

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů

Katedra zahradní a krajinné architektury



**Využití tepelných vlastností zelených střech k redukci
negativních dopadů tepelných ostrovů měst**

Bakalářská práce

Autor práce: Markéta Rybová

Obor studia: Zahradní a krajinářská architektura

Vedoucí práce: Ing. Alena Fedurcová

© 2018 ČZU v Praze

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "Využití tepelných vlastností zelených střech k redukci negativních dopadů tepelných ostrovů měst" jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autorka uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušila autorská práva třetích osob.

V Praze dne 19. 4. 2018

Poděkování

Ráda bych touto cestou poděkovala své vedoucí Ing. Aleně Fedurkové za cenné rady a připomínky k mé bakalářské práci. Dále bych ráda poděkovala své rodině, která mi poskytla podporu při studiu.

Využití tepelných vlastností zelených střech k redukci negativních dopadů tepelných ostrovů měst

Souhrn

Práce se zabývá procesem zvyšování teploty prostředí v měřítku globálním, městském a na lokální úrovni. Zvýšený zájem je věnován problematice městských tepelných ostrovů a tepelným vlastnostem zelených střech, jako jedním z hlavních způsobů zmírnění negativních dopadů tohoto jevu. Na příkladech získaných z odborné literatury a vědeckých článků jsou v práci demonstrovány účinky zelených střech na městské klima. Dále jsou zde porovnávány důležité aspekty ovlivňující efektivitu vegetačního souvrství z hlediska regulace teploty vnitřního a vnějšího prostředí budovy. Cílem práce je poskytnout ucelený přehled v oblasti dané problematiky. Na základě dostupných výzkumů zhodnotit pozitivní dopad zelených střech na městské klima.

Na základě výsledků většiny studií, zabývajících se danou tématikou, lze budování vegetace na konstrukci doporučit. Tepelné vlastnosti zelených střech, dle těchto studií, mohou redukovat negativní dopady tepelných ostrovů měst. Pro regulaci městského klimatu má však význam pouze rozsáhlá aplikace ozelenění na vysokém procentu potenciálních budov. Některá města již ozeleňování střech podporují. Ve společnosti je třeba šířit povědomí o jejich vlastnostech, díky nimž mohou majitelé budov ušetřit značnou částku na nižší spotřebě energie a navíc přispět k zlepšení životního prostředí.

Klíčová slova: město, městský tepelný ostrov, povrch, teplota, zeleň, zelená střecha, tepelné vlastnosti

Application of green roofs thermal attributes to reduce negative impact of urban heat islands

Summary

This thesis deals with the process of the temperature increasing of the environment on global, urban and building level. The major interest is devoted to the urban heat islands and the thermal attributes of the green roofs as one of the main solutions of the negative impacts reduction of this phenomenon. In this thesis the effects of the green roofs on the urban climate are demonstrated on the examples obtained from the scientific literature and the scientific articles. The important aspects influencing the efficiency of the vegetation stratum in terms of the regulation of indoor and outdoor building temperatures are also compared. The objective of this thesis is to provide a comprehensive overview in the field of the given issue and to evaluate the potential of the green roofs in the urban heat islands control on the basis of the available researches.

Based on the results of the most studies dealing with this issue the vegetation development on construction of buildings can be recommended. According to these studies the thermal attributes of the green roofs can reduce the negative impacts of the urban heat islands. However, if there is a need to regulate the urban climate, the large-scale application of the greenery to a large percentage of potential buildings is important. Some cities already require the greenery of the roofs and support their development. It is necessary to spread the awareness of the attributes of the green roofs in the society. Due to these attributes the owners of the buildings can save a great deal of the financial means from the energy consumption and, moreover, they can contribute to the environmental improvement.

Keywords: city, urban heat island, surface, temperature, greenery, green roof, thermal attributes

Obsah

1. Úvod	1
2. Cíl práce	2
3. Definice základních pojmů a odborné terminologie	3
4. Ohřívání Země	6
4.1. Dálkové snímání povrchové teploty	6
5. Městské prostředí	8
5.1. Urbanizace	8
5.2. Problémy městského prostředí	8
5.3. Městské tepelné ostrovy	10
5.3.1. Příčiny vzniku tepelných ostrovů	11
5.3.2. Typy MTO	15
5.3.3. Účinky MTO	18
5.3.4. Způsoby zmírnění MTO	20
6. Tepelné vlastnosti zelených střech	28
6.1. Přenos tepla skrze budovu	28
6.2. Tepelně technické požadavky střech	30
6.2.1. Fyzikální veličiny charakterizující vlastnosti materiálů	31
6.3. Skladba vegetační střechy	33
6.3.1. Posuzování skladby zelené střechy dle ČSN 73 0540-2	35
6.4. Materiály využívané v souvrství zelené střechy	37
6.4.1. Tradiční historické materiály vegetačních střech	37
6.4.2. Vrstvy střešního pláště	39
6.4.3. Vrstvy vegetačního souvrství	43
6.5. Odrazivost	50
6.6. Pohlcování tepla	51
6.7. Vliv vegetace na termiku	52
6.8. Přínos zelených střech	53
6.8.1. Vliv na stavbu	54
6.8.2. Vliv na ekologii	54
7. Závěr	56
8. Seznam použitých zdrojů	58
9. Seznam obrázků	62
10. Seznam tabulek	63

1. Úvod

Zemský povrch vystavený slunečnímu záření absorbuje v závislosti na jeho vlastnostech značnou část příchozí energie, kterou následně vyzařuje v podobě tepla a ohřívá atmosféru. Městské prostředí, které je charakteristické vysokým podílem zpevněných ploch, nedostatkem zeleně a vysokou hustotou zástavby, většinou vykazuje vyšší teploty než okolní venkovské oblasti. Tento jev je označován jako městský tepelný ostrov. Za zvýšené teploty mohou především zpevněné povrchy, které se během insolace rychle ohřívají a v noci teplo vypouštějí do ovzduší. Vysoké budovy pak blokují úniku ohřátého vzduchu do vyšších vrstev atmosféry. Tepelné ostrovy měst mají zpravidla nežádoucí vliv na spotřebu energie, životní prostředí a zdraví obyvatel. S rostoucí urbanizací mohou být problémy závažnější. Proto je třeba rozvíjet, testovat a aplikovat strategie zmírňující intenzitu tohoto jevu a zkvalitnit tak život obyvatel žijících v urbanizovaném prostředí. Dle Minkeho (2001) lze ekologickou situaci městských prostor výrazně zlepšit rozšiřováním vegetačních ploch. To je možné obzvláště ozeleňováním budov, čímž se ušetří ekonomicky cenné městské pozemky. Vegetační souvrství zelené střechy omezuje tepelné zisky a ztráty budovy. Rostliny navíc zmírňují teplotní výkyvy okolí. Některá města čelící zhoršenému životnímu prostředí již ozeleňování budov vyžadují, a také finančně podporují. Řada výzkumů se v současnosti zabývá významem zelených střech v boji proti účinkům městských tepelných ostrovů. Dále jsou předmětem výzkumu aspekty ovlivňující efektivitu zelených střech z hlediska regulace teploty vnitřního a vnějšího prostředí budovy.

2. Cíl práce

Na základě studia odborné literatury bude sepsána literární rešerše, která popíše proces zvyšování teploty prostředí v měřítku globálním, městském a na úrovni budovy. Dále práce shrne aktuální problematiku městských tepelných ostrovů se zaměřím na příčiny jejich vzniku a způsoby, jimiž lze zmírnit jejich negativní účinky. Jakožto hlavní způsob zmírnění tohoto jevu, budou detailněji rozebrány tepelné vlastnosti ozeleněných střech. Z dostupných literárních pramenů budou vybrány a porovnány aspekty, na nichž je závislá efektivita zelených střech z hlediska regulace teploty vnitřního a vnějšího prostředí budovy.

Cílem práce je popsat proces přenosu tepla na různých úrovních, shrnout problematiku městských tepelných ostrovů a poskytnout ucelený přehled o tepelných vlastnostech zelené střechy včetně aspektů, které ovlivňují jejich efektivitu.

V závěru práce je cílem zhodnotit potenciál zelených střech v redukci městských tepelných ostrovů na základě výzkumů zabývajících se touto problematikou.

3. Definice základních pojmů a odborné terminologie

Zelená střecha - pod tímto pojmem se rozumí střecha, kterou pokrývá vegetační souvrství s vegetací. Dalšími označeními pro takovou střechu, s kterými se můžeme setkat, jsou: střešní zahrada, vegetační střecha, střešní zeleň, či zeleň na konstrukci (Burian a kol., 2016). Všechny zelené střechy jsou složeny minimálně ze dvou vrstev a to z růstového média a ze samotné vegetace. Většina systémů zelených střech však obsahuje také vrstvu drenážní a mechanismus, který zabraňuje prorůstání kořenů a úniku vody (Dunnet et Kingsbury, 2008).

Městský tepelný ostrov (MTO) - tento termín vychází z překladu anglického ustáleného slovního spojení Urban Heat Island (UHI). Jev městského tepelného ostrova představuje rozdíl teplot městských a příměstských oblastí oproti teplotám v odlehleém venkovském prostředí. Roční průměrná teplota vzduchu ve městě je vyšší než v jeho okolí a tento rozdíl se mnohdy v závislosti na velikosti města mění (U.S. Environmental Protection Agency, 2008a). Za předpokladu, že městské a venkovské oblasti jsou umístěny v geograficky homogenních oblastech, lze vypočítat vliv urbanizace na teplotu DT_u jako rozdíl teploty městské T_u a teploty venkovské T_r (Bacci et Maugeri, 1992).

Město - krajina přeměněná vlivem osídlování různými kulturami a vlivem lidské produktivity. Města tvoří organizační struktury s vlastními relativně uzavřenými oběhy látek, energie a informací. Tyto urbanizované krajiny jsou z větší části tvořeny ulicemi a bloky domů, mezi něž jsou rozmístěny parky, či jiné krajinné složky, které jsou však občas opomíjeny. Uspořádání každého města je odrazem historických vlivů, jež na dané město působily (Forman et Godron, 1993).

Sluneční záření - je složeno z celého spektra elektromagnetického záření, které produkuje Slunce. Na Zemi prochází skrze atmosféru a projevuje se jako denní světlo a teplo. Spektrum elektromagnetického záření působící na Zemi je v rozmezí délky vln mezi 100 až 10⁶ nm. Typy záření jsou rozděleny podle vlnové délky od nejkratších po nejdelší na ultrafialové záření C (UVC), UVB, UVA, viditelné světlo a infračervené (tepelné) záření (Miller et al., 2009). Zhruba polovina slunečního záření dopadá na Zemi ve formě infračerveného záření a druhá polovina ve formě viditelného a ultrafialového záření

(Forman et Godron, 1993). Sluneční záření je důležitým abiotickým fyzikálním faktorem ovlivňujícím život na naší planetě (Braniš, 1999).

Šíření tepla - energie, která se vymění v důsledku teplotního rozdílu mezi systémem a okolím. Je přenášeno buď z okolí do systému, nebo ze systému do okolí. Vyměňuje se do té doby, dokud není dosaženo tepelné rovnováhy. Teplo je přenášeno vedením, prouděním a zářením (Halliday et al., 2003).

Vedení tepla - nejběžnější způsob šíření tepla, který se odehrává v pevných látkách. Uplatňuje se (kromě výjimek) u všech typů stavebních konstrukcí. Schopnost materiálu vést teplo je vyjádřena součinitelem tepelné vodivosti λ (Kulhánek, 2014).

Proudění tepla - způsob šíření tepla, k němuž dochází v plynech a kapalinách. Ve stavebnictví se uplatňuje výjimečně (Kulhánek, 2014). V případě, je-li vzduch ve styku s předmětem o vyšší teplotě, teplota vzduchu roste a jeho hustota klesá. Takový vzduch je lehčí než okolní chladnější vzduch a vlivem vzlaku začne stoupat vzhůru. Na jeho místo se dostane vzduch chladnější a proces pokračuje stejným způsobem. Proudění v atmosféře je klíčové při utváření globálního klimatu a změn počasí během dne (Halliday et al., 2003).

Záření tepla - jeden ze způsobů přenosu tepla, které je přenášeno prostřednictvím elektromagnetických vln. Každé těleso s vyšší teplotou než 0 K vyzařuje především infračervené záření, jehož přenos je podstatou šíření tepla zářením. Tělesa toto záření nejen sálají, ale i odrážejí, pohlcují a propouštějí. S ohledem na záření, jež dopadá na těleso, se pak v teorii sálání rozlišuje dokonale černé těleso, pohlcující všechnu dopadající energii, dokonale odrazivé (zrcadlové) těleso, odrážející veškerou dopadající energii a dokonale propustné těleso (Kulhánek, 2014).

Insolace - sluneční záření dopadající za určitý čas na danou plochu zemského povrchu. Daným povrchem může být jakýkoliv objekt vystavený slunečnímu záření. Část záření je objektem absorbována, což způsobí jeho oteplení a zbývající část se odrazí. Poměr záření

odraženého a absorbovaného závisí na odrazivosti objektu, tedy na jeho albedu (Miller et al., 2009).

Albedo - schopnost daného objektu odrážet sluneční záření. Vyjadřuje se jako poměr odraženého k dopadajícímu záření na jednotku plochy (Braniš a kol., 1999). Jeho hodnoty se pohybují mezi 0 - 1, kdy málo odrazivé povrchy se blíží k 0 a povrchy s vyšší odrazivostí k hodnotě 1 (Taha et al., 1992). Např. albedo trávníku se pohybuje mezi 0,20 a 0,26 (Braniš a kol., 1999).

Tepelná kapacita - množství tepla dodané předmětu, které způsobí zvýšení jeho teploty o jednotku (Halliday et al., 2003).

Transpirace - vypařování vody z rostlinného povrchu do okolí. Její intenzita je závislá na rozdílu koncentrací vodní páry na rostlině a v atmosféře (Braniš a kol., 1999).

Evapotranspirace - celkový výdej vody ve formě vodní páry z povrchu půdy (evaporace) a rostlin (transpirace) do atmosféry za příkonu tepla (Taha, 1997). Vodní pára atmosférou stoupá vzhůru, ochlazuje se a kondenzuje, nakonec ve formě deště padá zpět dolů (Forman et Godron, 1993).

Latentní teplo - množství energie spotřebované při skupenské přeměně vody na vodní páru v procesu vypařování (Taha, 1997).

Fotosyntéza - proces prováděný autotrofními organismy, při kterém dochází k tvorbě složitějších organických (ústrojných) látek z látek anorganických (neústrojných). Autotrofní organismy, mezi něž patří hlavně zelené rostliny, pro tento proces využívají energii získanou ze slunečního záření (Braniš, 1999). Pro fotosyntézu je důležité viditelné pásmo spektra a další krátkovlnná záření buňky mohou zabíjet. Z obrovského množství energie dopadajícího na zemský povrch je méně než 1 % použitelné pro fotosyntézu (Forman et Godron, 1993).

4. Ohřívání Země

Slunce vysílá směrem k Zemi neustálý proud širokého spektra elektromagnetického záření. Část příchozího záření je atmosférou odražena zpět do vesmíru nebo absorbována. Na zemský povrch pronikne skrze atmosféru zhruba 63 % slunečního záření, které je hlavním zdrojem energie na Zemi (Braniš, 1999). Množství dopadajícího záření se liší se vzdáleností od Slunce a úhlem dopadu, rozhodující je tedy umístění povrchu v rámci zeměkoule (Forman et Godron, 1993). Sluneční záření je zemským povrchem, v závislosti na jeho albedu, odraženo nebo pohlcováno (Miller et al., 2009). Absorbovaná část záření způsobuje jeho ohřívání a zpětné vyzařování tepla do atmosféry, skrze kterou již toto tepelné záření neproniká tak snadno do vesmíru. Atmosféra se tedy tímto způsobem ohřívá. Zvýšená koncentrace skleníkových plynů přispívá k ještě větší absorpci tepla a tudíž výraznějšímu růstu teplot (Moldan, 2006).

Teplota zemského povrchu je výrazně proměnlivá v průběhu dnů, ročních období a v různých oblastech naší planety. V globálním úhrnu se však průměrná teplota každým rokem mění jen velmi málo. Růst celkové teploty mohou zapříčinit zejména zvýšené emise skleníkových plynů, které vznikají antropogenní činností při spalování fosilních paliv, odlesňování, změně využívání půdy, používání klimatizací či distribuce elektřiny (Moldan, 2006).

4.1. Dálkové snímání povrchové teploty

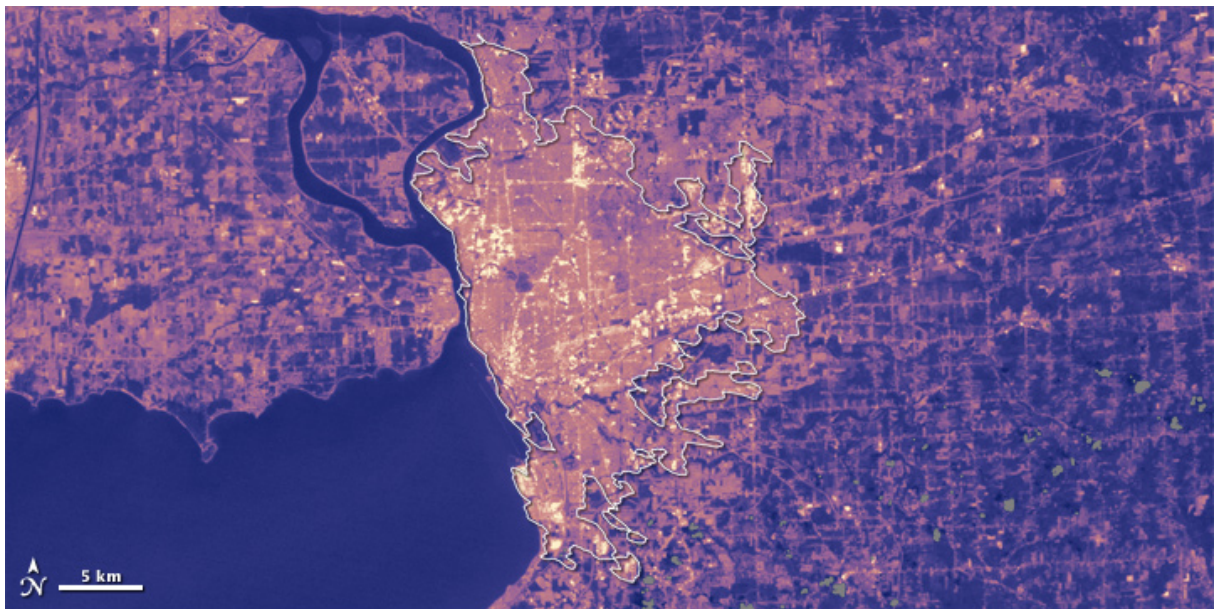
Voogt et Oke (2002) uvádějí, že povrchová teplota reguluje teplotu nejnižších vrstev atmosféry. Její snímání má tedy zásadní význam pro studium klimatu.

Termální snímky povrchu lze pořídit ručními termokamerami nebo prostřednictvím družic, které v rámci dálkového průzkumu Země snímají zemský povrch v globálním měřítku (U.S. Environmental Protection Agency, 2008a). Základním předpokladem pro vznik termálního snímku je rozdílná schopnost odrazivosti jednotlivých povrchových materiálů (Forman et Godron, 1993).

Nejdelší kontinuální záznam povrchu Země z vesmírného prostoru provádí společný program NASA a USGS. Využívá k tomu satelity Landsat, které každým dnem poskytují základní informace důležité pro správné nakládání s půdou, přírodními zdroji a životním

prostředím. Od vypuštění první družice Landsat 1 na oběžnou dráhu Země uplynulo již více než 40 let. V současné době snímají Zemi dvě družice Landsat (7 a 8) s tím, že nejnovější Landsat 8 je citlivější na povrchové teploty a poskytuje detailnější informace než předchozí typy. Data poskytovaná družicemi jsou využívána k sledování kvality vody, korálových útesů, ústupu ledovců, rozšiřování invazivních druhů rostlin, změn ve využívání půdy, úbytku lesních ploch a zvyšující se zástavby, spolu s populačním růstem. Dále pomáhají posoudit škody způsobené přírodními katastrofami, jako jsou požáry, hurikány, záplavy či tsunami, a následně plánovat opatření proti vzniku dalších nežádoucích situací (NASA, 2013).

Narůstající městské oblasti, spojené se změnou povrchových materiálů, jsou na termálních snímcích charakterizovány zvýšenou teplotou oproti okolním nezastavěným oblastem (viz. obr. 1). Satelitní snímky umožňují pozorování globálního rozsahu městských tepelných ostrovů a napomáhají k jejich lepšímu porozumění (Voogt et Oke, 2002). Výzkum vyhodnocující zavedené strategie na zmírnění tohoto jevu v Chicagu navíc využívá možnosti porovnávání snímků Landsat ze stejných míst před a po zavedení strategií. Takové porovnávání jakéhokoliv místa v různém čase je možné díky rozsahu a kontinuitě snímání (Mackley et al., 2011).



Obr. 1 - Termální snímek Buffala pořízený družicí Landsat 7 za srpnového dne modře zbarvené oblasti na obrázku jsou nejchladnější, s rostoucí teplotou barva žloutne (<https://landsat.visibleearth.nasa.gov/view.php?id=47704>)

5. Městské prostředí

Toto prostředí vzniká přeměnou krajiny díky působení lidské činnosti. Model města je tvořen převážně z ulic a bloků domů, doplněný plochami parků a ostatními krajinnými složkami (Forman et Godron, 1993). Podle Čermákové a Mužíkové (2009) třetinu velkoměsta obvykle představuje dlažba, třetinu zástavba a poslední část zaujímají zelené plochy.

5.1. Urbanizace

Tento jev je globálním trendem současnosti. Podíl městských prostor nadále roste především v rozvojových státech, ale i v státech vyspělých. Tyto plochy se rozšiřují na úkor ploch zemědělských, přírodních a přírodě blízkých. Jedním z důvodů je růst ekonomické aktivity a s ním spojené nároky na prostor v městských aglomeracích. Větší počet domácností je další příčinou zvyšující se urbanizace a důvodem třetím je vylidňování venkova. Stěhování do měst je zapříčiněno především nedostatkem pracovních příležitostí na venkově, nebo také faktem, že to jsou centra kultury, vzdělání a technického pokroku. V městských aglomeracích žije již zhruba polovina světové populace a té bude pravděpodobně dále přibývat. Kontinentem, který je nejvíce urbanizovaný a ve městech zde žije přes 70 % lidí, je Evropa. Aby byl život ve městech pro obyvatele příjemný a přínosný, je třeba řešit některé zásadní komplikace spojené s urbanizací, zejména v oblasti životního prostředí (Moldan, 2006).

5.2. Problémy městského prostředí

S rostoucími městskými aglomeracemi se objevuje řada problémů působících především na lidské zdraví a je důležité hledat vhodná opatření pro zmírnění jejich účinků.

Dle Braniše (1999) je jedním z nejzávažnějších problémů městského prostředí znečištěné ovzduší. Projevem znečištění může být například smog, který vzniká kombinací klimatických faktorů a lidské činnosti. Způsobuje řadu dýchacích potíží, dráždění očí a snižuje rostlinnou produkci.

Koncentrace škodlivých látek je ve městech mnohem vyšší než ve venkovském prostředí. Je zde vyšší obsah kovů, solí, ropných derivátů, oxidu siřičitého, dusičnanů, oxidu uhličitého, oxidu uhelnatého, prachu atd. (Čermáková a Mužíková, 2009).

Moldan (2006) považuje za hlavní problém způsob využití městských ploch, kdy se při nadměrném rozšiřování do okolní krajiny ztrácí vegetace, půda se betonuje nebo asfaltuje a narůstá dopravní infrastruktura. Dopravní zatížení městského prostředí s sebou nese vypouštění škodlivých zplodin do ovzduší a také hluk, který zvyšuje riziko různých onemocnění.

Čermáková a Mužíková (2009) jako další problémy urbanizovaného prostředí uvádějí vysokou a nadále narůstající koncentraci obyvatelstva, jež vede k psychickému zatížení obyvatelstva. Dále zmiňují nižší vlhkost vzduchu o 8 - 10 % než na venkově, nižší produkci kyslíku, zvýšenou prašnost a především zvýšenou teplotu vzduchu, na které se z vysoké míry podílí tepelná absorpce materiálů používaných ve městech.

Za zvýšenou teplotu je také zodpovědné soustředění různých spalovacích a chladících procesů v těchto oblastech. Tepelným znečištěním ovzduší se mohou změnit místní klimatické poměry a tvorba oblačnosti (Braniš, 1999).

Většina problémů vznikajících v městském prostředí souvisí s nedostatkem přítomnosti vegetačních složek. Plocha ve městě je velmi drahá a je kladen velký tlak na to, aby každý kousek půdy byl ekonomicky využit co možná nejvíce. Zeleň zde většinou nemá žádný ekonomický výnos, a proto je často její plocha redukována. Naštěstí v posledních letech roste povědomí o pozitivních účincích vegetačních složek, městská zeleň se stává předmětem ochrany a zelených ploch naopak přibývá (Moldan, 2006).

5.3. Městské tepelné ostrovy

Rostoucí urbanizace s sebou často přináší i zvýšené teploty v těchto oblastech (Susca et al., 2011). Průměrná roční teplota zde může být o 1 - 3 °C vyšší než v okolí, v noci může tento rozdíl dosáhnout až 12 °C. Oblast města, jež je značně teplejší než její okolní venkovské oblasti, je označována jako městský tepelný ostrov - MTO (Miller et al., 2009). Jedná se o jev akumulace tepla, který je charakteristický pro městské klima. S pokračující urbanizací bude intenzita tohoto efektu pravděpodobně dále narůstat (Yang et al., 2016).

Jev MTO je považován za nejlépe zdokumentovaný příklad antropogenní změny klimatu (Arnfield, 2003). První zmínka o tomto jevu padla již na počátku 19. století, kdy vědec Lake Howard studoval klima Londýna. Od té doby proběhlo po celém světě mnoho výzkumů zabývajících se tímto tématem, které došly k společnému názoru, že tento efekt je ovlivňován uvolňováním tepla ve městě, vlastnostmi a strukturou povrchů převládajících v tomto prostředí, nedostatkem vegetačního krytu, mírou hustoty zalidnění a povětrnostními podmínkami (Yang et al., 2016). Na počátku výzkumu povahy tohoto jevu byla většina pozorování uskutečněna v mírném podnebním pásmu, až v posledních desetiletích vznikly také studie z dalších klimatických pásem (Arnfield, 2003). Ačkoli nově publikované studie rozšířily geografický rozsah výzkumu, většina z nich potvrzuje již známé poznatky. Lze tvrdit, že intenzita MTO:

- klesá s rostoucí rychlostí větru
- klesá se zvyšující se oblačností
- je největší v anticyklonických podmínkách
- je nejvyšší v létě nebo v teplé polovině roku
- stoupá s rostoucí velikostí města a hustotou obyvatelstva
- je nejsilnější v noci

Existují však i případy, které výše zmíněná pravidla nepotvrzují. Při studiu intenzity MTO a jeho vlivu na sezónní a roční naměřené teploty vzduchu na stanici v pražském Klementinu bylo zjištěno, že v období od roku 1922 do roku 1995 byla zvýšená teplota ve městě oproti venkovským oblastem nejvíce zřejmá v zimě a na jaře. Naopak nejmenší rozdíl v teplotách byl pozorován v létě. V 60. letech se ve vývoji zdejšího tepelného ostrova

objevila stagnace a efekt tepelného ostrova zůstal od té doby víceméně stejný (Brázdil a Budíková, 1999).

Ojedinele může nastat i situace, kdy je město chladnější než okolní krajina. Příkladem je Reykjavík na Islandu, kde byla v letních měsících prokázána tendence negativních hodnot efektu tepelného ostrova a okolí města dosahovalo vyšších teplot. V ostatních obdobích roku už zde však byly naměřeny nízké pozitivní hodnoty (Steinecke, 1999).

5.3.1. Příčiny vzniku tepelných ostrovů

Úbytek vegetačních ploch

Pro venkovské oblasti je typická otevřená krajina pokrytá vegetací, kdežto ve městech jsou plochy zeleně nahrazovány pevnými nepropustnými povrchy. Vysoce rozvinuté městské oblasti může pokrývat 75 - 100 % těchto pro vodu neprostupných materiálů. Vegetační plochy mají schopnost ochlazovat okolní klima prostřednictvím evapotranspirace a stínění (U.S. Environmental Protection Agency, 2008a).

Při evapotranspiraci dochází k přeměně vody z povrchu půdy a rostlin na vodní páru za spotřeby latentního tepla a tím k snižování celkové teploty vzduchu (Taha, 1997). Stín poskytovaný listím a větvemi zase omezuje dopad slunečních paprsků na samotný povrch, který chrání a redukuje jeho zahřívání. Množství záření pronikajícího skrze rostlinný kryt se různí v závislosti na typu porostu a ročním období. V letních měsících se dostane až k povrchu zhruba 10 - 30 % sluneční energie, zbytek je listy buď odražen zpět do atmosféry nebo absorbován a využit pro fotosyntézu. V zimě se toto rozmezí pohybuje mezi 10 a 80 % podle toho, zda-li je porost opadavý, či stálezelený (Huang et al., 1990).

Vlastnosti typických městských materiálů

Materiály běžně používané v urbánních oblastech, především beton a asfalt, mají výrazně odlišné tepelné vlastnosti (tepelná kapacita, tepelná vodivost) a povrchové radiační vlastnosti (albedo, emisivita) než okolní venkovské oblasti. Tyto vlastnosti ovlivňují to, jak je sluneční energie odrážena, absorbována a vyzařována. Tím přeměňují energetickou bilanci města a podporují tvorbu tepelných ostrovů (Oke, 1982).

Albedo, neboli schopnost odrazet sluneční záření, je jednou z klíčových charakteristik povrchových materiálů. Vyjadřuje se jako poměr odraženého k dopadajícímu záření (Braniš a kol., 1999) a jeho hodnota ovlivňuje odraz a absorpci slunečního záření (Susca et al., 2011). Tato vlastnost je značně závislá na barvě povrchu. Objekty tmavší barvy, které ve městech tvoří převahu, mají tendenci reflektovat výrazně méně než světlé. Výsledkem je, že tmavé povrchy, které zahrnují většinu střešních krytin a dlažby, obecně absorbují více sluneční energie, než odrážejí a jejich teplota se zvyšuje (U.S. Environmental Protection Agency, 2008a). Asfalt například pohlcuje 75 - 90 % záření ze slunce (Kavka a Šindelářová, 1978). Městské oblasti odrážejí zpravidla jen asi 15 % z celkového záření, kdežto na venkově se odrazí až 25 % (Taha, 1997).

Dalším určujícím faktorem povrchové teploty je emisivita, tedy schopnost povrchu ztrácet teplo nebo vyzařovat infračervené záření. Většina stavebních materiálů s výjimkou kovu má vysokou hodnotu tepelné emisivity, jsou tedy schopny rychle uvolňovat teplo do okolí a chladnout (U.S. Environmental Protection Agency, 2008a).

Důležitou fyzikální vlastností materiálu je také tepelná kapacita, která určuje, kolik dodané energie zvětší jeho teplotu o jednotku. Čím menší je tato hodnota, tím snáz se těleso bude zahřívat (Halliday et al., 2003).

Geometrie města

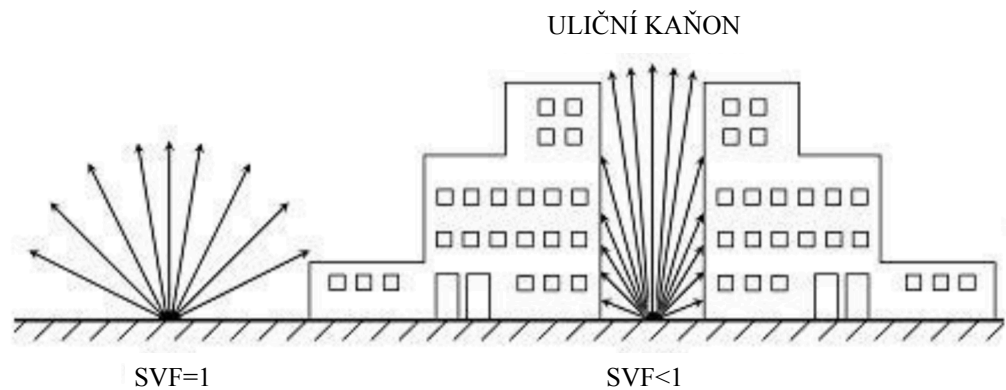
Jedná se o faktor přispívající k tvorbě MTO, jež se odvíjí od rozměrů a rozestupů budov (U.S. Environmental Protection Agency, 2008a). Městská geometrie ovlivňuje proudění větru, absorpci sluneční energie během insolace a schopnost daného povrchu v nočních hodinách vyzařovat dlouhovlnné záření zpět do atmosféry (Morris et al., 2001).

Vysoké budovy během dne poskytují velkou plochu pro absorpci sluneční energie, čímž se zvyšuje účinnost vytápění celé oblasti. Dále budovy blokují proudění větru a tím snižují možnost chlazení promícháváním ohřátého vzduchu s okolním chladnějším vzduchem (Miller et al., 2009).

Důležitým pojmem ve spojitosti s vlivem geometrie města jsou tzv. uliční kaňony, které jsou označením pro poměrně úzké ulice olemované vysokými budovami. Na jednu stranu mohou stavby během insolace vytvářet stín, který brání ohřevu povrchu i vzduchu.

Když se ale sluneční záření dostane až na povrch kaňonu, je jím postupně odráženo a pohlcováno, čímž se naopak povrchová teplota zvyšuje. V noci je potom akumulované teplo uvolňováno, ale kvůli stavebním překážkám nemůže dojít k jeho zpětnému přenosu do vyšších vrstev atmosféry a je tedy zabráněno nočnímu ochlazování (Fan et Sailor, 2002).

Dle Ungera (2004) je tzv. faktor viditelné oblohy - SVF (sky view factor) ukazatelem vlivu geometrie města na tvorbu tepelného ostrova, který je závislý na viditelné části oblohy z určitého bodu. Hodnota SVF se pohybuje mezi 0 a 1, přičemž čím víc se hodnota blíží k 1, tím je místo otevřenější vůči obloze. Naopak hodnoty přibližující se k 0 mají místa uzavřená množstvím překážek s malou viditelností na oblohu (viz. obr. 2).



Obr. 2 - Faktor viditelné oblohy (Unger, 2004)

Antropogenní emise tepla

Při vzniku tepelných ostrovů měst hraje roli také odpadní teplo z dopravy, chladicích zařízení, průmyslu a jiných lidských činností (Miller et al., 2009). Vliv antropogenního tepla na intenzitu jevu je výraznější během zimy než v letním období (Rizwan et al., 2008). V letních měsících zpravidla nemá tento faktor na vznik MTO téměř žádný vliv (U.S. Environmental Protection Agency, 2008a). Významný je v tomto ohledu také počet obyvatel města a jejich ekonomický rozvoj (Taha, 1997).

Ostatní faktory

Na formování MTO má jistý vliv také počasí a geografická poloha. I když nad těmito faktory nemá člověk kontrolu, je důležité pochopit jejich roli pro budoucí plánování (U.S. Environmental Protection Agency, 2008a).

Z hlediska počasí je vývoj MTO závislý zejména na oblačnosti a povětrnostních podmínkách. Nejintenzivnější projevy tepelných ostrovů jsou ve dnech s anticyklonálními poměry, kdy oblačnost je menší než 20 % a rychlost větru nižší než 2 m/s. Dny, které splňují tyto podmínky se označují jako radiační (Vysoudil, 2007). Největší četnost takových dnů skýtá letní období, proto obecně platí, že letní tepelné ostrovy jsou nejsilnější (Arnfield, 2003).

Podstatné je také umístění města v rámci klimatických oblastí, což je dáno především zeměpisnou šířkou, vzdáleností od větších vodních celků a hornatostí terénu. Obvykle je intenzita městského tepelného ostrova podstatně nižší v sídlech oceánského klimatu (U.S. Environmental Protection Agency 2008a). Vzhledem k ostatním faktorům působících na vznik MTO není závislost mezi jejich intenzitou a zeměpisnou šířkou rozhodující. Přesto zde podle studie Wienerta a Kuttlera (2005), kteří analyzovali tepelné ostrovy ve 150 městech s různou zeměpisnou šířkou, slabá vazba na zeměpisnou šířku existuje.

5.3.2. Typy MTO

U.S. Environmental Protection Agency (2008a) rozlišuje tepelný ostrov povrchu a tepelný ostrov atmosféry města. Tyto dva typy se od sebe liší způsobem vzniku, maximální a průměrnou intenzitou, technikami jejich identifikace a zobrazení, chováním v průběhu dne, jejich účinky a částečně i metodami zeslabení.

Městský tepelný ostrov povrchu

Tento typ je charakteristický relativně zvýšenou teplotou antropogenního aktivního povrchu. Jako příklad lze uvést chodníky, silnice, střechy a jiné zpevněné plochy, v porovnání s teplotou přírodního aktivního povrchu. Rozdíly v teplotách mezi těmito povrchy jsou více zřejmé v denních hodinách (tj. pozitivní energetická bilance povrchu) než v noci (tj. negativní energetická bilance). Dále je teplotní disparita výraznější během léta než v průběhu zimy (Roth et al., 1989). Průměrný rozdíl teplot mezi zmíněnými aktivními povrchy je 10 - 15 °C ve dne a 5 - 10 °C v noci (Voogt et Oke, 2003). Během horkého slunečného letního dne může být dobře exponovaný městský povrch o 27 - 50 °C teplejší než okolní vzduch, zatímco u přírodní plochy je tento rozdíl za stejných podmínek zanedbatelný. Kromě expozice je pro intenzitu ohřevu důležitá také jeho struktura a barva, která ovlivňuje albedo (Berdahl et Bretz, 1997). Identifikace povrchových tepelných ostrovů probíhá na základě nepřímého měření dálkovým snímáním. Touto metodou snímání zemského povrchu vznikají s rozvojem technologií stále přesnější a detailnější termální snímky (U.S. Environmental Protection Agency, 2008a).

Městský tepelný ostrov atmosféry

Poměrně teplejší vzduch v urbánní oblasti ve srovnání s chladnějším venkovským prostředím je projevem tzv. městského tepelného ostrova atmosféry. Disparita v teplotách mezi těmito oblastmi není v tomto případě tolik zřejmá jako u předchozího typu MTO. Zde se jedná o rozdíl přibližně 1 - 3 °C v ročních průměrných teplotách mezi větším sídlem čítajícím zhruba milion obyvatel a jeho okolím. Tento výsledek se pro různá města může lišit

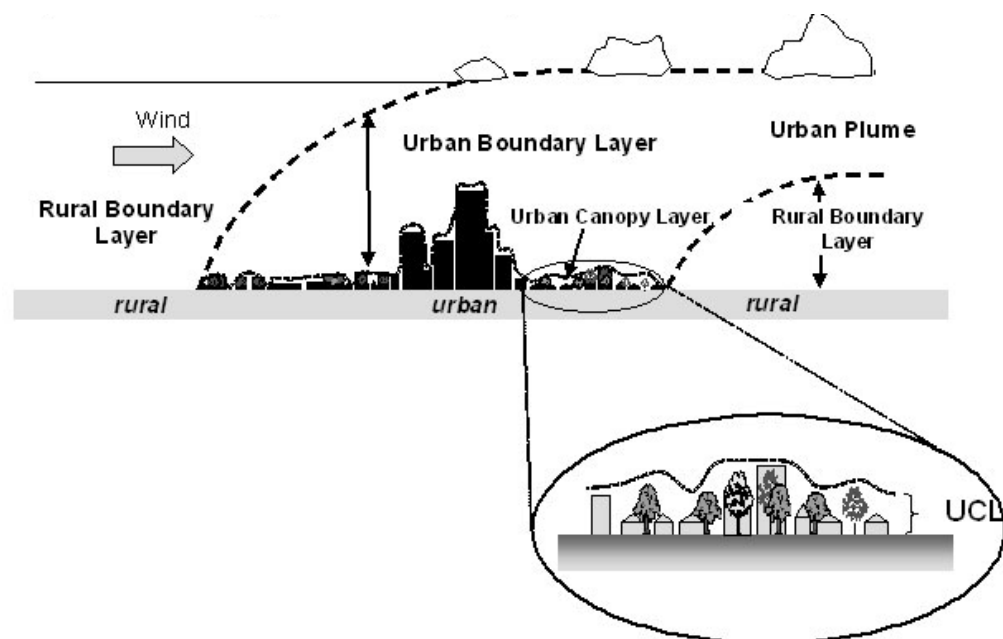
v závislosti na počtu obyvatel, rozloze města, hustotě zalidnění, geografické poloze, atd. (U.S. Environmental Protection Agency, 2008a).

Oke (1982) uvádí, že ve vertikálním směru lze městský tepelný ostrov atmosféry rozdělit na dvě úrovně (viz. obr. 3). V literatuře je najdeme pod pojmy Urban Canopy Layer - UCL (přízemní vrstva atmosféry, “městský baldachýn”) a Urban Boundary Layer - UBL (mezní vrstva atmosféry).

Tepelný ostrov přízemní vrstvy atmosféry je z jedné strany ohraničen povrchem země, z druhé pak střechami budov a vrcholky stromů. V této vrstvě je obvykle prováděno měření teploty pomocí stacionárních meteorologických stanic s polohou snímače obvykle 2 metry nad zemí (Slabá, 1972).

Tepelný ostrov mezní vrstvy atmosféry začíná tam, kde končí UCL a zasahuje až do místa, kde přestává mít městská zástavba vliv na atmosféru. Toto místo obvykle není výš jak 1,5 km nad povrchem (Oke, 1982).

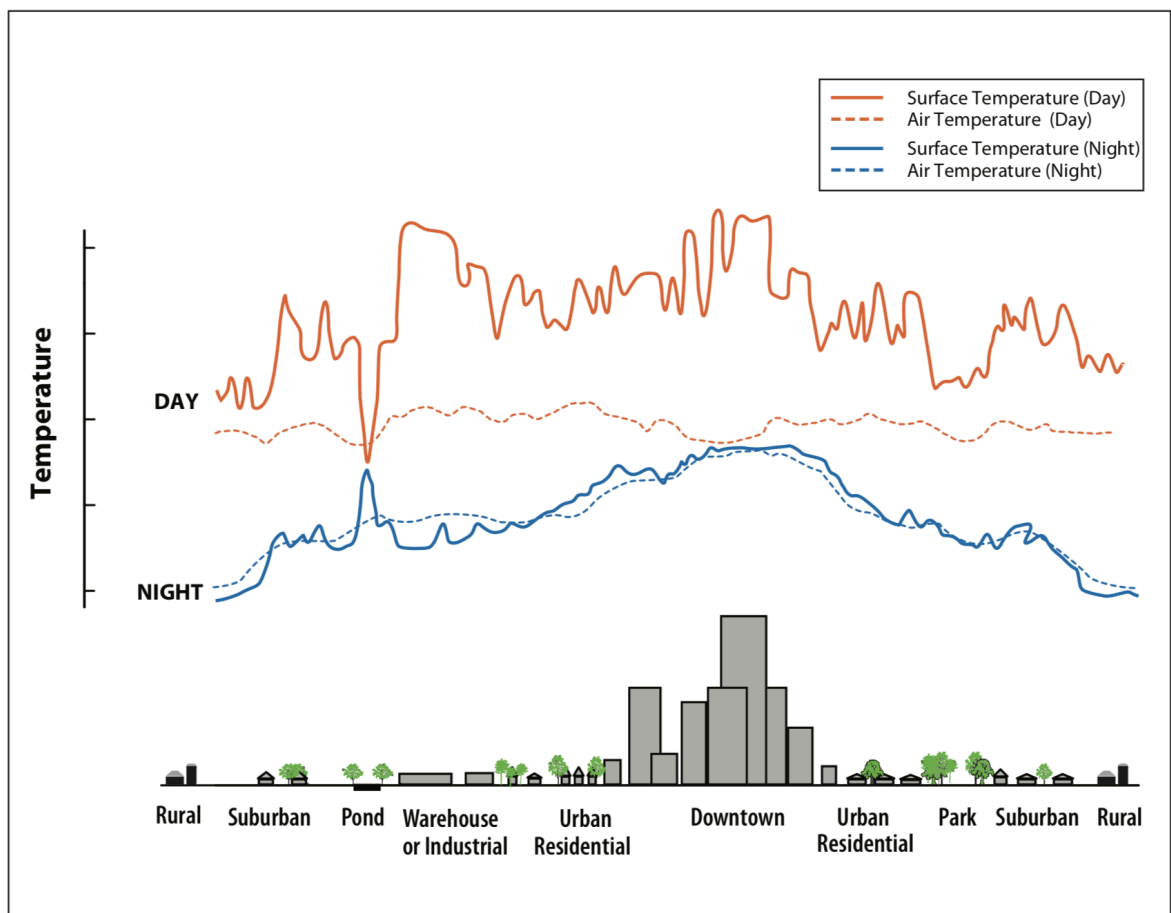
V přízemní vrstvě (UCL) je intenzita atmosférického tepelného ostrova vyšší a denní chod výraznější, než je tomu v mezní vrstvě (UBL). Během pozitivní energetické bilance povrchu je intenzita obecně nižší než v noci, kdy je uvolňováno teplo z městské infrastruktury do okolí. V nočních hodinách dosahuje maximálních hodnot a má výrazný vliv na denní minimální teploty (U.S. Environmental Protection Agency, 2008a).



Obr. 3 - Členění městského tepelného ostrova atmosféry (<http://www.actionbioscience.org/environment/voogt.html?print=1>)

Vliv povrchové teploty na atmosféru v průběhu dne

Antropogenní aktivní povrch, jež během insolace díky svým vlastnostem akumuluje velké množství tepla, následně po západu slunce začne toto teplo pouštět zpět do atmosféry. Tím během negativní energetické bilance (v noci) způsobuje značné zvýšení teploty přilehlého vzduchu, zejména v přízemní vrstvě atmosféry. Ohřátý vzduch se působením větru v atmosféře promíchává a dochází k tepelné výměně. Teploty vzduchu tak typicky kolísají méně než povrchové teploty. Vztah mezi teplotou přízemní vrstvy atmosféry a teplotou aktivního povrchu není konstantní (viz obr. 4). Z obrázku lze pozorovat také to, jak se povrchové a atmosférické teploty liší v různých oblastech využití území. V oblastech s přírodním aktivním povrchem krytým vegetací nedochází během dne k výraznému ohřevu povrchu, takže je přilehlý vzduch zahříván jen minimálně. Teplota vodní plochy zůstává během dne i noci poměrně konstantní kvůli její velmi vysoké měrné tepelné kapacitě (U.S. Environmental Protection Agency, 2008a).



Obr. 4 - Chod denních povrchových a atmosférických teplot za anticyklonálního počasí (U.S. Environmental Protection Agency, 2008a)

	MĚSTSKÝ TEPELNÝ OSTROV POVRCHU	MĚSTSKÝ TEPELNÝ OSTROV ATMOSFÉRY
VÝVOJ TEPLoty	přítomen ve dne i v noci nejintenzivnější během dne a v letních měsících	přes den se projevuje málo, někdy až negativně nejintenzivnější v noci a v zimě
PRŮMĚRNÁ INTENZITA	vyšší prostorová, časová a teplotní proměnlivost den: 10 až 15 °C noc: 5 až 10 °C	nižší proměnlivost den: -1 až 3 °C noc: 7 až 12 °C
IDENTIFIKAČNÍ METODA	Nepřímé měření: dálkový průzkum Země ruční termokamery	Přímé měření: stacionární meteorologické stanice
ZPŮSOB ZOBRAZENÍ	termální snímky	isotermické mapy grafy průběhu teplot

Tab. 1 - Základní charakteristiky MTO povrchu a atmosféry
(U.S. Environmental Protection Agency, 2008a)

5.3.3. Účinky MTO

Zatímco některé účinky městských tepelných ostrovů, jako je prodloužení vegetačního období rostlin, se mohou zdát pozitivní, většinou se jedná o účinky negativní (U.S. Environmental Protection Agency, 2008a). MTO charakteristické zvýšenými teplotami mají podstatný vliv na spotřebu energie, kvalitu životního prostředí a lidské zdraví (Santamouris, 2014).

Spotřeba energie

Vysoké teploty ve městech jsou během letního období doprovázeny větší spotřebou energie z využívání klimatizace za účelem udržení tepelného komfortu v budovách. Elektrická zátěž se začne postupně zvyšovat, jakmile teploty překročí 20 - 25 °C. Poptávka po energii k chlazení vzrůstá o 1,5 - 2 % na každé zvýšení teploty o 0,6 °C. Celosvětový požadavek na elektrickou energii využitou ke kompenzaci účinku MTO se nyní pohybuje mezi 5 a 10 % (Akbari, 2005). V důsledku zesílení energetické náročnosti města při extrémních teplotních událostech může dojít až k rozsáhlému výpadku energie (Arabi et al., 2015).

Naopak v chladných měsících mohou být účinky MTO pro společnost výhodné. Zvýšené teploty znamenají nižší spotřebu energie k vytápění budov a urychlují tání sněhu a ledu na silnicích (U.S. Environmental Protection Agency, 2008a).

Kvalita ovzduší

S vysokou poptávkou po energii souvisí hned další negativum týkající se kvality životního prostředí. Velká část elektřiny se v současné době získává spalováním fosilních paliv. Polutanty z elektrárenských procesů, zahrnující oxid siřičitý SO₂, oxidy dusíku NO_x, částice polétavého prachu PM a rtuť Hg. Tyto prvky škodí lidskému zdraví a zhoršují celkovou kvalitu ovzduší. Dále dochází k emisím skleníkových plynů, zejména oxidu uhličitého CO₂, které přispívají ke globální změně klimatu. Zvýšená koncentrace emisí v kombinaci s teplým vzduchem způsobuje také tvorbu přízemního ozonu, který vzniká reakcí slunečního záření s oxidy dusíku NO_x a těkavými organickými sloučeninami VOC. Intenzita vzniku přízemního ozonu stoupá s mírou oslunění a s vyšší teplotou (U.S. Environmental Protection Agency, 2008a).

Zdraví obyvatel

Již zmíněné skutečnosti spojené s vlivem městských tepelných ostrovů, jako je zvýšená denní povrchová teplota, snížená schopnost nočního chlazení vzduchu, či vysoká úroveň znečištění, mohou negativně působit na lidské zdraví. Přispívají k obecnému nepohodlí obyvatel, menší pracovní produktivitě, vyčerpanosti, respiračním potížím, většímu riziku mrtvice a celkově k vyšší úmrtnosti během období horka.

MTO mohou také zhoršovat situaci během tepelných vln. Ty jsou charakteristické extrémně vysokými teplotami, intenzivním slunečním svitem, po sobě jdoucími horkými dny i nocemi, nehybností vzduchu, vzdušnou vlhkostí, zvýšenými emisemi škodlivin a zrychlenou tvorbou fotochemického smogu. Tepelná vlna v červenci roku 1995 na středozápadě USA způsobila více než 1000 předčasných úmrtí. Zvláště ohrožena je v takových případech především citlivější část obyvatelstva, do které spadají děti, starší lidé a osoby se zdravotními problémy (Taha et al., 2004). Vyššímu riziku jsou vystaveni také lidé žijící v nejvyšších patrech budov s tmavou střechou, cihlovou konstrukcí a okny pouze na dvou stranách, kde

teploty mohou být extrémní (Kalkstein et Sheridan, 2003). I když je výskyt tepelných vln vzácný, stále rostoucí teplota ve městech má značný vliv na úmrtnost. Od roku 1979 do roku 1999 ve Spojených státech předčasně zemřelo kvůli nadměrnému vystavení horku více než 8000 obyvatel, což je více než počet úmrtí způsobených hurikány, tornády, potravinami a zemětřesením (U.S. Environmental Protection Agency, 2008a).

Kvalita vody

Tepelné ostrovy povrchu města degradují kvalitu vody jezer a vodních toků prostřednictvím tepelného znečištění dešťových srážek. Povrchové teploty dlažeb a střech mohou být přes den o 27 - 50 °C vyšší než teplota vzduchu a toto teplo je přenášeno na dešťovou vodu, která na povrch dopadne. Ta je následně odváděna do kanalizací a dále uvolňována do potoků, řek a jezer, které ohřívá. Studie sledující tepelné znečištění vody v městském prostředí ukazuje, že voda odtékající z města je přibližně o 11 - 17 °C teplejší než ta z oblastí venkova, kde rozdíl povrchové a atmosférické teploty není ani v letních měsících vyšší než 19 °C. V případě, kdy se déšť dostavil dříve, než se stihl povrch města zahřát, se teplota odtoku lišila pouze o necelé 2 °C (Roa-Espinosa et al., 2003).

Zvýšená teplota povrchových vod ovlivňuje život místních organismů a fungování celého vodního ekosystému (U.S. Environmental Protection Agency, 2008a).

5.3.4. Způsoby zmírnění MTO

Již od prvních pozorování účinků městských tepelných ostrovů dochází k všeobecné shodě, že je třeba rozvíjet, testovat a aplikovat strategie zmírňující negativní dopady tohoto jevu (Arnfield, 2003). Do roku 2050 bude ve městech žít odhadem zhruba 6,3 miliard obyvatel. Proto je nezbytné toto prostředí připravit, aby bylo schopno pojmout takové množství lidí a zároveň zpříjemnit jejich životy (Mackley et al., 2011).

Vzhledem k uvedeným důvodům vzniku MTO (viz. kapitola 5.3.1.) bylo navrženo několik strategií, které by efekt tohoto jevu snížily a omezily jeho další rozvoj. Důležité je především reagovat na nedostatek vegetace a zvyšovat její podíl v městském prostředí. To je s ohledem na nedostatek volných ploch nejlépe dosažitelné aplikací systému zelených střech. Dále je třeba potlačit vlastnosti typických stavebních materiálů, které přes den pohlcují více

energie než odrážejí. Žádoucí je tedy zvýšení celkového městského albeda instalací vysoce reflexních materiálů, či zesvětlením barvy povrchů (Mackley et al., 2011).

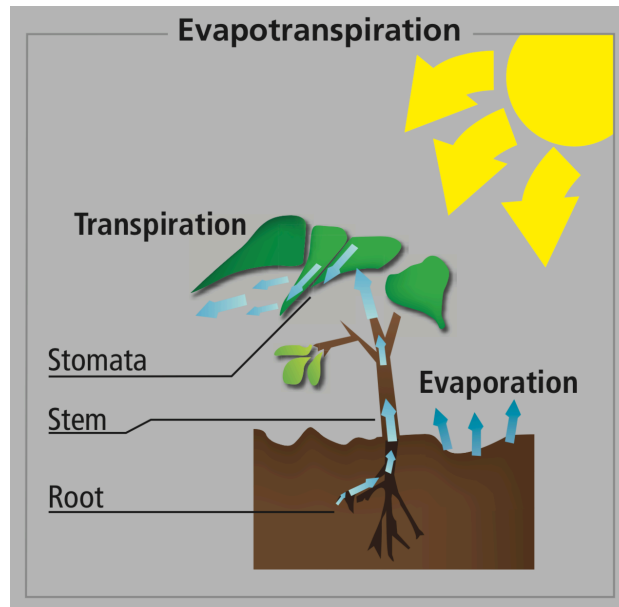
Podle hypotetického projektu v Los Angeles by k redukci teploty o 3 °C vedla výsadba 10 milionů stromů, přeměna střech 5 milionů domů a natření čtvrtiny komunikací, odhadem za 1 miliardu dolarů. Ročně by se pak ušetřilo 170 milionů dolarů vzhledem k snížení nákladů na klimatizaci a 360 milionů dolarů ve zdravotnictví díky redukci smogu, který může dráždit oči, vyvolávat astmatické záchvaty, zápal plic či celkově snižovat imunitní systém (Rosenfeld et al., 1998).

Rozšíření vegetačních ploch

Rostliny, mimo jiných funkcí, působí jako chladící činitel okolního prostředí. Příznivý vliv má zejména jejich schopnost poskytovat stín a zabraňovat tak části slunečních paprsků v proniknutí na samotný povrch. Množství propuštěného záření závisí na ročním období a na typu porostu. Například hustou korunou tsugy proniknou jen asi 2 - 3 % slunečního záření, korunami javoru či dubu zhruba 10 % a poměrně řídká koruna topolu nezachytí 20 - 40 %. Další podíl paprsků listy odrážejí zpět do prostoru. Reflektováno je cca 5 - 15 % v závislosti na tom, zda jsou listy lesklé, či matné. Zbytek záření ze slunce je listy absorbován a část energie rostliny spotřebovávají svými fyziologickými procesy (Kavka a Šindelářová, 1978). Při fotosyntéze je kromě energie spotřebováván také oxid uhličitý CO₂ vyskytující se ve městě ve větší koncentraci v důsledku spalování fosilních paliv (Rosenfeld et al., 1998).

Na tepelné bilanci se také výrazně podílí vypařování vody z povrchu rostlin a půdy, tzv. evapotranspirace. K vypařování dochází za přísunu sluneční energie, kdy je kapalina přeměněna na vodní páru za spotřeby latentního tepla (Taha, 1997). Při transpiraci rostliny absorbují vodu skrze své kořeny a transpiračním proudem ji přepraví až do listů, odkud se vyloučí zpět do ovzduší (viz. obr. 5). V podobě vodní páry stoupá atmosférou vzhůru, zde kondenzuje a tvoří oblačnost. Následně je voda z mraků uvolňována a formou srážek opět padá na zem. Na vypaření 1 litru vody je spotřebováno 2,2 MJ energie, stejné množství energie je vydáváno při tvorbě srážek. Ranní rosa na listech je projevem opětovného zisku tepla. Prostřednictvím tohoto cyklu je vyrovnáván teplotní rozdíl mezi dnem a nocí (Čermáková a Mužíková, 2009). Kavka a Šindelářová (1978) uvádějí, že mladý smrkový

porost může v horkých letních dnech spotřebovat na přeměnu vody na plyn z jehličí a půdy až 60 % energie přijaté ze slunce. Chladicí efekt, vyvolaný odpařováním mohutného stromu dobře zásobeného vodou, lze dokonce srovnat s účinností několika klimatizačních zařízení.



Obr. 5 - Evapotranspirace
(U.S. Environmental Protection Agency, 2008b)

Z výsledků měření rozmanitosti teplot různých povrchů za stejných klimatických podmínek je dobře zřetelný rozdíl teplot na plochách s vegetací a bez ní. Trávníková plocha měla 22 °C, listí 23 °C, zeď pokrytá rostlinami 20 - 22 °C, povrch polní půdy 32 °C, kamenná dlažba 38 °C, cihlová zeď 41 °C a asfaltový povrch až 45 °C (Kavka a Šindelářová, 1978).

Lze shrnout, že vegetace díky svým vlastnostem zmírňuje teplotní výkyvy. Její příznivý vliv na tepelný režim ovzduší je velmi významný a lze ho uplatnit při různém využití zelených ploch v prostorách měst (Kavka a Šindelářová, 1978). Lze ji sem implementovat v podobě parkových ploch, stromořadí podél komunikací, nebo zavedením systému zeleně na konstrukci (U.S. Environmental Protection Agency, 2008b).

Na základě poznatků studie z Hongkongu je ozeleňování měst klíčové pro jejich chlazení a celkové zlepšení životního prostředí. K účelu chlazení je přínosnější výsadba stromů než zakládání travnatých ploch. V některých městech s vysokou koncentrací výškových budov, jako je např. Hongkong, je přízemní ozeleňování daleko účinnější než

budování zelených střech, poněvadž u budov vyšších než 60 m ztrácejí tyto střechy svůj vliv na chlazení městského prostředí (Ng et al., 2011).

Zelené střechy

Důležitým faktorem ovlivňujícím energetickou bilanci města jsou plochy střech. Představují 20 - 25 % městského povrchu a svými vlastnostmi působí na intenzitu tepelného ostrova (Susca et al., 2011). Běžné střešní materiály jsou schopny se na slunci ohřát na 50 - 90 °C, což má následně vliv jak na okolní vzduch, tak na budovu pod nimi. Zvyšuje se teplota interiéru, spotřeba energie k chlazení a střešní materiály rychleji korodují. Snížení povrchové teploty střech může hrát klíčovou roli při zlepšování městského tepelného stavu. Toho lze dosáhnout nahrazením tradičních střešních materiálů vegetačními střechami, které zásadně zlepšují tepelný výkon celé konstrukce a snižují absorpci slunečního záření (Arabi et al., 2015).

Celková teplota zelené střechy závisí na jejím složení, obsahu vlhkosti v růstovém médiu, geografické poloze, expozici slunečnímu záření a dalších faktorech specifických pro danou lokalitu. V letním období je udržována většina těchto střešních povrchů chladnější než na konvenčních střechách především díky stínění a evapotranspiraci. Porovnáváním povrchové teploty mezi různými typy střešních povrchů se v posledních letech věnuje mnoho výzkumů. Tyto rozdílné teploty povrchů (viz. obr. 6) lze pozorovat díky termosnímům (U.S. Environmental Protection Agency, 2008b).



Obr. 6 - Rozdíl v povrchových teplotách zelené a konvenční střechy (<https://webberenergyblog.wordpress.com/2013/04/19/green-infrastructure-and-energy/>)

Měření v Chicagu například během teplého srpnového odpoledne ukázalo, že povrchová teplota zelené střechy se pohybovala mezi 33 a 48 °C, zatímco na běžné tmavé střeše vyšplhala až na 76 °C. Nad vegetačním typem byla teplota okolního vzduchu o více než 4 °C chladnější než v druhém případě (Department of Energy, 2004). Sledovaná ozeleněná střecha na Floridě měla průměrnou maximální povrchovou teplotu 30 °C, kdežto u sousední světle zbarvené střechy to bylo 57 °C. I zde byla nad vegetační střechou zpozorována nižší teplota vzduchu (Cummings et al., 2007).

Snížení povrchové teploty střešní konstrukce pomáhá udržovat interiér budovy během horkých dnů chladný. Navíc množství tepla přeneseného do ovzduší nad vegetační střechou je značně nižší, což může při rozsáhlejších zavedení střešních zahrad přispět k celkovému ochlazení městského prostředí. Několik analýz se pokusilo kvantifikovat potenciální snížení teploty většího území po širokém zavedení těchto střech (U.S. Environmental Protection Agency, 2008b).

Modelová studie pro Toronto v Kanadě například předpokládá, že po aplikaci zelených střech na 50 % dostupných povrchů v centru by se celé město ochladilo o 0,1 až 0,8 °C. Pravidelným zavlažováním těchto střech by se dále docílilo většího okruhu dosahu chladících účinků a o další 0,5 až 1 °C nižší teploty. Simulace tedy ukázala, že zejména při dostatečné vlhkosti pro odpařování mohou zelené střechy hrát významnou roli při snižování atmosférických městských tepelných ostrovů (Liu et Bass, 2005). Podobná studie z New Yorku, která sledovala teplotu vzduchu 2 metry nad povrchem ozeleněných střech, uvádí snížení celkové městské teploty v průměru o 0,2 °C za předpokladu ozelenění 100 % potenciálních plochých střech (Rosenzweig et al., 2006).

System vegetace na konstrukci lze použít jako víceúčelovou strategii, která kromě zmírňování tvorby MTO zároveň kompenzuje nedostatek zelených ploch a tím přináší řadu dalších výhod pro městskou společnost (Arabi et al., 2015). Zejména v centru města představují zelené střechy budov, garáží, či podzemních parkovišť možnost, jak efektivně a několikanásobně využít stejnou plochu, a zároveň tak přispět k ochraně životního prostředí. Města a obce v některých zemích z tohoto důvodu ozeleňování budov vyžadují, a také finančně podporují. Např. pro Singapur s vysokou hustotou obyvatelstva je využívání střech jako střešních zahrad velmi důležité. Navíc navzdory tropickému klimatu je zde klimatizace využívána jen minimálně, neboť jsou zelené střechy navrhovány v souladu s principy

udržitelosti tak, aby co nejlépe využívaly chladícího účinku vegetace a přirozené cirkulace vzduchu (Dostálová, 2013).

Kdyby se v ČR ozelenilo 10 - 20 % stávajících plochých střech, do prostředí by se navrátilo zhruba 1600 ha zeleně a došlo by k výraznému zlepšení městského klimatu (Čermáková a Mužíková, 2009).

Zvýšení městského albeda

Většina povrchů střech a dlažby, které ve městě tvoří společně zhruba 60 %, je tmavě zbarvena. Poněvadž mají objekty tmavších barev obecně nižší albedo, snadněji absorbují sluneční záření a ohřívají se. Zahřívání povrchu se dá omezit zvýšením odrazivosti těchto městských ploch. Toho lze docílit elastomerními nátěry, použitím reflexních materiálů nebo světlých střešních krytin a dlažeb (Akbari et al., 2006).

Zvyšování albeda vnějších povrchů je efektivní strategií zmírňující tvorbu MTO, obzvláště v oblastech se zhoršenými půdními podmínkami a omezenou dostupností vody, kam není možné implementovat vegetační složky. Navíc aplikace této strategie není pro města příliš náročná a nevyžaduje dodatečné náklady, poněvadž na většině budov a střech je každých 10 let prováděn nový nátěr nebo výměna krytiny. U nově vznikajících staveb je výhodné myslet na tuto vlastnost povrchu od počátku a zapracovat materiály s vyšší hodnotou albeda už v návrhu. Mimo plochy střech se mohou upravit i povrchové vlastnosti parkovišť nebo komunikací. V tomto případě je již nutná určitá investice. Ta se ovšem mnohokrát navrátí prostřednictvím ušetřené energie z chlazení a prodloužené životnosti materiálů (Taha et al., 1992). Všechny reflektivní materiály časem ztrácejí svou účinnost kvůli povlaku usazených nečistot, proto je třeba povrch pravidelně umývat nebo převrstvovat. (U.S. Environmental Protection Agency, 2008c).

Pro zlepšení odrazivé schopnosti střech se nejčastěji používají elastomerní nebo cementové nátěry se solární odrazivostí až 65 % (viz. obr. 7). Důležitým rozdílem je, že elastomerní povlaky poskytují vodotěsnou membránu, zatímco u cementových se spoléhá na hydroizolaci podkladového střešního materiálu. Běžně se také aplikují jednoplášťové "chladící" membrány ze syntetického kaučuku EPDM, polymerního materiálu CSPE a termoplastických materiálů TPO a PVC (U.S. Environmental Protection Agency, 2008c).



Obr. 7 - Aplikace elastomerního nástřiku na střechu
(<http://peter4gov.org/5426-spray-coatings-for-metal-roofs/>)

Konvenční asfaltová dlažba s nízkou hodnotou albeda je využívána po celá desetiletí v široké škále funkcí od parkovišť po dálnice. U těchto povrchů je vhodné upravit jejich reflektivní vlastnosti implementací jiných, odrazivých materiálů. Lepším řešením je využití betonu, který má daleko vyšší albedo. Asfaltové cesty mohou být např. překryty 10 cm betonovou vrstvou s příměsí zpevňujících vláken (tzv. whitetopping). Další možností je položení tenké těsnicí vrstvy světlé barvy na bázi cementu, písku a pryskyřice (U.S. Environmental Protection Agency, 2008d).

Přestože se zdá, že realizace této metody zmírnění MTO je poměrně snadná, mohou se vyskytnout komplikace omezující její uplatnění. Některé vysoce reflektivní povrchy způsobují problémy s oslněním, které zvyšují nebezpečí a nepohodlí obyvatel. Dále může být limitující vizuální stránka těchto povrchů, poněvadž ne každý preferuje jejich vzhled (Taha et al., 1992).

Omezení antropogenních emisí tepla

Odpadní teplo vylučované motorovými vozidly může zůstat uzavřeno ve špatně větraných uličních kaňonech a tak přidávat na intenzitě MTO. Mimo to, doprava také díky emisím škodlivých látek a skleníkových plynů přispívá k tvorbě smogu a globálnímu oteplování. Dobré dopravní plánování je nezbytné pro minimalizaci tepelných zisků prostředí a snížení koncentrace škodlivin v centru města. Vhodné by bylo nahradit využívání individuální automobilové dopravy veřejnou hromadnou dopravou a snížit tak celkový počet vozidel. Ulevit znečištění i oteplování by dále mohl přechod na alternativní pohonné hmoty (Coutts et al., 2008).

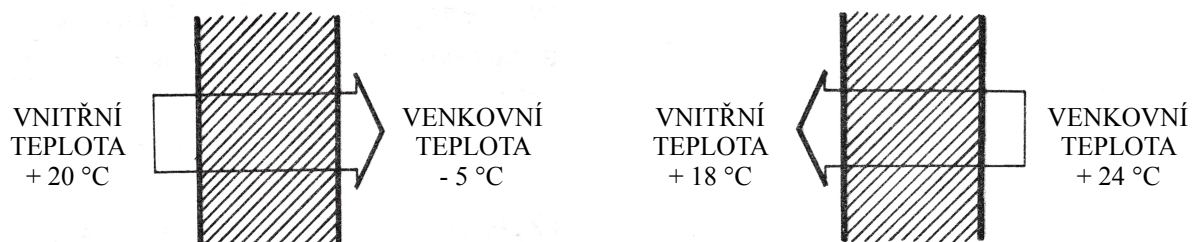
6. Tepelné vlastnosti zelených střech

Účelem zastřešení je ochrana stavebního díla a prostorů, které se v něm nacházejí před účinky vnějšího prostředí, jako je působení teplot a jejich střídání, déšť, sníh, nečistoty apod. Střecha ukončuje v pozemním stavitelství stavební dílo. Je důležitou konstrukční částí celé stavby a je na ní závislá hospodárnost, trvanlivost a životnost stavby. Z celého objektu podléhá střecha největšímu vystavení účinkům změny teplot. Působením slunečního záření v letním období dosahuje povrch běžné střechy kolem 80 °C. V zimě se pak ochlazuje až na -30 °C (Hauskrecht, 1982). Velké výkyvy teploty mají negativní vliv na konstrukci a interiér budovy, ale i na vzduch v blízkém okolí stavby (Arabi et al., 2015).

Zelená střecha obecně redukuje přenos tepla skrze budovu, čímž snižuje její celkové tepelné zisky a ztráty. Proces přenosu tepla na běžné střeše (prouděním, vedením, zářením) je ovlivněn vegetačním souvrstvím nejen změnou tepelných charakteristik materiálů a vlastnostmi povrchu, ale také evapotranspirací a metabolickými procesy v systému rostlin. Pro celkovou účinnost zelené střechy je tedy nutné rozebrat si tepelné vlastnosti jednotlivých komponentů (Martens et al., 2008).

6.1. Přenos tepla skrze budovu

Stavba představuje objekt postavený v krajině, který brání proudícímu vzduchu. Účinkem teplotního rozdílu měrných hodnot vzduchu v interiéru a v exteriéru je způsoben tlakový rozdíl, jenž je možno charakterizovat jako podtlak nebo přetlak. Za tohoto stavu pak vzduch, teplo, vodní pára difundují přes stěny, otvory a ostatní stavební konstrukce (viz. obr. 8). V zimním období, kdy se do budovy filtruje studený vzduch a z budovy uniká teplo a difuzní páry, hovoříme o infiltraci. Naopak v letním období, kdy se teplý vzduch a difuzní páry dostávají do budovy, se jedná o exfiltraci (Hauskrecht, 1982).



Obr. 8 - Infiltrace a exfiltrace vzduchu (Hauskrecht, 1982)

Při různých teplotách vzduchu na jedné a druhé straně konstrukcí prostupuje tepelný tok od vyšší teploty k nižší teplotě. Množství tepla, které se vymění mezi prostředím oddělenými konstrukcí s odporem R při jejich teplotním rozdílu, nazýváme součinitelem prostupu tepla U . Jednotkou je $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$. Pro výpočet hodnoty U je třeba znát hodnotu součinitele prostupu tepla na vnitřní h_{si} i vnější h_{se} straně konstrukce, součinitele tepelné vodivosti materiálu λ , z něhož je vyhotovena stavební konstrukce a tloušťka jednotlivých vrstev d (Hauskrecht, 1982). Součinitel prostupu tepla je zásadní veličina, charakterizující tepelně izolační schopnost konstrukce (Kulhánek, 2014).

Součinitel prostupu tepla vypočítáme dle normy ČSN 73 0540 z rovnice:

$$U = \frac{1}{R_T} \quad [\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}]$$

Velichina R_T označuje odpor při prostupu tepla a zahrnuje vliv tepelného odporu konstrukce i vliv přestupových jevů. Pro konstrukci s jednou vrstvou ji lze stanovit vztahem:

$$R_T = R_{si} + R + R_{se} \quad [\text{m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}]$$

Pro konstrukci o více vrstvách se určuje vztahem:

$$R_T = R_{si} + \sum_{j=1}^{j=n} R_j + R_{se} \quad [\text{m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}]$$

Odpor na vnitřní straně konstrukce při přestupu tepla R_{si} a na vnější straně konstrukce R_{se} získáme ze vztahu:

$$R_{si} = \frac{1}{h_{si}} \quad R_{se} = \frac{1}{h_{se}}$$

Tepelný odpor vrstvy konstrukce R dostaneme vyčíslením rovnice:

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad [\text{m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}]$$

Velká pozornost při navrhování je věnována jak obvodovému zdivu, tak i střechám a podlahám. Zlepšením tepelné izolace těchto konstrukcí se relativně sníží podíl vyměněného tepla mezi budovou a vnějším prostředím.

Kromě tepla přeneseného z vnějšího prostředí je budova ohřívána prostřednictvím slunečního záření, elektrické energie pro spotřebiče, paliv na vytápění či ohřev vody a také vydáváním lidského tepla. Teplo budova ztrácí jednak přenosem do chladnějšího okolí, dále pak větráním, spalováním paliv, vypouštěním použité ohřáté vody a uvolňováním tepla vnějšími povrchy (Hauskrecht, 1982).

Zabudováním vegetace na konstrukci se dá snížit letní tepelný tok střechou o 70 - 90 % a zimní o 10 - 30 %. Sluneční záření dopadající na střechu je z 20 - 30 % odraženo zpět do atmosféry, zhruba 60 % je absorbováno a spotřebováno k evapotranspiraci nebo fyziologickým procesům rostlin. Zbýlých méně než 20 % je přeneseno do růstového média (La Roche et Berardi, 2014).

6.2. Tepelně technické požadavky střech

Střešní konstrukce se z hlediska tepelné techniky posuzují dle požadavků ČSN 73 0540-2. Norma ČSN 73 0540-2 Tepelná ochrana budov - Část 2: Požadavky (2011) doporučuje řadit vrstvy konstrukce tak, aby směrem od interiéru k exteriéru klesal součin součinitele tepelné vodivosti a faktor difuzního odporu jednotlivých vrstev. Dle Kulhánka (2014) existují však i konstrukce, kde nemusí být tento ideální návrh dodržen. Např. jednoplášťová střecha s klasickým pořadím vrstev, tj. od vnějšího líce k vnitřnímu: hydroizolace, tepelná izolace, parozábrana, nosná konstrukce, je v rozporu s výše uvedenými pravidly, ale přesto v praxi úspěšně používána. Čermáková a Mužíková (2009) uvádějí, že právě jednoplášťová střešní konstrukce je vhodná k ozelenění.

Další tepelně vlhkostní požadavky na stavební konstrukci dle ČSN 73 0540-2 (2011) jsou:

- nejnižší vnitřní povrchová teplota $>$ teplota rosného bodu vnitřního prostředí
- součinitel prostupu tepla \leq normový požadavek, uvedený v tab. 2

- kondenzace vodní páry by neměla ohrozit funkci konstrukce, tzn. množství zkondenzované vodní páry za rok < množství vypařené, roční množství kondenzátu < maximální normová hodnota

Druh konstrukce		Součinitel prostupu tepla [W.m ⁻² .K ⁻¹]	
		Požadovaná hodnota*	Doporučená hodnota**
Střecha plochá a šikmá se sklonem do 45° včetně		0,24	0,16
Střecha šikmá se sklonem nad 45°	Lehká	0,30	0,20
	Těžká	0,38	0,25

Tab. 2 - Požadované a doporučené hodnoty součinitele prostupu tepla U_N pro střechy (Čermáková a Mužíková, 2009)

* Požadovaná hodnota U_N je hodnota závazná. Platí, že $U \leq U_N$, kde U_N je požadovaná hodnota součinitele prostupu tepla a U je součinitel prostupu tepla posuzované konstrukce.

** Doporučená hodnota U_N by se měla dodržovat u energeticky úsporných staveb.

6.2.1. Fyzikální veličiny charakterizující vlastnosti materiálů

Pro tepelně technické výpočty technických a funkčních parametrů stavebních konstrukcí jsou důležité následující veličiny:

Objemová hmotnost ρ [kg/m³] - je vyjádřením poměru hmotnosti ku objemu tělesa včetně dutin či pórů v něm obsažených. Póry jsou vyplněny vzduchem nebo vlhkostí v různých skupenstvích. Hustota a rozměry pórů se pohybují v širokém rozmezí, což je důležité pro určení objemové hmotnosti látky. Ve stavebnictví se využívají materiály do objemové hmotnosti až 3000 kg/m³. S rostoucí pórovitostí hodnota klesá (Hauskrecht, 1982).

Součinitel tepelné vodivosti λ [W.m⁻¹.K⁻¹] - vyjadřuje schopnost materiálu vést teplo. Čím nižší je jeho hodnota, tím je daný materiál lepším izolantem. Hauskrecht (1982) uvádí, že podle součinitele tepelné vodivosti lze rozdělit stavební materiály do několika skupin (viz. tab. 3). Tato veličina závisí především na vlhkosti materiálu (Hanzalová a kol., 1998).

Měrná tepelná kapacita c [J.kg⁻¹.K⁻¹] - dříve nazývaná měrné teplo, vyjadřuje množství tepla potřebné k ohřátí jednotkového množství daného materiálu o 1 K. Čím vyšší je tato hodnota, tím hůře se daný materiál zahřívá. Nejvyšší hodnotu má voda, jejíž

$c = 4190 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$. U organických materiálů je $c > 1000 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$, kdežto kovy mohou mít $c < 500 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ (Halliday et al., 2003).

Součinitel difuze vodní páry δ [s] - někdy též nazýván jako součinitel difuzní vodivosti, je veličinou popisující difuzní schopnost materiálu. V současné době se již používá k vyjádření této schopnosti faktor difuzního odporu (Kulhánek, 2014).

Faktor difuzního odporu μ [-] - udává, kolikrát vyšší je difuzní odpor vrstvy daného materiálu, než difuzní odpor stejně silné vrstvy vzduchu. Jedná se o bezrozměrnou veličinu (Kulhánek, 2014).

Jako výpočtové hodnoty je možné dle ČSN 73 0540-3 Tepelná ochrana budov - Část 3: Navrhované hodnoty veličin (2005) aplikovat s vyhovující přesností normové hodnoty fyzikálních veličin stavebních materiálů.

Materiály	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Součinitel tepelné vodivosti [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
Vysoce izolační	do 500	0,03 - 0,10
Dobře izolační	500 - 800	0,10 - 0,30
Středně izolační	800 - 1600	0,30 - 0,60
Normální	1600 - 2400	0,60 - 1,25
Velmi hutné anorganické	nad 2400	1,25 - 3,50
Velmi hutné izotropní	-	3,50 a více
Kovy	-	50,00 a více

Tab. 3 - Dělení stavebních materiálů podle součinitele tepelné vodivosti λ (Hauskrecht, 1982)

6.3. Skladba vegetační střechy

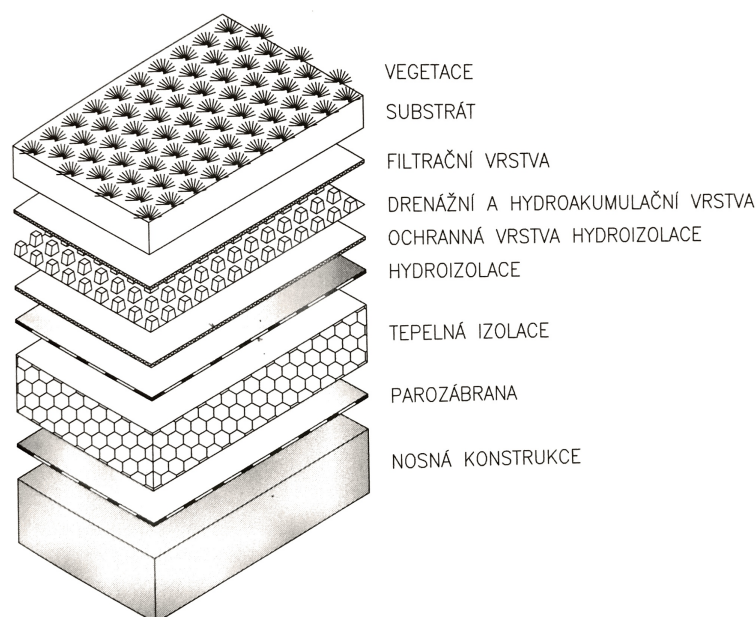
Výběr skladby střešního souvrství je navrhován v závislosti na řadě faktorů, jako je funkce, typ a sklon střechy, klimatické podmínky, realizační technologie atd. Čermáková a Mužíková (2009) rozdělují vrstvy na vegetační souvrství a souvrství střešního pláště.

Vegetační souvrství obsahuje směrem z exteriéru do interiéru tyto vrstvy:

- vegetace (rostlinná složka)
- mulčovací vrstva
- substrát
- hydroakumulační vrstva
- filtrační / separační vrstva
- drenážní vrstva

Souvrství střešního pláště běžné jednoplášťové střechy (opět směrem do interiéru):

- ochranná vrstva hydroizolace
- hydroizolační vrstva s odolností vůči prorůstání kořenů
- tepelná izolace
- parozábrana
- spádová vrstva
- nosná konstrukce



Obr. 9 - Skladba ozeleněného střešního pláště
(Čermáková a Mužíková, 2009)

Uvedené pořadí vrstev je pouze orientační. Některé vrstvy mohou být vynechány, některé mohou sdružovat více funkcí. Lze se setkat i s odlišným pořadím vrstev. Zejména vegetační souvrství je řešeno různým uspořádáním skladeb, vycházející z typu vegetace a sklonu střechy (Čermáková a Mužíková, 2009).

Zjednodušeně řečeno, zelené střechy se liší od klasických střech především nejsvrchnějšími vrstvami sloužícími pro růst rostlin, vyššími nároky na hydroizolaci a únosnost nosné konstrukce (Čermáková a Mužíková, 2009). Burian a kol. (2016) uvádějí, že základními požadavky na zřízení střech s vegetačním souvrstvím jsou:

- zajištění dostatečné únosnosti nosné konstrukce
- hydroizolace odolná vůči prorůstání kořenů rostlin
- dostatečná pevnost v tlaku tepelné izolace a kvalitní parozábrana

Dle Buriana a kol. (2016) může rozhodování o skladbě střešního souvrství ovlivnit také využití interiéru pod střechou. Jiné požadavky na souvrství střešního pláště z hlediska relativní vlhkosti a vnitřní teploty bude mít bytový objekt a jiné požadavky plavecký bazén. Důležitý je tedy správný výběr vhodných výrobků, následně ověřený tepelně technickým výpočtem. U výběru je kladen důraz především na tloušťku a druh tepelné izolace, vhodnou

parozábranu, nosnou konstrukci a materiálové provedení hydroizolace (hydroizolační fólie či asfaltové pásy).

6.3.1. Posuzování skladby zelené střechy dle ČSN 73 0540-2

O zelených střeších se norma konkrétně nezmiňuje. U jejich tepelně technických výpočtů je problematické začlenit do výpočtu vrstvy vegetačního souvrství, tzn. vrstvy nad hydroizolací. Tyto vrstvy jsou někdy i trvale vlhké a míra zvlhčení může výrazně kolísat, jejich tepelně technické parametry se proto stanovují obtížně (Čermáková a Mužíková, 2009).

Hanzalové a kol. (1998) uvádějí, že lze provést tepelně technické hodnocení střešní konstrukce třemi způsoby.

1. Zanedbat vrstvy nad hydroizolací a posoudit skladbu běžným způsobem dle požadavků ČSN 73 0540-2.
2. Zahrnout vrstvy nad hydroizolací a kompletně posoudit skladbu zelené střechy obvyklým způsobem dle normy. U všech vegetačních vrstev se musí upravit parametry v závislosti na předpokládaném maximu jejich hmotnostní vlhkosti dle ČSN 73 0540-3. Obvykle je u této metody nevýhodou nedostupnost pro výpočet potřebných fyzikálních hodnot jednotlivých vrstev, zejména hodnoty λ a μ .
3. Počítat s trvalou hladinou vody nad hydroizolací, tedy do výpočtu zahrnout celou skladbu zelené střechy jako v předchozí metodě. Zjednodušeně lze vypočítat difuzi vodní páry tak, že zanedbáme difuzní tok z místa kondenzace směrem z konstrukce. Skutečné hodnoty difuzního toku se vzhledem k tomu, že tento tok prochází přes vodní hladinu, určují velmi obtížně.

Cílem výpočtových modelů je, přiblížit se co nejvíce realitě. Jedná se však pouze o teoretické předpoklady a výsledek může ve skutečnosti být odlišný. Model by tedy měl počítat s nejnepříznivějším možným stavem z hlediska posuzované veličiny. Vzhledem k bezpečnosti výpočtu vnitřní povrchové teploty a součinitele prostupu tepla lze doporučit 1. metodu. Naopak 3. metoda je nejbezpečnější z hlediska výpočtu difuze vodní páry. Jsou-li započítány vrstvy nad hydroizolací, množství zkondenzované vodní páry bude menší, než při zanedbání těchto vrstev (Hanzalová a kol., 1998).

Tepelně technický výpočet zelené střechy se obvykle provádí bez vegetačního souvrství z toho důvodu, že by mohlo být časem odstraněno a střecha by pak nesplňovala normové požadavky. Tepelně izolační efekt střechy s vegetačním souvrstvím lze následně dopočítat pouze pro získání doplňujících informací, nikoli pro vyhovění požadavkům normy ČSN 73 0540-2 (Burian a kol., 2016).

6.4. Materiály využívané v souvrství zelené střechy

Výběru materiálů do souvrství zelené střechy je potřeba věnovat zvýšenou pozornost. Vhodné je používat prověřené systémy skladeb z vybraných materiálů a vyhnout se tak případným poruchám. Systémové řešení musí být vhodné pro dané podmínky navrhované střechy, tedy pro druh vegetace, lokální podmínky, sklon střechy, orientaci k světovým stranám atd. Materiály by vzhledem k přitížení vegetačním souvrstvím měly mít vysokou pevnost v tlaku. Všechny materiály prochází testy na řadu parametrů, které by měl výrobce nebo prodejce na vyžádání poskytnout (Čermáková a Mužíková, 2009).

6.4.1. Tradiční historické materiály vegetačních střech

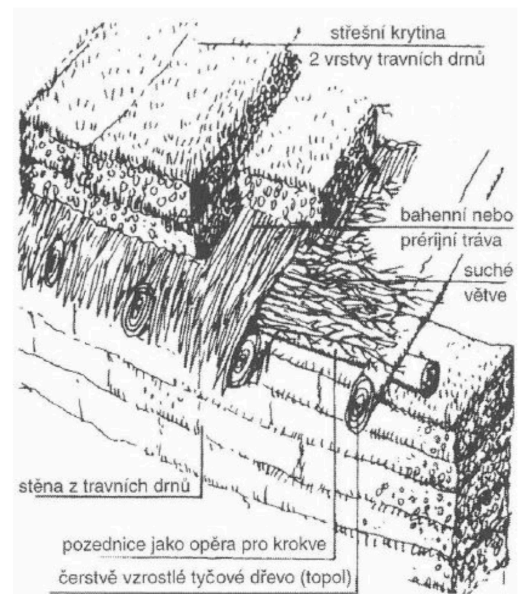
Ozeleněné střechy byly využívány pro své tepelně akumulční a izolační vlastnosti již před staletími. To, že vrstva zeminy spolu s vegetací vyrovnává teplotní výkyvy, bylo zásadním zjištěním pro obyvatele žijící v teplých i chladných částech světa. Ve Skandinávii, USA a Kanadě, tedy v oblastech s chladným klimatem, tyto vegetační střechy akumulovaly teplo unikající z interiéru a zabraňovaly tak jeho ochlazení. Naproti tomu v horkých suchých oblastech, jako je Tanzánie, bránily teplu před vstupem do příbytku a navíc sloužily k zvýšení obsahu vzdušné vlhkosti (Minke, 2001).

Tradiční islandský dům pokrytý rašelinovými drny, je ukázkou toho, jak se v minulosti účinně využívalo tepelně akumulčních vlastností vegetačních střech. Zdrojem tepla v interiéru bylo pouze teplo uvolňované lidmi a zvířaty žijících uvnitř. Obyvatelé spoléhali jen na účinky střešního pokryvu, jako ochranu před mrazem. Střecha na takovém domě je tvořena dvěma nebo třemi vrstvami rašelinových drnů. Ty jsou uloženy na větvích a shora pokryty silnými travními drny (Čermáková a Mužíková, 2009). Celá konstrukce je sice pro srážkovou vodu v podstatě propustná, zpravidla však při dostatečném sklonu střechy k promáčení nedochází. Obzvláště je-li rašelina úplně suchá, vodu na sebe neváže (Minke, 2001).

Na severu USA a v Kanadě zhruba před 100 lety osadníci budovali domy na podobném principu. Tzv. "sodhouses", neboli drnové domy, byly pravděpodobně inspirovány konstrukčním řešením staveb v severní Evropě. Na jejich stavbu se používaly materiály dostupné v prériích, tedy dřevo, kámen a drny. Stěny široké 60 - 90 cm se stavěly

z 10 cm silných travních drnů. Drny se na sebe kladly obdobně jako cihly, travnatou stranou dolů a stranou s kořeny nahoru. Skladbu střechy tvořila vaznicová konstrukce krovu, jež byla pokryta vrstvou z větví, préríjní trávy a dvěma vrstvami travních drnů (viz. obr. 11). Nevýhodou těchto domů byla náchylnost k promáčení během dešťů (Minke, 2001).

Travnatá střecha ve Skandinávii měla tradičně sklon 30° - 45° (viz obr. 10). Tvořila ji 20 cm tlustá vrstva travních drnů položených kořenovou stranou nahoru, s výjimkou nejsvrchnější vrstvy, která směřovala kořeny dolů. Travní drny ležely na několika vrstvách březové kůry, která je relativně odolná vůči zpráchnivění. Kůra se pokládala bílou stranou dolů a běžně se lepila dřevným dehtem, aby vznikla pro kořeny neprostupná a vodotěsná vrstva. Dnes se doporučuje dřevný dehet nepoužívat, kvůli jeho rakovinotvorným účinkům. Tato střecha měla navíc údajně životnost jen 20 let (Čermáková a Mužíková, 2009).



Obr. 10 - Tradiční skandinávský dům
obrázek vlevo
(<https://cz.pinterest.com/pin/278801033155036243/?autologin=true>)

Obr. 11 - Konstrukce domu "sodhouse"
obrázek vpravo
(Minke, 2001)

6.4.2. Vrstvy střešního pláště

Skladba tohoto souvrství musí být navržena v souladu s platnými požadavky českých technických norem a dalších předpisů (Burian a kol. 2016).

Nosná konstrukce

Nosnou konstrukcí se rozumí krov, jehož účelem je nést střešní plášť a přenášet vznikající zatížení na nosné stěny stavby. V architektuře se setkáváme s krovky dřevěnými (nejčastěji ze smrkového dřeva), ocelovými a železobetonovými (Hauskrecht, 1982). Pro správný výběr nosné konstrukce je třeba zohlednit, jakožto stálé zatížení, hmotnost celé konstrukce společně s vodou nasyceným substrátem a vegetací (Burian a kol. 2016). Mimo stálá zatížení se musí počítat i s nahodilými zátěžemi, mezi něž patří užitné zatížení spojené s lidským provozem na střeše, zatížení sněhem, větrem a teplotou. Zatížení teplotou je nahodilé a krátkodobé, způsobené vlivem sezónních a denních klimatických změn. U zelených střech je však negativní vliv teplotních výkyvů výrazně zmírněn schopností vegetačních vrstev tepelnou energii akumulovat (Čermáková a Mužíková, 2009).

Pro střechu s extenzivním ozeleněním lze obvykle využít, vzhledem k plošné hmotnosti vegetačního souvrství 90 - 200 kg/m², jakýkoliv typ nosné konstrukce. Vegetační souvrství intenzivní zeleně má obvykle plošnou hmotnost > 400 kg/m², proto je vhodná pouze železobetonová konstrukce. Z hlediska tepelně technického se doporučují používat tzv. "těžké střechy", tedy střechy o plošné hmotnosti > 100 kg/m², které poskytují potřebnou akumulaci tepla a tepelnou stabilitu (Čermáková a Mužíková, 2009; Burian a kol. 2016).

Spádová vrstva

Vrstva, zajišťující požadovaný sklon pro odtok vody z hydroizolace, se umísťuje buď na nosnou konstrukci, na parozábranu, nebo může spád tvořit samotná nosná konstrukce. Je-li vrstva umístěna na nosné konstrukci, jedná se o vrstvu silikátovou (např. betonovou mazaninu), či monolitickou betonovou vrstvu z lehčeného betonu (např. z perlitbetonu, karamzitbetonu, polystyrenu), který má dobré tepelně technické vlastnosti a menší objemovou hmotnost než klasický beton.

Spádová vrstva se v současnosti provádí často přímo v tepelně izolační vrstvě. Je tvořena spádovými klíny z pěnového polystyrenu (EPS), pěnového skla, pěnového polyuretanu (PIR), nebo z tužených minerálních vláken (Čermáková a Mužíková, 2009).

Varianta	Tloušťka vrstvy d [mm]	Součinitel tepelné vodivosti λ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
Silikátová vrstva (cementová pěna)	cca 140	0,11
Lehčený beton (perlitbeton)	cca 80	0,09 - 0,16
Spádové klíny (EPS)	cca 140	0,04 - 0,05

Tab. 4 - Potřebné hodnoty pro stanovení tepelného odporu R spádové vrstvy (<http://www.lite-smesi.cz>; Veverka a kol. 1995)

Parozábrana

Parotěsná vrstva, jenž podstatně omezuje pronikání vodní páry do konstrukce stavby, je nutnou součástí každé střechy s vegetačním souvrstvím. (Burian a kol. 2016). Nejlepším řešením jsou parozábrany z asfaltových pásů o tloušťce 2 - 5 mm s nosnou vložkou ze zesílené hliníkové fólie. Dále se používají fólie (PE a PVC) o tloušťce 0,1 - 0,3 mm, které jsou vyztužené polypropylenovými vlákny. Využit lze i pěnové sklo o tloušťce několika cm s tepelně izolačními vlastnostmi a velkým difuzním odporem (Čermáková a Mužíková, 2009).

Materiál	Tloušťka vrstvy d [mm]	Součinitel tepelné vodivosti λ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
Asfaltové pásy	2 - 5	0,21
Fólie PE	0,1 - 0,3	0,35
Fólie PVC	0,1 - 0,3	0,16
Pěnové sklo	115	0,04 - 0,05

Tab. 5 - Potřebné hodnoty pro stanovení tepelného odporu R parozábrany (<https://www.dek.cz>; Veverka a kol. 1995)

Tepelná izolace

Dle Čermákové a Mužíkové (2009) tato vrstva brání prostupu tepla konstrukcí a tím snižuje tepelné zisky a ztráty budovy. Její tloušťka se určuje podle tepelně technického výpočtu střešního souvrství. Návrh je závislý především na funkčních požadavcích na hodnotu součinitele prostupu tepla U [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$] uvedených v ČSN 73 0540-2 (viz. Tab. 2).

Materiály tepelné izolace se vybírají s ohledem na potřebné technické parametry (pevnost v tlaku, malá stlačitelnost) a tepelně technické požadavky (součinitel tepelné vodivosti, faktor difuzního odporu). Jako tepelné izolace lze použít pěnový polystyren (EPS), extrudovaný polystyren (XPS), pěnový polyuretan (PUR nebo PIR), pěnové sklo či minerální vlnu, která se však dá využít pouze u nepochozích extenzivních střech. Základní vlastnosti těchto materiálů jsou shrnuty v tabulce 4. Nejčastěji se používá pěnový polystyren (EPS). Tepelné izolace z EPS se dodávají v několika typech dle pevnosti v tlaku (EPS 100, EPS 150, EPS 200). Izolace z extrudovaného polystyrenu (XPS) by se neměla používat u klasických plochých střech, kvůli trvalé tepelné odolnosti pouze do $+75$ °C. Nejspolehlivější tepelnou izolací je izolace z pěnového skla, při jejímž využití již není potřeba parozábrana (Burian a kol. 2016).

Materiál	Objemová hmotnost ρ [kg/m^3]	Součinitel tepelné vodivosti λ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	Faktor difuzního odporu μ [-]	Pevnost v tlaku [MPa]	Objemová nasákavost [%]
Pěnový polystyren (EPS)	15 - 35	0,039 - 0,051	40 - 67	0,07 - 0,22	4
Extrudovaný polystyren (XPS)	25 - 45	0,030 - 0,034	100 - 160	0,30 - 0,70	do 0,5
Pěnový polyuretan (PUR)	30 - 100	0,026 - 0,032	30 - 100	0,15	do 5
Pěnové sklo	105 - 165	0,038 - 0,048	70 000 - - 700 000	0,10 - 0,40	0
Minerální vlna	120 - 200	0,040 - 0,044	1,2 - 2	0,04 - 0,08	do 3

Tab. 6 - Vlastnosti materiálů tepelných izolací (Čermáková a Mužíková, 2009)

Hydroizolace

Účelem hydroizolace je bránit vodě před proniknutím do konstrukce. Na střeše s vegetčním pokryvem navíc musí sama odolávat vůči prorůstání kořenů. Proto se do hydroizolací začaly vkládat vyztužovací vložky a speciální aditivum zabraňující kořenům v prorůstání. Podle Čermákové a Mužikové (2009) hydroizolaci nejčastěji tvoří hydroizolační pásy, které lze rozdělit na:

- asfaltové pásy:
 - oxidované - pro zelené střechy nevhodné
 - modifikované (SBS) - nejsou odolné vůči UV záření, (APP) - odolné vůči UV záření
- hydroizolační fólie - odolné vůči UV záření:
 - termoplastické fólie (mPVC, PO, PEC, EVA) - při delší mechanické námaze se může část fólie trvale deformovat, působením tepla měknou
 - elastomerní fólie (EPDM, PIB) - vracejí se do původního stavu, působením tepla neměknou, nejsou tepelně tvarovatelné
 - termoplastické elastomery (CSPE) - jsou pružné, teplem měknou

Materiál		Tloušťka vrstvy d [mm]	Součinitel tepelné vodivosti λ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
Modifikované asfaltové pásy		5	0,21
Hydroizolační fólie	mPVC	0,8 - 1,5	0,16 - 0,35
	PEC	1,5	
	PIB	1,2 - 2,0	
	EPDM	1,2	

Tab. 7 - Potřebné hodnoty pro stanovení tepelného odporu R hydroizolace (Čermáková a Mužiková, 2009; Veverka a kol., 1995)

V případě, že vrstva hydroizolace sousedí s jinou vrstvou z materiálu, který se vzájemně chemicky nesnáší s materiálem hydroizolace, musí být od sebe odděleny separační vrstvou. Separační vrstva se pokládá zejména mezi hydroizolací z hydroizolační fólie

a tepelnou izolaci z EPS nebo XPS. K tomuto účelu se nejčastěji používá separační textilie o hmotnosti 300 g/m² (Burian a kol., 2016).

Ochranná vrstva hydroizolace

Tato vrstva chrání hydroizolaci před mechanickým poškozením a zároveň může zadržovat určité množství vody. Materiál se volí podle požadované funkce, kterou má primárně plnit. Nejčastěji se jedná o geotextilii o minimální plošné hmotnosti 300 g/m². Dále se jako ochranná vrstva používá cementový potěr o tloušťce alespoň 3 cm, betonová mazanina, atd. (Čermáková a Mužíková, 2009).

Materiál	Tloušťka vrstvy d [mm]	Součinitel tepelné vodivosti λ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
Separací geotextilie 300 g/m ²	3,9	0,15
Cementový potěr	30	1,16

Tab. 8 - Potřebné hodnoty pro stanovení tepelného odporu R ochranné vrstvy (Čermáková a Mužíková, 2009; Veverka a kol., 1995)

6.4.3. Vrstvy vegetačního souvrství

Pro tyto vrstvy nejsou vždy přesně definované jejich tepelně technické parametry, poněvadž v nich výrazně kolísá množství obsažené vody, která výsledné hodnoty ovlivňuje. (Čermáková a Mužíková, 2009).

Drenážní vrstva

Úkolem drenážní vrstvy je odvádět přebytečnou vodu do odvodňovacího zařízení a současně ji do jisté míry absorbovat. Je nutné s ní počítat na střeších se sklonem do 5°. Pro tyto účely jsou vhodné zejména porézní, lehké sypané materiály s hrubou zrnitostí, jako je např. drcený keramzit (Minke, 2001). Neporézní, těžké materiály (např. kačírek) tuto absorpční schopnost nemají. Zrnitostní frakce závisí na sklonu střechy. Při sklonu nad 20° již sypké materiály nejsou vhodné. Tloušťka vrstvy minerálních materiálů se odvíjí od způsobu ozelenění. Pro extenzivní typ ozelenění by měla mít 3 - 5 cm, pro intenzivní 5 - 10 i více cm.

Jako drenážní a zároveň hydroakumulační vrstva mohou sloužit i nopové fólie (z PVC, PE) či desky (z pěnového polystyrenu) s drážkami, které mohou být vyplněny sypkým materiálem. Tloušťka nopové fólie se pohybuje mezi 0,6 - 1 mm s výškou nopů kolem 60 mm (Čermáková a Mužíková, 2009).

Materiál	Tloušťka vrstvy d [mm]	Součinitel tepelné vodivosti λ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
Drcený keramzit	30 - 100 i více	0,13
Kačírek	30 - 100 i více	0,27
Nopová fólie z PVC	60	0,16
Nopová fólie z PE	60	0,35
Profilovaná deska z pěnového polystyrenu	50	0,04 - 0,05

Tab. 9 - Potřebné hodnoty pro stanovení tepelného odporu R drenážní vrstvy (Čermáková a Mužíková, 2009; Veverka a kol., 1995)

Filtrační vrstva

Tato separační vrstva zamezuje zanesení drenáže vyplavenými částicemi substrátu, společně s mulčovací vrstvou tak omezuje úbytku substrátu. Musí být vodopropustná a nesmí bránit kořenům v prorůstání. V současnosti se jako filtrační vrstva do vegetačního souvrství používají tkané nebo netkané textilie. Tloušťka textilie se volí na základě zatížení, jemuž je vystavena. Při tloušťce substrátu do 25 cm se používá textilie s plošnou hmotností 100 - 200 g/m², při větších mocnostech substrátu a větších střešních sklonech se používají textilie s vyšší plošnou hmotností (Bohuslávek a kol., 2009).

Materiál	Tloušťka vrstvy d [mm]	Součinitel tepelné vodivosti λ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
Geotextilie 150 g/m ²	2,5	0,15
Geotextilie 200 g/m ²	2,8	
Geotextilie 300 g/m ²	3,9	

Tab. 10 - Potřebné hodnoty pro stanovení tepelného odporu R filtrační vrstvy (<https://www.dek.cz>)

Hydroakumulační vrstva

Funkcí této vrstvy je akumulovat vodu potřebnou pro růst rostlin. Pokud je již hydroakumulační schopnost součástí drenáže, může se tato vrstva vynechat. Její význam roste se snižující se mocností substrátu a zvětšujícím se sklonem střechy (Bohuslávek a kol., 2009). Tvořit ji mohou hydroakumulační desky, textilie či substráty (Burian a kol., 2016).

Materiál	Tloušťka vrstvy d [mm]	Součinitel tepelné vodivosti λ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]
Deska z hydrofilní vlny	50	0,035
Hydroakumulační textilie 900 g/m ²	6	0,15

Tab. 11 - Potřebné hodnoty pro stanovení tepelného odporu R hydroakumulační vrstvy (<https://www.dek.cz>)

Substrát

Vrstva střešního substrátu poskytuje životní prostor pro rostliny, které zde koření, přijímají vodu, živiny a vzduch. Zároveň se podílí i na dalších funkcích zelené střechy, jako je zadržování vody a zpomalování jejího odtoku (Burian a kol., 2016).

Substrát je složen z plynné, kapalně a pevně složky. Pevná část je dále složena z organických a minerálních látek. Poměr těchto látek se odvíjí od potřeb vysazovaných rostlin. Organická část zajišťuje rostlinám výživu, minerální část zadržuje v substrátu vodu a provzdušňuje ho (Čermáková a Mužíková, 2009). Sypané substrátové směsi mohou obsahovat rašelinu, kompost, zeminu, jíl, písek, drcené cihly, porézní horniny (zeolit, pemzu, lávu, spongilit), drcené expandované jíly či břidlice atd.

Mocnost substrátu se volí na základě typu vegetace (viz. tab. 12) a zda se jedná o intenzivní či extenzivní střechu. Dále se mocnost upravuje podle místních klimatických podmínek (Burian a kol., 2016). Silnější vrstvu substrátu osázenou rostlinami s malou konkurenceschopností mohou ohrozit nalétavé dřeviny. Příliš tenká vrstva zase může být náchylná k přesychání (Čermáková a Mužíková, 2009).

Typ ozelenění	Potřebná mocnost substrátu [cm]
Rozchodníky a netřesky	3 - 8
Suchomilné traviny	5 - 18
Suchomilné trvalky	7 - 18
Byliny	12 - 35
Traviny a byliny	14 - 18
Traviny a vyšší trvalky	15 - 20
Trávník, keře do 1 m a zakrslé dřeviny	20 - 45
Keře 1 - 3 m vysoké	30 - 60
Vysoké keře a stromy 3 - 10 m vysoké	min. 60
Vysoké stromy (Acer, Sorbus atd.)	min. 100

Tab. 12 - Vhodné mocnosti substrátu pro jednotlivé typy vegetace
(Čermáková a Mužíková, 2009)

Růstové médium je z tepelného a hydrologického hlediska jednou z nejdůležitějších součástí systému zelené střechy. Účinnost substrátu je ovlivněna jeho složením (Jelínková et al., 2015). Studie Jelínkové et al. (2015) na modelových segmentech zelených střech porovnávala dva typy substrátů o mocnosti 5 cm s odlišným složením. Do prvního segmentu byl použit substrát (S1) složený ze sejmuté ornice s příměsí anorganických látek o nízké objemové hmotnosti (drcený expandovaný jíl a cihly). Míchání těchto složek je z ekonomických důvodů v českém stavebnictví velice populární. Druhý segment byl pokryt substrátem (S2) Optigreen pro lehké extenzivní střechy. Hlavními komponenty tohoto substrátu jsou drcená expandovaná břidlice, expandovaný jíl, láva, pemza, drcené cihly a kompost. Substrát S1 byl klasifikován jako písčito-hlinitý a S2 jako hlinito-písčitý. Výsledky měření ukázaly, že substrát S1 má lepší schopnost vyrovnávat teplotní rozdíly v průběhu dne. Tento substrát má také větší retenční schopnosti, zadržuje větší množství vody a díky tomu jí také více odpaří zpět do ovzduší.

Vrstva substrátu na střeše působí jako přídavná tepelná izolace, která zmírňuje přenos tepla vedením skrze konstrukci, čímž snižuje celkové tepelné zisky a ztráty budovy. Mocnost substrátu proto z tepelně izolačního hlediska hraje důležitou roli. Tato schopnost se však mění také v závislosti na objemové hmotnosti. S vyšší hutností, tím izolační schopnost půdy klesá (Eksi et al., 2017).

Mulčovací vrstva

Mulč slouží jako ochrana vrstvy substrátu. Zabraňuje odvtání jeho částic větrem, vyrovnává teplotní výkyvy, omezuje zaplevelení a chrání před erozí. Pro mulčování zelených střech jsou vhodnější materiály, které nelétají a nejsou příliš těžké. Využít se dá např. štěpka, kamenná drť, keramzit, mulčovací textilie pokrytá těžším materiálem, či biologický odpad (Čermáková a Mužíková, 2009).

Vegetace

Dle Buriana a kol. (2016) se jedná o biologicky aktivní vrstvu vegetačního souvrství, která plní funkci mikroklimatickou (snižování teplotních výkyvů, zvyšování vzdušné vlhkosti), hygienickou (zlepšování kvality ovzduší, snižování prašnosti a hluku), estetickou a ekologickou (náhrada ploch zeleně na zastavěném území, životní prostor pro ornitofaunu a bezobratlé atd.).

Požadovaný přínos zelené střechy je závislý na správném výběru vegetačního krytu, který vyhovuje aktuálním potřebám a místním klimatickým podmínkám. Spektrum vhodných rostlin v podstatě není omezeno, pokud jsou zajištěny vyhovující podmínky pro růst a potřebná péče. Nevhodné je vysazovat dřeviny s křovovým kořenem a také dřeviny vyšší než 10 m. Za nejvhodnější lze považovat rostliny odolnější vůči suchu, mrazu, větru, vysokým teplotám a slunečnímu záření. Tomu odpovídají hlavně tučnolisté či ojiněné druhy a rostliny schopné zadržovat vodu (Čermáková a Mužíková, 2009).

Pro tepelně izolační účinnost porostu je rozhodující jeho výška, hustota a velikost listového povrchu. Podle zjištění experimentu na univerzitě Kassel má čerstvě posečený trávník o výšce 3 - 5 cm zhruba 6 - 9 m² listového povrchu na 1 m² plochy půdy, kdežto na nesečené louce s trávou vysokou až 60 cm činí listová zeleň asi 225 m² na 1 m² půdy. Na dobře vybudované střeše s extenzivním travním pokryvem tvoří listový povrch 50 - 100 m² na 1 m² střešní plochy. Střechy porostlé rozchodníkem oproti tomu vykazují pouze 1 - 5 m² povrchu listů (Minke, 2001).

Hustý porost ze směsi divoké trávy a divokých bylin tedy zajišťuje lepší tepelnou izolaci v zimním období, stejně jako chladicí efekt během léta. Rozchodníky, volené na střechu především z estetického hlediska, mají ve srovnání s předchozím typem ozelenění jen

minimální stavebně fyzikální a ekologický účinek. Střešní výsadby s bylinami, jako je *Bellis*, *Trifolium*, *Allium* apod., také vykazují menší listovou plochu než porost extenzivní louky, přesto však větší než porost sukulentních druhů (Čermáková a Mužíková, 2009).

Čím je porost hustější a poskytuje více listové plochy, tím se zlepšuje jeho stínící efekt a zvyšuje se celkové albedo střechy. Díky tomu se na povrch substrátu dostane méně slunečního záření (Eksi et al., 2017).

Eksi et al. (2017) se ve svém výzkumu v Michiganu zabývali vlivem na povrchovou a okolní atmosférickou teplotu dvou typů vegetace, rostoucích v substrátech o různé mocnosti. Oba zkoumané typy byly umístěny v rámci jedné vegetační střechy, tedy kromě substrátu a vegetace byla skladba ostatních vrstev v obou případech stejná. V jedné části střechy byla položena vrstva substrátu o mocnosti 20 cm a založen porost ze směsi domácích druhů travin a bylin. Tato směs obsahovala byliny *Allium cernuum*, *Anemone virginiana*, *Asclepias tuberosa*, *Aster laevis*, *Aster olentangiensis*, *Campanula rotundifolia*, *Coreopsis lanceolata*, *Echinacea purpurea*, *Geum triflorum*, *Liatris aspera*, *Monarda fistulosa*, *Penstemon hirsutus*, *Tradescantia ohiensis* a traviny *Eragrostis spectabilis*, *Koeleria macrantha*, *Schyzachyrium scoparius*, *Sporobolus heterolepis*. Druhou část tvořil substrát o mocnosti 5 cm a porost z rozchodníků *Sedum acre*, *S. album*, *S. floriferum*, *S. kamtschaticum*, *S. reflexum* a *S. spurium*.

Střecha byla pozorována v průběhu všech ročních období (viz. obr. 12). Největší rozdíly byly mezi oběma typy ozelenění zaznamenány během léta. Denní průměrná teplota povrchu rozchodníkové části byla v průběhu celé sezóny o 4 ° C vyšší než u bylinné části. Bylinná část rovněž vykazovala menší teplotní výkyvy mezi dnem a nocí. Substrát s rozchodníky navíc kvůli malé tloušťce přenesl více tepla do dalších vrstev střešní konstrukce.

V zimě byla většinu sezóny střecha pokryta sněhem, který působí jako izolant. Hlubší substrát byl v chladných dnech až o 10 °C teplejší než mělký a vykazoval lepší schopnost snižovat tepelné ztráty budovy. Navíc větší biomasa, v tomto případě bylinno-travinový porost, je schopna zachytit více sněhu a zvýšit tak celkovou izolaci (Eksi et al., 2016).

JARO



LÉTO



PODZIM



ZIMA



Obr. 12 - Pozorovaná střecha v průběhu ročních období (Eksi et al., 2016)

6.5. Odrazivost

Část příchozího slunečního záření je díky odrazivé schopnosti povrchu listů a půdy reflektována zpět do atmosféry. Zbylou část rostliny nebo substrát pohlcují. Vegetační vrstva tak reguluje tepelné zisky budovy (Zhao et al., 2013). Stejně tak listy odrážejí nebo absorbují část dlouhovlnného záření vycházejícího z budovy, čímž snižují její tepelné ztráty (Minke, 2001). Povrchová vlastnost materiálu odrážet sluneční záření je vyjádřena hodnotou albeda. Čím je tato hodnota vyšší, tím více daný povrch odráží příchozí záření. Vysokou odrazivou schopnost má čistý sníh, jehož albedo se pohybuje mezi 0,85 - 0,95 (Braniš a kol. 1999). Oproti tomu albedo vody je pouze 0,08 (Veverka a kol., 1995).

Zhao et al. (2013) uvádějí, že albedo substrátu se mění v závislosti na komponentech, které jej tvoří (viz. tab. 13). Stejně tak se tato hodnota liší u různých typů rostlin (viz. tab. 14). Lesklé listy odrážejí více slunečního záření než matné (Kavka a Šindelářové, 1978)

Susca et al. (2011) zjistili, že průměrné albedo zelené střechy je 0,20, zatímco u běžné tmavé střechy je to jen 0,05.

Složení substrátu		Albedo	Objemová hmotnost ρ [kg/m ³]	Součinitel tepelné vodivosti λ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	Měrná tepelná kapacita c [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]
Hlavní složka	Vedlejší složky				
křemičitý písek, perlit	prvky dolomitu, živce a cristobalitu	0,13	621	0,31	1348
křemičitý písek	prvky leucitu, dolomitu a jílu	0,12	682	0,32	1065
křemičitý písek, jíl	prvky dolomitu	0,11	1347	0,93	1113
křemičitý písek, porézní břídlíce	prvky živce, dolomitu a leucitu	0,08	863	0,46	1246

Tab. 13 - Vlastnosti substrátů s různým složením (Zhao et al., 2013)

Typ rostliny	Albedo
<i>Sedum album</i>	0,23
<i>Sedum sexangular</i>	0,22
<i>Sedum hispanicum</i>	0,18
<i>Sedum reflexum</i>	0,16
<i>Sedum spurium</i>	0,14

Tab. 14 - Albedo různých druhů rozchodníku
(Zhao et al., 2013)

6.6. Pohlcování tepla

Část záření, kterou povrch neodrazí zpět do atmosféry, je materiálem absorbována a zvyšuje jeho teplotu (Susca et al., 2011).

Kromě výše uvedených vlastností materiálů má velký význam tepelná akumulace. Jedná se o schopnost přijímat teplo při zvyšování teploty. Materiály v průběhu ochlazování vydávají o to víc tepla, čím mají větší schopnost ho pohlcovat (Hauskrecht, 1982).

Akumulační schopnost materiálu je závislá na jeho měrné tepelné kapacitě. Čím je hodnota tepelné kapacity vyšší, tím lepší je jeho schopnost akumulovat teplo. Materiál s vysokou tepelnou kapacitou se pomalu zahřívá a při svém ohřevu pojme více energie. Při poklesu okolní teploty zase dochází k pomalému chladnutí za stejného výdeje energie, jako bylo potřeba na jeho zahřátí. Jak již bylo uvedeno v kapitole 6.2.1, nejvyšší měrnou tepelnou kapacitu má voda (Halliday et al., 2003). Voda obsažená v růstovém médiu a rostlinách tedy absorbuje značnou část dopadající sluneční energie. Čermáková a Mužiková (2009) uvádějí až 90 % pohlcení slunečního záření vegetačními vrstvami.

U vegetačních vrstev je tato schopnost ovlivněna jak měrnou tepelnou kapacitou materiálu, tak především obsahem vody v něm obsažené. Hodnoty měrné tepelné kapacity substrátů různého složení při průměrném nasycení vodou jsou uvedeny v tabulce 13 (Zhao et al., 2013).

6.7. Vliv vegetace na termiku

Rostliny díky svým schopnostem dokáží zmírňovat teplotní výkyvy. Regulují tak teplotu budovy i jejího okolí (Čermáková a Mužíková, 2009). Rostlinný kryt společně s půdou snižuje množství vstupujícího tepla do dalších vrstev střešního systému a stejně jako množství tepla unikajícího z budovy (La Roche et Berardi, 2014). To zajišťuje především hustý rostlinný porost, jenž povrchu střechy poskytuje stín a navíc působí jako tepelně izolační vrstva. Takový porost může vykazovat hodnotu součinitele tepelné vodivosti $\lambda = 0,17 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Dále hustý pokryv brání ve styku budovy s větrem a snižuje tak tepelné ztráty způsobené konvekcí (Minke, 2001).

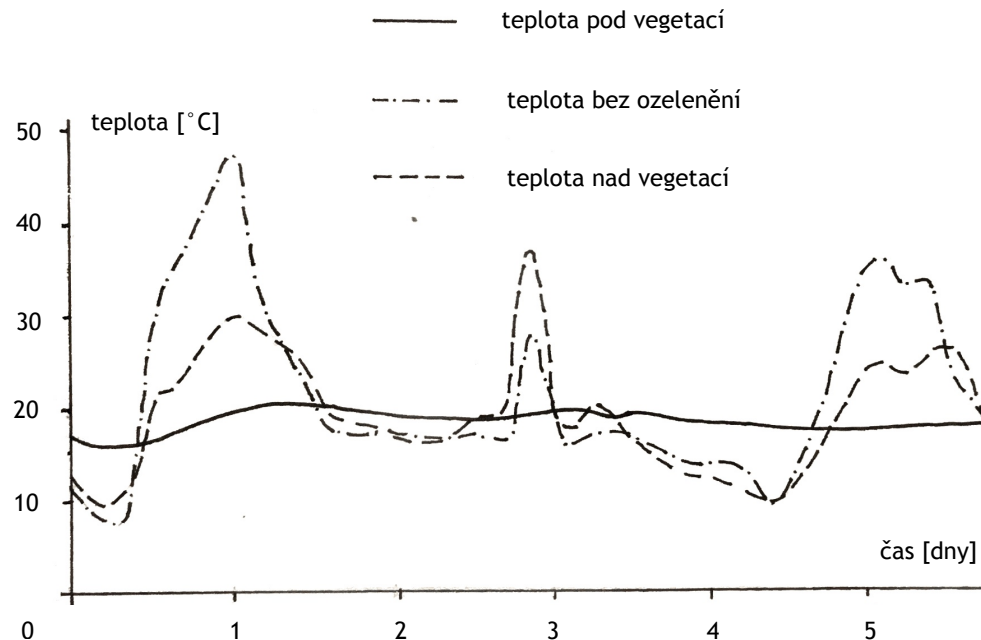
Rostlina ze svého okolí čárpá teplo fotosyntézou, vypařováním a schopností vody v rostlině obsažené akumulovat teplo. Chladicí efekt, který je zjevný zejména v horkých letních dnech, může spotřebovat zhruba 90 % dopadající sluneční energie. Latentní teplo spotřebované na odpaření litru vody je 2,2 MJ, tedy 530 kcal (Minke, 2001). Rychlost transpirace je ovlivněna faktory okolního prostředí, jako je vlhkost vzduchu, sluneční záření, rychlost větru a obsah vody v substrátu (Zhao et al., 2013). K další spotřebě energie dochází při fotosyntéze, kdy ke vzniku 1 molekuly glukózy je potřeba 2,83 kJ. Značná část energie, kterou rostlina nespotřebuje ke svým fyziologickým procesům, je pohlcena listy (Čermáková a Mužíková, 2009).

Zatímco v horkých letních dnech rostliny energii spotřebovávají, v zimě a v noci teplo vyrábějí. K uvolňování energie dochází v procesu opačném fotosyntéze, tedy dýchání (Minke 2001). Dále se teplo uvolňuje při kondenzaci vodní. Tento děj probíhá zpravidla v ranních hodinách, kdy rozdíl mezi povrchovou a okolní teplotou je nejvyšší. Rostlina se tak tvorbou rosy snaží tento rozdíl vyrovnat (Čermáková a Mužíková, 2009).

Teplota vzduchu měřená ve výšce 1,5 m nad povrchem zelené střechy při výzkumu v Michiganu (viz. obr. 11), dosáhla v červenci maximální hodnoty 28,2 °C. Naopak v lednu byla naměřena minimální teplota -12,1 °C. Na nejbližší meteorologické stanici přitom byly hodnoty maxima a minima 28,4 °C a -15,7 °C. To potvrzuje, že vegetace má schopnost ochlazovat v horkých dnech okolní vzduch a v zimě naopak teplo vytvářet (Eksi et al., 2016).

Z obrázku 13 jsou zřejmé rozdíly průběhu denních teplot mezi šterkopískovou a vegetační střechou během letních dnů. Polední teploty v období měření dosahovaly v průměru 30 - 35 °C, přesto teplotní maximum zelené střechy v hloubce substrátu 10 cm

nepřekročilo 20 °C. V zimě pak při nočních průměrných teplotách -10 °C se rozmezí dosažených teplot na zelené střeše v hloubce substrátu 5 cm pohybovalo mezi -1° a 0 °C (Minke, 2001).



Obr. 13 - Průběh teploty na střeše s vegetací a bez vegetace v letním období (Minke, 2001)

6.8. Přínos zelených střech

První ozeleněné střechy byly zakládány z čistě praktických důvodů, tedy jako ochrana před únikem či vstupem tepla do budovy, nikoliv pro estetický dojem nebo ekologický přínos (Čermáková a Mužíková, 2009). V současné době se tyto střechy realizují nejen kvůli udržení teploty v budově, ale především jako hlavní způsob obnovy ztracených ploch zeleně ve městech společně s jejich pozitivním přínosem pro společnost i životní prostředí (Martens et al., 2008).

6.8.1. Vliv na stavbu

Sřecha bez vegetačního souvrství je vystavena prudkým výkyvům teplot v krátkém časovém rozmezí, čímž dochází k rozpínání materiálů a k jejich rychlejšímu poškození. Vegetační souvrství chrání střešní plášť před slunečním zářením, reguluje teplotní výkyvy a prodlužuje tak celkovou životnost střešní konstrukce (Čermáková a Mužíková, 2009).

Díky schopnosti omezovat přenos tepla do budovy a mimo ni, zlepšují zelené střechy tepelný komfort v interiéru. Snižuje se také spotřeba energie pro vytápění a chlazení. K ještě menší spotřebě elektřiny by dále přispělo snížení efektu městského tepelného ostrova rozsáhlým zavedením systému zelených střech na potenciálních střešních plochách (Akbari et Konopacki, 2005). Omezení chladících a vytápěcích procesů navíc vede k celkovému zlepšení kvality ovzduší ve městě.

Vegetace a substrát na střeše zlepšují její akustické vlastnosti, protože absorbují zvukové vlny. Do budovy proniká méně hluku, způsobeného primárně dopravou. Obyvatelům budovy jsou tak dopřány kvalitnější životní podmínky (Čermáková a Mužíková, 2009).

Pokud střešní vegetace není vysušená dlouhodobým suchem, je omezena možnost vzniku požáru a jeho šíření (Burian a Ondřej, 1992).

6.8.2. Vliv na ekologii

Velký podíl dlážděných ploch v městských aglomeracích má negativní vliv na místní klima, kvalitu ovzduší a vodní režim. Zelené střechy mohou být, díky úspornému zacházení s půdou ve městě, alespoň částečným kompenzačním opatřením za ztracené vegetační plochy (Minke, 2001).

Vegetační souvrství zmírňuje tepelné zisky a ztráty budovy. Snižuje tak její ohřev během insolace a vyzařování tepla v noci. Značná část sluneční energie dopadající na střechu je navíc rostlinami využita k ochlazování okolního vzduchu (Department of Energy, 2004).

Rostliny na střeše dále okolní vzduch čistí, tím že zachycují částice polévatého prachu a nečistot, které jsou následně spláchnuty deštěm do půdy. Mohou také absorbovat škodlivé plyny a aerosoly (Minke, 2001).

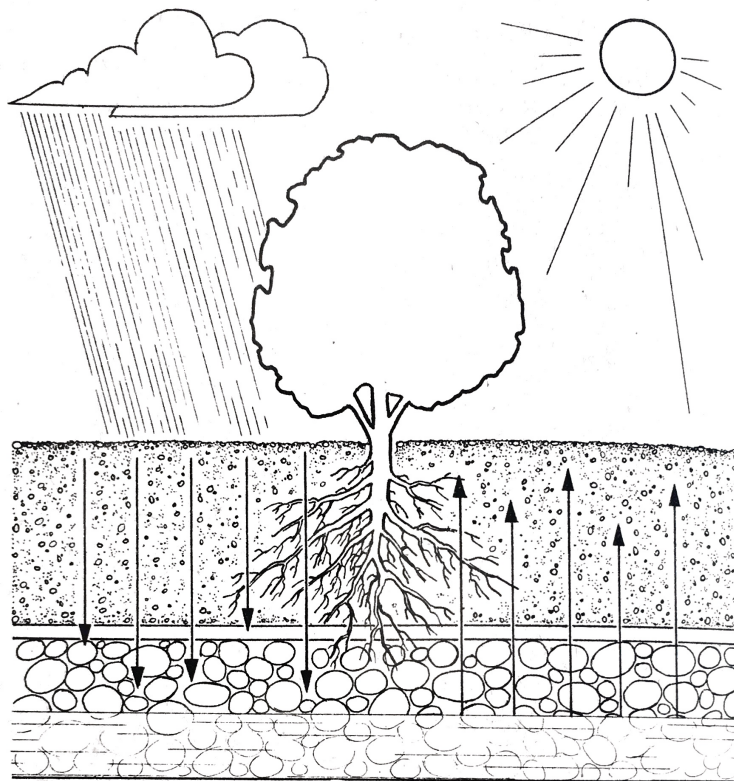
Důležitou schopností zelené střechy je snižovat a zpomalovat odtok dešťových srážek, čímž méně zatěžuje kanalizační systém od zatížení. Voda protékající vegetačními vrstvami je

jimi navíc filtrována. Do povrchových vod se tedy dostane již očištěná od škodlivých látek a chladnější (Department of Energy, 2004).

Dle Buriana a Ondřeje (1992) vegetační souvrství zadržuje až polovinu vodních srážek dopadajících na střechu. Zachycenou vlhkost pak rostliny transpirací dostávají zpět do ovzduší a regulují místní mikroklima (viz. obr. 14).

Na ozeleněné plochy střech se do měst mohou vracet výstavbou potlačené druhy rostlin, což přispívá k návratu přirozené biodiversity. Zároveň je vytvářen životní prostor pro hmyz a ptáky (Dunnet et Kingsbury, 2008).

Pokud má střešní konstrukce minimální únosnost 300 kg/m^2 , umožňuje pokrytí tlustší vrstvou substrátu, ve kterém lze následně pěstovat zeleninu, bobuloviny, léčivé a kořeninové byliny (Burian a Ondřej, 1992).



Obr. 14 - Zadržování a vzlínání vody ve vegetačním souvrství (Burian a Ondřej, 1992)

7. Závěr

Práce shrnuje problematiku městských tepelných ostrovů a vytváří ucelený přehled o tepelných vlastnostech zeleně na konstrukci. Dále se věnuje aspektům, které ovlivňují efektivitu zelených střech. Při studiu vědeckých článků bylo zjištěno, že zájem o problematiku tepelných ostrovů a snaha zmírnit jejich negativní účinky stále roste. Rozsáhlé zavedení vegetace na konstrukci je mnohými autory považováno za velmi podstatnou strategii s maximálním možným potenciálem, nejen v boji proti MTO. Střešní zahrady a zeleň na konstrukci mají významný dopad v širším rozsahu problematiky týkající se urbanizovaného území.

Eksi et al. (2016) ve svém výzkumu potvrzuje schopnost vegetačního souvrství regulovat teplotu okolí. Jako efektivnější z tepelně izolačního hlediska tento výzkum vyhodnocuje hustý porost společenstva travin a bylin v hlubším substrátu oproti porostu rozchodníku v substrátu o nižší mocnosti. Výzkum z Chicaga dokládá schopnost zelené střechy ochlazovat vzduch během horkých letních dnů. V průběhu měření vykazovala ozeleněná střecha výrazně nižší povrchovou teplotu než v případě běžné tmavé střechy. Teplota okolního vzduchu nad vegetačním typem pak byla o více než 4 °C chladnější než v druhém případě (Department of Energy, 2004). Totožné výsledky shrnuje i studie Cummingse et al. (2007), kde je porovnána ozeleněná střecha se světle zbarvenou střechou. Výsledkem experimentu je, že teplota povrchu i okolního vzduchu je výrazně nižší u střechy s vegetačním pokryvem.

Liu et Bass (2005) z modelové situace Toronta vypočítali potenciální ochlazení městského prostředí o 0,1 až 0,8 °C při ozelenění 50 % dostupných povrchů střech. Klesající trend teplot po zavedení zelených střech zaznamenala i studie z New Yorku (Rosenzweig et al., 2006). Tyto studie doporučují rozsáhlou aplikaci vegetace na konstrukci v městském měřítku pro snížení intenzity MTO. Ng et al. (2011) tvrdí, že ozeleňování prostorů měst je pro jejich chlazení klíčové. Dále zmiňuje, že ve městech s vysokou koncentrací výškových budov, jako je Hongkong, nemá zavedení zelených střech význam, poněvadž u budov vyšších než 60 m ztrácejí tyto střechy vliv na chlazení městského prostředí.

S ohledem na výsledky většiny studií zabývajících se danou problematikou lze dojít k závěru, že tepelné vlastnosti zelených střech významnou měrou redukuje negativní dopady tepelných ostrovů měst. Pro efektivní regulaci městského klimatu a k vytvoření kvalitního

mikroklima má však význam pouze rozsáhlá aplikace ozelenění na vysokém procentu potenciálních budov. Některá pokroková města, jako je Singapur, Chicago či Toronto, z tohoto důvodu ozelenování budov již vyžadují. Na ozelenění měst poskytují finanční podporu a řadu dotačních programů. Ve společnosti je třeba šířit povědomí o účincích zelených střech, díky nimž mohou majitelé budov ušetřit značnou částku na nižší spotřebě energie (v zimním období zelené střechy izolují budovu před únikem tepla a v létě zabraňují před vstupem tepla do budovy) a navíc přispět k zlepšení životního prostředí.

8. Seznam použitých zdrojů

- Akbari, H. 2005. Energy Saving Potentials and Air Quality Benefits of Urban Heat Island Mitigation [online]. [cit. 2018-03-01]. Dostupné z <<https://www.osti.gov/servlets/purl/860475>>.
- Akbari, H., Berdahl, P., Levinson, R., Miller, S. W. W., Desjarlais, A. 2006. Cool Color Roofing Materials [online]. California Energy Commission. [cit. 2018-03-07]. Dostupné z <<https://buildings.lbl.gov/sites/default/files/coolcolorroofingmaterials.pdf>>.
- Akbari, H., Konopacki, S. 2005. Calculating energy-saving potentials of heat-island reduction strategies. *Energy Policy*. 33. 721 - 756.
- Arabi, R., Shahidan, M. F., Kamal, M. S. M., Jaafar, M. F. Z., Rakhshandehroo, M. 2015. Mitigating Urban Heat Island Through Green Roofs. *Current World Environment*. 10. 918 - 927.
- Arnfield, A. J. 2003. Two decades of urban climate research: A review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *International Journal of Climatology*. 23. 1 - 26.
- Bacci, P., Maugeri, M. 1992. The urban heat island of Milan. *Nuovo Cimento*. 15. 417 - 424.
- Berdahl, P., Bretz, S. 1997. Preliminary survey of the solar reflectance of cool roofing materials. *Energy and Buildings*. 25. 149 - 158.
- Bohuslávek, P., Horský, V., Jakoubková, Š. 2009. Vegetační střechy a střešní zahrady. Dektrade. Praha. 71 s. ISBN: 978-80-87215-05-0.
- Braniš, M. (ed.), Pivnička, K., Benešová, L., Pušová, R., Tonika, J., Hovorka, J. 1999. Výkladový slovník vybraných termínů z oblasti ochrany životního prostředí a ekologie. Karolinum. Praha. 46 s. ISBN: 80-7184-758-5.
- Braniš, M. 1999. Základy ekologie a ochrany životního prostředí. 2. vydání. Informatorium. Praha. 169 s. ISBN: 80-86073-52-1.
- Brázdil, R., Budíková, M. 1999. An urban bias in air temperature fluctuations at the Klementinum, Prague, The Czech Republic. *Atmospheric Environment*. 33. 4211 - 4217.
- Burian, S., Dostálová, J., Dubský, M., Halama, P., Chaloupka, K., Komzák, J., Pařava, R., Straková, M., František, Š., Vacek, P., Vokál, J. 2016. Standardy pro navrhování, provádění a údržbu: Vegetační souvrství zelených střech. Odborná sekce Zelené střechy. 34 s.
- Burian, S., Ondřej, J. 1992. Oživená architektura. Fajma. Praha. 58 s. ISBN: 80-85374-10-2.
- Coutts, A. M., Beringer, J., Tapper, N. 2008. Changing Urban Climate and CO2 Emissions: Implications for the Development of Policies for Sustainable Cities. *Urban Policy and Research*. 28:1. 27 - 47.
- Cummings, J., Withers, C., Sonne, J., Parker, D., Vieira, R. 2007. UCF Recommissioning, Green Roofing Technology, and Building Science Training; Final Report [online]. [cit. 2018-03-15]. Dostupné z <<http://www.fsec.ucf.edu/en/publications/pdf/FSEC-CR-1718-07.pdf>>.
- Čermáková, B., Mužíková, R. 2009. Ozeleněné střechy. Grada. Praha. 246 s. ISBN: 978-80-247-1802-6.
- ČSN 73 0540-2. Tepelná ochrana budov - Část 2: Požadavky. 2011. Český normalizační institut. Praha. 56 s.

- ČSN 73 0540-3. Tepelná ochrana budov - Část 3: Navrhované hodnoty veličin. 2005. Český normalizační institut. Praha. 96 s.
- Department of Energy. 2004. Federal Technology Alert: Green Roofs [online]. Federal Energy Management Program. [cit. 2018-03-20]. Dostupné z <https://www.nps.gov/tps/sustainability/greendocs/fta_green_roofs-sm.pdf>.
- Dostálová, J. 2013. 3. mezinárodní kongres "Zelené střechy". 13. - 15. 5. 2013. Hamburk. Inspirace. 2. 27 - 29.
- Eksi, M., Rowe, D. B., Wichman, I. S., Andresen, J. A. 2017. Effect of substrate depth, vegetation type, and season on green roof thermal properties. *Energy and Buildings*. 145. 174 - 187.
- Fan, H., Sailor, D. J. 2002. Modeling the Diurnal Variability of Effective Albedo for Cities. *Atmospheric Environment*. 36. 713 - 72.
- Forman, R. T. T., Godron, M. 1993. *Krajinná ekologie*. Academia. Praha. 583 s. ISBN: 80-200-0464-5.
- Halliday, D., Resnick, R., Walker, J. 2003. *Fyzika: Mechanika - Termodynamika*. Vutium. Brno. 576 s. ISBN: 80-214-1868-0.
- Hanzalová, L., Stibůrková, B., Svoboda, Z., Šilarová, Š. 1998. Zásady pro navrhování zelených střech z hlediska stavební tepelné techniky. *Stavební obzor*. 10. 292-294.
- Hauskrecht, A. 1982. *Tepelná ochrana budov*. Alfa. Bratislava. 233 s.
- Huang, J., Akbari, H., Taha, H. 1990. The Wind - Shielding and Shading Effects of Trees on Residential Heating and Cooling Requirements [online]. Energy & Environment Division. [cit. 2018-03-02]. Dostupné z <<https://pubarchive.lbl.gov/islandora/object/ir%3A90282/datastream/PDF/view>>.
- Jelínková, V., Dohnal, M., Pícek, T. 2015. A Green Roof Segment for Monitoring the Hydrological and Thermal Behaviour of Anthropogenic Soil Systems. *Soil and Water Research*. 10. 262 - 270.
- Kalkstein, L. S., Sheridan, S. C. 2003. The Impact of Heat Island Reduction Strategies on Health - Debilitating Oppressive Air Masses in Urban Areas [online]. U.S. EPA Heat Island Reduction Initiative. [cit. 2018-03-05]. Dostupné z <http://www1.udel.edu/SynClim/MM5_complete.pdf>.
- Kavka, B., Šindelářová, J. 1978. *Funkce zeleně v životním prostředí*. Státní zemědělské nakladatelství. Praha. 235 s.
- Kingsbury, N., Dunnet, N. 2008. *Planting green roofs and living walls*. 3rd ed. Portland. Timber Press. p. 328. ISBN: 978-0-88192-911-9.
- Kulhánek, F. 2014. *Tepelná ochrana a energetika budov*. ČKAIT. Praha. 172 s. ISBN: 978-80-87438-48-0.
- La Roche, P., Berardi, U. 2014. Comfort and energy savings with active green roofs. *Energy and Buildings*. 82. 492 - 504.
- Liu, K., Bass, B. 2005. Performance of Green Roof Systems [online]. National Research Council Canada. [cit. 2018-03-10]. Dostupné z <<https://nparc.nrc-cnrc.gc.ca/eng/view/object/?id=a3f06fba-bf23-4b72-a2e9-881eafda6613>>.
- Mackley, Ch. W., Lee, X., Smith, R. B. 2011. Remotely sensing the cooling effects of city scale efforts to reduce urban heat island. *Building and Environment*. 49. 348 - 358.

- Martens, R., Bass, B., Alcazar, S. S. 2008. Roof-envelope ratio impact on green roof energy performance. *Urban Ecosyst.* 11. 399 - 408.
- Miller, F. P., Vandome, A. F., McBrewster, J. (ed.). 2009. *Solar energy*. Alphascript Publishing. Beau Bassin. p. 306. ISBN: 978-613-0-00472-9.
- Minke, G. 2001. *Zelené střechy: plánování, realizace, příklady z praxe*. HEL. Ostrava. 92 s. ISBN 80-861-6717-8.
- Moldan, B. 2006. *Ekologická dimenze udržitelného rozvoje*. Karolinum. Praha. 102 s. ISBN: 80-246-0246-6.
- Morris, C. J., Simmonds, I., Plummer, N. 2001. Quantification of the influences of wind and cloud on the nocturnal urban heat island of a large city. *Journal of Applied Meteorology*. 40. 169 - 181.
- NASA. 2013. *Landsat: Continuing to Improve Everyday Life* [online]. [cit. 2018-04-14]. Dostupné z: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/wp-content/uploads/2013/11/Landsat_Improve_Life1.pdf>.
- Ng, E., Chen, L., Wang, Y., Yuan, C. 2011. A study on the cooling effects of greening in a high-density city: An experience from Hong Kong. *Building and Environment* 47. 256 - 271.
- Oke, T. R. 1982. The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 108. 1 - 24.
- Rizwan, A. M., Dennis, Y. C., Liu, Ch. 2008. A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island. *Journal of Environmental Sciences*. 20. 120 - 128.
- Roa-Espinosa, A., Wilson, T. B., Norman, J. M., Johnson, K. 2003. Predicting the Impact of Urban Development on Stream Temperature Using a Thermal Urban Runoff Model [online]. [cit. 2018-03-03]. Dostupné z <<http://colowqforum.org/pdfs/listing-methodology/10-2014/WQCD%2020141001%20Roa-Espinosa%20et%20al%202003%20Article.pdf>>.
- Roth, M., Oke, T. R., Emery, W. J. 1989. Satellite - derived urban heat islands from three coastal cities and the utilization of such data in urban climatology. *International Journal of Remote Sensing*. 10. 1699 - 1720.
- Rosenfeld, A. H., Romm, J. J., Akbari, H., Pomerantz, M. 1998. Cool communities: strategies for heat islands mitigation and smog reduction. *Energy and Buildings*. 28. 51 - 62.
- Rosenzweig, C., Solecki, W. D., Parshall, L., Gaffin, S., Lynn, B., Goldberg., Cox, J., R., Hodges, S. 2006. Mitigating New York City's Heat Island with Urban Forestry, Living Roofs, and Light Surfaces [online]. [cit. 2018-03-11]. Dostupné z <<https://www.giss.nasa.gov/research/news/20060130/103341.pdf>>.
- Santamouris, M. 2014. Cooling the cities - a review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. *Solar Energy*. 103. 682 - 703.
- Slabá, N. 1972. *Návod pro pozorovatele meteorologických stanic ČSSR*. Hydrometeorologický ústav v Praze. Praha. 224 s. ISBN: 06-016-72.
- Steinecke, K. 1999. Urban climatological studies in the Reykjavik subarctic environment, Iceland. *Atmospheric Environment*. 33. 4157 - 4162.
- Susca, T., Gaffin, S. R., Dell'Osso, G. R. 2011. Positive effects of vegetation: Urban heat island and green roofs. *Environmental Pollution*. 159. 2119 - 2126.

- Taha, H., Sailor, D., Akbari, H. 1992. High-Albedo Materials for Reducing Building Cooling Energy Use [online]. [cit. 2018-02-16]. Dostupné z <<https://www.osti.gov/servlets/purl/7000986>>.
- Taha, H. 1997. Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat. *Energy and Buildings*. 25. 99 - 103.
- Taha, H., Kalkstein, L. S., Sheridan, S. C., Wong, E. 2004. The Potential of Urban Environmental Controls in Alleviating Heat-wave Health Effects in Five US Regions [online]. [cit. 2018-03-06]. Dostupné z <<https://pdfs.semanticscholar.org/255d/337becd3efeb074e52bc4d25c58a974f28b2.pdf>>.
- Unger, J. 2004. Intra - urban relationship between surface geometry and urban heat island: Review and new approach. *Climate Research*. 27. 253 - 264.
- U.S. Environmental Protection Agency. 2008a. Urban Heat Island Basics. Reducing urban heat islands: Compendium of strategies [online]. [cit. 2018-02-26]. Dostupné z <<https://www.epa.gov/heat-islands/heat-island-compendium>>.
- U.S. Environmental Protection Agency. 2008b. Trees and Vegetation. Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies [online]. [cit. 2018-03-07]. Dostupné z <<https://www.epa.gov/heat-islands/heat-island-compendium>>.
- U.S. Environmental Protection Agency. 2008c. Cool Roofs. Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies [online]. [cit. 2018-03-08]. Dostupné z <<https://www.epa.gov/heat-islands/heat-island-compendium>>.
- U.S. Environmental Protection Agency. 2008d. Cool Pavements. Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies [online]. [cit. 2018-03-08]. Dostupné z <<https://www.epa.gov/heat-islands/heat-island-compendium>>.
- Veverka, J., Chybík, J., Meixner, M. 1995. Tepelná ochrana budov: Souhrn fyzikálních veličin stavebních materiálů a výpočtů k ČSN 730540. PC-DIR. Brno. ISBN: 80-85895-03-X.
- Voogt, J. A., Oke, T. R. 2003. Thermal Remote Sensing of Urban Areas. *Remote Sensing of Environment*. 86. 370 - 384.
- Vysoudil, M. 2007. Možnosti sběru dat pro studium topoklimatu. *Miscellanea geographica*. 13. 167 - 174.
- Wienert, U., Kuttler, W. 2005. The dependence of urban heat island intensity on latitude - A statistical approach. *Meteorologische Zeitschrift*. 14. 677 - 686.
- Yang, L., Qian, F., Song, D., Zheng, K. 2016. Research on Urban Heat-island Effect. *Procedia Engineering*. 169. 11 - 18.
- Zhao, M., Tabares-Velasco, P. C., Srebric, J., Komarneni, S. 2013. Comparison of green roof plants and substrates based on simulated green roof thermal performance with measured material properties [online]. [cit. 2018-04-05]. Dostupné z <http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2013/p_1198.pdf>.

9. Seznam obrázků

Obr. 1 - Termální snímek Buffala pořízený družicí Landsat 7 za srpnového dne	7
Obr. 2 - Faktor viditelné oblohy	13
Obr. 3 - Členění městského tepelného ostrova atmosféry	16
Obr. 4 - Chod denních povrchových a atmosférických teplot za anticyklonálního počasí	17
Obr. 5 - Evapotranspirace	22
Obr. 6 - Rozdíl v povrchových teplotách zelené a konvenční střechy	23
Obr. 7 - Aplikace elastomerního nástřiku na střechu	26
Obr. 8 - Infiltrace a exfiltrace vzduchu	28
Obr. 9 - Skladba ozeleněného střešního pláště	34
Obr. 10 - Tradiční skandinávský dům	38
Obr. 11 - Konstrukce domu “sodhouse”	38
Obr. 12 - Pozorovaná střecha v průběhu ročních období	49
Obr. 13 - Průběh teploty na střeše s vegetací a bez vegetace v letním období	53
Obr. 14 - Zadržování a vzlínání vody ve vegetačním souvrství	55

10. Seznam tabulek

Tab. 1 - Základní charakteristiky MTO povrchu a atmosféry	18
Tab. 2 - Požadované a doporučené hodnoty součinitele prostupu tepla UN pro střechy	31
Tab. 3 - Dělení stavebních materiálů podle součinitele tepelné vodivosti λ	32
Tab. 4 - Potřebné hodnoty pro stanovení tepelného odporu R spádové vrstvy	40
Tab. 5 - Potřebné hodnoty pro stanovení tepelného odporu R parozábrany	40
Tab. 6 - Vlastnosti materiálů tepelných izolací	41
Tab. 7 - Potřebné hodnoty pro stanovení tepelného odporu R hydroizolace	42
Tab. 8 - Potřebné hodnoty pro stanovení tepelného odporu R ochranné vrstvy	43
Tab. 9 - Potřebné hodnoty pro stanovení tepelného odporu R drenážní vrstvy	44
Tab. 10 - Potřebné hodnoty pro stanovení tepelného odporu R filtrační vrstvy	44
Tab. 11 - Potřebné hodnoty pro stanovení tepelného odporu R hydroakumulační vrstvy	45
Tab. 12 - Vhodné mocnosti substrátu pro jednotlivé typy vegetace.....	46
Tab. 13 - Vlastnosti substrátů s různým složením	50
Tab. 14 - Albedo různých druhů rozchodníku.....	51