



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV POZEMNÍHO STAVITELSTVÍ

INSTITUTE OF BUILDING STRUCTURES

ANALÝZA TEPLOTNÍCH A VLHKOSTNÍCH PROCESŮ VE VRSTVÁCH INTENZIVNÍ VEGETAČNÍ STŘECHY

ANALYSIS OF TEMPERATURE AND MOISTURE PROCESSES IN LAYERS OF INTENSIVE
VEGETATION ROOF

TEZE DIZERTAČNÍ PRÁCE

SHORT VERSION OF DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. DÁŠA SUKOPOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. et doc. Ing. MILAN VLČEK, CSc

BRNO 2021

Klíčová slova

Intenzivní vegetační střecha, střešní zahrada, chladná střecha, městské střešní zemědělství, fotosyntéza, permitivita, chladicí efekt, tepelně izolační efekt, fotosyntéza, transpirace, evapotranspirace, intercepce

Keywords

Intensive Green Roof, Roof Garden, Cool roof, Urban rooftop farming, Permittivity, Cooling Effect, Thermal Insulation Effect, Photosynthesis, Transpiration, Evapotranspiration, Interception

OBSAH

1	ÚVOD	2
2	SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	3
3	CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE A METODY ZPRACOVÁNÍ.....	4
3.1	Cíle disertační práce	4
3.2	Metody zvolené k realizaci cílů	5
3.3	Popis lokality a objektu měření	5
4	VÝSLEDKY MĚŘENÍ.....	8
4.1	Výsledky měření – 1. část	8
4.1.1	Výsledky měření - zimní období	9
4.1.2	Výsledky měření - letní období.....	14
4.2	Výsledky měření – 2. část	17
4.3	Výsledky měření – 3. část	22
4.4	Výpočet dvourozměrného stacionárního teplotního pole v konstrukci pomocí programu Area 2017	31
4.5	Výpočet teploty vzduchu v interiéru v modelovém dni pro letní období pomocí programu Simulace 2018, tepelná stabilita v letním období	33
4.6	Závěr, význam pro praxi a možnosti dalšího výzkumu	34
5	Seznam použité literatury	35

1 ÚVOD

V současné době je všeobecně známo, že vegetační střechy poskytují celou řadu výhod environmentálních, estetických, stavebně-technických, hospodářských i ekonomických a mohou výrazně zlepšit kvalitu života ve městech. Především v hustě zastavěných a zalidněných oblastech přispívají ke zmírnění negativního efektu „městského tepelného ostrova“ (*angl. Urban Heat Island – zkr. UHI*) - jevu, projevujícího se v oblasti velkoměst zvýšenými teplotami oproti okolní krajině. Hlavní příčinou vzniku oblastí s vyšší teplotou jsou změny v charakteru aktivního zemského povrchu, k nimž dochází v důsledku lidské činnosti. Nahrazením původní krajiny nově vybudovanými povrchy se mění míra jejich odrazivosti (albedo) a také množství záření, které povrchy absorbují či vyzáří zpět do atmosféry. Je vědecky dokázáno, že tmavé povrchy (černá barva asfaltu) absorbují více energie než povrchy světlé. Plochy (střechy, obvodové zdi, dlažba, silnice) se vlivem slunečního záření ohřívají více než původní zalesněná krajina. Plochy bez vegetace mohou dosahovat teploty 50 °C i více. Nejintenzivnější je „efekt“ v horkých letních dnech (s maximy přes 30 °C), kdy teplota neklesá ani v noci. Běžné rozdíly teplot oproti okolní krajině se pohybují u menších měst mezi 1-5 °C, teplotní rozdíly u největších velkoměst mohou dosahovat až 10 °C.

Vzduch je ohříván nejen slunečním zářením, ale i naakumulovaným teplem, které se uvolňuje z ohřátých předmětů, zvláště při bezvětří. Ke zhoršujícímu stavu ovzduší přispívá i městská doprava, průmyslová výroba, provoz klimatizačních zařízení v letním a vytápění budov v zimním období. Vyšší teploty ovzduší mohou ovlivňovat ve větší míře pochody v atmosféře i množství srážek. Výstavba a rozvoj měst se vzrůstajícím podílem nepropustných povrchů a nedostatečným podílem ploch porostlých vegetací se významně podílí na změnách místních vlhkostních poměrů v porovnání s oblastmi, kde převládají povrchy přirozené. Rychle odtékající voda nemá možnost se vsáknout do půdy a následně se odpařit evapotranspirací (celkový výpar vztahující se k určitému území). Vyšší teplota sice zvyšuje množství výparu, ale ten je malý v důsledku malého podílu ploch pokrytých vegetací. Zde je třeba připomenout, že městská zeleň může výparem dodávat do ovzduší velké množství vodní páry a tak se pozitivně podílet na přirozené cirkulaci vzduchu v ovzduší.

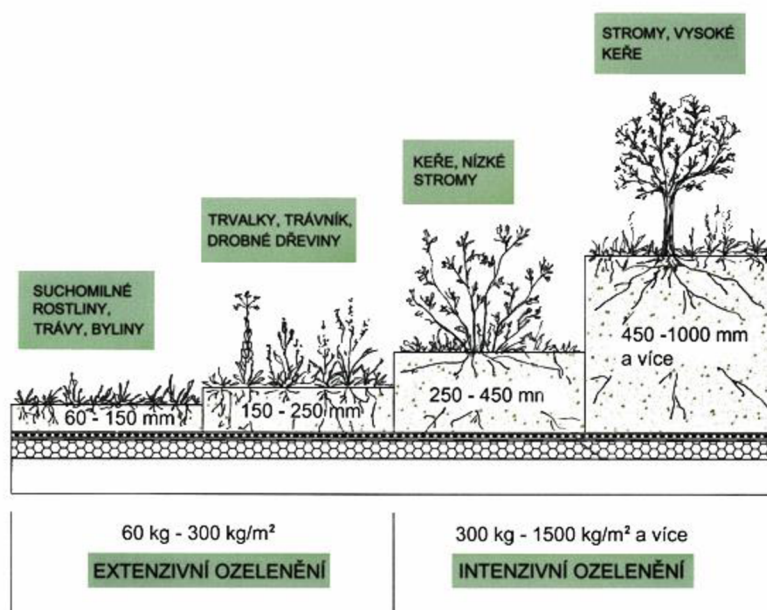
Větší členitost vertikálních povrchů ve městech (různě vysoké budovy) snižuje rychlost proudění větru, čímž dochází ke zpomalování postupu frontálních systémů. V důsledku nepřirozených procesů nad urbanizovanými oblastmi narůstá počet kondenzačních jader a následné vypadávání srážek, k čemuž přispívá i znečišťování atmosféry. Vznikají srážkové anomálie, spočívající ve vzniku izolovaných srážkových extrémů (např. v létě častější bouřky a krupobití). Ačkoli některé z dopadů UHI mohou být i pozitivní, např. prodloužení vegetačního období rostlin ve městech, pro obyvatelstvo v konečném důsledku může být jeho vliv negativní, spočívající ve zhoršeném životním prostředí a následném prohloubení zdravotních problémů obyvatel. Teplejší dny i noci v horkém letním období spolu s vyšší úrovní znečištění ovzduší (zvýšené emise znečišťujících látek) mohou přispět k respiračním potížím, přehřátí a celkovému vyčerpání organismu. Ohřátá dlažba a střešní plochy předávají teplo srážkové vodě, která odtéká do kanalizace a ohřívá vodu rybníků a jezer. Výsledkem je zhoršení kvality vody a negativní vliv na vodní organismy.

Existuje řada opatření, jak snižovat např. letní tepelné zisky absorbované budovami, chodníky, silnicemi. Podle řady vědeckých studií by systematická výměna tmavých povrchů za bílé mohla snížit maximální teplotu ve městech až o 2 až 3 °C. Náklady a provoz bílých (tzv. „chladných střech“) se sice jeví z hlediska ekonomického efektivnější např. v porovnání s vegetačními střechami, avšak naproti tomu některé vědecké studie dokazují, že bílé povrchy mohou mít i negativní dopad na životní prostředí a globální oteplování planety. Mohou snižovat vertikální transport vlhkosti do atmosféry, což má za následek větší sucho a méně deště. Např. studie

provedená na Stanfordské univerzitě ukázala, že bílé střechy mohou teplotu Země i zvýšit a teplo směřující nahoru může po smísení se znečišťujícími částicemi ke globálnímu oteplování spíše přispívat¹. Bylo také prokázáno, že „chladné střechy“ jsou užitečné spíše v jižním podnebí. V severních oblastech, kde bývá častěji chladno, mohou bílé střechy zvýšit průměrné vytápění prostoru více, než v letním období sníží náklady na klimatizaci. Tzv. „chladné střechy“ zdaleka nemohou nahradit pozitivní působení vegetace především z hlediska ekologického a estetického. Střechy porostlé vegetací mimo to, že mají bezesporu příznivý vliv na psychiku člověka, dovedou zadržet dešťovou vodu, přirozeným způsobem pomáhají ochlazovat budovu i vzduch, podílejí se na čištění ovzduší od prachu a průmyslových exhalací. Jejich významným přínosem pro obyvatele měst je i možnost mít zeleň všude tam, kde žijí a pracují. Vegetační střechy poskytují náhradní útočiště pro ptáky, hmyz a jiné živočichy, čímž přispívají k ochraně biodiverzity (druhové rozmanitosti). Ve své disertační práci jsem se zaměřila především na jeden typ vegetačních střech, a to intenzivní vegetační střechy. V odborné literatuře bývají též označovány jako „střešní zahrady“.

2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Vegetační střechy s intenzivním ozeleněním (též střešní zahrady) se vyznačují větší tloušťkou substrátu (450-1000 mm) a mají oproti střechám s extenzivním ozeleněním tu výhodu, že umožňují nejen pěstování okrasných keřů a stromů, ale také zemědělských plodin a bylin, podobně jako je tomu v zahradách na terénu.



Obr. 2.1 - Typy ozelenění střech dle tloušťky substrátu

¹ SAMIR, Ibrahim. White Roofs Not Always Green: White roofing systems have been the system of choice because it was believed that they reduce global warming. <https://metropolismag.com> [online]. 2013 [cit. 2021-11-08]. Dostupné z: <https://metropolismag.com/programs/white-roofs-not-always-green/>

Rozdělení ozelenění dle tloušťky substrátu (*obr.2.1*) není jednotné, podle různých pramenů se může lišit. Střešní zahrady mohou být řešením pro přelidněná velkoměsta, kde často chybí dostupné zahrádkářské plochy, zatímco plochy střech často disponují nevyužitým prostorem. Výhodou je i umístění zahrad na stejném místě jako objekty pro bydlení. V posledních desetiletích nabývá na významu pěstování zemědělských plodin na střeších budov, vznikají tzv. *městské střešní farmy* (angl. *Urban rooftop farming*) – viz *obr.2.2*, *obr.2.3*, z nichž některé jsou schopné vyprodukovat desítky tun zemědělských produktů ročně.



Obr. 2.2 - Střešní farma na střeše kancelářské budovy o rozloze 1000 m² v nizozemském Rotterdamu. Pěstuje se zde zelenina, ovoce, květiny a chovají včely.²



Obr. 2.3 - Střešní zahrada o ploše 600 m² s 90 tunami půdy (Kodaň, Dánsko) na pětipodlažní budově nad aukcí starých automobilů³

3 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE A METODY ZPRACOVÁNÍ

3.1 Cíle disertační práce

Hlavním cílem mé disertační práce bylo získání podrobnějších informací o fyzikálních dějích ve vrstvách intenzivní vegetační střechy s větší tloušťkou substrátu (střešní zahrady), poskytnutí získaných poznatků pro další výzkum a následně uplatnění výsledků v praxi. Získané výsledky měření mohou přispět k přesnějšímu a efektivnějšímu návrhu skladby intenzivních vegetačních střech s využitím fyzikálních vlastností vegetačního souvrství a především k vývoji výpočetního software, který bude uvažovat s vlivem vegetačního souvrství střešních zahrad do výpočtu.

Předmětem mého zájmu, jak jsem již uvedla, byla problematika střešních zahrad. Ve světě jsou tyto zahrady značně rozšířené a řada z nich slouží jako náhradní prostor pro pěstování zemědělských produktů, především čerstvé zeleniny. Je známo, že hustý porost rostlin na vegetační střeše, pokud vytváří vzduchově uzavřenou vrstvu, působí částečně jako tepelně izolační vrstva. Čím je porost hustší a tlustší, tím je účinek větší. Část dlouhovlnného záření je

²Dakaker. *Www.Dakaker.nl* [online]. Rotterdam, 2019 [cit. 2021-7-26]. Dostupné z: <https://dakaker.nl/site/2019/02/05/rotterdamse-dakendagen-31-mei-t-m-2-juni-2019/?lang=e>

³ØsterGro. *Www.kobenhavnergron.dk* [online]. 2019 [cit. 2021-7-26]. Dostupné z: <https://www.kobenhavnergron.dk/place/ostergro/?lang=en>

listím odrážena a část pohlcována, což má vliv na snižování tepelných ztrát budovy vyzařováním. Hustý rostlinný porost chrání povrch substrátu před větrem a omezuje tak tepelné ztráty v důsledku konvekce z vnitřních prostor směrem ven, zvláště u starších budov bez tepelné ochrany. Přes všechny tyto vlastnosti vegetace je mnohem významnější efekt, který rostliny poskytují v horkých letních dnech. Jedním z cílů mé disertační práce bylo získání informací o ochlazovacím efektu vegetace na střeše objektu, jsou-li rostlinami na střeše zemědělské plodiny (rajčata, mrkev, okurky apod.).

Shrnutí cílů mé disertační práce:

- analýza fyzikálních dějů (teplotních, vlhkostních) ve vrstvách intenzivní vegetační střechy na základě naměřených údajů
- získání přesnějších informací o vlastnostech a chování zeminy (půdy) na střeše budovy
- ověření vlivu vegetační vrstvy na tepelný režim vegetačního souvrství
- porovnání experimentálních dat s vypočtenými hodnotami dle programu Area 2017 a Simulace 2018 od Svoboda Software.

3.2 Metody zvolené k realizaci cílů

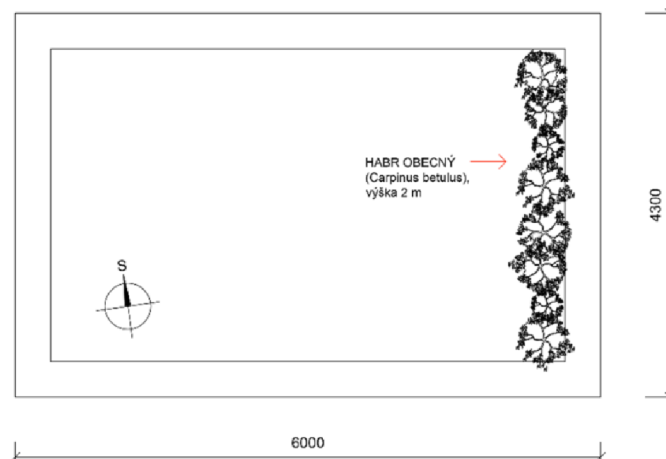
Metodiky vedoucí ke zvoleným cílům představují kombinace různých metod jak teoretických tak i empirických. Z empirických metod jsem zvolila metodu měření a metodu observační (metodu vědeckého pozorování). Metoda observační spočívá ve sběru informací, založených na systematickém a organizovaném sledování aspektů, které jsou předmětem zkoumání. V závěru pozorování je analýza pozorovaných údajů.

Při dalším zpracování tématu jsem použila obecně teoretické metody: analýza, syntéza, dedukce, srovnávání, počítačové zpracování dat.

Vybrané metody jsem zvolila, abych získala přesnější informace o chování střešní zahrady na objektu. Naměřená data lze využít k počítačovým simulacím různých stavů, které mohou porovnávat se skutečným chováním vegetační střechy na budově. Měření bylo prováděno na objektu zahradního domku realizovaného dle mého vlastního návrhu.

3.3 Popis lokality a objektu měření

Objekt zahradního domku se nachází v lokalitě Brno-Tuřany, nadmořská výška 229 m, zeměpisné souřadnice 49°8'N,16°39'E. Zahradní domek o rozměrech 4,3 x 6,0 m je nezateplený, v zimním období nevytápěný. Zdivo je navrženo z betonových tvárnic, stropní konstrukce je tvořena předpjatými stropními panely Spiroll. Střešní zahrada na objektu zahradního domku byla navržena s úmyslem nahradit zastavěnou část zahrady funkční plochou na objektu tak, aby umožňovala nejen pěstování zemědělských plodin (rajčata, okurky, papriky apod.), bylin a okrasných keřů ale také snadné kypření, obdělávání a hnojení půdy, příp. umístování opor (tyčí) k rajčatům obdobně jako na terénu. Z tohoto důvodu byla navržena větší tloušťka substrátu – 60 cm. Ideální hloubka pro pěstování zeleniny na terénu je dána především hloubkou ornice, která se pohybuje obvykle od 30 do 60 cm. Kořenový systém zemědělských plodin tak může dosahovat hloubky přibližně 30 až 40 cm.



Obr. 3.1 - Schéma vegetační střechy

Substrát na objektu zahradního domku je tvořen ornici, nacházející se původně pod objektem. Jedná se o středně těžkou hlinitou až písčitohlinitou půdu. Podrobnější půdní rozbor nebyl proveden. Pod vrstvou substrátu byla navržena vrstva říčního písku (frakce 1- 4 mm) o tl. 100 mm za účelem zlepšení odtoku přebytečné vody z profilu. Část říčního písku byla přimísena i do spodních vrstev substrátu z důvodu lepší propustnosti. Propustnost substrátu nesmí být příliš nízká, aby nedocházelo k poškození kořenového systému rostlin uhníváním, ani příliš vysoká, aby byl zajištěn dostatek vlhkosti pro růst rostlin.

Aby nedocházelo k nadměrnému odvodnění substrátu, je pod vrstvou písku je umístěna hydroakumulační vrstva, tvořená nopovou folií z vysokohustotního polyethylenu (HDPE), opatřená nopy o výšce 20 mm s nakaširovanou filtrační textilií. Kromě akumulace vody má folie drenážní schopnost, tj. po naplnění nopů odvádí přebytečnou vodu do vrstvy kačírku frakce 16/32 mm. Nad vrstvou písku je umístěn zavlažovací systém, který měl sloužit k zavlažování profilu v období sucha, ale zatím nebyl použit. Využití zavlažovacího systému by mohlo být předmětem dalšího výzkumu. Rostliny byly zalévány klasickým způsobem jako na terénu.



Obr. 3.2 - Vegetační zahrada na střeše zahradního domku osázená zemědělskými plodinami-rajčata, mrkev, paprika (r.2014)



Obr. 3.3 - Úroda rajčat na střeše zahradního domku

Pro získání měřených hodnot jsem zvolila metodu TDR (Time Domain Reflectometry). Metoda patří v současné době mezi nejmodernější a velmi přesné metody určování vlhkosti v zemině. Pro běžné použití nevyžaduje kalibraci a poskytuje poměrně přesné okamžité výsledky. TDR je nedestruktivní metoda, umožňující analýzu vlastností média. Patří mezi metody nepřímé, měřenou veličinou jsou dielektrické vlastnosti půdy (relativní permitivita, elektrická vodivost), které jsou závislé na půdní vlhkosti.

K měření bylo použito měřicí zařízení od německého výrobce Imko, GmbH. Sestavu tvoří tři senzory TRIME-PICO32 (*obr.3.4*) pro kontinuální nedestruktivní měření objemové vlhkosti a teploty půdy a datalogger GlobeLog (IMKO GmbH) – (*obr.3.5*). K dosažení co největší přesnosti měření byly vybrány senzory TRIME-PICO32 s nejmenším možným objemem o rozměrech 155 x Ø 32 mm a s vysokou prostorovou rozlišovací schopností, které byly umístěny horizontálně v různých hloubkách. Senzory umožňují měření 3 parametrů: obsah vody, teplotu a elektrickou vodivost včetně salinity (zasolení).

Elektrická vodivost (EC) představuje množství elektrického proudu, které je schopna voda vést a rovná se přibližně salinitě. Jednotkami EC je mS/cm (milisimens na centimetr). Salinita má značný vliv na fyzikálně-chemické a biologické vlastnosti půd a ovlivňuje jejich úrodnost.



Obr. 3.4- Senzory TRIME-PICO32



Obr. 3.5 - Datalogger GlobeLog (IMKO GmbH)

Měřicí zařízení představuje sonda, která je složena ze dvou kovových tyčí. Tyče jsou spojeny koaxiálním kabelem s generátorem pulsů, který vysílá přesně definované napěťové pulsy do snímače. Měří se rychlost postupu elektromagnetického pulzu podél vodiče, který je uložen v půdě. Z rychlosti postupové vlny je zjištěna permitivita (dříve dielektrická konstanta), ze které je stanovena průměrná objemová vlhkost mezi tyčemi.

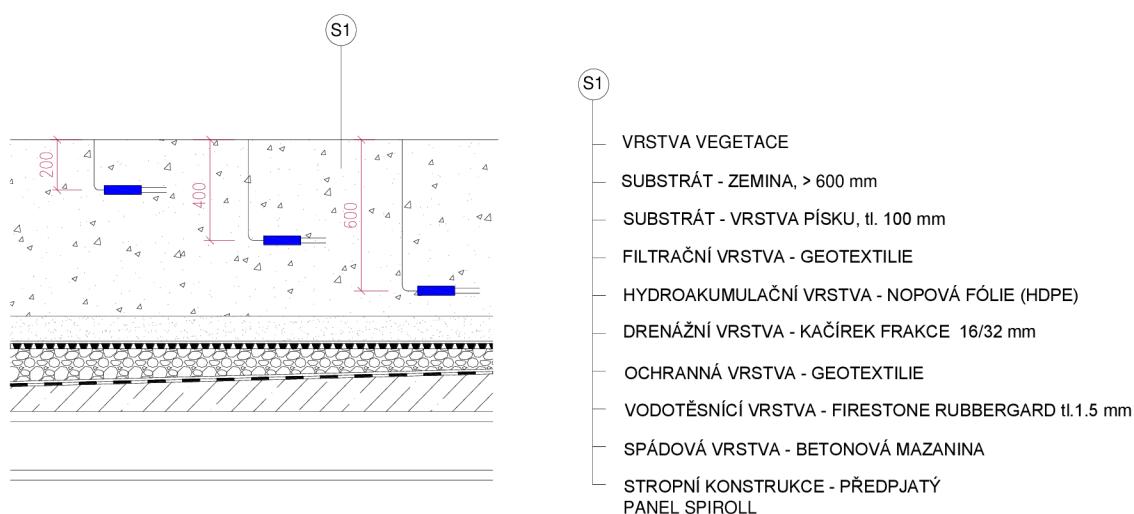
Dosažené výsledky měření tvoří tři okruhy (části):

1. měření v substrátu (půdě) intenzivní vegetační střechy
2. měření uvnitř objektu zahradního domku
3. měření uvnitř a nad porostem rostlin na vegetační střeše

4 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

4.1 Výsledky měření – 1. část

K měření byly použity tři senzory TRIME-PICO32, umístěné v substrátu střešní zahrady ve směru horizontálním ve třech různých hloubkových úrovních – 20, 40 a 60 mm (*obr.4.1*).



Obr. 4.1 - Umístění senzorů TRIME-PICO32 ve skladbě střešní zahrady

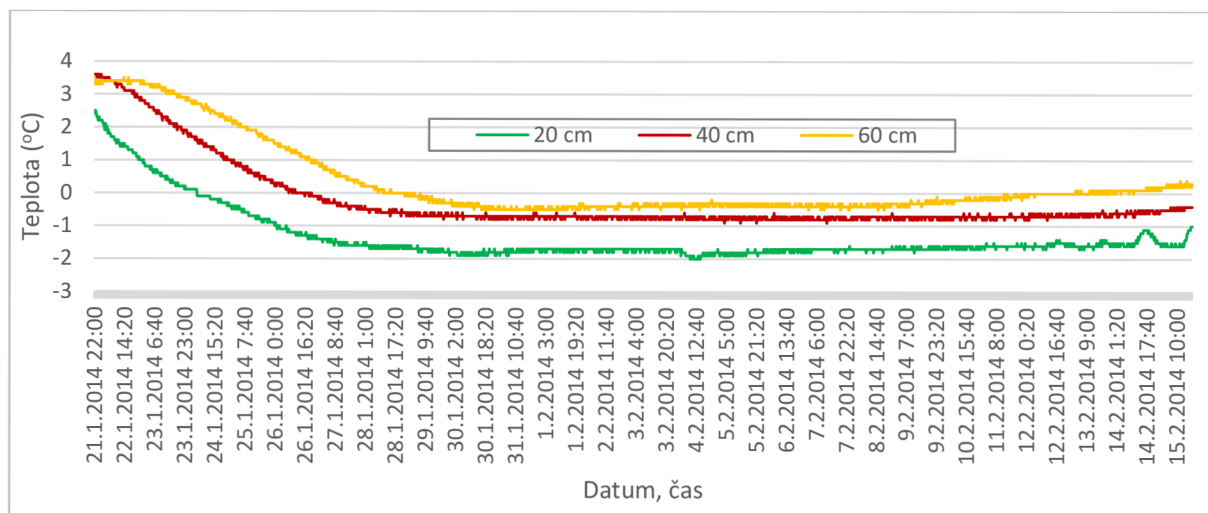
Měření probíhalo kontinuálně v intervalu po 20 minutách. Senzory měřily v substrátu vegetační střechy v jednotlivých hloubkových úrovních 20, 40 a 60 cm teplotu a objemovou vlhkost (v %). Nad senzory byly na různých místech vysázeny sezónní zemědělské plodiny a byliny. Přes některé technické problémy se podařilo získat kontinuální data ze čtyř po sobě následujících ročních období.

Ve zkrácené verzi uvedu pouze vybraná měření v letním a zimním období, kdy byly naměřeny teplotní extrémy.

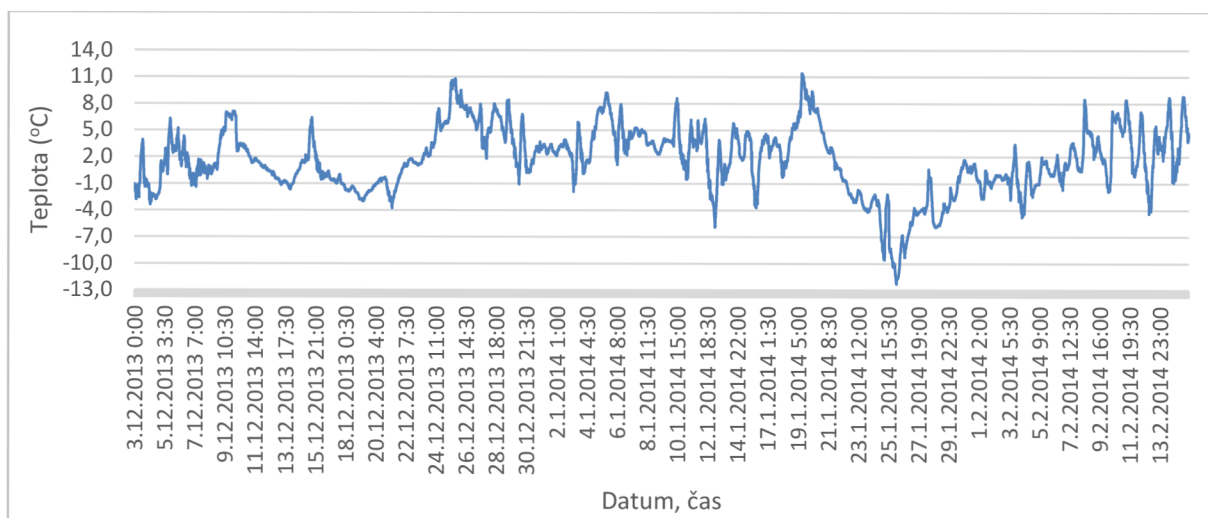
4.1.1 Výsledky měření - zimní období

- *zimní období (2013-14)*

Na následujících grafech jsou průběhy teplot a naměřená objemová vlhkost v jednotlivých hloubkových úrovních 20, 40 a 60 cm v substrátu střešní zahrady v zimním období (*obr.4.2*), kdy teploty dosahovaly nejnižších hodnot.



Obr. 4.2 - Průběh teplot v substrátu intenzivní vegetační střechy v hloubkách 20,40,60 cm v zimním období od 21.1. do 15.2.2014

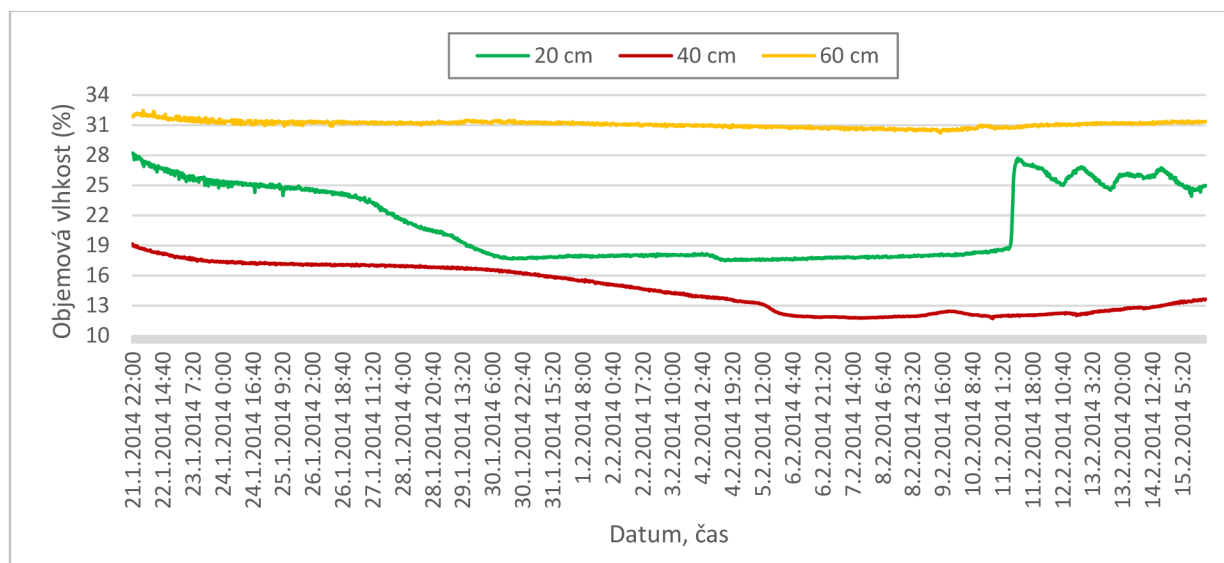


Obr. 4.3 – Průběh teplot venkovního vzduchu (zdroj: archivní data ČHMÚ z meteostanice (B2BTUR01) Brno-Tuřany)

Ve sledovaném období (3.12.-15.2.2014) se teploty vzduchu pohybovaly nejnižše koncem ledna (*obr.4.3*). Nejnižší teplota vzduchu (-12,3 °C) byla naměřena dne 26. ledna 2014. Nejnižší naměřené teploty v substrátu střešní zahrady během sledovaného období jsou uvedeny v tabulce (*tab.4.1*) na str.14.

Nejnižší teplota (-2°C) v substrátu vegetační střechy byla naměřena 4.2.2014 v hloubce 20 cm. Oproti teplotě venkovního vzduchu se extrém v hloubce 20 cm projevil přibližně za 8 dní, v hloubce 40 cm přibližně za 9 dní. V hloubce 60 cm se minimální teploty projeví se zpožděním 4 dnů, teplota se zde pohybovala okolo hodnoty $-0,5^{\circ}\text{C}$. Rychlejší nástup minimální teploty v této hloubce oproti ostatním hloubkovým úrovním pravděpodobně souvisí s faktem, že objekt zahradního domku je nevytápěný a nezateplený.

Na obr. 4.4 jsou naměřené hodnoty objemové vlhkosti v období, kdy teploty v zemině dosahovaly extrémních hodnot. Na grafu pozorujeme úbytek vlhkosti v době, kdy se teploty v substrátu pohybovaly pod nulou. Největší úbytek vlhkosti byl zaznamenán v hloubce 20 cm. Důvodem úbytku je pravděpodobně zamrznutí vody v substrátu.



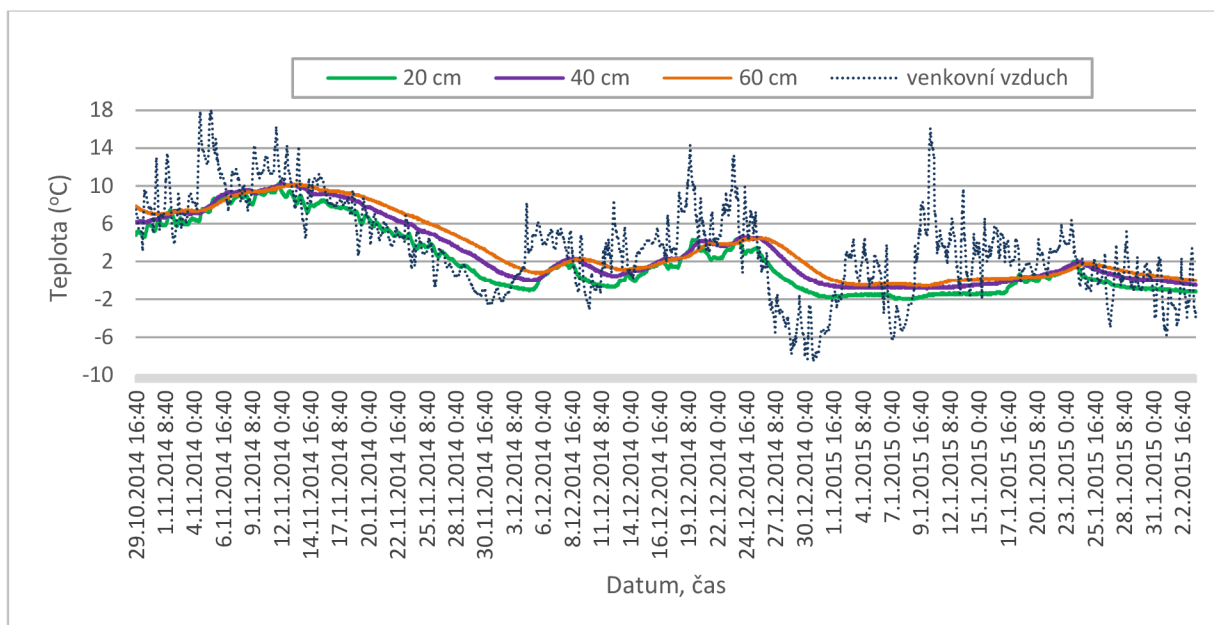
Obr. 4.4 - Objemová vlhkost (v %) v substrátu intenzivní vegetační střechy v hloubkách 20, 40 a 60 cm v zimním období od 21.1. do 15.2.2014

Další vybrané naměřené hodnoty byly získány v zimním období 2014/2015.

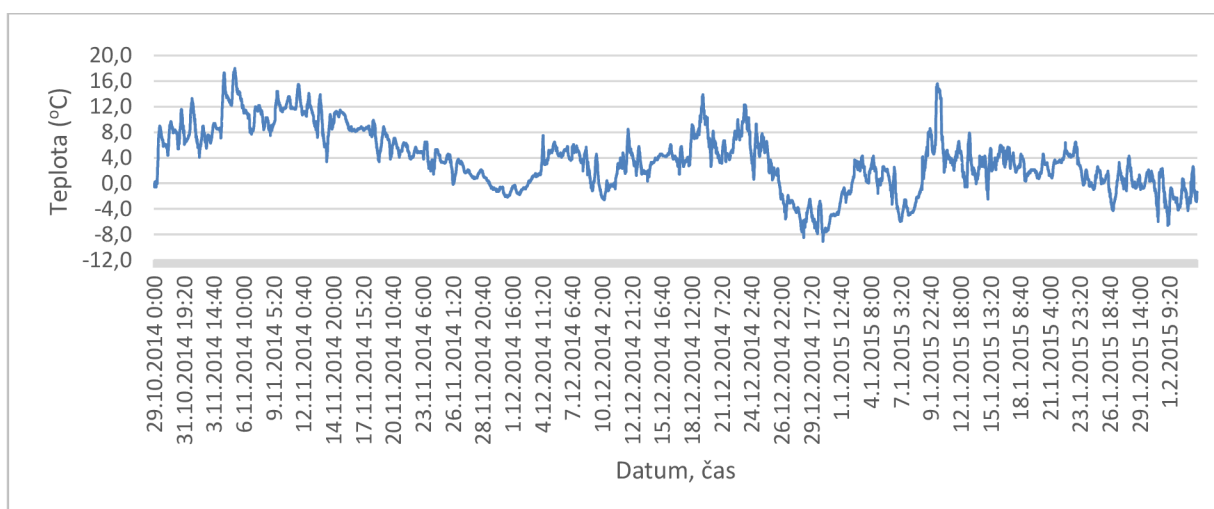
- **zimní období (2014-15)**

Měření v zimním období probíhalo od října do února 2014-2015. Od září 2014 byl vedle objektu zahradního domku umístěn datalogger s meteostanicí (Em50 Logger, Decagon) s možností připojení pěti portů. Pro záznam dat byl použit software ECH2O. Meteostanice byla umístěna ve výšce 4,5 m nad terénem.

Na obr.4.5 je průběh teplot v substrátu v porovnání s teplotami vzduchu, které byly naměřeny meteostanicí Em50. Ve sledovaném období se teploty pohybovaly nejnižší v měsíci prosinci. Meteostanice umístěná vedle objektu zahradního domku naměřila nejnižší teplotu $-8,6^{\circ}\text{C}$ dne 30. prosince 2014. Pro srovnání uvádím i data z ČHMÚ, meteostanice Brno-Tuřany. Nejnižší naměřená teplota meteostanicí dne 30. prosince 2014 byla $-9,1^{\circ}\text{C}$ (obr. 4.6). Nejnižší naměřené teploty v substrátu jsou uvedeny v tab.4.1, str.14.

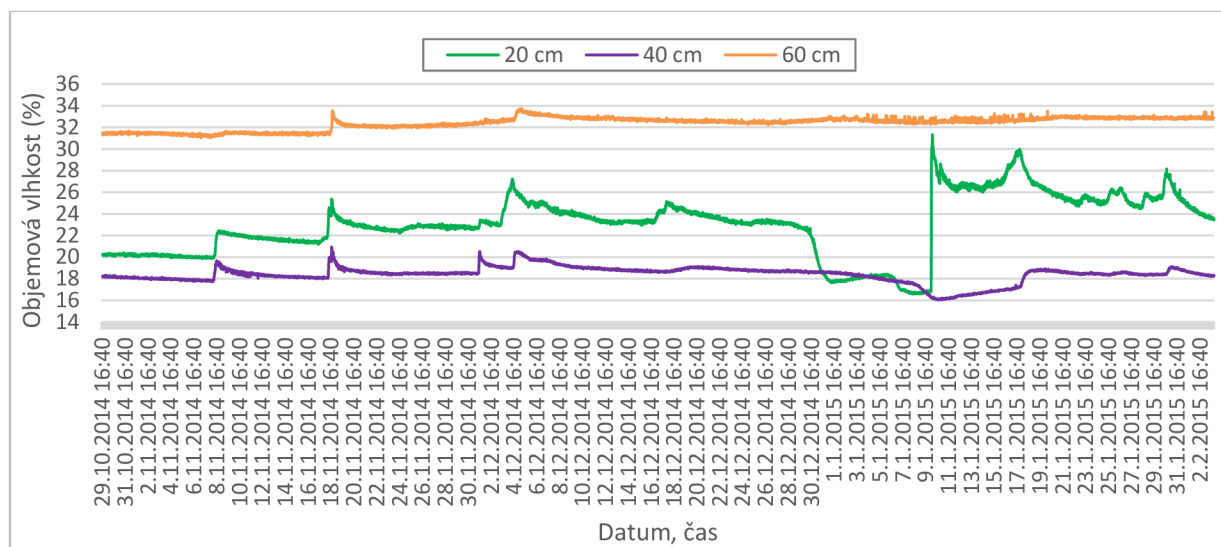


Obr. 4.5 - Průběh teplot v substrátu intenzivní vegetační střechy v hloubkách 20, 40 a 60 cm v období od 29.10.2014 do 3.2.2015 v porovnání s průběhem teplot venkovního vzduchu



Obr. 4.6 – Průběh teplot venkovního vzduchu v období od 29.10 do 3.2.2015 (zdroj: archivní data ČHMÚ z meteorostanice (B2BTUR01) Brno-Tuřany)

Na obr.4.7 jsou zobrazeny hodnoty objemové vlhkosti v substrátu střešní zahrady v období od 29.10.2014 do 3.2.2015. Největší hodnoty objemové vlhkosti (v %) byly naměřeny v hloubce 60 cm. Procento objemové vlhkosti se zde pohybovalo mezi 31- 34%. V této hloubkové úrovni se jedná pravděpodobně o maximální možné nasycení substrátu vodou vzhledem k umístění hydroakumulační vrstvy, která zabraňuje odtoku vody. Na grafu vidíme prudký pokles vlhkosti vlivem zamrznutí zeminy a následný nárůst vlhkosti ve svrchnějších vrstvách substrátu v důsledku oteplení, kdy teplota vystoupala až na 15,7 °C. Podobný pokles a nárůst objemové vlhkosti byl zaznamenán i v lednu 2014.



Obr. 4.7 - Naměřené hodnoty objemové vlhkosti (%) v substrátu intenzivní vegetační střechy v zimním období od 29.10. 2014 do 3.2.2015

Z obr.4.5 je patrné, že v zimním období má denní průběh teplot v substrátu výrazně menší denní teplotní výkyvy než v letním období. Oteplováním a narůstáním počtu dní s teplotami nad bodem mrazu se teplotní křivka postupně mění v periodickou s výraznější amplitudou v závislosti na jednotlivých hloubkových úrovních.

Na naměřené hodnoty objemové vlhkosti v profilu v zimním období má vliv především zamrznání a rozmrznání vody v substrátu, případně tání napadaného sněhu. Úbytek vlhkosti na grafech pravděpodobně souvisí s hodnotou permitivity vody, která je mnohem vyšší (80-81)⁴ než permitivita ledu (4,8)⁵. Výraznější úbytek vlhkosti byl zaznamenán ve svrchnějších hloubkových úrovních, v hloubce 60 cm byl pokles vlhkosti minimální, můžeme se tedy domnívat, že k zamrznutí vody obsažené v substrátu v této hloubkové úrovni ve sledovaném období již nemuselo dojít.

Během letního období došlo k poškození původních tří senzorů elektrostatickým výbojem blesku. Další měření již probíhalo pouze se dvěma novými senzory, které nahradily původní poškozené.

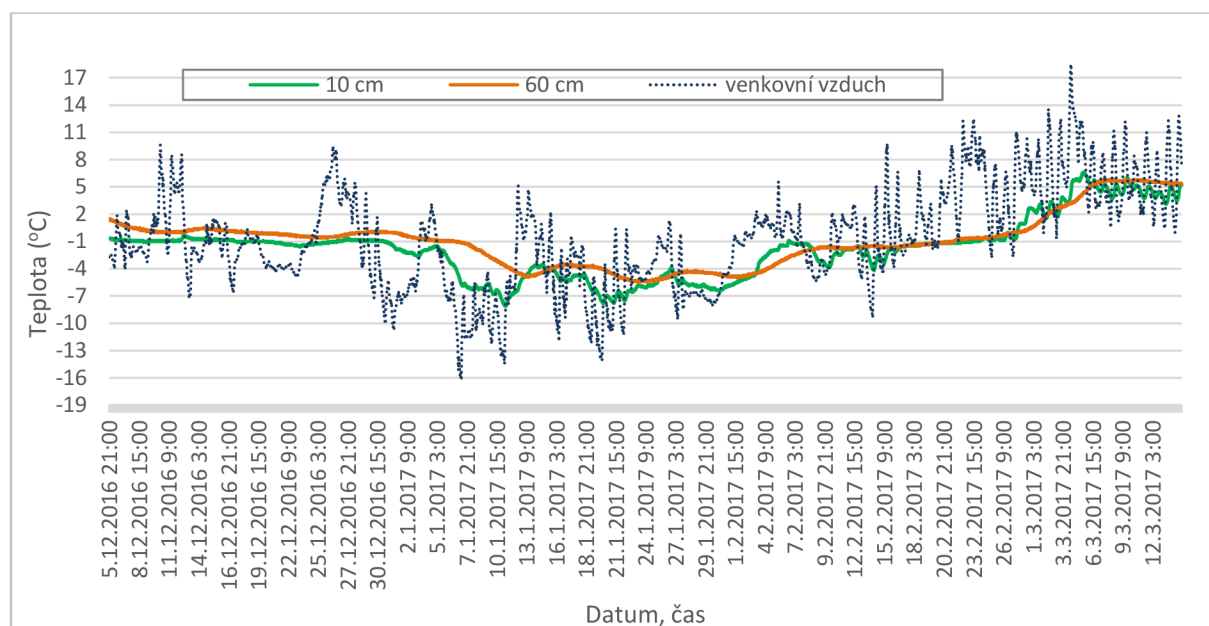
- **zimní období (r. 2016 – 2017)**

Měření probíhalo v období od 5.12.2016 do 14.3.2017 (obr. 4.8). Senzory byly umístěny v substrátu střešní zahrady pod keři habrů v hloubkách 10 a 60 cm. Ve sledovaném období poklesla teplota venkovního vzduchu až na -16,3 °C (naměřeno meteostanicí umístěnou u objektu). Meteostanice (B2BTUR01) Brno-Tuřany zaznamenala teplotu ještě nižší (-17,2 °C).

⁴ Dielektrizitätszahl-Liste. www.vega.com [online]. [cit. 2021-11-20]. Dostupné z: https://www.vega.com/home_pe/-/media/PDF-files/Dielektrizitaetszahl-Liste_DE.ashx

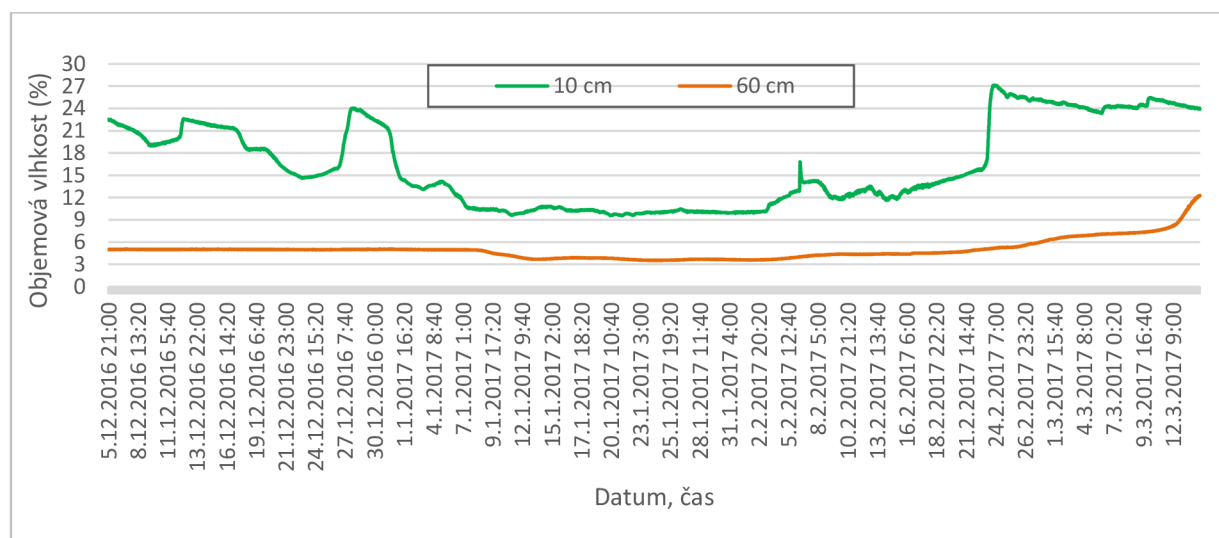
⁵ MIKULČÁK. *Matematické, fyzikální a chemické tabulky pro střední školy: pomocná kniha pro studijní obory středních škol*. Praha: SPN, 1988. Pomocné knihy pro žáky (Státní pedagogické nakladatelství)

V substrátu vegetační střechy byly zaznamenány teploty $-8,1^{\circ}\text{C}$ v 10 cm a $-5,5^{\circ}\text{C}$ v hloubce 60 cm.



Obr. 4.8- Průběh teplot v substrátu v hloubce 10 a 60 cm (5.12.2016 do 14.3.2017) v porovnání s teplotami vzduchu

Pod keři habrů v hloubce 60 cm byla naměřena mnohem nižší objemová vlhkost, než v místech, která byla osázena pouze zemědělskými plodinami. Výrazně nižší objemová vlhkost v této hloubce je pravděpodobně zapříčiněna kořeny habrů, které odčerpávají vodu ze substrátu (obr.4.9). Na obr.4.9 můžeme pozorovat, stejně jako v předešlých měřeních, výraznější pokles vlhkosti ve svrchní vrstvě substrátu v období, kdy teploty poklesly pod bod mrazu a voda v profilu zamrzla. Nejnižší teplota venkovního vzduchu ve sledovaném období byla naměřena 7. ledna 2017. Z obr. 4.8 je patrné, že vliv minimální teploty vzduchu ze dne 7.1.2021 se projevil v substrátu v hloubce 10 cm za 4 dny (11.1.2021).



Obr. 4.9 - Hodnoty objemové vlhkosti v substrátu v hloubce 10 a 60 cm (5.12.2016 - 14.3.2017)

Tab. 4.1 Přehled výsledků za zimní období

Rok	t_{min} (°C)					
	20 cm 1 (34768)	40 cm 2 (34769)	60 cm 3 (34770)	10 cm 1 (39856)	60 cm 2 (39855)	Venkovní vzduch
2013/14	-2	-0,9	-0,5			-12,3*
2014/15	-2	-0,9	-0,6			-9,1 (-8,6*)
2016/17				-8,1	-5,5	-17,2 (-16,6*)

* minimální teplota venkovního vzduchu naměřená ve sledovaném období meteostanicí (EM50) u objektu, teploty venkovního vzduchu bez označení jsou hodnoty naměřené meteorologickou stanicí ČHMÚ, (B2BTUR01) Brno-Tuřany

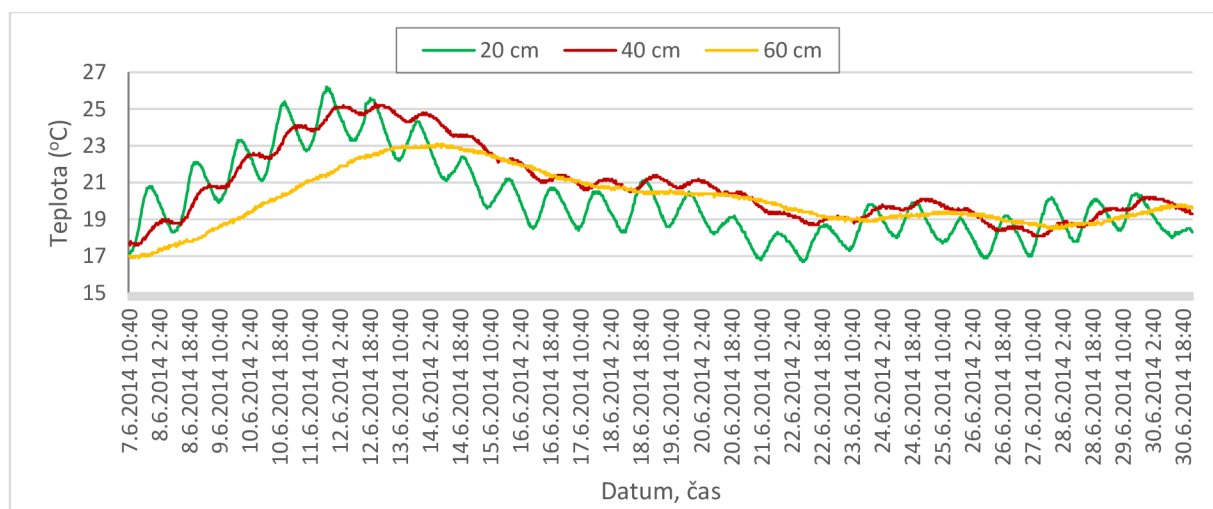
Závěrem můžeme shrnout, že v substrátu střešní zahrady v hloubce 60 cm na nevytápěném objektu zahradního domku byla naměřena teplota přibližně o 8-12 °C vyšší, než byla minimální teplota venkovního vzduchu ve sledovaném období.

4.1.2 Výsledky měření - letní období

Dílní výsledky měření byly získány v letním období v letech 2014-2015.

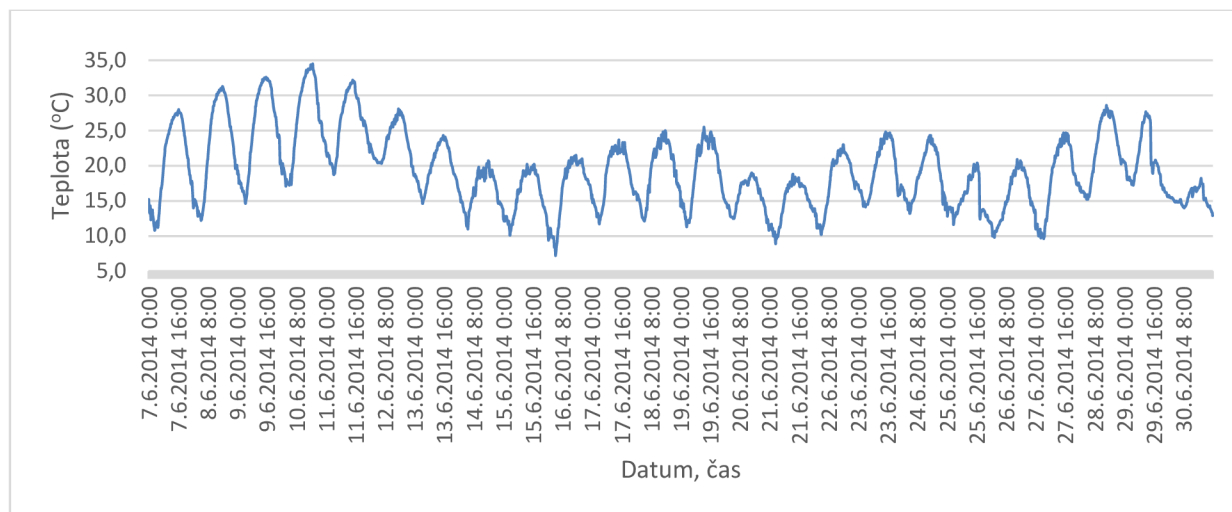
- **letní období (r. 2014)**

Na obr.4.10 a obr.4.12 jsou naměřená data od 7.6. do 30.6.2014. V porovnání se zimním obdobím lze pozorovat v letním období pravidelné střídání denních maxim a minim, výraznější zejména ve svrchních vrstvách substrátu. Teplotní kmity vykazují periodický průběh s jedním denním maximem a jedním denním minimem. Směrem do hloubky substrátu pozorujeme zmenšování denní amplitudy teplotních změn, ale také fázový posun teplotního kmitu. V hloubce 60 cm již nejsou denní minima a maxima pozorovatelná.

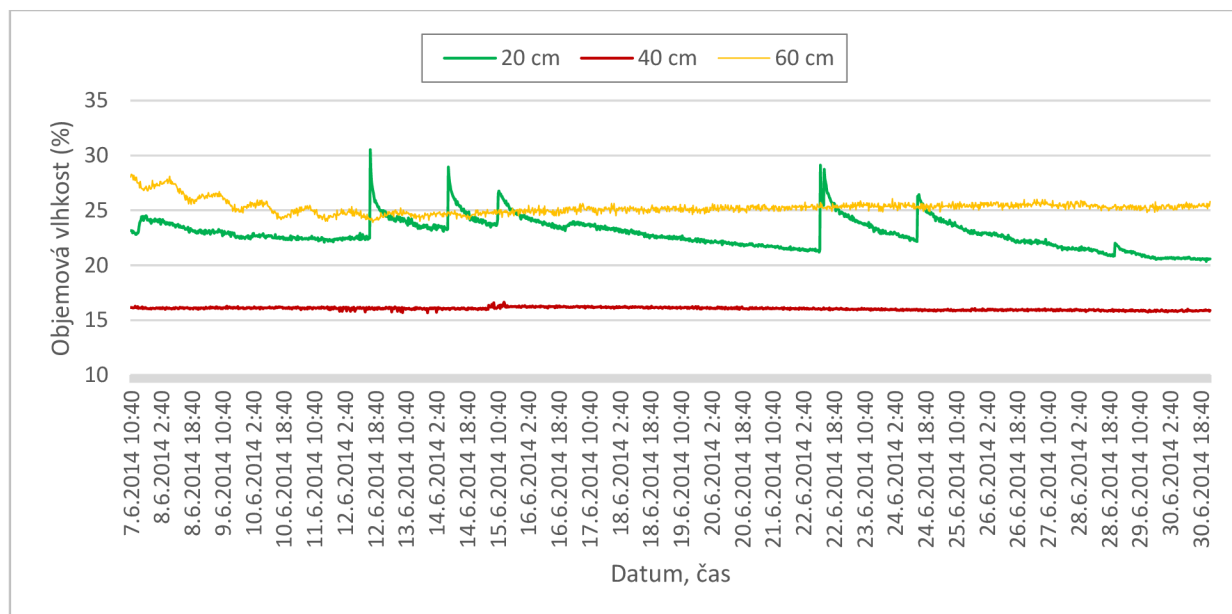


Obr. 4.10 - Průběh teplot v substrátu střešní zahrady v hloubkách 20, 40 a 60 cm (7.6. - 30.6.2014)

Na obr. 4.11 je průběh teplot venkovního vzduchu (data ČHMÚ, meteostanice (B2BTUR01) Brno-Tuřany).



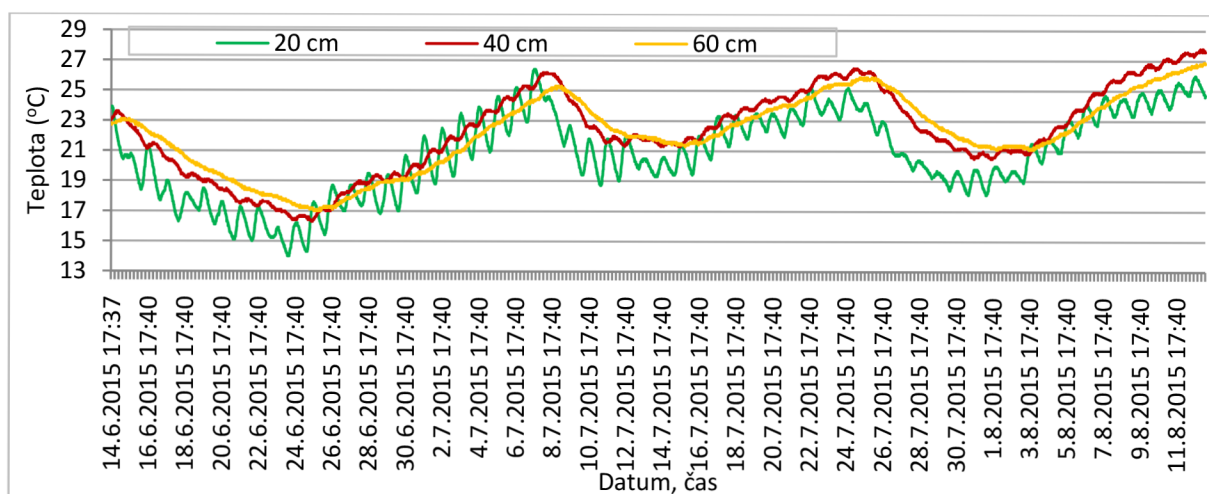
Obr. 4.11- Průběh teplot venkovního vzduchu v období od 7.6.2014 do 30.6.2014 (zdroj: data ČHMÚ, meteostanice (B2BTUR01) Brno-Tuřany)



Obr. 4.12 - Hodnoty objemové vlhkosti v substrátu střešní zahrady v hloubkách 20, 40 a 60 cm (7.6. - 30.6.2014)

- **letní období (r. 2015)**

Měření se třemi senzory v hloubkových úrovních 20, 40 a 60 cm probíhalo pouze do poloviny srpna 2015, tj. do doby, než došlo k poškození všech tří senzorů elektrostatickým výbojem způsobeným úderem blesku v blízkém okolí zahradního domku (obr.4.13, obr.4.14). Nejprve nastaly výpadky měření u senzoru v hloubce 40 cm, zbývající dva senzory ještě měřily do 17. srpna 2015.



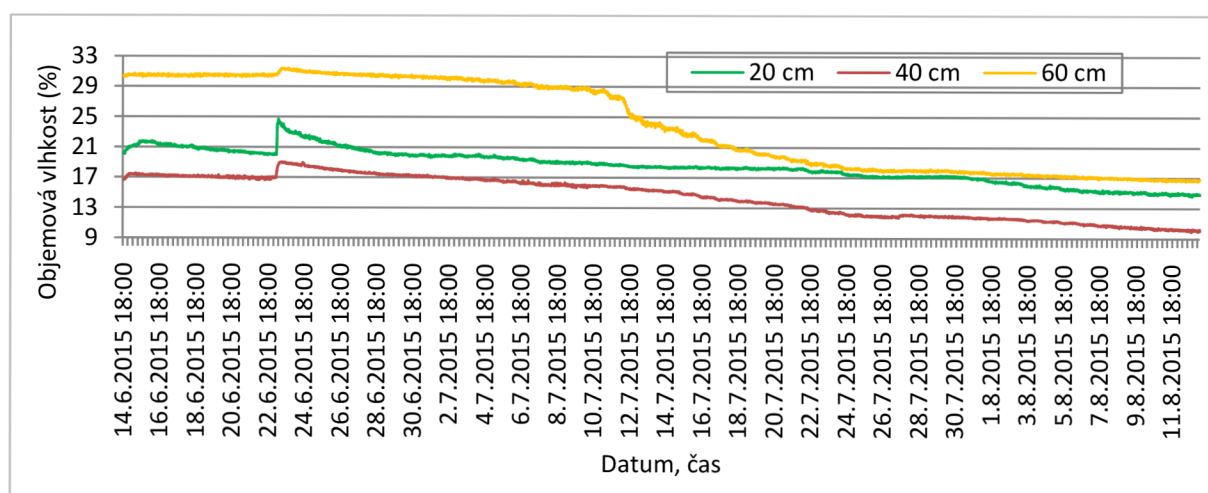
Obr. 4.13 – Průběh teplot v substrátu vegetační střechy v hloubkách 20, 40 a 60 cm (14.6.2015-13.8.2015)

Tab. 4.2 Maximální naměřené teploty v jednotlivých hloubkových úrovních v substrátu vegetační střechy a maximální teploty venkovního vzduchu ve sledovaném období v letech 2014 a 2015

Rok	max. t (°C) v substrátu střešní zahrady			max. t (°C) venkovního vzduchu
	20 cm	40 cm	60 cm	
2014	26,2	25,3	24	34,7 °C *
2015	26,8	27,8	27,6	35,6°C *

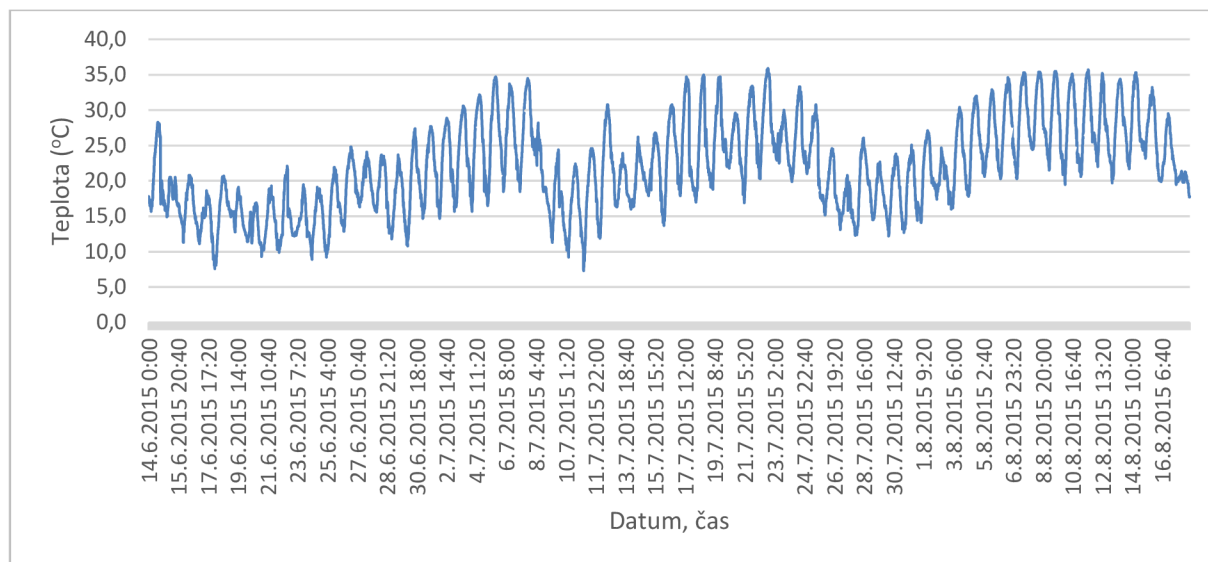
* zdroj: data ČHMÚ, meteostanice (B2BTUR01) Brno-Tuřany

V tab. 4.2 jsou nejvyšší naměřené teploty za sledovaná období v letech 2014 a 2015. Nejvyšší teplota byla naměřena v hloubce 40 cm (r.2015) a dosáhla hodnoty 27,8 °C. Dne 17.8.2015 bylo měření z důvodu poškození všech tří senzorů ukončeno.



Obr. 4.14 – Hodnoty objemové vlhkosti v hloubkách 20, 40 a 60 cm (14.6.2015-13.8.2015)

Na obr.4.15 je průběh teplot venkovního vzduchu. Naměřené hodnoty byly poskytnuty ČHMÚ, (B2BTUR01) Brno-Tuřany. Teploty venkovního vzduchu se ve sledovaném období pohybovaly okolo 35°C.



Obr. 4.15- Průběh teplot venkovního vzduchu v období od 14.6. do 17.8.2015 (zdroj: data ČHMÚ, meteostanice (B2BTUR01) Brno-Tuřany)

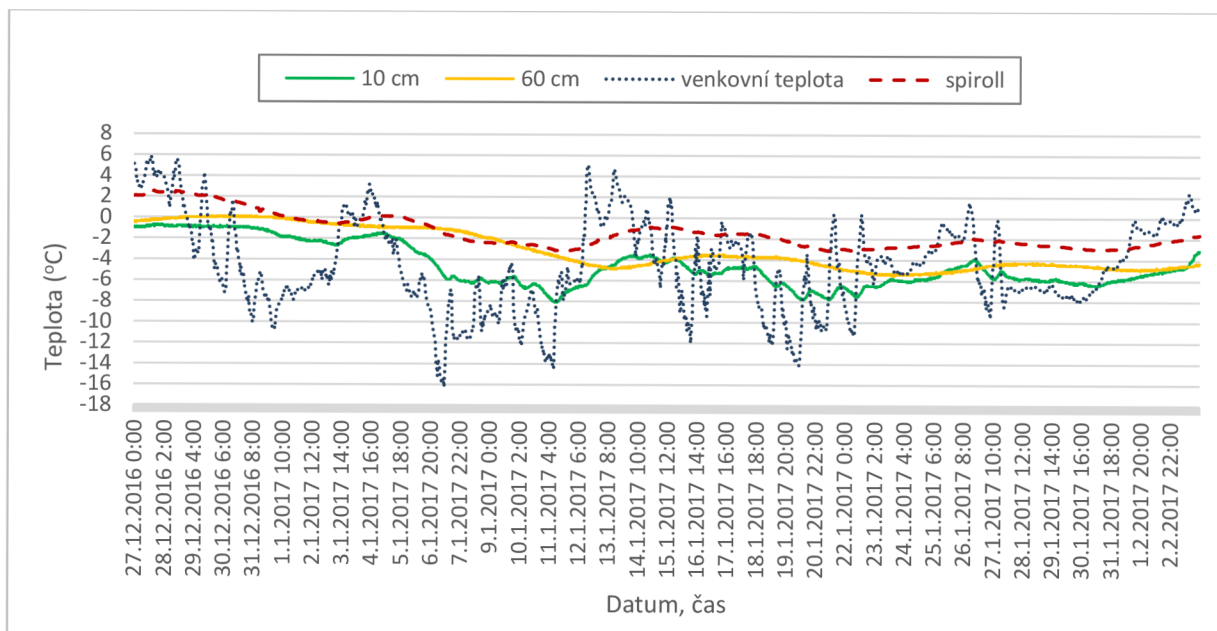
Vzhledem k vysoké citlivosti senzorů a častých bouřek muselo být měření, které v následujících letech pokračovalo se dvěma náhradními senzory, v letním období často přerušováno. Z tohoto důvodu i další naměřená data, získaná v letním období, nejsou zcela kompletní.

4.2 Výsledky měření – 2. část

Druhá část měření byla zaměřena na sledování teploty uvnitř nezatepleného objektu zahradního domku, na kterém bylo prováděno předchozí měření. K měření byla k dispozici meteostanice EM50 s teplotním čidlem, datalogger GlobeLog (IMKO GmbH) a dva senzory TRIME-PICO32. Teplotní čidlo bylo umístěno na strop zahradního domku mezi stropní panely Spiroll. Senzory TRIME-PICO32 byly ve stejné době používány i k měření v substrátu vegetační střechy pod rostlinami.

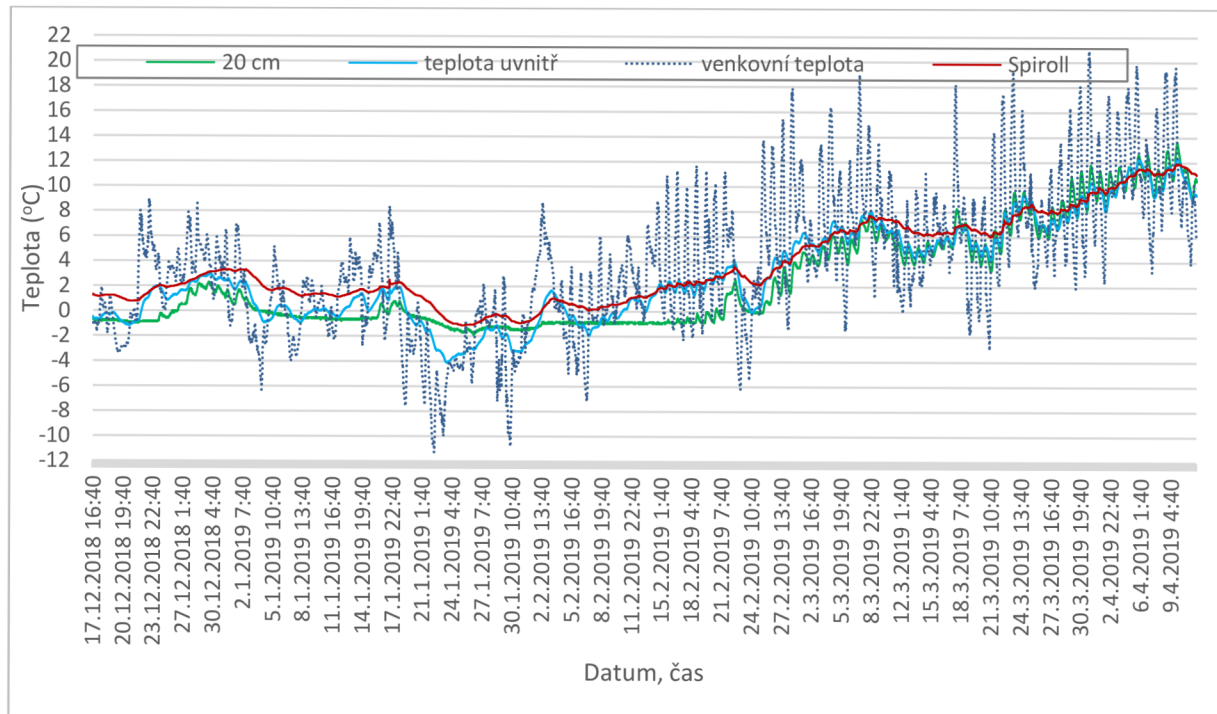
Výsledky měření v zimním období:

Měření probíhalo od 20.11.2016 do 1.5.2017. Na obr. 4.16 je zobrazena vybraná část naměřených teplot na stropní konstrukci zahradního domku, teploty venkovního vzduchu a průběh teplot v hloubkách 10 a 60 cm v substrátu vegetační střechy v období od 27.12.2016 do 3.2.2017. Na stropní konstrukci byla naměřena nejnižší teplota -3,1 °C, zatímco teplota venkovního vzduchu ve sledovaném období poklesla až na -16,3 °C. Teploty venkovního vzduchu a teploty na stropní konstrukci byly naměřeny meteostanicí EM50, umístěné u objektu zahradního domku.

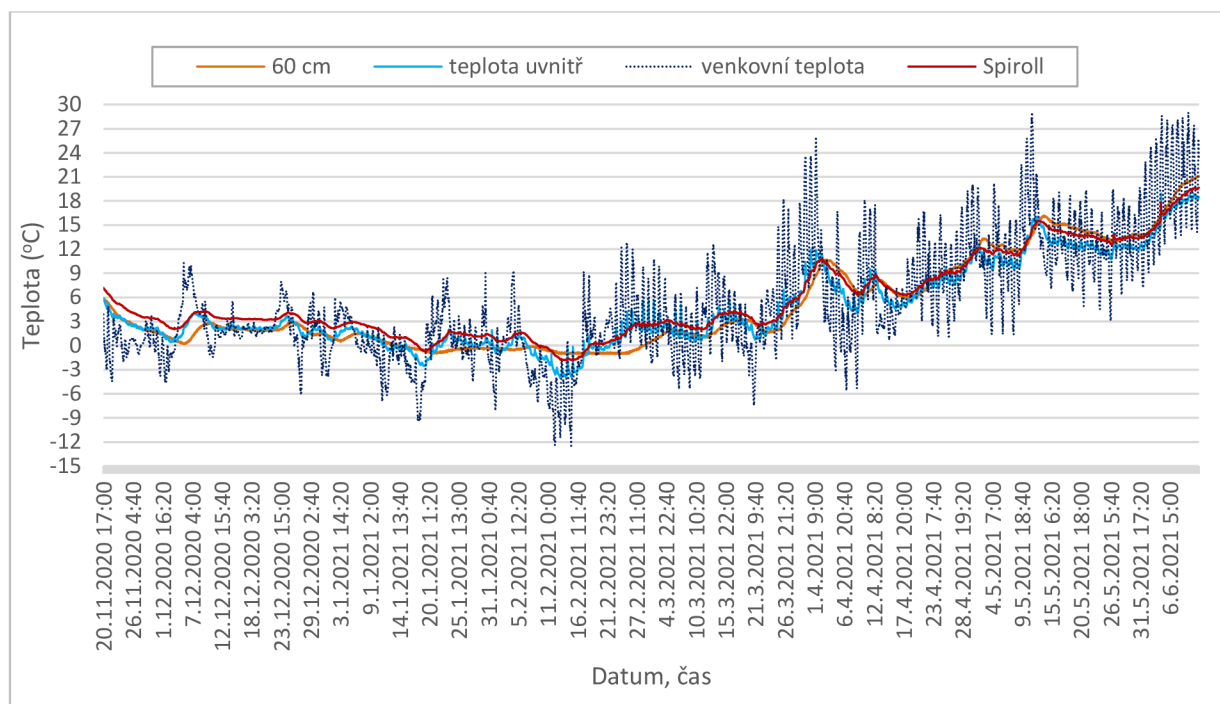


Obr. 4.16 - Průběh teplot v substrátu v hloubce 10, 60 cm ve srovnání s teplotami na stropě uvnitř zahradního domku a teplotami venkovního vzduchu (27.12.2016 do 3.2.2017)

Další měření probíhalo v zimním období v letech 2018/19 a 2019/20. Na obr. 4.17 je zobrazen průběh teplot na stropní konstrukci, uvnitř zahradního domku, v hloubce 20 cm v substrátu vegetační střechy a průběh teplot venkovního vzduchu.



Obr. 4.17- Průběh teplot na stropě (Spiroll) zahradního domku, uvnitř zahradního domku v porovnání s teplotami venkovního vzduchu a průběhem teplot v substrátu vegetační střechy v hloubce 20 cm (17.12.2018-11.4.2019)



Obr. 4.18 - Průběh teplot na stropě (Spiroll) zahradního domku, uvnitř zahradního domku v porovnání s teplotami venkovního vzduchu a průběhem teplot v substrátu vegetační střechy v hloubce 60 cm (20.11.2020-11.6.2021)

Na obr. 4.18 je zobrazen průběh teplot na stropní konstrukci, uvnitř zahradního domku, v hloubce 60 cm v substrátu vegetační střechy a průběh teplot venkovního vzduchu v období od 20.11.2020 do 11.6.2021.

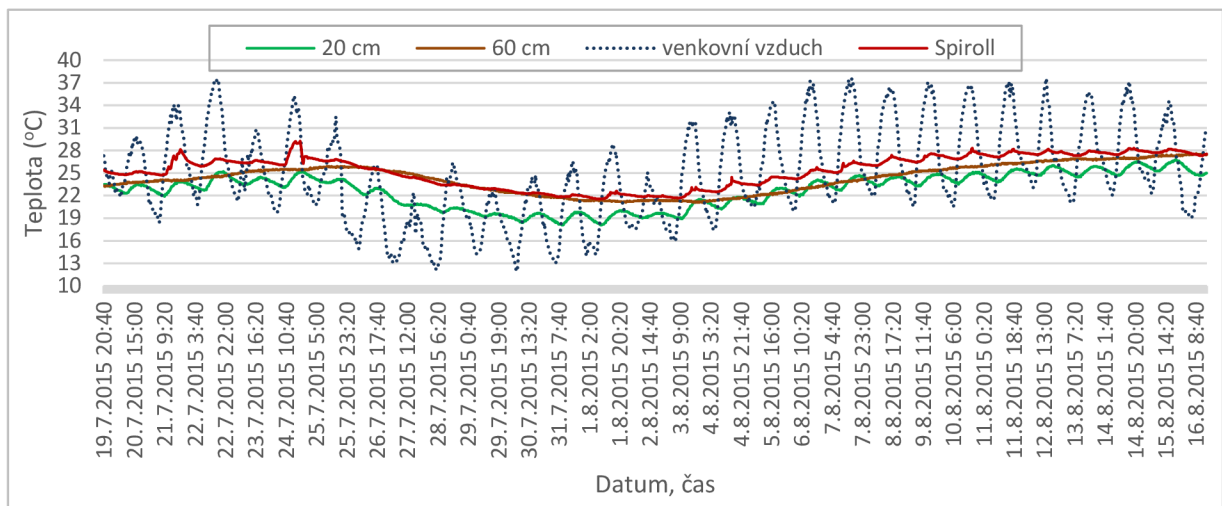
Tab. 4.3 Minimální dosažené teploty v zimním období v letech 2018-2020

r.	Minimální dosažená teplota v zimním období - $t_{\min} (^{\circ}\text{C})$				
	vzduch	substrát, hl. 20 cm	substrát, hl. 60 cm	uvnitř objektu	strop Spiroll
2016-17	-16,3			-7,2	-3,1
2018-19	-11,3	-1,8		-4,11	-1,1
2020-21	-12,5		-1,0	-4,06	-1,8

V tab. 4.3 je uveden přehled nejnižších naměřených teplot. Nejnižší teplota na stropní konstrukci ($-3,1^{\circ}\text{C}$) byla naměřena v letech 2016 – 2017, kdy teplota venkovního vzduchu poklesla až na $-16,3^{\circ}\text{C}$ (hodnota byla naměřena meteorologem Em50 u objektu).

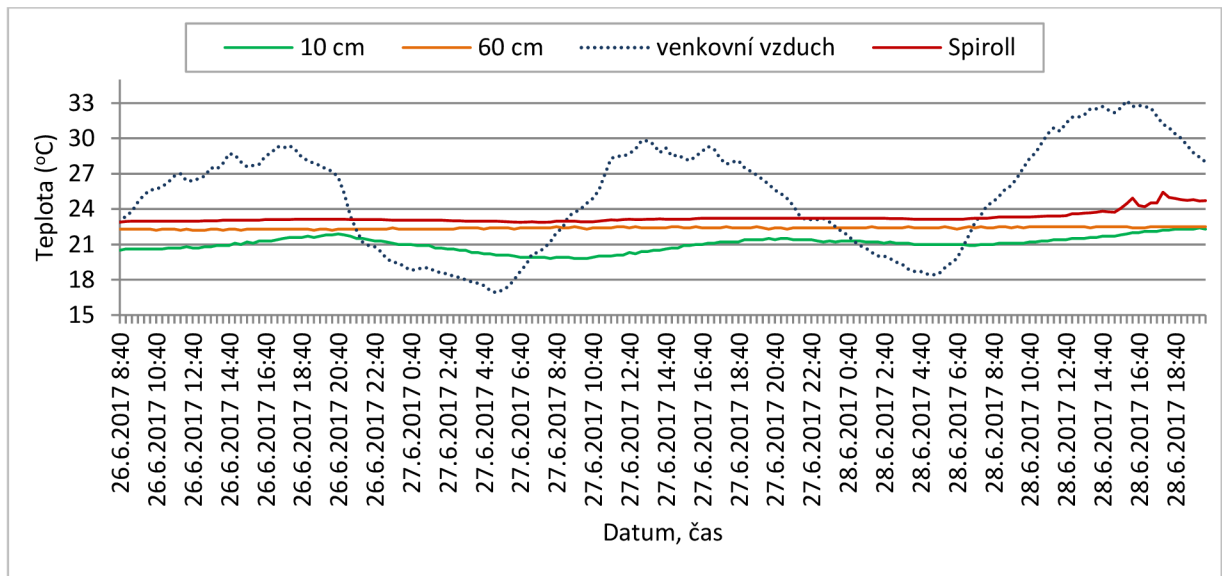
Výsledky měření v letním období:

Na obr. 4.19 jsou data pořízená v r. 2015. V této době došlo k poškození senzorů. Nejprve došlo k výpadku měření u senzoru v hloubce 40 cm. Další dva senzory v hloubkách 20 a 60 cm pracovaly ještě týden (do 16.8.2015).



Obr. 4.19- Průběh teplot na stropě zahradního domku v porovnání s teplotami v substrátu vegetační střechy a s teplotami venkovního vzduchu naměřenými meteostanicí Em50 (19.7.-16.8.2015)

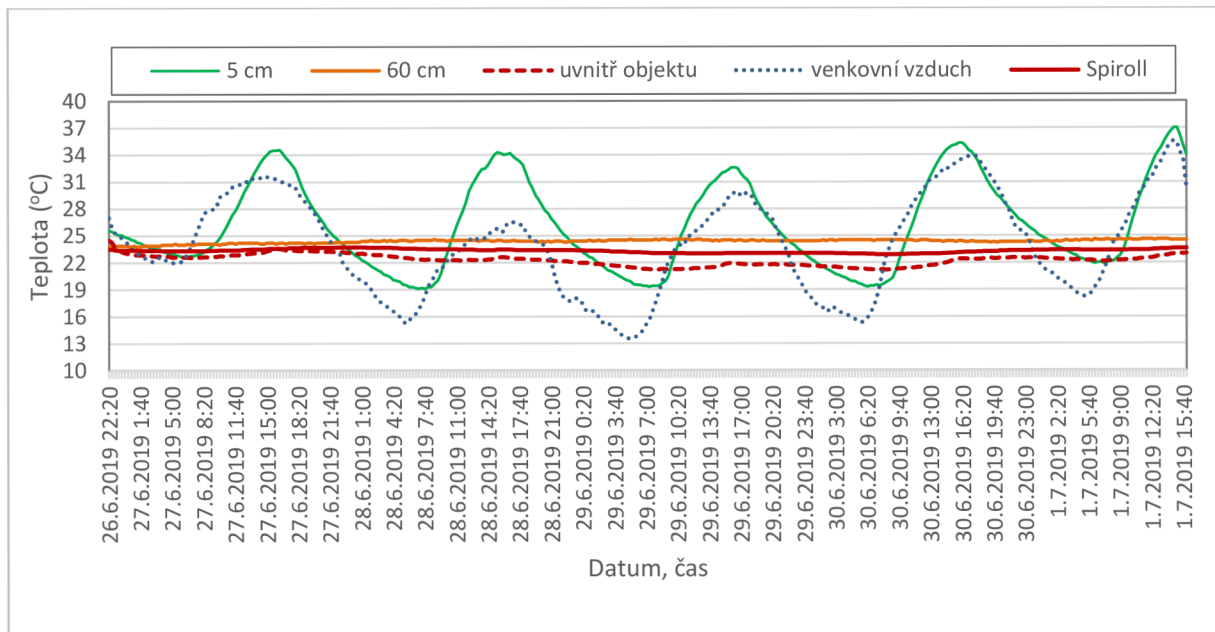
Na obr. 4.20 je další ukázka z průběhu teplot na stropní konstrukci objektu zahradního domku v červnu 2017. Senzory byly umístěny pod habry v hloubce 10 cm a 60 cm.



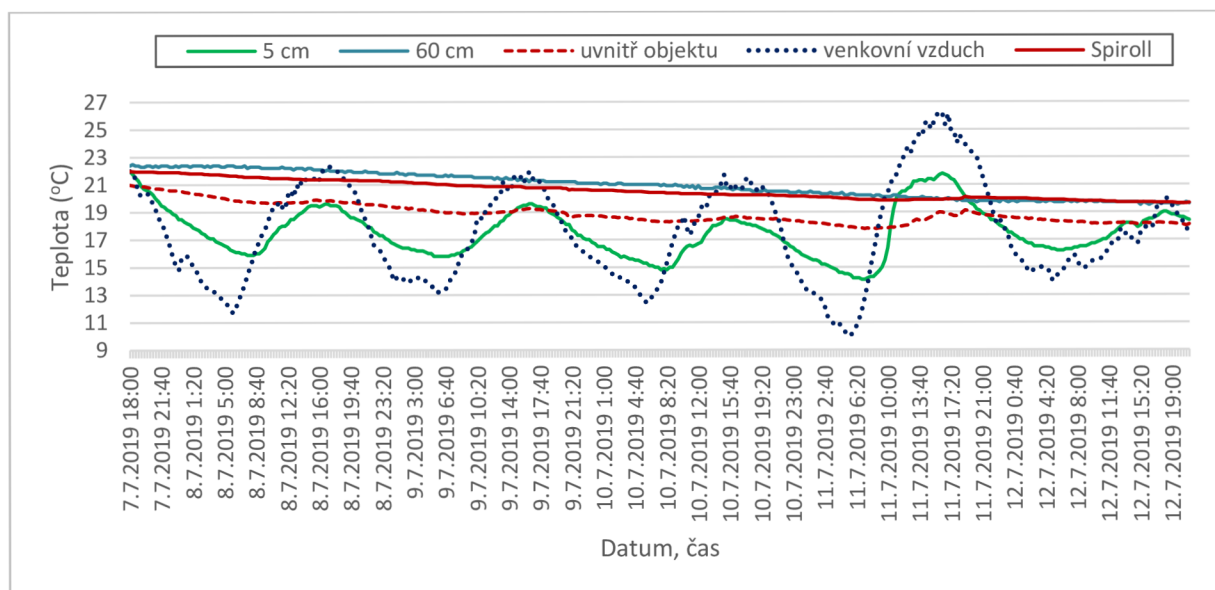
Obr. 4.20 -Průběh teplot na stropě (Spiroll) zahradního domku v porovnání s teplotami venkovního vzduchu a průběhem teplot v substrátu vegetační střechy v hloubkách 10 a 60 cm (26.6.-28.6.2017)

Další měření probíhalo s přerušeními od dubna do července 2019. Teplota uvnitř objektu byla zaznamenávána dataloggerem GlobeLog (IMKO GmbH) a průběh teplot na stropě uvnitř objektu zahradního domku teplotním čidlem připojeným k meteostanicí Em50 (Decagon Devices, Inc.). Senzory TRIME-PICO32 byly přemísťovány v substrátu vegetační střechy do různých hloubek podle měření, které právě probíhalo v rostlinách.

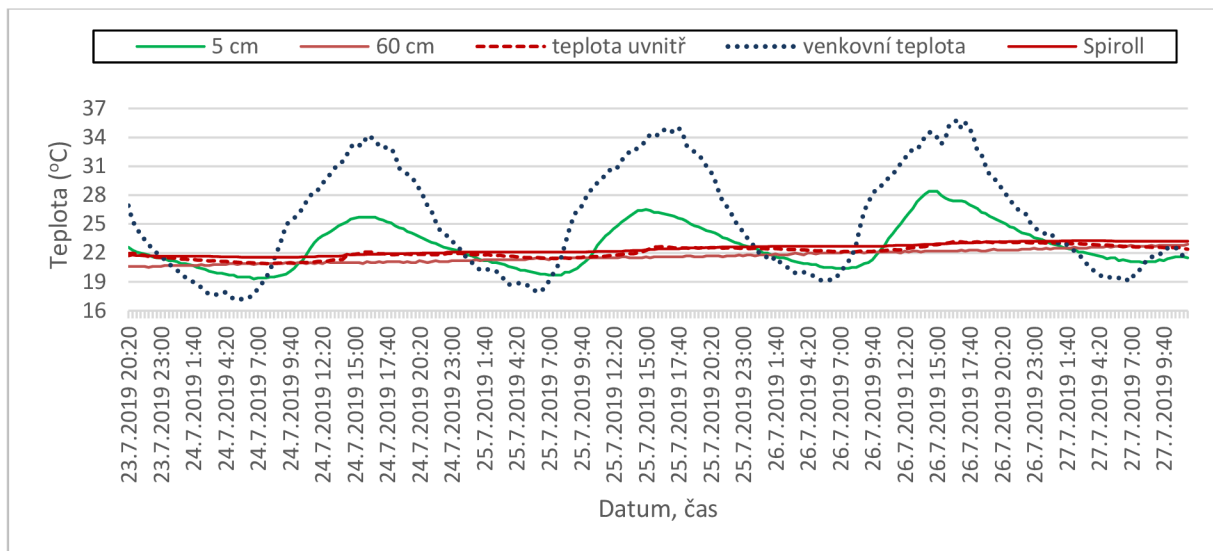
Na dalších obrázcích (obr.4.21, obr.4.22 a obr. 4.23) je průběh naměřených teplot na stropní konstrukci a uvnitř objektu v porovnání s průběhem teplot v zemině v hloubkách 5 a 60 cm a teplotami venkovního vzduchu v období od 26.6.2019 do 27.7.2019. Měření byla přerušována bouřkami.



Obr. 4.21 - Průběh teplot na stropě (Spiroll) zahradního domku, uvnitř zahradního domku v porovnání s teplotami venkovního vzduchu a průběhem teplot v substrátu vegetační střechy v hloubce 5 a 60 cm (26.6.2019-1.7.2019)



Obr. 4.22- Průběh teplot na stropě (Spiroll) zahradního domku, uvnitř zahradního domku v porovnání s teplotami venkovního vzduchu a průběhem teplot v substrátu vegetační střechy v hloubce 5 a 60 cm (7.7.-12.7.2019)



Obr. 4.23 – Průběh teplot na stropě (Spiroll) zahradního domku, uvnitř zahradního domku v porovnání s teplotami venkovního vzduchu a průběhem teplot v substrátu vegetační střechy v hloubkách 5 a 60 cm (23-27.7.2019)

Výsledky měření z této části byly vybrány pro porovnání v programu Simulace 2018 od Svoboda Software (obr.4.23).

4.3 Výsledky měření – 3. část

Ve třetí, poslední části, jsem se zaměřila na získání dat v rostlinách na střešní zahradě. Řada měření úzce souvisí s problematikou tzv. střešního zemědělství (*angl. rooftop farming*). Zajímalo mě, zda se i zemědělské plodiny (rajčata, okurky, mrkev aj.) vysázené na objektu během svého vegetačního období mohou podílet na ochlazovacím efektu.

Měření byla prováděna v zemědělských plodinách, v tymiánu a pod keři habrů. Jak víme, rostliny jsou závislé na vegetační době (období, kdy světelné, teplotní a vlhkostní podmínky umožňují jejich růst a vývoj). Vegetační doba je pro různé druhy rostlin různě dlouhá. Z tohoto důvodu se rostliny na vegetační střeše vyskytují pouze po dobu svého vegetačního období, po kterém nastává vegetační klid. Vzdálenosti mezi zemědělskými plodinami jsou různé v závislosti na pěstovaném druhu. Rostliny se během svého vegetačního období nacházejí v různých fázích růstu a vývoje - porosty mají různou výšku i hustotu. Tyto podmínky, chceme-li intenzivně vegetační střechu využívat jako zahradu, značně ovlivňují ochlazovací efekt, který vegetace na objektu poskytuje, je-li porost hustý, vysoký a během svého vegetačního období se příliš nemění. Měření probíhalo za podmínek standardních pro každoroční užívání zahrady – běžné zemědělské plodiny, hnojení, zalévání apod.

Výsledky měření - r. 2017

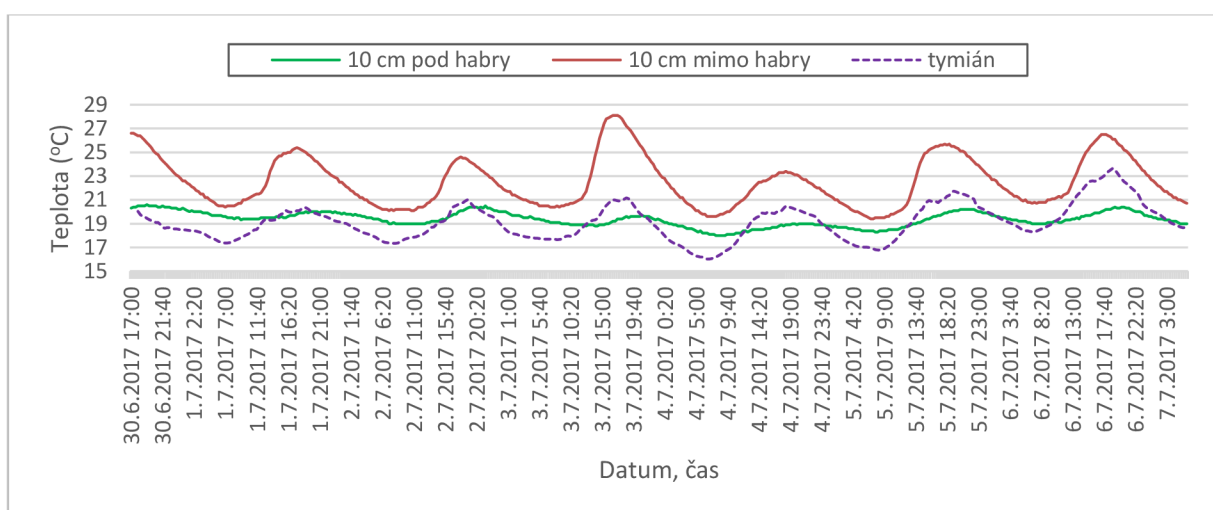
Senzory byly umístěny v substrátu střešní zahrady v hloubce 10 cm. Senzor č. 1 (39855) byl umístěn pod habry a senzor č. 2 (39856) ve vzdálenosti 1 m od habrů (mezi vysázenými rajčaty a habry) bez překrytí vegetací. Do porostu bylinek (tymián) těsně pod povrch bylo umístěno

teplotní čidlo (3) připojené k meteostanici (Em50). Střecha byla osázena rajčaty a okurkami. Vzdálenost mezi jednotlivými rajčaty byla přibližně 50 cm. Okurky byly vysázeny v jednom řádku, vzdálenost mezi rostlinami na řádku byla 40 cm. Porost bylinek byl umístěn na okraji střechy s orientací k jihu.

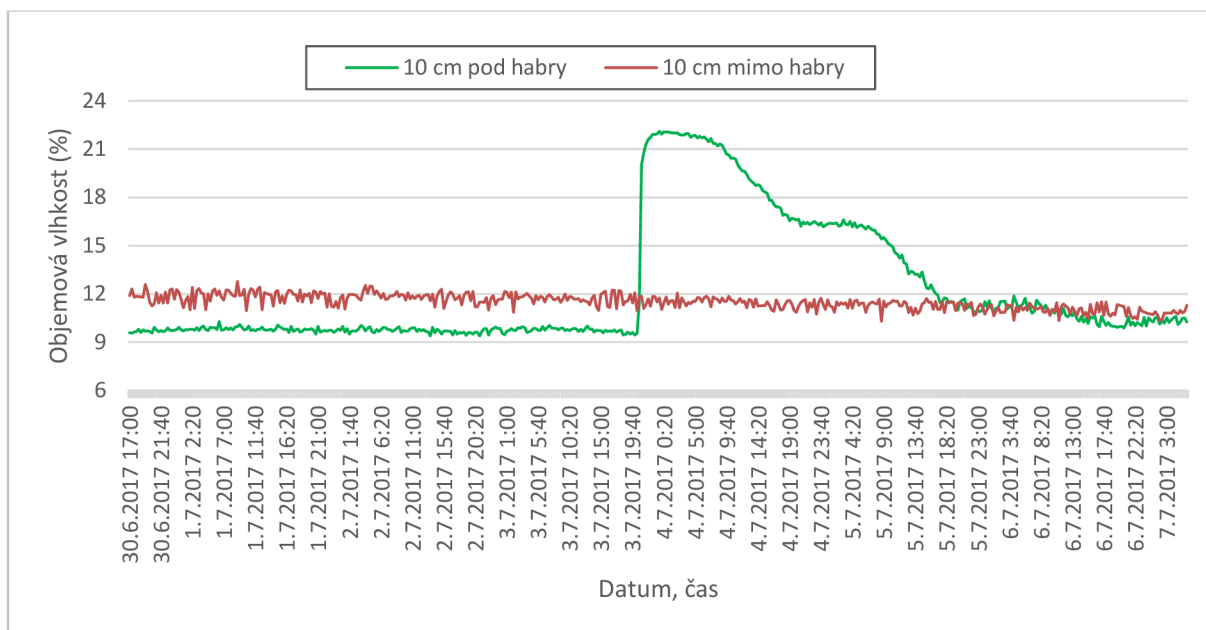


Obr. 4.24 – Vegetace na intenzivní vegetační střeše, foto pořízeno 1.8.2017

Na obr.4.25 je průběh teplot v době od 30.6 do 7.7.2017. V substrátu pod habry v hloubce 10 cm se teploty pohybovaly mezi 18 – 20,5 °C. Teplota ve stejné hloubce v substrátu bez vegetace vystoupala až na 28°C. V porostu bylinek (tymián) se teploty pohybovaly mezi 16 - 22 °C. Ke konci měření byl porost bylinek již částečně prořídilý, což se projevilo vzestupem teploty v porostu až na 23,5 °C. Na grafu můžeme sledovat pokles teploty (obr. 4.25) a nárůst objemové vlhkosti (obr. 4.26) způsobený zálivkou keřů habrů (3.7.2017). Na obr.4.24 je vegetace na objektu zahradního domku v době, kdy probíhalo měření.



Obr. 4.25 Průběh teplot v substrátu v hloubce 10 cm pod habry, mimo habry a srovnání s teplotou v porostu bylinek (tymián) těsně pod povrchem (30.6.-7.7.2017)

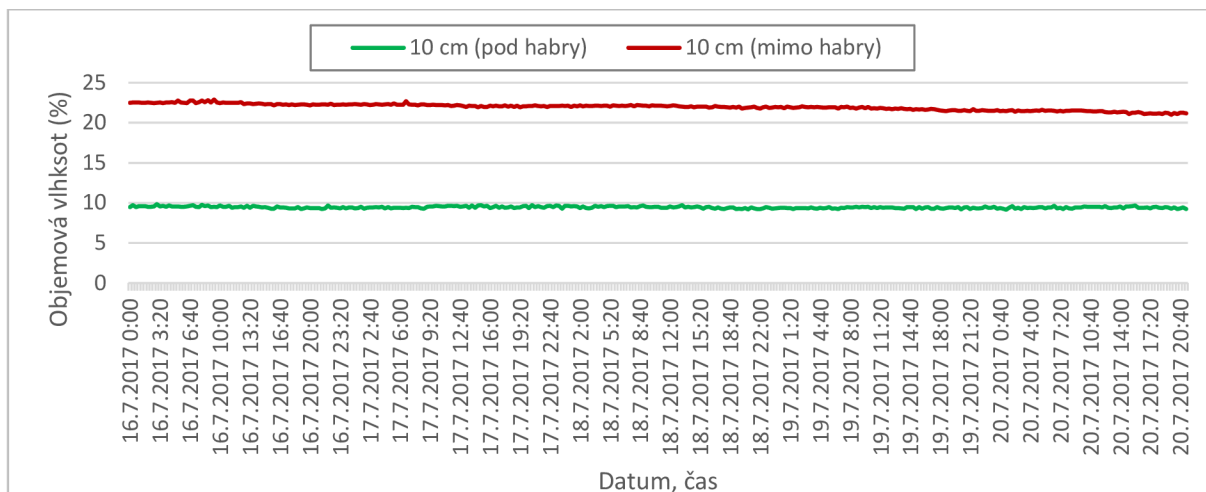


Obr. 4.26 Objemová vlhkost (%) naměřená pod keři habrů a mimo keře habrů v hloubce 10 cm (30.6.-7.7.2017)

Měření bylo přerušováno bouřkami a pokračovalo od 16.7 do 20.7.2017 (obr.4.27, obr.4.28). Teplotní čidlo (3) bylo přemístěno do hustšího porostu bylinek (tymián), těsně pod povrch. Porost tymiánu byl již značně prořídlý. Pod habry v hloubce 10 cm byly opět naměřeny nižší hodnoty objemové vlhkosti než mimo habry (obr.4.28).

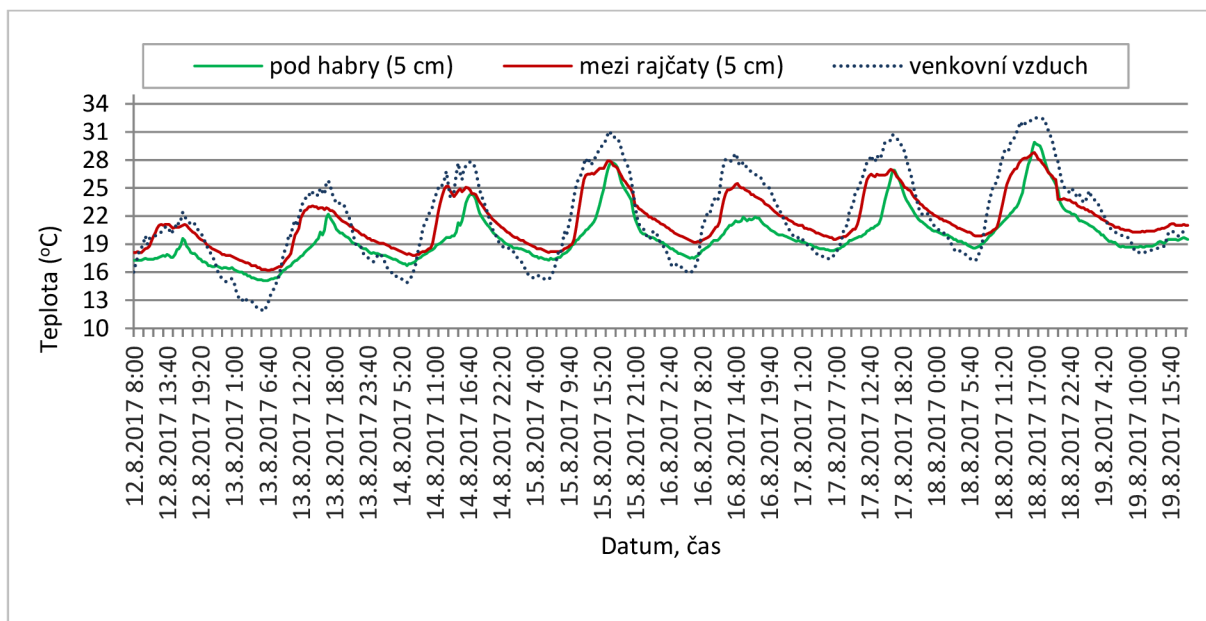


Obr. 4.27- Průběh teplot v substrátu (senzor (1) - 10 cm pod habry, senzor(2)- 10 cm mimo habry, teplotní čidlo (3) umístěné těsně pod povrchem v tymiánu) a průběh teplot venkovního vzduchu (16.7-20.7.2017)



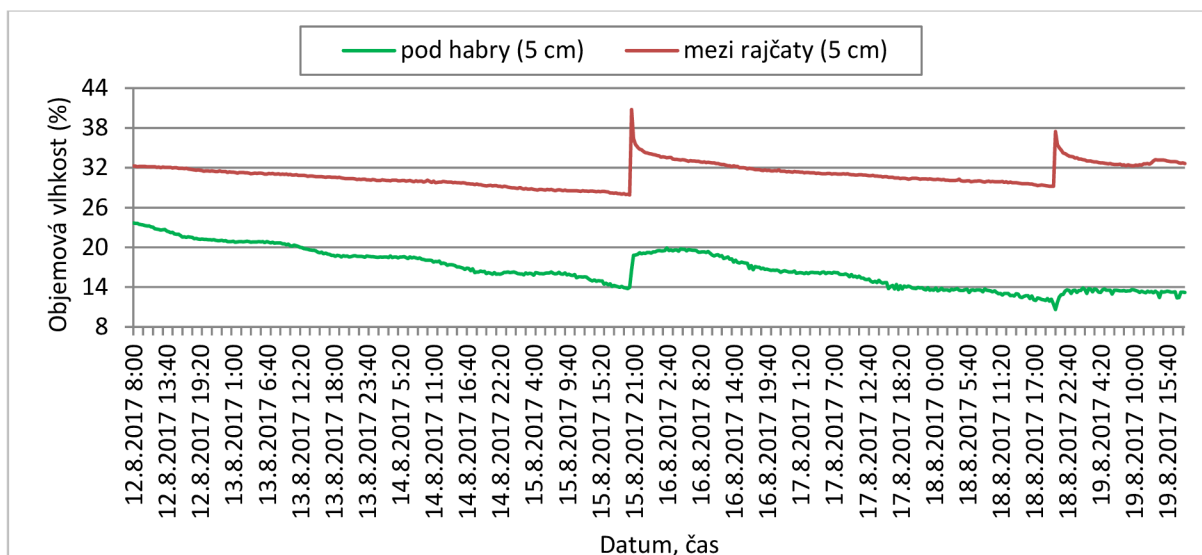
Obr. 4.28 - Hodnoty objemové vlhkosti pod keři habrů a mimo habry v hloubce 10 cm (16.7.-20.7.2017)

Další měření probíhalo se senzory umístěnými mezi rajčaty a pod keři habrů (obr.4.29, obr.4.30). Senzor č.1 byl umístěn pod habry směrem do prostoru zahrady a senzor č.2 mezi keře rajčat, která byla od sebe vzdálena přibližně 50 cm. Oba senzory byly umístěny v hloubce 5 cm.



Obr. 4.29 - Průběh teplot v substrátu vegetační střechy v hloubce 5 cm pod habry a mezi rajčaty ve srovnání s teplotami vzduchu (12.8.-19.8.2017)

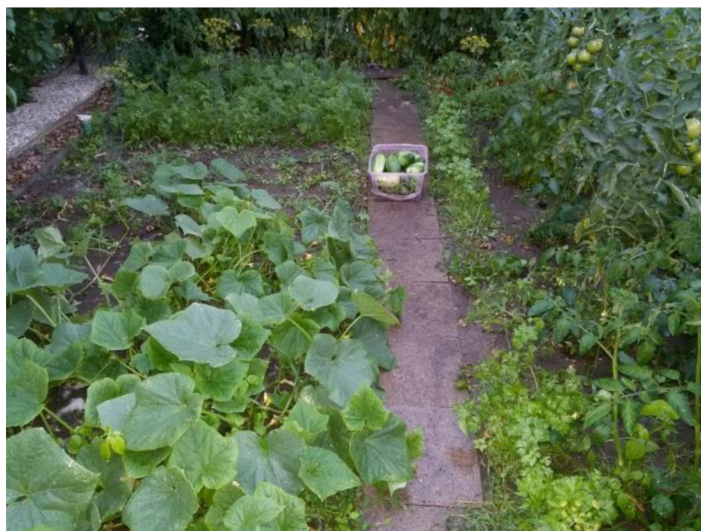
Průběh teplot v hloubce 5 cm mezi rajčaty a pod habry se výrazně neliší (obr.4.29, obr.4.30). Pod habry se nárůst vyšších teplot projevil později a trval kratší dobu. Vyšší teploty nepatrně snížila zálivka rostlin – viz graf (obr.4.30). Pod keři habrů byly opět naměřeny podstatně nižší hodnoty objemové vlhkosti než v místech osázených zemědělskými plodinami, což potvrzuje, že kořeny habrů odčerpávaly větší množství vody než sezónní plodiny.



Obr. 4.30 Hodnoty objemové vlhkosti v substrátu vegetační střechy (12.8.-19.8.2017)

Výsledky měření – r. 2018

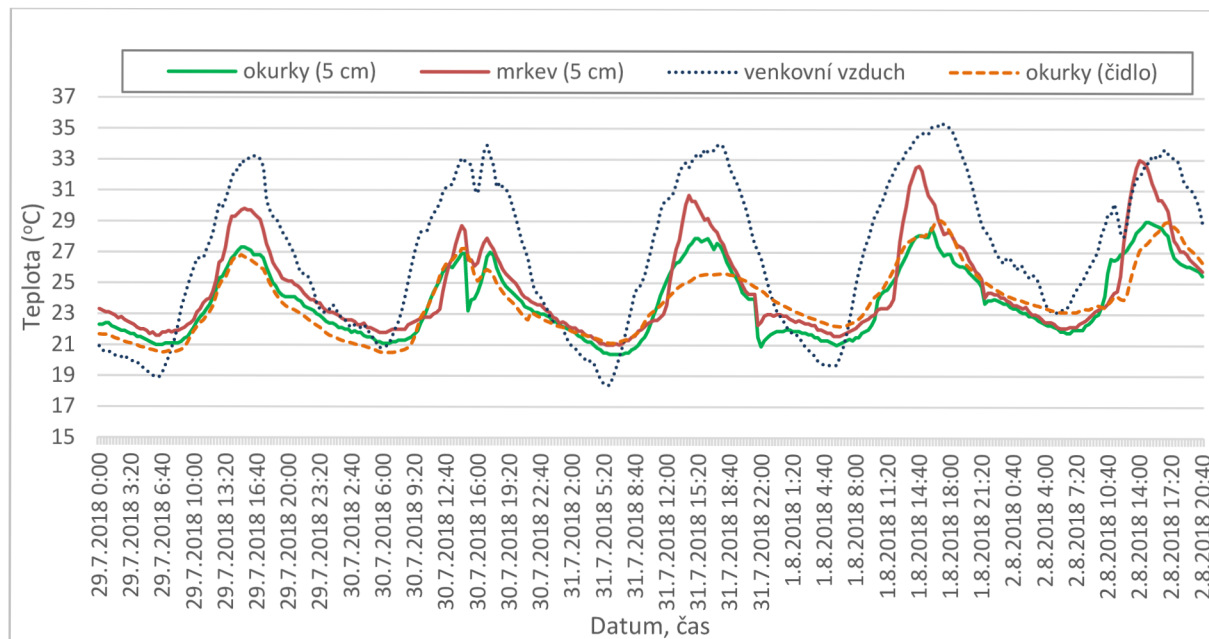
Měření pokračovalo v srpnu r. 2018. Senzor č.1 (39855) byl umístěn v porostu okurek do hloubky 5 cm, senzor č. 2 (39856) do porostu mrkve do stejné hloubky. Teplotní čidlo (3) bylo umístěno pod listy okurek těsně pod povrch (obr.4.31).



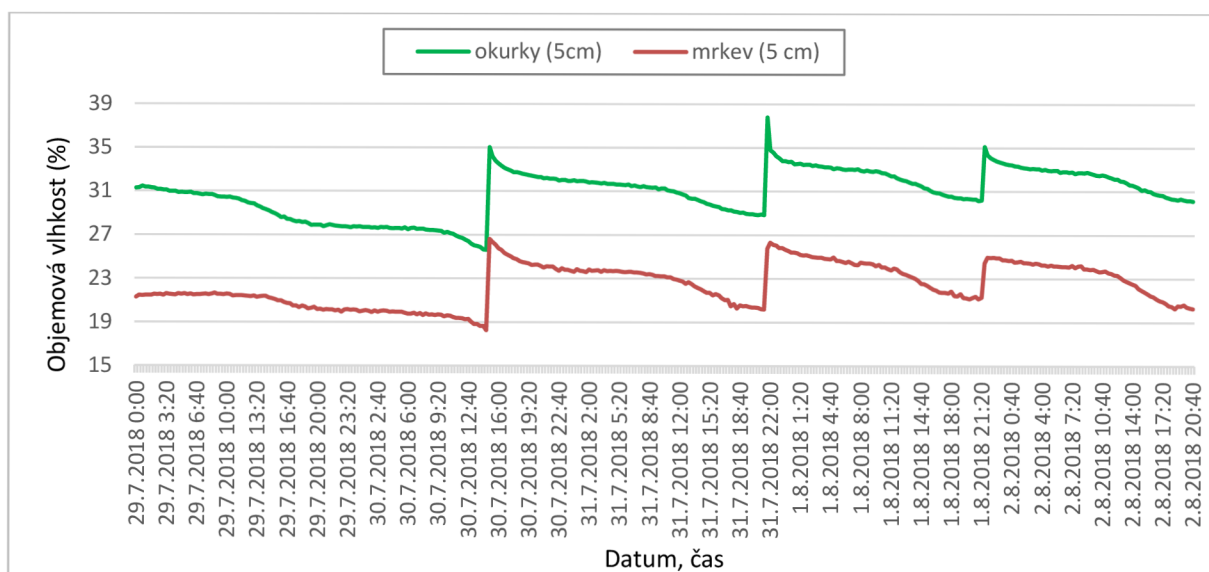
Obr. 4.31- Střešní zahrada – okurky, mrkev, foto pořizeno 13.7.2018

Na obr. 4.32 je průběh teplot v substrátu v hloubce 5 cm pod zemědělskými plodinami (mrkev, okurky) v porovnání s průběhem teplot venkovního vzduchu. Pod porostem okurek byly naměřeny teploty přibližně o 2-3 °C nižší než v porostu mrkve ve stejné hloubce.

Na dalším grafu (*obr.4.33*) jsou zobrazeny nárůsty objemové vlhkosti (%) v hloubce 5 cm při pravidelném zalévání zemědělských plodin. Ačkoli plodiny byly zalévány přibližně stejně, vyšší vlhkost byla zaznamenána pod porostem okurek.

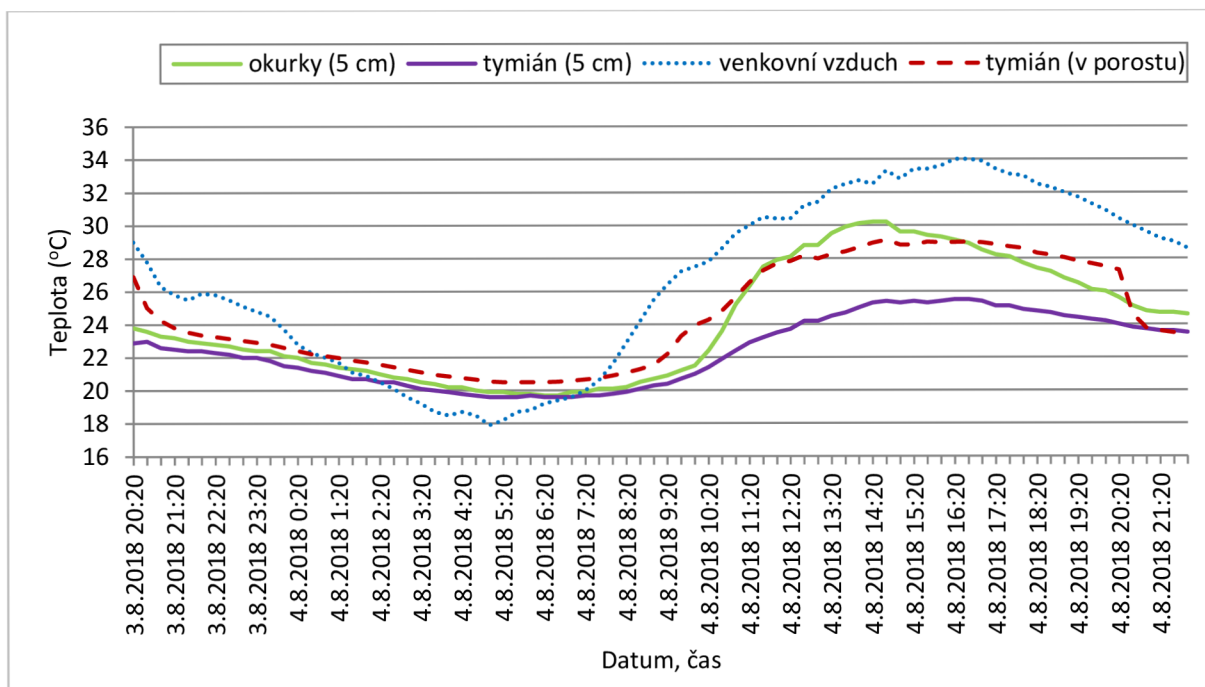


Obr. 4.32- Průběh teplot v substrátu v hloubce 5 cm (senzor 1 - okurky, senzor 2 – mrkev), ve srovnání s teplotou pod okurkami (teplotní čidlo 3) a teplotou venkovního vzduchu

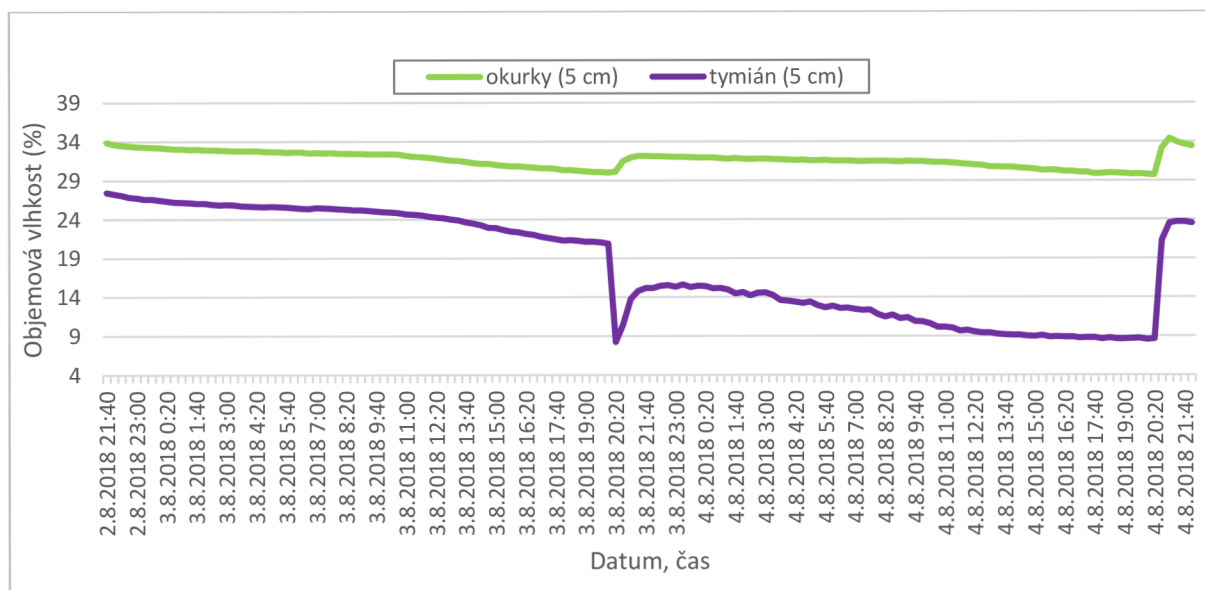


Obr. 4.33 Hodnoty objemové vlhkosti v porostu okurek a mrkve v hloubce 5 cm

Další měření probíhalo v porostu okurek a tymiánu. Senzor č.1 byl ponechán v porostu okurek v hloubce 5 cm. Senzor č.2 byl přemístěn z porostu mrkve do porostu tymiánu do stejné hloubky 5 cm (*obr.4.34, obr.4.35*). Porost okurek na konci vegetačního období již byl značně prořídlý.



Obr. 4.34- Průběh teplot v substrátu (5 cm - okurky, 5 cm – tymián), ve srovnání s teplotou venkovního vzduchu a naměřenou teplotou v porostu tymiánu (teplotní čidlo (3) připojené k meteorostanici Em50)



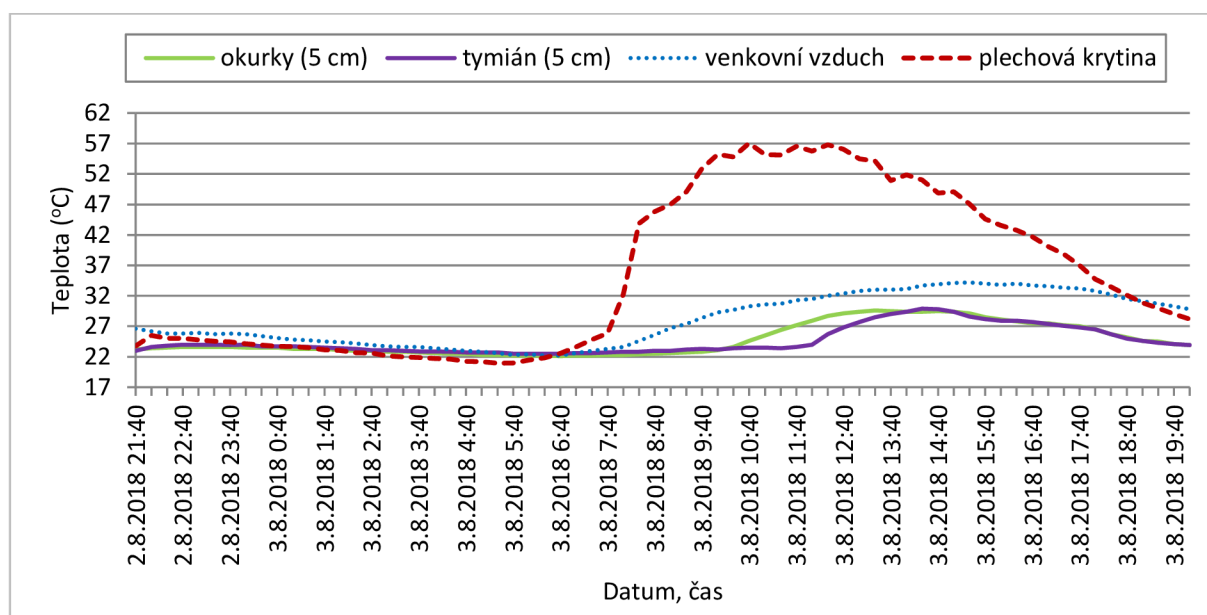
Obr. 4.34 - Hodnoty objemové vlhkosti naměřené v hlouce 5 cm pod okurkami a tymiánem (2.8.2018-4.8.2018)

Pro porovnání s teplotou povrchu na střeše bez vegetace bylo teplotní čidlo (3) přemístěno na plechovou krytinu (červená barva) a posléze na živičnou krytinu (červená barva) sousedního objektu (obr.4.36).

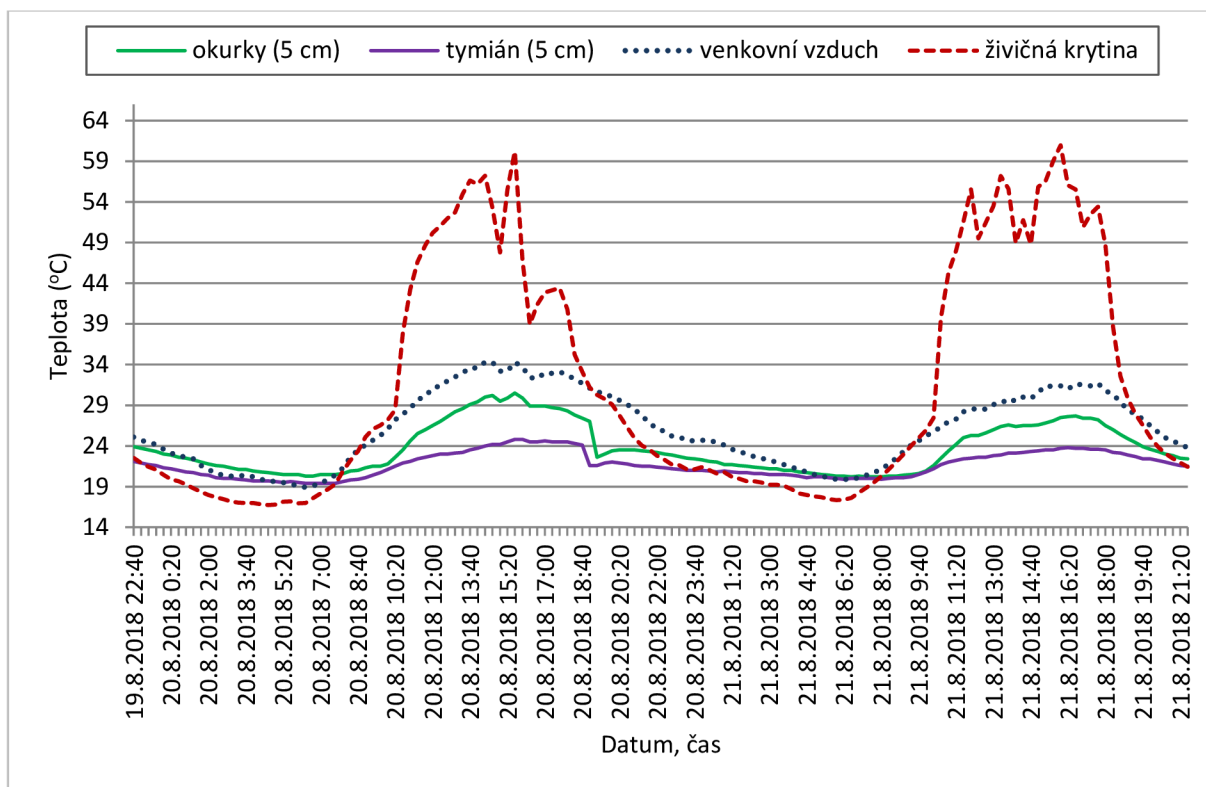


Obr. 4.35 Plechová a živičná krytina na sousedních objektech (červená barva)

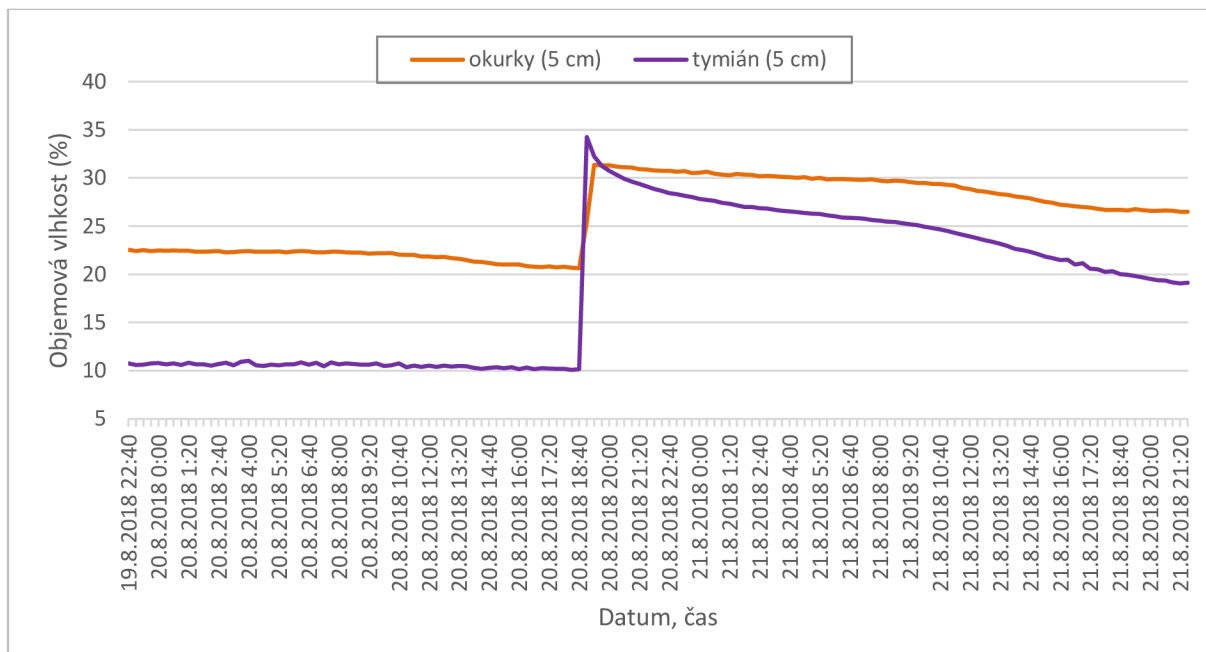
Na obr. 4.37 a obr.4.38 je průběh teplot v substrátu pod porostem okurek a tymiánu v hloubce 5 cm v porovnání s teplotami na plechové a živičné krytině. Na obr. 4.39 je průběh objemové vlhkosti v hloubce 5 cm pod porostem okurek a tymiánu.



Obr. 4.36 Průběh teplot v substrátu (okurky - 5 cm, tymián - 5 cm), ve srovnání s teplotou venkovního vzduchu a naměřenou teplotou na plechové krytině



Obr. 4.37 Průběh teplot v substrátu (okurky - 5 cm, tymián - 5 cm), ve srovnání s teplotou venovního vzduchu a teplotou na živičné krytině (19.8.-21.8.2018)



Obr. 4.39 Hodnoty objemové vlhkosti na vegetační střeše v hloubce 5 cm (okurky, tymián) (19.8.2018-21.8.2018)

Na obou površích - plechové i živičné krytině dosáhly teploty v horkých letních dnech okolo 60 °C, na plechové krytině 57,1 °C a na živičné krytině dokonce 61°C. Teploty na vegetační

střeše v hloubce 5 cm nepřesáhly 33°C. Lepší hodnoty vykazovaly teploty pod porostem tymiánu, který byl hustší, než porost okurek na konci svého vegetačního období. Nicméně teploty v substrátu v hloubce 5 cm byly výrazně nižší než teploty na rozpálené plechové a živičné krytině.

4.4 Výpočet dvourozměrného stacionárního teplotního pole v konstrukci pomocí programu Area 2017

Pro výpočet dvourozměrného stacionárního teplotního pole v konstrukci byl použit program Area 2017 od Svoboda Software. Vypočtené hodnoty budou porovnány s naměřenými hodnotami teplot v substrátu intenzivní vegetační střešky a na kontaktu se stropní konstrukcí v zimním období. Objekt, na kterém měření probíhala, je nezateplený a netemperovaný.

Porovnání naměřených teplot v konstrukci nezatepleného a netemperovaného objektu s vypočtenými hodnotami teplot z teplotních polí

Pro výpočet průběhu teplot v konstrukci byly pro exteriér uvažovány okrajové podmínky pro lokalitu Brno, tj. teplota -15 °C, a pro interiér byly uvažovány hodnoty pro nezamrzající garáže, tj. teplota v interiéru 5 °C.

V programu Area 2017 byl vymodelován detail atiky s odpovídajícími skladbami konstrukcí. Vypočtené hodnoty teplot byly porovnány s naměřenými hodnotami teplot v hloubkách 10 cm a 60 cm a na stropní konstrukci zahradního domku.

Jedná se o hodnoty naměřené v období s nejnižší zaznamenanou teplotou venkovního vzduchu pro sledované období. V hloubce 10 cm byla nejnižší naměřená teplota -8,1 °C. V hloubce 60 cm byla naměřena nejnižší teplota -5,5 °C. Na stropní konstrukci byla naměřena minimální teplota -3,1 °C. Přehled výsledků měření je uveden v tab. 4.4. Minimální teplota v interiéru zahradního domku nepřesáhla ve sledovaném období -7,16°C.

Tab. 4.4 Přehled naměřených minimálních teplot

Rok	t_{min} (°C)			
	10 cm 1 (39856)	60 cm 2 (39855)	Spiroll teplotní čidlo	Venkovní vzduch
2016/17	-8,1	-5,5	-3,1	-16,6 (-17,2*)

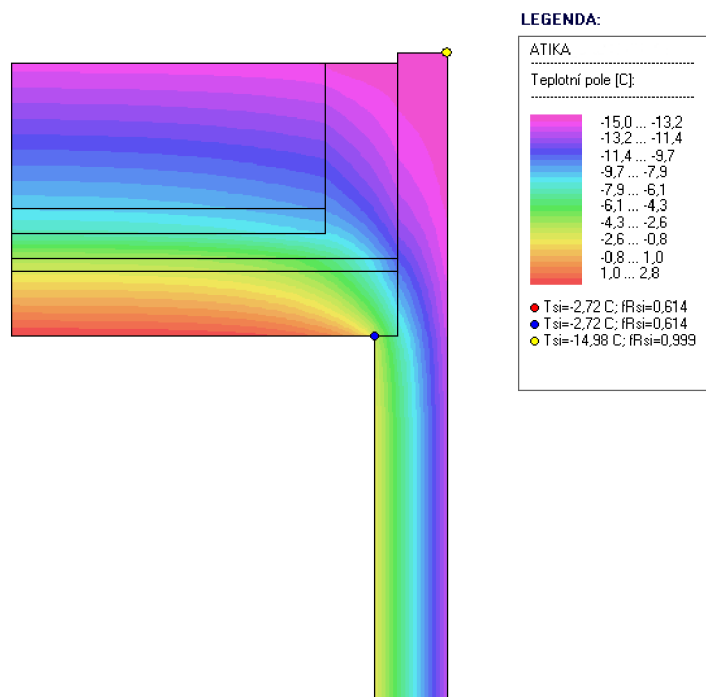
Pozn.: minimální teploty dosažené ve sledovaném období – meteostanice EM50 u objektu,

* meteorologická stanice ČHMÚ, (B2BTUR01) Brno-Tuřany

Na obr. 4.40 je znázorněno dvourozměrné teplotní pole u detailu atiky se skladbami konstrukcí odpovídajícími skladbám na zkoumaném objektu. Výpočet byl proveden pro výše uvedené okrajové podmínky. Teplota v poli stanovená výpočtem v hloubce 10 cm nabývá hodnoty -13,9 °C. V hloubce 60 cm byla v poli výpočtem stanovena hodnota -8,9 °C. Teplota na stropní konstrukci stanovená výpočtem byla 1,0 °C. Porovnání výsledků vypočtených a naměřených teplot je v tab.4.5.

Tab.4.5 Naměřené a vypočtené hodnoty teplot v substrátu a na stropní konstrukci

	naměřené teploty (°C)	vypočtené teploty (°C)	Δt (°C)
10 cm - substrát	-8,1	-13,9	5,8
60 cm - substrát	-5,5	-8,9	3,4
Stropní konstrukce	-3,1	1,0	2,1



Obr. 4.38 – Stacionární dvojrozměrné teplotní pole – detail atiky

Naměřená hodnota teploty substrátu v hloubce 10 cm je o 5,8 °C vyšší, než teplota stanovená výpočtem v programu Area 2017 a v hloubce 60 cm je vyšší o 3,4 °C. I přes uvažování příznivějších okrajových podmínek ve výpočtu byly teploty substrátu v hloubkách 10 cm a 60 cm nižší, než teploty zjištěné měřením. Z těchto výsledků lze usuzovat, že intenzivní vegetační střecha s touto skladbou má pozitivní vliv na průběh teplot v konstrukci i u nezatepleného a netemperovaného objektu. Teplota na kontaktu se stropní konstrukcí vykazuje hodnotu nižší, než je hodnota stanovená výpočtem, avšak je nutné poznamenat, že se teplota v interiéru zkoumaného objektu v době měření pohybovala okolo -7,16 °C. Při udržování minimální teploty 5 °C v objektu by byly naměřené hodnoty pravděpodobně ještě příznivější.

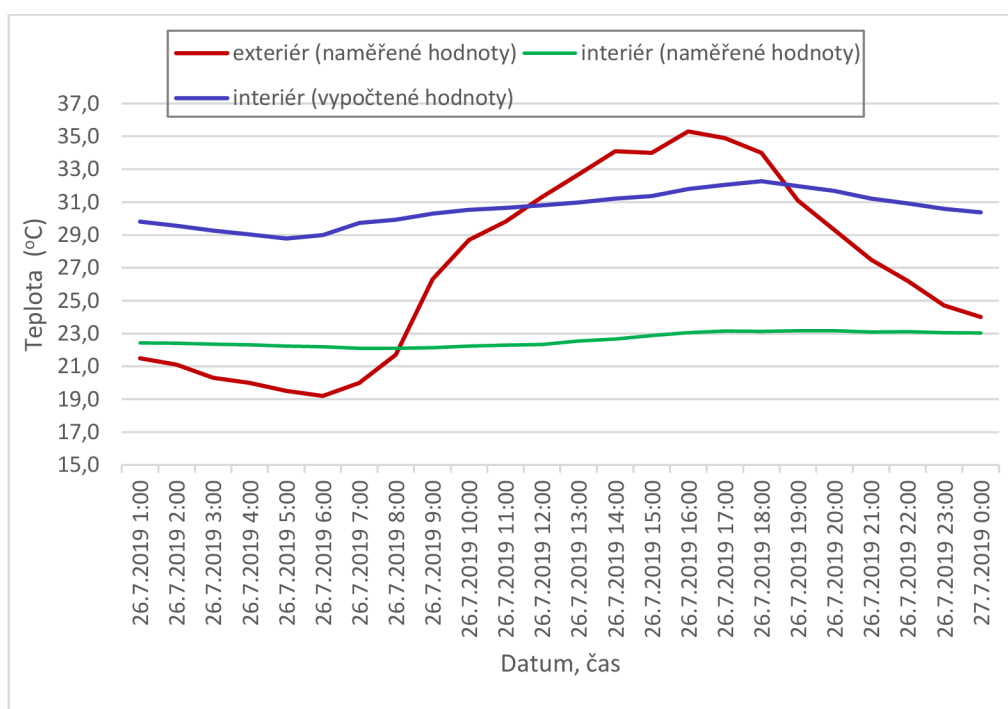
4.5 Výpočet teploty vzduchu v interiéru v modelovém dni pro letní období pomocí programu Simulace 2018, tepelná stabilita v letním období

Pro výpočet teploty vzduchu v interiéru zkoumaného objektu byl zvolen program Simulace 2018 od Svoboda software. Výpočtem stanovené hodnoty teploty vzduchu v interiéru budou porovnány s naměřenými hodnotami.

Porovnání naměřených teplot v interiéru s teplotami stanovenými výpočtem v programu Simulace 2018

Pro porovnání teplot naměřených v interiéru objektu s teplotami stanovenými výpočtem byl vybrán den 26.7 2019, kdy byla pro sledované období naměřena nejvyšší teplota v exteriéru (35,3 °C).

Pro výpočet teplot během modelového dne pomocí programu Simulace 2018 byly uvažovány teploty venkovního vzduchu a hodnoty intenzity globálního slunečního záření naměřené meteostanicí Em50. Pro porovnání výsledků měření s vypočtenými hodnotami byl vytvořen graf, ve kterém jsou znázorněny vypočtené i naměřené teploty v interiéru během modelového dne (obr.4.41).



Obr. 4.39 – Průběh naměřených teplot v exteriéru, interiéru a vypočtených teplot v interiéru

Z grafu vyplývá, že naměřené hodnoty jsou výrazně nižší, než teploty stanovené výpočtem v programu Simulace 2018. Z výsledků lze usuzovat, že intenzivní vegetační střecha na zkoumaném nezatepleném objektu zahradního domku má v letním období pravděpodobně pozitivní vliv na tepelnou stabilitu v objektu. Největší rozdíl mezi naměřenými teplotami v interiéru a teplotami stanovenými výpočtem je 9,14 °C.

4.6 Závěr, význam pro praxi a možnosti dalšího výzkumu

Výsledky prováděného měření naznačují, že vegetační souvrství na intenzivní vegetační střeše může v zimním období do určité míry mírnit kolísání venkovních teplot a může sloužit jako přídavná izolace, která druhotně pomáhá snižovat náklady na vytápění, má-li substrát dostatečnou tloušťku. Porovnáme-li průběh venkovních teplot na grafech s naměřenými teplotami uvnitř nevytápěného domku a na stropní konstrukci, dojdeme k závěru, že intenzivní vegetační střecha může v zimním období pozitivně ovlivnit i teplotu uvnitř nevytápěného objektu. U intenzivní vegetační střechy se v zimním období, kdy je střecha bez vegetace, uplatňuje především izolační schopnost substrátu, která závisí na mocnosti, jeho složení a vlhkosti. Výsledným efektem fyzikálních vlastností zeminy je snížení teplotních výkyvů. Na efektu se podílí především akumulací vlastnosti půdy (schopnost absorbovat a udržet teplo po určitou dobu) a jev známý jako „*tepelné zpoždění*“. Za chladnějšího počasí se na izolačním efektu se může významně podílet i vzduchová vrstva uvnitř a pod vegetací a také fakt, že studený vítr nepronikne k povrchu zeminy.

Výhodou střešní zahrady v horkém letním období je ochlazovací efekt vegetačního souvrství. Chladicí účinek vegetace, jak bylo již uvedeno výše, je vyvolán především tepelnou akumulací vlastní zadržované vody, schopností rostlin odpařovat vodu, odrážet sluneční záření a využívat sluneční energii na proces fotosyntézy. Povrch pokrytý rostlinami se prakticky nepřehřívá a zůstává i za horkého letního dne relativně chladný. Vegetační souvrství tak může v letním období výrazně zredukovat prostup tepla skrze střechu z vnějšího do vnitřního prostředí. Ochlazovací efekt, který poskytuje intenzivní vegetační střecha, zejména v letním období, je z hlediska úspory energie za provoz klimatizačního zařízení mnohem významnější než tepelně izolační efekt substrátu v zimním období. Závěrem můžeme říci, že v horkém letním období, kdy teploty dosahovaly hodnot okolo 35 °C se teploty v interiéru zahradního domku pohybovaly výrazně níže, než teploty v exteriéru. Skutečně naměřené teploty v objektu zahradního domku byly nižší, než teploty stanovené výpočtem v programu Simulace 2018, což potvrzuje pozitivní vliv intenzivní vegetační střechy na teplotní stabilitu uvnitř objektu v letním období.

V praxi by měly získané výsledky měření přispět k přesnějšímu a efektivnějšímu návrhu skladby intenzivních vegetačních střech s využitím fyzikálních vlastností vegetačního souvrství a především k vývoji výpočetního software, který bude uvažovat s vlivem vegetačního souvrství střešních zahrad do výpočtu.

Na závěr mé disertační práce bych chtěla podotknout, že cílem nebyla komplexní analýza všech fyzikálních dějů ve vrstvách intenzivní vegetační střechy. Chtěla jsem pouze poskytnout přesnější informace pro návrh střešního pláště s využitím vlastností a výhod vegetačního souvrství střešní zahrady. V projekční praxi je pozitivní vliv vegetačního souvrství střešních zahrad často zanedbáván. Přidanou hodnotou, především ve velkoměstech, tak jako je běžné jinde ve světě, může být i u nás pěstování zemědělských plodin na střeších budov.

Problematiku střešních zahrad by bylo vhodné podrobněji zmapovat v širším měřítku. Další měření by mohla zahrnovat měření na stejném objektu po zateplení (objekt by byl v zimním období temperován) a tato data porovnat s dosud získanými daty, dále zkoumat vliv samotné vegetace na tepelnou stabilitu objektu v letním období (tj. provést měření na objektu s intenzivní vegetační střechou zcela bez vegetace a ve stejném období s vegetací) a např. porovnat teploty uvnitř objektu s intenzivní vegetační střechou v letním období s hodnotami zjištěnými uvnitř sousedního objektu s plechovou krytinou.

5 Seznam použité literatury

- [1] New York City has painted over 9.2 million square feet of rooftops white — and it could be a brilliant heat-fighting plan. *Https://www.businessinsider.com* [online]. 13. srpen 2018 [cit. 2021-11-08]. Dostupné z: <https://www.businessinsider.com/new-york-city-painted-6-million-square-feet-of-rooftop-white-2018-8>
- [2] SAMIR, Ibrahim. White Roofs Not Always Green: White roofing systems have been the system of choice because it was believed that they reduce global warming. *Https://metropolismag.com* [online]. 2013 [cit. 2021-11-08]. Dostupné z: <https://metropolismag.com/programs/white-roofs-not-always-green/>
- [3] Dakaker. *Www.Dakakker.nl* [online]. Rotterdam, 2019 [cit. 2021-7-26]. Dostupné z: <https://dakakker.nl/site/2019/02/05/rotterdamse-dakendagen-31-mei-t-m-2-juni-2019/?lang=e>
- [4] ØsterGro. *Www.kobenhavnergron.dk* [online]. 2019 [cit. 2021-7-26]. Dostupné z: <https://www.kobenhavnergron.dk/place/ostergro/?lang=en>
- [5] File:Phase diagram of water.svg. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2021-10-11]. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Phase_diagram_of_water.svg?uselang=cs
- [6] Tabulky a výpočty. *Https://stavba.tzb-info.cz* [online]. [cit. 2021-12-29]. Dostupné z: https://stavba.tzb-info.cz/docu/tabulky/0000/000086_katalog.html
- [7] ŠTRAJBLOVÁ, Jana. Aktualita z fyziky: Permittivita vody trochu jinak. *Https://www.matfyz.cz/clanky/aktualita-z-fyziky-permittivita-vody-trochu-jinak* [online]. 23. července 2018 [cit. 2021-11-20]. Dostupné z: www.matfyz.cz
- [8] Dielektrizitätszahl-Liste. *Www.vega.com* [online]. [cit. 2021-11-20]. Dostupné z: https://www.vega.com/home_pe/-/media/PDF-files/Dielektrizitaetszahl-Liste_DE.ashx
- [9] Manuál k Aree 2017. *Https://kcad.cz* [online]. Praha, 2017 [cit. 2021-12-28]. Dostupné z: <https://kcad.cz/cz/stavebni-fyzika/tepelna-technika/area/>
- [10] Manuál k Simulaci 2018. *Https://kcad.cz* [online]. Praha, 2018 [cit. 2021-12-28]. Dostupné z: <https://kcad.cz/cz/stavebni-fyzika/tepelna-technika/simulace/>

PŘEDSTAVENÍ AUTORA

Osobní údaje:

Jméno a příjmení: Dáša Sukopová (roz. Apeltauerová)

Datum narození: 8. 8. 1964

e-mail: sukopova.d@fce.vutbr.cz

Dosažené vzdělání:

2010 – dosud: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební. Doktorský studijní program.
Obor: Pozemní stavby

1983-1991: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební. Studijní program stavební inženýrství. Studijní obor: Pozemní stavby. Dosažená kvalifikace: Inženýr (Ing.)

Praxe/zaměstnání:

1983-1988: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemního stavitelství. Referent 12

1988-1992: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemního stavitelství. Asistent I D4

1992-1995: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemního stavitelství. TP - technický pracovník

1995-2000: mateřská dovolená

2000-dosud: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemního stavitelství. TP, od roku 2010 tajemník pro pedagogiku

- výuka, vedení bakalářských (51) a diplomových prací (20)

Cizí jazyk: angličtina, němčina, francouzština, ruština – pasivně

Odborné znalosti, software: AutoCAD, MS Office (Word, Excel, Power Point), Stavební fyzika (Area 2017, Teplo 2017, Simulace 2018)

Aktivity:

Člen přípravného výboru 36. mezinárodní konference – Brno 2012 (setkání akademických pracovníků kateder a ústavů pozemního stavitelství technických univerzit ČR a SR, 19.-21.9.2012)

Publikační činnost:

- SUKOPOVÁ Dáša – *Cooling and Thermal Insulating Effects in Layers of Roof Garden*, (Applied Mechanics and Materials, Trans Tech Publications, Switzerland, Switzerland, 19.6.2017, ISSN 166-7482
- SUKOPOVÁ, Dáša – *Ochlazovací efekt ve vrstvách intenzivní vegetační střechy*, JUNIORSTAV 2016, 18. odborná konference doktorského studia, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 28.1.2016, sborník ISBN 978-80-214-5311-1
- SUKOPOVÁ, Dáša - *Intenzivní vegetační střecha jako přídatná izolace budovy v zimním období*, JUNIORSTAV 2015, 17. odborná konference doktorského studia, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 29.1.2015, sborník ISBN 978-80-214-5091-2
- MACEKOVÁ, Věra, Annemarie NERUDOVA a Dáša SUKOPOVÁ. *Pozemní stavitelství II (S) - podlahy, podhledy a povrchové úpravy: modul 03*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007. Studijní opory pro studijní programy s kombinovanou formou studia. ISBN 978-80-7204-521-1.

Abstrakt

Předkládaná disertační práce se zabývá analýzou teplotních a vlhkostních procesů probíhajících ve vrstvách intenzivní vegetační střechy s větší vrstvou zeminy – střešní zahrady. Cílem mé disertační práce poskytnout přesnější informace pro návrh střešního pláště s využitím vlastností a výhod vegetačního souvrství střešní zahrady. Jednou z nejdůležitějších výhod střešních zahrad je ochlazovací efekt vegetačního souvrství v horkém letním období. Práce se zabývá i myšlenkou širšího využití střešních zahrad pro tzv. „střešní zemědělství - angl. rooftop farming“, které je ve světě stále oblíbenější. Jinak nevyužité plochy střech mohou nahradit nedostatek ploch pro zahrádky, které především ve velkoměstech chybí.

Abstract

The presented dissertation deals with the analysis of temperature and humidity processes taking place in the layers of an intensive vegetation roof with a larger layer of soil - the roof garden. The aim of my dissertation is to provide more accurate information for the design of the roof covering using the properties and benefits of the vegetation layer of the roof garden. One of the most important advantages of roof gardens is the cooling effect of the vegetation formation in the hot summer season. The work also deals with the idea of wider use of roof gardens for the so-called rooftop farming, which is becoming more and more popular in the world. Otherwise, unused roof areas can make up for the lack of areas for gardens, which are especially lacking in big cities.