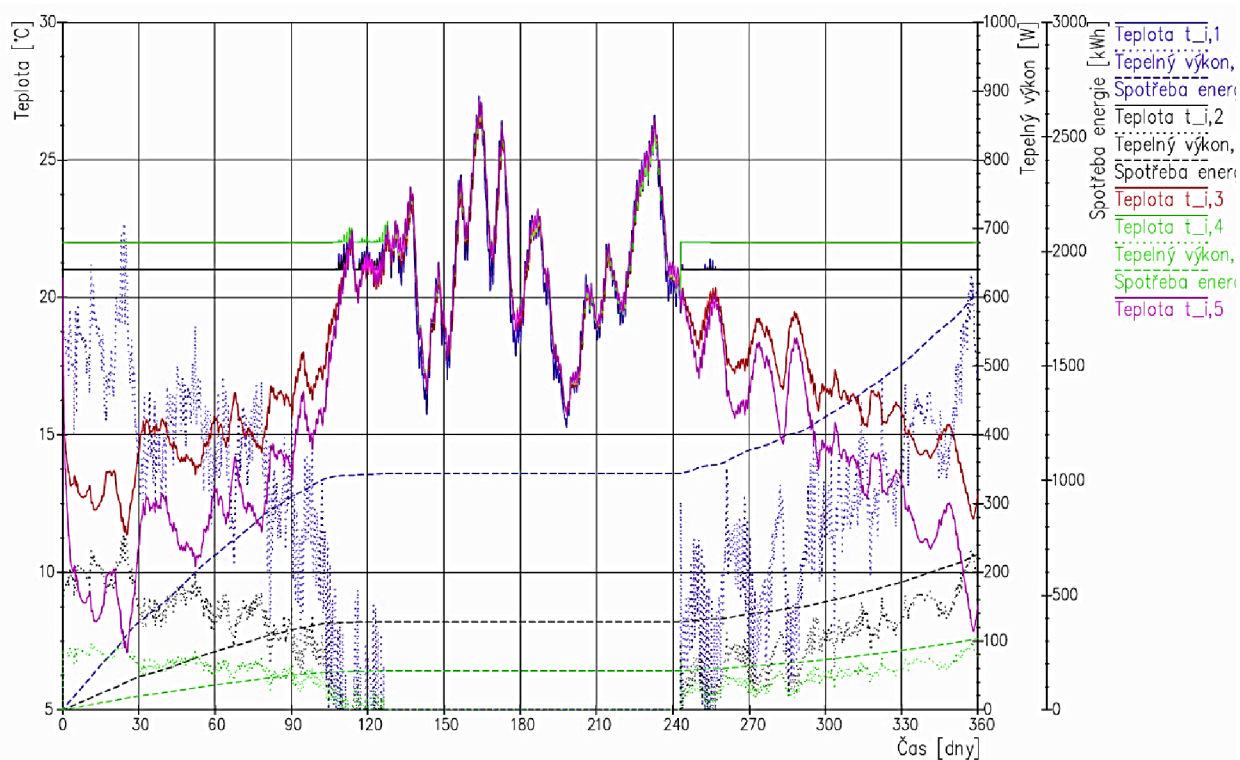
$$U_w = \frac{\sum A_g \cdot U_g + \sum A_f \cdot U_f + \sum L_g \cdot \Psi_g}{\sum A_g + \sum A_f} \quad (\text{W m}^{-2} \text{ K}) \quad (48),$$

- kde: A_g zasklená plocha v $[\text{m}^2]$,
 A_f navrhovaná plocha rámu v $[\text{m}^2]$,
 L_g celkový viditelný obvod zasklení $[\text{m}]$,
 U_g součinitel prostupu tepla zasklení ve $[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$,
 U_f součinitel prostupu tepla rámu ve $[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$,
 Ψ_g lineární činitel prostupu tepla způsobený kombinovanými tepelnými vlivy zasklení, distančního rámečku a rámu ve $[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$.



Obř. 26 Skladba ploché střechy bez zeminy.

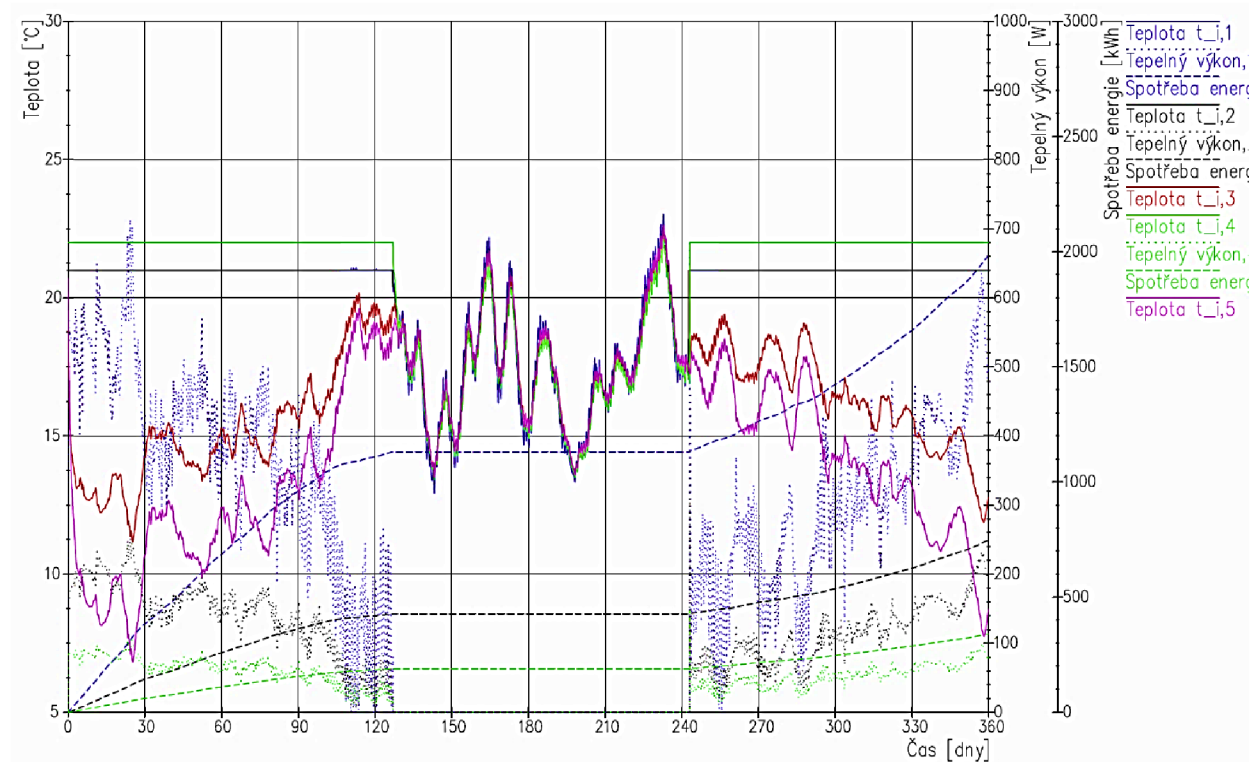
Výpočtem pomocí strojového programu jsme zjistili maximální teploty v jednotlivých místnostech v průběhu roku. Jak lze vyčíst z grafu 4, tak maximální teploty všech místností byli 14. 6. v 15 hodin. V místnosti č. 1 (kancelář) byla vypočtena max. teplota 27,3°C, dále pak v místnosti č. 2 (chodba) činila 26,7°C, místnost č. 3 (WC) rovněž 26,7°C, místnost č. 4 (sprcha) 27,0°C a místnosti č. 5 (sklad) 27,2°C. V letním období tedy dochází k přehřívání jednotlivých místností.



Graf 4 Průběh teplot, tepelný výkon a spotřeba energie objektu s plochou střechou bez zeminy.

8.2.2 OBJEKT S VEGETAČNÍ STŘECHOU O MOCNOSTI 100MM ZEMINY

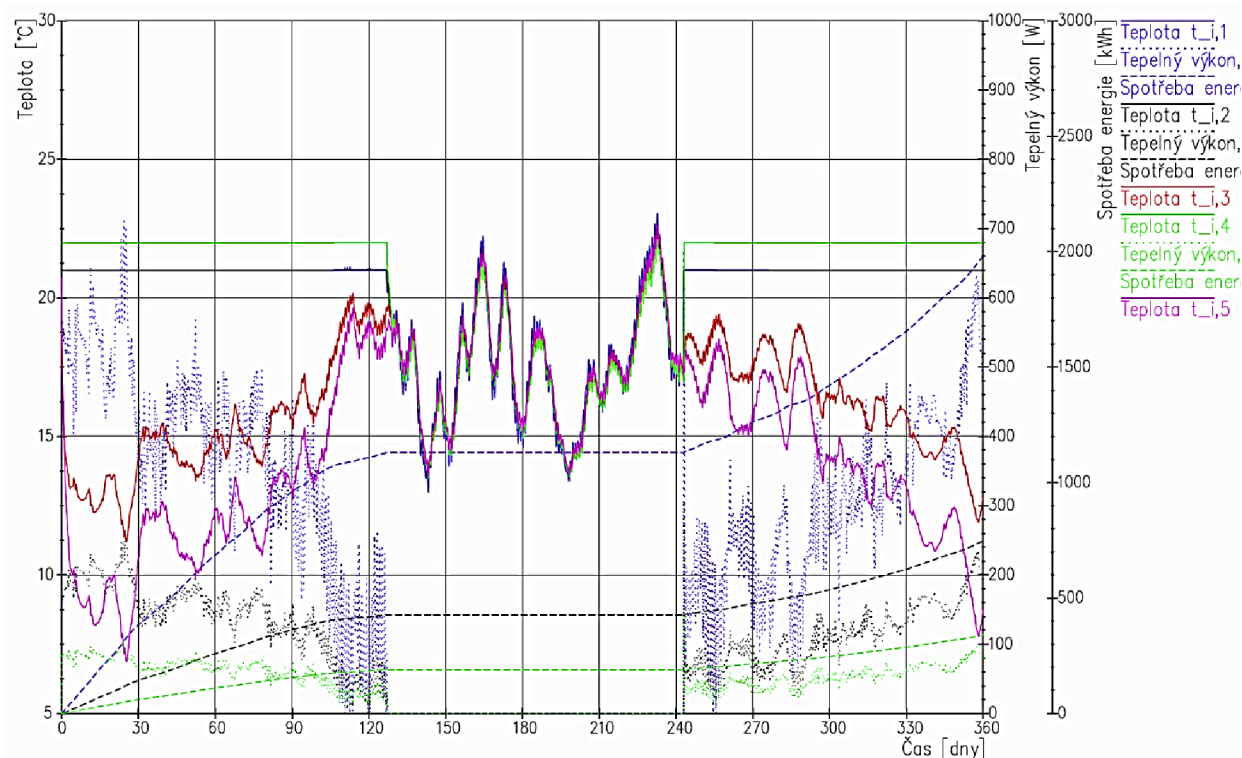
Pokud střešní konstrukci téhož objektu doplníme o vegetační vrstvu a to s mocností zeminy 100mm, dostaneme tentýž den a stejnou hodinu což je 14. 6. v 15 hodin tyto teploty místností. Místnost 1 (kancelář) 22,3°C, místnost 2 (chodba) 21,5°C, místnost 3 (toaleta) 21,8°C, místnost 4 (umývárna) 21,4°C a v poslední místnosti 5 (sklad) 22,1°C. U grafu 5 je patrné, že nejvyšší teplota v místnosti ztelně klesla, a to průměrně o 5,2K.



Graf 5 Průběh teplot, tepelný výkon a spotřeba energie objektu s vegetační střešou s mocností 100mm zeminy.

8.2.3 OBJEKT S VEGETAČNÍ STŘECHOU O MOCNOSTI 300MM ZEMINY

Při mocnosti zeminy 300mm ve vegetační vrstvě se teploty 14. 6. v 15 hodin nadále zlepšily. V místnosti 1 je teplota 22,1°C, v místnosti 2 činí 21,4°C, v místnosti 3 je 21,7°C, v místnosti 4 byla vypočtená teplota 21,3°C a v místnosti 5 je teplota 21,6°C. Přesněji v grafu 6. Teplota v místnostech průměrně klesla o 5,4K oproti objektu s klasickou plochou střešou a oproti vegetační střeše o mocnosti 100mm zeminy poklesla průměrně o 0,7K.



Graf 6 Průběh teplot, tepelný výkon a spotřeba energie objektu s vegetační střeou s mocností 300mm zeminy.

V této kapitole bylo cílem prokázat reálnější projevy z hlediska účinku konstrukce vegetační střechy z hlediska tepelné stability na objekt. To lze zachytit pouze tehdy, jestli-že se posuzuje teplotní průběh nestacionárně za denního chodu okrajových klimatických teplot blízkých reálnému projevu klimatu. Náročný simulační výpočet, v němž se uplatní všechny fyzikální vlastnosti staviv související s šířením tepla - součinitel tepelné vodivosti, objemová hmotnost, tepelná kapacita i přestupové jevy, poskytuje reálný obraz o teplotních pochodech probíhajících v objektu. Výpočtově se podařilo prokázat, že v letním období střecha pokrytá vegetací, díky tepelné jímavosti zeminy, zabraňuje přehřívání podstřešních místností. Ovšem vypočtené hodnoty se mohou od reality mírně lišit, neboť teplotu interiéru ovlivní i volba vysazené zeleně, závlahové poměry, zhutnění zeminy aj. Ohledně spotřeby energie v posuzovaném objektu na vytápění za rok nebyly zjištěny větší rozdíly, důvodem je posouzení relativně malé budovy.

9 DOPLNĚNÍ SIMULAČNÍHO MODELU O VNITŘNÍ TEPELNÉ ZDROJE

Jak je již známo, tak k vnitřním zdrojům tepla patří především tepelný tok vznikající od:

- Pobývajících osob,
- Svítidel,
- Spotřebičů v domácnosti,
- Elektronického vybavení, atp.

V práci se budu zabývat pouze tepelnými zisky od osob a svítidel.

9.1 TEPELNÉ ZISKY OD OSOB

Do tepelného zisku od osob Q_L [W] se započítává pouze produkce citelného tepla, které závisí na intenzitě lidské činnosti, teplotě vzduchu a pohlaví.

$$Q_L = 6,2 \cdot n_L \cdot (36 - t_i) \quad (49),$$

kde: n_L počet osob [-],

t_i teplota interiéru [°C].

Vzorec (23) platí pouze pro výpočet produkce tepla u mužů konajících mírně aktivní práci. Jedna mírně aktivní osoba při teplotě vzduchu 26 °C vyprodukuje 62 W citelného tepla a 116 g/h vodní páry. Pro ostatní druhy lidské činnosti je produkce tepla uveden v normě ČSN 73 0548: 1985 *Výpočet tepelné zátěže klimatizovaných prostor*.

Pro různorodé složení skupiny osob v místnosti se počet osob koriguje vztahem:

$$n_L = 0,85 \cdot n_z + 0,75 \cdot n_d + n_m \quad (50),$$

kde: n_z počet žen [-],

n_d počet dětí [-],

n_m počet mužů [-].

9.2 TEPELNÉ ZISKY OD SVÍTIDEL

Produkce tepla svítidel Q_{sv} se počítá pro prostory bez oken (kina, divadla) a místnosti s požadavky na vyšší intenzitu osvětlení (rýsovný, provozy jemné mechaniky ap.), kde nestačí přirozené osvětlení. U hlubokých místností se uvažuje s umělým osvětlením ve vzdálenosti větší než 5 m od okna.

$$Q_{SV} = q_{SV} \cdot S_{osv} \quad (51),$$

kde: q_{SV} měrný tepelný tok osvětlené [W/m^2],

S_{osv} osvětlená plocha [m^2].

Produkce tepla různých druhů osvětlení je uvedena rovněž v normě ČSN 73 0548: 1985
Výpočet tepelné zátěže klimatizovaných prostor.

10 EXPERIMENTÁLNÍ DŮM

Součástí disertační práce je porovnání výsledků ze sestaveného programu s reálnými hodnotami, které budou naměřeny v experimentálním domě. I pro tento účel byl postaven testovací objekt se šikmou zelenou střechou, kde byly zvoleny tři varianty vegetační vrstvy. Tento objekt byl postaven v areálu ADMAS v Brně. Jedná se o environmentální objekt EnviHUT, k jehož realizaci jsou používány zejména přírodní či recyklované materiály. Tyto materiály jsou z převážné většiny dodány z lokálních nebo blízkých zdrojů. Objekt má demonstrovat možná stavební řešení pro obalové konstrukce. Pro provozní chod stavby budou využívány pouze obnovitelné zdroje energie (solární energie, větrná energie atd.). Objekt EnviHut je koncipován jako soběstačná mobilní jednotka, kterou lze například využít jako víkendový rekreační objekt. Více informací o půdorysném a stavebním řešení, vnitřních instalacích a zásobování energií je uvedeno na webových stránkách testovacího objektu - <http://envihut.com/>.

10.1 PARAMETRY EXPERIMENTÁLNÍHO DOMU

Obálkové konstrukce vybudovaného experimentálního domu byly navrženy tak, aby součinitele prostupu tepla vyhovovali závazné normě ČSN 73 0540-2/2011 Tepelná ochrana budov – část 2. Konstrukce podlahy a obvodových stěn byly navrženy jako lehké montované s nosnou částí z dřevěných prvků.

Tab. 6. S1 – skladba podlahy

Název vrstvy včetně základní charakteristiky	tl. [mm]	λ [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]
Nášlapná vrstva tvořená OSB deskami	25	0,130
tepelná izolace XPS	20	0,035
Tepelná izolace EPS v dřevěném roštu	200	*0,084

* - λ nehomogenní vrstvy upravená výpočtem

Podlaha neleží přímo na zemině, je pod ní provětrávaný prostor o velikosti 100mm.

Tab. 7. S2 – skladba stěny

Název vrstvy včetně základní charakteristiky	tl. [mm]	λ [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]
OSB deska	22	0,130
Tuhá izolační deska kingspan	40	0,022
Dřevěný rošt vyplněný minerální vatou	160	*0,052
SDK deska	12,5	0,21
Vzduchová mezera	20	
Dřevěný obklad	12,5	

* - λ nehomogenní vrstvy upravená výpočtem

Pro disertační práci je hlavním zkoumaným úsekem střešní konstrukce pokrytá vegetací, která byla navržena jako sedlová se sklonem 25° a zateplením nad krokviemi. Vzduchová dutina v této střešní konstrukci pracuje s proměnnou charakteristikou, a to díky mechanismu, které je zřízeno na její otevírání a zavírání. Pro naši potřebu je stále dutina uzavřena.

Tab. 8. S3 – skladba šikmé vegetační střechy

Název vrstvy včetně základní charakteristiky	tl. [mm]	λ [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]
Nosná konstrukce tvořená dřevěnými krokviemi průřez prvků dle statických požadavků		
Dřevěné podbití smrková hoblovaná prkna 18/120/3000mm	18	0,180
Parotěsná fólie	1	
Uzavřená vzduchová mezera (laťování 45/45/1000mm)	45	0,294
Parotěsná fólie	0,15	2,300
Tuhá tepelně izolační deska	240	0,040
Dřevotřískové desky	18	0,180
Vzduchová mezera s proměnnou charakteristikou tj. provětrávaná/neprovětrávaná	60	
Záklop tvořený OSB deskami	22	0,130
Hydroizolační fólie	2	0,500
Retenční vrstva vegetace	10	0,035 – 0,600
Vegetace (λ dle druhu zeminy a obsahu vody v zemině)	120	0,200 – 1,660

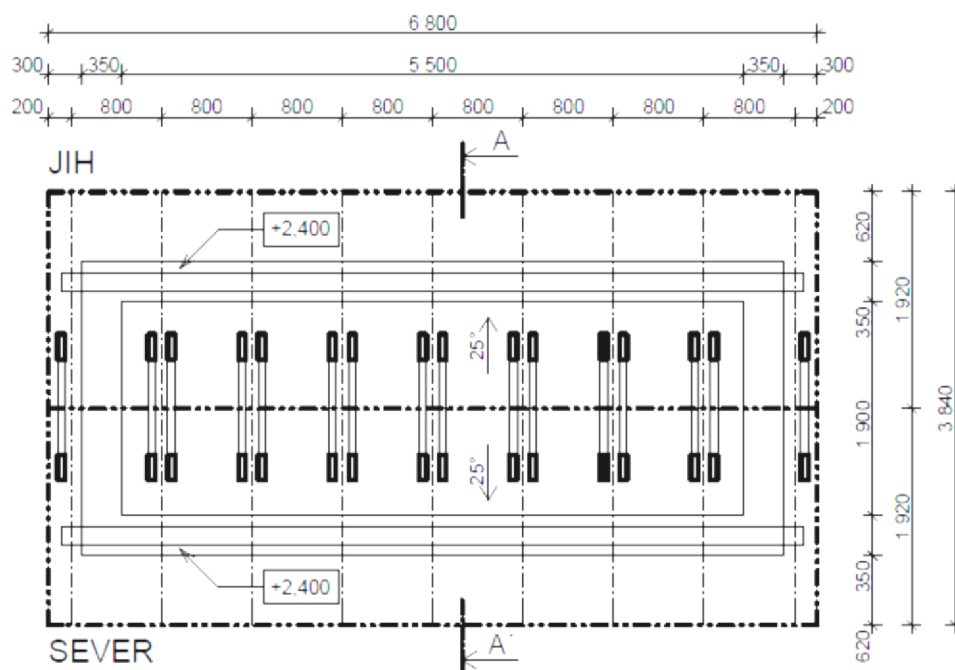
Sedlová střešní konstrukce má sklon 25° a je rozdělena do tří vegetačních sekcí. První sekce má skladbu tvořenou z desek z recyklovaného PES o tloušťce 60mm, jenž tvoří

vegetačně-retenční vrstvu, dále buňkovým záchytným systémem, který je vyplněn drceným substrátem s výškou 80mm a nakonec vegetací tvořenou rostlinami rozchodníků. Tento systém reprezentuje střechu vegetačně chudou.

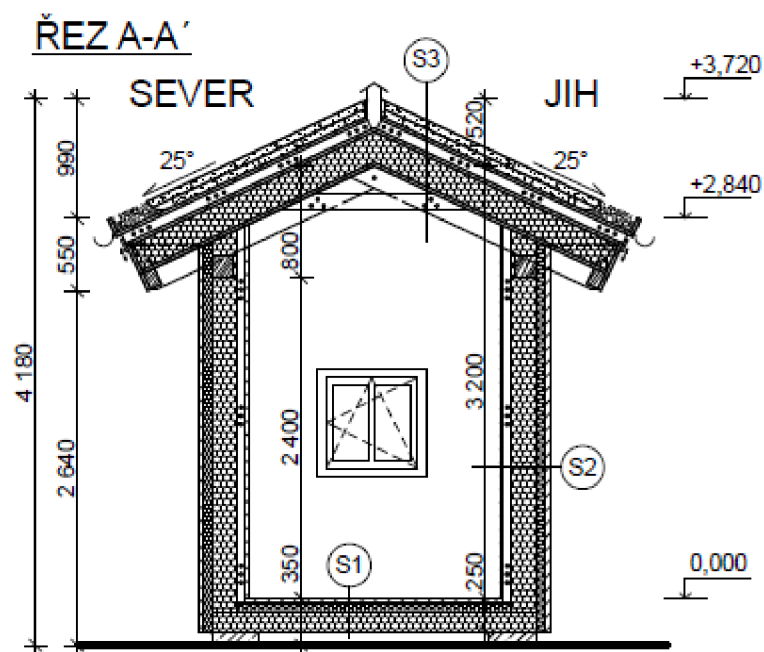
Prostřední segment je založen na švýcarském konceptu a zastupuje střechu biodiverzní neboli vegetačně bohatou. Tato skladba je podporována vegetačně-retenční vrstvou z desek z recyklovaného PES o tl. 40 nebo 60 mm, na které je umístěn záchytný systém z deskového materiálu a výztužné sítě. Na tuto vrstvu je navršena přírodní zemina z výkopku o síle 180mm. Pro urychlení růstu vegetace byly použity travní koberce doplněné o osivo z okolně rostoucích rostlin (vlčí mák, heřmánek atd.).

Poslední část reprezentuje islandský koncept provádění šikmých zelených střech. Na vegetačně-retenční vrstvu různých mocností jsou pokládány travní koberce, mezi které je doplněná výztužná síť a rostlá zemina, přičemž první dva koberce jsou kladeny kořeny nahoru a poslední koberec, který tvoří povrch konstrukce, je kladen kořeny dolů. Takto navržená a provedená vrstva tvoří velmi odolný a stálý systém, který je schopen odolávat extrémním klimatickým vlivům. Každý segment je doplněn o vlhkostní čidla do zeminy a dále čidla teplotní, které jsou umístěny nad povrchem. Orientace střešních roviny je sever (SSV) - jih (JJZ).

Na obrázku 27 a 28 je znázorněn půdorys střechy a řez experimentálním domkem.



Obr. 27 Půdorys střechy experimentálního domku.



Obr. 28 Řez experimentálním domkem.

Následuje několik obrázků z výstavby domku.



Obr. 29 Provádění hydroizolace.



Obr. 30 Pohled po ukončení první sekce vegetace.



Obr. 31 Provádění středové sekce vegetace.



Obr. 32 První zavlažování vegetační střechy.



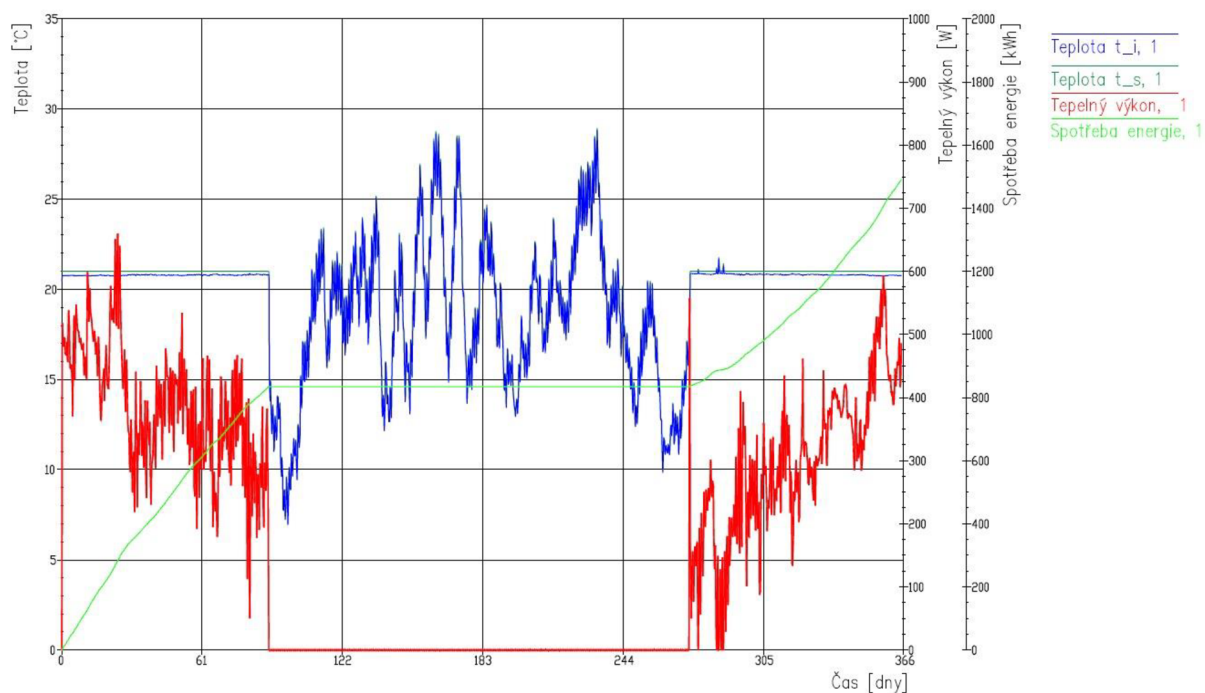
Obr. 33 Provádění opláštění domku.



Obr. 34 Konečný vzhled experimentálního domku.

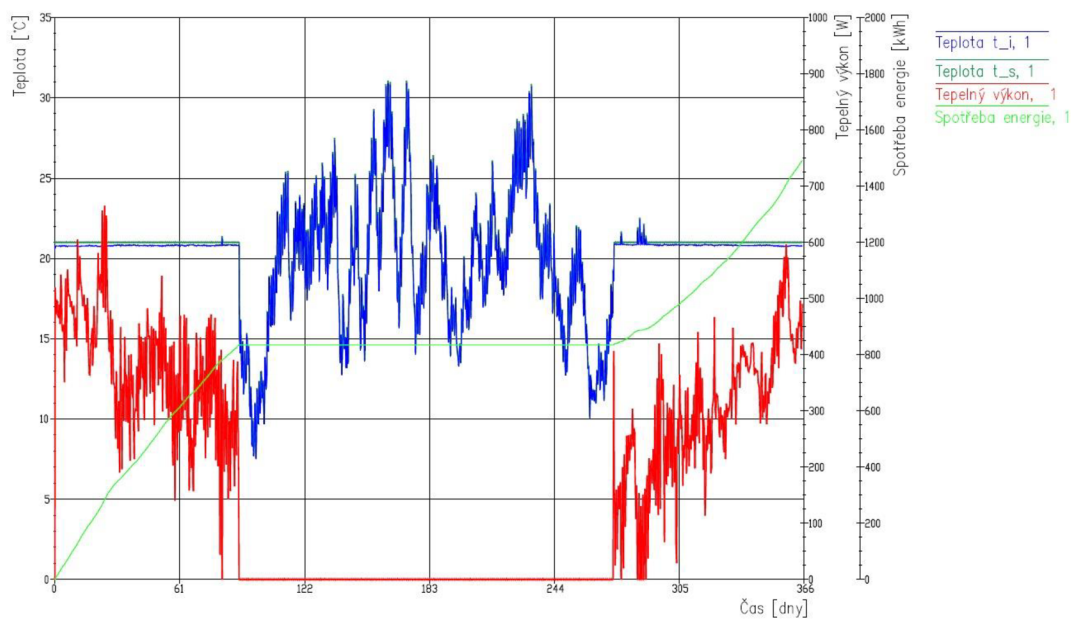
10.2 VÝPOČET V SESTAVENÉM STROJOVÉM PROGRAMU

Experimentální dům byl namodelován v sestrojeném strojovém programu. Bylo zde počítáno s normovou výměnou vzduchu a to $0,5 \text{ h}^{-1}$. Dále bylo uvažováno s výlukou vytápění v měsících duben až září. V ostatních měsících bylo vytápěno na 21°C . Byly zde namodelovány dvě varianty a to s vegetační střechou a pak se střechou bez vegetace. Co se týče spotřeby energie, tak ta se nijak extrémně nelišila. Důvodem byl objekt o malé ploše a objemu. Odhadovaná spotřeba energie v objektu s vegetací činila $1465,8 \text{ kWh/rok}$ a v tentýž objektu bez vegetační střechy byla spotřeba $1491,1 \text{ kWh/rok}$. Rozdíl byl tedy nepatrný a činil jen $25,3 \text{ kWh/rok}$.



Graf 7 Odhadovaný průběh teplot, tepelný výkon a spotřeba energie objektu s vegetační střechou.

Jak je znázorněno v grafu 7, tak nejvyšší teplota v interiéru byla vypočtena 21.8. v 18:00 a to 28.8°C a průměrná povrchová teplota v interiéru činila 28,9°C. Pro srovnání v modelu bez zeminy byla vypočtena nejvyšší teplota v interiéru tentýž den a čas 30, 7°C a průměrná povrchová teplota interiéru 30,9°C, jak je patrné z grafu 8. Rozdíl teploty v interiéru je tedy 1,9K a průměrná povrchová teplota vzrostla oproti modelu s vegetační střechou o 2K.



Graf 8 Odhadovaný průběh teplot, tepelný výkon a spotřeba energie objektu se střechou bez vegetace.

Bylo tak výpočtově prokázáno, že vegetační střecha zabraňuje přehřívání objektu v prostoru pod střechou.

10.3 ZPŮSOB MĚŘENÍ V EXPERIMENTÁLNÍM DOMĚ

Pro měření a dlouhodobé zaznamenávání měřených veličin byla použita stanice Davis Instruments Vantage Pro2 viz obrázek 35.



Obr. 35 Součásti meteostanice Davis Instruments Vantage Pro2

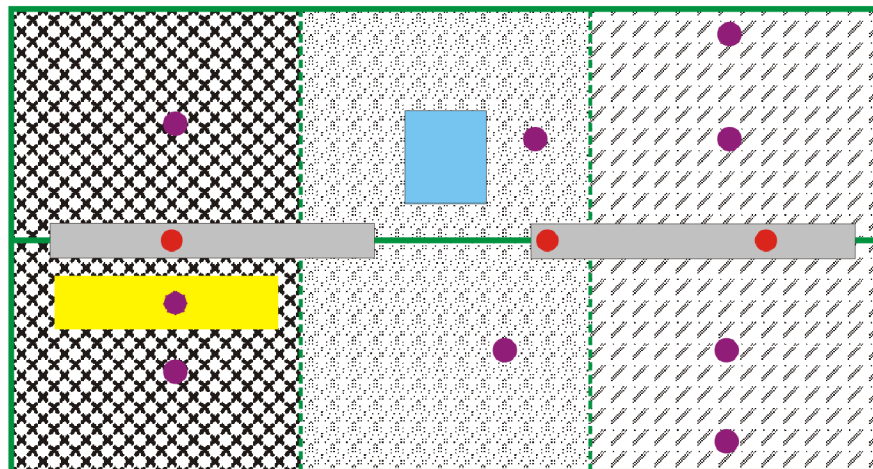
Pro zaznamenání teploty byla použita čidla Sensit TG12-20 a TG8-40. Jako vlhkostní čidla byla použita čidla se stanicí Davis, a to sensor typu 6440 vyobrazený na obrázku 36.



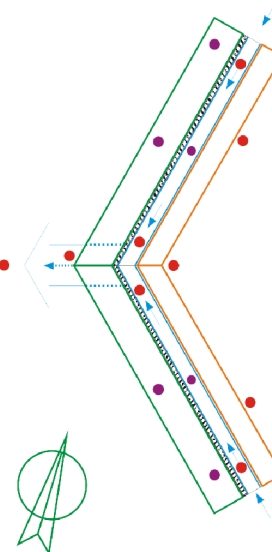
Obr. 36 Vlhkostní čidlo typu 6440

Rozmístění čidel je patrné z obrázku 36.

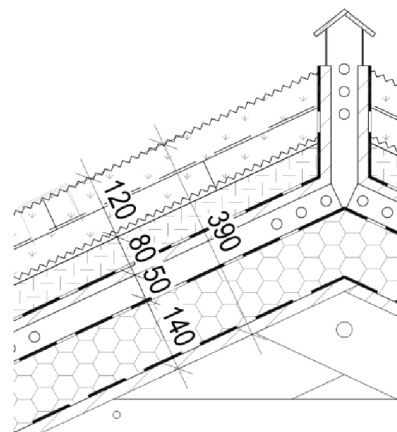
PŮDORYS ZASTŘEŠENÍ



ŘEZ POLEM



- TEPLOTNÍ MĚŘENÍ
- TEPLOTNĚ-VLHKOSTNÍ MĚŘENÍ
- ⊗ ROZCHODNÍKOVÁ VARIANTA
- ⋯ BIODIVERZNÍ LUČNÍ VARIANTA
- ⚡ SEVERSKÁ TURFOVÁ VARIANTA
- ▬ ODVĚTRÁNÍ HŘEBENE
- STŘEŠNÍ OKNO
- SOLÁRNÍ POLE
- VEGETAČNÍ SOUVRSTVÍ
- - HRANICE VEGETAČNÍCH VARIANT
- VĚTRANÁ VZDUCHOVÁ MEZERA
- NOSNÁ KONSTRUKCE



Obr. 37 Schéma střešní konstrukce s rozmístěním čidel

Související teplotní a vlhkostní údaje z dlouhodobého měření na popisované zkušební střeše však nebylo možno pro vyhodnocení využít, neboť do doby odevzdání doktorské práce nebyl měřicí cyklus během zimního období dokončen.

11 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ

Pro ověření přesnosti výpočtů byl sestaven box, na kterém byla vytvořena skladba střešní konstrukce podobná té z experimentálního domu. Experimentální box byl umístěn do exteriéru v areálu ÚTHD. Skladba střešní konstrukce je uvedena v tabulce 9. Do zeminy jsme ovšem nevysadili žádné rostliny z důvodu extrémních venkovních klimatických podmínek. V boxu byl umístěn termostat, který temperoval teplotu vnitřního prostoru na 22°C. Byly měřeny teploty v boxu t_b , poté mezi parotěsnou folií a tepelnou izolací t_l , teplota mezi asfaltovým HI pásem a zemínou t_2 a teplota exteriéru t_e . Teploty byly zaznamenávány pomocí měřidla Ahlborn s teplotním čidlem a teplotně vlhkostním čidlem viz obrázek 38.

Tab. 9. Skladba vegetační střechy experimentálního boxu

Název vrstvy včetně základní charakteristiky	tl. [mm]	λ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]
Dřevěné podbití smrková hoblovaná prkna 18/120/3000mm	18	0,18
Parotěsná fólie	1	0,25
Tuhá tepelně izolační deska	240	0,04
Dřevotřískové desky	18	0,18
Záklon tvořený OSB deskami	22	0,13
Hydroizolační fólie	2	0,5
Vegetace (λ dle druhu zeminy a obsahu vody v zemině)	100	1,5



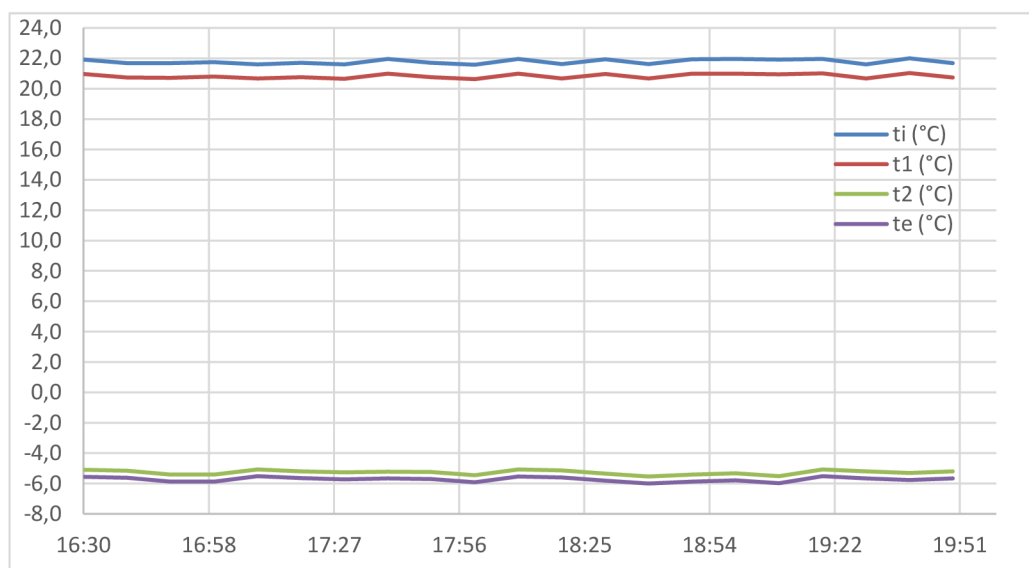
Obr. 38 Vyobrazení teplotní ústředny Ahlborn s čidly

11.1 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

Měření probíhalo v ustáleném teplotním stavu bez vlivu oslunění v čase od 16:30 do 19:50 hod. Výsledky měření jsou uvedeny v tabulce 10 a vyobrazeny v grafu 9.

Tab. 10. Hodnoty zaznamenané z měření

Čas	t_i (°C)	t_l (°C)	t_2 (°C)	t_e (°C)
16:30	21,9	21,0	-5,1	-5,6
16:40	21,7	20,7	-5,2	-5,6
16:50	21,7	20,7	-5,4	-5,9
17:00	21,7	20,8	-5,4	-5,9
17:10	21,6	20,7	-5,1	-5,5
17:20	21,7	20,8	-5,2	-5,6
17:30	21,6	20,6	-5,3	-5,7
17:40	21,9	21,0	-5,2	-5,7
17:50	21,7	20,7	-5,2	-5,7
18:00	21,6	20,6	-5,4	-5,9
18:10	21,9	21,0	-5,1	-5,5
18:20	21,6	20,7	-5,1	-5,6
18:30	21,9	21,0	-5,3	-5,8
18:40	21,6	20,7	-5,5	-6,0
18:50	21,9	21,0	-5,4	-5,9
19:00	22,0	21,0	-5,3	-5,8
19:10	21,9	20,9	-5,5	-6,0
19:20	21,9	21,0	-5,1	-5,5
19:30	21,6	20,7	-5,2	-5,7
19:40	22,0	21,0	-5,3	-5,8
19:50	21,7	20,7	-5,2	-5,6



Graf 9 Graficky znázorněné výsledky měření ve °C v daném čase.

11.2 ANALÝZA SHODY VYPOČTENÝCH A NAMĚŘENÝCH HODNOT

Abych prokázal, že výpočtový program se blíží reálným hodnotám, zvolil jsem stacionární výpočet teploty v dané střešní konstrukci. Pro výpočet jsem zvolil teploty v čase 19:00 hod, kdy byla naměřená teplota interiéru $t_i = 22^\circ\text{C}$, teplota mezi parotěsnou folií a tepelnou izolací $t_1 = 21^\circ\text{C}$, teplota mezi asfaltovým HI pásem a zeminou $t_2 = -5,3^\circ\text{C}$ a teplota naměřená v exteriéru $t_e = -5,3^\circ\text{C}$. Výpočet teplot mezi vrstvami t_1 a t_2 byl proveden dle rovnice:

$$\frac{t_i - t_e}{R_{si} + R + R_{se}} = \frac{t_i - t_{1;2}}{R_{si} + R_{1;2}} \quad (52)$$

Po úpravě:

$$t_{1;2} = t_i - \frac{t_i - t_e}{R_{si} + R + R_{se}} (R_{si} + R_{1;2}) \quad (53)$$

kde: $t_{1;2}$ teplota v dané vrstvě [$^\circ\text{C}$],
 t_i teplota interiéru [$^\circ\text{C}$],
 t_e teplota exteriéru [$^\circ\text{C}$],
 R tepelný odpor konstrukce [$\text{m}^2\text{K/W}$],
 R_{si} odpor při přestupu tepla na vnitřní straně konstrukce [$\text{m}^2\text{K/W}$],
 R_{se} odpor při přestupu tepla na vnější straně konstrukce [$\text{m}^2\text{K/W}$],
 $R_{1;2}$ tepelný odpor konstrukce do dané vrstvy [$\text{m}^2\text{K/W}$].

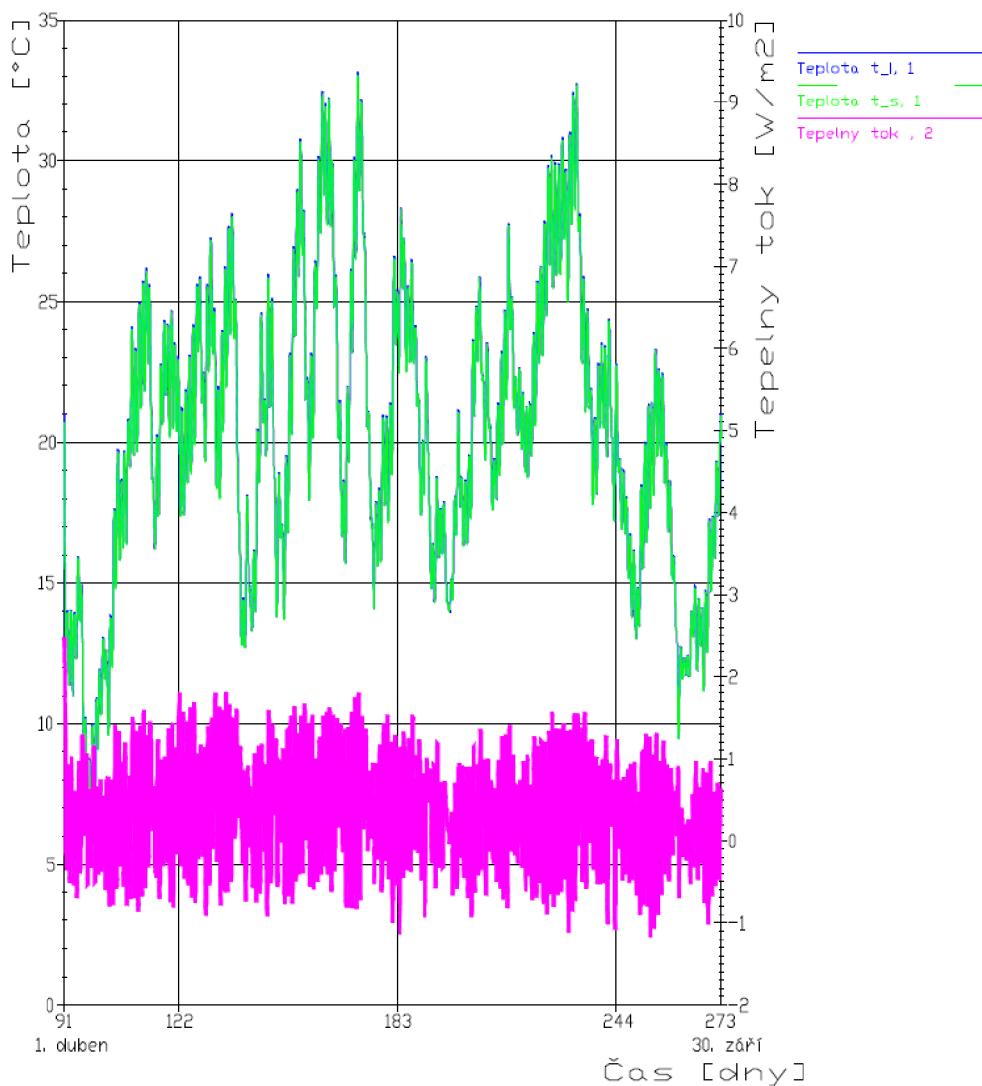
Po dosazení patřičných hodnot do vzorce nám vyjde teplota mezi parotěsnou folií a tepelnou izolací $t_1 = 20,8^\circ\text{C}$, teplota mezi asfaltovým HI pásem a zeminou $t_2 = -5,4^\circ\text{C}$. Vypočtené hodnoty teplot se takřka shodují s naměřenými hodnotami. Díky této shodě lze prokázat výpočtové teploty z programu jako těsné s reálnými teplotami v konstrukci.

11.3 VÝPOČET PRŮBĚHU TEPLŮ VE STŘEŠNÍ KONSTRUKCI S RŮZNOU MOCNOSTÍ ZEMINY

Ve strojovém programu byly namodelovány 4 druhy střešní konstrukce. Nejprve totožná s experimentálním měřením tzn. se 100 mm zeminy. Poté byla mocnost zeminy navýšena na 200 a 300 mm. Pro porovnání byla namodelována stejná konstrukce, akorát bez zeminy. Tím zjistíme, o kolik bude teplota interiéru méně příznivá než s vegetační střeškou. Pro zajímavost byla namodelována totožná střešní konstrukce jen se 100 mm, 200 mm a 300 mm šterku místo zeminy.

11.3.1 STŘEŠNÍ KONSTRUKCE S MOCNOSTÍ ZEMINY 100MM

Jak bylo zmíněno výše, totožná konstrukce střechy byla namodelována v sestaveném výpočetním programu. Jelikož byla uvažována výluka vytápění od 1. dubna do 30. září, v grafu jsou zaznamenány teploty interiéru (Teplota $t_{i, 1}$) a průměrná teplota na povrchu konstrukce (Teplota $t_{s, 1}$) právě v tomto období, abychom zjistili, jaký vliv má vegetace na přehřívání prostoru pod ní v letních měsících, blíže graf 10.

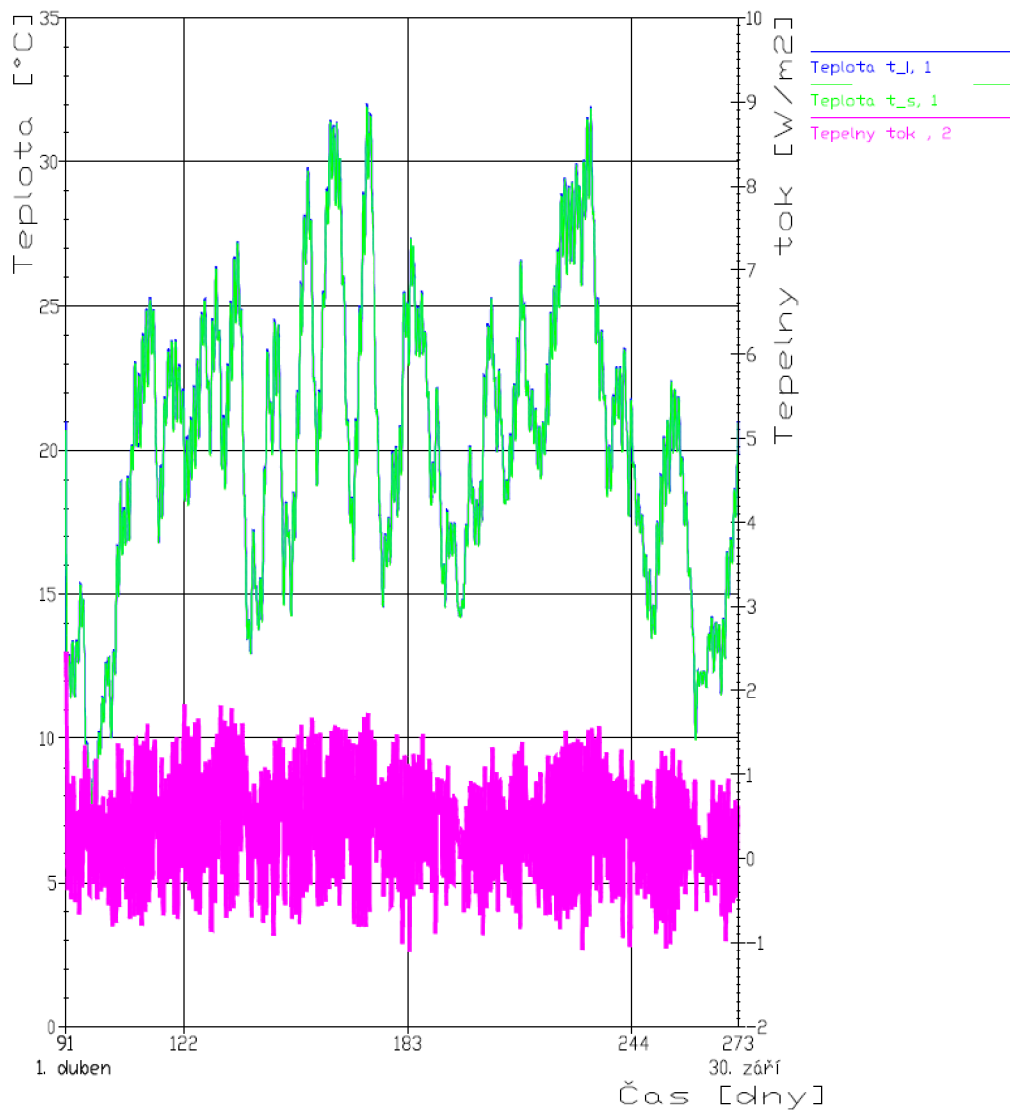


Graf 10 Průběh teplot v letních měsících v posuzované střešní kci se 100mm zeminy.

V období mezi 1. dubnem a 30. zářím byla vypočtena nejvyšší teplota interiéru 22. června ve 12 hodin odpoledne a to 32°C.

11.3.2 STŘEŠNÍ KONSTRUKCE S MOCNOSTÍ ZEMINY 200MM

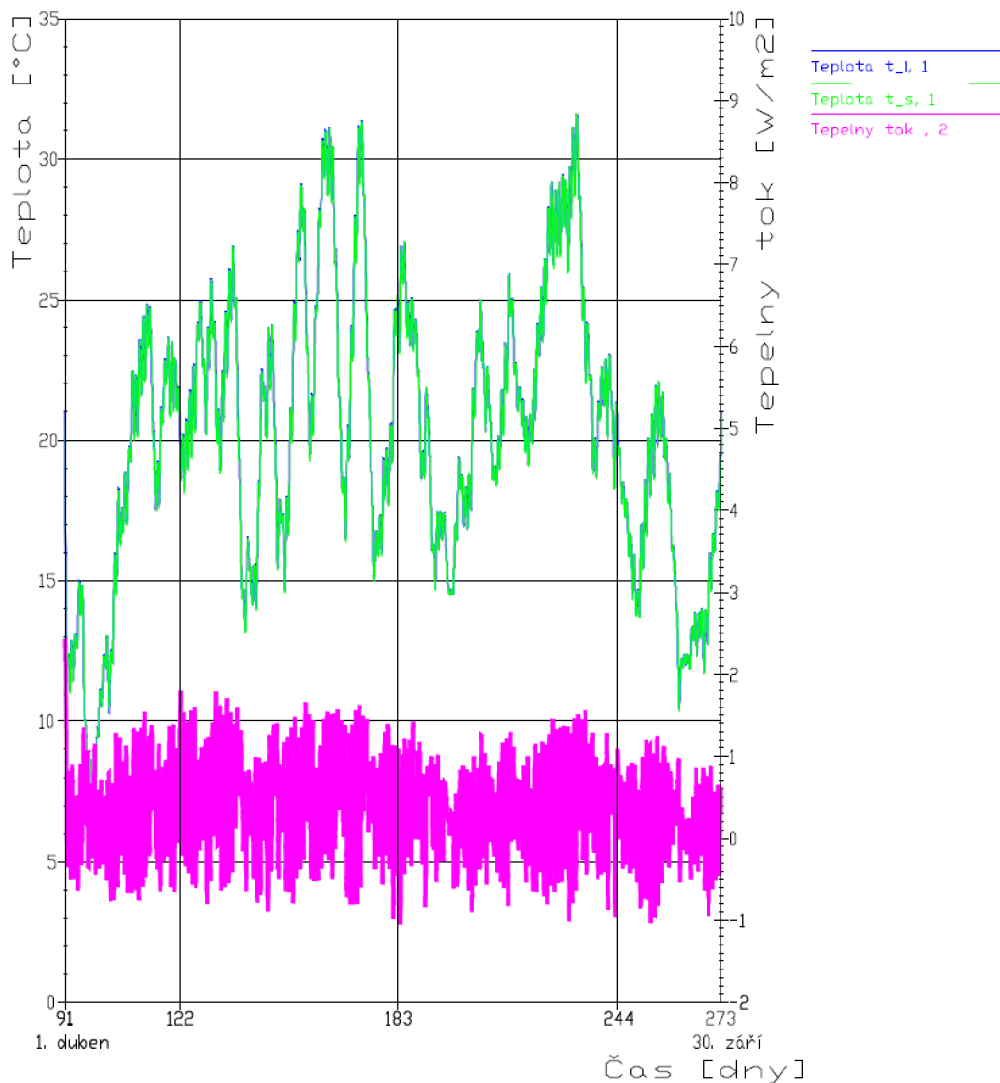
Výpočtem jsme zjistili nejvyšší teplotu interiéru opět 22. června ve 12:00 odpoledne a to 31,5°C. Zde je patrné zlepšení oproti střešní konstrukci s mocností 100mm zeminy o 0,5K viz graf 11.



Graf 11 Průběh teplot v letních měsících v posuzované střešní kci se 200mm zeminy.

11.3.3 STŘEŠNÍ KONSTRUKCE S MOCNOSTÍ ZEMINY 300MM

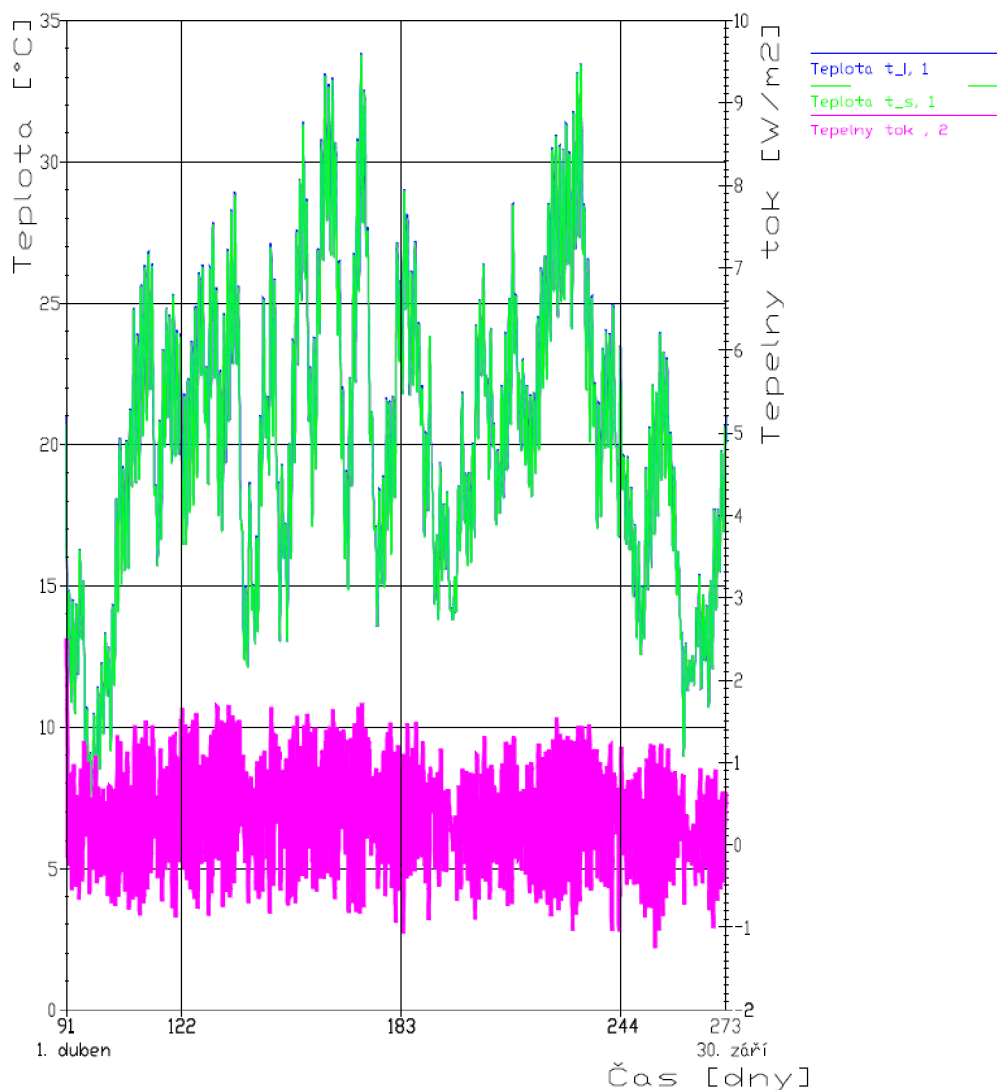
Ve střešní konstrukci s mocností 300mm zeminy jsme vypočítali odhadovanou teplotu interiéru ve stejném čase jako v minulých případech a to 22. června ve 12 hodin odpoledne 31,1°C. Zde je patrné zlepšení oproti konstrukci s mocností 100 mm zeminy o 0,9K a oproti střešní konstrukci s vrstvou zeminy 200 mm o 0,4K. Blíže graf 12.



Graf 12 Průběh teplot v letních měsících v posuzované střešní kci se 300mm zeminy.

11.3.4 STŘEŠNÍ KONSTRUKCE BEZ ZEMINY

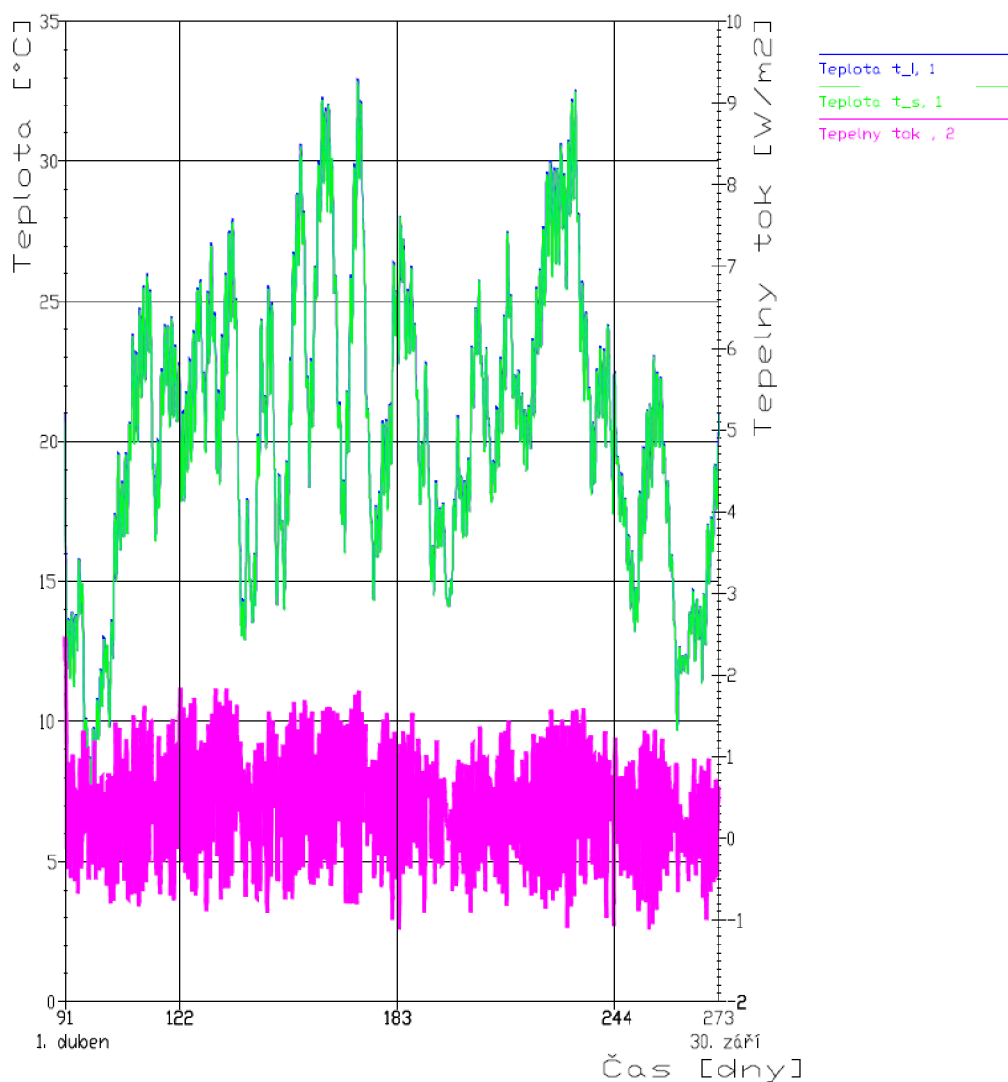
Pokud budeme uvažovat stejnou střešní konstrukci, ale bez zeminy, výpočtem dostaneme 22. června ve 12 hodin odpoledne teplotu interiéru 33,8°C. Zde je patrné zhoršení oproti střešní konstrukci se 100 mm vrstvou zeminy o 1,8K, s 200 mm jde o zhoršení o 2,3K a oproti konstrukci s mocností zeminy 300 mm zhoršení o 2,7K. Viz graf 13.



Graf 13 Průběh teplot v letních měsících v posuzované střešní kci bez zeminy.

11.3.5 STŘEŠNÍ KONSTRUKCE SE 100MM ŠTĚRKU MÍSTO ZEMINY

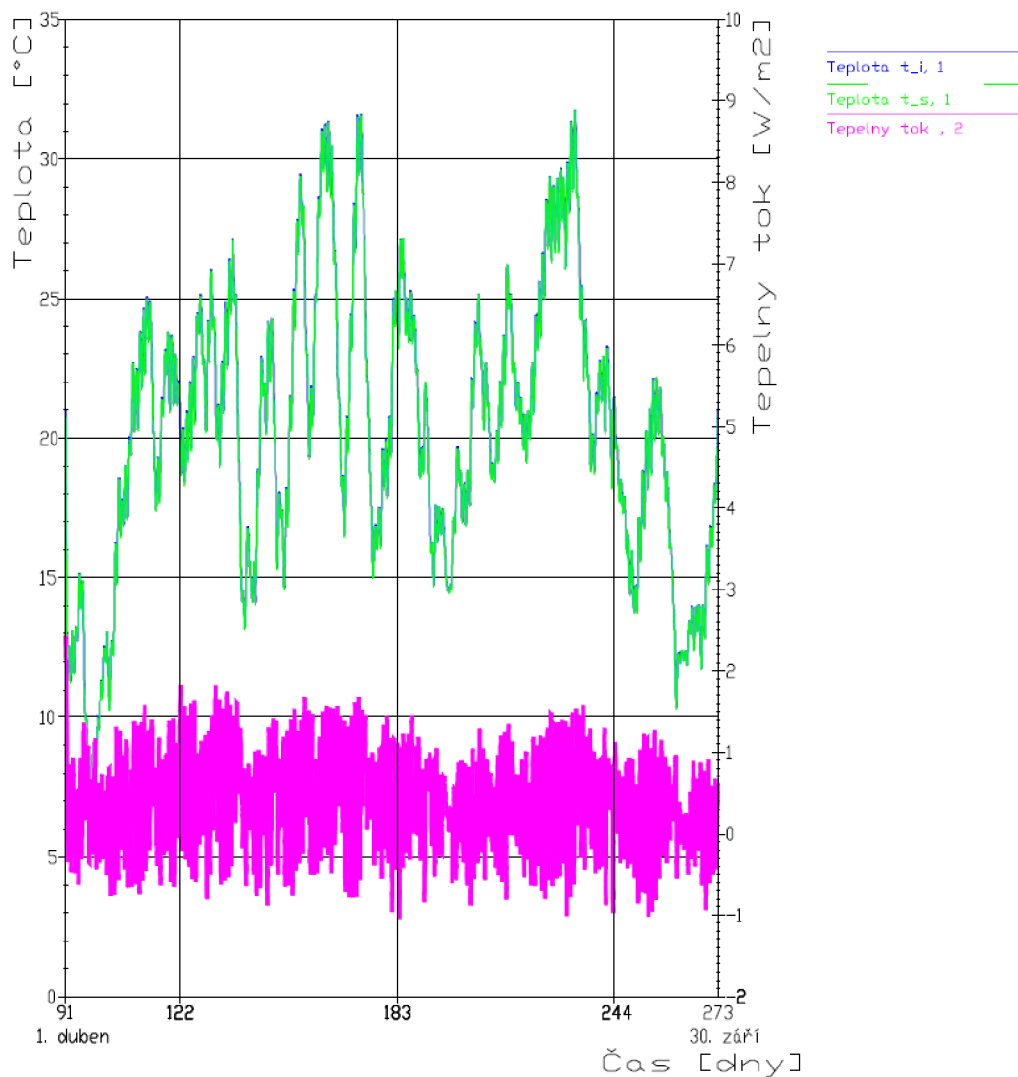
Pro zajímavost byla vypočtena střešní konstrukce se 100 mm zeminy. U této konstrukce byla vypočtena maximální teplota interiéru 22. června ve 12 hodin odpoledne 32,4°C viz graf 14. Zde je zlepšení oproti konstrukci bez zeminy a štěrku o 1,4K, ale zhoršení oproti konstrukci se 100 mm zeminy a to o 0,4K.



Graf 14 Průběh teplot v letních měsících v posuzované střešní kci se 100mm štěrku.

11.3.6 STŘEŠNÍ KONSTRUKCE SE 200MM ŠTĚRKU MÍSTO ZEMINY

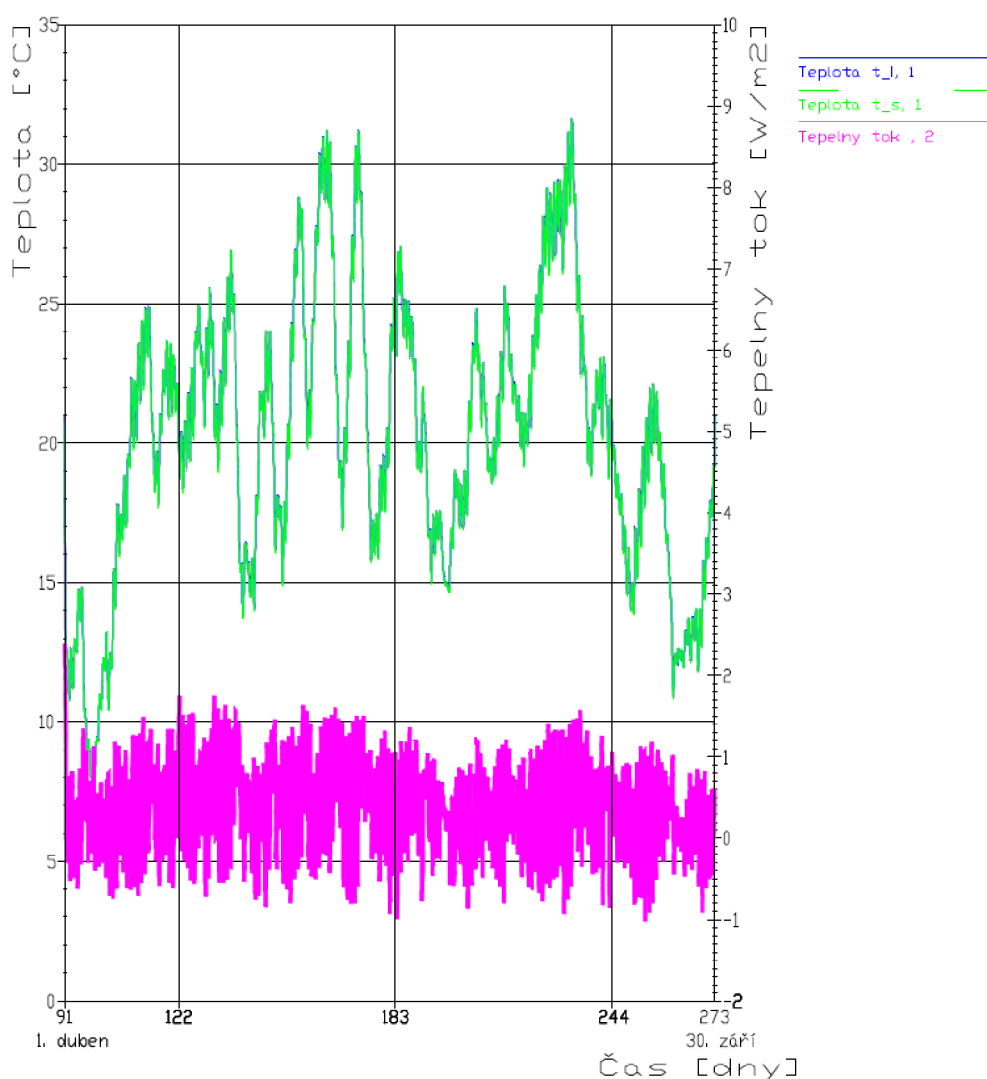
Při zvýšení mocnosti štěrků na 200 mm vypočteme teplotu interiéru 22. června ve 12 hodin odpoledne 31,7°C. Teplota se nám oproti konstrukci bez zeminy a štěrků zlepšila o 2,1K. Oproti střešní konstrukci se 100 mm štěrků se zlepšila o 0,7K, oproti konstrukci se 100 mm zeminy se zlepšila o 0,3K, ale pokud ji porovnáme s konstrukcí s mocností zeminy 200 mm, tak se nám teplota interiéru zhoršila o 0,2K. Podrobněji v grafu 15.



Graf 15 Průběh teplot v letních měsících v posuzované střešní kci se 200mm štěrků.

11.3.7 STŘEŠNÍ KONSTRUKCE SE 300MM ŠTĚRKU MÍSTO ZEMINY

Jako poslední byla vymodelována střešní konstrukce s mocností šterku 300 mm. Nejvyšší teplota byla opět vypočtena 22. června ve 12 hodin odpoledne a to 31,4°C. Zde došlo ke zlepšení oproti střešní konstrukci bez šterku a zeminy o 2,4K. Oproti střešní konstrukci se 100mm šterku se teplota interiéru zlepšila o 1K, oproti konstrukci s 100 mm zeminy o 0,6K, v porovnání s konstrukcí s 200 mm šterku došlo ke zlepšení o 0,3K a oproti konstrukci s 200 mm zeminy o 0,1K. Ovšem oproti konstrukci s mocností zeminy 300 mm došlo ke zhoršení teploty interiéru o 0,3K. Graf 16 znázorňuje průběh teplot ve vymezeném období v konstrukci s 300mm šterku umístěných nad hydroizolační membránu.



Graf 16 Průběh teplot v letních měsících v posuzované střešní konstrukci se 300mm šterku.

11.4 SHRnutí KAPITOLY 11 – EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ

Z měření teplot na reálné skladbě střešní konstrukce a následného porovnání s výsledky stacionárního výpočtu se podařilo prokázat, že vypočtené odhady průběhů teplot jsou identické s měřenými teplotami. Také lze výpočtově prokázat, že střešní konstrukce doplněná o zeminu snižuje teplotu v interiéru podstřešního prostoru, tudíž poskytuje účinek ve snížení teploty v interiéru při vysokých teplotách v letním období. Pro zajímavost byla modelována střešní konstrukce, která obsahovala místo vrstvy zeminy vrstvu štěrku. Účinky tohoto typu střešů jsou výpočtově srovnatelné se střešami obsahujícími zeminu. Nelze ovšem dovodit to, že značné množství tepla pohltí listy rostlin vysazené na do této zeminy. To se ovšem kvůli náročnosti výpočtu nepodařilo prokázat a tak si dovoluji tvrdit, že reálné teploty v interiéru při vysazení zeleně budou příznivější.

12 ZÁVĚR PRÁCE

Cílem této práce bylo prokázat příznivý účinek vegetační střechy, přesněji vegetačního souvrství, z tepelně-technického hlediska prokázat příznivější teplotní poměry ve stavbě při její aplikaci. Takový projev lze zachytit pouze tehdy, jestli-že se posuzuje teplotní průběh nestacionárně za chodu reálných okrajových klimatických teplot blízkých realitě. Použitím stacionárních nebo quasi-stacionárních okrajových klimatických teplot, které se obvykle využívají pro stanovení energetické náročnosti budov, uvedený účinek zachytit nelze. Náročný simulační výpočet, v němž se uplatní všechny fyzikální materiálové vlastnosti (součinitel tepelné vodivosti, objemová hmotnost i tepelná kapacita), však poskytuje reálný obraz o teplotních pochodech probíhajících nejen ve střešní konstrukci objektu, nýbrž ve všech plošných konstrukcích celého stavebního objektu. Podle výsledků z kapitoly 11. si dovoluji tvrdit, že výpočtové údaje ze simulace tepelné stability budov budou velmi těsně reálnému chování objektu, a při prokazování účinků vegetační střechy na tepelnou stabilitu v objektu se o ně opírat.

Podle výsledků výpočtů uvedených v kapitole 8.1 - Nestacionární výpočet průběhu teplot ve střešní konstrukci, prokazují reálnou účinnost konstrukce vegetační střechy z hlediska snížení účinku letního klimatického zatížení vrstvou zeminy umístěné na střeše. Tuto skutečnost se podařilo výpočtově prokázat započtením tepelné kapacity zeminy. Ovšem výpočtové hodnoty se mohou od reality lišit, neboť povrchové teploty konstrukce ovlivňuje i volba vysazené zeleně, závlahové poměry, zhutnění zeminy aj. Obecně listy zeleně pohltní velké množství tepla, toto se mi však nepodařilo v simulačních výpočtech zohlednit. Ve skutečnosti lze očekávat příznivější teplotní poměry oproti výpočtové simulaci.

Dále byl proveden výpočet tepelné stability na modelu malé dřevostavby viz kapitola 8.2. Zde se podařilo prokázat reálnější projevy z hlediska účinku konstrukce vegetační střechy z hlediska tepelné stability na objekt. Výpočtově se podařilo prokázat, že v letním období střecha pokrytá vegetací eliminuje přehřívání podstřešních místností. Ovšem stejně jak u průběhu teplot se vypočtené hodnoty mohou od reality mírně lišit, neboť teplotu interiéru ovlivní i volba vysazené zeleně, závlahové poměry, zhutnění zeminy aj., jak bylo zmíněno výše. Ohledně spotřeby energie v posuzovaném objektu na vytápění za rok nebyly zjištěny větší rozdíly, důvodem je posouzení relativně malého objektu.

Pro další výpočty byl simulační prostředek doplněn o tepelné zisky od svítidel a pobytu osob, jak je uvedeno v kapitole 9.

Pro verifikaci výpočtového nástroje, zda výpočtové údaje jsou platné, byla zhotovena menší dřevostavby; bližší informace uvádím v kapitole 10. Pomocí dřevostavby měly být porovnány vypočtené hodnoty ze simulací tepelné stability s naměřenými. Teplotní a vlhkostní údaje z dlouhodobého měření na popisované zkušební střeše však nebylo možno pro vyhodnocení využít, neboť do doby odevzdání mé doktorské práce nebyl měřicí cyklus zimního období dokončen.

Proto byl sestaven menší měřicí box se skladbou střešní konstrukce a se zeminou, na němž byla vytvořena skladba střešní konstrukce identická skladbě střechy experimentálního domu. Experimentální box byl umístěn v areálu ÚTHD. Jak bylo zmíněno výše, naměřené experimentální teploty v daných vrstvách konstrukce se s výpočtovými teplotami shodovaly s rozdílem desetin Kelvínu. Lze tak prokázat, že výsledky provedených simulačních výpočtů jsou těsné reálným hodnotám. V důsledku toho lze prokázat, že vegetační souvrství střechy příznivě ovlivní teplotu uvnitř objektu, zejména v ohledu zlepšení teplotních poměrů určující míru tepelné pohody.

Na základě toho mohu shrnout, že vytčené cíle disertační práce se mi podařilo v celém rozsahu zadání splnit.

ABSTRACT

Dissertation deals with thermal technical assessment of vegetation roof with moisture, the more the influence of vegetation on the roof thermal stability of the structure. The aim of this work is to demonstrate the beneficial effect of vegetation roofs, specifically growing formation of thermo-technical point of view on the favorable temperature conditions in the building. Such speech can be captured only if it is judged-temperature profile dynamically daily operation of real marginal climatic temperatures. Using a stationary or quasi-stationary boundary climatic temperatures which are usually used for the determination of the energy performance of buildings, said effect can not be collected. Demanding simulation calculation, which apply material properties - thermal conductivity, density and thermal capacity, but gives a realistic picture of the thermal processes in progress not only in the roof structure of the building, but also across the entire circuit construction of a building.

During the preparation of the dissertation was assembled machine program that works with the energy flow between rooms in the building and the surrounding environment. Furthermore calculates temperature gain of residence of persons, internal lighting and sunlight. The values of the internal environment are calculated from surface temperature, relative humidity, air exchange and, of course, the indoor air temperature with hourly weather data. In constructing the program was included in the calculation of the solar radiation both on flat and on an inclined surface. The output of the energy value and temperature conditions in individual rooms, which include not only thermal insulation but also thermal storage properties of an object.

Using experimental measurements were able to demonstrate that the calculated values closely correlate real thermal processes, so it can be demonstrated through the calculated results of the vegetation roof has a favorable effect on the thermal state especially in the attic rooms.

PODĚKOVÁNÍ:

Velké poděkování patří zejména mým rodičům i mé přítelkyni za duševní i materiální podporu při studiu.

Dále mému školiteli prof. RNDr. Ing. Stanislav Štastník, CSc. za odborné vedení, za půjčení literatury a za ochotu a trpělivost při konzultacích.

13 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Alternativní řešení zelených střech [online]. [cit. 2014-12-29]. Isover. Dostupné z <http://www.isover.cz/alternativni-reseni-zelenych-strech>
- [2] BOHUSLÁVEK, P., HORSKÝ, V., JAKOUBKOVÁ, Š. a kol., *Vegetační střechy a střešní zahrady*. DEKTRADE a.s., 2009. 72 s. ISBN 978-80-87215-05-0
- [3] ČERMÁKOVÁ, B., MUŽÍKOVÁ, R., *Ozeleněné střechy*. Praha: Grada Publishing, 2009. 248 s. ISBN 978-80-247-1802-6.
- [4] GEPRT, Svatopluk. *Zelené střechy a střešní zahrady pro obytné budovy a stavby občanského vybavení, optimalizace skladby a použité vegetace: bakalářská práce*. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, Fakulta životního prostředí, 2012, 87 l. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Sovina, PhD.
- [5] ČSN 73 0540-2. *Tepelná ochrana budov: Požadavky*. 1 vyd. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011
- [6] Přednosti a význam zelených střech [online]. [cit. 2014-12-29]. Optigreen zelené střechy. Dostupné z <http://www.optigreen.cz/News/1.html>
- [7] Rozdělení rostlin [online]. [cit. 2013-05-22]. Dostupné z <http://www.zive-rostliny.cz/rozdeleni-rostlin>
- [8] Řehánek, J., Janouš, A., *Tepelné ztráty budov a možnosti jejich zmenšování*, SNTL 1985
- [9] Střešní zahrada v Lipníku nad Bečvou [online]. [cit. 2014-12-29]. Dostupné z <http://www.kudykam.com/stresni-zahrada-v-lipniku-nad-becvou.html>
- [10] Teorie zelených střech [online]. [cit. 2014-12-29]. Gazda: projekční a inženýrská činnost. Dostupné z [www:http://gazda.webpark.cz/gr/theory.htm](http://www.gazda.webpark.cz/gr/theory.htm)
- [11] Tepelná stabilita místnosti [online]. [cit. 2015-01-02]. Dostupné z <http://www.topin.cz/download.php?idx=84614&di=7>
- [12] ISOVER SAINT-GOBAIN, *Střešní zahrady Isover – řešení pro novostavby i rekonstrukce*, Praha: Divize Isover, 2011. 12 s
- [13] [online]. [cit. 2016-09-29]. Dostupné z <http://www.falcosystem.cz/files/Zelene-strechy.pdf>
- [14] [online]. [cit. 2016-10-03]. Dostupné z <http://fast10.vsb.cz/studijni-materialy/ps4/literatura.html>
- [15] [online]. [cit. 2016-10-09]. Dostupné z <http://www.forting.cz/co-je-pasivni-dum.html>
- [16] [online]. [cit. 2016-10-09]. Dostupné z <http://www.luchtdichtrenoveren.nl/blowerdoor-test>
- [17] Recktenwald, G., Crank-Nicolson Solution to the Heat Equation. ME 448/548 Notes, Portland State University, Department of Mechanical Engineering, 2005

14 SEZNAM NEJDŮLEŽITĚJŠÍCH UŽITÝCH SYMBOLŮ

a	$[\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$	Teplotní vodivost
A	$[\text{m}^2]$	Plocha
b	$[\text{W}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-4} \cdot \text{K}^{-2}]$	Tepelná jímavost
C	$[\text{W}/\text{m}^2]$	Tepelný tok konvekcí
C_{res}	$[\text{W}/\text{m}^2]$	Teplo odevzdané ohříváním vdechovaného vzduchu
c	$[\text{J} \cdot \text{kg} \cdot \text{K}^{-1}]$	Měrná tepelná kapacita
c_{vzd}	$[\text{J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})]$	Objemová tepelná kapacita vzduchu
$c_{\check{c}}$	$[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)]$	Součinitel sálání absolutně černého tělesa
d	$[\text{m}]$	Tloušťka
E_{res}	$[\text{W}/\text{m}^2]$	Výdej tepla odpařováním vody v plicích
eqt	$[\text{min}]$	Časová korekce
h_0	$[\text{rad}]$	Úhel výšky slunce nad horizontem
$h_{m,si}$	$[\text{m}^3]$	Součinitel přestupu tepla na vnitřní straně m -té konstrukce
L_g	$[\text{m}]$	Celkový viditelný obvod zasklení
M	$[\text{W}/\text{m}^2]$	Energetický výdej
n	$[\text{h}^{-1}]$	Intenzita výměny vzduchu
n_L	$[-]$	Počet lidí
n_z	$[-]$	Počet žen
n_d	$[-]$	Počet dětí
n_m	$[-]$	Počet mužů
\dot{Q}^M	$[\text{W}]$	Tepelný tok v místnosti
\dot{Q}_{ztr}	$[\text{W}]$	Tepelný tok vyvolaný vnitřními ztrátami
\dot{Q}_{zisk}	$[\text{W}]$	Tepelný tok vyvolaný vnitřními zisky
q	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-2}]$ $[\text{W} \cdot \text{m}^{-2}; \text{met}]$	Hustota tepelného toku Měrný tepelný výkon
R	$[\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}]$	Tepelný odpor
R_s	$[\text{W}/\text{m}^2]$	Výdej tepla sáláním
S	$[\text{m}^2]$	Plocha
t	$[\text{s}], [\text{h}]$	Čas
T_p	$[\text{K}]$	Termodynamická teplota sálajících ploch
U	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$	Součinitel prostupu tepla konstrukce
U_g	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$	Součinitel prostupu tepla zasklení

U_f	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}]$	Součinitel prostupu tepla rámu
V	$[\text{m}^3]$	Objem
V_{LV}	$[\text{m}^3/\text{s}]$	Objemový tok vzduchu proudícího do místnosti při větrání
W	$[\text{J}]$	Množství tepla
W_m	$[\text{W}/\text{m}^2]$	Mechanická práce
Δx	$[\text{m}]$	Tloušťka parciální vrstvy
λ	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$	Součinitel tepelné vodivosti
θ	$[\text{°C}]$	Teplota
θ_{ai}	$[\text{°C}]$	Teplota vnitřního vzduchu
θ_e	$[\text{°C}]$	Teplota exteriéru
θ_m	$[\text{°C}]$	Střední teplota
θ_v	$[\text{°C}]$	Teplota na počátku chladnutí
$\Delta\theta_r(t)$	$[\text{°C}]$	Pokles výsledné teploty v místnosti na konci doby chladnutí
ϕ_c	$[\text{W}]$	Tepelná ztráta místnosti
Ψ_g	$[\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$	Lineární činitel prostupu tepla způsobený kombinovanými tepelnými vlivy zasklení, distančního rámečku a rámu
ρ	$[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$	Objemová hmotnost
ω	$[\text{hod}]$	Hodinový úhel
δ	$[\text{°}]$	Solární deklinace
ϑ	$[\text{°}]$	Denní úhel

15 SEZNAM PUBLIKACÍ AUTORA

2017

MAJSNIAR, M.; ŠŤASTNÍK, S.; SOUDEK, P., ZELENE STŘECHY A JEJICH VLIV NA TEPELNOU STABILITU, příspěvek na konferenci *Juniorstav 2017*, ISBN 978-80-214-5462-0, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Brno, 2017

2016

MAJSNIAR, M.; ŠŤASTNÍK, S., Vliv vegetační střechy na vnitřní klima dřevostaveb, příspěvek na konferenci *Sborník Juniorstav 2016*, ISBN 978-80-214-5311-1, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Brno, 2016

NEČADOVÁ, K.; SELNÍK, P.; BEDLIVÁ, H.; MAJSNIAR, M., The Effect of the Vegetative Roof Construction on the Thermal Stability in the Testing Building Taking into Consideration the Effect of the Designed Air Gap, článek v *Applied Mechanics and Materials*, ISSN 1660-9336, EnviBUILD 2015 - Building Concepts - Energy Savings & Environment Friendly Technologies, 2016

2015

MAJSNIAR, M.; ŠŤASTNÍK, S., TEPELNÁ STABILITA OBJEKTU PŘI POUŽITÍ ZELENE STŘECHY, příspěvek na konferenci *Juniorstav 2015*, ISBN 978-80-214-5091-2, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2015

MAJSNIAR, M.; ŠŤASTNÍK, S., The effects of vegetative roofs onto the thermal stability of a building object, příspěvek na konferenci *Maltoviny 2014*, ISBN 9783038354, 2015

2014

MAJSNIAR, M.; ŠŤASTNÍK, S., Vliv zeminy na průběh teplot ve vegetační střeše, příspěvek na konferenci *Stavební fyzika v pozemním stavitelství: teorie a praxe*, ISBN 978-80-214-4926-8, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Brno, 2014

MAJSNIAR, M.; ŠŤASTNÍK, S., On some aspects of application of vegetative roofs in building structures, článek v *Advanced Materials Research*, ISSN 1022-6680, TransTech, Zurich, 2014

2013

MAJSNIAR, M.; ŠŤASTNÍK, S., Konstrukční skladby vegetačních střech, příspěvek na konferenci *REALIZACE STAVEB - TEORIE A PRAXE Sborník mezinárodního workshopu 11. - 13. září 2013, Křtiny, Česká republika*, ISBN 978-80-214-4803-2, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie, mechanizace a řízení staveb, Brno, 2013

MAJSNIAR, M.; HINDRÁKOVÁ, K.; ŠŤASTNÍK, S.; ŠKRAMLÍK, J., Druhy rostlin pro vegetační střechy, *Stavební obzor*, ISSN 1210-4027, Fakulta stavební VŠB TU-Ostrava ČKAIT, Praha, 2013

MAJSNIAR, M.; ŠŤASTNÍK, S., Uspořádání zelených vegetačních střech, příspěvek na konferenci *sborník konference Construction Materials 2013*, ISBN 978-80-552-1031-5, Technická Fakulta SPU Nitra, Nitra, 2013