



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV POZEMNÍHO STAVITELSTVÍ

INSTITUTE OF CIVIL ENGINEERING

ANALÝZA TEPLOTNÍCH A VLHKOSTNÍCH PROCESŮ VE VRSTVÁCH INTENZIVNÍ VEGETAČNÍ STŘECHY

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

DIZERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. DÁŠA SUKOPOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Doc. et Doc. Ing. MILAN VLČEK, CSc

BRNO 2021

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. Chladicí účinek vegetace 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 přehřívá minimálně a zůstává i za horkého letního dne relativně chladný. Vegetační souvrství tak může v letním období výrazně zredukovat vstup tepla skrze střechu z vnějšího do vnitřního prostředí. V zimním období pomáhá větší vrstva substrátu snižovat tepelné ztráty a náklady na vytápění. 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. Výhodou pak je, že čerstvou zeleninu si můžeme vypěstovat v místě, kde bydlíme a nemusíme ji dovážet zdaleka. Mimo jiné výhody střešní zahrady napomáhají zvyšování biodiverzity a poskytují stanoviště pro různé druhy hmyzu a ptáků.

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 cooling effect of vegetation is caused primarily by the heat accumulation of their own retained water, the ability of plants to evaporate water, reflect solar radiation and use solar energy for the process of photosynthesis. The surface covered with plants overheats minimally and remains relatively cool even on a hot summer day. The vegetation formation can thus significantly reduce the heat transfer through the roof from the outside to the inside in the summer. In winter, a larger layer of substrate helps reduce heat loss and heating costs. 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. The advantage is that we can grow fresh vegetables in the place where we live, and we do not have to import them from afar. Among other things, the benefits of the roof garden help increase biodiversity and provide habitat for various species of insects and birds.

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

Bibliografická citace VŠKP

SUKOPOVÁ, Dáša. *Analýza teplotních a vlhkostních procesů ve vrstvách intenzivní vegetační střechy*. Brno, 2018. 303 s. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních staveb. Vedoucí práce doc. et doc. Ing. Milan Vlček, CSc.

**PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ
FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE**

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané disertační práce s názvem Analýza vlhkostních a teplotních procesů ve vrstvách intenzivní vegetační střechy je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne

.....
Podpis autorky disertační práce
Ing. Dáša Sukopová

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem disertační práci s názvem „Analýza vlhkostních a teplotních procesů ve vrstvách intenzivní vegetační střechy“ zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne

.....
Podpis autorky disertační práce
Ing. Dáša Sukopová

PODĚKOVÁNÍ

V úvodu bych chtěla poděkovat především rodině za pomoc a trpělivost při zpracování mé disertační práce a také svému školiteli Doc. et Doc. Ing. Milanu Vlčkovi, CSc. za odbornou pomoc a cenné rady.

OBSAH

1	ÚVOD	10
2	SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	14
2.1	Fyzikální děje ve vrstvách intenzivní vegetační střechy	16
2.1.1	Sluneční energie, biochemické děje v rostlinách	16
2.1.1.1	Fotosyntéza	21
2.1.1.2	Odpařování vody rostlinami	23
2.1.1.3	Požadavky rostlin na elektromagnetické záření.....	26
2.1.1.4	Teplota rostlin	29
2.1.2	Půda a fyzikální děje v půdě	31
2.1.2.1	Půda jako součást střešní zahrady.....	31
2.1.2.2	Složení, vznik a dělení půd.....	32
2.1.2.3	Půdní vzduch	38
2.1.2.4	Půdní voda, chemické a fyzikální vlastnosti vody.....	39
2.1.2.5	Vodní režim půdy.....	46
2.1.2.6	Půdní vlhkost	48
2.1.2.7	Proudění vody v nenasyceném a nasyceném pórovitém prostředí.....	49
2.1.2.8	Teplo v půdě	54
2.1.2.9	Tepelně technické parametry související s danou problematikou.....	58
2.1.2.10	Vedení tepla v půdě.....	62
3	CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE A METODY ZPRACOVÁNÍ.....	65
3.1	Cíle disertační práce	65
3.2	Metody zvolené k realizaci cílů.....	66
3.3	Popis lokality a objektu měření	67
4	VÝSLEDKY MĚŘENÍ.....	72
4.1	Výsledky měření – 1. část.....	72
4.1.1	Výsledky měření – zimní období	86
4.1.2	Výsledky měření - letní období.....	99
4.2	Výsledky měření – 2. část	106
4.3	Výsledky měření – 3. část	114
4.4	Výpočet dvourozměrného stacionárního teplotního pole v konstrukci pomocí programu Area 2017	139

4.5	Výpočet teploty vzduchu v interiéru v modelovém dni pro letní období pomocí programu Simulace 2018, tepelná stabilita v letním období	144
4.6	Závěr	148
5	Seznam použité literatury	150
6	Seznam příloh	165

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. Města jsou budována z materiálů, které sluneční záření špatně odrážejí. 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 půdy a 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. Ohřívá 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. Věda se zaměřuje na výzkum materiálů, které jsou schopny odrážet sluneční záření zpět do atmosféry (sluneční odrazivost – *angl. solar reflectance*). Vyšší faktor „sluneční odrazivosti“ má za následek to, že střecha zůstane chladnější především za horkých letních dnů, tzv. chladná střecha (*angl. cool roof*). Četné výzkumy ukazují, že zvýšení odrazivosti povrchů může mít významný vliv na snížení extrémních teplot ve městech i venkovských oblastech. Dalším významným parametrem, který je sledován, je tepelná emisivita (*angl. thermal emittance*). Jednotlivé materiály mají různou schopnost pohlcovat a vyzařovat tepelné záření. Stanovení hodnot sluneční odrazivosti a tepelné emisivity je důležité zejména u stavebních (zejména střešních) materiálů, jelikož se může významně podílet na snížení nákladů na vytápění a spotřebu energie vynaloženou na chlazení. Hlavním parametrem, který umožňuje vyjádřit schopnost materiálů odrážet a vyzařovat sluneční záření je tzv. SRI index (Index odrazivosti slunečního záření – *ang. Solar Reflectance Index*)¹, který vyjadřuje kombinaci obou vlastností – odrazivosti slunečního záření a emisivity (sálavosti) tepelného záření. Index SRI je definován, tak že SRI má hodnotu 0 pro standardní černou (odrazivost 0,05, emisivita 0,90) a hodnotu 100 je pro standardní bílou (odrazivost 0,80, emisivita 0,90). Čím vyšší je hodnota SRI, tím nižší by měla být teplota povrchu vystaveného slunečnímu záření a tím lepší jsou parametry z hlediska střešního materiálu pro „chladnou střechu“. Má-li střešní plocha vysokou sluneční

¹ Solar Reflectance. <https://www.sciencedirect.com> [online]. 2016, 2016 [cit. 2021-12-21]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/solar-reflectance>

odrazivost a vysokou tepelnou emisivitu bude snadno odrážet sluneční záření a snadno uvolňovat teplo, které neodrazí a absorbuje.

Podle řady vědeckých studií by systematická výměna tmavých povrchů za bílé mohla snížit maximální teplotu ve městech až o 2 až 3 °C. Bílé střechy mohou odrážet i třikrát víc záření než tmavé a natření každé střechy by podle vědců mohlo snížit efekt „městského tepelného ostrova“ přibližně o třetinu. Např. v USA, především ve velkých městech jako je New York, bylo za poslední roky vymalováno několik milionů m² střech na bílo². V Los Angeles byly vybarveny světlou barvou i asfaltové povrchy vozovky. Náklady a provoz 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 přispívat³. 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 zeď 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

² 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>

³ 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/>

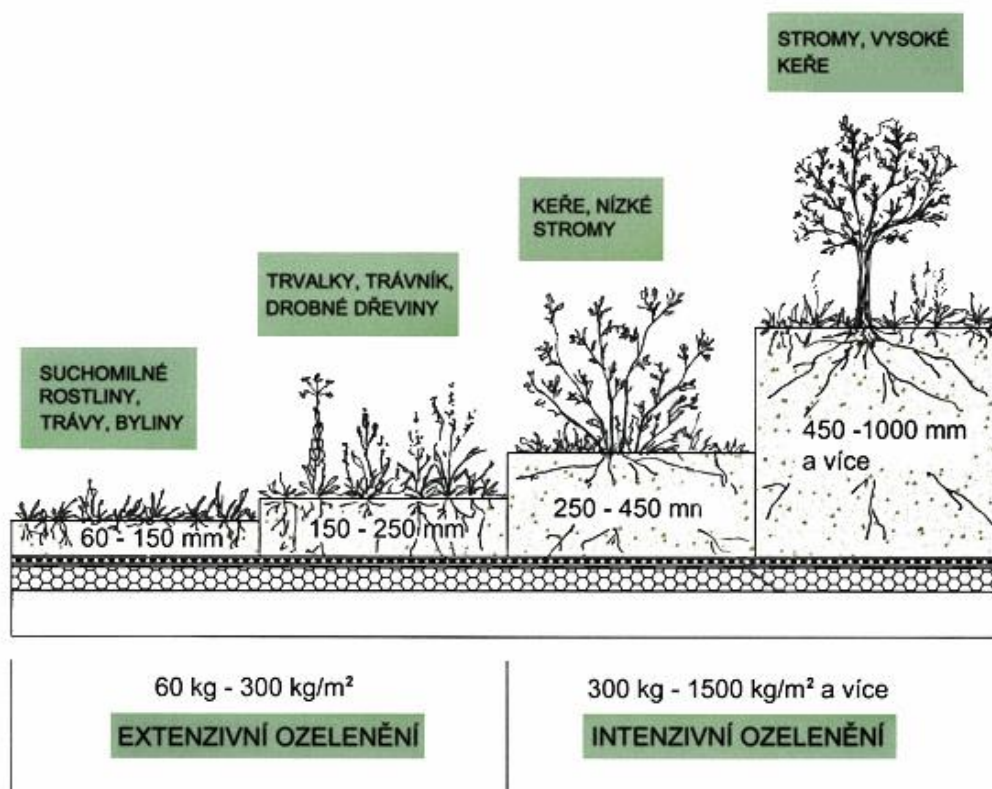
práci jsem se zaměřila především na jeden typ vegetačních střech, a to intenzivní vegetační střechy. V odborné literatuře bývají též označovány jako „střešní zahrady“.



Obr. 1.1- Příklad „bílé střechy“

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. Rozdělení ozelenění dle tloušťky substrátu (Obr. 2.1) není jednotné, podle různých pramenů se může lišit.^{4,5}



Obr. 2.1 - Typy ozelenění střech dle tloušťky substrátu

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.

⁴ ČERMÁKOVÁ, Barbora a Radka MUŽÍKOVÁ. *Ozeleněné střechy*. Praha: Grada, 2009. Stavitel. ISBN 978-80-247-1802-6.

⁵ MINKE, Gernot. *Zelené střechy: plánování, realizace, příklady z praxe*. Ostrava: HEL, 2001. ISBN 80-86167-17-8.

V posledních desetiletích nabývá na významu pěstování zemědělských plodin na střechách budov, vznikají tzv. *městské střešní farmy* (angl. *Urban rooftop farming*) – viz obr.2.2, obr.2.3 a obr.2.4, 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.⁶

Obr. 2.3 - Střešní zahrada o ploše 600 m² s 90 tunami půdy (Kodaň, Dánsko) na pětipodlažní budově nad aukcí starých automobilů⁷



Obr. 2.4 - Jedna ze tří střešních farem v New Yorku (Brooklyn Navy Farm, obdělávaná plocha 6039 m²). Na třech střechách o rozloze 5,6 akrů (12 542 m²) půdy je ročně vyprodukováno 80000 Ibs (36287,4 kg) ekologicky pěstovaných zemědělských produktů, je zde provozováno i 40 včelínů.⁸

⁶Dakaker. 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>

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

⁸Brooklyn Grange: Green roofs. www.brooklyngrangefarm.com [online]. [cit. 2021-7-26]. Dostupné z: <https://www.brooklyngrangefarm.com/green-roofs>

Takové farmy se nacházejí např. v USA (Brooklyn, New York), Asii (Čína, Thajsko) i na mnoha místech v Evropě (Norsko, Dánsko a další). Inovativní způsob hospodaření na střeších umožňuje pěstování potravin přímo ve městech a zároveň poskytuje možnost lépe využívat dosud nevyužité plochy. Výhodou je, že vypěstovanou zeleninu spotřebitel dostane čerstvou, protože nemusí být dovážena zdaleka. K závlaze rostlin může být využita dešťová voda ze střešních, příp. i filtrovaná odpadní voda z domácností.

Střešní zahrady poskytují náhradní prostor pro odpočinek i pro podnikání. Mimo jiné mohou tvořit součást zdravotnických zařízení a přispívat k urychlení léčby pacientů. Nelze opomíjet význam vegetační souvrství ani z hlediska stavebně-technického. Vrstva substrátu a vegetace chrání stavební materiály před působením povětrnostních podmínek a extrémními výkyvy teplot. Dokáže prodloužit jejich životnost i o několik desítek let. V letním období vegetační střechy přinášejí úsporu energie jinak spotřebovanou na provoz klimatizačních zařízení a v zimě mohou přispívat ke snížení tepelných ztrát. Možnosti střešních zahrad lze rozšířit také např. alternativními metodami pěstování rostlin (hydroponie, aeroponie). Tyto metody mohou podstatně snížit hmotnost vegetačního souvrství a zatížení střechy.

2.1 Fyzikální děje ve vrstvách intenzivní vegetační střechy

2.1.1 Sluneční energie, biochemické děje v rostlinách

Hlavním zdrojem energie pro všechny důležité procesy na Zemi je tok záření ze Slunce (solární radiace). Efektivní teplota povrchu Slunce se odhaduje na 5780 K (teplota fotosféry - viditelného povrchu Slunce), teplota v jádru je mnohem vyšší, odhadujeme ji na 15 000 000 K. Výkon vyzařované energie je přibližně $3,9 \times 10^{26} \text{ W (J}\cdot\text{s}^{-1})$. Zdrojem slunečního záření jsou jaderné reakce – termonukleární fúze, probíhající v jádrech hvězd. Při termonukleárních fúzích dochází ke slučování lehčích jader prvků v jádra těžších prvků, přesněji ke slučování jader atomu vodíku (protonů) v jádro helia, čímž se uvolňuje velké množství energie. V hlubších vrstvách Slunce za vysokých teplot a extrémního tlaku probíhá tzv. proton-protonový cyklus. Z proton-protonové reakce (PPI, PPII) získává naše Slunce převážnou část veškeré energie.

Zbývající část (přibližně 2 %) získává z CNO cyklu (způsob přeměny vodíku na helium u hvězd hmotnějších než Slunce). K přeměně dochází za účasti katalyzátorů reakce, kterými jsou atomy uhlíku, dusíku a kyslíku. Energie ve Slunci se šíří směrem od jádra zářením (radiační zóna - částice vysílají fotony, jiné je pohltí), blíže k povrchu se energie šíří konvekcí (konvektivní zóna - teplejší plazma stoupá vzhůru a chladnější klesá dolů). Slunce vyzařuje energii v širokém rozmezí vlnových délek, které tvoří spojité spektrum elektromagnetického vlnění od gama záření až po rádiové vlny. Téměř veškeré sluneční záření dopadající na Zemi patří do oblasti vlnových délek 200-3000 nm s maximem kolem 480 nm. Na povrch planety dopadá záření ve formě ultrafialového záření (UV- *angl. Ultraviolet*), viditelného (VIS- *angl. Visible*) a infračerveného záření (IR- *angl. Infrared*). Vymezení jednotlivých oblastí spektra bylo převzato z ISO 21348:2007⁹ (podle různých zdrojů se rozdělení oblastí může lišit).

Ultrafialové záření (UV) ($100 \text{ nm} \leq \lambda < 400 \text{ nm}$) je pro člověka neviditelné. Z hlediska biologických účinků je dělíme do tří oblastí.

Krátkovlnné UVC ($100 \text{ nm} \leq \lambda < 280 \text{ nm}$) je zcela pohlcováno plyny v horních vrstvách zemské atmosféry, z převážné části ve stratosféře ozonovou vrstvou. Pro živé organismy je škodlivé.

UVB ($280 \text{ nm} \leq \lambda < 315 \text{ nm}$) je částečně absorbováno zemskou atmosférou (ozónová vrstva), malé procento záření dosahuje na zemský povrch. Při narušení ozonové vrstvy se procento dopadajícího záření zvyšuje. UVB je pro živé organismy nebezpečné, vede k poškození DNA, ke vzniku nádorových onemocnění, poškození rohovky očí apod. U rostlin může způsobovat poškození jejich orgánů, mutace, omezovat fotosyntézu aj.

Dlouhovlnné UVA ($315 \text{ nm} \leq \lambda < 400 \text{ nm}$) záření téměř zcela proniká ozónovou vrstvou a dopadá na zemský povrch.

Intenzita dopadajícího UV na zemský povrch závisí na zeměpisné šířce, ročním období a denní době. Čím blíže se pohybujeme k rovníku, tím je záření silnější, nejslabší UV záření je na pólech. V letním období je dopadající záření intenzivnější než v zimě. Množství UV záření ovlivňuje i poloha Slunce během dne. Čím výše stojí Slunce na obloze, tím více UV záření dopadá na zemský povrch. Na intenzitu UV záření má vliv obsah ozonu v atmosféře,

⁹BS ISO 21348:2007- Space environment (natural and artificial) - Process for determining solar irradiances; Published in Switzerland, Dostupné z: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/53aee542-8f22-4f5f-ba6b-f83d55fd21d6/iso-21348-2007>

koncentrace prachových částic a aerosolů v ovzduší, vrstva oblačnosti a odrazivost povrchu. Dle síly ozónové vrstvy je UV vyšší na jižním pólu (nad Antarktidou), v posledních letech se tvoří ozonová díra i na severním pólu (nad Arktidou). Nadmořská výška zvyšuje intenzitu UV záření asi o 10 % na 1000 m.

Viditelné záření (VIS) ($380 \leq \lambda < 760 \text{ nm}$) představuje viditelné světlo. Naše oko je zachytí v rozmezí vlnových délek (400-750 nm). Pohlcována je jen jeho malá část. Barva závisí na vlnové délce (fialová, modrá, zelená, žlutá, oranžová, červená). V rostlinné fyziologii se používá pojem *fotosynteticky aktivní záření FAR* (angl. *PAR Photosynthetically Active Radiation*). Patří sem záření o vlnových délkách přibližně 400-700 nm.

Infračervené záření (IR) ($760 \text{ nm} \leq \lambda < 1,00 \text{ mm}$). IR záření od 0,7-3 μm snadno proniká atmosférou, lidské oko na ně není citlivé. IR nad 3 μm pocítujeme jako teplo. Oblast od 8-15 μm je označována jako tepelné infračervené záření, nebo též oblast termovizního zobrazování. Při absorpci infračerveného záření objektem dochází ke změnám rotačně vibračních energetických stavů molekul v závislosti na změně jejich elektrického dipólového momentu. V důsledku vibrace molekul je tepelné záření z objektů i vyzařováno. Materiály s vyšší emisivitou se jeví teplejší, zatímco materiály s nižší emisivitou jako chladnější, což má např. vliv na výsledky při používání infračervených kamer. Objekty při běžné pokojové teplotě vyzařují v pásmu 8-25 μm , vyzařování člověka je přibližně na vlnových délkách asi 10 μm . Množství absorbovaného a emitovaného infračerveného záření ovlivňuje výměnu energie mezi Zemí a atmosférou a má vliv na zemské klima, v současné době na globální oteplování.

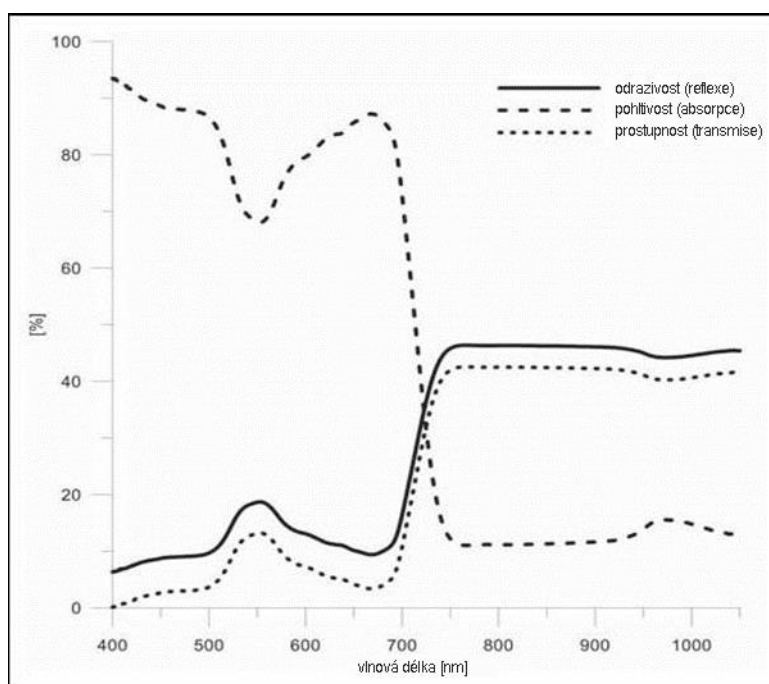
Tok energie ze Slunce na Zemi činí přibližně $1,4 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ ($E_0 = 1367 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$). Množství energie, tzv. solární konstanta (*TSI – Total Solar Irradiance*) představuje celkový tok slunečního záření v celé oblasti spektra u Země vně zemské atmosféry, který dopadá na plochu 1 m^2 , kolmou na směr paprsků za 1 s ve střední vzdálenosti Země od Slunce. Ve skutečnosti solární konstanta kolísá - přibližně kolem 3% (asi $40 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$) vlivem tvaru oběžné dráhy Země kolem Slunce. Menší změny mají za následek také cykly sluneční aktivity, na které však připadá jen několik desetin procenta. Průměrná hodnota množství slunečního záření (*insolace – oslunění*) je rovna jedné čtvrtině sluneční konstanty – přibližně $342 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Je to způsobeno rotací planety, kdy je energie rozdělována na celý povrch planety ($4 \pi r^2$). Konkrétní množství energie, které dopadne na zemský povrch v určitém čase a místě je ovlivněno zeměpisnou šířkou, stavem atmosféry a ročním obdobím. Průměrný tok slunečního záření na zemský povrch v rovníkové oblasti Slunce v zenitu je přibližně 1000 W . Z celkového množství dopadajícího záření

přibližně 32 W připadá na ultrafialové záření, 445 W na viditelné záření a na infračervené záření přibližně 527 W.

Sluneční záření dopadající na povrch planety se částečně odráží zpět do vesmíru, část záření je spotřebována při průchodu plynným obalem atmosféry na ohřev a vypařování vody. Vodní pára a některé plyny (oxid uhličitý, metan, oxid dusný, ozon a další) obsažené v atmosféře absorbované záření vyzařují zpět k povrchu – příčina skleníkového efektu, kdy se povrch planety ohřívá na vyšší teplotu, než by měl bez atmosféry. Část slunečního záření, která dosáhne na povrch planety, je absorbována tenkou horní vrstvou povrchu, půdy nebo vody a mění se na teplo. Část záření se odráží a znovu se vrací do atmosféry. Ultrafialové záření absorbované zemským povrchem je zpět vyzařováno jako *dlouhovlnné infračervené (tepelné) záření*. Paprsky ze Slunce dopadají na zemský povrch jednak přímo – *přímé sluneční záření* (insolace), jednak odrazem z jiných částí oblohy - *rozptýlené (difuzní) sluneční záření* z prostorového úhlu 2π . Souhrnně je označováno jako *globální sluneční záření* a představuje tok krátkovlnného záření směřující dolů. Po odrazu od horní části mraků a od povrchu směřuje tok záření nahoru a nazýváme je *odražené globální sluneční záření*. Intenzita odraženého záření závisí na albedu povrchu a oblačnosti. Zastíněné části povrchu jsou vystaveny především odraženému záření. Množství odraženého záření závisí na vlastnostech povrchu. Např. stromy s hustou korunou mohou snížit dopadající UV záření přibližně o 20%. Je-li povrch přirozený (lesy, louky, pole) nahrazován umělými materiály a jakýmikoliv jinými materiály, které absorbují sluneční záření, dochází k ohřívání povrchu více než u okolní krajiny. Poměr odraženého elektromagnetického záření k množství dopadajícího záření nazýváme *albedo*. Jeho hodnota se pohybuje mezi 0 a 1. Nula představuje černou barvu (povrch je dokonalý absorbér), jednička barvu bílou (povrch je dokonalý reflektor). Hodnota je obvykle vyjadřována v %. Albedo se obecně vztahuje na viditelné světlo, i když někdy může zahrnovat záření z infračervené oblasti spektra. Průměrné albedo Země je asi 37-39%, albedo sněhu je asi 90 %. Albedo travnatého povrchu je přibližně 20 %. Městské oblasti se vyznačují nepřirozenými albedy. Záření je také pohlcováno materiály různých struktur, vzniklých lidskou činností dříve, než dosáhne povrchu. Jsou-li povrchy tmavé, jejich průměrné albedo je přibližně 7%. Např. lesnaté oblasti mají albedo také nízké (přibližně kolem 10%), ale mnohem významnější je jejich ochlazovací efekt zapříčiněný výparem vody. Svými vlastnostmi jsou rostliny a stromy schopny vytvořit dokonalou přírodní klimatizaci. Podle množství a intenzity dopadajícího slunečního záření odpařují pomocí průduchů (stomat, z řec. στόμα -ústa) vodní páru a ochlazují tak své okolí. Při dopadu slunečního záření do porostu rostlin dochází částečně k odrazu záření od

jejich povrchu (reflexe), část záření je pohlcena (absorpce) a část projde povrchem rostliny (transmise). Povrchem aktivně reagujícím na dopadající záření je u rostlin především plocha listů.

Reflexí (odrazem) je část zářivé energie dopadající na listy odrazena zpátky do ovzduší. U jednotlivých vlnových délek je množství odražené energie různé a závisí na postavení listů, úhlu dopadajícího záření a také na struktuře povrchu listu (hladký, matný, lesklý, pokrytý chlupy apod.). Lesklé listy odrážejí více, matné a pokryté chlupy méně. Množství odražené zářivé energie představuje přibližně 10-20 % kolmo dopadajících paprsků podle druhu porostu. (např. v jehličnatých porostech 10 -14 %, v listnatých porostech 13-17 %). Listy s větším turgorem (napětí, závisící na dostatku či nedostatku vody v rostlině) odrážejí více než listy povadlé.



Obr. 2.5 - Míra odrazivosti, absorpce a propustnosti listem kukuřice (BBCH Stadium 31)¹⁰

¹⁰LILIENTHAL Holger, Optische Sensoren in der Landwirtschaft: Grundlagen und Konzepte, JOURNAL FÜR KULTURPFLANZEN, 66 (2). S. 34–41, 2014, ISSN 1867-0911, DOI: 10.5073/JFK.2014.02.01 VERLAG EUGEN ULMER KG, STUTTGART, Dostupné z: <https://silo.tips/download/optische-sensoren-in-der-landwirtschaft-grundlagen-und-konzepte>

Absorpci (vstřebáváním) je část dopadající sluneční energie rostlinou pohlcována. Absorpce záření je pro využití energie v látkové přeměně rostlin nezbytná, avšak *na fotosyntézu je využita jen malá část slunečního záření (přibližně 1 %)*, značná část absorbované energie se přemění na teplo. Teplo je využito k přeměně vody ve vodní páru a uvolňuje se s ní do okolí jako tzv. teplo výparné (k odpaření 1 kg vody je třeba 2442 kJ).

Transmisí (propouštěním) část dopadajícího záření prochází listem. Množství prošlého záření závisí na tloušťce listu. Tenké listy mohou propouštět až 40 %, středně tlusté 10-20%, silné mohou být i nepropustné.

Na obr. 2.5 je znázorněno množství záření, které bylo odraženo, absorbováno a prostoupilo (prosvítalo) přes list kukuřice. Hodnoty jsou vyjádřeny v procentech. Naměřenou hodnotou je zde odrazivost, která popisuje poměr intenzity odraženého a dopadajícího záření.

2.1.1.1 Fotosyntéza

Význam rostlin pro všechny živočichy spočívá především v jejich schopnosti vázat kyslíčnick uhlíčitý (CO₂) a vyrábět kyslík (O₂). Rostlina zachytí světelnou energii pomocí rostlinných barviv (chlorofyly a,b, fykocian, fykoerytrin, xantofyly a karotenoidy), které jsou v ní obsaženy. Barvivo neboli pigment má schopnost absorbovat sluneční záření a energii světelného kvanta přeměnit na energii chemickou. Ta se ukládá do molekul glukózy (C₆H₁₂O₆) v procesu nazývaném *fotosyntéza*^{11,12}. Jedná se o složitý několikastupňový proces, při kterém probíhají složité biochemické děje (ve dvou fázích). Primární fáze probíhající za přítomnosti světelného záření (světlá fáze), se uskutečňuje v chloroplastech (buněčné organely schopné fotosyntézy). Zahrnuje procesy související s pohlcováním a přeměnou slunečního záření. Energie fotonů je v této fázi využita ke štěpení vody (fotolýza), vedlejším produktem je kyslík (O₂), a k tvorbě molekul ATP (adenosintrifosfátu), které slouží jako zdroj energie v tmavé fázi. Výsledné produkty primární fáze jsou redukované koenzymy NADH + H⁺, adenosintrifosfát ATP a kyslík O₂.

¹¹ JELÍNEK, Jan a Vladimír ZICHÁČEK. *Biologie pro gymnázia: (teoretická a praktická část)*. 9., rozš. vyd. Olomouc: Nakladatelství Olomouc, 2011. ISBN 978-80-7182-213-4, 579 s.

¹² BŘÍŽĎALA, Jan. Fotosyntéza. [Http://e-chembook.eu](http://e-chembook.eu) [online]. [cit. 2021-7-28]. Dostupné z: <http://e-chembook.eu/fotosynteza>

Sekundární fáze, která probíhá ve tmě (tmavá fáze), se odehrává ve stromatu (výplňová hmota chloroplastů). Zahrnuje procesy přeměny oxidu uhličitého (CO₂) na sacharidy (D-glukosu C₆H₁₂O₆) za využití redukovaných koenzymů NADPH + H⁺ a adenosintrifosfátu ATP, produktů vzniklých v primární fázi fotosyntézy. Mezi nejběžnější způsob přeměny patří tzv. Calvinův proces.

Zjednodušeně můžeme fotosyntézu popsat chemickou rovnicí (2.1):



Rostliny přijímají z půdy vodu (H₂O) a ze vzduchu oxid uhličitý (CO₂). Působením světla dochází v listech k reakci, při níž vzniká kyslík a glukóza C₆H₁₂O₆. Kyslík (O₂) je uvolňován do vzduchu, kde jej dýchají živočichové a vydechují oxid uhličitý (CO₂). Glukóza (monosacharid) bohatá na energii se následně přeměňuje na látky potřebné k růstu rostliny – asimiláty (škrob, bílkoviny, tuky a další organické látky). Při procesu dýchání (respirace) u rostlin je naopak produkován kyslíčnan uhličitý (CO₂) a spotřebováván kyslík (O₂), avšak rostliny spotřebují jen asi 1/5-1/3 látek vyrobených fotosyntézou. Proces dýchání rostlin (buněčné dýchání) souvisí s využitím zásobních látek (asimiláty), které vznikly během procesu fotosyntézy. Energie z těchto zásobních látek je uvolňována rozkladem na látky jednodušší (disimilace). Během fotosyntézy je energie slunečního záření ukládána pomocí redukce oxidu uhličitého do molekul glukózy. Aby bylo možné takto uloženou energii využít pro buněčné dýchání, musí molekula glukózy projít opačným procesem – oxidací.

Proces dýchání můžeme popsat rovnicí (2.2):



Buněčné dýchání probíhá v několika etapách. První etapa buněčného dýchání se nazývá *glykolýza*. V této etapě dochází k přeměně glukózy na kyselinu pyrohroznovou. Tento proces je anaerobní (probíhá bez přístupu vzduchu). V druhé etapě je kyselina pyrohroznová dekarboxylována na oxid uhličitý během tzv. Krebsova cyklu (cyklu kyseliny citronové) a dochází k její dehydrogenaci (odnětí vodíků). Vodíky odebrané během dekarboxylace jsou v dýchacím řetězci oxidovány pomocí vzdušného kyslíku na vodu. Během tohoto procesu vzniká energie, která se ukládá do molekul ATP (adenosintrifosfát) a slouží k zajištění energie

životních funkcí buněk.¹³ Další část energie se uvolňuje jako teplo. Tato fáze již probíhá za přístupu vzdušného kyslíku – aerobní proces.

Na základě rozdílného metabolismu rozdělujeme rostliny do skupin C3, C4 a CAM. Jednotlivé skupiny se liší podle způsobu fixace CO₂ v procesu fotosyntézy. Do skupiny C3 patří rostliny mírného pásma (hrách, rýže, pšenice, brambory, rajčata, špenát, ovocné stromy atd.). Rostliny typu C4 jsou rostliny tropického pásma (kukuřice, cukrová třtina aj).

Mezi rostliny CAM (Crassulacean Acid Metabolism) patří rostliny tučnolisté (*Crasulacea*), které jsou přizpůsobeny pro suché a horké podnebí (např. ananas, agáve). CO₂ fixují podobným způsobem jako C4-rostliny, ale jejich stomata jsou pro sběr CO₂ otevřena až noci, aby bylo zamezeno jejich nadměrnému vysychání, zatímco skupiny C3 a C4 mají stomata otevřená během dne. Rostliny C3 začleňují CO₂ do tříuhlíkatých sloučenin, rostliny C4 do čtyřuhlíkatých sloučenin. Rostliny C3 mají největší účinnost ve vlhkém stavu, C4 a CAM v suchém stavu.¹⁴

2.1.1.2 Odpařování vody rostlinami

Mezi další důležité procesy, které probíhají v rostlinách patří transpirace. Při procesu *transpirace* se z povrchu rostlin odpařuje voda ve formě vodní páry. Pomocí tohoto mechanismu uvolňuje rostlina přebytečnou vodu a proces zároveň slouží k jejímu ochlazení. K regulaci rychlosti odpařování slouží otvory v pokožce – průduchy (*stomata*), na spodní straně listů, kterými se dostává voda z rostliny na její povrch. Tyto otvory jsou uzavíratelné a umožňují regulaci rychlosti odpařování vody. Průduch se skládá z průduchové štěrbiny a svěracích buněk. Přijmou-li svěrací buňky vodu, stoupne jejich vnitřní tlak (*turgor*), průduchová štěrbinu se zvětší a otevře, zatímco při nízkém turgoru se štěrbinu uzavře.

Transpirace je ukončením transpiračního proudu, který umožňuje rostlině příjem vody a minerálních živin a zabraňuje jejich přehřívání. Díky transpiraci funkční vegetace do značné míry aktivně ovlivňuje teplotu svého povrchu. Husté souvislé rostlinné porosty transpirací

¹³ NOBEL, Park S., *Physicochemical and Environmental Plant Physiology*. 4th edition. Amsterdam, Academic Press (2009), ISBN 978-0-12-374143-1, Pages 604.

¹⁴ SAGE, Rowan F., *Photosynthetic efficiency and carbon concentration in terrestrial plants: the C₄ and CAM solutions*, *Journal of Experimental Botany*, Volume 65, Issue 13, July 2014, Pages 3323–3325, <https://doi.org/10.1093/jxb/eru262>

vyrovnávají teplotní rozdíly mezi dnem a nocí, proto jsou na územích bez vegetace velké rozdíly mezi denní a noční teplotou.

Příbuzným jevem transpirace je gutace. Gutací rostliny vyloučí pomocí hydátod (nejčastěji na okrajích listů) větší množství vody v kapalně formě, v které mohou být rozpuštěné minerální látky (NaCl, CaCO₃, KCl, MgCl₂...). Rostliny gutují v přírodě ve vlhkém vzduchu, nejčastěji v noci a nad ránem, když teplota poklesne a vzduch je téměř nasycený vodními parami.

S transpirací rostlin úzce souvisí termín evapotranspirace, což je celkový výpar, který se vztahuje k určitému území. Termín je spojením slov evaporace (výpar z půdního nebo vodního povrchu nezakrytého vegetací) a transpirace (výdej vody z vegetace). Udává vrstvu vody v mm, která se za určitý čas uvolní do atmosféry. Hodnotu evapotranspirace ovlivňují především klimatické podmínky a půdní poměry. Konkrétně je významná půdní vlhkost, intenzita vztlínání vody v půdě, reliéf (sklon, expozice, nadmořská výška), hloubka hladiny spodní vody, teplota vzduchu a teplota půdy, vítr, vlhkost vzduchu a atmosférický tlak. Na vodou nasycených půdách závisí výpar na pohybu vzduchu, většinou dosahuje hodnoty 10 až 15 mm denně. V podmínkách lesních porostů je výše výparu z povrchu půdy silně ovlivněna vegetační vrstvou. Vítr zvyšuje potenciál pro evapotranspiraci. Aktuální evapotranspirace představuje množství vody, které se skutečně odpaří a které probíhá v reálných přírodních podmínkách. Její stanovení je poměrně obtížné.

Vegetace se nejen významně podílí se na výparu do atmosféry, ale také ovlivňuje množství srážkové vody, která dopadne do půdy. Část vody, která dopadá do porostu rostlin, se působením povrchového napětí zadrží na povrchu vegetace. Množství zadržené vody je závislé na druhu, hustotě vegetace, na délce trvání srážek a jejich intenzitě. Tato část vody se neúčastní infiltrace do půdy, jelikož nedopadá na její povrch, ale vrací se zpět do ovzduší (intercepce).

Zadržená voda na vegetaci je odpařena rychleji (evaporací nebo sublimací), než voda evaporací z půdy nebo transpirací z listů rostlin. Intercepce se může vyskytovat v kapalném skupenství (srážky) nebo v pevném skupenství ve formě sněhu a jinovatky. Vegetace sice může zadržet 10-50% srážkové vody, která se odpaří zpět do atmosféry, ale na druhé straně může snížit např. výpar vody z půdy (vysoušení).

Tab. 2.1 Index listové plochy u různých druhů porostů¹⁵

Druh porostu	Index listové plochy (LAI) m²/m²
Pole (zimní období)	0.2
Intenzivní louka (letní období)	7
Travní porosty	1–2
Jehličnatý les	5
Jedle Douglas	10-13
Smrk	5-10
Buk (letní období)	6–8
Dub	5–7
Borovice lesní	3-4
Modřín evropský	2-4
Bukový les (zimní období)	0.2
Kukuřice (32 rostlin / m ²)	10
Kukuřice (8 rostlin / m ²)	0,24

Důležitou charakteristikou vegetačních porostů při určování množství jimi zadržené vody je pokryvnost listoví, neboli *index listové plochy* (angl. *Leaf Area Index* – zk. LAI). Je definován jako celková plocha listů (jedna strana), u jehličnanů jehlic nad jednotkovou plochou půdy (m².m⁻²).¹⁶ Veličina je bezrozměrná, pro hodnotu 0 -1 je plocha listů menší než plocha pod vegetací. V tab. 2.1 jsou uvedeny LAI pro různé druhy porostů.

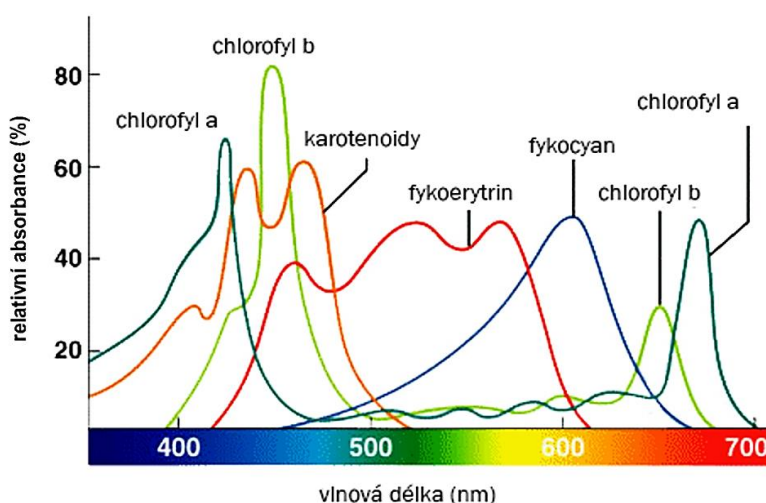
U jehličnatých stromů může být ztráta intercepce (množství zadržené vody na rostlinách nebo předmětech, která nikdy nedopadne na povrch půdy) v letních měsících přibližně 35% - 45 % spadlého deště dle druhu porostu a množství srážek, u listnatých stromů v průměru kolem 25%. Při vydatných srážkách se intercepční kapacita na rostlinách snižuje, vegetace není schopná udržet takové množství vody a voda propadává na povrch. LAI má vliv i na zpomalování odtoku při srážkách. Množství intercepce v porostech podléhá změnám v závislosti na ročním období. Např. listnaté stromy na zimu opadávají, zatímco jehličnaté si intercepční schopnost uchovávají po celý rok a i v zimním období na větvích zadrží velké množství srážek v podobě sněhové pokrývky. Ne všechna zadržaná voda se však odpaří, nepatrná část steče po kmeni a větvích stromů a keřů do půdy.

¹⁵ Blattflächenindex. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-6-28]. Dostupné z: <https://de.wikipedia.org/wiki/Blattfl%C3%A4chenindex>

¹⁶ POKORNÝ Radek, Stanovení indexu listové plochy v nesmíšených porostech lesních dřevin, Centrum výzkumu globální změny AV ČR, Brno, <http://www.nusl.cz/ntk/nusl-180899>, ISBN978-80-87902-08-0

2.1.1.3 Požadavky rostlin na elektromagnetické záření

Různá barviva absorbují jinou část světelného spektra. Z celého slunečního spektra je pro rostliny hlavním přímo využitelným zdrojem energie světla rozmezí vlnových délek 380 až 750 nm (některé zdroje uvádějí rozmezí 400-750 nm), tzv. fotosynteticky aktivní záření, zkr. FAR (*angl. Photosynthetically Active Radiation – zkr. PAR*). Vlnové délky viditelného světla se pohybují v intervalu 400 až 700 nm¹⁷.



Obr. 2.6 - Fotosyntetické pigmenty^{18,19}

Chlorofyl pohlcuje část slunečního záření v modrofialové části spektra a část v oblasti oranžovočervené (Obr. 2.6). Světlo ze střední části spektra se chlorofylem prakticky nepohlcuje, ale odráží se od listů. Obsahuje hlavně složky modrozelené, zelené a žluté. Naše oko z těchto barev vytvoří výslednou zelenou barvu. Zelené zbarvení listů je tedy způsobeno chlorofylem. Ten ve vegetační době zachycuje sluneční energii a díky fotosyntéze vytváří látky důležité pro stavbu rostliny. Listy obsahují i žlutá barviva (xantophyly) a oranžová barviva

¹⁷ HLADKÝ, Luděk. Osvětlení z pohledu rostlin. *Světlo* [online]. Praha: FCC PUBLIC, 2010(4), [cit. 2021-12-21]. ISSN 1212-0812. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/casopis/tema/osvetleni-z-pohledu-rostlin--15564>

¹⁸ Photosynthesis: Pigments and absorption spectra. <http://phototroph.blogspot.com/> [online]. 2008 [cit. 2021-7-27]. Dostupné z: <http://phototroph.blogspot.com/2006/11/pigments-and-absorption-spectra.html>

¹⁹ Metabolismus sacharidů: Fotosyntéza. http://web2.mendelu.cz/af_291_projekty2/vseo [online]. 2021 [cit. 2021-7-27]. Dostupné z: http://web2.mendelu.cz/af_291_projekty2/vseo/print.php?page=1883&typ=html

(karotenoidy). V podzimních měsících se zkracující se délkou dne klesá intenzita slunečního záření, dochází ke zpomalení procesu fotosyntézy a postupnému rozkladu zelených barviv (chlorofylů). Žlutá a oranžová barviva jsou proti rozkladu podstatně odolnější, proto zůstávají v listech i po rozkladu chlorofylů (barevné zbarvení listů na podzim).

K výrobě glukózy a k řízení buněčných procesů tedy potřebují rostliny během dne určité množství fotonů v dostatečné intenzitě z modré a červené části spektra slunečního záření (v rozsahu FAR). Intenzitu FAR lze vyjádřit fotosyntetickou hustotou fotonového toku v $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (angl. *Photosynthetic Photon Flux Density* - zkr. *PPFD*). PPFD udává, kolik fotonů dopadne na plochu rostliny za sekundu.²⁰

Na vývoj, růst a pohyb rostlin působí složení, intenzita a doba působení světla. Různé druhy rostlin mají odlišné požadavky na spektrum a intenzitu záření. Množství absorbovaného záření je závislé na úhlu, pod kterým dopadá na rostlinu (největší absorpce záření nastává při kolmém dopadu). Požadavky rostlin na spektrum se mění nejen v závislosti na druhu rostliny, ale i na fázi jejího vývoje. Jiné vlnové délky záření potřebují rostliny ve vegetační fázi růstu, jiné během cyklu, kdy kvetou. Bylo např. zjištěno, že pro svůj růst potřebují rostliny sluneční záření z modré části spektra a např. pro dobu kvetení záření z červené části spektra. Délka slunečního svitu ovlivňuje např. tvorbu semen, nástup kvetení, opadávání listů apod.

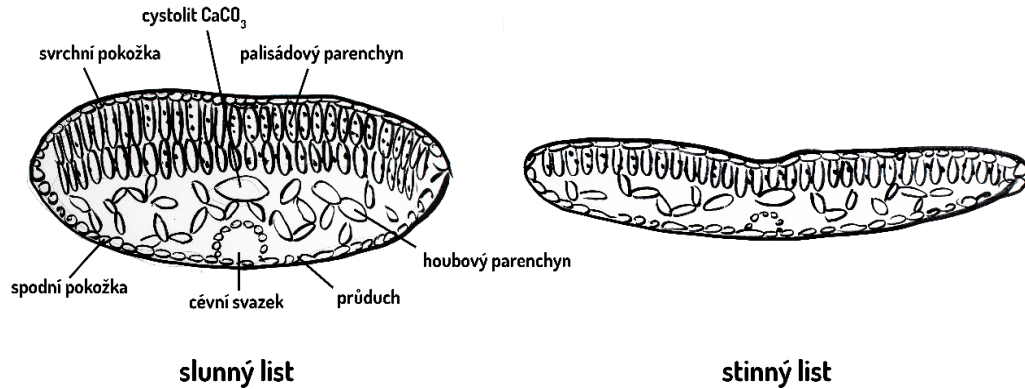
V souvislosti s ozářeností rostlin rozlišujeme dva typy listů s odlišnou funkcí a strukturou – slunné a stinné (obr.2.7). Příslušný typ listu je určen již během vegetačního období různými intenzitami světla během svého vývoje. Při vysoké intenzitě ozáření se palisádová struktura listů, která je fotosynteticky aktivní, vyvíjí ve více vrstvách na úkor houbovitě tkáně. U méně ozářených listů se vyvíjí palisádová struktura v jedné vrstvě.²¹

Slunné listy vystavené většímu ozáření (vyskytují se na vrcholu koruny stromu a na okrajích) jsou menší a tlustší, mají vyšší fotosyntetickou kapacitu (více ATP a NADPH + H⁺ pro zpracování oxidu uhličitého) a větší schopnost transpirace. Stinné listy (vyskytují se uvnitř

²⁰Photosynthetically active radiation. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2021-12-22]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Photosynthetically_active_radiation.

²¹Licht- und Schattenblätter. *Lernhelfer.de* [online]. Berlin: © Duden Learnattack GmbH, 2021, 2010 [cit. 2021-7-19]. Dostupné z: <https://www.lernhelfer.de/schuelerlexikon/biologie-abitur/artikel/licht-und-schattenblaetter>

koruny) mají větší plochu, menší tloušťku, přizpůsobují se lépe nedostatku slunečního záření a mají větší schopnost využití difuzního záření.²²



Obr. 2.7 - Stinný a slunný list

O světelných podmínkách získává rostlina informace svými fotoreceptory a reaguje na ně v procesu *fotomorfogeneze* – proces při kterém rostlina reaguje na světelný signál, aby mohla světlo využívat pro svůj další vývoj. Při fotomorfogenezi je světlo zachycováno pomocí pigmentů, které jsou součástí fotosenzorických fotoreceptorů červeného světla (fytochromy A až E- *angl. phytochromes*), modrého světla a UV-A (kryptochromy a fototropiny - *angl. cryptochromes, phototropins*).

Podle schopnosti fotosyntézy při určité hustotě světelného toku můžeme rostliny rozdělit na *sluncemilné* druhy (heliofytní), *světломilné* (fotofitní) a *stínomilné* (sciofitní).

Poškození rostlin nadměrným množstvím slunečního záření může nastat v různých fázích jejich vývoje. Přímým slunečním zářením může vést u rostlin k *slunečnímu úpalu*. Dlouhotrvající nadbytek slunečního záření působí poškození buněčných struktur působením volných

²² PALLARDY, Stephen G. Physiology of Woody Plants. 3rd Edit. San Diego: Academic Press, 2008. ISBN 978-0-12-088765-1,464 str.

kyslíkových radikálů – *fotooxidační stres*. Při nedostatku světla naopak může dojít k vybělení listů (*etiolizaci*) vlivem nízké tvorby chlorofylu.²³

2.1.1.4 Teplota rostlin

Rostliny nemají vnitřní regulaci teploty - jsou to tzv. *poikilotermické* organismy. Teplota rostliny není rovna teplotě vzduchu, ale je výsledkem tepelné bilance porostu. Rostliny patří mezi *ektotermní organismy*. Jsou závislé především na vnějších zdrojích tepla, především na slunečním záření. Vysoká teplotní vodivost jejich povrchu jim dovoluje snadno přijímat teplo ze svého okolí. Teplotu rostlin určuje rozdíl mezi pohlcenou a vydanou energií (2.3):

$$Q = I_s + I_L - R - C - G - Ph - Ev \quad (2.3)$$

Q – výsledný příjem energie do porostu

I_s – přítok krátkovlnného záření (méně než 700 nm)

I_L – přítok dlouhovlnného záření (včetně záření odraženého od povrchu planety a atmosféry)

R – dlouhovlnné záření odražené a zpět vyzářené

C – přenos tepla konvekcí (prouděním) – vzduchem

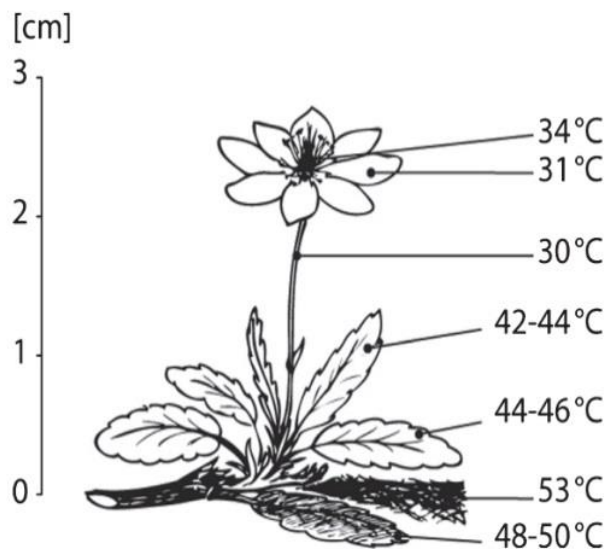
G – přenos tepla kondukcí (vedením) přes rozhraní listu a půdu

Ph – energie využitá na fotosyntézu

Ev – latentní teplo, které je spotřebováno na evapotranspiraci

Při přímém oslunění může být teplota listu až o 3-8 °C vyšší, než teplota ovzduší (*obr. 2.8*). Proti přehřátí rostliny působí odrazivost listů a ochlazování procesem transpirace. Na teplotě jsou závislé jednotlivé životní funkce rostlin. Teplotní limity jsou různé podle druhů. Každý rostlinný druh má různé teplotní maximum a minimum a různá teplotní optima pro jednotlivé fyziologické procesy. Překročení limitů má za následek přehřátí rostlin a následné poškození tkání rostlin vysokou teplotou (změny zbarvení, hnědé skvrny, opadání listů, pupenů květů, plodů, nekrózy tkání, odumírání částí apod.).

²³ HRUDOVÁ, Eva. Poškození rostlin světlem. *Web2.mendelu.cz* [online]. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, financováno projektem 35 f4d 2011 MŠMT FRVŠ, 2011 [cit. 2021-7-19]. Dostupné z: http://web2.mendelu.cz/af_291_sklad/frvs/hrudova/index_soubory/Page519.htm



Obr. 2.8 - Povrchová teplota rostliny v letním období (Tyrolské Alpy, měření W.LARCHER)²⁴

Podle tolerance rozsahu teplot dělíme rostliny na:

- eurytermní (odolávají teplotám v rozsahu od -5 do 55 °C, optimální teplota 20-25 °C)
- stenotermní (odolávají teplotám v úzkém teplotním rozsahu - v oblasti nízkých či vysokých teplot)

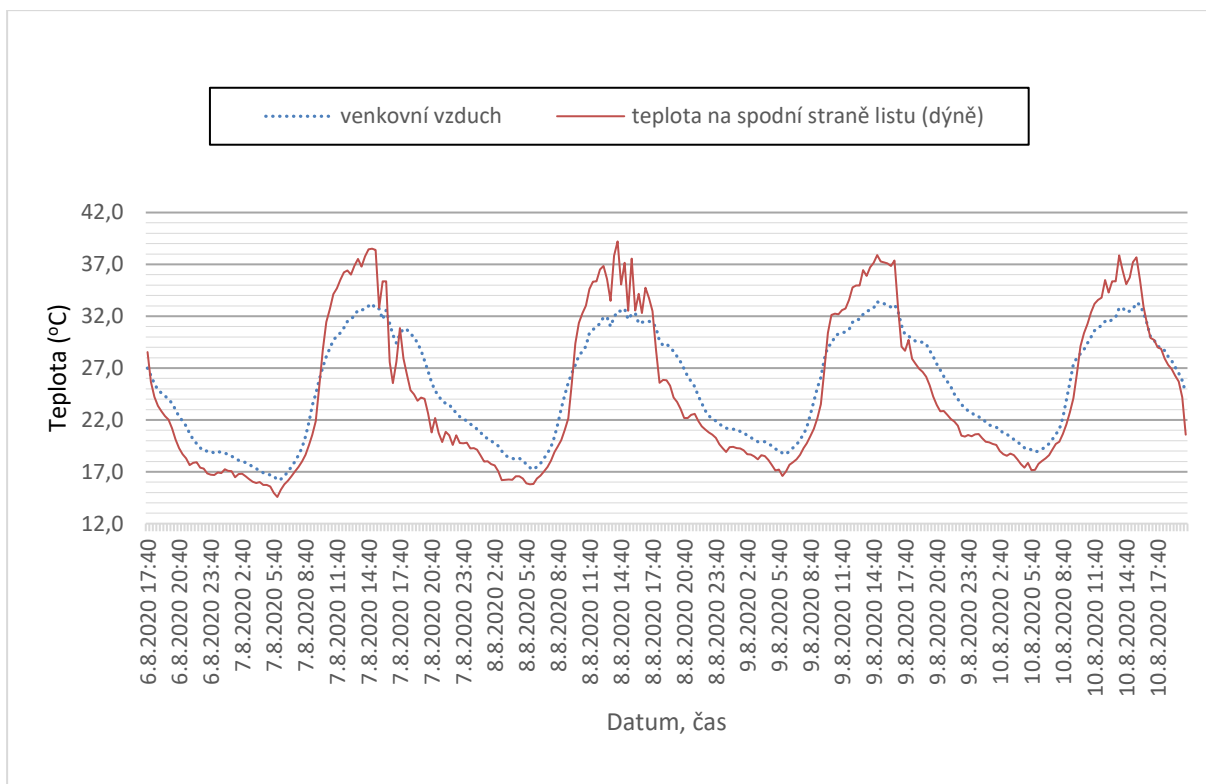
Podle požadavků na teplotu rozlišujeme termofyty (snášejí vysoké teploty), psychrofyty (snášejí nízké teploty) a kryofyty (rostoucí na sněhu)²⁵.

Na fyziologické procesy rostlin má vliv také teplota půdy. Procesy v rostlinách většinou probíhají v intervalu teplot od 5 do 35° C (pro naše podmínky je ideální teplota kolem 15-25 °C).²⁶ Nižší i vyšší teploty mohou zpomalit růst nebo způsobit úplné odumření rostliny. Např. teplota nad 30 °C může zastavit klíčení semen, poškodit kořenový systém apod.

²⁴ LARCHER, W., WAGNER, J. (2012). Temperatures in the Life Zones of the Tyrolean Alps. Sitzungsberichte und Anzeiger der mathematisch-naturwissenschaftlichen Klasse. 213. DOI:10.1553/SundA2009_2010sSI_2010_s31, Dostupné z: www.researchgate.net [2_8_2020]

²⁵ HRUDOVÁ, Eva. Poškození rostlin vysokými teplotami. <http://web2.mendelu.cz> [online]. Brno: financováno MŠMT FRVŠ, 2011, 2021 [cit. 2021-7-27]. Dostupné z: http://web2.mendelu.cz/af_291_sklad/frvs/hrudova/index_soubory/Page833.htm

²⁶ VELEBNÝ, Vladimír a kol. *Vodný režim pody*. Bratislava: STÚ, 2000, 208 s. ISBN 80-227-1373-2.



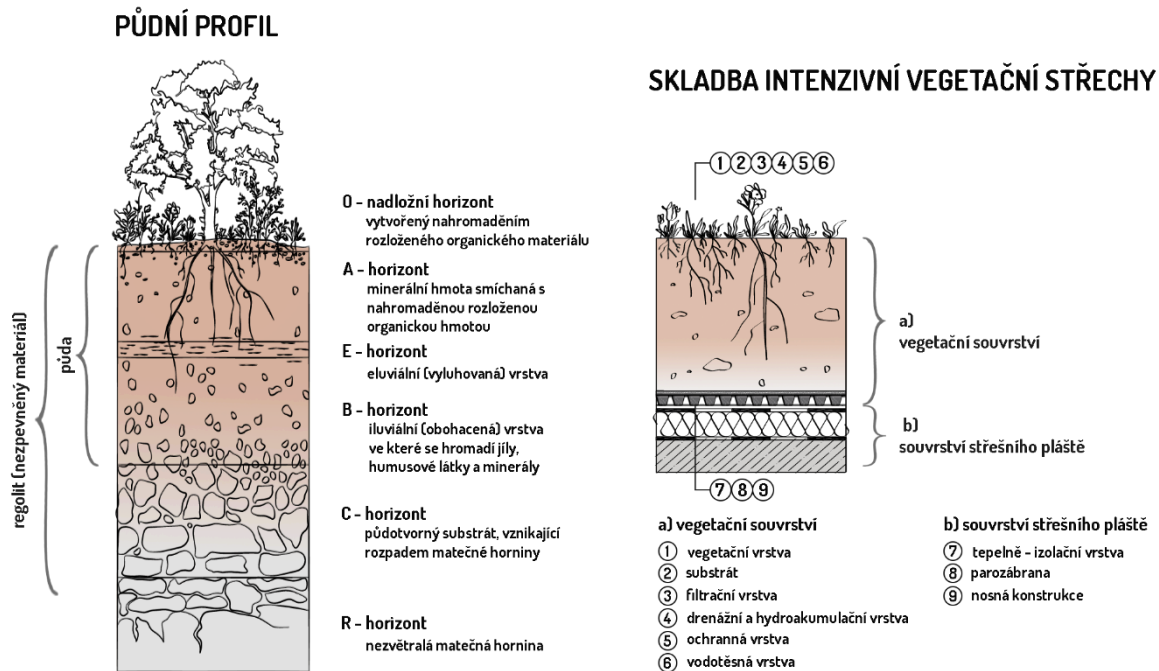
Obr. 2.9- Průběh teplot během letního dne na spodní straně listu dýně ve srovnání s teplotou okolního vzduchu (zdroj: autor)

2.1.2 Půda a fyzikální děje v půdě

2.1.2.1 Půda jako součást střešní zahrady

Pro zakořenění a růst rostlin na vegetační střeše je důležitá vrstva substrátu (též pěstební médium). Měla by mít odpovídající vodní kapacitu, podíl humusu, schopnost absorbovat živiny a být dobře provzdušněná. Její tloušťka závisí také na nosnosti střešní konstrukce, která musí odolat zatížení o plošné hmotnosti větší než $400 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$.

Ačkoliv bylo do dnešní doby vyvinuto velké množství pěstebních médií (substrátů), které mohou vrstvu půdy na střeše nahradit, a které jsou rozhodně užitečné v případě extenzivní vegetační střechy, na střešní zahradě oceníme, můžeme-li na ní vytvořit přirozené půdní prostředí.



Obr. 2.10 - Půdní profil v porovnání se skladbou intenzivní vegetační střechy (střešní zahrady)

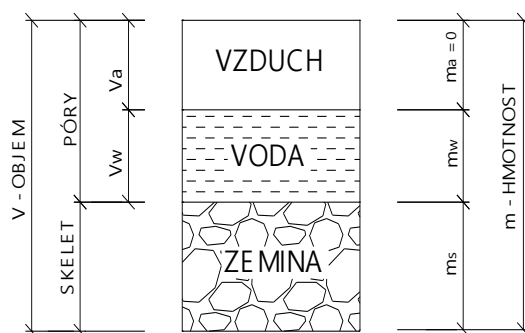
Na Obr. 2.10 je zobrazen půdní profil (vertikální průřez půdou od povrchu až po nevětralý horninový podklad) se základními diagnostickými půdními horizonty (vrstva půdy, která se vyznačuje specifickým horizontálním umístěním a určitými fyzikálními a chemickými vlastnostmi)²⁷ v porovnání se skladbou intenzivní vegetační střechy.

2.1.2.2 Složení, vznik a dělení půd

Ve stavebnictví se často setkáváme s označením „zemina“ pro část půdy, která je využívána jako základní stavební materiál např. při výstavbě hrází, přehrad, násypů apod. Zemina tvoří prostředí, do kterého se přenáší síly ze základů většiny stavebních konstrukcí. Od jiných

²⁷ NĚMEČEK, Jan; SMOLÍKOVÁ, Libuše; KUTÍLEK, Miroslav. *Pedologie a paleopedologie*. Praha: Academia, 1990. 546 s. ISBN 80-200-0153-0.

stavebních materiálů se zemina odlišuje svojí partikulární povahou. Jsou v ní obsaženy všechny tři fáze – pevná, kapalná a plynná. Kostra je tvořena částicemi hornin (pevná fáze), mezi jednotlivými částicemi jsou póry vyplněné vodou (kapalná fáze) a vzduchem (plynná fáze). Poměr těchto tří základních částí ovlivňuje její základní fyzikální i mechanické vlastnosti. Na obr. 2.11 je znázorněno složení zeminy o objemu V a hmotnosti m (složení zeminy používané ve stavebnictví). V souvislosti s používáním zeminy jako stavebního materiálu se neuplatňuje její *organická složka*, která je také významnou součástí půdy a která je nepostradatelná pro růst rostlin a existenci převážné většiny živých organismů na Zemi. Tato složka je důležitá, chceme-li půdu využívat jako pěstební médium na střešní zahradě.



Obr. 2.11- Složení zeminy o objemu V a hmotnosti m

Půda považována za „živý“ přírodní útvar, tvořící půdní obal Země – pedosféru (z řeckého pedon - půda) a pokrývající svrchní část zemské kůry. Nepřetržitě na ni působí všechny zemské sféry, se kterými je v přímém kontaktu - litosféra, hydrosféra, atmosféra a biosféra.

Nejdůležitější vlastností půdy je její *úrodnost* - schopnost zajistit živiny a vodu pro rostliny, živočichy i člověka (poskytování sklizně pěstovaných plodin). Půda vznikala a vyvíjela se velmi pozvolným způsobem - přibližně 1 cm za více než 100 let. Působením vlivu klimatu (teplota, srážky, vítr), podzemní vody, nadmořské výšky a reliéfu, spolupůsobením vegetace, živých organismů, jejich odumřelých částí a v současné době také působením člověka probíhala její mechanická, chemická a biologická přeměna z původní celistvé matečné horniny do současné podoby.

Půda je složena z pevné *anorganické složky* (nerosty, horniny), *kapalné složky* (půdní voda) a *plynné složky* (kyslík, dusík a ostatní plyny). Mimo to obsahuje i pevnou *organickou složku*

(humus) a živou složku (edafon – organismy, žijící v půdě). Vzájemným promísením jednotlivých půdních složek tvoří půda složitý heterogenní polydisperzní (částice různých velikostí) vícefázový (pevná, kapalná a plynná fáze) a neopomineme-li edafon, i živý systém.

Půdní částice mají různé tvary – kulové nebo nepravidelné mnohostěny (pískové, prachové částice), šupinové, diskové příp. tyčinkové (jílové minerály). Kulové částice převládají v hrubých disperzích, šupinové a diskové jsou typické pro jílové částice v koloidních disperzích. Tvar částic má vliv na velikost specifického povrchu – nejmenší povrch mají kulové částice, největší šupinové a diskové částice. Na specifickém povrchu je závislá např. míra adsorpce vodních par u jílových minerálů. Během adsorpce dochází ke zvětšování krystalové mřížky – bobtnání. Vysokou hodnotu specifického povrchu (až $1000 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$) a také vyšší hodnotu adsorpčního tepla ve srovnání s jílovými minerály (nejaktivnější z nich montmorillonit)²⁸ má humus, který ovlivňuje hydrofobické půdní vlastnosti ve větší míře než jílové minerály.

Jednotlivé částice (písek, prach, jíly) půdy se vyskytují stmelené do menších celků, agregátů – (též pedů - pochází z řeckého slova *pedon* = *půda*). Agregáty vznikají fyzikálními procesy - bobtnáním, smršťováním, promrzáním půdy, činností organismů v půdě. Jejich tvar a velikost závisí na horizontu, ve kterém se nacházejí. Prázdná místa mezi agregáty vytvářejí cestu pro vodu a kořeny rostlin, které se přichytávají k jejich povrchu. Důležitou úlohu zde hrají stmelující látky (např. uhličitany a seskvioxydy) a koloidní částice (jílové a organické látky). Koloidní částice se přilepí na povrch bakterií a po jejich odumření vytvářejí v agregátech mikropóry. Postupně do nich pronikají např. vlákna hub a vytvářejí úzké prostupy (cestičky) pro prorůstání kořenů rostlin, později pro vodu a vzduch. Póry umožňují výměnu plynů, zajišťují pohyb vody a živin v půdě, umožňují pronikání kořenů i edafonu do půdního profilu.

Půdní strukturu tvoří vzájemné uspořádání agregátů. Podle struktury dělíme půdy na strukturní a nestrukturní. Nestrukturní půdy nevytvářejí agregáty nebo obsahují agregáty ve vodě se rozpadající a vytvářející kašovitou hmotu – tzv. pseudoagregáty, na povrchu po dešti vzniká škraloup. Strukturní půdy obsahují mikro a makroagregáty trvalejšího charakteru, pevné a ve vodě stabilní. Struktura významně ovlivňuje hydrologické vlastnosti. Počáteční rychlost infiltrace je u půdy nestrukturní nízká a dále se snižuje. Způsobuje to rozpad pseudoagregátů a vznik škraloupu na povrchu půdy, voda se ztrácí povrchovým odtokem a výparem, vzduch je

²⁸ KUTÍLEK, Miroslav. *Vodohospodářská pedologie*. Praha: SNTL, 1966, 276 s.

uzavřený pod škraloupem a zhoršuje infiltraci. U strukturní půdy nedochází k rozplavování agregátů a vzduch v pórech může unikat. Z hospodářského hlediska je půda strukturní výhodnější, umožňuje lepší zásobování rostlin vodou²⁹.

Půdy se stabilními agregáty jsou dobře propustné pro vodu i vzduch. Na jejich stabilitě závisí pórovitost, provzdušněnost, kationtová výměnná kapacita a schopnost půdy zadržovat vodu. Půda s nestabilními agregáty (tzv. pseudoagregáty) se brzy rozmělní na jednotlivé částičky a je nevhodná pro rostliny i půdní organismy.

Anorganická složka půdy závisí na složení minerálů, které jsou z velké části tvořeny prvky: Si, Al, Fe, Ti, Mn, Ca, Mg, K, Na, P, S, N. V malém množství se v nich vyskytují i další stopové prvky: B, Co, Cu, Mo, Zn, Pb, Ni, Cr.

Edafon je velmi důležitý pro fungování půdního ekosystému. Patří sem např. bakterie, houby, řasy, sinice, prvoci, červi, hmyz, pavouci, menší savci a další. Půda spolu s půdními mikroorganismy a půdními živočichy zabezpečuje procesy přeměny prvků a živin. Organismy obývající půdu si vzájemně poskytují obživu, napomáhají při tvorbě její struktury – provzdušňováním, biologickým čištěním apod. V jednom gramu půdy se mohou nacházet i desítky milionů půdních bakterií. Půdní mikroorganismy se vyskytují na povrchu pevných částic i ve vodou zaplněných pórech. Větší živočichové si vytvářejí chodbičky a obývají dutiny zaplněné vzduchem. Spolu představují *živý dynamický systém*, který je nepostradatelný pro růst a vývoj rostlin.

Humus vzniká humifikací a mineralizací organické hmoty. Je tvořen odumřelými organickými látkami živočišného a rostlinného původu, které podléhají rozkladným procesům biochemické povahy za přítomnosti půdních mikroorganismů (bakterie, houby, plísně aj.). Tyto látky se nacházejí na různém stupni přeměny. V procesu mineralizace dochází k úplnému rozkladu organických látek na složky CO₂, H₂O, NH₃ a další. Humifikací vzniká humus - humusové kyseliny, (humínové kyseliny, fulvokyseliny, humatonelanové kyseliny) soli humusových kyselin, ligniny, huminy, humusové uhlí. Humus „pravý“ (trvalý) vzniká při humifikaci. Představuje zásobárnu živin, která postupně uvolňuje živiny. Živiny jsou promíseny

²⁹ KUTÍLEK, Miroslav. *Vodohospodářská pedologie: vysokoškolská učebnice*. 2., přeprac. vyd. Praha: SNTL, 1978. Řada stavební literatury, 296 s.

s minerální složkou a vyvábí velmi složité sloučeniny v procesu humifikace. Humus je považován za nejdůležitější část půdy.³⁰

Mezi prvky důležité pro růst rostlin patří C, O, H, N, S, P, K, Ca, Mg. V nepatrném množství potřebují rostliny i B, Cu, Fe, Mn, Zn, I, Mo. Tyto prvky však mohou být pro ně ve vyšších dávkách i škodlivé. Na rostliny působí příznivě, ale nejsou pro ně nezbytné i některé další stopové prvky Al, Cl, Si, Na.³¹

Po sklizni je třeba doplňovat vyčerpané živiny hnojením. K vyplavování živin může docházet také po příválových deštích. Mezi nejdůležitější prvky patří dusík (N), fosfor (P), vápník (Ca) a draslík (K), příp. hořčík (Mg). Optimálně nasycený sorpční komplex by měl obsahovat 60 – 80% vápníku (Ca), 10-20% hořčíku (Mg), 2-5% draslíku (K), optimální poměr Mg : K by měl být přibližně 2-3:1.³²

Prvky důležité pro výživu rostlin i pro půdotvorný proces jsou poutány sorpčními silami. Sorpční schopnost půdy zabezpečuje celý soubor organických i anorganických koloidů – *půdní sorpční komplex*. Tvoří ho z organických sloučenin *humus*, z anorganických sloučenin především *jílové minerály, kysličníky Fe a Al*. Půdní koloidy mají schopnost poutat ionty, ovlivňují některé fyzikální vlastnosti půdy, pohyblivost půdní vody aj. Jílové minerály na svém povrchu nesou většinou záporné náboje (kationty) a mají výrazný vliv např. na bobtnavost. Význam půdních koloidů spočívá i v zachycování půdních mikroorganismů. Koloidní vlastnosti mají půdní částice menší než 1-2 μm.

Většina rostlin je citlivá na obsah solí v půdě (*salinita*). Salinita půdy ovlivňuje fyzikálně-chemické, chemické (např. pH) a biologické vlastnosti půdy a má vliv na její úrodnost. Z aniontů se v zasolených půdách vyskytují především sírany, chloridy, uhličitany, fosfáty a nitráty (např. SO_4^{2-} , Cl^- , HCO_3^- , CO_3^{2-} , NO_3^-). Z kationtů to jsou ionty vápníku, hořčíku, sodíku a draslíku (např. Ca^{2+} , K^+ , Na^+ , Mg^{2+}), v kyselých půdách Al^{3+} , Fe^{3+} . Příčinou zasolení v sušších oblastech je především nedostatek srážek, které z půdy rozpustné soli vyplavují. Koncentraci

³⁰ VRBA, Vladimír, HULEŠ, Ludvík: Humus - půda - rostlina (1) Funkce humusu v ekosystému. *Biom.cz* [online]. 2006-09-04 [cit. 2021-07-27]. Dostupné z WWW: <<https://biom.cz/cz/odborne-clanky/humus-puda-rostlina-1-funkce-humusu-v-ekosystemu>>. ISSN: 1801-2655

³¹ VELEBNÝ, Vladimír. *Vodný režim pôdy*. Bratislava: Slovenská technická univerzita, 2000. Edícia skript. ISBN 80-227-1373-2, 208 s.

³² RICHTER, Rostislav. Sorpční schopnost půdy. *Web2.mendelu.cz* [online]. 2004 [cit. 2021-7-27]. Dostupné z: http://web2.mendelu.cz/af_221_multitext/vyziva_rostlin/html/agrochemie_pudy/sorpce.htm

solí v půdě zvyšuje také výpar z půdy, zhoršená propustnost půdy, používání zasolené vody k závlaze, příp. vysoké dávky průmyslových hnojiv. Vysoká zasolenost půdy a vysoký stupeň nasycení sorpčního komplexu sodíkem mohou snižovat úrodnost půdy, měnit její strukturu, např. humus vytváří sypké granule a zrníčka. Sodík, chlor a některé další prvky jsou pro rostliny škodlivé, rostliny je přijímají spolu s živinami, které jsou rozpuštěné v půdní vodě. To má za následek zpomalení jejich růstu. Osmotický efekt způsobuje, že vzrůstá potenciál půdní vody (voda je v půdě poutaná větší energií, než voda s nižším obsahem solí) a kořeny rostlin nejsou schopné ji nadále přijímat. Vysoké zasolení má za následek zpomalení jejich růstu (podobně jako při značném poklesu vlhkosti) a jejich následný úhyn.

Důležitým faktorem pro růst rostlin je pH půdy (0-14). Hodnota pH vyjadřuje chemickou reakci půdy, která může být extrémně kyselá (pH do 4,4) kyselá (pH 4,6-5), zásaditá (pH 7,3-7,7) nebo neutrální (6,6-7,2), silně zásaditá (pH nad 7,7). Půdní reakce je závislá na výskytu iontů vodíku (H_2), příp. železa (Fe) nebo hliníku (Al) v půdním roztoku. Kyselost půdy závisí na řadě faktorů, zejména na typu a chemickém složení matečné horniny, na které vznikala. Na vyvěřelinách (např. žule) vznikají půdy kyselé, na vápencích naopak půdy zásadité. Většině rostlin vyhovuje neutrální, až slabě kyselá půda (pH v rozmezí 6-7,5). Půda, která je vhodná pro zemědělství by měla mít hodnotu pH 4-8,5. Vysoké pH (nad 9) nebo příliš nízké pH (méně než 3) způsobuje poškození rostlin včetně jejich úhynu. Kyselé půdy jsou méně úrodné a méně vhodné pro půdní organismy a rostliny. Kyselou reakci můžeme upravovat vápněním. Okyselení půdy je také způsobováno lidskou činností, především znečištěním ovzduší.

Půdy dělíme podle **typů a druhů**. Podle obsahu humusu rozlišujeme půdní typy např. černozemě, hnědozemě, hnědé lesní půdy, podzoly apod.

Půdní druhy rozlišujeme podle množství částic a zrnitosti. Podle druhů dělíme půdy na lehké (písčité, hlinitopísčité), středně těžké (písčitolhinité, hlinité) a těžké (jílovitolhinité a jílovité).

Půdy **lehké (písčité)** jsou sypké, dobře propustné pro vodu, mají vysoký obsah půdního vzduchu, rychle vysychají, vyžadují intenzivní zavlažování, obsahují málo jílovitých částic a málo živin (nízká sorpce, živiny se snadno vyplavují), jsou vhodné pouze pro nenáročné rostliny. Snadno se prohřívají. Vzhledem k nízké úrodnosti se v zemědělství nevyužívají. Převažují částice o rozměru 0,1-2 mm. Více úrodné jsou půdy hlinitopísčité.

Půdy **středně těžké (hlinité)** - mají optimální proces vsakování, jsou dobře propustné pro vodu i vzduch, s téměř vyrovnaným poměrem jílovitých a písčitých částic, mají dostatek živin, jsou

úrodné a pro zemědělství nejvhodnější, většinou se vyskytují v nížinách, kde se nacházejí spraše. Převažují částice 0,01 – 0,1 mm. Hlinité půdy jsou pro zemědělství nejvhodnější.

Těžké půdy (jílovité) jsou půdy jílovitého charakteru, nepropustné pro vodu i vzduch, mají nadbytek jílovitých částic, za sucha praskají, za deště břednou. Mají nevyhovující tepelný režim, půda je chladnější vlivem zamokření. V zemědělství jsou využívány pouze omezeně (jsou-li dostatečně kypřeny). Převažují částice pod 0,01 mm. Pro zemědělství jsou ještě využitelné půdy jílovitohlinité. Jíly jsou v zemědělství nevyužitelné.

Tab. 2.2 Rozdělení půdy podle procenta obsahu částic menších než 0,01 mm ³³

	Podíl částic menších než 0,01 mm
Písčité	0-10% (půdy lehké)
Hlinitopísčité	10-20% (půdy lehké)
Písčitolhinité	20-30% (půdy střední)
Hlinité	30-45% (půdy střední)
Jílovitohlinité	45-60% (půdy těžké)
Jílovité	60-75% (půdy těžké)
jíl	>75% (půdy těžké)

2.1.2.3 Půdní vzduch

Půdní vzduch představuje plynnou fázi obsaženou v půdě. Je důležitý pro většinu procesů probíhajících v půdě, pro růst rostlin i pro existenci půdních organismů. Od atmosférického vzduchu se liší vyšším obsahem vlhkosti (relativní vlhkost se často blíží ke 100%), větším obsahem CO₂ v půdním vzduchu a může obsahovat další plyny, např. N₂, O₂. Obsah CO₂

³³ ŠARAPATKA, B. *Pedologie*. 1. vyd. Olomouc, Univerzita Palackého, 1996. ISBN 80-7067-590

v půdním vzduchu je za běžných podmínek přibližně 10 x větší než v atmosféře (0,3 %) a může dosáhnout až 5- 10% z celkového objemu půdního vzduchu.

Kyslík tvoří obvykle 10-20% objemu půdního vzduchu a jeho podíl klesá s hloubkou. Provzdušněné půdy se přibližují složením vzduchu v atmosféře, zatímco méně provzdušněné půdy mají větší koncentraci CO₂. Provzdušňováním půdy se odvádí oxid uhličitý do atmosféry a přivádí kyslík do kořenového systému rostlin. Malá provzdušněnost půdy zpomaluje růst rostlin a aktivitu půdních mikroorganismů rozkládajících organické látky. Množství a obsah půdního vzduchu závisí ve velké míře na obsahu vody a aktivitě půdního edafonu. Složení půdního vzduchu významně ovlivňuje metabolická aktivita kořenů rostlin, mikroorganismů a dalších půdních organismů. Půdní vzduch vyplňuje všechny póry, které nejsou vyplněny vodou³⁴. *Provzdušněnost* můžeme charakterizovat jako (2.4):

$$P_a = P - \theta (\%) \quad (2.4)$$

P- pórovitost

θ- objemová vlhkost půdy

2.1.2.4 Půdní voda, chemické a fyzikální vlastnosti vody

Půdní voda zahrnuje veškerou vodu, která je obsažená v půdě. Má vliv na řadu jejích fyzikálních vlastností, na tepelný režim, objemové změny, pohyb látek v půdě apod. Má velký význam pro utváření půdního prostředí a zároveň je nepostradatelným činitelem pro půdní organismy a rostliny. Voda vsakující do půdy obsahuje kyslík, oxid uhličitý a v malém množství další plyny. V malých koncentracích jsou do ní přimíseny rozpustné minerály a organické látky v závislosti na jednotlivých horizontech. Poměr rozpuštěných látek v půdní vodě se během roku mění. Schopnost půdy poutat ionty nebo molekuly různých sloučenin z půdního roztoku do pevné fáze nazýváme sorpční kapacitou. Podle intenzity sorpce jsou živiny chráněny proti vyplavení a tvoří zásobárnu živin pro rostliny během vegetace.

³⁴ VELEBNÝ, Vladimír. *Vodný režim pôdy*. Bratislava: Slovenská technická univerzita, 2000. Edícia skript. ISBN 80-227-1373-2, 208 s.

Voda vyplňující póry v zemině je ovlivňována různými silami. Síly působící na půdní vodu jsou kromě gravitační síly podmíněny vlastnostmi půdy i vody a jejich vzájemným spolupůsobením. Např. vysušená zemina pohlcuje vodní páry obsažené ve vzduchu, zvětšuje svoji hmotnost tak dlouho, dokud nenastane rovnovážný stav mezi tenzí par v ovzduší a vlhkostí zeminy. Podle převládajícího působení sil v půdě rozeznáváme tři základní kategorie půdní vody: adsorpční, kapilární a gravitační.

Adsorpční půdní voda tvoří část vody, kterou půda přijme stykem se vzduchem obsahujícím vodní páry. Voda je pevně vázaná půdními částicemi. Vyskytuje se v horninách jen při velmi nízké vlhkosti. Má podstatně odlišné vlastnosti než volná voda. Má odlišnou hustotu, nižší hodnotu dielektrické konstanty a podstatně snížený bod mrazu. Pohybuje se pouze ve formě vodní páry, v kapalném stavu je prakticky nepohyblivá. Pro rostliny je téměř nepřístupná.

Mezi vodu adsorpční řadíme vodu *hygroskopickou* (vodní páry pohlcované z atmosféry), *obalovou* (část vody adsorpční kolem půdních částic) a *osmotickou* (část vody adsorpční vázané výměnnými kationty). Adsorpční síly se vzdáleností od povrchu klesají. Adsorpcí se nasycuje silové pole povrchu, snižuje se jeho energie, uvolňuje se adsorpční teplo, totožné se smáčecím teplem adsorbentu (teplo uvolněné při smáčení povrchu tuhé látky kapalinou). Množství adsorbovaných částic je závislé na tlaku vodních par v ovzduší, na teplotě, velikosti a charakteru půdních částic (např. na zrnitostním složení zeminy).

Při dalším zvyšování vlhkosti zeminy voda adsorpční postupně přechází ve vodu kapilární a póry se postupně zaplňují vodou.

Kapilární půdní voda je částí vody, jejíž stav závisí na kapilárních silách. Zároveň se mění vlastnosti půdní vody. Kapilární voda má zmenšenou pohyblivost a mírně snížený bod mrazu. Označujeme ji jako vodu volně vázanou. Voda nejprve vyplňuje oddělené kapiláry, které se postupně propojují do celého systému. Při spojování kapilární vody dochází k uzavírání půdního vzduchu do oddělených bublin. Tuto formu vody nazýváme *koutková (styková)*. Na styku zrn se vytvářejí menisky a s přibývajícím vlhkostí vzniká voda *pendulární* (ještě nedochází k uzavření vzduchové bubliny), která přechází později ve vodu *funikulární* (dochází k uzavření vzduchové bubliny)^{35,36}. Pro rostliny je přístupná při velikosti kapilárních pórů střední velikosti od 0,2-0,10 nm. Kapilární voda je ovlivňována silami působícími na fázových rozhraních. Patří

³⁵ KUTÍLEK, Miroslav. *Vodohospodářská pedologie*. Praha: SNTL, 1966, 276 s.

³⁶ KUTÍLEK, Miroslav. *Vodohospodářská pedologie*. Druhé, přepracované vydání. Praha: SNTL, 1978. 296 s.

sem např. smáčivost (vlastnost kapaliny přilnout k povrchu některých pevných látek). Kapalina může povrch jednotlivých zrn smáčet úplně, neúplně nebo je nesmáčí v závislosti na úhlu smáčení (úhel sevřený tečnou k povrchu kapky v bodě styku s rozhraním). Čím menší je smáčecí úhel, tím větší je smáčení. Je-li smáčecí úhel roven 0° , kapalina smáčí povrch tuhé fáze úplně. Pro úhel větší než 90° platí, že kapalina povrch nesmáčí. Kapilární voda může mít formu zavěšené vody (po závlaze, srážkách) nebo vody kapilárně vzlínající (nad hladinou spodní vody). K nasycování kapilár v půdě dochází častěji shora vlivem srážek a závlahy, než vzlínáním z hladiny spodní vody. Výška kapilárního vzlínání závisí na druhu zeminy (tab.2.3).

Tab. 2.3 Výška kapilárního vzlínání³⁷

<i>Druh zeminy</i>	<i>H_k (m)</i>
Písek	0,03 -0,1
Jemný písek	0,1-0,5
Hlinitý písek	0,5-0,2
Sprašová hlína	2,0-5,0
Hlína	5,0-15,0
Jílovitá zemina	15,0-50,0
Jíly	více než 50,0

Na výšku kapilárního vzlínání může mít vliv povlak půdních koloidů (humus, jílové minerály, kyslíčnky železa Fe a Al) na povrchu částic. Oblast s absorpční a kapilární vodou označujeme jako provzdušněné pásmo.

Pokračuje-li nadále zvyšování obsahu vody v půdě, začíná se stále více uplatňovat vliv zemské tíže a voda postupně přechází ve vodu gravitační.

Gravitační půdní voda je část vody v půdním prostředí, jejíž pohyb a hydromechanické účinky jsou určovány převážně gravitačními silami. Základní charakteristikou gravitační vody je její pohyblivost. Vyskytuje se v pórech nekapilárních, v menší míře semikapilárních (tvoří přechod mezi póry kapilárními a nekapilárními). Při srážkách nebo závlaze voda z nekapilárních pórů odteče. Gravitační voda může mít formu *prosakující gravitační vody* nebo *gravitační vody*

³⁷SEREDA, Oleg. *Mechanika zemin se základy pedologie*. Brno: Vysoká škola zemědělská v Brně, 1988, 96 s.

podepřené, vyskytuje -li se překážka ve formě nepropustné vrstvy. Oblast s gravitační vodou, ležící obvykle pod provzdušněným pásmem, nazýváme zvodnělé pásmo.

Voda – složení a vlastnosti

Voda (H₂O) je chemická sloučenina vodíku a kyslíku. V přírodě se vyskytuje ve třech skupenstvích (fázích) – pevném (led a sníh), kapalném (voda v tocích, mořích, oceánech, podzemní voda) a plynném (vzdušná vlhkost, pára, mlha). Má mnoho výjimečných chemických a fyzikálních vlastností, které ji odlišují od ostatních kapalin. Pravděpodobně je to způsobeno asymetrickou geometrií její molekuly. Atomy vodíku na kyslík jsou navázány pod úhlem 104,45°. Vlastnosti vody ovlivňují i vodíkové můstky mezi jejími molekulami. Vodíkové vazby jsou příčinou vysokého povrchového napětí vody ($72,75 \times 10^{-3} \text{ N.m}^{-1}$ při 20°C) a kapilárních sil. Z toho plyne její tendence se pohybovat po úzké trubici proti gravitační síle. To má význam pro všechny cévnaté rostliny. Vodíkové vazby jsou důvodem, proč teploty tání a varu jsou vyšší než u jiných podobných sloučenin.

Jednou z výjimečných vlastností vody je tzv. *anomálie vody*. Pro tuto vlastnost má voda velký význam pro vodní živočichy i rostliny. Při zahřívání od 0 °C do 4 °C (přesněji do 3,98 °C) roste hustota vody a zmenšuje se její objem. Od 4 °C začíná hustota vody klesat a její objem roste. Skutečnost, že je hustota vody při teplotě 4 °C největší, způsobuje, že v zimě se tato teplota nachází na dně vodních ploch a pomáhá přežít živým organismům pod vodou. Blíže k hladině má voda nejen nižší teplotu, ale i nižší hustotu. Při tuhých mrazech tak může vzniknout na povrchu rybníků a jezer vrstva ledu, která tvoří izolaci proti mrazu. Největší hustotu tedy nemá led, ale voda přibližně o teplotě 3,98 °C, která se hromadí na dně. Dalším snižováním teploty se objem vody zvětšuje, což má význam i pro rostliny a zemědělství - kypří ornici, ale také urychluje zvětrávání hornin.

Největší odpor a nejmenší vodivost má chemicky čistá voda bez příměsí. I malé množství chemických příměsí iontového charakteru, především solí (nejběžnější NaCl – chlorid sodný) zvyšuje její vodivost. Hlavními prvky zastoupenými v mořské soli jsou chlor, sodík, síra a hořčík, v menším množství vápník, draslík aj. Sodné a chloridové ionty (chlorid (Cl⁻) a sodíku (Na⁺) jsou v mořské soli přítomny v mnohem větším množství než jiné složky. Čím je voda slanější, tím větší je její vodivost.

Slaná mořská voda obsahuje velké množství solí (přibližně 35 g/litr) a liší se od sladké vody fyzikálními vlastnostmi (průměrná salinita mořské vody je 35‰). Její hustota je závislá na teplotě, salinitě a tlaku. S rostoucí teplotou hustota mořské vody klesá, se zvyšujícím se tlakem a salinitou její hustota roste. Hustota mořské vody je větší než u sladké vody. Mořská voda zamrzá při nižších teplotách, např. při salinitě 35‰ a hustotě $1,028 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ zamrzá přibližně při $-1,9 \text{ }^\circ\text{C}$ ³⁸.

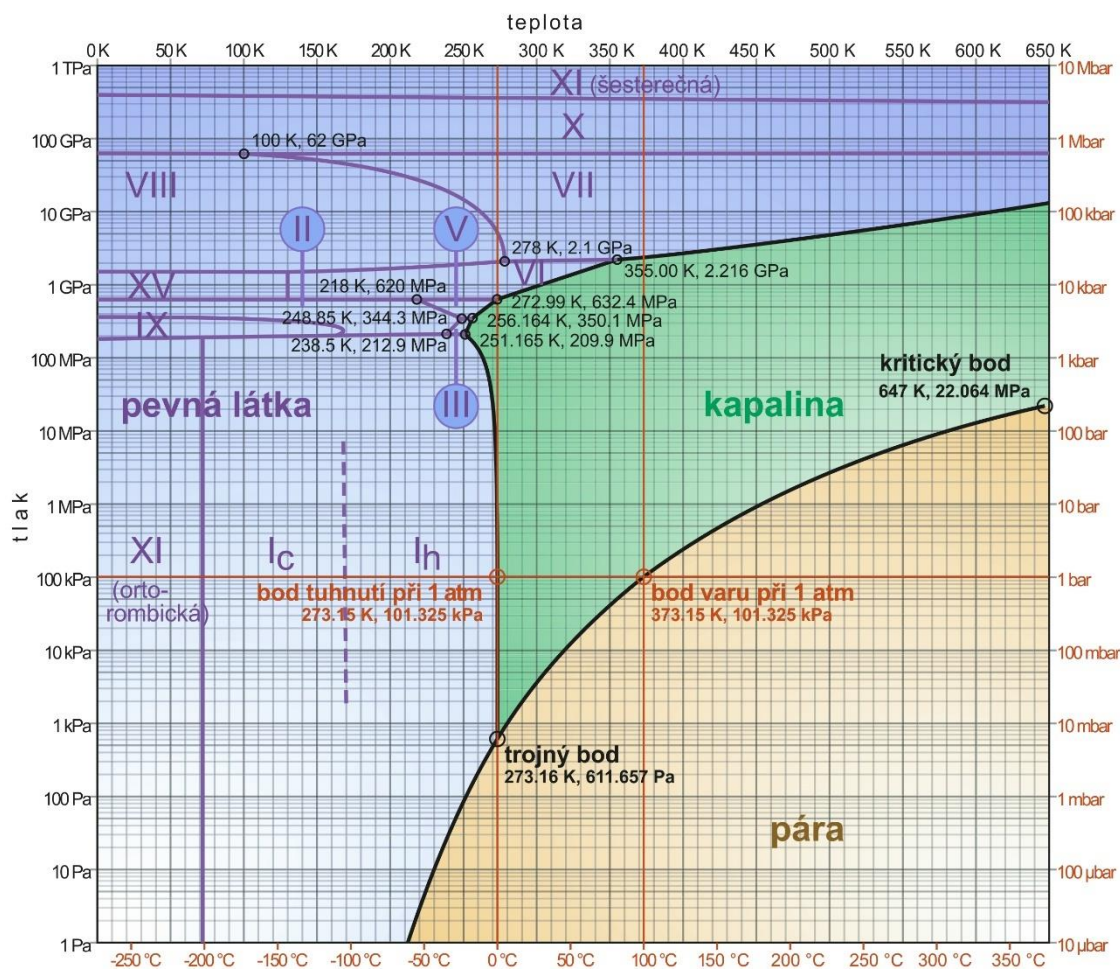
Fázové přechody vody

Změna skupenství vody patří mezi tzv. *fázové přechody 1. druhu* (skupenské). Fázovým přechodem rozumíme skokovou změnu vlastností termodynamického systému při změně termodynamické proměnné (teplota, hustota, měrná tepelná kapacita aj.). Fázový přechod je obvykle spojený s energií, kterou musí látka přijmout nebo odevzdat (např. teplo), aby ke změně mohlo dojít. Patří sem skupenské fázové přechody:

- tání a tuhnutí
- kondenzace a vypařování
- sublimace a desublimace

Oblasti existence jednotlivých fází za určité teploty a tlaku jsou patrné z fázového diagramu vody – *obr.2.12*. Pro vodu je trojný bod dán hodnotami $p = 615,3 \text{ Pa}$, $t = 0,01^\circ\text{C}$, tj. při teplotě $0,01^\circ\text{C}$ mohou existovat v uzavřené nádobě při tlaku $p = 615,3 \text{ Pa}$ led, voda a vodní pára zároveň.

³⁸ Fyzikální vlastnosti mořské vody. *Klimatologie a hydrogeografie pro učitele* [online]. [cit. 2021-10-11]. Dostupné z: https://is.muni.cz/do/rect/el/estud/pedf/ps14/fyz_geogr/web/pages/12-2-fyzikalni-vlastnosti.html



Obr. 2.12 - Fázový diagram vody³⁹

Sublimace je skupenská přeměna, při které pevná látka přechází do plynného skupenství, aniž by došlo k jejímu tání. Při sublimaci musí látka přijmout takové množství energie, aby se zpretrhaly vazby v obou skupenstvích. Opačný proces je desublimace, při níž se plynná látka mění na pevnou bez předchozí kondenzace (jinovatka, námraza, sněhové vločky).

Sníh a led sublimuje při teplotách pod bodem mrazu. Vítr napomáhá výměně vlhkého vzduchu nad sněhem za sušší vzduch, který se nachází ve vyšších vrstvách⁴⁰. Z výzkumu prováděného

³⁹ 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

⁴⁰ *Hydrologie sněhu: Sublimace*. [online]. 2011 [cit. 2021-10-11]. Dostupné z:

https://www.chmi.cz/files/portal/docs/poboc/CB/snowmelt/navmenu.php_tab_1_page_5.1.0.htm

v USA (Reba et al., 2009⁴¹), bylo zjištěno, že místa vystavená větru přinášejí během sezóny přibližně dvakrát vyšší sublimační rychlosti a celkovou sublimaci než místa chráněná lesním porostem. K sublimaci více přispívaly podmínky s velkým rozdílem tlaku par a slabým až středním větrem (suché podmínky na chráněném místě), nežli podmínky se silným větrem a nízkými rozdíly tlaku par (vlhké období na exponovaném místě). Výjimečně vysoké míry sublimace byly zjištěny i při silném větru a silných rozdílech tlaku par za chladných podmínek. Na chráněném místě byly zaznamenány ve srovnání s exponovaným místem vyšší maximální a nižší minimální teploty vzduchu, teplejší polední teploty a téměř o dva stupně větší denní teplotní rozsah, zatímco míra sublimace byla zjištěna na exponovaném místě přibližně dvakrát vyšší než na chráněném místě. Vyšší míra sublimace se často shodovala s největším rozdílem tlaku par a vysokou rychlostí větru.⁴²

Při změně skupenství se uvolňuje latentní teplo (*starší název - skupenské*). Dodáním nebo odebráním latentního tepla dojde ke změně skupenství látky, ale nedojde ke změně její teploty. K roztátí nebo zmrznutí vody potřebujeme 334 kJ.kg^{-1} . Měrné skupenské teplo výparu (kapalná - plynná fáze) je přibližně 8 x větší (2257 kJ.kg^{-1}).

Voda v zemině zamrzá postupně. Nejprve zamrzá volná voda, následně kapilární a nakonec slabě vázaná voda. Vytvářejí se krystalky ledu, který má přibližně o 9% větší objem než voda, vytvoří se čočky ledu, led nadzvedává zeminu, následkem je porušení konstrukcí na ní. Při jarním tání led roztaje, vlhkost zeminy vzroste, což má za následek její rozbředání. Na základové konstrukce působí velké tlaky, které způsobují nerovnoměrné sednutí a vznik trhlin v základech i ve zdivu.

⁴¹ REBA Michele L., POMEROY J., MARKS D. a LINK Timothy E.: Hydrological processes: Estimating surface sublimation losses from snowpacks in a mountain catchment using eddy covariance and turbulent transfer calculations. *Wiley Online Library* [online]. 31 January 2012 [cit. 2021-10-12]. Dostupné z: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/hyp.8372>

2.1.2.5 Vodní režim půdy

Vodní režim půdy zahrnuje veškerou vodu, která do ní vnikne, pohybuje se v ní, je v ní zadržována nebo z ní odteče. Voda se do půdy dostává především infiltrací vody srážkové, umělou závlahou, z povrchových vod nebo kapilárním vztlínáním z podzemní vody. V malé míře adsorpci vodních par z ovzduší.

Výdej vody z půdy zahrnuje povrchový odtok, odtok do podzemních vod, výpar z volného povrchu, absorpci a transpiraci rostlinami. Jestliže srážky převýší infiltrační kapacitu půdy, voda prosakuje do spodních vrstev.

Infiltrace (vsakování) je schopnost povrchu půdy pohlcovat vodu nebo průtok vody přes povrch do půdy. Intenzitu infiltrace obvykle udáváme v $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$. Mění se závislosti na půdních poměrech. Ovlivňuje ji především intenzita, množství a časové rozložení srážek, teplota ovzduší a roční doba. V druhé řadě ji ovlivňují fyzikální vlastnosti půd - struktura, zrnitost, pórovitost, obsah humusu. Vliv na vsakování mají i vlhkostní poměry - půdní vlhkost, sací tlak, hladina podzemní vody, hydraulická vodivost apod. V neposlední řadě ji ovlivňuje kořenový systém rostlin a půdní živočichové (tvorba chodbiček apod.) Podle minimální rychlosti infiltrace vody do půdy bez pokrytí vegetací po dlouhodobém syčení vodou dělíme půdy do 4 skupin (*tab.2.4*).

Množství infiltrované vody závisí na počáteční vlhkosti, době trvání vnikání vody do půdy, vlastnostech svrchní části půdy (struktura, pórovitost, zrnitost apod.)

Rychlost infiltrace můžeme odvodit ze vztahu (2.5):

$$V = dQ/F dt \text{ (m}\cdot\text{s}^{-1}\text{)} \quad (2.5)$$

Q -objem infiltrující vody
F - plocha půdy infiltrace (m^2)
t - čas

Tab. 2.4 Hydrologické skupiny půd, Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy⁴³

skupina	rychlost infiltrace i při úplném nasycení (mm/min)		charakteristika hydrologických vlastností
A	vysoká	> 0,20	půdy zahrnující hluboké, dobře až nadměrně odvodněné písky a štěrky
B	střední	0,10 – 0,20	půdy středně hluboké až hluboké, středně až dobře odvodněné, hlinitopísčité až jílovitohlinité
C	nízká	0,05 – 0,10	půdy s málo propustnou vrstvou, půdy jílovitohlinité až jílovité
D	velmi nízká	< 0,05	půdy jílovité s vysokou bobtnavostí, půdy s trvale vysokou hladinou podzemní vody, půdy s vrstvou jílu na povrchu nebo pod ním, mělké půdy nad nepropustným podložím

Bilanční rovnice půdní vody (2.6):

$$V_1 + S + Z + P_1 + P_2 = V_r + O_1 + O_2 + E + T + V_2 \quad (2.6)$$

V_1 – počáteční množství vody v půdě

S – množství spadných srážek (déšť, sníh, kroupy, rosa, jinovatka) které dopadnou na povrch půdy (s odečtením intercepce)

Z – množství vody použité na závlahu rostlin

P_1 – povrchový přítok

P_2 – přírůstek z podzemní vody

V_r – voda spotřebovaná rostlinami

O_1 – odtok z povrchu

O_2 – podzemní odtok

E – evaporace (výpar z půdy)

T – transpirace (výpar z vegetace)

V_2 – konečná zásoba vody v půdě za pozorované období

⁴³ Hydrologické skupiny půd. www.vumop.cz [online]. Praha [cit. 2021-7-27]. Dostupné z: https://www.vumop.cz/sites/default/files/20130529_katalogmap_hydrologicke_charakteristiky.pdf

Bilanční rovnici pro vegetační střechy lze upravit následovně (2.7):

$$V_1 + S + Z + P = V_r + O + E + T + V_2 \quad (2.7)$$

V_1 – počáteční množství vody v substrátu vegetační střechy

S – množství spadených srážek na povrch vegetační střechy (s odečtením intercepce)

Z – množství vody použité na závlahu rostlin

P – zásoba vody zadržovaná hydroakumulační vrstvou (na počátku sledovaného období), je-li součástí skladby

V_r – voda spotřebovaná rostlinami

O – odtok vody z vegetační střechy

E – evaporace (výpar ze substrátu)

T – transpirace (výpar z vegetace)

V_2 – konečná zásoba vody v substrátu vegetační střechy (za sledované období)

Část odtékající vody z vegetační střechy zadrží hydroakumulační vrstva, je-li součástí skladby. Voda obsažená v hydroakumulační vrstvě, příp. voda vyplňující nopy HDPE folie může vzlínat do horních vrstev substrátu. Rostliny čerpají vodu pomocí jevu nazývaného kapilární elevace, rovněž pomocí tohoto jevu se voda dostává ze spodních vrstev půdou až k jejich kořenům.

Retenční vodní kapacita je charakterizována jako množství vody, které je půda schopna zadržet v kapilárních pórech pro potřeby rostlin a postupně ji uvolňovat.

Využitelná vodní kapacita (angl. available water capacity – zk. AWC) slouží k určování závlahové dávky k jednotlivým plodinám. Závisí na hloubce, do které jsou schopné plodiny svými kořeny dosáhnout.

2.1.2.6 Půdní vlhkost

Množství vody v půdě nazýváme půdní vlhkostí. Vyjadřujeme ji v % vztažených k objemu nebo k hmotnosti vysušené zeminy. Její stanovení se provádí nejčastěji klasickým způsobem z rozdílu hmotnosti vlhké a vysušené zeminy při 105°C. Nevýhodou u této metody je porušení půdního vzorku. Chceme-li pracovat s neporušeným vzorkem, je výhodnější objemové vyjádření. Objemová hmotnost je proměnná, což nám hmotnostní vyjádření neumožňuje zohlednit.

Objemová vlhkost je definovaná vztahem (2.8):

$$\theta = \frac{V_w}{V_p} \quad (2.8)$$

V_w - objem vody

V_p - celkový objem

2.1.2.7 Proudění vody v nenasyčeném a nasyceném pórovitém prostředí

Půda se všemi póry tvoří velmi složité a navíc značně proměnlivé pórovité prostředí. Póry mají rozdílné velikosti a tvary, většinou jsou jen částečně vyplněné vodou, zbytek je zaplněný vzduchem. Tvar, velikost i poloha pórů se neustále mění vlivem vnějšího prostředí, působením vegetace (prorůstání kořenů), činností edafonu (chodbičky) i člověka (obdělávání půdy), vlivem vlhkosti (srážky, závlaha) apod. Obsah pórů v našich půdách se pohybuje přibližně mezi 40 - 45%. Za optimální množství pórů pro zemědělské plodiny ve svrchních vrstvách půdy je považováno přibližně 50% pórů z celkového objemu půdy - z toho optimálně 2/3 pórů zaplněných vodou a 1/3 pórů zaplněných vzduchem. U zemědělské půdy z celkové pórovitosti se uvádí jako maximální hranice 80% pórů kapilárních a 20 % nekapilárních⁴⁴. Kapilární póry zadržují vodu a umožňují její pohyb proti působení gravitace. Nekapilární póry jsou důležité pro výměnu vzduchu a zajišťují rychlejší pohyb vody v půdě.

Pro proudění vody jsou důležité především propojené póry (efektivní pórovitost). Póry jsou různě zakřivené, jejich konce mohou být zaslepené nebo velmi malých rozměrů, potom dochází k tomu, že voda jimi neproudí. Navíc v půdě působí celý soubor silových polí, který má vliv na pohyb půdní vody a který je také poměrně komplikovaný.

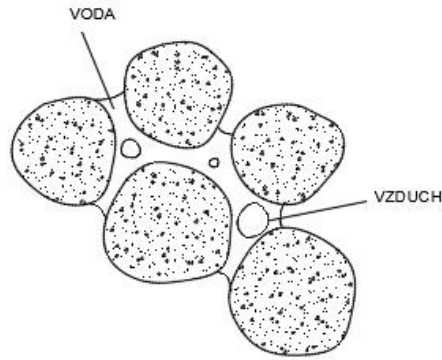
Pórovitost definujeme vztahem (2.9):

$$P = V_p/V \quad (2.9)$$

V_p – objem pórů

V - objem půdy

⁴⁴ KUTÍLEK, Miroslav. *Vodohospodářská pedologie*. Praha: SNTL, 1966, 276 s.



Obr. 2.13 Složitost půdního prostředí – pevná fáze (půdní agregáty, zrna), kapalná fáze (voda), plynná fáze (vzduch)

Jsou – li póry zcela nasycené vodou, je vlhkost rovna pórovitosti. V tomto případě uvažujeme o nasyceném prostředí. Systém je tvořený dvěma fázemi - pevná látka (půdní agregáty) a kapalina (půdní voda). Předpokládáme neexistenci třetí fáze, kterou představuje plynná látka (půdní vzduch).

V půdě se uplatňuje laminární proudění vody, turbulentní proudění se vyskytuje pouze u velkých hydraulických sklonů nebo v případě většího podílu hrubých zrn v zemině. Voda v půdě není chemicky čistá (obsahuje rozpuštěné organické a anorganické příměsi), roztok navíc podléhá změnám teploty v závislosti na teplotě ovzduší. Tyto změny však podstatně neovlivňují fyzikální vlastnosti půdní vody nebo se je spíše ve výpočtech snažíme zanedbávat, abychom půdní prostředí zjednodušili. Složitě pórovité prostředí nahrazujeme systémem kapilár o průměrech, které se co nejvíce přibližují danému typu půdy. Zjednodušíme-li půdu na systém složený z rovnoběžných kapilárních trubic o poloměru r , lze průměrnou rychlost laminárního proudění vyjádřit Poiseuillovou rovnicí (2.10):

$$v_p = \frac{\pi \cdot r^2}{8\eta} \cdot \frac{\Delta p}{\Delta L} = \frac{\rho_w \cdot g \cdot r^2}{8\eta} \cdot \frac{\Delta H}{L} \quad (2.10)$$

v_p - průměrná rychlost proudění v trubici ($m \cdot s^{-1}$)

r - poloměr trubice (m)

η - dynamická viskozita vody ($Pa \cdot s$)

Δp - rozdíl tlaků mezi konci trubice (Pa)

L - délka trubice

g - gravitační zrychlení ($m \cdot s^{-2}$)

ρ_w - měrná hmotnost vody (kg.m^{-3})

ΔH – rozdíl tlakových výšek v trubici na délce L (m)

V nenasyceném prostředí je vlhkost půdy vždy menší než pórovitost. Systém je tvořen třemi fázemi – pevná fáze (půdní agregáty, zrna), kapalná fáze (půdní voda) a plynná fáze (půdní vzduch). Základní rovnice popisující přenos vody v nenasyceném prostředí vycházejí z Darcyho zákona zformulovaného H. Darcym (1856) na základě experimentů pro proudění vody přes pískový filtr, který definuje rychlost průtoku porézním prostředím. Vyjadřuje závislost mezi rychlostí proudění a hydraulickým gradientem. Rychlost se zvětšuje při nárůstu ΔH a snižuje při zvětšení délky L ve směru proudění (2.11):

$$v = K_s \frac{\Delta H}{L} \quad (2.11)$$

v - rychlost proudění vody přes jednotku plochy (m.s^{-1})

K_s - nasycená hydraulická vodivost (vyjadřuje schopnost půdy vést vodu)

ΔH - rozdíl hydraulických výšek (rozdíl hladin před vtokem a po výtoku z půdy)

L - délka proudění

Rovnici lze zapsat ve tvaru (2.12):

$$v = -K_s \frac{dH}{dz} \quad (2.12)$$

Záporným znaménkem ($-K_s$) označujeme opačný směr proudění vody, než je směr gradientu hydraulické výšky, jestliže ztotožníme spodní hladinu vody s počátkem osy z a osa bude směrem nahoru kladná - voda bude proudit opačným směrem.

Pro neustálené proudění v nenasyceném pórovitém prostředí lze použít Darcy-Buckinghamův zákon (Darcyho zákon zevšeobecněný Buckinghamem v roce 1907) .

Pro proudění ve více než v jednom směru platí (2.12):

$$v = -k(h_w) \cdot \text{grad } H \quad (2.13)$$

$k(h_w)$ - hydraulická vodivost nenasyceného pórovitého prostředí

$\text{grad } H$ - gradient hydraulické výšky půdní vody

V hrubě disperzních zeminách při velkém sklonu nebo u půd obsahujících koloidní částičky i při menších sklonech (pravděpodobně změnou viskozity)⁴⁵ se objevují odchylky od Darcyho zákona. Darcyho zákon platí do kritické hodnoty Reynoldsova čísla (2.14):

$$Re = \frac{v_s \rho d}{\eta} \quad (2.14)$$

d - trubice o průměru (průměr zrna, póru)

v_s - průměrná rychlost proudění kapaliny v průřezu

ρ - hustota kapaliny

η - dynamická viskozita ($N.s.m^{-2}$)

η/ρ - kinematická viskozita ($m^2.s^{-1}$)

Viskozita (vazkost) je závislá na přitažlivých silách mezi částicemi a charakterizuje vnitřní tření. Větší viskozita má za následek brždění pohybu kapaliny nebo částic v kapalině. Kritická hodnota Reynoldsova čísla se zjišťuje experimentálně, je pro různé kapaliny odlišná. Čím je Re vyšší, tím je vliv třecích sil v kapalině na celkový odpor nižší.

Pro odvození rovnice neustáleného proudění vody v nenasyceném pórovitém prostředí vycházíme z rovnice rovnici kontinuity, která vyjadřuje zákon o zachování energie (2.15):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \operatorname{div} v = -\nabla \cdot v \quad (2.15)$$

Operátor divergence lze vyjádřit v jako skalární součin operátoru ∇ na vektoru v . Složkami vektoru jsou parciální derivace skalárního pole podle kartézských souřadnic x, y, z (2.16):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z}\right) \quad (2.16)$$

V jednorozměrném tvaru má rovnice tvar (2.17):

⁴⁵ KUTÍLEK, Miroslav. *Vodohospodářská pedologie*. Druhé, přepracované vydání. Praha: SNTL, 1978. 296 s.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial v}{\partial z} \quad (2.17)$$

Celkový potenciál půdní vody vyjádříme vztahem (2.18):

$$H = h_w + z \quad (2.18)$$

h_w - vlhkostní potenciál

z - gravitační potenciál

Dosadíme do rovnice (2.13) a dostaneme (2.19) rovnici pro přenos vody v nenasyčeném pórovitém prostředí:

$$v = -k(h_w) \cdot \text{grad} (h_w + z) \quad (2.19)$$

$k(h_w)$ – hydraulická vodivost nenasyčeného pórovitého prostředí

Jelikož nenasyčená hydraulická vodivost půdy je závislá na vlhkosti θ , můžeme Darcy-Buckinghamovu rovnici vyjádřit ve tvaru (2.20):

$$v = -k(\theta) \cdot \text{grad} (h_w + z) \quad (2.20)$$

Přenos vody v nenasyčené půdě probíhá především ve vertikálním směru. Po úpravě dostaneme rovnici (2.21):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[k(\theta) \cdot \frac{\partial h_w}{\partial z} \right] + \frac{\partial k(\theta)}{\partial z} \quad (2.20)$$

Vyjádříme-li levou stranu rovnice pomocí vztahu mezi vlhkostním potenciálem (Richardsova rovnice) a vlhkostí dostaneme rovnici ve tvaru (2.22)⁴⁶:

⁴⁶ VELEBNÝ, Vladimír. *Vodný režim půdy*. Bratislava: Slovenská technická univerzita, 2000. Edícia skript. ISBN 80-227-1373-2, 208 s.

$$\frac{\partial \theta}{\partial h_w} \frac{\partial h_w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[k(\theta) \cdot \frac{\partial h_w}{\partial z} \right] + \frac{\partial k(\theta)}{\partial z} \pm V_A \quad (2.22)$$

V_A – přítok nebo odtok vody uvnitř jednotkového objemu ($m^3 \cdot m^{-3} \cdot s^{-1}$)

kde $\partial \theta / \partial h_w$ je sklon retenční čáry. Retenční čára půdní vlhkosti vyjadřuje závislost mezi objemovou půdní vlhkostí θ ($L^3 \cdot L^{-3}$) a tlakovou výškou h (L).

2.1.2.8 Teplo v půdě

Teplo významně ovlivňuje fyzikální, chemické a biochemické procesy v půdě. Má vliv na růst rostlin i život půdních organismů. Hlavním zdrojem tepla v půdě je sluneční záření, které je pohlcováno svrchní vrstvou jejího povrchu. Půdou je absorbováno převážně krátkovlnné záření, vyzařováno je jako záření dlouhovlnné. V rámci řady vědních oborů (pedologie, pedochemie, geofyzika, geotermika aj.) jsou prováděna měření teplot v různých hloubkách (např. 5, 10, 20, 50 a 100 cm). V rámci programů využití geotermální energie se provádí sledování teplot v odlišných zemských strukturách do hloubky 4–5 km pod povrchem. Vliv atmosférických vlivů (sluneční záření, venkovní teplota, déšť apod.) se pod povrchem projevuje přibližně do hloubky 10-20 m. Pod touto hloubkou se nachází pásmo prakticky konstantní teploty (kolem 10 °C) až do hloubky přibližně 50 m. Od hloubky 50 m se začíná na teplotním profilu projevovat geotermální vliv. Teplota směrem k zemskému jádru v hloubce větší než 50 m stoupá přibližně o 3 °C na 100 m. Venkovní teplota na zemském povrchu kolísá podle klimatického pásu přibližně od -90°C (nejnižší naměřená teplota do -89 °C, Antarktida, 1983) do 60 °C (nejvyšší naměřená teplota 57,8 °C v Lybii (r.1922) - neuznáno WMO (Světová meteorologická organizace), uznán pouze světový rekord 56,7°C naměřený v Death Valley v Kalifornii v USA v r.1913)⁴⁷.

⁴⁷ Světový teplotní rekord patří Death Valley [online]. 2012 [cit. 2021-7-27]. Dostupné z: <https://www.in-pocasi.cz/clanky/vyznacne/svetovy-teplotni-rekord-14.9.2012/>

Přenos tepla v půdním prostředí je ovlivněn sezónním a denním střídáním venkovních teplot. Největší změny teplot se projevují na povrchu půdy. Denní amplituda teplot na povrchu bývá větší než amplituda teplot vzduchu. Směrem do hloubky se kolísání teplot zmírňuje.

Teplotu povrchu ovlivňuje barva, struktura povrchu, vlhkost, rostlinný porost a v zimě sněhová pokrývka. Tmavý povrch s hrubší strukturou se zahřívá více než světlý. Teplotní rozdíly jsou způsobeny i orientací povrchu půdy. Nejvíce se zahřívá terén orientovaný na jih (s jižní expozicí), méně na západ a východ a nejméně záření absorbuje povrch orientovaný k severu. Je-li povrch porostlý vegetací, část dopadající energie vegetace použije na ohřátí porostu a transpiraci, část se odrazí do ovzduší. Z toho plyne, že půda porostlá vegetací se zahřívá méně. Na druhé straně porost omezuje tepelné ztráty při vyzařování z povrchu. Na ztrátách tepla z povrchu půdy se podílí i tloušťka sněhu v zimě. Vrstva 20-30 cm může půdu ochránit i před velmi silnými mrazy. Teplota povrchu půdy pod sněhem se v takovém případě může pohybovat kolem 0°C.

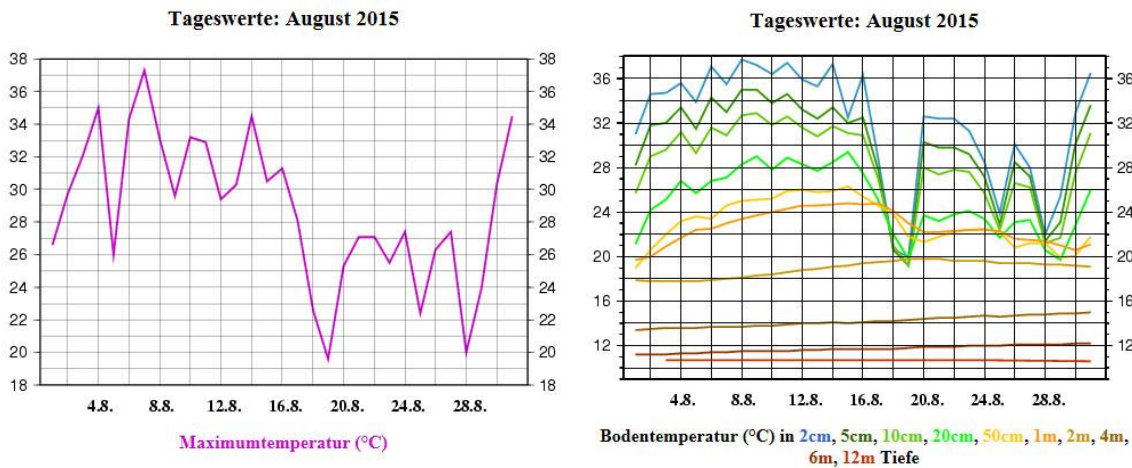
Míra zahřátí povrchu půdy závisí na schopnosti půdy absorbovat sluneční záření, na její tepelné kapacitě, na ztrátách energie při výparu vody z půdy, na ztrátách energie při vyzařování a na přenosu energie do hlubších vrstev.

Denní průběh teploty ve svrchních vrstvách půdy má většinou jedno maximum a jedno minimum. Podle dosavadních výzkumů bylo zjištěno, že doba nástupu denního maxima a minima s rostoucí hloubkou po 10 cm se zpožďuje přibližně o 2-4 hodiny. Povrch půdy je nejteplejší většinou hodinu po kulminaci Slunce a nejchladnější před východem Slunce. Nejvyšší roční teplota půdy v našich podnebních podmínkách se vyskytuje nejčastěji v červenci až srpnu, nejnižší v lednu až v únoru. V našich podmínkách denní výkyvy pronikají do hloubky 5 m a roční přibližně do hloubky 20 m⁴⁸.

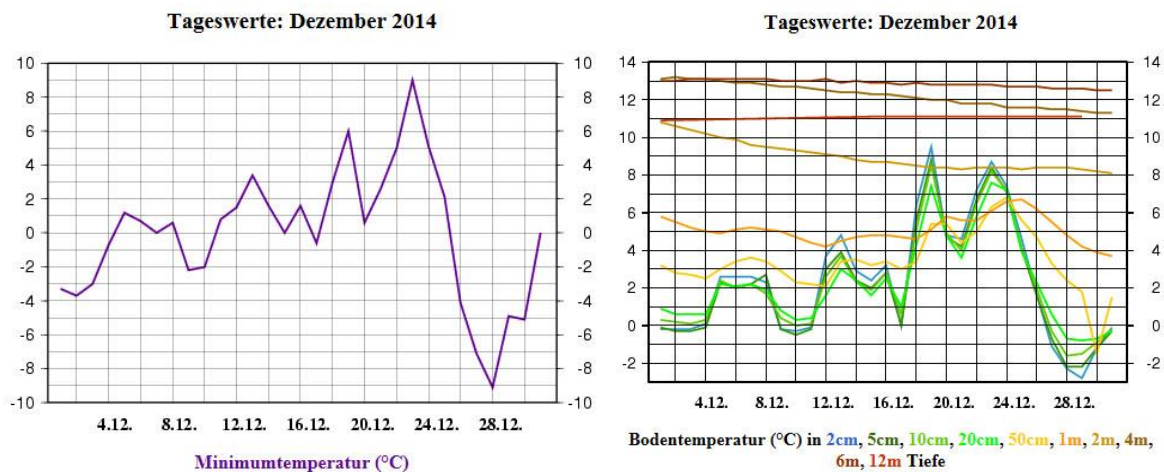
Pouze pro ilustraci uvedu příklady průběhu teplot v půdě (*Obr. 2.14 a Obr. 2.15*), na kterých jsou zobrazeny výsledky měření v prosinci 2014 a srpnu 2015 prováděná v Německu v hloubkách od 2 cm - 12 m, zveřejněná Postupimským institutem pro výzkum dopadů změn klimatu (PIK). Měření byla prováděna v 13-ti hodinových intervalech. Kolísání teplot na obou obrázcích je možné pozorovat až do hloubky 6 m. V hloubce 12 m již byla naměřena téměř

⁴⁸ PAVLŮ, Lenka. *Základy pedologie a ochrany půdy*. V Praze: Česká zemědělská univerzita, 2019. ISBN 978-80-213-2952-2.

konstantní teplota při maximální naměřené teplotě 37,5°C v srpnu 2015 a v prosinci 2015 při minimální naměřené teplotě -9 °C.



Obr. 2.14 - Průběh venkovních teplot a průběh teplot v půdě (Německo, PIK- srpen 2015)⁴⁹



Obr. 2.15 - Průběh venkovních teplot a průběh teplot v půdě (Německo, PIK- prosinec 2014)⁵⁰

⁴⁹ POTSDAM-INSTITUT FÜR KLIMAFOLGENFORSCHUNG, Bodentemperatur,[on line], 1992 [cit. 17-3-2016] , dostupné z https://www.pik-potsdam.de/services/klima-wetter-potsdam/klimazeitreihen/bodentemperatur/index_html

⁵⁰ POTSDAM-INSTITUT FÜR KLIMAFOLGENFORSCHUNG, Bodentemperatur,[on line], 1992 [cit. 17-3-2016] , dostupné z https://www.pik-potsdam.de/services/klima-wetter-potsdam/klimazeitreihen/bodentemperatur/index_html

Pro vyjádření časové změny teploty v půdě v závislosti na hloubce můžeme použít Fourierovy zákony, které vyplývají z řešení rovnice molekulárního vedení tepla.

Předpokládáme-li, že neexistuje horizontální transport tepla, z Fourierových zákonů vyplývá, že perioda časových změn teploty půdy se s rostoucí hloubkou nemění, zatímco amplituda časových změn se s rostoucí hloubkou zmenšuje. Pro amplitudu časových změn v hloubce z platí vztah (2.22)⁵¹:

$$A_z = A_0 \exp^{-z \sqrt{\frac{z}{P \cdot k_m}}} \quad (2.21)$$

kde

- A_0 - počáteční amplituda výkyvů na povrchu půdy
- z - hloubka
- P - perioda výkyvů teploty
- k_m - koeficient molekulární teplotní vodivosti

S rostoucí hloubkou dochází ke zpoždění doby výskytu maxima a minima teploty půdy oproti času výskytu extrému na povrchu. Zpoždění ΔT lze vyjádřit vztahem (2.23)⁵²:

$$\Delta T = \frac{z}{2} \sqrt{\frac{P}{k_m \cdot \pi}} \quad (2.22)$$

Hloubky stálé denní a roční teploty jsou v poměru druhých odmocnin period výkyvů (2.24)⁵³:

$$\frac{z_d}{z_r} = \sqrt{\frac{P_d}{P_r}} \quad (2.23)$$

kde

⁵¹ Česká meteorologická společnost [online]: Elektronický meteorologický slovník výkladový a terminologický (eMS) [cit 27.07.2021]. Dostupné z: <http://slovník.cmes.cz>

⁵² Česká meteorologická společnost [online]: Elektronický meteorologický slovník výkladový a terminologický (eMS) [cit 27.07.2021]. Dostupné z: <http://slovník.cmes.cz>

⁵³ Česká meteorologická společnost [online]: Elektronický meteorologický slovník výkladový a terminologický (eMS) [cit 27.07.2021]. Dostupné z: <http://slovník.cmes.cz>

- z_d - hloubka stálé denní teploty půdy
 z_r - hloubka stálé roční teploty půdy
 P_d - perioda denních výkyvů půdy
 P_r - perioda ročních výkyvů půdy

2.1.2.9 Tepelně technické parametry související s danou problematikou

V této kapitole budou zmíněny základní tepelně technické parametry úzce související s danou problematikou.

Tepelná vodivost vyjadřuje schopnost dané látky vést teplo směrem z její teplejší části do chladnější. Tepelná vodivost je charakterizována *součinitelem tepelné vodivosti*. Definujeme ho jako množství tepla, které musí za jednotku času projít tělesem při jednotkovém gradientu teploty.

Součinitel tepelné vodivosti (tepelná konduktivita) λ [$W.m^{-1}.K^{-1}$] vyjadřuje schopnost stejnorodého izotropního materiálu vést teplo (2.25):

$$\lambda = \frac{\vec{q}}{-grad T} \quad (2.24)$$

kde

$grad T$ - gradient teploty [$K.m^{-1}$]

\vec{q} - vektor hustoty ustáleného tepelného toku vedením proudícího izotropním materiálem [$W.m^{-2}$]

Na součinitel tepelné vodivosti má výrazný vliv především vlhkost a objemová hmotnost látky, v menší míře teplota a tloušťka materiálu. Tepelná vodivost půdy (přenos tepla v půdě) závisí na její struktuře, zrnitosti, vlhkosti, obsahu humusu a mineralogickém složení.

Tab. 2.5 Tepelné vodivosti nejběžnějších zemin a výplně jejich pórů - Drbal (1969)

Druh zeminy	λ [$W.m^{-1}.K^{-1}$]	Druh zeminy	λ [$W.m^{-1}.K^{-1}$]
žula	2,90	vodou nasycený písek jemnozrný	1,63
suchá půda	0,30	vodou nasycená hlína písčítá	1,34
suchý písek hrubozrný	0,20	vodou nasycená hlína	0,88

suchý písek jemnozrnný	0,19	vodou nasycená rašelina	0,46
suchá hlína písčítá	0,19	vzduch	0,02
suchá hlína	0,14	voda	0,50
vlhká půda	1,90	led	2,10
vodou nasycený písek hrubozrnný	1,72		

Tepelná kapacita C vyjadřuje množství tepla, které musíme dodat látce, aby se její teplota zvýšila o 1 K, je definována vztahem $[J \cdot K^{-1}]$ (2.26):

$$C = \frac{Q}{\Delta T} \quad (2.25)$$

kde

Q - teplo dodané(odebrané) tělesu

ΔT - rozdíl teplot mezi počátečním a konečným stavem

Měrná tepelná kapacita c (ve starší literatuře *měrné nebo specifické teplo*), představuje množství tepla potřebného k ohřátí 1 kg látky o 1°K. $[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$. Čím je tato hodnota vyšší, tím lépe látka odolává kolísání teplot. Měrná tepelná kapacita je definována vztahem (2.27):

$$c = \frac{C}{m} = \frac{Q}{m \cdot \Delta T} \quad (2.26)$$

kde

m - hmotnost tělesa (kg)

C - tepelná kapacita $(J \cdot K^{-1})$

Měrná tepelná kapacita má jiné hodnoty pro různá skupenství a je mírně závislá na teplotě. Pro získání přesnějších hodnot se uvádí hodnota včetně teploty, ke které se vztahuje. Látky o malé měrné tepelné kapacitě (kovy) se rychle zahřejí a rychle zchladnou, naopak tělesa z látek o velké měrné tepelné kapacitě (voda, vzduch) se zahřejí pomaleji, ale déle drží teplotu.

Z běžně známých látek má nejvyšší měrnou tepelnou kapacitu voda 4 180 J.K⁻¹.kg⁻¹ (10°C), vzduch při 0 °C má měrnou tepelnou kapacitu 1003 J.K⁻¹.kg⁻¹.

Objemová tepelná kapacita $C [J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}]$ je schopnost daného objemu látky uložit vnitřní energii, zatímco prochází teplotní změnou, aniž by přešla fázovým přechodem.

Objemovou tepelnou kapacitu zeminy lze stanovit ze vztahu (2.28):

$$C = \rho \cdot c \quad (2.27)$$

Přesnější hodnotu C získáme ze vztahu (2.29), kde jsou započítány podíly všech složek (pevné, kapalné, plynné)⁵⁴.

$$C = v_s \cdot C_s + v_w \cdot C_w + v_a \cdot C_a \quad (2.28)$$

v_s – objemový podíl pevné složky (půda)

v_w – objemový podíl kapalné složky (půdní voda)

v_a – objemový podíl plynné složky (půdní vzduch)

Pevná fáze půdy může obsahovat i více složek, především organickou a minerální s odlišnou tepelnou kapacitou.

Tab. 2.6 Tepelné vlastnosti vybraných složek půdy^{55,56,57}

	t $t[^\circ\text{C}]$	ρ $\rho [\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$	c $c [\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$	C $C[\text{J}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}]$	λ $\lambda [\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$
Voda	20	998,0	4180,0	$4,17 \cdot 10^6$	0,600
Vzduch suchý	20	1,188	1010	$1,20 \cdot 10^3$	0,0252
Led	0	920	2093,4	$1,93 \cdot 10^6$	2,20
Sníh	0	300	2090,0	$0,63 \cdot 10^6$	0,26
Hlína suchá		1600	920,0	$1,47 \cdot 10^6$	0,700
Rostlá půda		2000	920,0	$1,84 \cdot 10^6$	2,30
Žula		2500	920,0	$2,30 \cdot 10^6$	3,10
Písek		1750,0	960,0	$1,68 \cdot 10^6$	0,950
Štěrk		1650	750,0	$1,24 \cdot 10^6$	0,650
Organické látky		1300	1923	$2,5 \cdot 10^6$	0,25

Součinitel tepelné vodivosti ledu je vyšší než vody ($\lambda = 2,20 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), zatímco měrná tepelná kapacita ledu je poloviční, přibližně $2090 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. U sněhu závisí součinitel tepelné vodivosti na jeho hustotě $100\text{-}500 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, $\lambda = 0,0286\text{-}0,6378 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ⁵⁸.

⁵⁴ VELEBNÝ, Vladimír. *Vodný režim půdy*. Bratislava: Slovenská technická univerzita, 2000. Edícia skript. ISBN 80-227-1373-2, 208 s.

⁵⁵ VELEBNÝ, Vladimír. *Vodný režim půdy*. Bratislava: Slovenská technická univerzita, 2000. Edícia skript. ISBN 80-227-1373-2, 208 s.2

⁵⁶ 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

⁵⁷ Hodnoty jsou získány z různých pramenů

⁵⁸ Součinitel tepelné vodivosti sněhu. <https://stavba.tzb-info.cz> [online]. [cit. 2021-12-29]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/69-soucinitel-tepelne-vodivosti-snehu>

Teplotní vodivost je schopnost stejnorodého materiálu o určité vlhkosti vyrovnávat rozdílné teploty při neustáleném vedení tepla. Je charakterizována *součinitelem teplotní vodivosti* (a).

Součinitel teplotní vodivosti (tepelná difuzivita) a [$m^2 \cdot s^{-1}$] udává rychlost s jakou stejnorodý materiál vyrovnává teplotní rozdíl. Čím je hodnota vyšší, tím více je teplota v určitém místě závislá na změně jeho povrchové teploty. Z teplotního součinitele usuzujeme, jak rychle se teplota materiálu změní v závislosti na změně jeho povrchové teploty. Součinitel teplotní vodivosti (a) je definován vztahem (2.30):

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \quad (2.29)$$

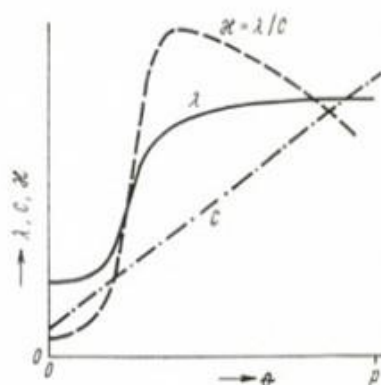
kde

λ - součinitel tepelné vodivosti ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)

c - měrná tepelná kapacita ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)

ρ - objemová hmotnost ve stavu definované vlhkosti ($kg \cdot m^{-3}$)

Teplotní vodivost charakterizuje rychlost, jakou probíhají teploty v půdě a zároveň určuje hloubku, do jaké změna teploty pronikne. V půdě je součinitel tepelné vodivosti (λ) závislý na vlhkosti. Na grafu (obr.2.16) vidíme prudký nárůst hodnoty součinitele λ v okamžiku, kdy dochází v půdě vlivem vzrůstající vlhkosti propojení vodních cest. Nárůst je dán skutečností, že součinitel tepelné vodivosti vody ($\lambda = 0,57 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$) je přibližně 23 x větší, než součinitel tepelné vodivosti vzduchu ($\lambda = 0.025 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$), kdy jsou póry ještě částečně naplněny vzduchem.



Obr. 2.16 - Závislost tepelných charakteristik na vlhkosti půdy⁵⁹

⁵⁹ KUTÍLEK, Miroslav. *Vodohospodářská pedologie*. Druhé, přepracované vydání. Praha: SNTL, 1978. 296 s.

C - objemová tepelná kapacita ($c \cdot \rho$)

X - tepelná difuzivita (dle nového značení - součinitel teplotní vodivosti (a))

λ - součinitel tepelné vodivosti ($W/m.K$)

2.1.2.10 Vedení tepla v půdě

Rozlišujeme tři základní způsoby přenosu tepla: zářením (*radiací*), prouděním (*konvekci*) a vedením (*kondukcí*). Konvekci se přenáší teplo v kapalinách a plynech, tedy tento způsob přenosu tepla se uplatňuje ve vodou nenasycené půdě např. při infiltraci vody ze srážek, závlahy nebo na jaře z roztátého sněhu. Kondukcí probíhá přenos tepla mezi pevnými částicemi v půdě. Radiací je energie přenášena elektromagnetickými vlnami a přeměna na teplo nastává při absorpci povrchem půdy.

Tepelný režim půdy závisí na absorpci slunečního záření, tepelné vodivosti a na měrné tepelné kapacitě. Tepelnou vodivost zvyšuje voda obsažená v půdě. Vlhká půda je chladnější než suchá, důvodem je vyšší hodnota měrné tepelné kapacity vody ($4180 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$). Voda má také větší měrnou tepelnou kapacitu než vrstvy pevné zemské kůry. Důsledkem toho se pomaleji ohřívá a pomaleji ochlazuje oproti pevnině. Tento jev bývá příčinou menších teplotních rozdílů přímořského podnebí oproti podnebí vnitrozemskému.

Teplota půdy má velký význam pro pěstování zemědělských plodin. Ovlivňuje jejich růst a vývoj. Čím má půda větší měrnou tepelnou kapacitu, tím se ohřívá pomaleji. Tepelná kapacita půdy je tedy závislá na obsahu vody v pórech.⁶⁰ Čím větší měrnou tepelnou kapacitu půda má, tím pomaleji se ohřívá.

Nejméně vody obsahují půdy písčité (voda rychleji odečte), proto se ohřívají nejrychleji a nejsnadněji. Mají vysokou tepelnou vodivost, výkyvy teplot zasahují nejhluběji (včetně promrzání půdy), délka promrzání je naopak nejkratší. Jílovité půdy obsahují hodně vody, díky tomu mají vyšší hodnotu měrné tepelné kapacity, jsou studenější a délka mrazu je delší.

⁶⁰ HORA, Petr. : *Vztah teploty vzduchu a půdy různých půdních druhů* [online]. In: . Skalní mlýn, 2.-4.2.2011, s. 11 [cit. 2021-12-22]. ISBN 978-80-86690-87-2. Dostupné z: <http://www.cbks.cz/SbornikSMlyn11/Hora.pdf>

Rašelinné půdy jsou velmi chladné, prohřívají se mělko a kolísání teplot zasahuje přibližně do hloubky 30 cm.

V letních měsících může snížit teplotu půdy i závlaha zemědělských plodin. Výkyvy extrémních teplot zmírňuje také vegetace. Během dne snižuje intenzitu slunečního záření, v noci brání vyzařování a poklesu teploty povrchu půdy. Podobný efekt vzniká, zakryjeme-li povrch půdy uměle. Použijí-li se k závlivce odpadní vody, mohou např. na podzim zvýšit teplotu půdy. Měrná tepelná kapacita má vliv na opožďování průběhu teplot v půdě oproti průběhu teplot v ovzduší.

Sezónní kolísání teplot se projevuje ve větších hloubkách než denní kolísání teplot. Průběh ročního chodu teplot má periodický průběh s amplitudou zmenšující se v závislosti na hloubce. Roste-li hloubka aritmetickou řadou, amplituda výkyvů klesá řadou geometrickou. S rostoucí hloubkou se zpožďuje i doba nástupu maxim a minim. Zpoždění maxim je tím menší, čím je tepelná vodivost půdy větší. Opoždění ročních extrémů je v našich podmínkách přibližně cca 25 dnů na 1 m hloubky, denní maxima a minima se opožďují asi o 3 hodiny na každých 10 cm hloubky.

Ustálené (stacionární) vedení tepla

Jestliže přítok tepla prochází látkou tak, že teplota v kterémkoli místě se s časem nemění, rychlost přenosu tepla je konstantní (2.31) a množství tepla vstupující do objemu se rovná množství tepla vystupujícího z objemu, hovoříme o ustáleném přenosu tepla.

$$\Delta T = T_2 - T_1 > 0 = konst \quad (2.30)$$

Vedení tepla popisuje Fourierův zákon (2.32):

$$q = -\lambda \text{ grad } T = -\lambda \nabla T \quad (2.31)$$

q - hustota tepelného toku

λ - součinitel tepelné vodivosti

∇T - gradient teploty

Pro vodou nenasycenou půdu je součinitel tepelné vodivosti závislý na vlhkosti. Čím je vlhkost větší, tím větší je součinitel λ . Intenzitu tepelného toku můžeme vyjádřit rovnicí (2.33):

$$q = -\lambda(\theta) \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (2.32)$$

q - intenzita tepelného toku ($W.m^{-2}$)

$-\lambda(\theta)$ - součinitel tepelné vodivosti jako funkce vlhkosti ($W.m^{-1} K^{-1}$)

T - teplota půdy ($^{\circ}K$)

Záporné znaménko vyjadřuje směr přenosu tepla, který probíhá proti kladnému směru gradientu teploty, tj. teplota v kladném směru osy x klesá.

Neustálené vedení tepla

Při neustáleném vedení tepla množství tepla přivedeného do objemu půdy se nerovná množství tepla vystupujícího z objemu, což má za následek změny v rozdělení teplot v objemu půdy. Změnu obsahu tepla v objemu půdy můžeme matematicky vyjádřit rovnicí (2.34)⁶¹:

$$c \cdot \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = - \frac{\partial q}{\partial x} - L \frac{\partial E}{\partial x} \pm H(x, t) \quad (2.33)$$

ρ - objemová hmotnost půdy ($kg.m^{-3}$)

c - měrná tepelná kapacita ($J.kg^{-1}.K^{-1}$)

L - skupenské teplo vypařování ($J.kg^{-1}$)

E - (evapotranspirace) intenzita vypařování ($kg \cdot m^{-2}.s^{-1}$)

H - intenzita zdroje nebo odběru tepla ($J.m^{-3}.s^{-1}$)

⁶¹ VELEBNÝ, Vladimír. *Vodný režim pôdy*. Bratislava: Slovenská technická univerzita, 2000. Edícia skript. ISBN 80-227-1373-2, 208 s.2

Rovnici (2.35)⁶² pro neustálený přenos tepla vedením získáme kombinací rovnice rychlosti přenosu tepla (2.33) a rovnice kontinuity (2.34):

$$c \cdot \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(\theta) \frac{\Delta T}{\Delta x} \right) - L \frac{\partial E}{\partial x} \pm H(x, t) \quad (2.34)$$

Řešením rovnice je rozdělení teplot v půdě jako funkce souřadnic bodu a funkce času (2.36):

$$T = f(x, y, z, t) \quad (2.35)$$

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

⁶² VELEBNÝ, Vladimír. *Vodný režim půdy*. Bratislava: Slovenská technická univerzita, 2000. Edícia skript. ISBN 80-227-1373-2, 208 s.2

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 listím odražena 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.

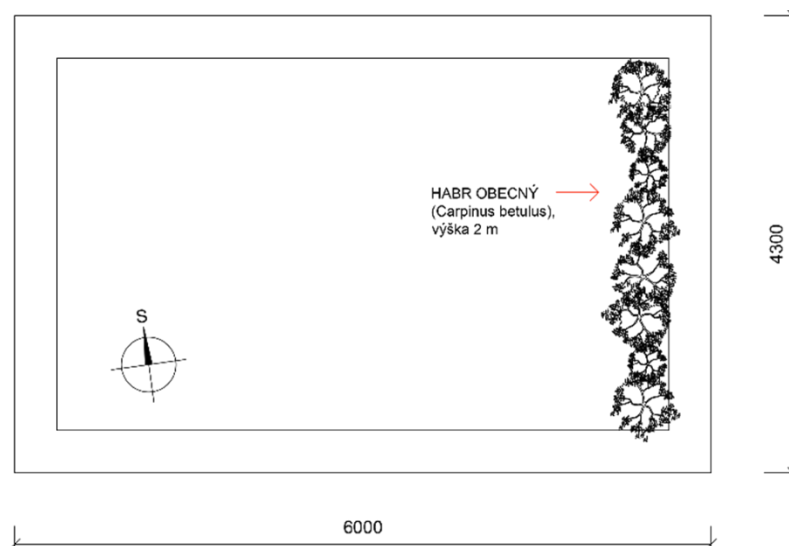
Vybrané metody jsem zvolila, abych získala přesnější informace o chování střešní zahrady na objektu. Naměřená data lze využít k počítačovým simulacím různých stavů, které mohou porovnávat se skutečným chováním vegetační střechy na budově.

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



Obr. 3.2 – Intenzivní vegetační vrstva na objektu zahradního domku

Substrát na objektu zahradního domku je tvořen orníci, 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. 3.3 - Vegetační zahrada na střeše zahradního domku osázená zemědělskými plodinami-rajčata, mrkev, paprika (r.2014)



Obr. 3.4 - 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.3.5) pro kontinuální nedestruktivní měření objemové vlhkosti a teploty půdy a datalogger GlobeLog (IMKO GmbH) – (obr.3.6). 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.

Vysoká hodnota salinity škodí rostlinám, vyskytuje se především tam, kde jsou dodávky vody do půdy nižší než odpar a spodní vrstvy půdy jsou nedostatečně propustné, příp. jako důsledek vysokých dávek průmyslových hnojiv. Snížení vysoké hodnoty salinity se provádí např. dodatečnou závlahou, promýváním půdy, snížením dávek minerálních hnojiv apod.

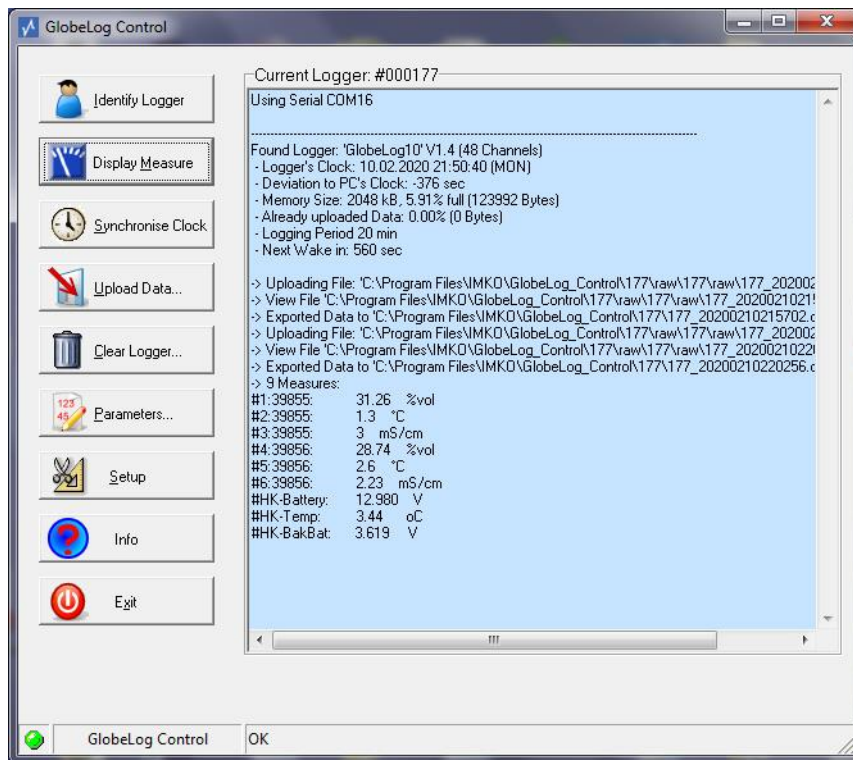


Obr. 3.5- Senzory TRIME-PICO32



Obr. 3.6 - 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.



Obr. 3.7 - Software pro komunikaci s měřícím zařízením GlobeLog (IMKO GmbH)

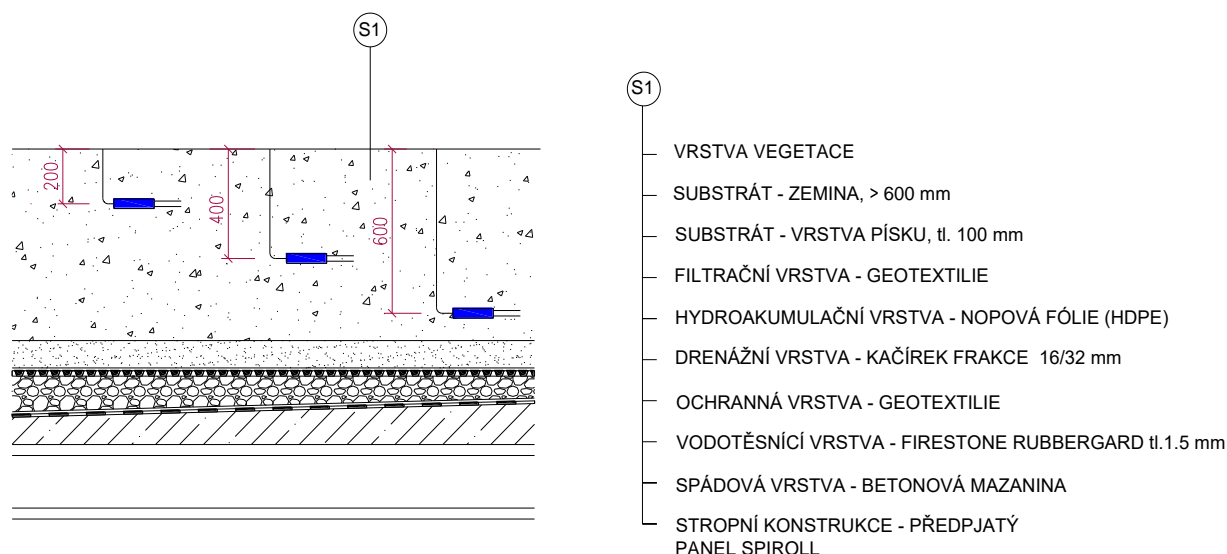
Dosažené výsledky měření tvoří tři okruhy (části):

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

4 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

4.1 Výsledky měření – 1. část

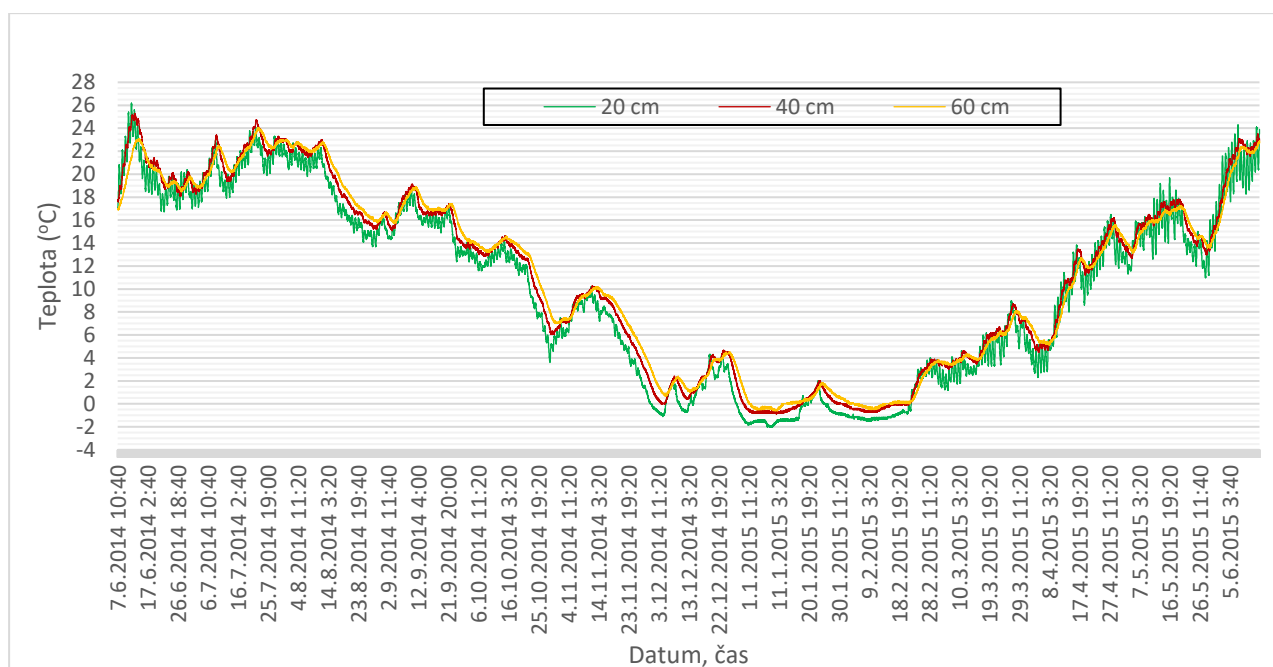
K měření byly použity tři senzory TRIME-PICO32, umístěné v substrátu střešní zahrady ve směru horizontálním ve třech různých hloubkových úrovních – 20, 40 a 60 mm (*obr.4.1*).



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

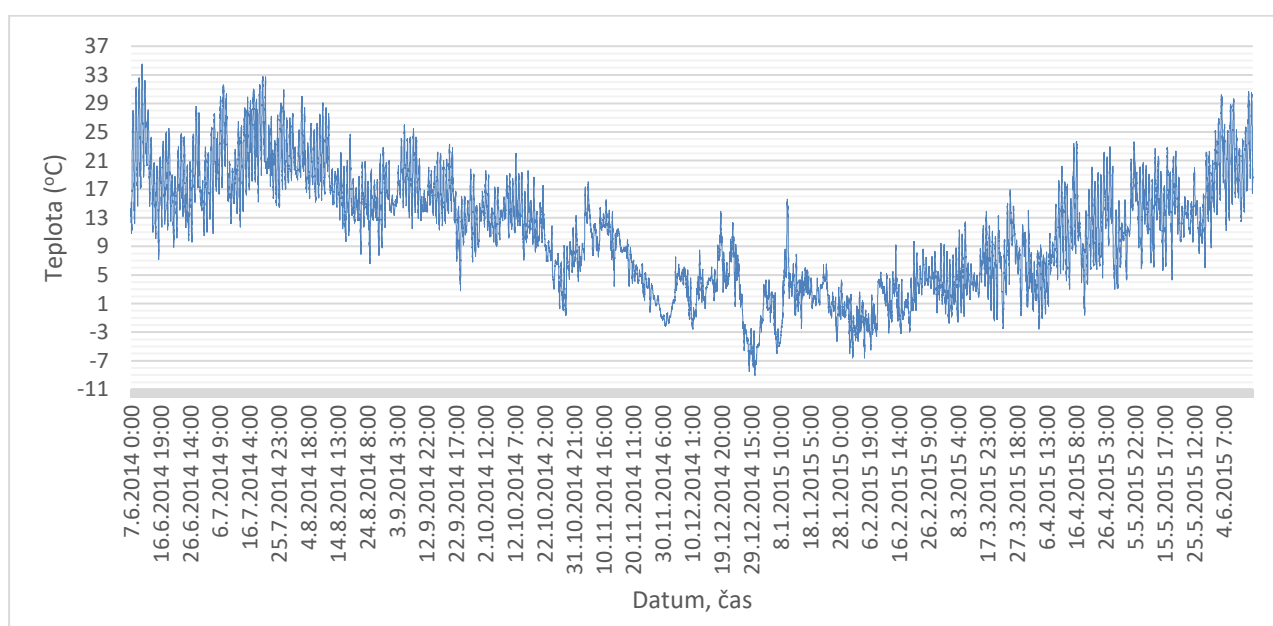
Měření probíhalo kontinuálně v intervalu po 20 minutách. Senzory měřily v substrátu vegetační střechy v jednotlivých hloubkových úrovních 20, 40 a 60 cm teplotu a objemovou vlhkost (v %). Nad senzory byly na různých místech vysázeny sezónní zemědělské plodiny a byliny. Přes některé technické problémy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

Na *obr. 4.2* je zobrazen průběh teplot v substrátu střešní zahrady v období od června 2014 do června 2015. Ve sledovaném období byla naměřena nejvyšší teplota v substrátu 26,2 °C dne 11. června 2014 v hloubce 20 cm. Nejnižší teplota -2 °C byla zaznamenána 8. a 9. ledna opět v hloubce 20 cm. Z důvodů velkého objemu naměřených dat nebylo možné všechna data umístit do příloh. V přílohách jsou pouze ukázky dat - viz *příloha č.1,2*.



Obr. 4.2 - Průběh teplot v substrátu intenzivní vegetační střechy v hloubkách 20,40,60 cm (7.6.2014 - 14.6.2015)

Na obr. 4.3 jsou teploty venkovního vzduchu ve sledovaném období. Měření byla prováděna v 10-ti minutových intervalech. Naměřené hodnoty poskytl ČHMÚ, meteorologická stanice Brno-Tuřany (B2BTUR01).

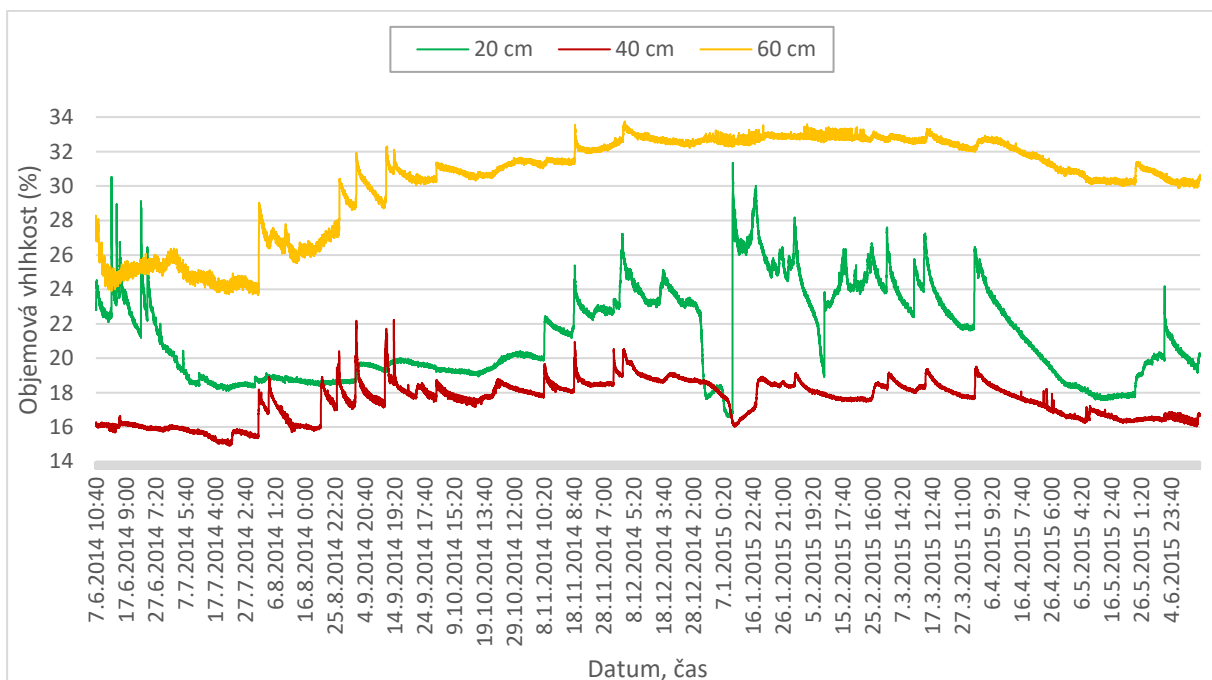


Obr. 4.3 - Průběh teplot venkovního vzduchu (zdroj: ČHMÚ, meteorologická stanice (B2BTUR01) Brno-Tuřany)

Z grafu na obr. 4.3 je patrné, že teploty venkovního vzduchu v letním období r. 2014 byly spíše průměrné s maximálními teplotami 33-34,4°C, v zimním období byla naměřena nejnižší teplota venkovního vzduchu -9,1°C.

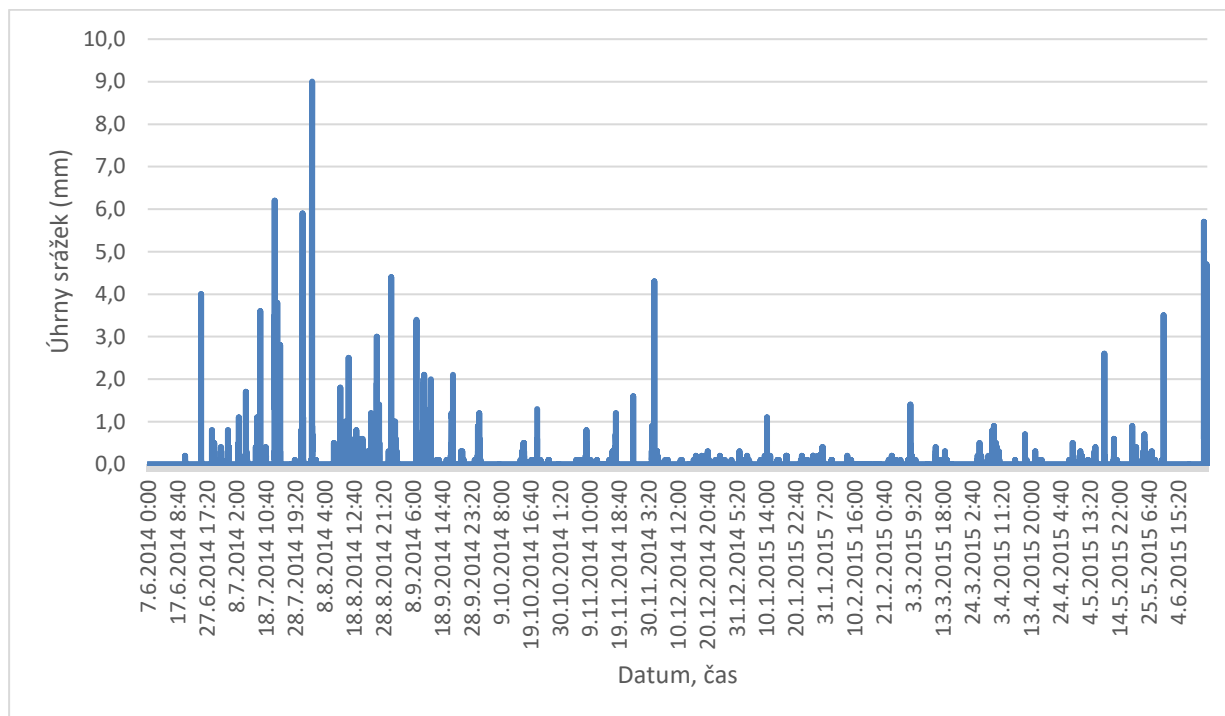
Na obr. 4.4 jsou hodnoty naměřené objemové vlhkosti (v %) v substrátu vegetační střechy ve sledovaném období v hloubkových úrovních 20,40 a 60 cm. V průměru byly nejvyšší hodnoty objemové vlhkosti naměřeny v hloubce 60 cm, nejnižší v hloubce 40 cm. Z grafu je patrné, že naměřené hodnoty objemové vlhkosti kolísaly nejvíce v hloubce 20 cm (16%-31%). V hloubce 40 cm byly naměřeny hodnoty přibližně v rozmezí 15-22 %. Nejvyšší hodnoty objemové vlhkosti byly naměřeny v zimním období v hloubce 60 cm (max. hodnota 33,76 %).

V profilu střešní zahrady se nachází pod vrstvou substrátu vrstva písku o tloušťce 10 cm. Pod touto vrstvou je umístěna hydroakumulační vrstva, kterou tvoří nopová folie (HDPE) s výškou nopů 2 cm. Z naměřených hodnot objemové vlhkosti v hloubce 60 cm můžeme usuzovat, že hydroakumulační vrstva zadržuje v profilu v této úrovni část vody. Přes vrstvu písku se předpokládá kapilární vztlínání malého množství vody do substrátu. Z tohoto důvodu byly pravděpodobně v hloubce 60 cm naměřeny nejvyšší hodnoty objemové vlhkosti. Do jaké míry jsou tyto hodnoty významné pro rostliny, může být předmětem samostatného výzkumu.



Obr. 4.4 - Hodnoty objemové vlhkosti v substrátu intenzivní vegetační střechy v hloubkách 20,40 a 60 cm (7.6.2014-14.6.2015)

Na obr. 4.5 jsou úhrny srážek v mm v 10-ti minutových intervalech. Naměřená data poskytl ČHMÚ z meteorologické stanice (B2BTUR01) Brno-Tuřany.

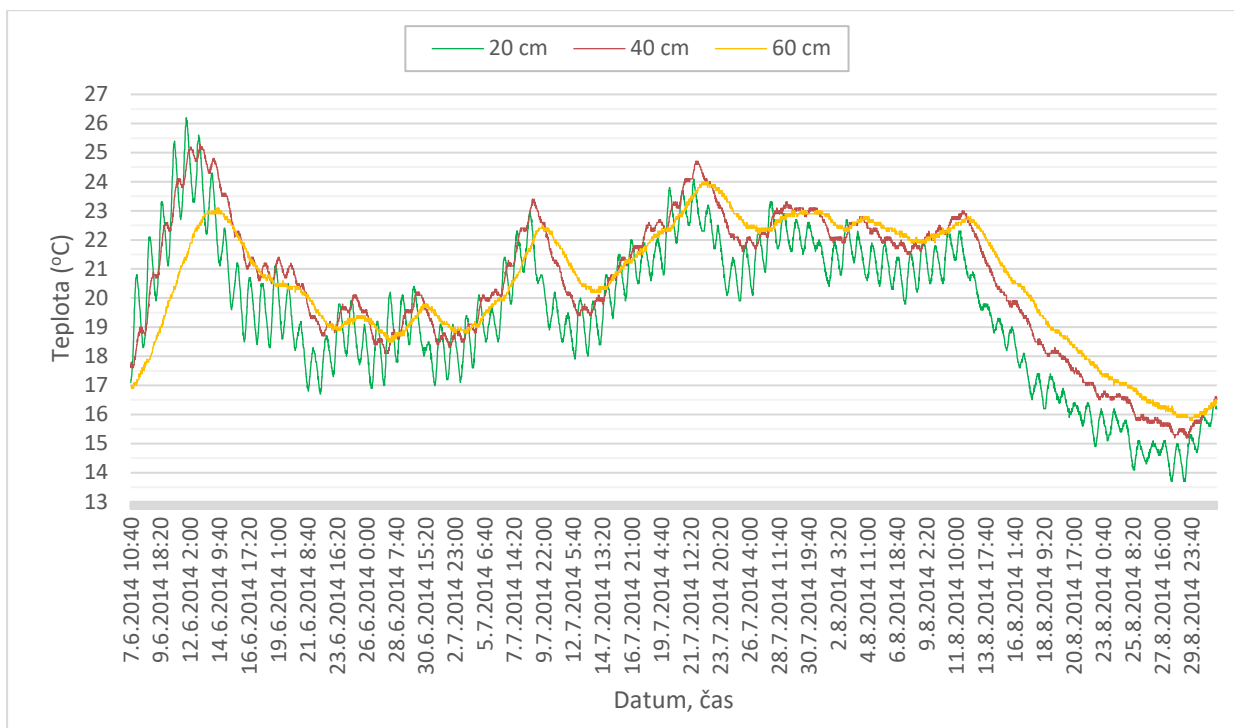


Obr. 4.5- Úhrny srážek v období od 7.6.2014 do 14.6.2015 (zdroj: ČHMÚ, meteorologická stanice (B2BTUR01) Brno-Tuřany)

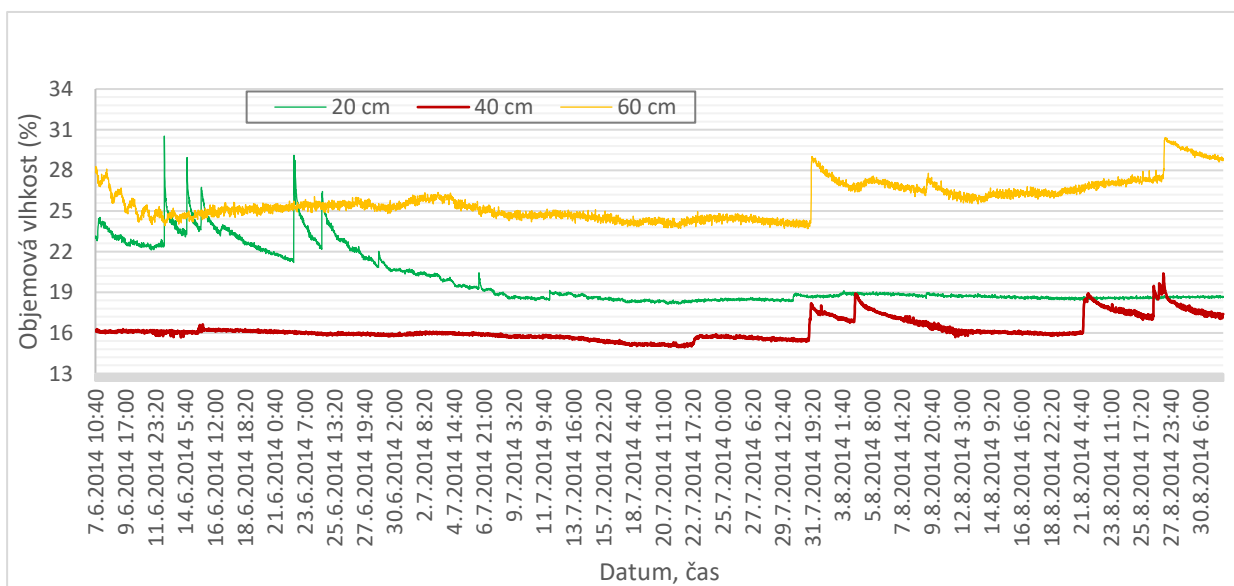
Pro větší názornost jsem grafy na obr.4.2 a obr. 4.4 rozdělila do několika dílčích úseků.

Na obr. 4.6 je zobrazen podrobnější průběh teplot na objektu zahradního domku v nejteplejších měsících roku (červen, červenec, srpen) v období od 7.6 do 31.8.2014. Největší kolísání teplot bylo zjištěno v hloubkové úrovni 20 cm. Denní amplituda teplot je zde nejvýraznější, směrem do hloubky pozorujeme zmírňování teplotních výkyvů. Rovněž můžeme pozorovat zpoždění doby nástupu denních maxim a minim s rostoucí hloubkou v hloubkových úrovních 20 a 40 cm. V hloubkové úrovni 60 cm již denní kolísání teplot není pozorovatelné.

Na obr. 4.7. jsou hodnoty objemové vlhkosti v substrátu vegetační střechy v hloubkových úrovních 20, 40 a 60 cm ve sledovaném období. V hloubce 20 cm můžeme pozorovat kolísání vlhkosti v substrátu mezi 18 až 31% . Nejnižší hodnoty objemové vlhkosti byly naměřeny v hloubce 40 cm (15-21 %), zatímco nejvyšší hodnoty byly zjištěny v hloubce 60 cm. Objemová vlhkost se zde pohybovala mezi 24-31%.



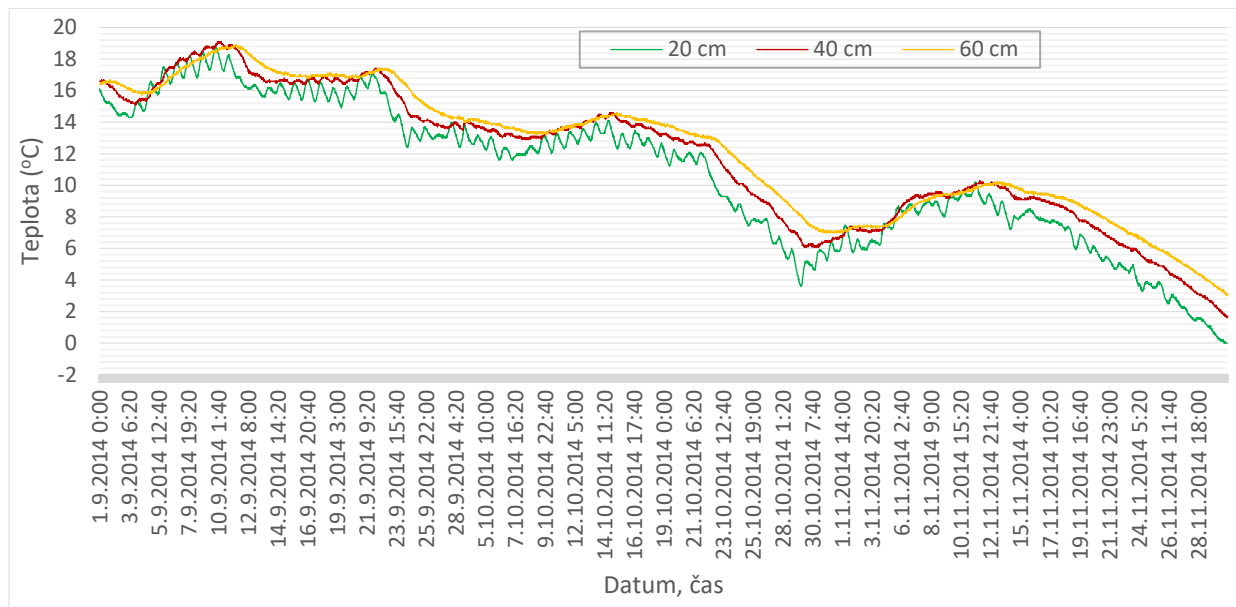
Obr. 4.6 - Průběh teplot v substrátu vegetační střechy v hloubkových úrovních 20, 40 a 60 cm (7.6. - 31.8.2014)



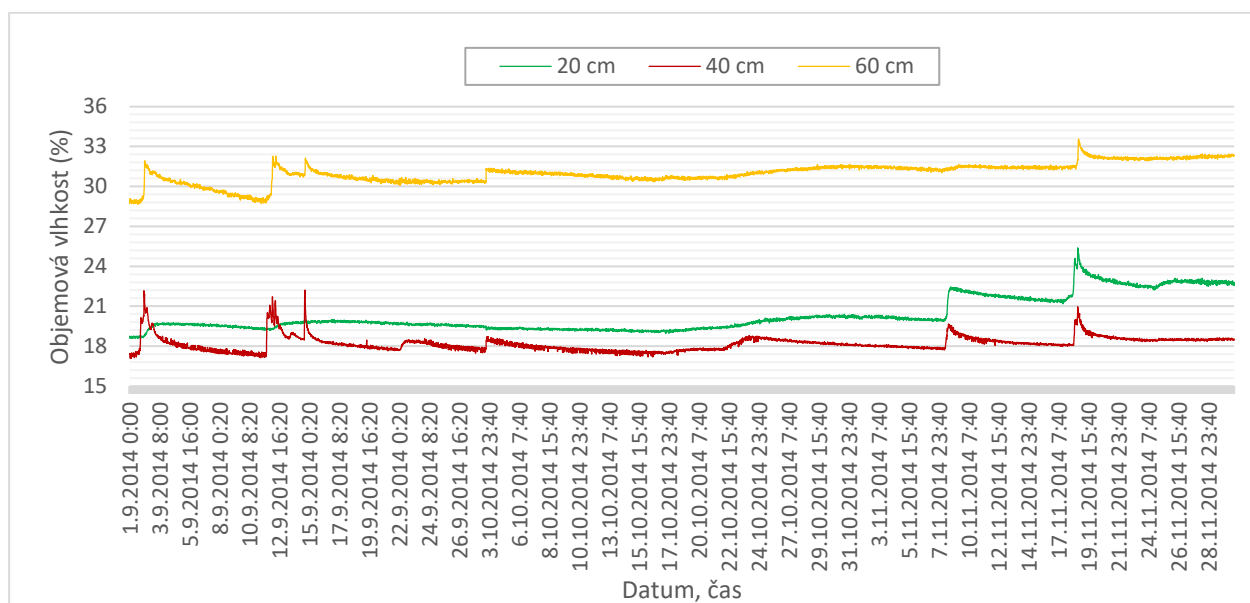
Obr. 4.7 - Hodnoty objemové vlhkosti v substrátu vegetační střechy v hloubkových úrovních 20, 40 a 60 cm (7.6.-31.8.2014)

Na obr. 4.8 a 4.9 je průběh teplot a objemová vlhkost v jednotlivých hloubkových úrovních 20, 40 a 60 cm v období od 1. září do 30. listopadu 2014. Nejvyšší naměřená teplota ve sledovaném období byla zjištěna v hloubce 40 cm (18,8 °C), nejnižší teplota byla zaznamenána

v hloubce 20 cm (0,1°C). Nejvyšší hodnoty objemové vlhkosti byly naměřeny opět v hloubce 60 cm.



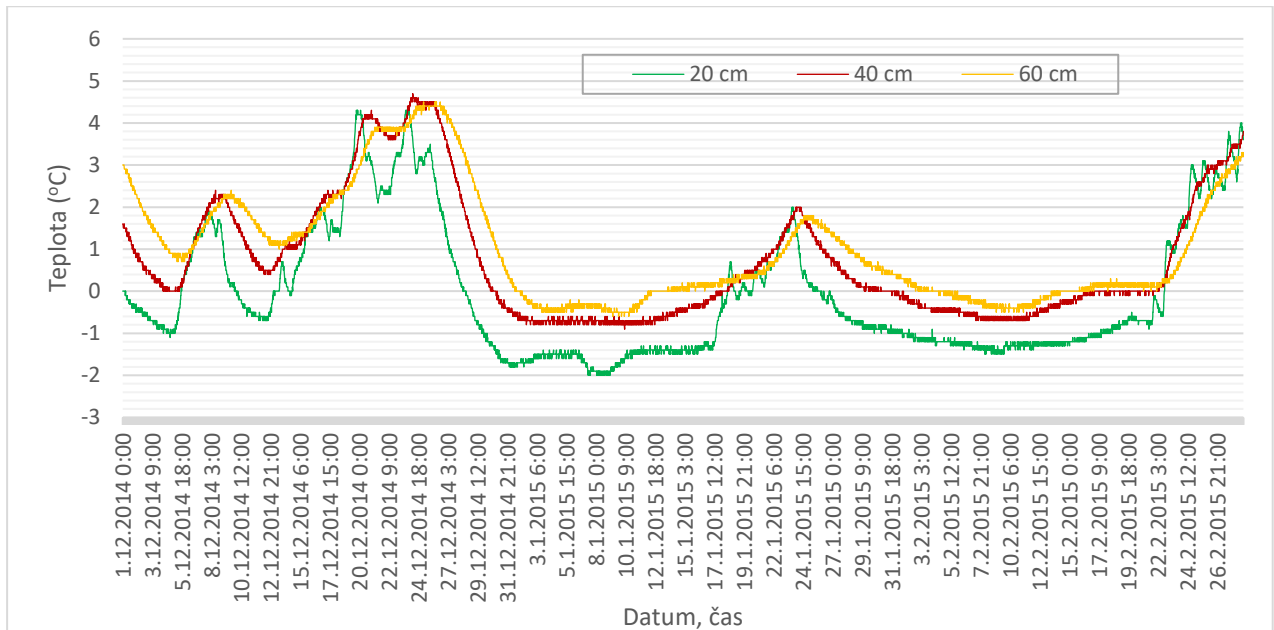
Obr. 4.8 - Průběh teplot v substrátu vegetační střechy v hloubkách 20, 40 a 60 cm (1.9. – 30.11.2014)



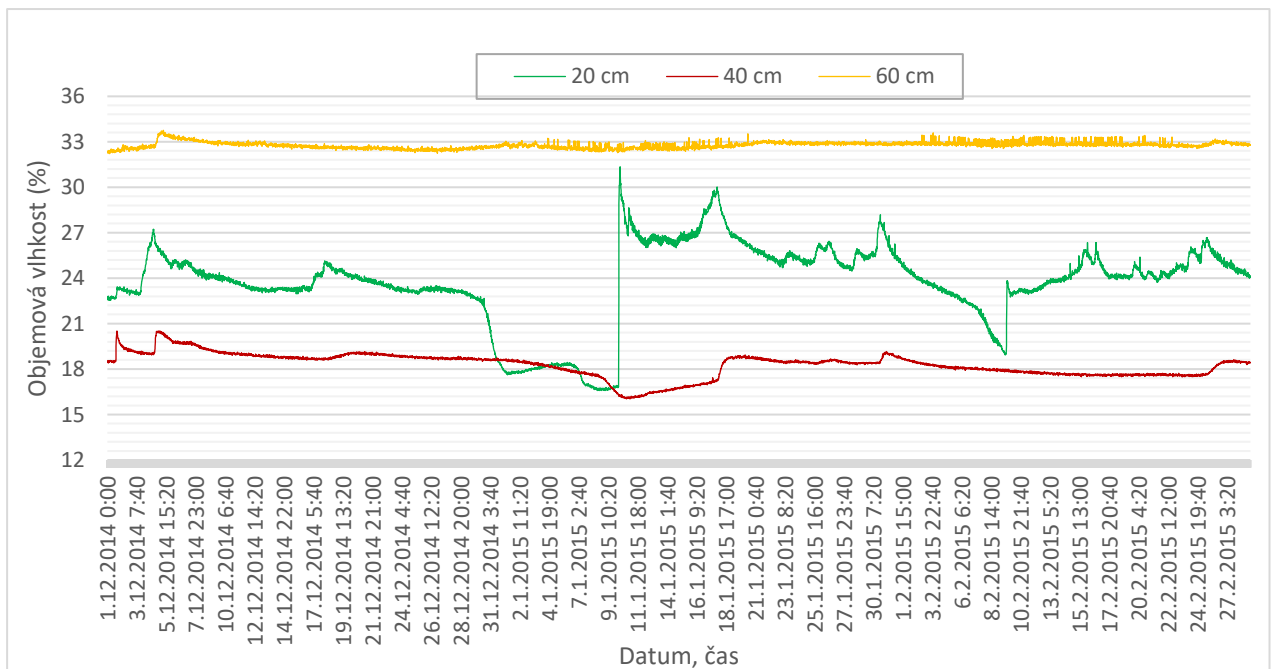
Obr. 4.9 - Hodnoty objemové vlhkosti v substrátu vegetační střechy v hloubkách 20,40 a 60 cm (1.9. – 30.11.2014)

Grafy na obr. 4.10 a obr. 4.11 zobrazují průběh teplot a objemovou vlhkost v nejchladnějším období roku (prosinec, leden, únor) od 1. prosince 2014 do 28. února 2014. Nejvyšší teplota

ve sledovaném období byla naměřena v hloubce 40 cm (4,7°C), nejnižší teplota v hloubce 20 cm (-2°C). Nejvyšší objemová vlhkost byla opět naměřena v hloubce 60 cm.

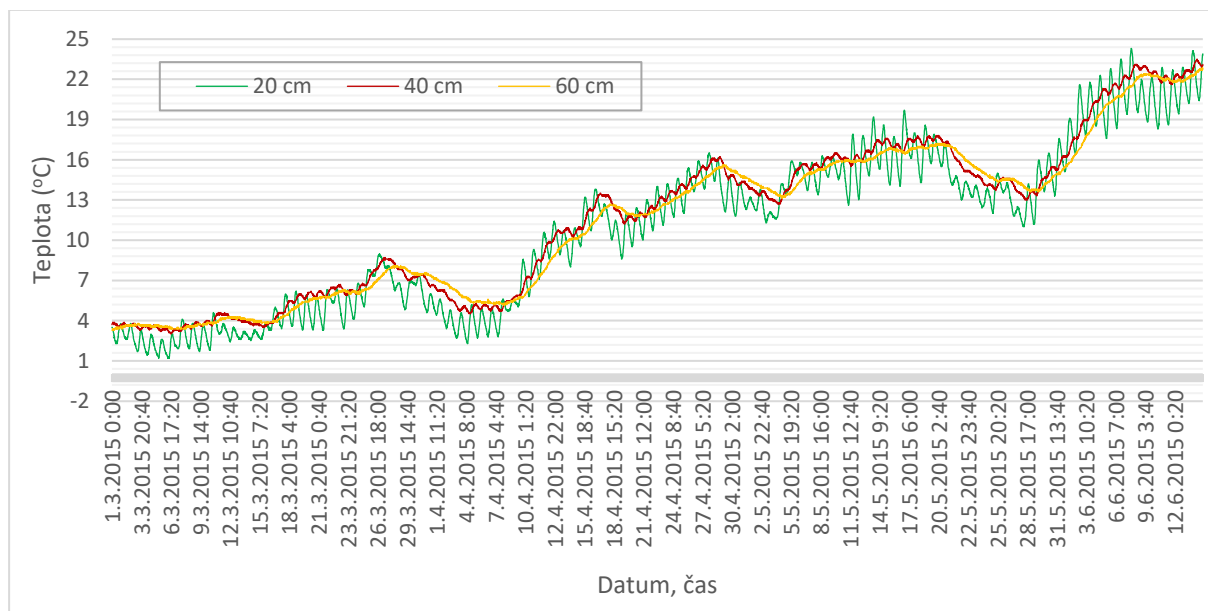


Obr. 4.10 - Průběh teplot v substrátu vegetační střechy v hloubkách 20, 40 a 60 cm (1.12.2014 – 28.2.2015)

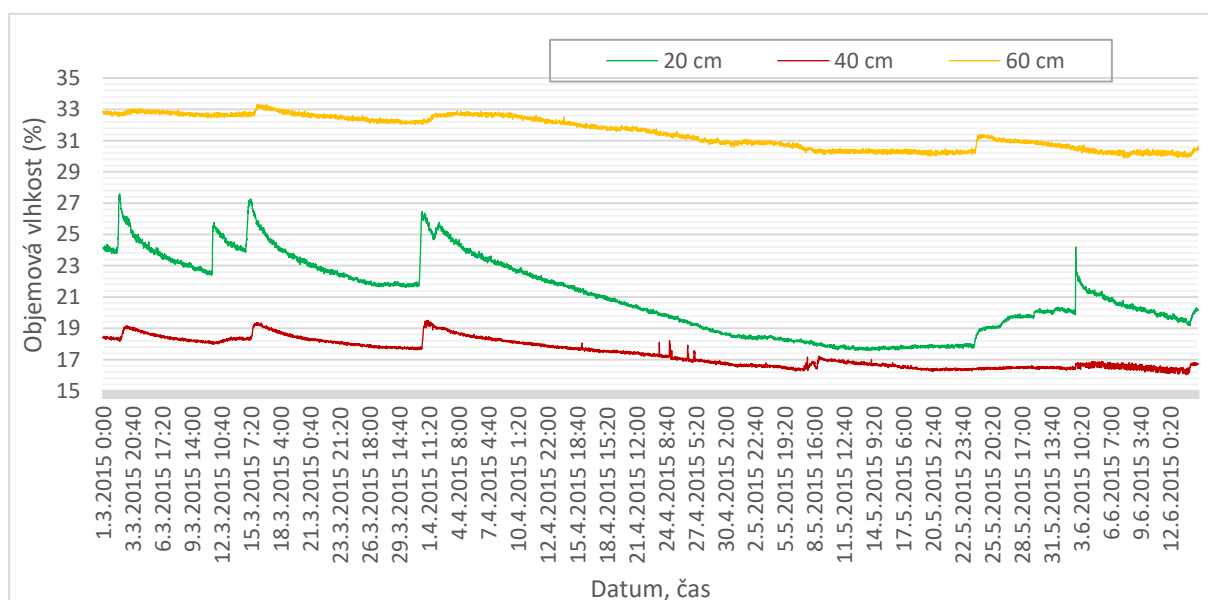


Obr. 4.11 - Hodnoty objemové vlhkosti v substrátu vegetační střechy v hloubkách 20, 40 a 60 cm (1.12.2014 – 28.2.2015)

Na grafech obr. 4.12 a obr. 4.13 je zobrazen průběh teplot a hodnoty objemové vlhkosti v substrátu vegetační střechy v období od 1. března do 14. července 2014. Nejvyšší teplota ve sledovaném období byla naměřena v hloubce 20 cm (24,3°C), nejnižší opět v hloubce 20 cm (1,2°C). Nejvyšší hodnoty objemové vlhkosti byly opět zjištěny v hloubce 60 cm, nejnižší v hloubce 40 cm.



Obr. 4.12 - Průběh teplot v substrátu vegetační střechy v hloubce 20, 40 a 60 cm (1.3. – 14.6.2015)



Obr. 4.13 - Hodnoty objemové vlhkosti v substrátu vegetační střechy v hloubkách 20, 40 a 60 cm (1.3. – 14.6.2015)

S39																	
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N			
1	Logger: #000177 GlobeLog10													www.IMKO.com	V2.01	Jul 14 2010	
2	No	Time	#1:%vol:34768	#2:"C:(do.)	#3:%sampl:(do.)	#4:%vol:34769	#5:"C:(do.)	#6:%sampl:(do.)	#7:%vol:34770	#8:"C:(do.)	#9:%sampl:(do.)	#HK Battery:	#HK Temp.oC	#HK BakBat:V			
3			20 cm			40 cm			60 cm								
4	257	11.06.2014 0:00	22,54	24,8	56	16,16	23,8	68	24,67	20,4	51,2						
5	258	11.06.2014 0:20	22,53	24,8	56	16,1	23,8	67,9	25,08	20,5	52						
6	259	11.06.2014 0:40	22,52	24,6	56,1	16,16	23,9	68	24,89	20,5	51,6						
7	260	11.06.2014 1:00	22,39	24,6	55,8	16,19	23,9	68,1	24,73	20,5	51,2						
8	261	11.06.2014 1:20	22,34	24,4	55,7	16,08	23,9	67,8	25,2	20,6	52,1						
9	262	11.06.2014 1:40	22,34	24,4	55,8	16,15	24	68	25,17	20,5	52	12,742	21,74	3,652			
10	263	11.06.2014 2:00	22,66	24,3	56,5	16,22	24	68	24,53	20,6	50,7						
11	264	11.06.2014 2:20	22,34	24,2	55,8	16,16	24	68	25	20,6	51,6						
12	265	11.06.2014 2:40	22,53	24,1	56,3	16,11	24	67,9	24,84	20,6	51,2						
13	266	11.06.2014 3:00	22,41	24	56,1	16,07	24,1	67,8	25,26	20,6	52						
14	267	11.06.2014 3:20	22,52	23,9	56,3	16,11	24,1	67,9	25,28	20,6	52						
15	268	11.06.2014 3:40	22,45	23,8	56,2	15,96	23,9	67,6	24,88	20,8	51,2	12,746	21,47	3,651			
16	269	11.06.2014 4:00	22,54	23,8	56,4	16	24	67,7	25,31	20,7	52						
17	270	11.06.2014 4:20	22,35	23,6	56	16,13	24,1	67,9	25	20,7	51,4						
18	271	11.06.2014 4:40	22,38	23,6	56,2	16,07	24,1	67,8	25,07	20,8	51,5						
19	272	11.06.2014 5:00	22,39	23,5	56,2	16,09	24,1	67,8	24,98	20,8	51,3						
20	273	11.06.2014 5:20	22,41	23,3	56,3	16,12	24	67,9	25,14	20,8	51,6						
21	274	11.06.2014 5:40	22,46	23,3	56,4	16,01	24,1	67,7	25,07	20,9	51,4	12,746	21,28	3,651			
22	275	11.06.2014 6:00	22,39	23,3	56,3	16,07	24,1	67,8	25,4	20,8	52						
23	276	11.06.2014 6:20	22,44	23,2	56,4	16,09	24,1	67,9	25,25	20,8	51,7						
24	277	11.06.2014 6:40	22,45	23,1	56,5	16,12	24,1	67,9	25,17	20,9	51,5						
25	278	11.06.2014 7:00	22,42	23,1	56,4	16,01	24	67,7	25,43	20,9	52						
26	279	11.06.2014 7:20	22,35	23	56,3	16,18	24	68	25,29	20,9	51,7						
27	280	11.06.2014 7:40	22,35	22,9	56,3	16,1	24	67,9	25,12	20,9	51,4	12,742	21,77	3,651			
28	281	11.06.2014 8:00	22,52	22,8	56,7	16,08	24	67,8	25,24	21	51,6						
29	282	11.06.2014 8:20	22,48	22,8	56,6	16,17	24,1	68	25,45	21	52						
30	283	11.06.2014 8:40	22,49	22,8	56,6	16,11	24,1	67,9	25,3	21	51,7						
31	284	11.06.2014 9:00	22,43	22,7	56,5	16,09	24	67,8	24,98	21	51,1						
32	285	11.06.2014 9:20	22,64	22,8	57	16,11	23,9	67,9	25,05	21,1	51,2						
33	286	11.06.2014 9:40	22,41	22,8	56,5	16,02	23,9	67,7	24,98	21	51,1	12,738	22,6	3,651			
34	287	11.06.2014 10:00	22,51	22,8	56,7	16,07	23,9	67,8	24,92	21,1	51						
35	288	11.06.2014 10:20	22,42	22,8	56,4	16,14	23,9	68	24,89	21,1	51						
36	289	11.06.2014 10:40	22,5	22,9	56,6	16,13	23,9	68	25,05	21,1	51,4						
37	290	11.06.2014 11:00	22,51	23	56,6	16,11	23,9	67,9	24,63	21,1	50,6						
38	291	11.06.2014 11:20	22,37	23	56,3	16,11	23,8	67,9	24,86	21,1	51						
39	292	11.06.2014 11:40	22,34	23,1	56,2	16,06	23,9	67,8	24,99	21,1	51,4	12,738	23,37	3,65			
40	293	11.06.2014 12:00	22,36	23,2	56,2	16,1	23,9	67,9	25,07	21,1	51,6						
41	294	11.06.2014 12:20	22,43	23,3	56,3	16,11	23,8	67,9	24,61	21,1	50,7						
42	295	11.06.2014 12:40	22,5	23,3	56,4	16,15	23,8	68	24,52	21,2	50,6						
43	296	11.06.2014 13:00	22,22	23,5	55,8	16,14	23,9	68	24,32	21,2	50,2						
44	297	11.06.2014 13:20	22,24	23,6	55,8	16,07	23,9	67,8	24,55	21,2	50,7						
45	298	11.06.2014 13:40	22,26	23,8	55,8	16,14	23,9	68	24,3	21,2	50,3	12,742	24,15	3,649			
46	299	11.06.2014 14:00	22,4	23,9	56	16,16	23,9	68	24,53	21,2	50,7						
47	300	11.06.2014 14:20	22,29	24,1	55,7	16,06	23,9	67,8	24,46	21,3	50,6						
48	301	11.06.2014 14:40	22,53	24,2	56,2	16,2	23,9	68,1	24,41	21,2	50,6						
49	302	11.06.2014 15:00	22,48	24,3	56	16,12	23,9	67,9	24,16	21,3	50,1						
50	303	11.06.2014 15:20	22,38	24,5	55,7	16,16	23,9	68	24,4	21,2	50,6						
51	304	11.06.2014 15:40	22,41	24,7	55,8	16,19	23,9	68	24,47	21,3	50,7	12,742	34,84	3,646			
52	305	11.06.2014 16:00	22,11	24,9	55	16,08	24	67,8	24,62	21,3	51						
53	306	11.06.2014 16:20	22,37	25,1	55,6	16,12	24,1	67,9	24,21	21,4	50,2	12,735	28,91	3,649			
54	307	11.06.2014 16:40	22,36	25,1	55,5	16,1	24,1	67,8	24,02	21,3	49,8						
55	308	11.06.2014 17:00	22,32	25,3	55,3	16,11	24,1	67,8	24,24	21,3	50,2						
56	309	11.06.2014 17:20	22,37	25,5	55,4	16,19	24,2	68	24,26	21,4	50,2						
57	310	11.06.2014 17:40	22,28	25,7	55,2	16,21	24,2	68	24,01	21,4	49,7						
58	311	11.06.2014 18:00	22,19	25,8	55	16	24,2	67,6	24,32	21,4	50,3						
59	312	11.06.2014 18:20	22,21	25,9	55	16,15	24,3	67,8	24,53	21,4	50,7	12,746	23,87	3,651			
60	313	11.06.2014 18:40	22,35	25,9	55,3	15,96	24,4	67,5	24,32	21,4	50,2						
61	314	11.06.2014 19:00	22,32	25,9	55,2	16,16	24,4	67,8	24,53	21,4	50,6						
62	315	11.06.2014 19:20	22,22	26	55	15,96	24,4	67,5	24,51	21,3	50,6						
63	316	11.06.2014 19:40	22,21	26,2	55	16,11	24,4	67,7	24,43	21,4	50,4						
64	317	11.06.2014 20:00	22,22	26,2	55	16,18	24,6	67,8	24,39	21,4	50,2						
65	318	11.06.2014 20:20	22,32	26	55	16,08	24,6	67,7	24,38	21,5	50	12,738	23,18	3,651			
66	319	11.06.2014 20:40	22,14	26,1	54,8	16	24,6	67,5	24,39	21,5	50						
67	320	11.06.2014 21:00	22,31	26,1	55,2	16,14	24,7	67,8	24,67	21,4	50,6						
68	321	11.06.2014 21:20	22,4	26,1	55,4	16,21	24,7	67,9	24,69	21,5	50,6						
69	322	11.06.2014 21:40	22,33	25,9	55,3	16,06	24,8	67,6	24,61	21,5	50,4						
70	323	11.06.2014 22:00	22,39	25,9	55,4	16,13	24,8	67,7	24,58	21,6	50,3						
71	324	11.06.2014 22:20	22,35	25,8	55,3	16,04	24,9	67,5	24,16	21,6	49,4	12,738	22,77	3,651			
72	325	11.06.2014 22:40	22,43	25,8	55,5	16,08	24,9	67,6	25,01	21,5	51						
73	326	11.06.2014 23:00	22,3	25,6	55,3	16,03	25	67,5	24,61	21,5	50,2						
74	327	11.06.2014 23:20	22,42	25,6	55,5	16,08	25	67,6	24,54	21,6	50						
75	328	11.06.2014 23:40	22,42	25,4	55,5	16,12	25	67,6	24,56	21,6	50,1						

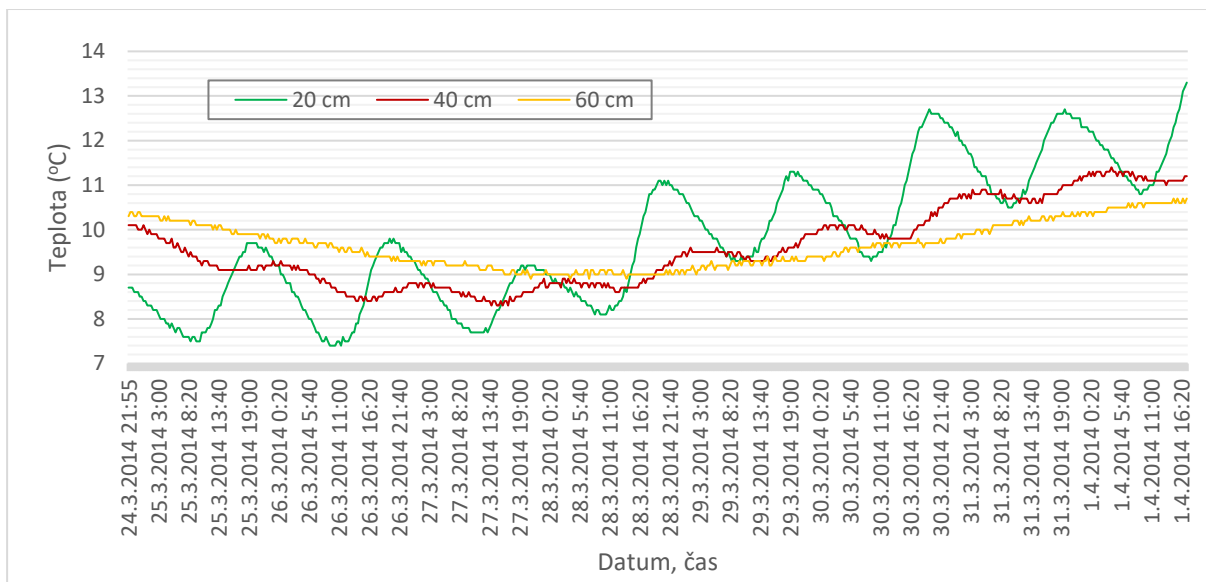
Obr. 4.14 - Ukázka z naměřených dat – žlutou barvu je zvýrazněna maximální naměřená teplota v profilu vegetační střechy ve sledovaném období (7.6.2014 - 14.6.2015)

W74													
Logger: #000177 "Globelog10" www.iMKO.com - V2.01 Jul 14 2010													
No	Time	#1.%vol:34768	#2."C:(do.)	#3.%ampI	#4.%vol:34769	#5."C:(do.)	#6.%ampI	#7.%vol:34770	#8."C:(do.)	#9.%ampI	#HK Batte	#HK Temp	#HK BakBa
		20 cm			40 cm			60 cm					
1	08.01.2015 3:00	16,82	1,9	71,9	17,58	0,7	73,4	32,5	0,3	66,1			
2	08.01.2015 3:20	16,85	1,9	72	17,65	0,7	73,6	32,47	0,4	66			
3	08.01.2015 3:40	16,85	1,9	72	17,68	0,7	73,6	32,57	0,4	66,2	12,56	1,81	3,647
4	08.01.2015 4:00	16,8	2	72	17,54	0,7	73,4	32,51	0,4	66,1			
5	08.01.2015 4:20	16,77	1,9	71,9	17,62	0,7	73,5	32,49	0,4	66,1			
6	08.01.2015 4:40	16,82	2	72	17,74	0,7	73,8	32,37	0,4	65,8			
7	08.01.2015 5:00	16,87	2	72,1	17,67	0,7	73,6	32,56	0,3	66,2			
8	08.01.2015 5:20	16,8	1,9	72	17,62	0,7	73,6	32,45	0,4	66			
9	08.01.2015 5:40	16,79	2	72	17,66	0,7	73,6	32,52	0,4	66	12,556	1,86	3,647
10	08.01.2015 6:00	16,85	1,9	72,1	17,58	0,8	73,5	32,48	0,3	66			
11	08.01.2015 6:20	16,76	1,9	72	17,6	0,7	73,5	33,01	0,4	67			
12	08.01.2015 6:40	16,77	2	72	17,63	0,8	73,6	32,64	0,4	66,3			
13	08.01.2015 7:00	16,75	2	72	17,61	0,7	73,6	32,47	0,3	66			
14	08.01.2015 7:20	16,76	1,9	72	17,62	0,8	73,6	32,47	0,4	66			
15	08.01.2015 7:40	16,64	2	71,8	17,65	0,8	73,7	32,48	0,4	66	12,56	1,88	3,647
16	08.01.2015 8:00	16,82	1,9	72,2	17,61	0,7	73,6	32,95	0,4	67			
17	08.01.2015 8:20	16,72	2	72	17,59	0,8	73,6	32,43	0,4	66			
18	08.01.2015 8:40	16,69	2	72	17,59	0,7	73,6	32,36	0,4	65,8			
19	08.01.2015 9:00	16,72	2	72	17,53	0,8	73,5	32,96	0,4	67			
20	08.01.2015 9:20	16,76	1,9	72,1	17,64	0,7	73,7	32,45	0,3	66			
21	08.01.2015 9:40	16,74	2	72,1	17,55	0,7	73,5	32,47	0,3	66,1	12,56	1,89	3,647
22	08.01.2015 10:00	16,76	2	72,1	17,68	0,8	73,8	32,44	0,4	66			
23	08.01.2015 10:20	16,69	2	72	17,62	0,7	73,7	32,55	0,4	66,2			
24	08.01.2015 10:40	16,72	2	72,1	17,56	0,7	73,6	32,34	0,4	65,8			
25	08.01.2015 11:00	16,69	2	72	17,58	0,8	73,7	32,55	0,4	66,2			
26	08.01.2015 11:20	16,67	1,9	72	17,53	0,7	73,6	32,34	0,5	65,9			
27	08.01.2015 11:40	16,77	1,9	72,2	17,65	0,7	73,9	32,51	0,4	66,2	12,56	1,61	3,647
28	08.01.2015 12:00	16,63	2	71,9	17,53	0,7	73,6	32,42	0,4	66			
29	08.01.2015 12:20	16,7	2	72,1	17,54	0,7	73,6	32,47	0,4	66,1			
30	08.01.2015 12:40	16,64	2	72	17,65	0,7	73,9	32,55	0,4	66,1			
31	08.01.2015 13:00	16,76	1,9	72,2	17,58	0,7	73,6	32,74	0,4	66			
32	08.01.2015 13:20	16,65	2	72,1	17,63	0,7	73,9	32,56	0,4	66			
33	08.01.2015 13:40	16,65	2	72	17,62	0,7	73,9	32,45	0,4	66,1	12,552	1,48	3,647
34	08.01.2015 14:00	16,69	2	72,1	17,56	0,7	73,8	32,43	0,4	66			
35	08.01.2015 14:20	16,59	2	71,9	17,65	0,7	74	32,34	0,4	65,8			
36	08.01.2015 14:40	16,67	2	72,1	17,55	0,8	73,7	32,46	0,4	66,1			
37	08.01.2015 15:00	16,7	1,9	72,1	17,6	0,7	73,9	32,4	0,5	66			
38	08.01.2015 15:20	16,63	2	72	17,54	0,8	73,8	32,41	0,4	66			
39	08.01.2015 15:40	16,64	1,9	72	17,57	0,8	73,9	32,51	0,4	66,2	12,552	1,51	3,647
40	08.01.2015 16:00	16,6	2	71,9	17,63	0,8	73,9	32,59	0,4	66,3			
41	08.01.2015 16:20	16,69	2	72,1	17,55	0,8	73,8	32,5	0,4	66,2			
42	08.01.2015 16:40	16,74	2	72,2	17,51	0,7	73,8	32,43	0,3	66			
43	08.01.2015 17:00	16,69	1,9	72,1	17,47	0,7	73,7	32,31	0,4	65,8			
44	08.01.2015 17:20	16,7	1,9	72,1	17,57	0,7	74	32,42	0,4	66			
45	08.01.2015 17:40	16,59	1,9	71,9	17,45	0,6	73,8	32,91	0,4	67	12,549	1,77	3,647
46	08.01.2015 18:00	16,73	1,9	72,2	17,48	0,8	73,8	32,42	0,3	66			
47	08.01.2015 18:20	16,62	1,9	72	17,5	0,7	73,8	32,95	0,5	67			
48	08.01.2015 18:40	16,73	1,9	72,2	17,46	0,7	73,8	32,43	0,5	66			
49	08.01.2015 19:00	16,73	1,9	72,2	17,51	0,8	73,9	32,41	0,4	66			
50	08.01.2015 19:20	16,76	2	72,2	17,52	0,8	74	32,42	0,4	66			
51	08.01.2015 19:40	16,69	2	72,1	17,5	0,8	73,9	32,44	0,4	66,1	12,552	1,77	3,647
52	08.01.2015 20:00	16,65	2	72	17,51	0,8	74	32,5	0,4	66,2			
53	08.01.2015 20:20	16,64	1,9	72	17,43	0,8	73,8	32,9	0,4	67			
54	08.01.2015 20:40	16,68	1,9	72,1	17,51	0,7	74	32,9	0,4	67			
55	08.01.2015 21:00	16,59	2	71,9	17,46	0,6	73,9	32,49	0,4	66,2			
56	08.01.2015 21:20	16,69	1,9	72,1	17,48	0,8	74	32,32	0,4	65,9			
57	08.01.2015 21:40	16,61	2	72	17,39	0,7	73,8	32,51	0,4	66,2	12,552	1,8	3,647
58	08.01.2015 22:00	16,63	1,9	72	17,48	0,8	74	32,39	0,4	66			
59	08.01.2015 22:20	16,74	2	72,2	17,43	0,8	74	32,4	0,5	66,1			
60	08.01.2015 22:40	16,67	2	72,1	17,41	0,7	73,9	32,39	0,5	66			
61	08.01.2015 23:00	16,68	2	72,1	17,42	0,8	74	32,36	0,5	66			
62	08.01.2015 23:20	16,74	1,9	72,2	17,42	0,7	74	32,47	0,5	66,2			
63	08.01.2015 23:40	16,68	1,9	72,1	17,44	0,7	74,1	32,36	0,4	66	12,552	1,74	3,647
64	09.01.2015 0:00	16,7	1,9	72,2	17,4	0,7	74	32,5	0,4	66,2			
65	09.01.2015 0:20	16,67	1,9	72,1	17,41	0,7	74,1	32,49	0,5	66,2			
66	09.01.2015 0:40	16,61	2	72	17,38	0,8	74	32,37	0,4	66			
67	09.01.2015 1:00	16,71	2	72,1	17,41	0,8	74,1	32,48	0,5	66,2			
68	09.01.2015 1:20	16,74	2	72,2	17,39	0,7	74,1	32,55	0,5	66,3			
69	09.01.2015 1:40	16,66	2	72,1	17,41	0,8	74,1	32,49	0,4	66,2	12,545	1,62	3,647
70	09.01.2015 2:00	16,72	1,9	72,2	17,36	0,7	74,1	32,52	0,5	66,3			
71	09.01.2015 2:20	16,63	1,9	72	17,31	0,8	74	32,55	0,4	66,3			
72	09.01.2015 2:40	16,69	1,9	72,1	17,32	0,7	74,1	32,55	0,5	66,3			
73	09.01.2015 3:00	16,69	2	72,1	17,36	0,7	74,2	32,39	0,5	66,1			
74	09.01.2015 3:20	16,64	2	72	17,33	0,8	74,1	32,54	0,5	66,3			
75	09.01.2015 3:40	16,65	1,9	72	17,33	0,8	74,2	32,4	0,5	66,1	12,548	1,49	3,647

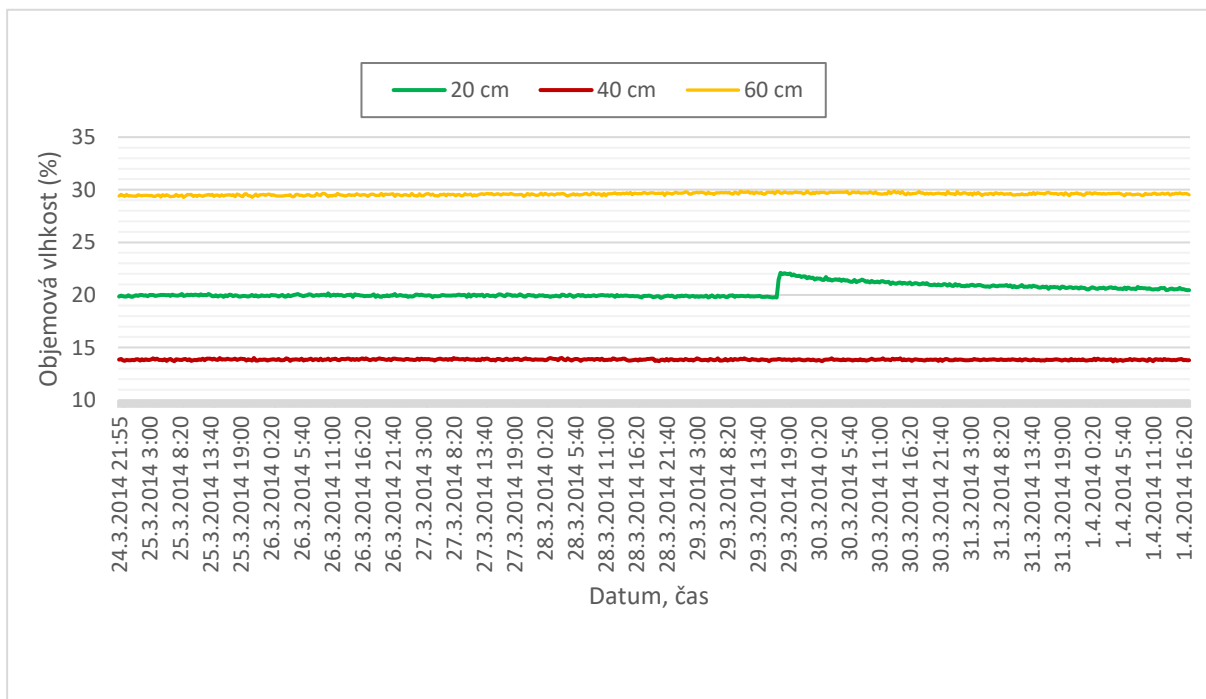
Obr. 4.15 - Ukázka z naměřených dat – zelenou barvou je zvýrazněna nejnižší naměřená teplota v profilu vegetační střechy ve sledovaném období (7.6.2014 - 14.6.2015)

Na obr. 4.14 a obr. 4.15 je ukázka z naměřených dat s nejnižšími a nejvyššími teplotami ve sledovaném období.

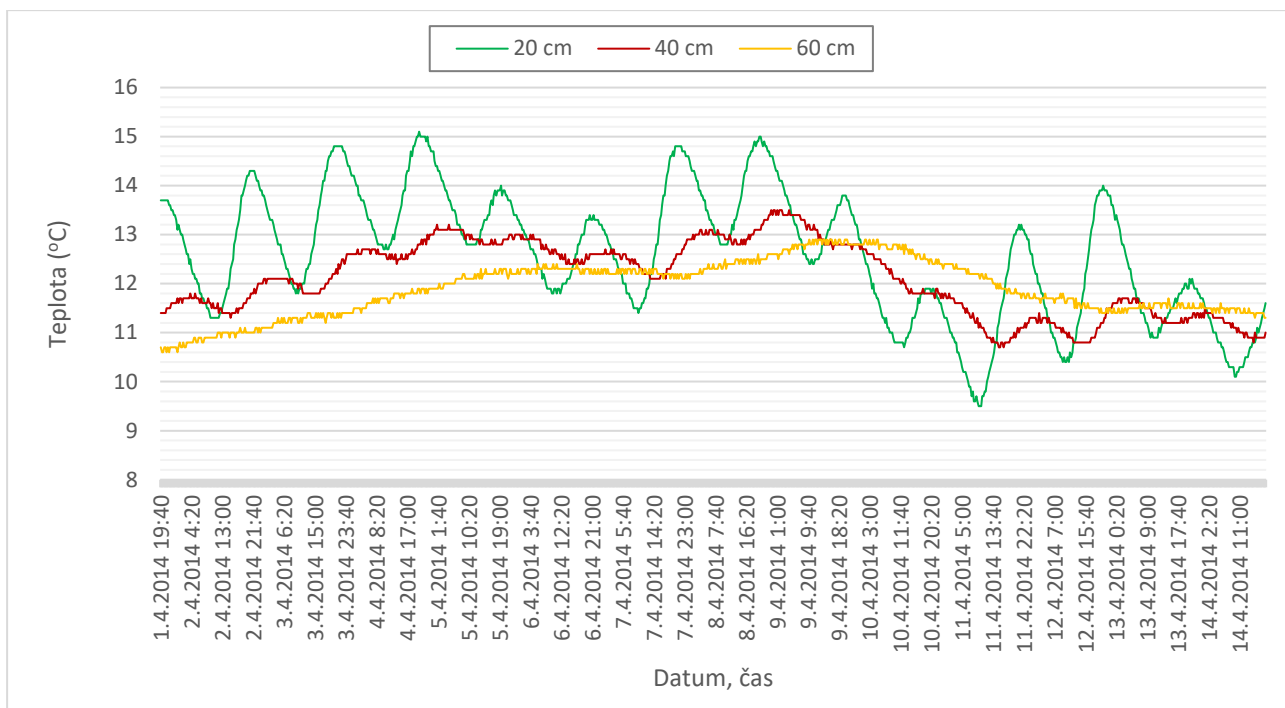
Na následujících grafech jsou zobrazena další naměřená data, která z důvodu technických problémů kontinuálně nenavazují na výše uvedené sledované období, ale úzce s ním souvisejí.



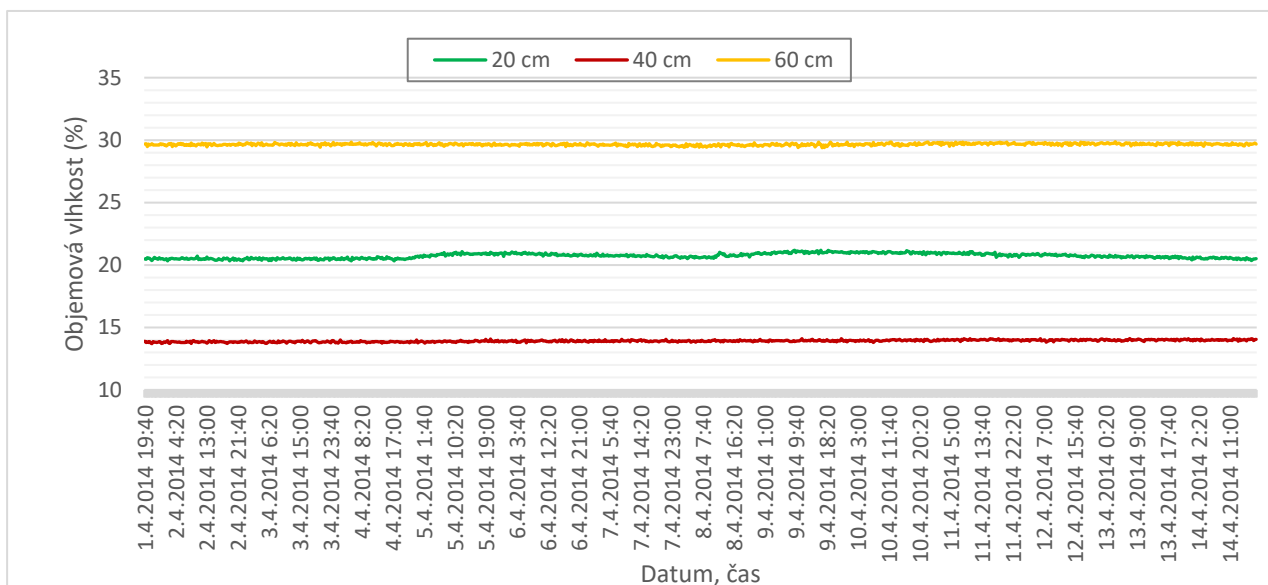
Obr. 4.16 - Průběh teplot v substrátu intenzivní vegetační střechy v hloučkách 20, 40 a 60 cm (24.3. do 1.4.2014)



Obr. 4.17 - Naměřené hodnoty objemové vlhkosti (%) v substrátu intenzivní vegetační střechy v hloučkách 20, 40 a 60 cm (24.3.-1.4.2014)



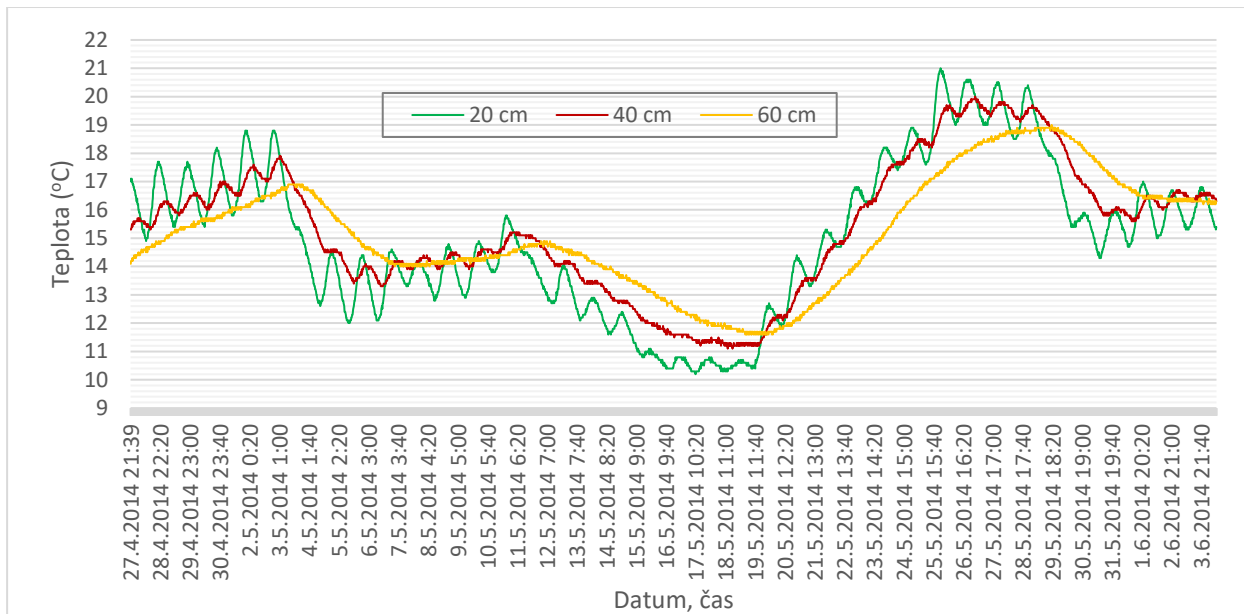
Obr. 4.18 - Průběh teplot v substrátu intenzivní vegetační střechy v hloubkách 20, 40 a 60 cm (1.4. - 14.4.2014)



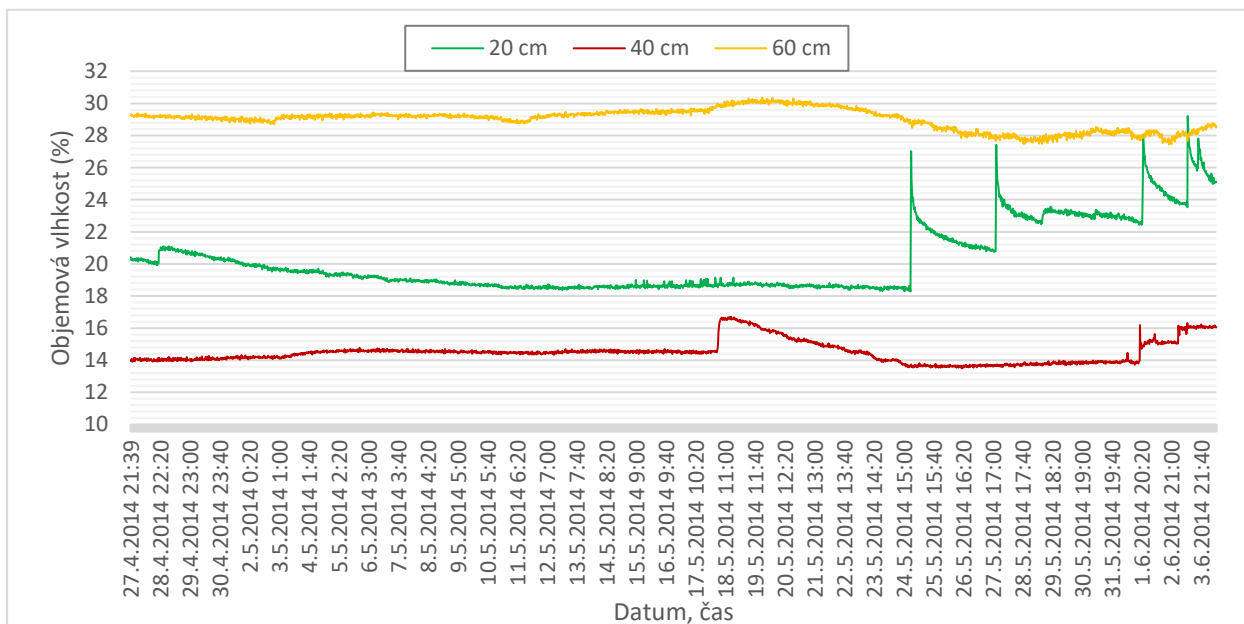
Obr. 4.19 - Průběh objemové vlhkosti (%) v substrátu intenzivní vegetační střechy v hloubkách 20, 40, a 60 cm (1.4. - 14.4.2014)

Na grafech obr.4.16 a obr.4.18 jsou velmi dobře pozorovatelné výkyvy teplot v substrátu. Amplituda teplotních kmitů je nejvýraznější v hloubce 20 cm a s narůstající hloubkou se zmírňuje. Na grafech je vidět zpoždování doby nástupu denních maxim a minim v závislosti na hloubce, především v hloubkových úrovních 20 a 40 cm. Hodnoty objemové vlhkosti jsou

zobrazeny na *obr. 4.17* a *obr. 4.19*. Nejvyšší hodnoty vlhkosti byly naměřeny v hloubce 60 cm (v rozmezí od 29 do 30 %), nejnižší opět v hloubce 40 cm (v rozmezí 13 -14 %). V hloubce 20 cm se hodnoty pohybovaly v rozmezí 19-22 %. Na *obr.4.20* a *obr.4.21* jsou další naměřená data z období od 27.4.2014 do 4.6.2014.

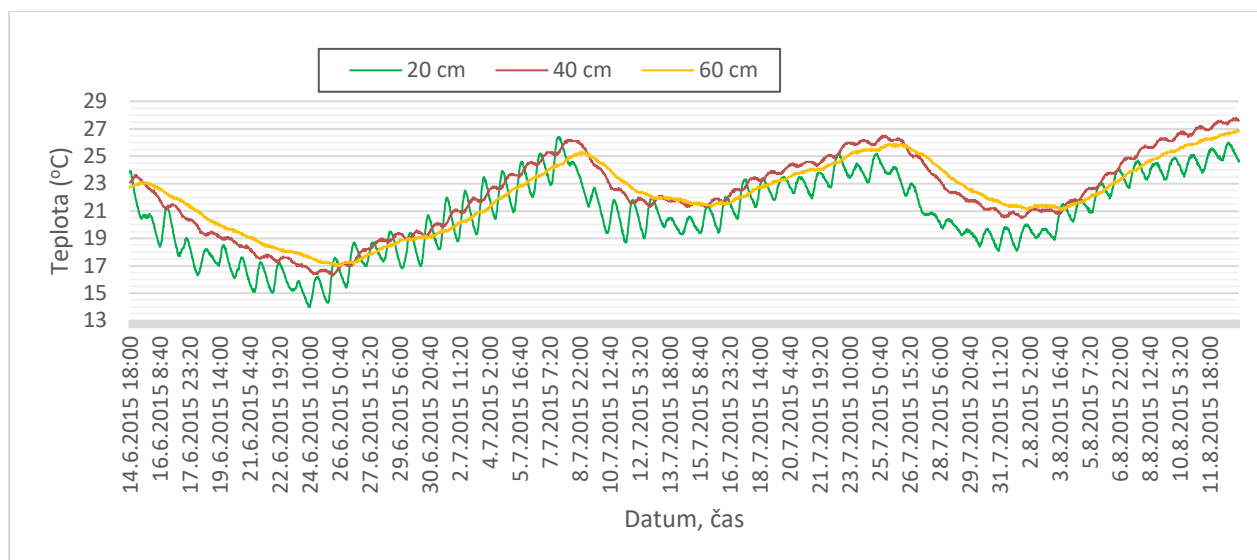


Obr. 4.20 - Průběh teplot v substrátu intenzivní vegetační střechy v hloubkách 20, 40 a 60 cm (27.4. - 4.6.2014)

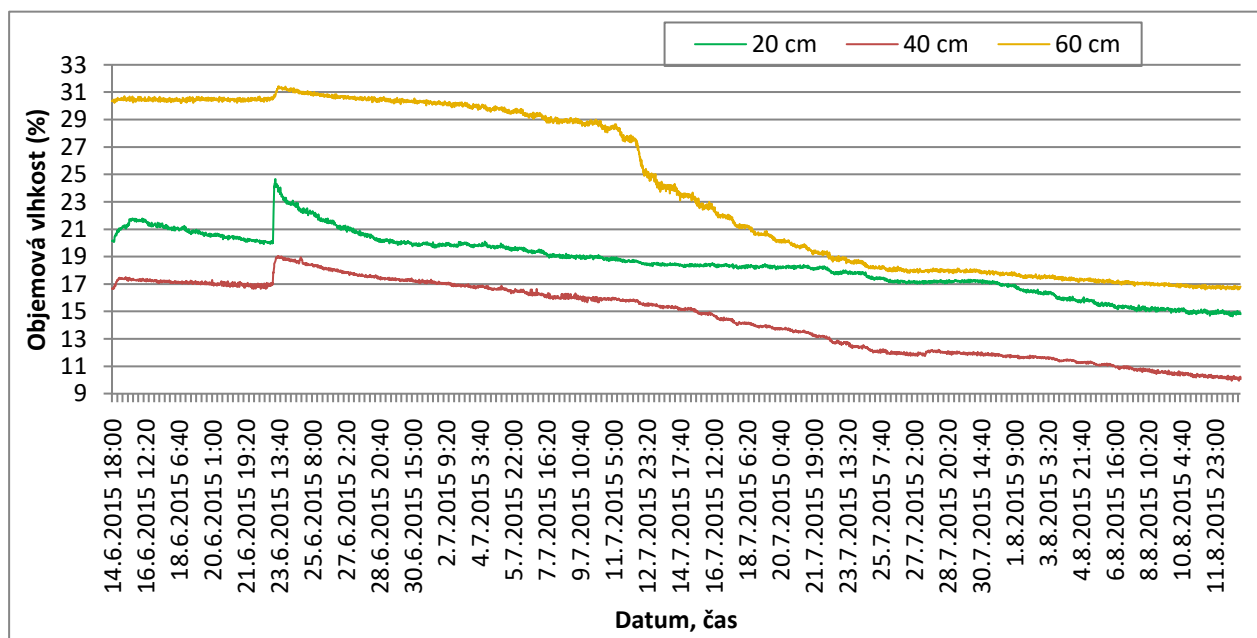


Obr. 4.21 - Hodnoty objemové vlhkosti (%) v substrátu intenzivní vegetační střechy v hloubkách 20,40 a 60 cm (27.4. - 4.6.2014)

Na grafu *obr.4.21* je koncem měsíce května v hloubkové úrovni 20 cm patrný skokový nárůst objemové vlhkosti. Tento nárůst byl zapříčiněn zálivkou porostu bylinek. Zálivka rostlin se v substrátu narozdíl od napadaných srážek projevila prudkým nárůstem objemové vlhkosti, zatímco vliv srážek se projevuje pozvolnějším nárůstem hodnot. Senzor v hloubce 20 cm byl umístěn pod porostem bylinek. Nad senzory umístěnými v hloubkách 40 a 60 cm ve sledovaném období nebyly vysázeny žádné rostliny.



Obr. 4.22 - Průběh teplot v substrátu intenzivní vegetační střechy (14.6. - 13.8.2015)



Obr. 4.23 - Hodnoty objemové vlhkosti (%) v substrátu intenzivní vegetační střechy (14.6-13.8.2015)

Na obr. 4.22 a obr.4.23 jsou výsledky měření v období od 14.6. do 13.8.2015. Na grafu obr.4.23 můžeme pozorovat od poloviny července do poloviny srpna pokles objemové vlhkosti ve všech třech sledovaných hloubkových úrovních, způsobený obdobím sucha.

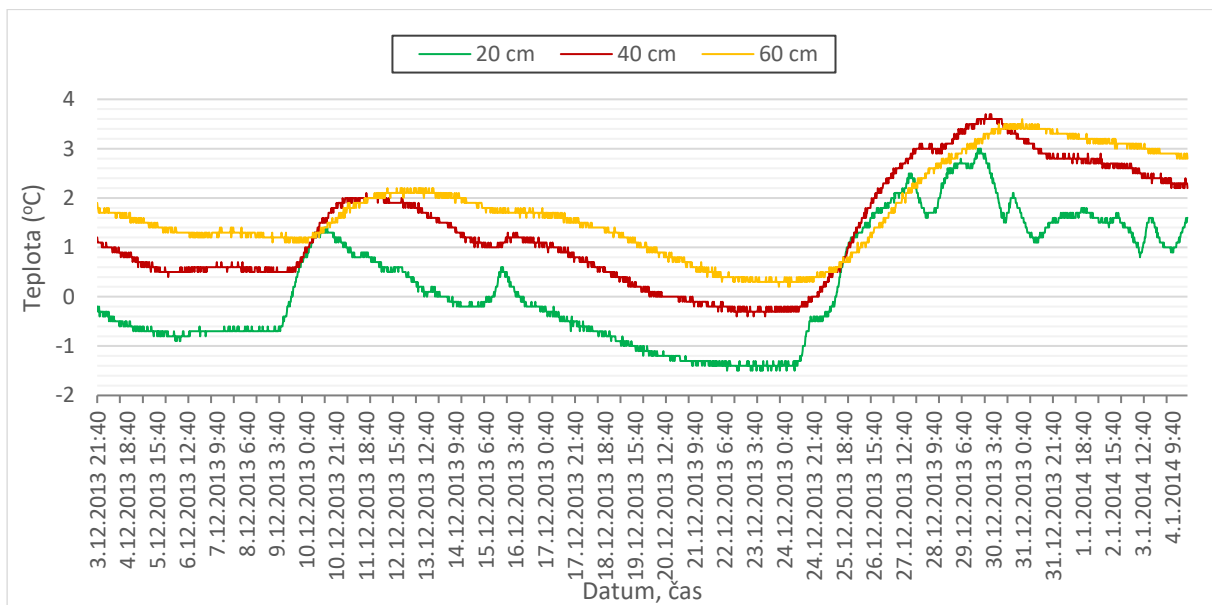
Dále se podrobněji zaměřím pouze na výsledky měření získané v zimním a letním období, kdy bylo možné očekávat extrémní teploty.

4.1.1 Výsledky měření – zimní období

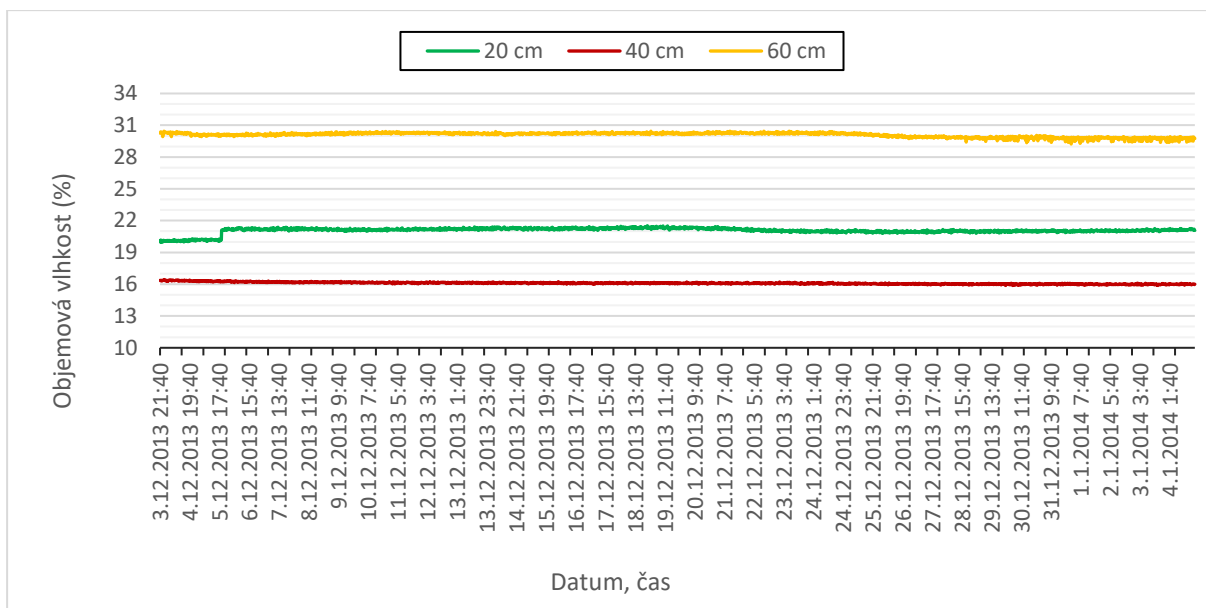
Vybrané dílčí výsledky byly získány v zimním období v letech 2013-2017.

- **zimní období (2013-14)**

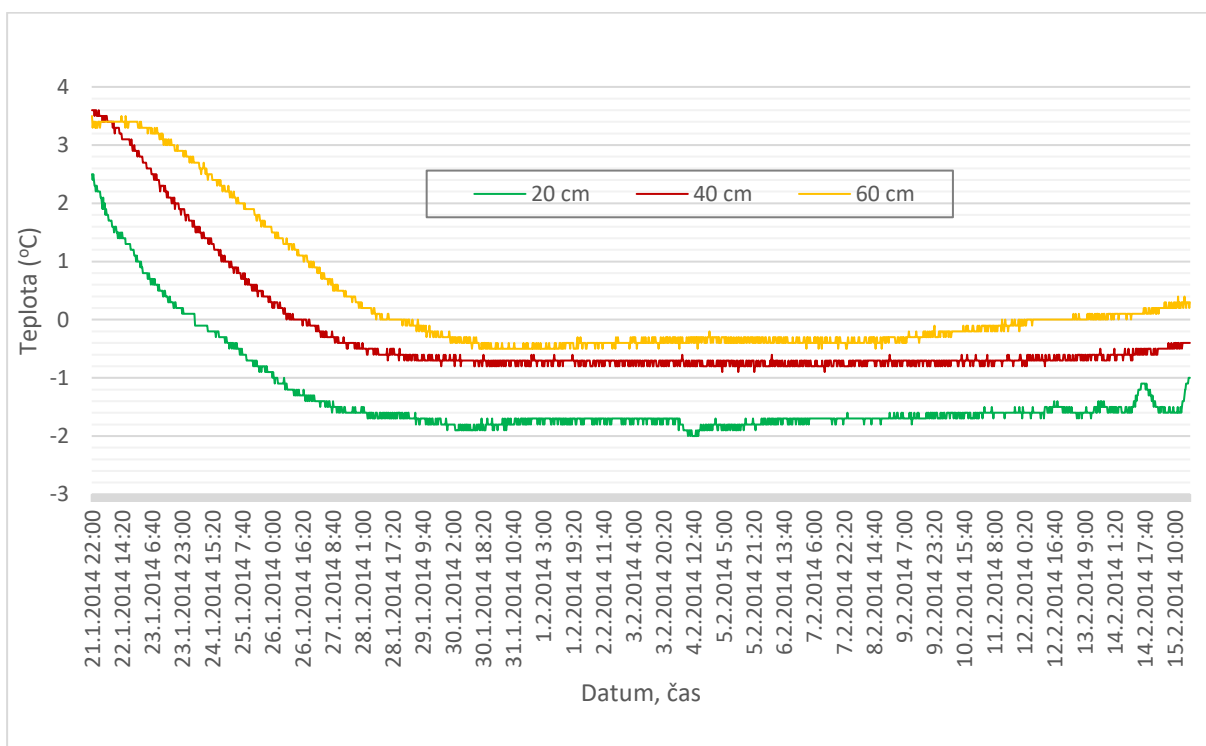
Na následujících grafech jsou průběhy teplot a naměřená objemová vlhkost v jednotlivých hloubkových úrovních 20, 40 a 60 cm v substrátu střešní zahrady v zimním období (prosinec, leden 2013-14), kdy teploty dosahovaly nejnižších hodnot.



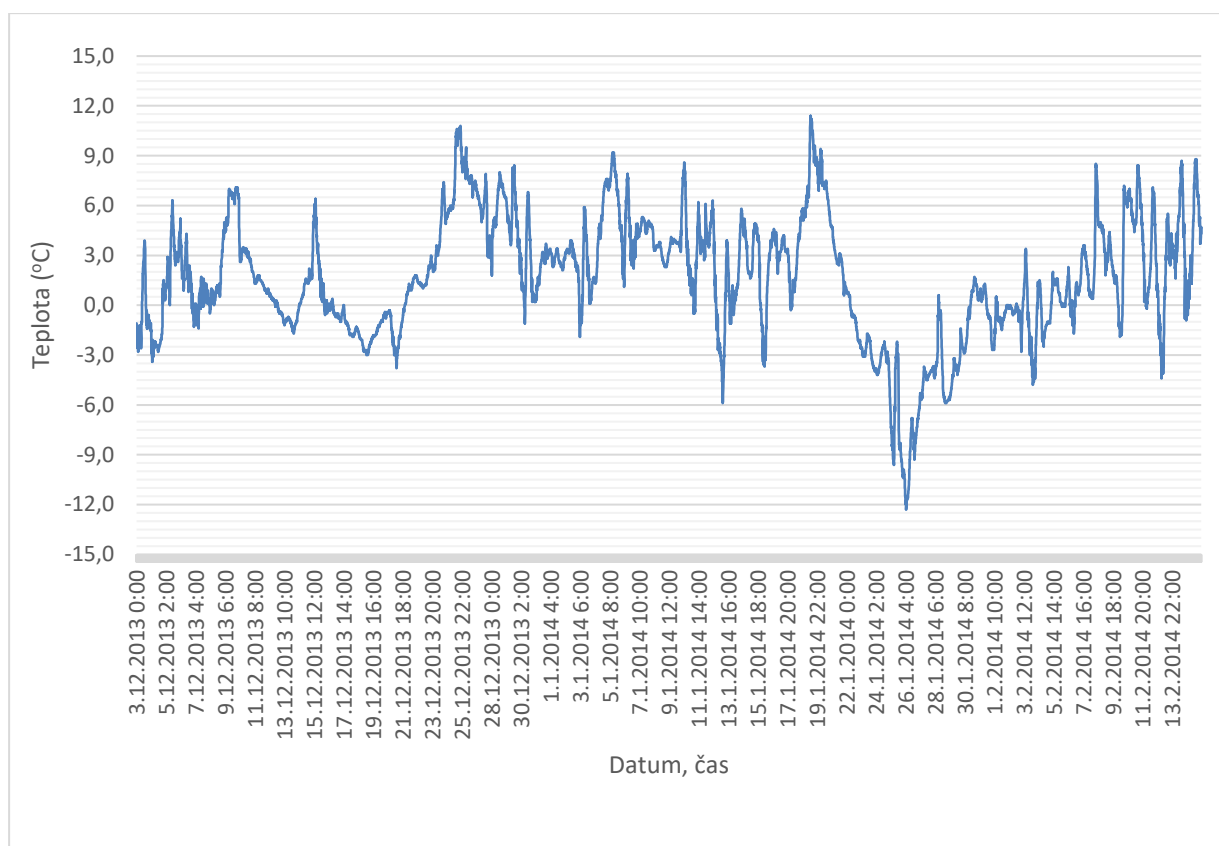
Obr. 4.24 - Průběh teplot v substrátu intenzivní vegetační střechy v zimním období (3.12.2013 - 4.1.2014)



Obr. 4.25 - Naměřené hodnoty objemové vlhkosti v substrátu intenzivní vegetační střechy v zimním období (3.12.2013 - 4.1.2014)



Obr. 4.26 - Průběh teplot v substrátu intenzivní vegetační střechy v zimním období (21.1.-15.2.2014)



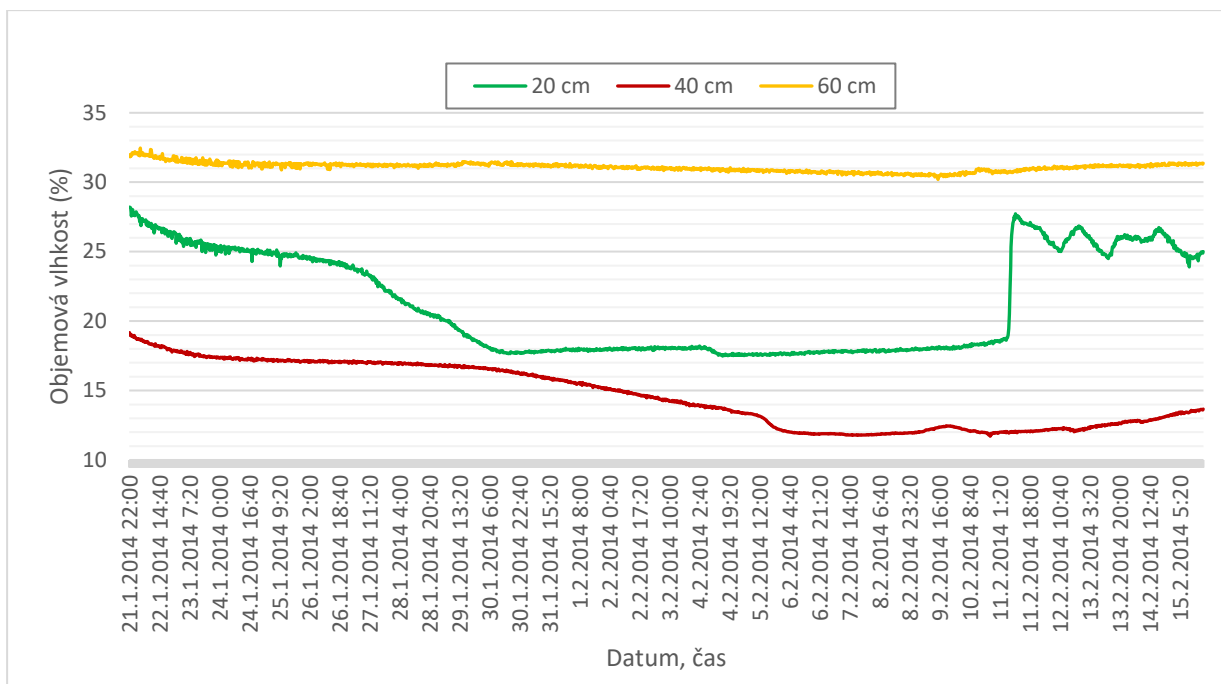
Obr. 4.27 – Průběh teplot venkovního vzduchu (zdroj: archivní data ČHMÚ z meteostanice (B2BTUR01) Brno-Tuřany)

Ve sledovaném období (3.12.-15.2.2014) se teploty vzduchu pohybovaly nejnižše koncem ledna - viz obr.4.27. 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 následující tabulce (tab.4.1).

Tab. 4.1 Nejnižší naměřené teploty v substrátu vegetační střechy (r.2013-14)

	umístění senzoru v substrátu	t_{min} (°C)
Senzor č. 1 (34768)	20 cm	-2
Senzor č. 2 (34769)	40 cm	-0,9
Senzor č. 3 (34770)	60 cm	-0,5



Obr. 4.28 - Objemová vlhkost (v %) v substrátu intenzivní vegetační střechy v zimním období (21.1.- 15.2.2014)

Na obr. 4.28 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.

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

- **zimní období (2014-15)**

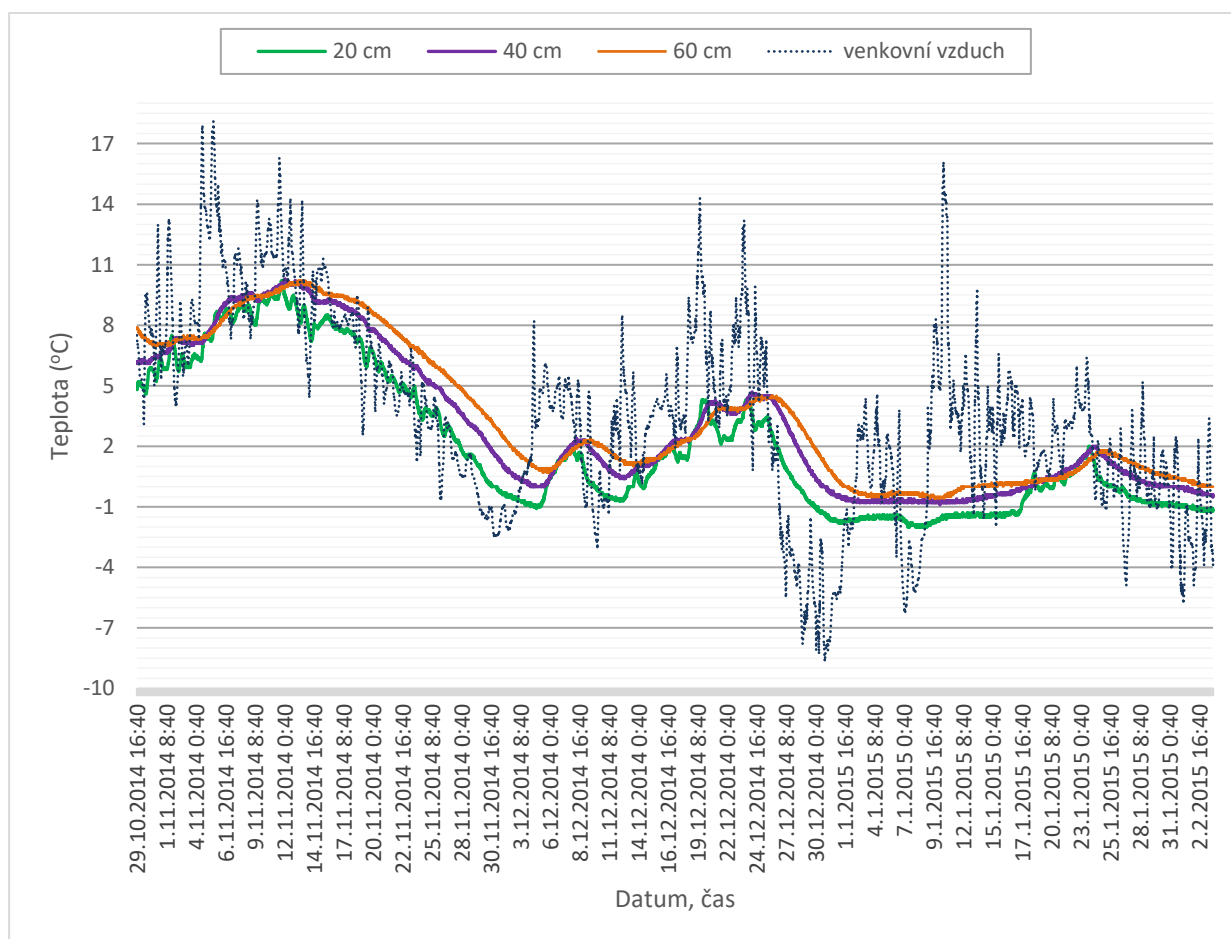
Měření v zimním období probíhalo od října do února v letech 2014-2015. Od září 2014 byl vedle objektu zahradního domku umístěn datalogger s meteostanicí (Em50 Logger, Decagon) s možností připojení pěti portů (obr. v příloze č. 9). Pro záznam dat byl použit software ECH₂O. Meteostanice byla umístěna ve výšce 4,5 m nad terénem.

Na Obr. 4.29 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°C dne 30. prosince 2014. Pro srovnání uvádím i data z ČHMÚ, meteostanice Brno-Tuřany. Nejnižší

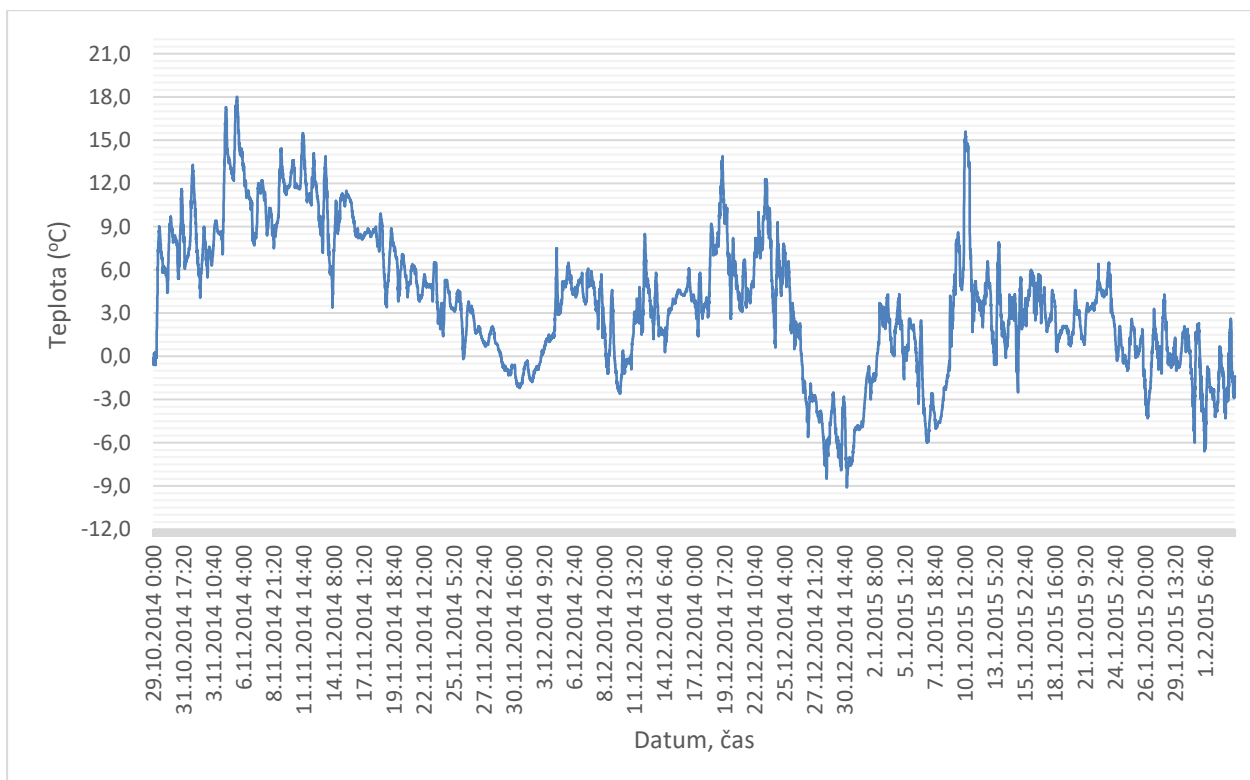
naměřená teplota meteostanicí dne 30. prosince 2014 byla $-9,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ (obr. 4.30). Nejnižší naměřené teploty v substrátu jsou uvedeny v tab. 4.2.

Tab. 4.2 Nejnižší naměřené teploty v substrátu vegetační střechy (r. 2014-15)

	<i>umístění senzoru v substrátu</i>	<i>t_{min} (°C)</i>
Senzor č. 1 (34768)	20 cm	-2
Senzor č. 2 (34769)	40 cm	-0,9
Senzor č. 3 (34770)	60 cm	-0,6



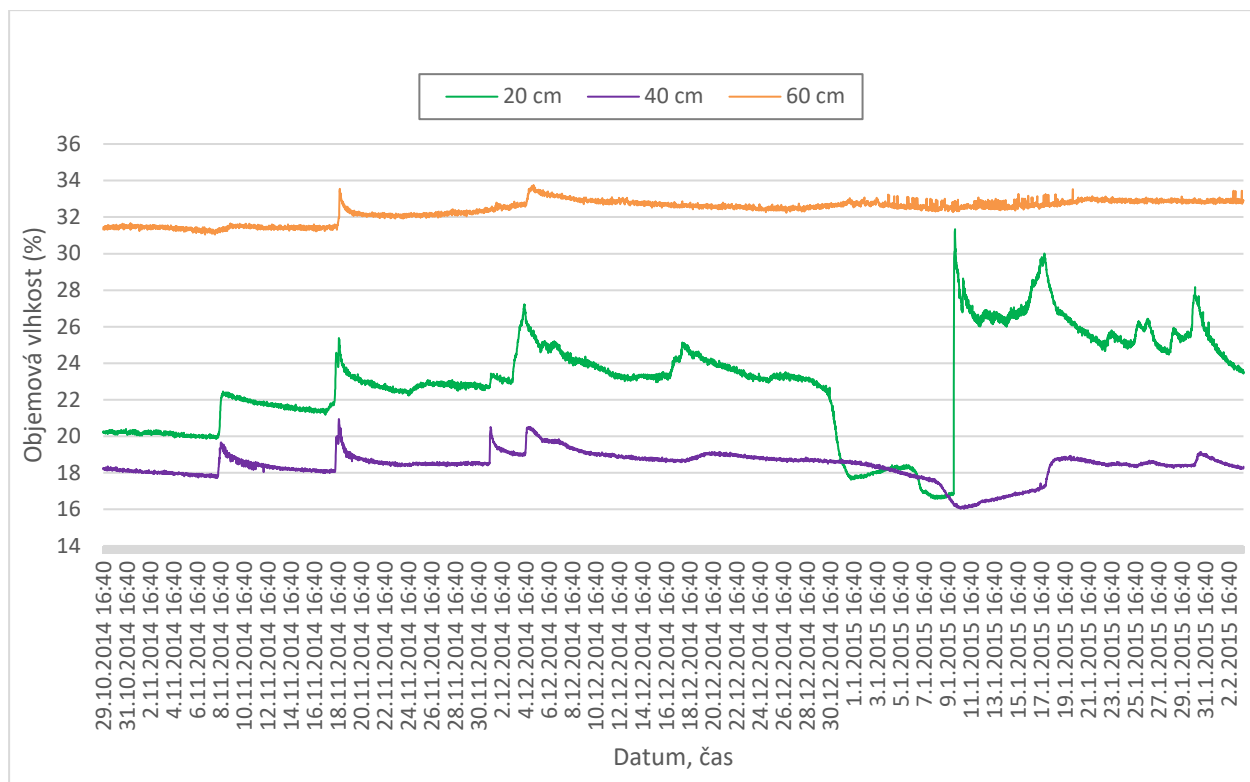
Obr. 4.29 - Průběh teplot v substrátu intenzivní vegetační střechy v hloubkách 20,40 a 60 cm (29.10.2014 - 3.2.2015) v porovnání s průběhem teplot venkovního vzduchu



Obr. 4.30 – Průběh teplot venkovního vzduchu v období od 29.10 do 3.2.2015 (zdroj: archivní data ČHMÚ z meteostanice (B2BTUR01) Brno-Tuřany)

Na Obr. 4.31 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.

Z Obr. 4.292 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.



Obr. 4.31 - Naměřené hodnoty objemové vlhkosti (%) v substrátu intenzivní vegetační střechy v zimním období (29.10. 2014 - 3.2.2015)

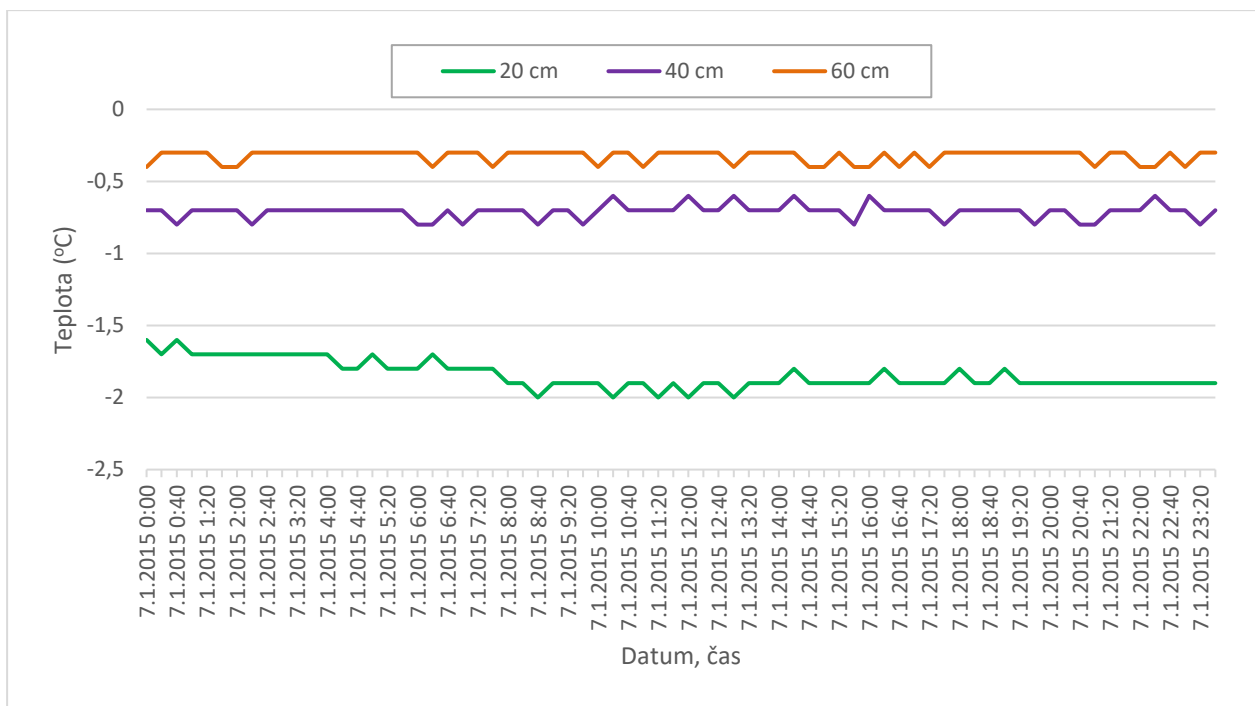
Na naměřené hodnoty objemové vlhkosti v profilu v zimním období má vliv především zamrznání a rozmrznání vody v substrátu, případně tání napadaného sněhu. Úbytek vlhkosti na grafech pravděpodobně souvisí s hodnotou permitivity vody⁶³, která je mnohem vyšší (80-81)⁶⁴ než permitivita ledu (4,8)⁶⁵.

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.

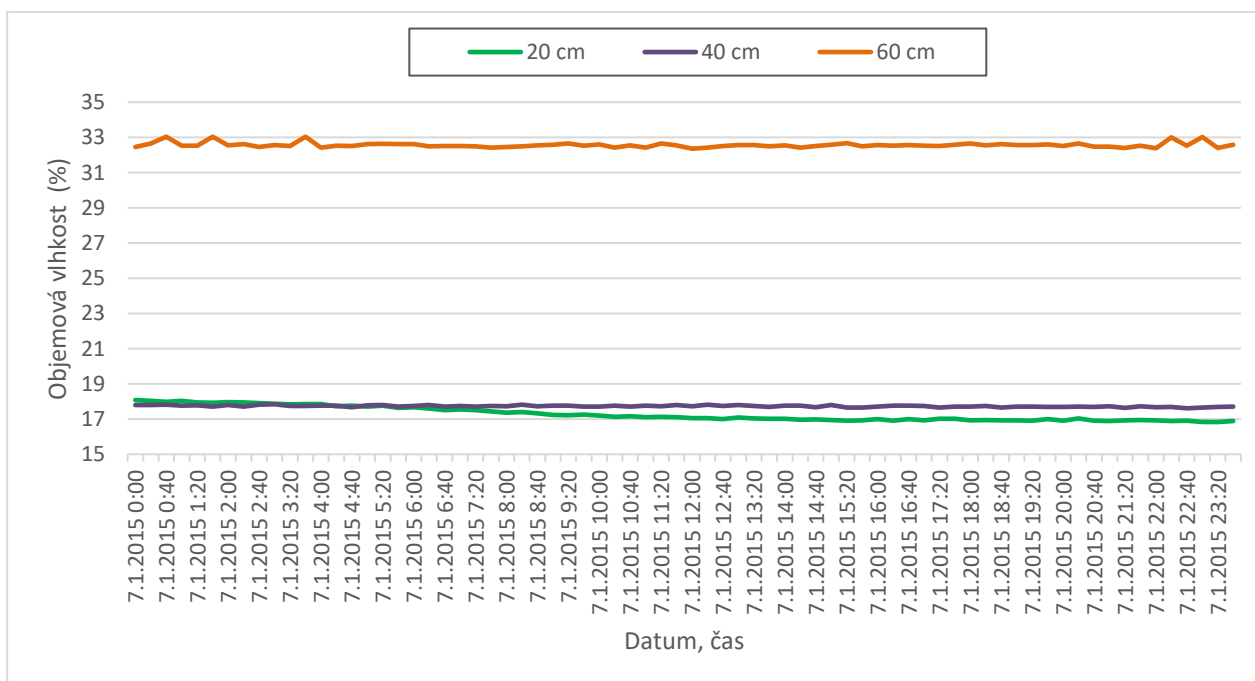
⁶³ ŠTRAJBLOVÁ, Jana. Aktualita z fyziky: Permitivita vody trochu jinak. <https://www.matfyz.cz/clanky/aktualita-z-fyziky-permitivita-vody-trochu-jinak> [online]. 23. července 2018 [cit. 2021-11-20]. Dostupné z: www.matfyz.cz

⁶⁴ 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

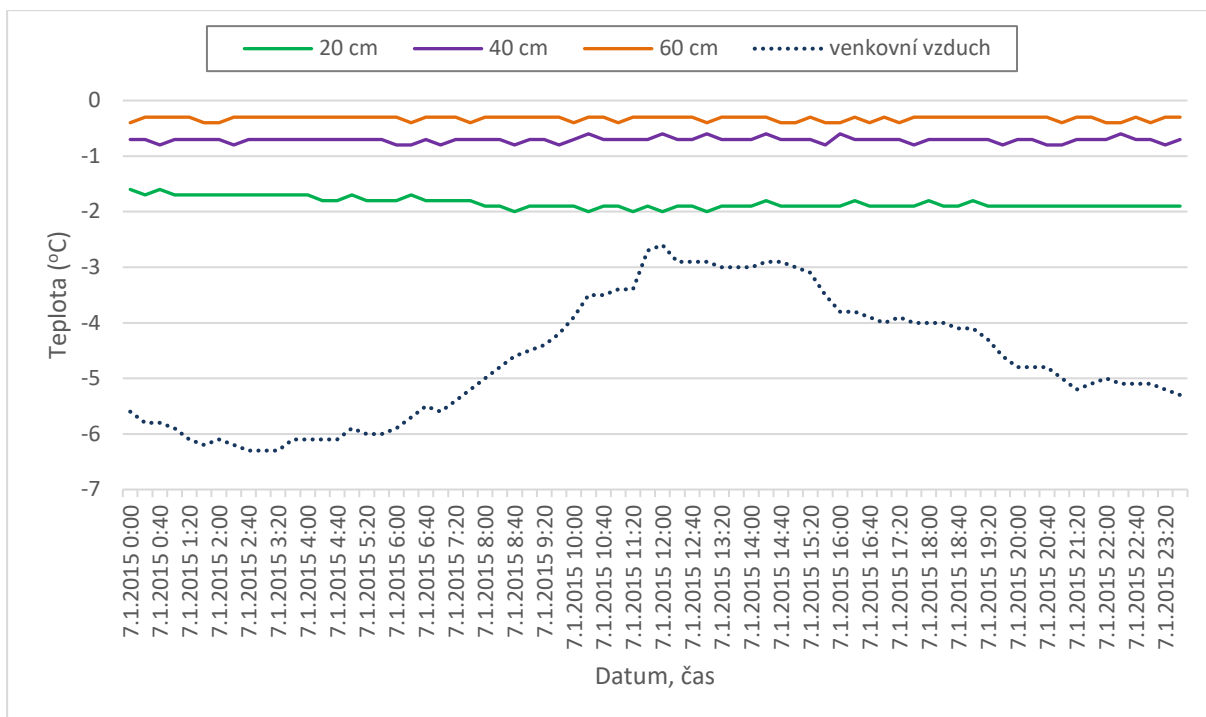
⁶⁵ MIKULČÁK. *Matematické, fyzikální a chemické tabulky pro střední školy: pomocná kniha pro studijní obory středních škol*. Praha: SPN, 1988. Pomocné knihy pro žáky (Státní pedagogické nakladatelství)



Obr. 4.32 - Průběh teplot v substrátu střešní zahrady během zimního dne (7.1.2015) v hloubkách 20,40 a 60 cm



Obr. 4.33 - Naměřená objemová vlhkost v substrátu střešní zahrady v během zimního dne (7.1.2015) v hloubkách 20,40,60 cm



Obr. 4.34- Průběh teplot v substrátu střešní zahrady v hloubkách 20, 40, 60 cm doplněný o průběh teplot venkovního vzduchu (7.1.2015)

Na grafu obr. 4.34 je průběh teplot v substrátu a průběh teplot venkovního vzduchu během zimního dne, kde je patrné, že rozdíly teplot během dne nejsou tak výrazné jako v letním období, což se projevuje i na neperiodickém průběhu teplot v substrátu.

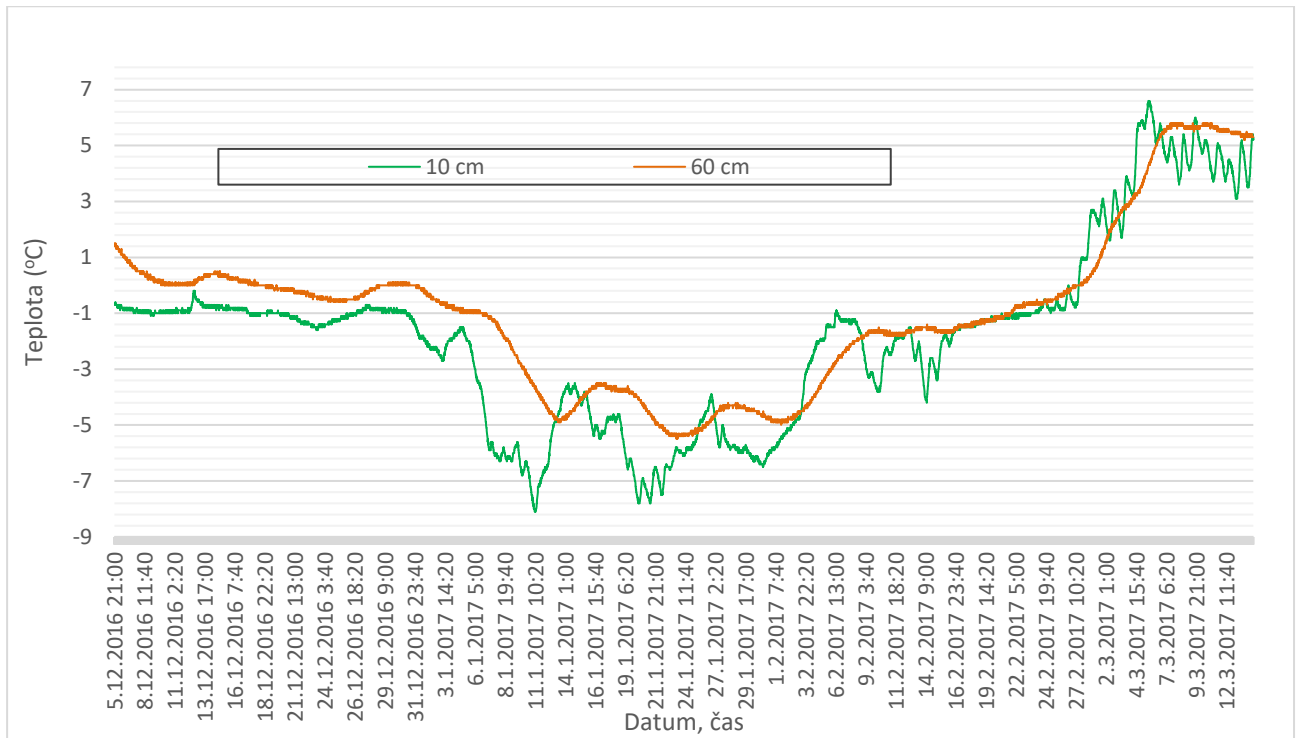
Další měření již probíhalo pouze se dvěma novými senzory, které nahradily původní poškozené.

- **zimní období (r. 2016 – 2017)**

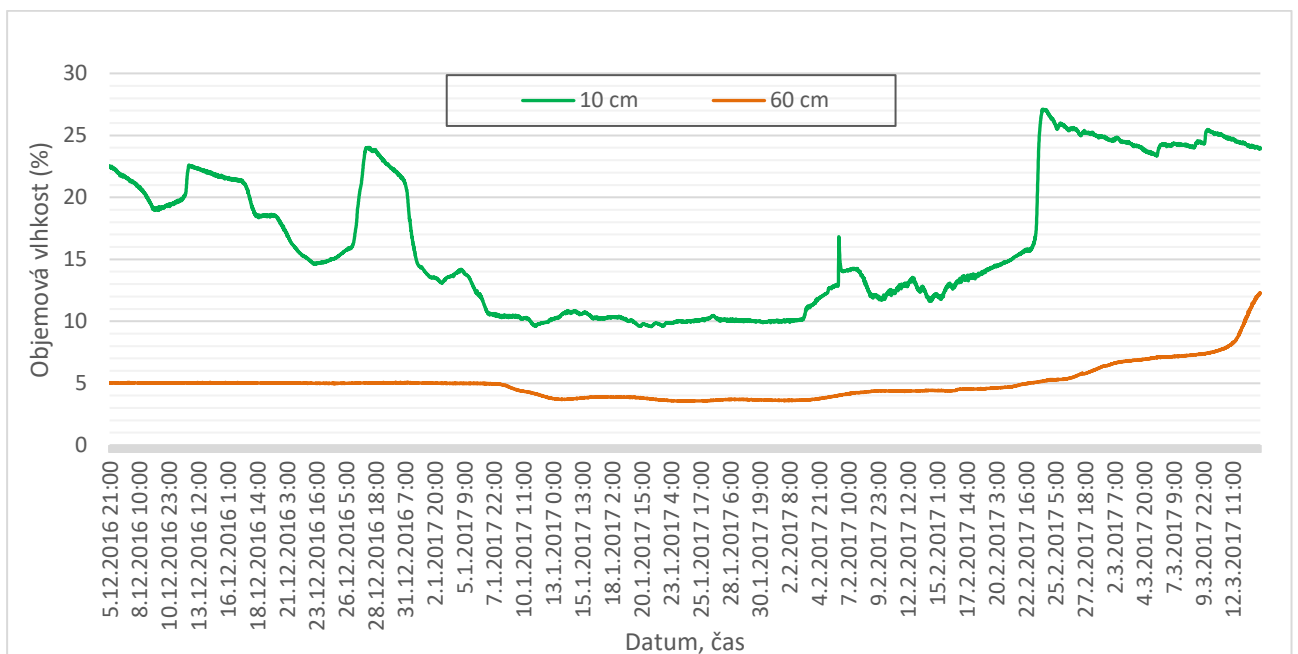
Měření probíhalo v období od 5.12.2016 do 14.3.2017. Senzory byly umístěny v substrátu střešní zahrady pod keři habrů v hloubkách 10 a 60 cm (obr. 4.35).

Ve sledovaném období poklesla teplota venkovního vzduchu až na $-16,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ (naměřeno meteostanicí umístěnou u objektu). Meteostanice (B2BTUR01) Brno-Tuřany zaznamenala teplotu ještě nižší. V substrátu vegetační střechy byly zaznamenány teploty $-8,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ v 10 cm a $-5,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ v hloubce 60 cm. 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 způsobena kořeny habrů, které odčerpávají vodu ze substrátu (obr.4.36).

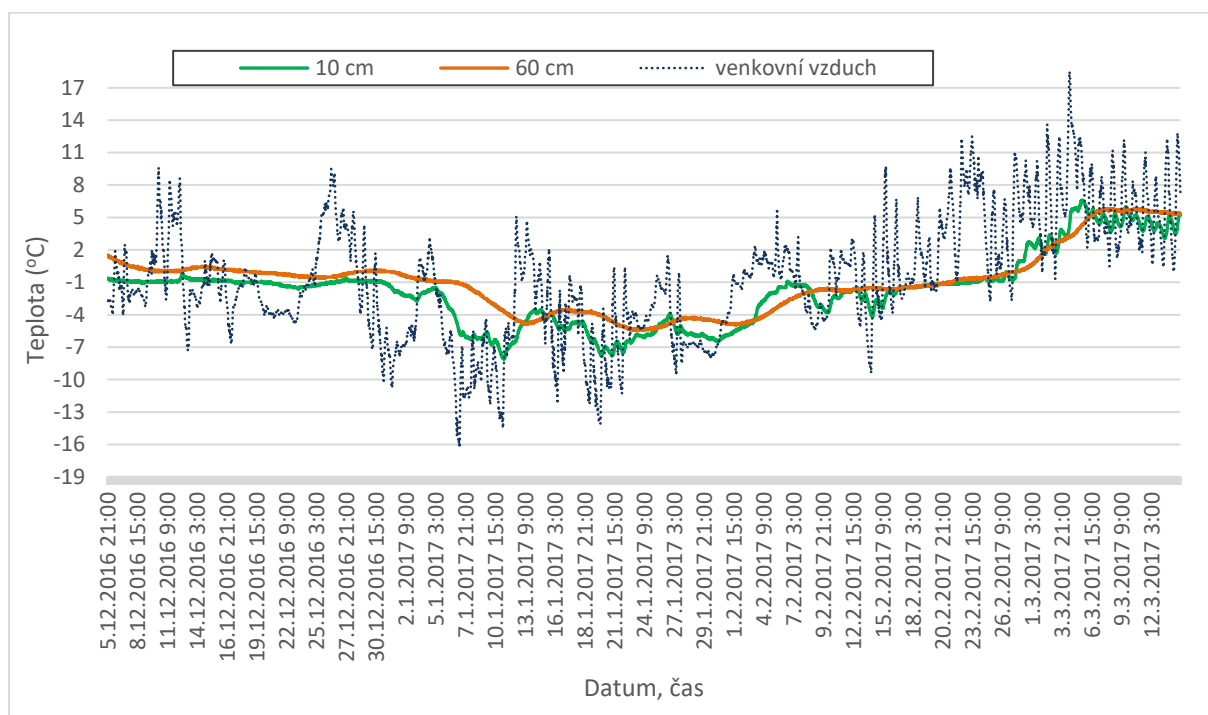


Obr. 4.35 - Průběh teplot v substrátu v hloubce 10 a 60 cm (5.12.2016- 14.3.2017)



Obr. 4.36 - Hodnoty objemové vlhkosti v substrátu v hloubce 10 a 60 cm (5.12.2016 - 14.3.2017)

Na Obr. 4.36 můžeme pozorovat, stejně jako v předešlých letech, výraznější pokles vlhkosti ve svrchní vrstvě substrátu v období, kdy teploty poklesly pod bod mrazu a voda v profilu zamrzla. Na obr. 4.37 je vybraný úsek měření s minimálními teplotami v substrátu vegetační střechy v porovnání s teplotami venkovního vzduchu.



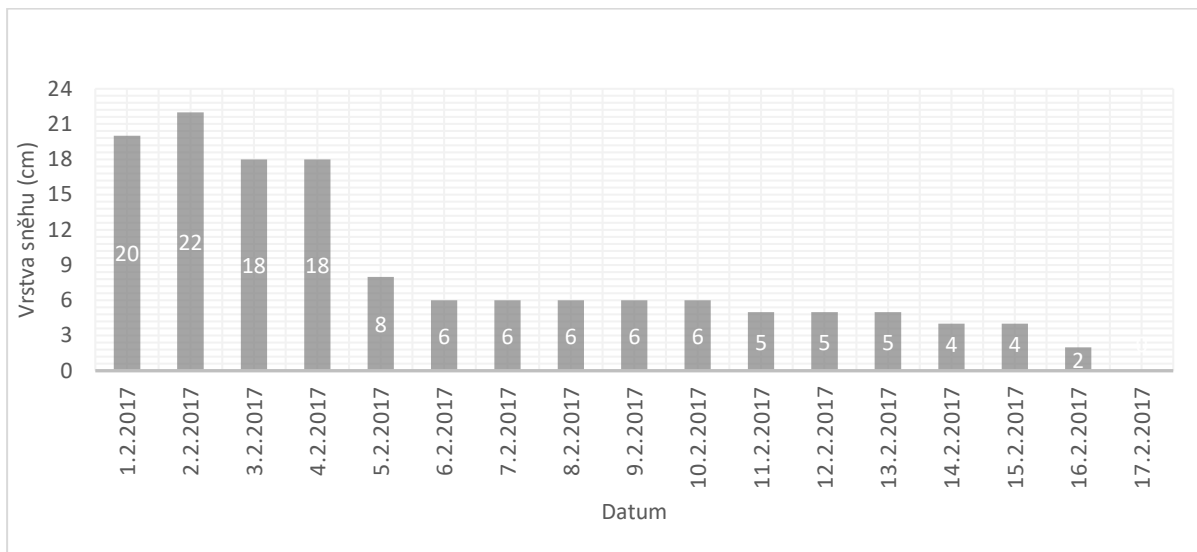
Obr. 4.37- Průběh teplot v substrátu v hloubce 10 a 60 cm (5.12.2016 - 14.3.2017) v porovnání s teplotami vzduchu

Nejnižší teplota venkovního vzduchu ve sledovaném období byla naměřena 7. ledna 2017, v substrátu střešní zahrady byly naměřeny nejnižší teploty viz tab.4.3. Z tabulky je patrné, že vliv minimální teploty vzduchu ze dne 7.1.2021 se projevil v substrátu v hloubce 10 cm přibližně za 4 dny (11.1.2021), v hloubce 60 cm byla nejnižší teplota naměřena až za 5 dní (23.1.2021).

Tab. 4.3 Nejnižší naměřené teploty v substrátu vegetační střechy a nejnižší naměřená teplota venkovního vzduchu (r. 2016-17)

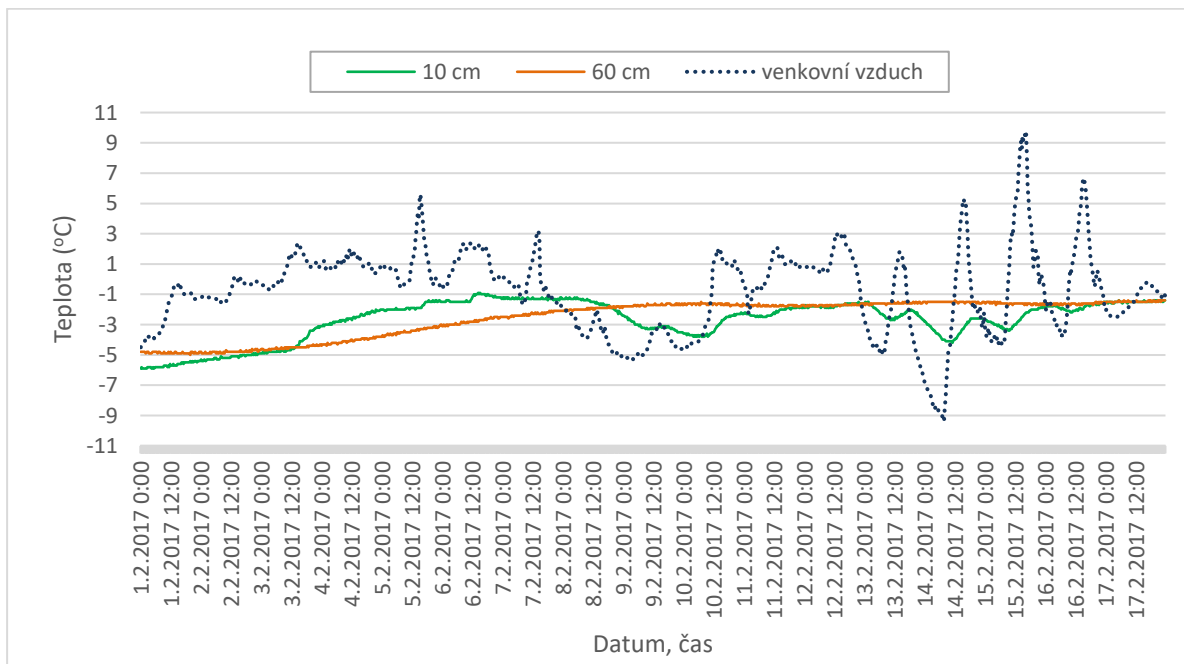
	<i>umístění senzoru v substrátu</i>	<i>t_{min} (°C)</i>	<i>datum</i>
Senzor č. 1 (39856)	10 cm	-8,1	11.1.2017
Senzor č. 2 (39855)	60 cm	-5,5	23.1.2017
Venkovní vzduch		-16,6	7.1.2021

Na obr. 4.39 je průběh teplot v substrátu střešní zahrady v časovém úseku, kdy byla střešní zahrada pokryta sněhovou pokrývkou (Obr. 4.38).

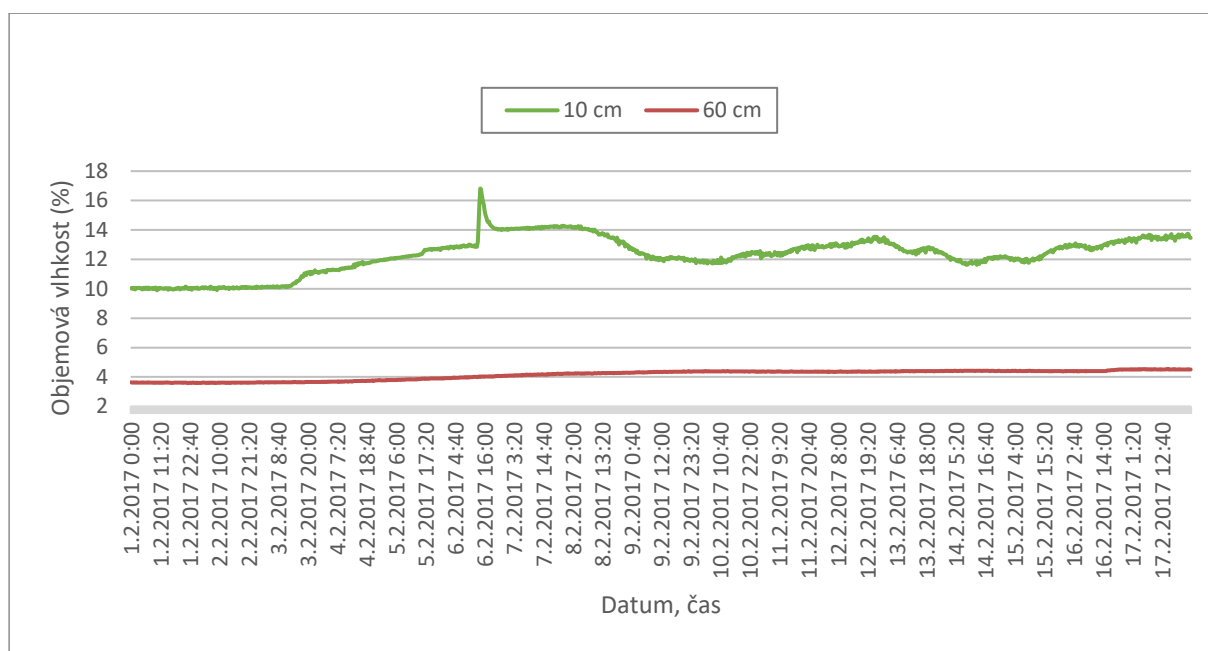


Obr. 4.38 - Vrstva sněhu pokrývající střešní zahradu (1.2-17.2.2017)

Na grafu Obr. 4.40 jsou naměřené hodnoty objemové vlhkosti ve sledovaném období. V hloubce 10 cm je patrný výraznější nárůst objemové vlhkosti vlivem oteplení a tání sněhové pokrývky.



Obr. 4.39 – Průběh teplot v substrátu střešní zahrady v hloubkách 10 a 60 cm (1.2-17.2.2017) v porovnání s teplotami venkovního vzduchu



Obr. 4.40 - Průběh objemové vlhkosti v hloubkách 10 a 60 cm v substrátu střešní zahrady (1.2-17.2.2017)

Tab. 4.4 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

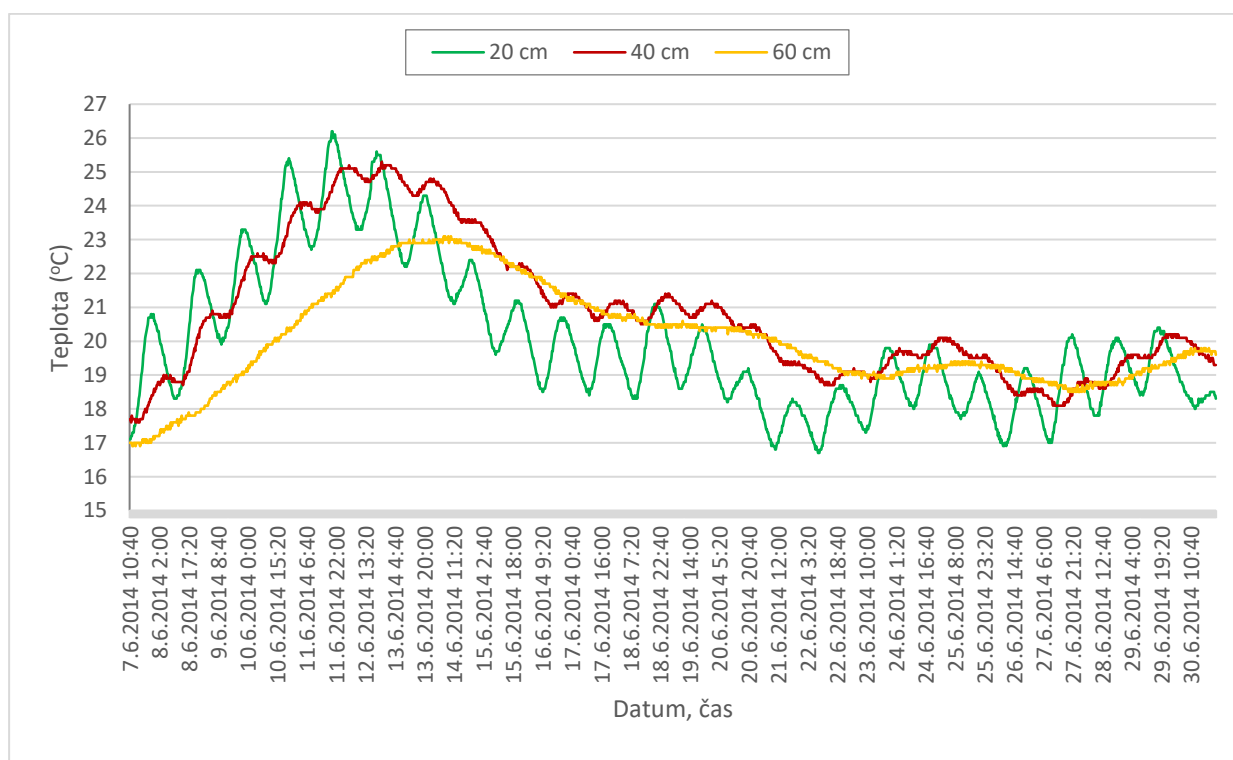
Závěrem můžeme shrnout, že v substrátu střešní zahrady v hloubce 60 cm na nevytápěném objektu zahradního domku byla naměřena teplota přibližně o 8-12 °C vyšší, než byla minimální teplota venkovního vzduchu ve sledovaném období.

4.1.2 Výsledky měření - letní období

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

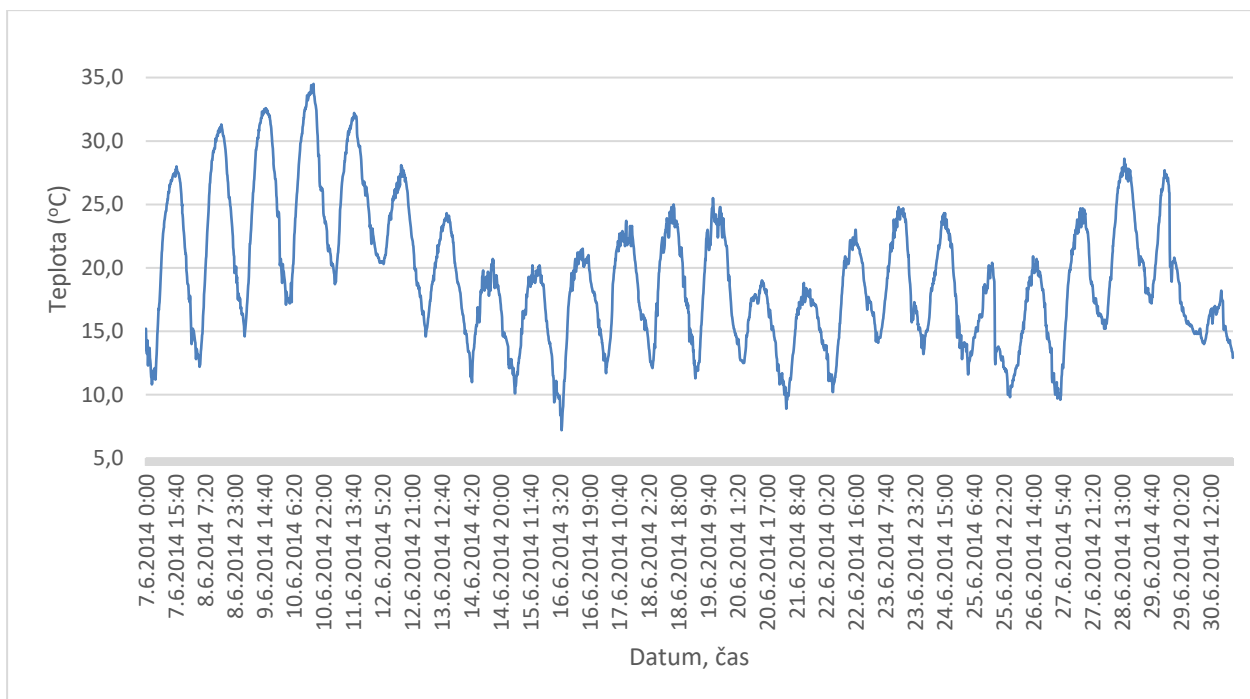
- **letní období (r. 2014)**

Na Obr. 4.41 a Obr. 4.43 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.



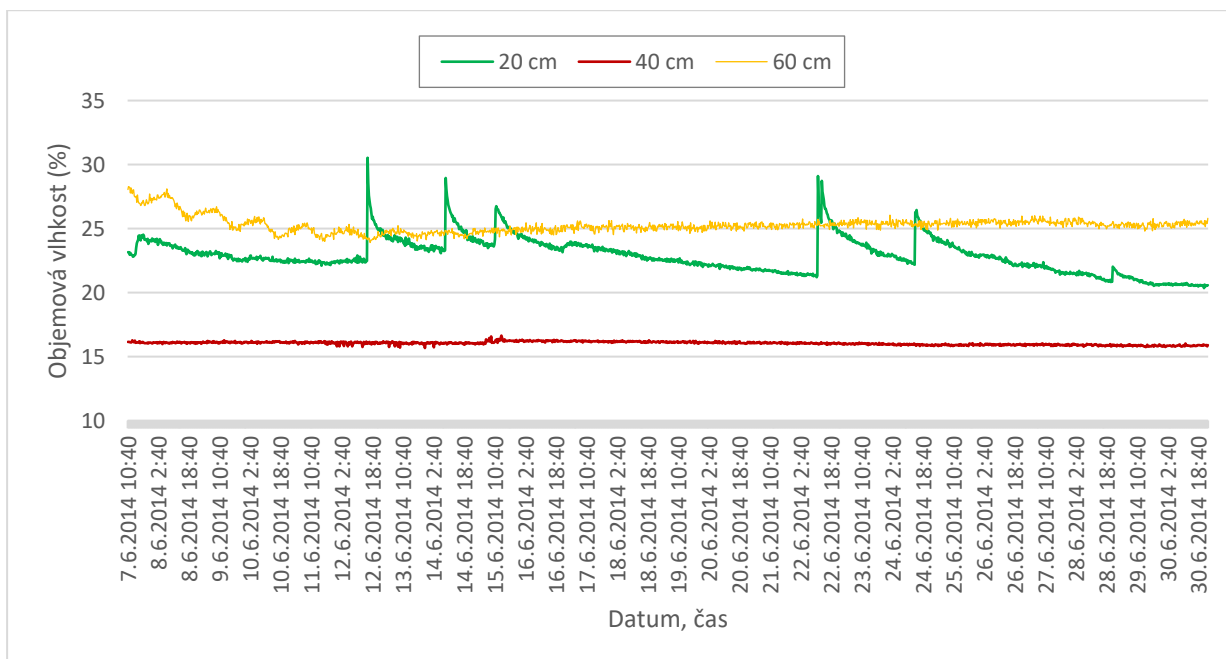
Obr. 4.41 - Průběh teplot v substrátu střešní zahrady v hloubkách 20, 40 a 60 cm (7.6. - 30.6.2014)

Na obr. 4.42 je průběh teplot venkovního vzduchu (data ČHMÚ, meteor stanice (B2BTUR01) Brno-Tuřany).



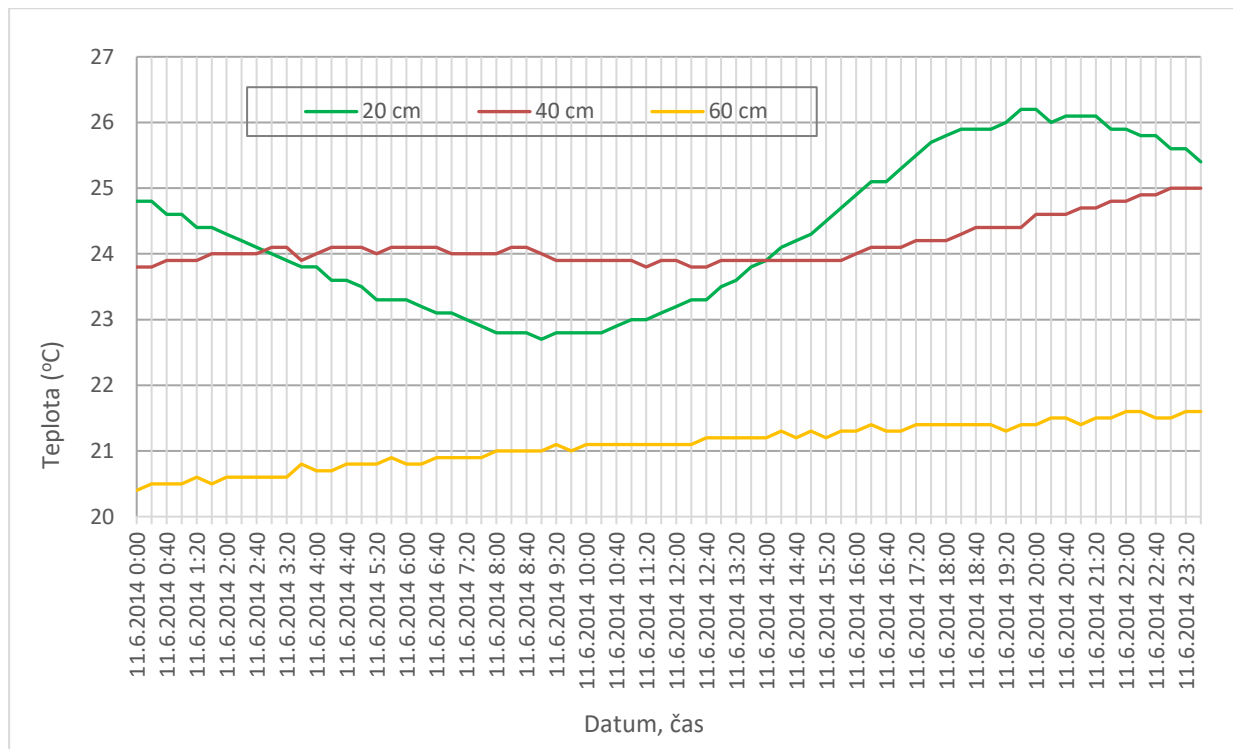
Obr. 4.42- Průběh teplot venkovního vzduchu v období od 7.6.2014 do 30.6.2014 (zdroj: data ČHMÚ, meteor stanice (B2BTUR01) Brno-Tuřany)

Na Obr. 4.43 je objemová vlhkost ve sledovaném období. Nejnižší hodnota objemové vlhkosti byla zaznamenána opět v hloubce 40 cm.

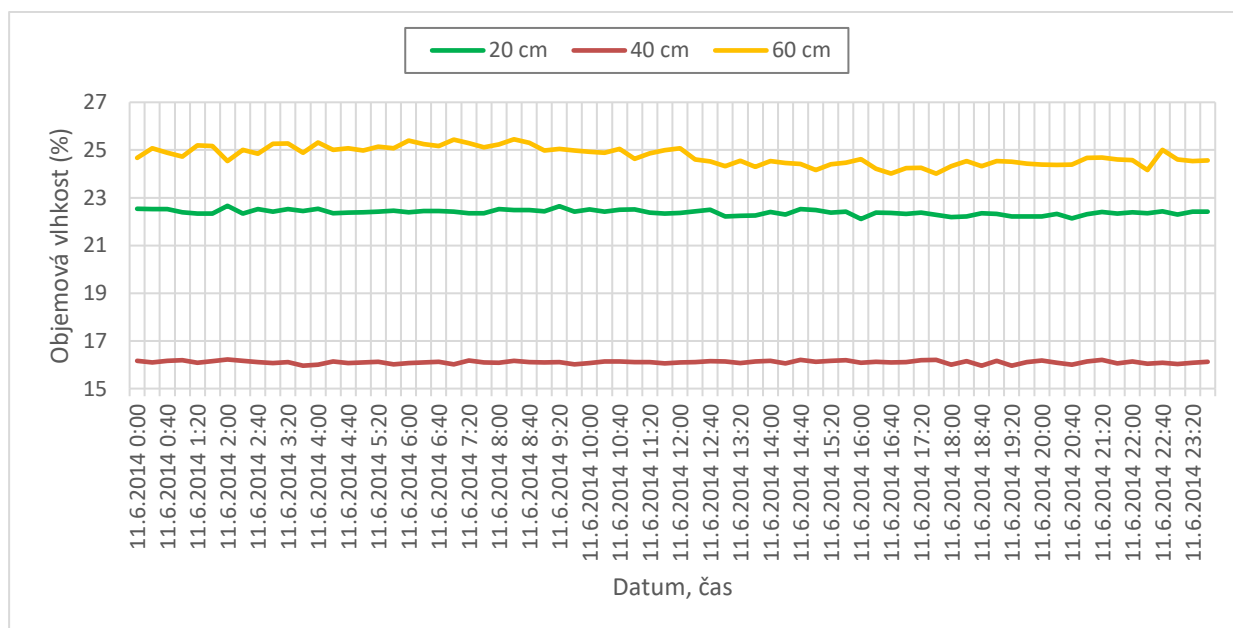


Obr. 4.43 - Hodnoty objemové vlhkosti v substrátu střešní zahrady v hloubkách 20, 40 a 60 cm (7.6.- 30.6.2014)

Pro přehlednější znázornění uvedu ještě průběh teplot a objemové vlhkosti během jednoho dne (Obr. 4.44 a Obr. 4.45).



Obr. 4.44 – Typický průběh teplot v substrátu vegetační střechy během letního dne v hloubkách 20, 40 a 60 cm (11.6.2014)



Obr. 4.45 - Naměřená objemová vlhkost v substrátu vegetační střechy během letního dne v hloubkách 20, 40 a 60 cm (11.6.2014)

V *tab.4.5* jsou uvedeny minimální a maximální dosažené teploty v jednotlivých hloubkových úrovních během typického letního dne (*Obr. 4.44*). Největší rozdíl teplot byl zaznamenán ve svrchní vrstvě substrátu v hloubce 20 cm. Teplotní rozdíly v hloubkách 40 a 60 cm byly přibližně stejné. Nejvyšší hodnoty objemové vlhkosti (*obr.4.45*) byly naměřeny v hloubce 60 cm, nejnižší v hloubce 40 cm. V hloubce 40 cm se vyskytovaly kořeny zemědělských plodin, které během vegetačního období odčerpávaly vodu.

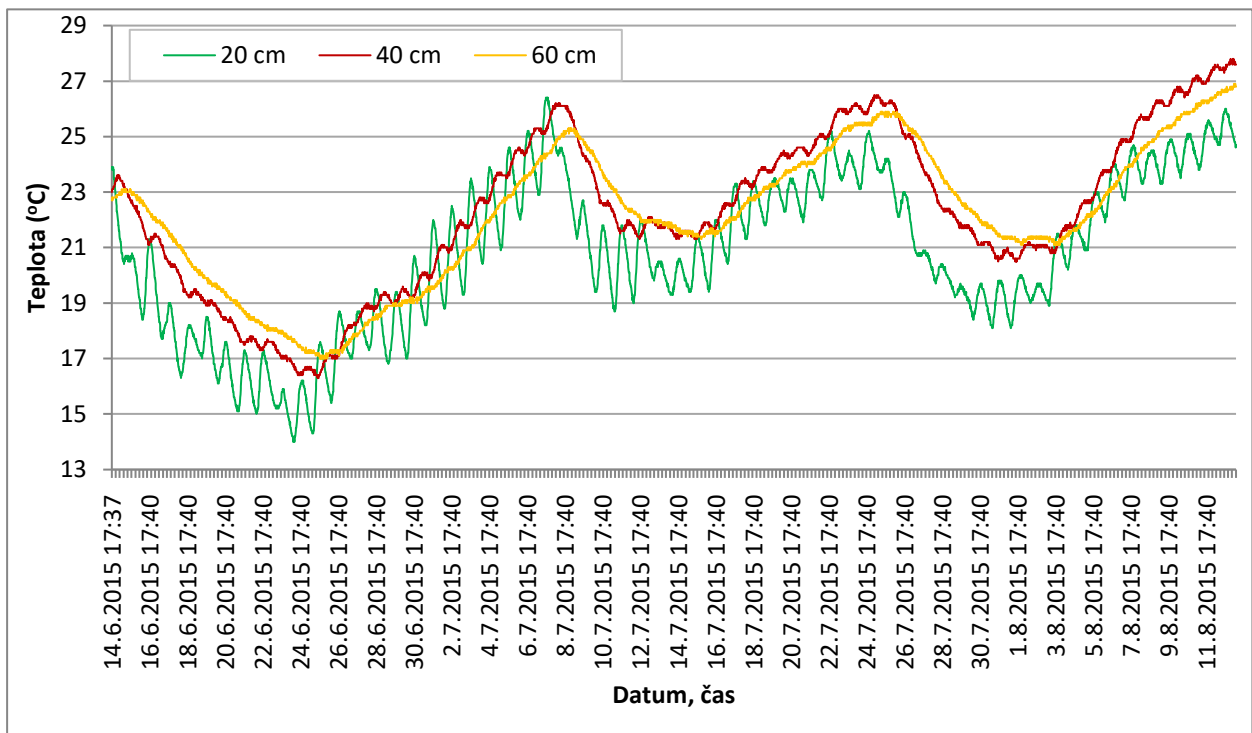
Tab. 4.5 Minimální a maximální teploty během letního dne a průměrná hodnota objemové vlhkosti v % v jednotlivých hloubkových úrovních

<i>Umístění senzoru v substrátu</i>	<i>t_{min} (°C)</i>	<i>t_{max} (°C)</i>	<i>Δt (°C)</i>	<i>Prům. hodnota z naměřené objemové vlhkosti (%)</i>
<i>20 cm</i>	<i>22,7</i>	<i>26,2</i>	<i>3,5</i>	<i>22,39%</i>
<i>40 cm</i>	<i>23,8</i>	<i>25,0</i>	<i>1,2</i>	<i>16,10%</i>
<i>60 cm</i>	<i>20,4</i>	<i>21,6</i>	<i>1,2</i>	<i>24,76%</i>

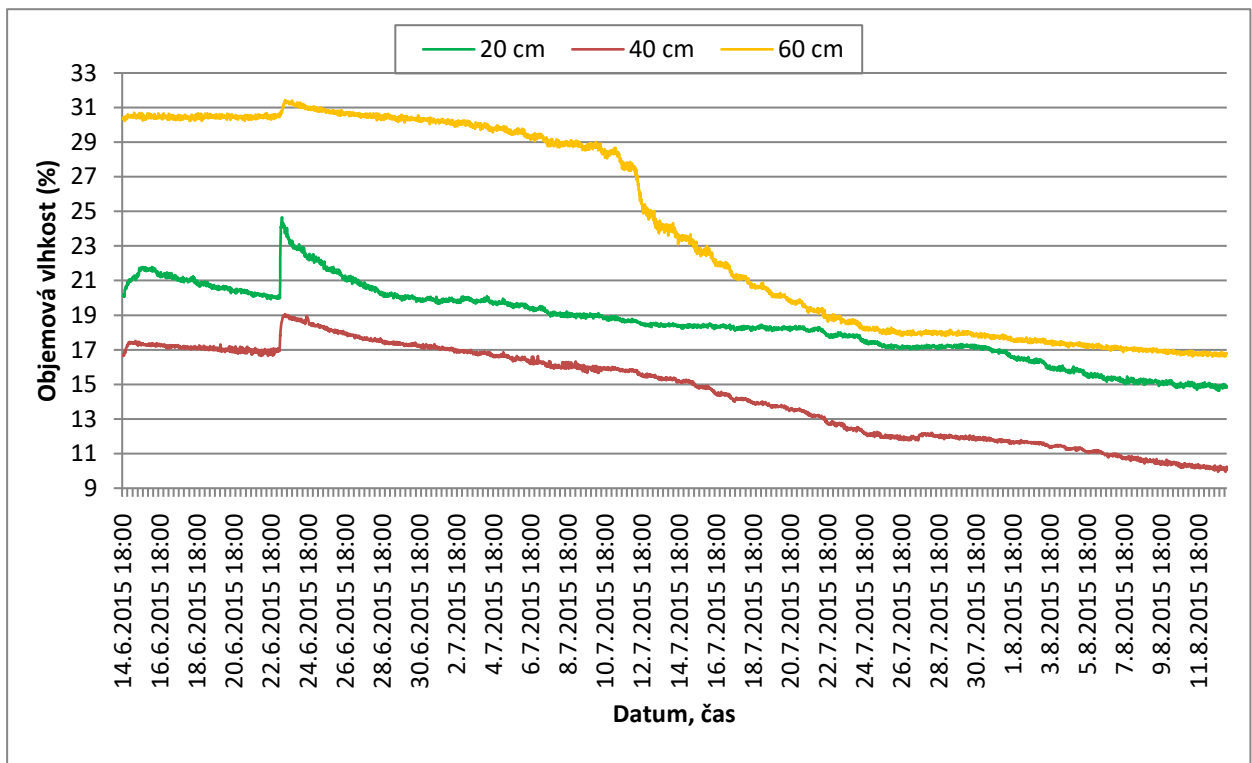
- ***letní období (r. 2015)***

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. Nejprve nastaly výpadky měření u senzoru v hloubce 40 cm (*obr.4.46, obr.4.47*), zbývající dva senzory ještě měřily do 17. srpna 2015 (*obr.4.48, obr.4.49*).

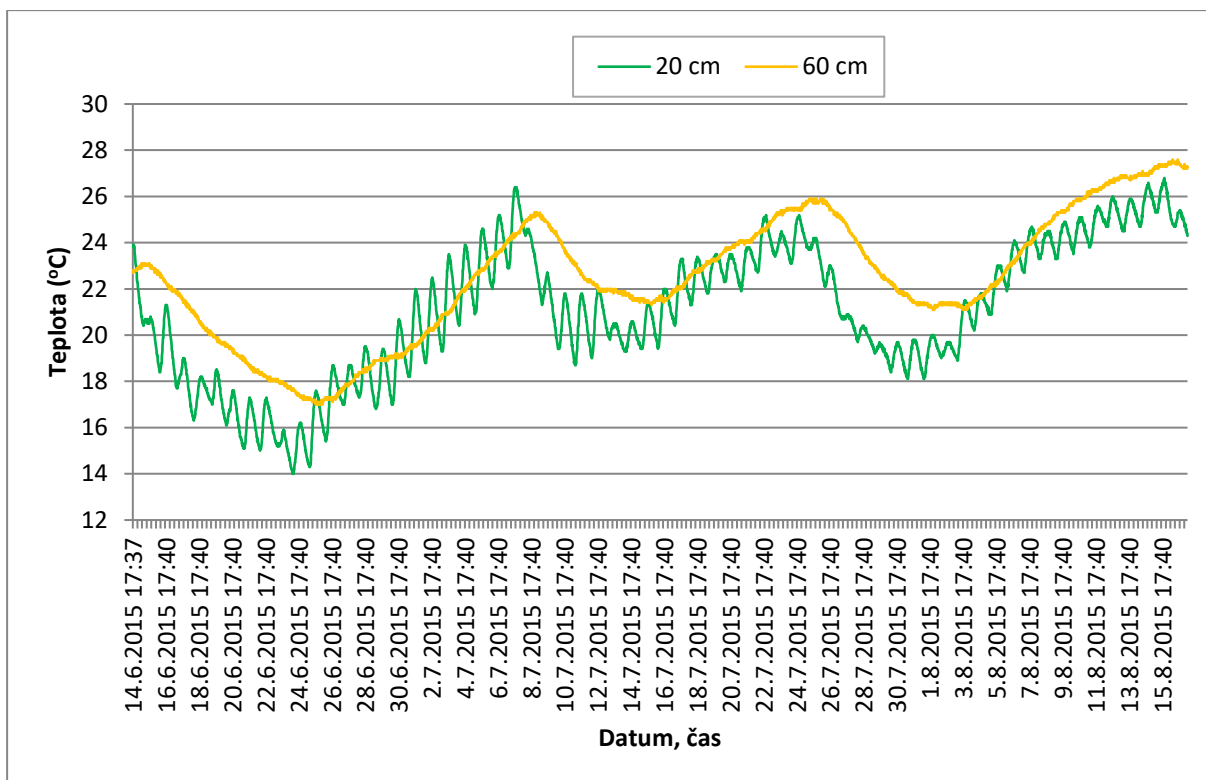
Na *obr.4.50* je průběh teplot venkovního vzduchu. Naměřené hodnoty byly poskytnuty ČHMÚ, (B2BTUR01) Brno-Tuřany. Teploty venkovního vzduchu se ve sledovaném období pohybovaly okolo 35°C.



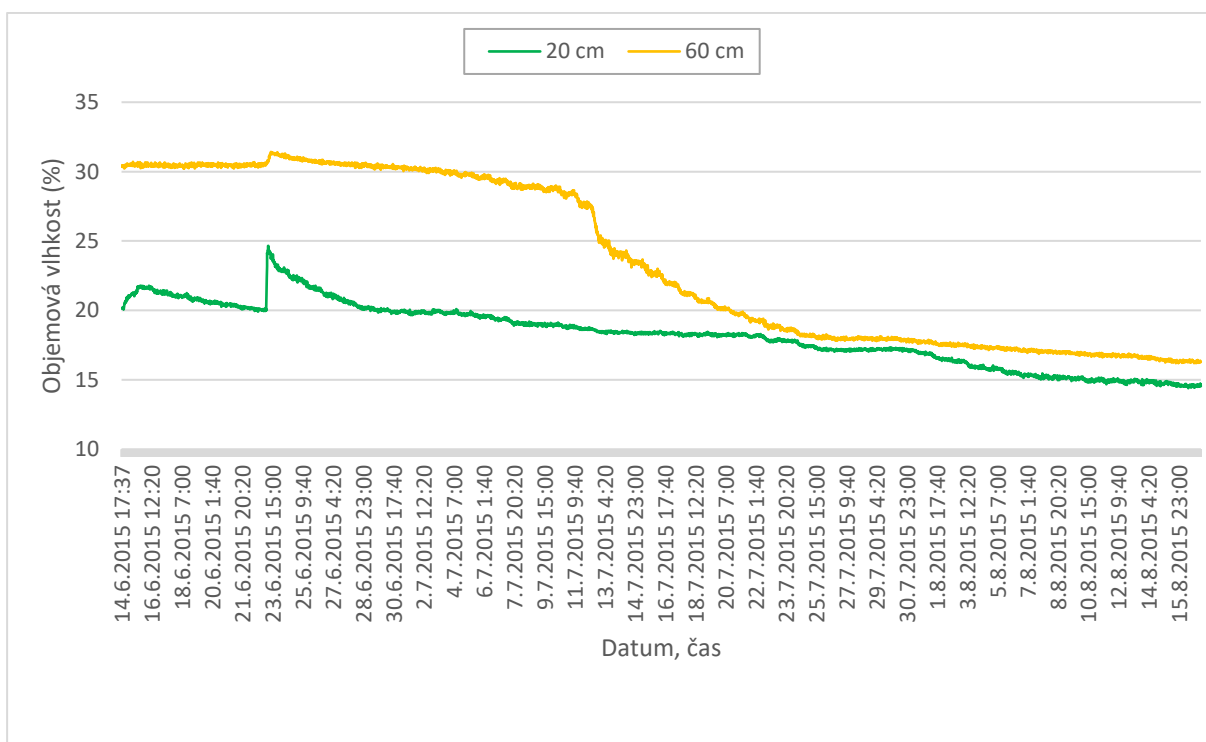
Obr. 4.46 – Průběh teplot v substrátu vegetační střechy v hloubkách 20,40 a 60 cm (14.6.2015-13.8.2015)



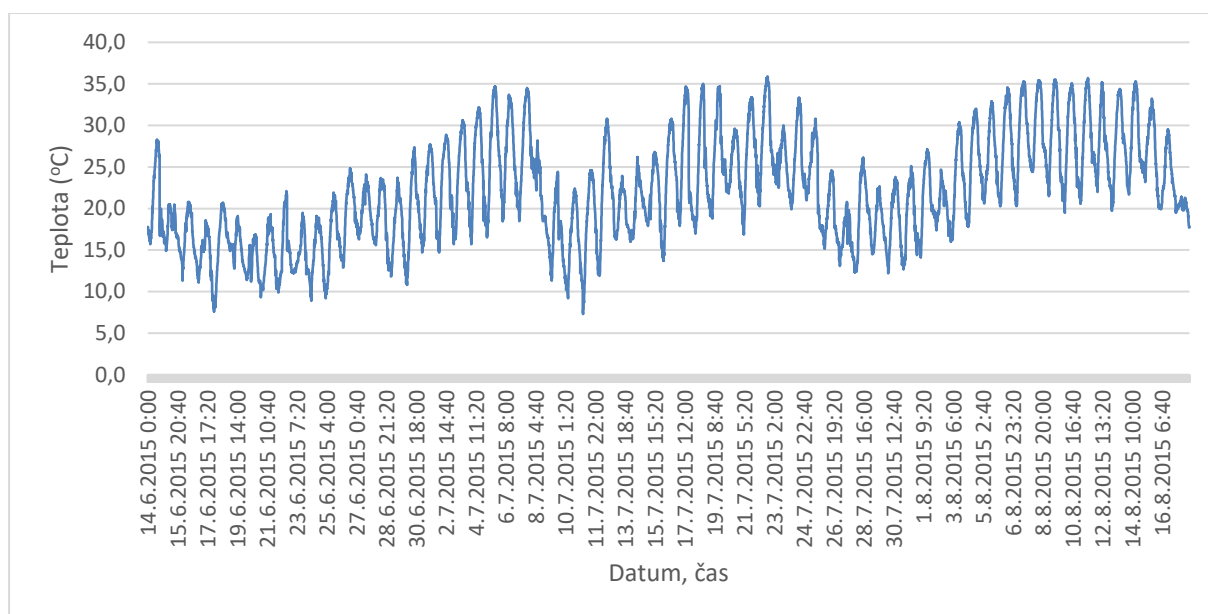
Obr. 4.47 – Hodnoty objemové vlhkosti v hloubkách 20,40 a 60 cm (14.6.2015-13.8.2015)



Obr. 4.48 – Průběh teplot v substrátu vegetační střechy v hloubkách 20 a 60 cm (14.6.2015-17.8.2015)



Obr. 4.49- Hodnoty objemové vlhkosti v substrátu vegetační střechy v hloubkách 20 a 60 cm (14.6.2015-17.8.2015)



Obr. 4.50- Průběh teplot venkovního vzduchu v období od 14.6. do 17.8.2015 (zdroj: data ČHMÚ, meteostanice (B2BTUR01) Brno-Tuřany)

Tab. 4.6 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. 4.6 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. Je pravděpodobné, že teploty v substrátu vegetační střechy mohly dosáhnout ještě vyšších hodnot.

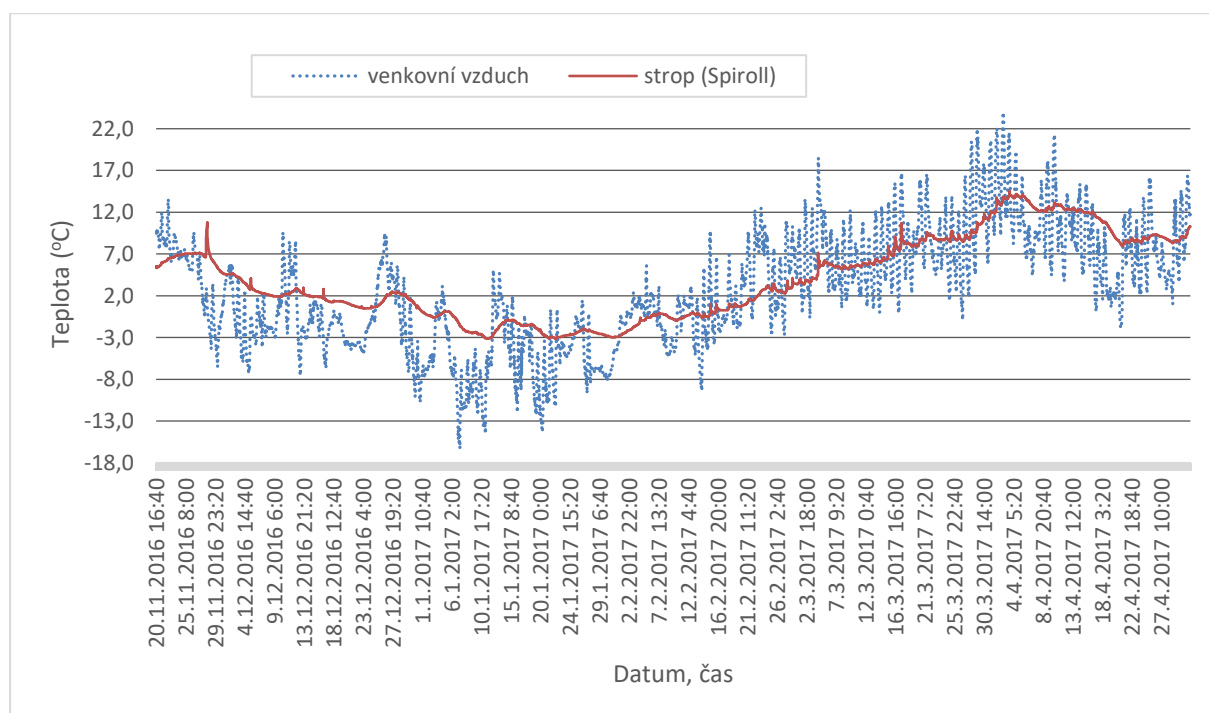
Vzhledem k vysoké citlivosti senzorů a častých bouřek muselo být měření, které pokračovalo se dvěma náhradními senzory v následujících letech, v letním období často přerušováno. Z tohoto důvodu i další naměřená data, získaná v letním období, nejsou zcela kompletní.

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 stropní konstrukci 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:

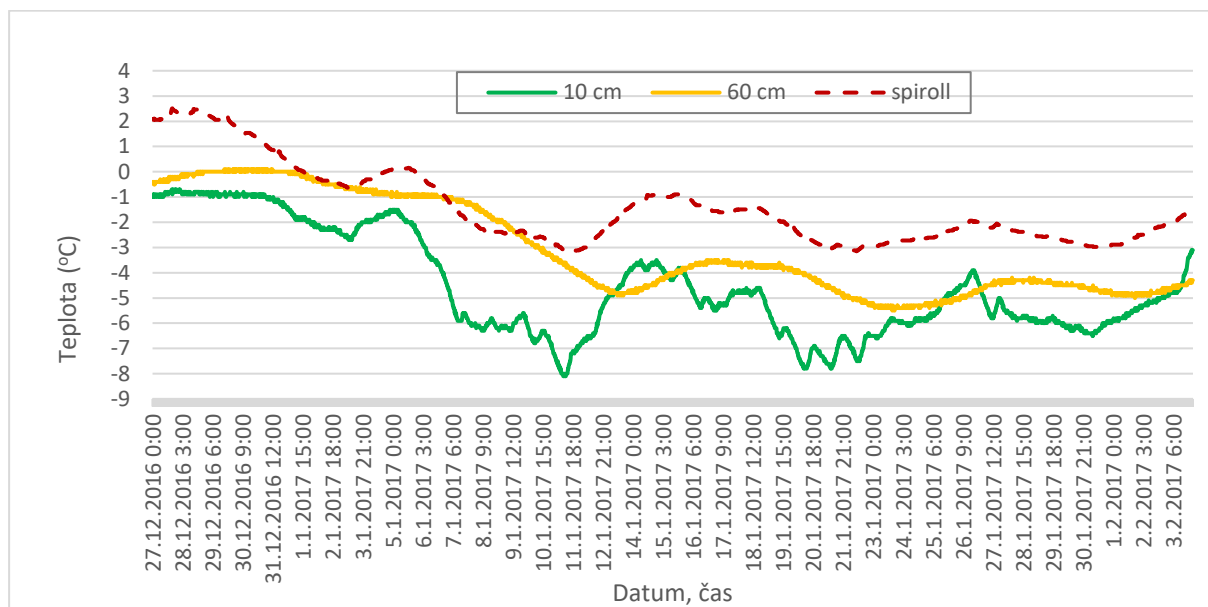
Měření na obr. 4.51 probíhalo od 20.11.2016 do 1.5.2017.



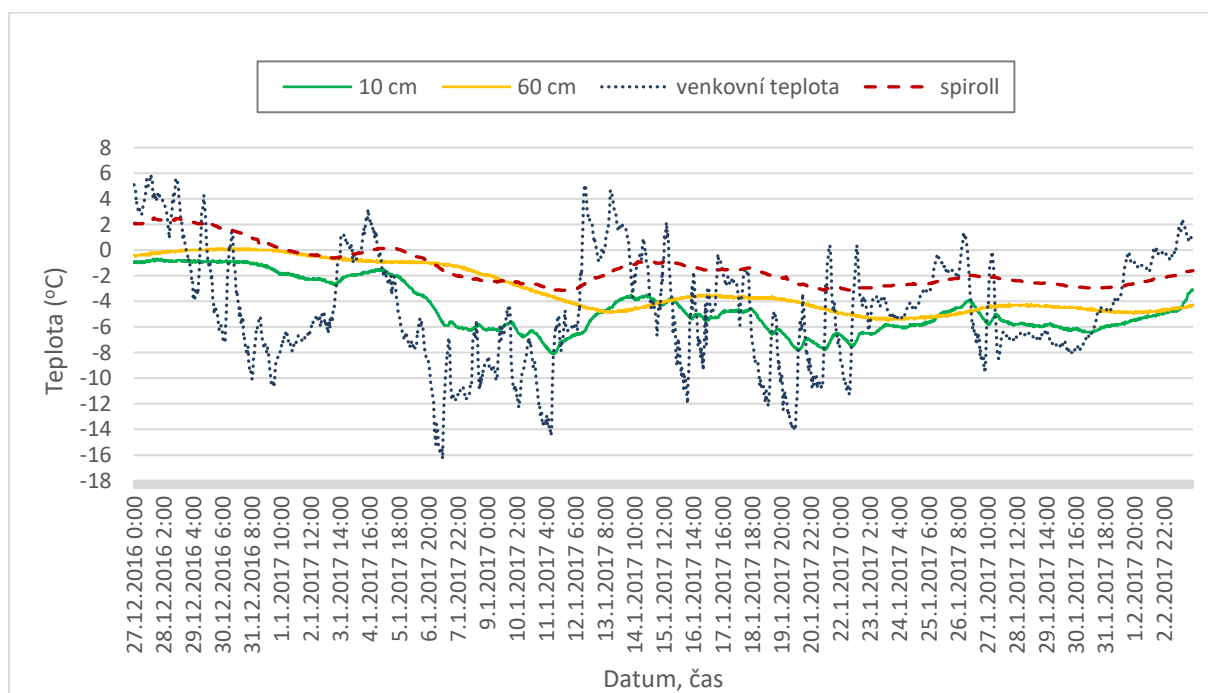
Obr. 4.51- Průběh teplot na stropě (Spiroll) zahradního domku v porovnání s teplotami venkovního vzduchu (20.11.2016-1.5.2017)

Na obr. 4.51 je zobrazen průběh teplot na stropní konstrukci zahradního domku v závislosti na teplotě venkovního vzduchu. Objekt je nezateplený a nevytápěný. Na stropní konstrukci byla naměřena nejnižší teplota $-3,1\text{ °C}$, zatímco teplota venkovního vzduchu ve sledovaném období poklesla až na $-16,3\text{ °C}$. Data byla získána z meteostanice (EM50), umístěné u objektu zahradního domku.

Na obr. 4.52 je pro větší přehlednost výsledků zobrazen pouze průběh teplot v jednotlivých hloubkových úrovních substrátu vegetační střechy a na stropní konstrukci v době, kdy se teploty venkovního vzduchu pohybovaly nejnižše. Obr. 4.53 je doplněný o průběh teplot venkovního vzduchu.

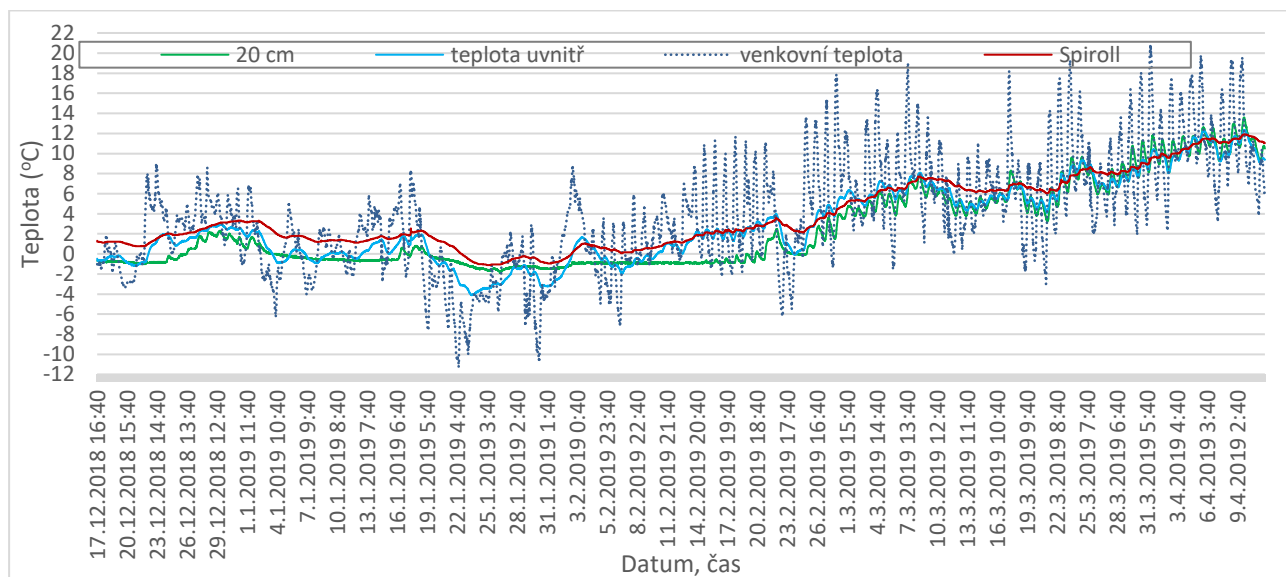


Obr. 4.52-Průběh teplot v substrátu v hloubce 10 a 60 cm ve srovnání s teplotami na stropní konstrukci uvnitř zahradního domku (27.12.2016 - 3.2.2017)

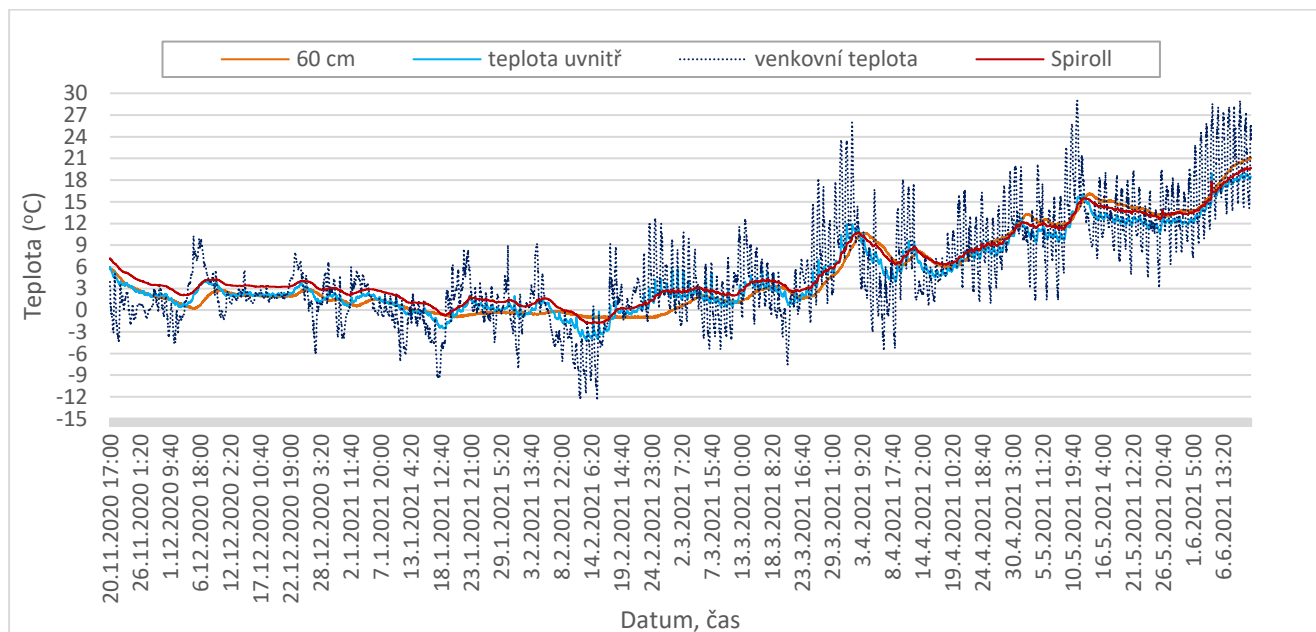


Obr. 4.53 - Průběh teplot v substrátu v hloubce 10, 60 cm ve srovnání s teplotami na stropě uvnitř zahradního domku a teplotami venkovního vzduchu (27.12.2016 - 3.2.2017)

Další měření probíhalo v zimním období v letech 2018/19 a 2019/20. Na obr. 4.54 je zobrazen průběh teplot na stropní konstrukci, uvnitř zahradního domku, v hloubce 20 cm v substrátu vegetační střechy a průběh teplot venkovního vzduchu.



Obr. 4.54- 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. 4.55 - 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. 4.55 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.

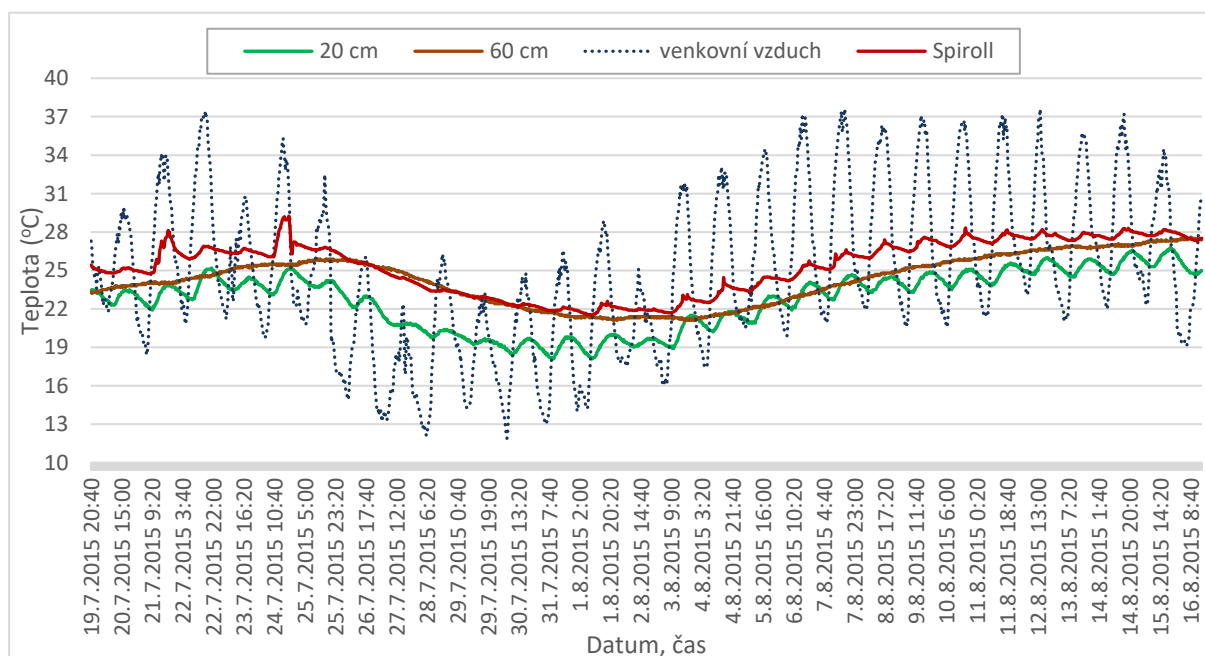
Tab. 4.7 Minimální dosažené teploty v zimním období v letech 2018-2020

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. 4.7 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 $-16,3^{\circ}\text{C}$.

Výsledky měření v letním období:

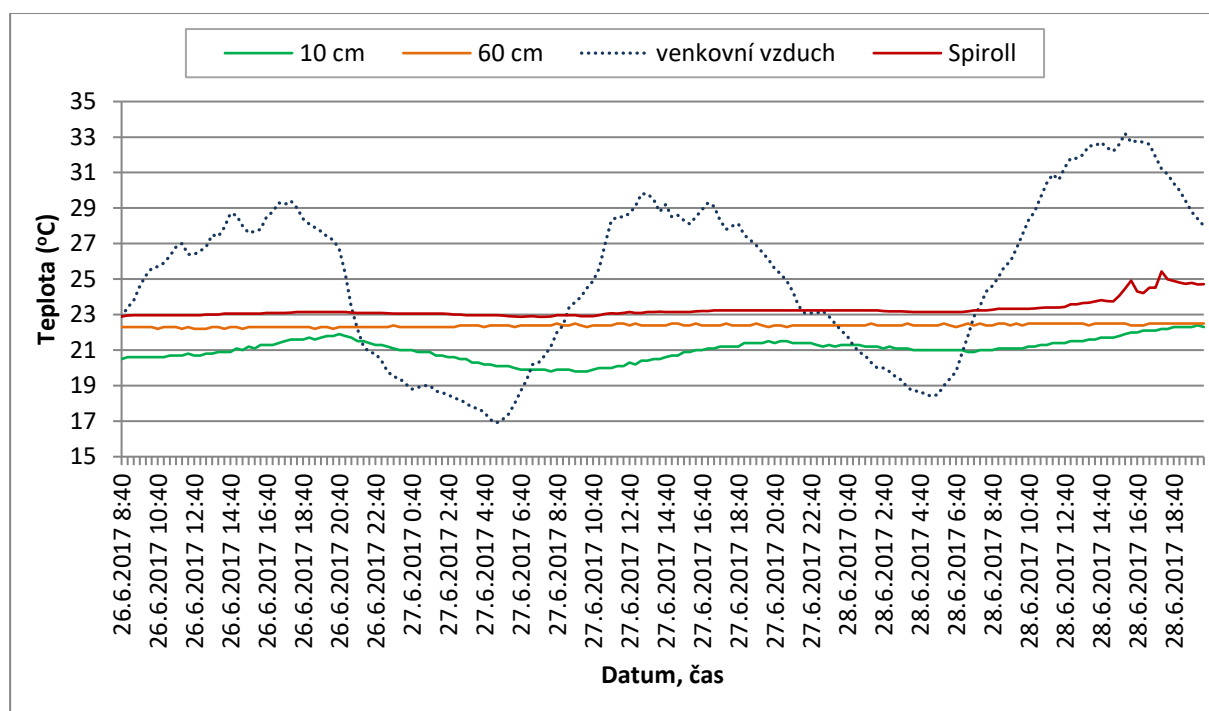
Na obr. 4.56 jsou data pořízená v r. 2015. V této době došlo k poškození senzorů. Nejprve došlo k výpadku měření u senzoru v hloubce 40 cm. Další dva senzory v hloubkách 20 a 60 cm pracovaly ještě týden (do 16.8.2015).



Obr. 4.56- Průběh teplot na stropě zahradního domku v porovnání s teplotami v substrátu vegetační střechy a s teplotami venkovního vzduchu (19.7.-16.8.2015)

Na grafu *obr.4.56* jsou poslední získaná data před poškozením zbývajících dvou senzorů. Na obrázku je průběh teplot venkovního vzduchu naměřený meteostanicí EM50 u objektu, teploty na stropní konstrukci a teploty v substrátu v hloubkách 20 a 60 cm. Naměřené teploty venkovního vzduchu se pohybovaly okolo 36-37,6°C. Na stropní konstrukci se naměřené teploty pohybovaly mírně nad 28°C, tedy v průměru o 8°C nižší, než byla naměřená teplota venkovního vzduchu.

Na *obr. 4.57* 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.

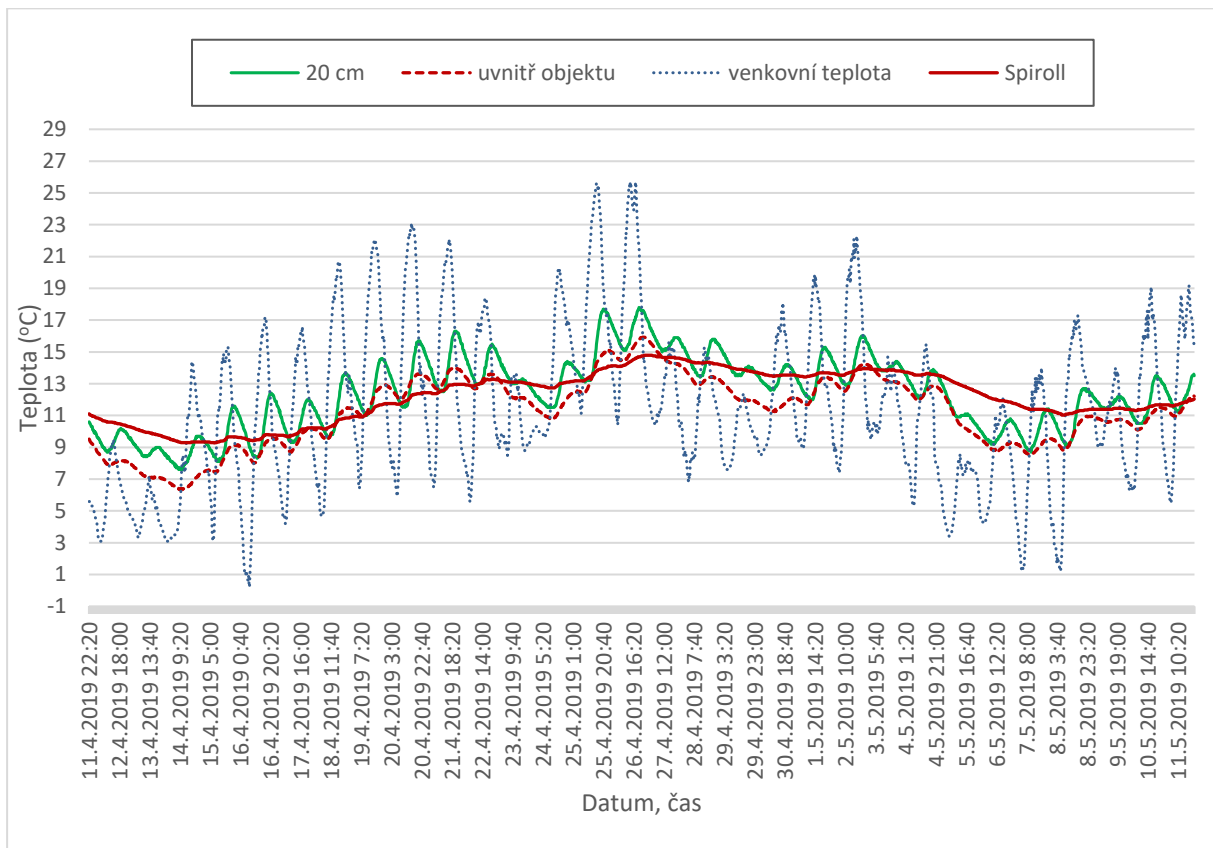


Obr. 4.57 -Průběh teplot na stropní konstrukci (Spiroll) zahradního domku v porovnání s teplotami venkovního vzduchu a průběhem teplot v substrátu vegetační střechy v hloubkách 10 a 60 cm (26.6.-28.6.2017)

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

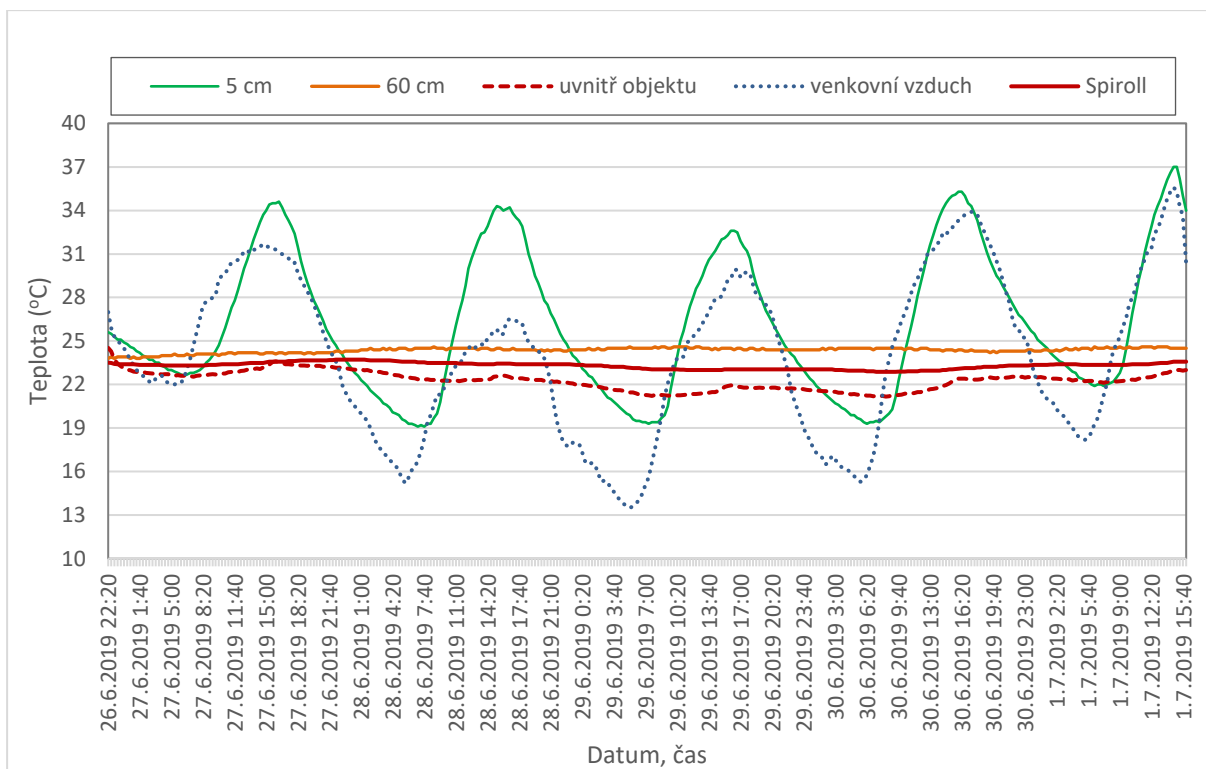
Devices, Inc.). Senzory TRIME-PICO32 byly přemístovány v substrátu vegetační střechy do různých hloubek podle měření, které právě probíhalo v rostlinách.

Na obr. 4.58 jsou průběhy teplot ve sledovaném období uvnitř objektu a na stropní konstrukci, senzor TRIME-PICO32 byl umístěn v hloubce 20 cm na místě neosázeném rostlinami.

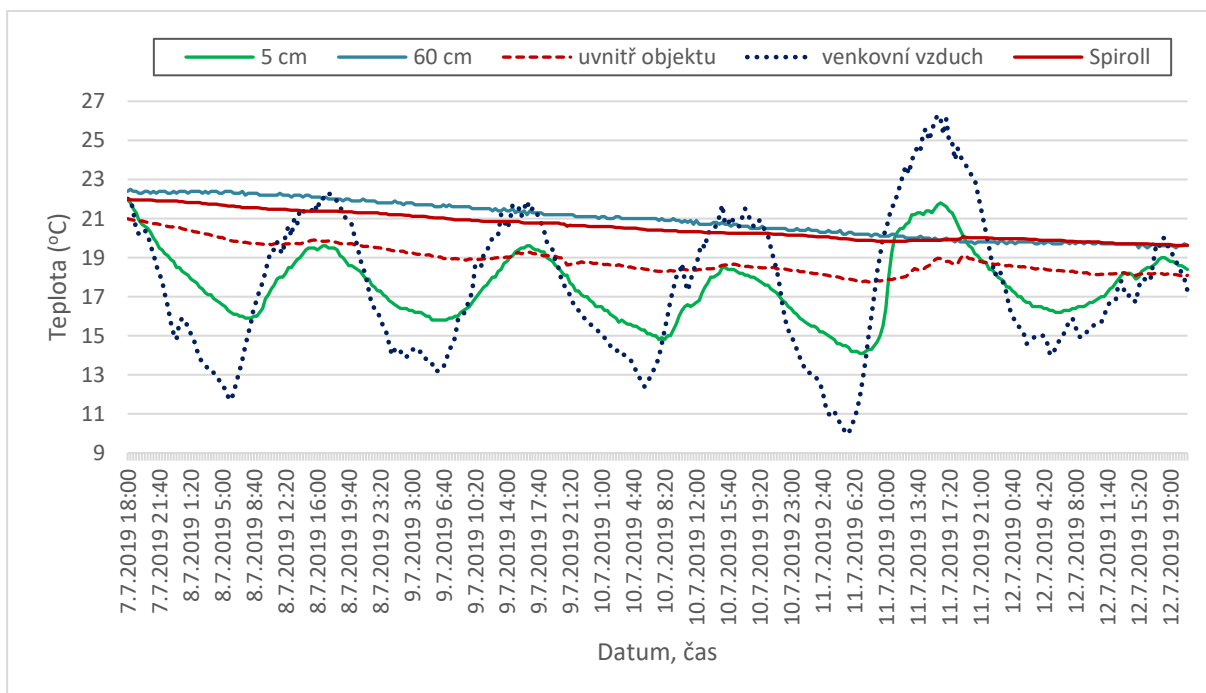


Obr. 4.58 - Průběh teplot na stropě (Spiroll) zahradního domku, uvnitř zahradního domku v porovnání s teplotami venkovního vzduchu a průběhem teplot v substrátu vegetační střechy v hloubce 20 cm (11.4.-11.5.2019)

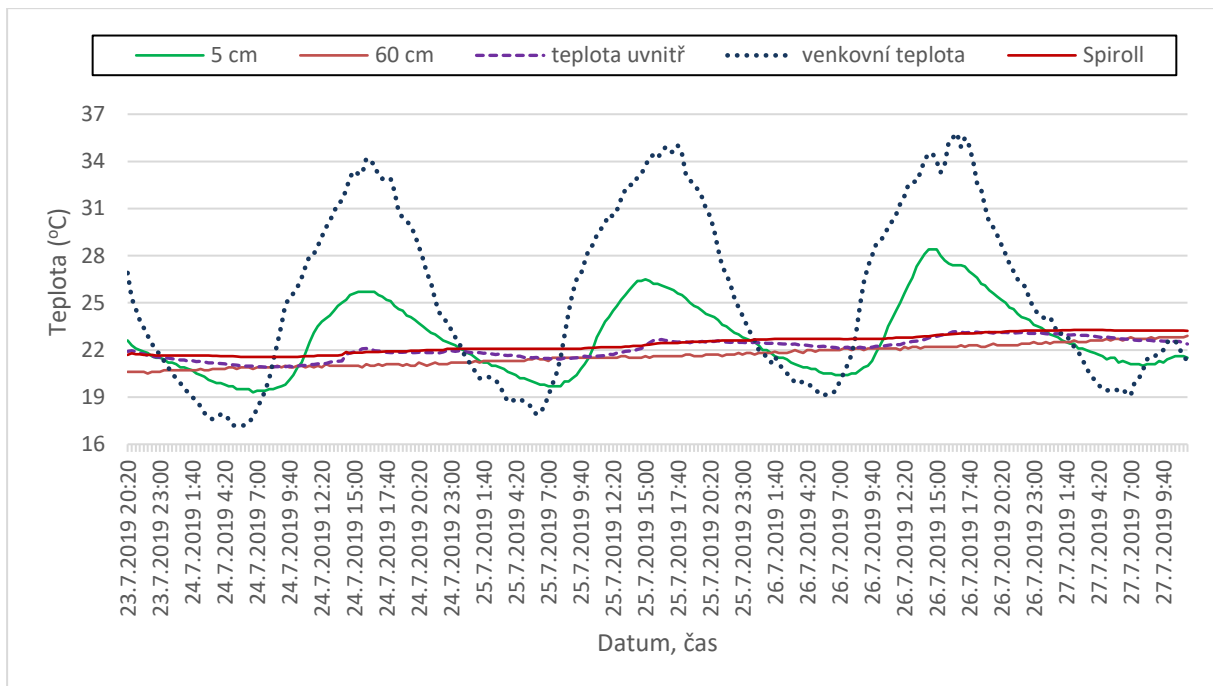
Na dalších obrázcích (obr.4.59, obr.4.60 a obr. 4.61) je průběh naměřených teplot na stropní konstrukci a uvnitř objektu v porovnání s průběhem teplot v zemině v hloubkách 5 a 60 cm a teplotami venkovního vzduchu v období od 26.6.2019 do 27.7.2019. Měření byla přerušována bouřkami.



Obr. 4.59 - Průběh teplot na stropní konstrukci (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. 4.60- Průběh teplot na stropní konstrukci (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. 4.61 - Průběh teplot na stropní konstrukci (Spiroll) zahradního domku, uvnitř zahradního domku v porovnání s teplotami venkovního vzduchu a průběhem teplot v substrátu vegetační střešky v hloubkách 5 a 60 cm (23-27.7.2019)

Výsledky měření z této části budou použity pro porovnání v programu Area 2017 a Simulace 2018 od Svoboda Software.



Obr. 4.62- Umístění sondy v hloubce 60 cm na intenzivní vegetační střeše

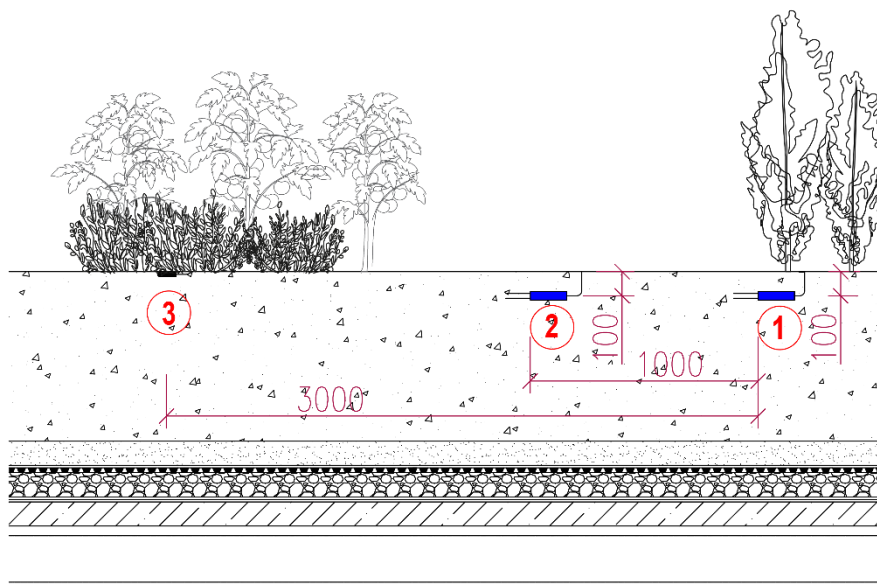
4.3 Výsledky měření – 3. část

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 mně, zda se i zemědělské plodiny (rajčata, okurky, mrkev aj.) vysázené na objektu během svého vegetačního období mohou podílet na ochlazovacím efektu, který vegetace poskytuje.

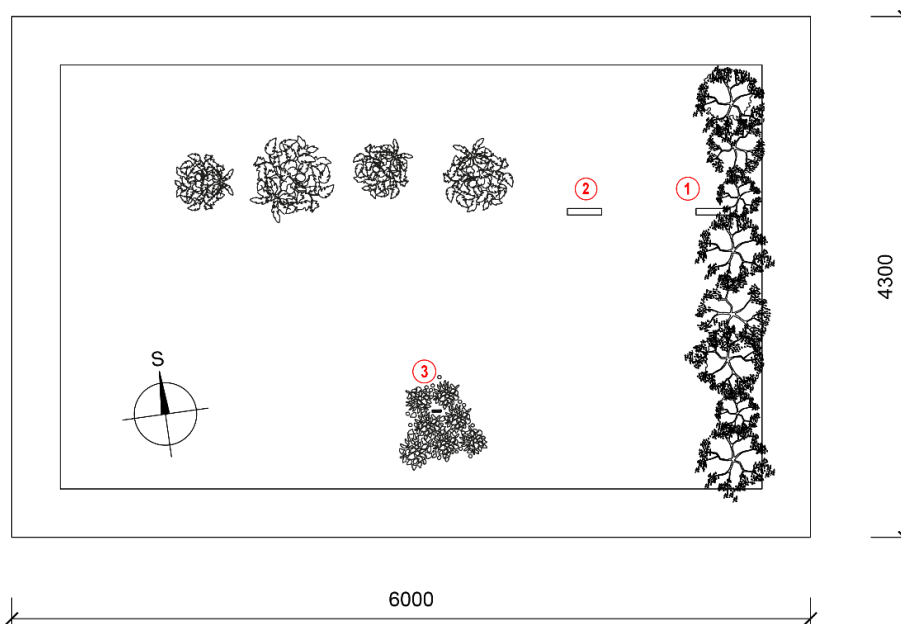
Měření byla prováděna v zemědělských plodinách, v bylinkách (tymián) a pod keři habrů. Jak víme, rostliny jsou závislé na vegetační době (období, kdy světelné, teplotní a vlhkostní podmínky umožňují jejich růst a vývoj). Vegetační doba je pro různé druhy rostlin různě dlouhá. Z tohoto důvodu se rostliny 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 intenzivní 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. Na následujících obrázcích jsou vzdálenosti kótovány v mm.



Obr. 4.63 - Umístění senzorů v substrátu střešní zahrady v hloubce 10 cm (1 - pod habry, 2 – mimo habry, 3- teplotní čidlo v bylinkách)



Obr. 4.64 - Půdorysné umístění senzorů na vegetační střeše v hloubce 10 cm (1 - pod habry, 2 – mimo habry, 3- teplotní čidlo v bylinkách)

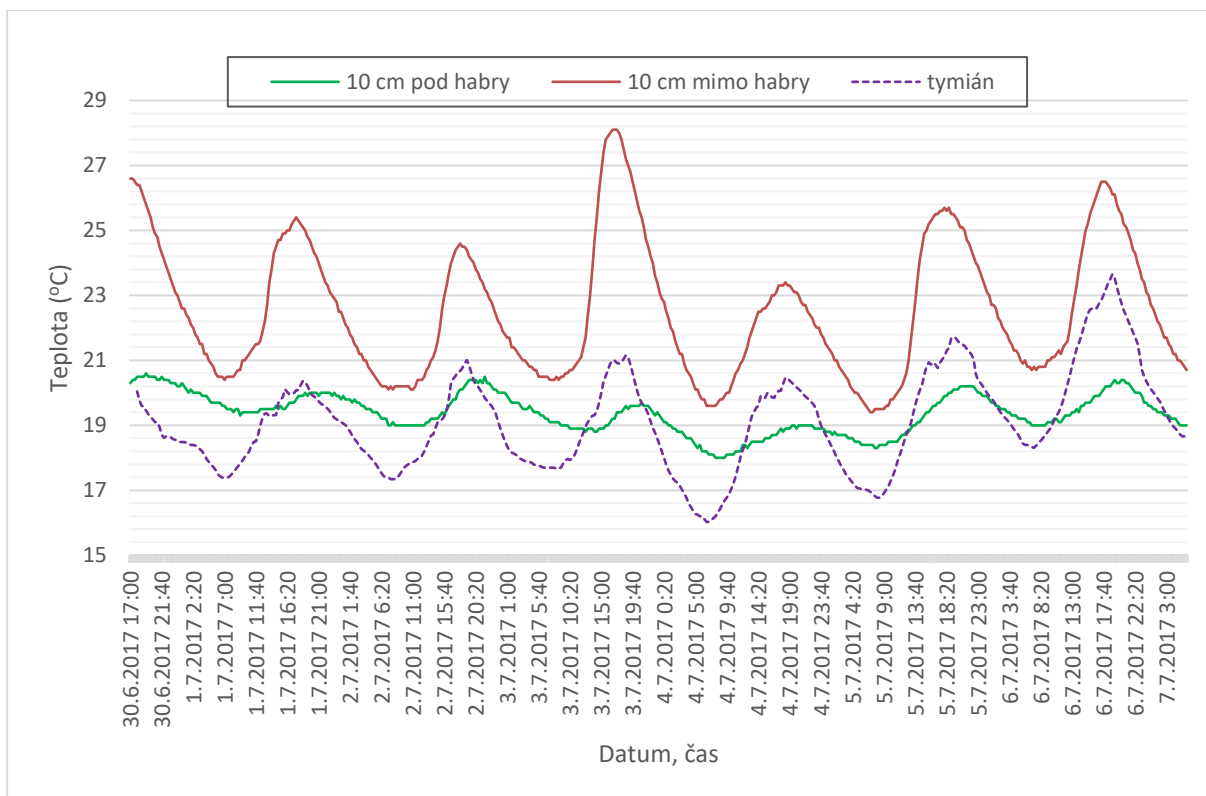


Obr. 4.65 – Vegetace na intenzivní vegetační střeše, foto pořízeno 1.8.2017

Na *obr.4.66* 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 grafech *obr. 4.66* a *obr. 4.68* můžeme sledovat pokles teploty a nárůst objemové vlhkosti způsobený zálivkou keřů habrů (3.7.2017). Nárůst objemové vlhkosti způsobil pokles hodnot salinity (*obr. 4.69*).

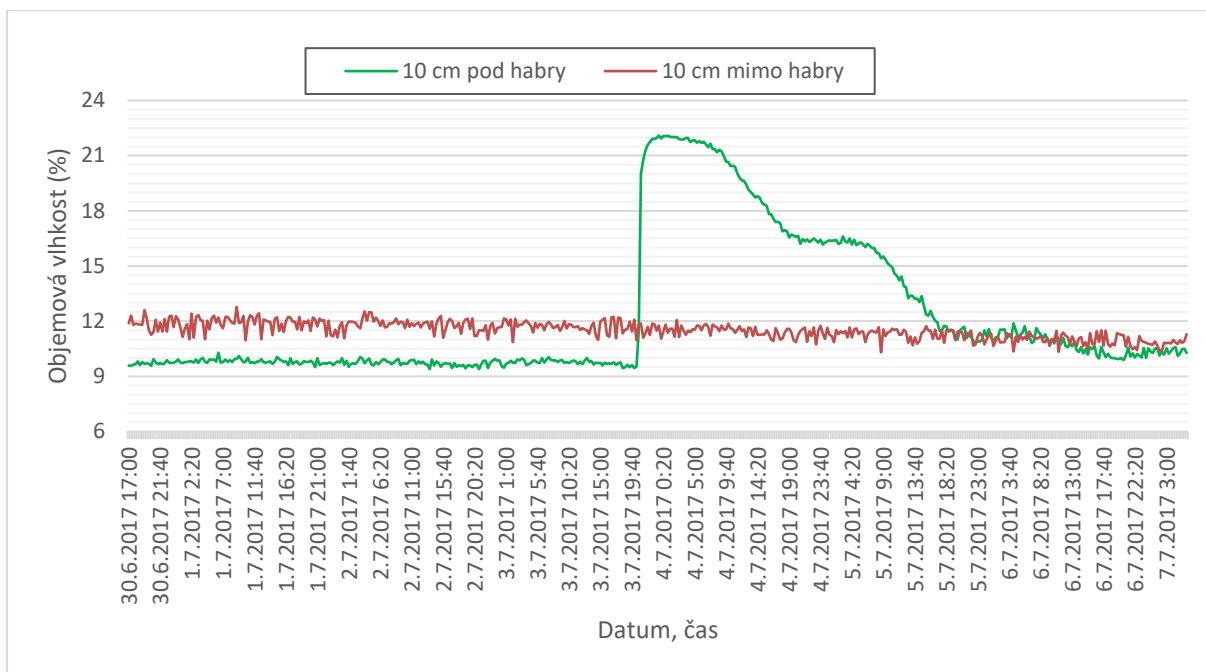
Na *obr. 4.65* a *obr.4.67* jsou vysázené rostliny na objektu zahradního domku v době, kdy probíhalo měření.



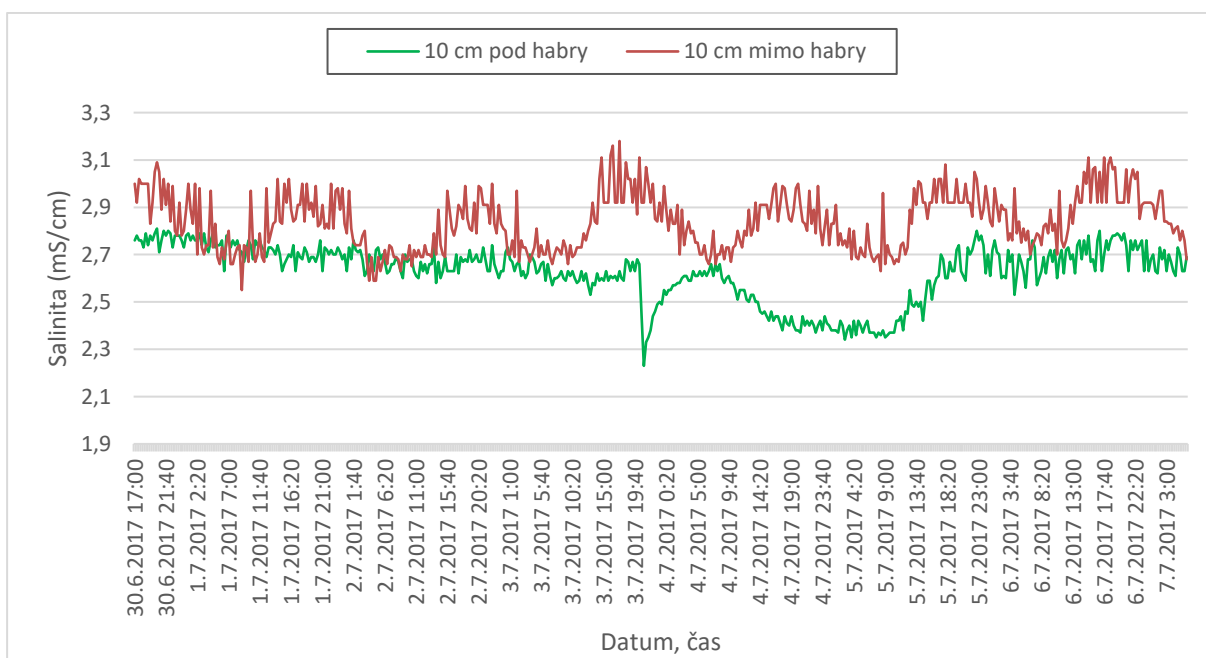
Obr. 4.66 - Průběh teplot v substrátu v hloubce 10 cm pod habry a mimo habry ve srovnání s teplotou v porostu bylinek (tymián) těsně pod povrchem (30.6.-7.7.2017)



Obr. 4.67- Umístění bylinek (tymián) na okraji střechy (2018)



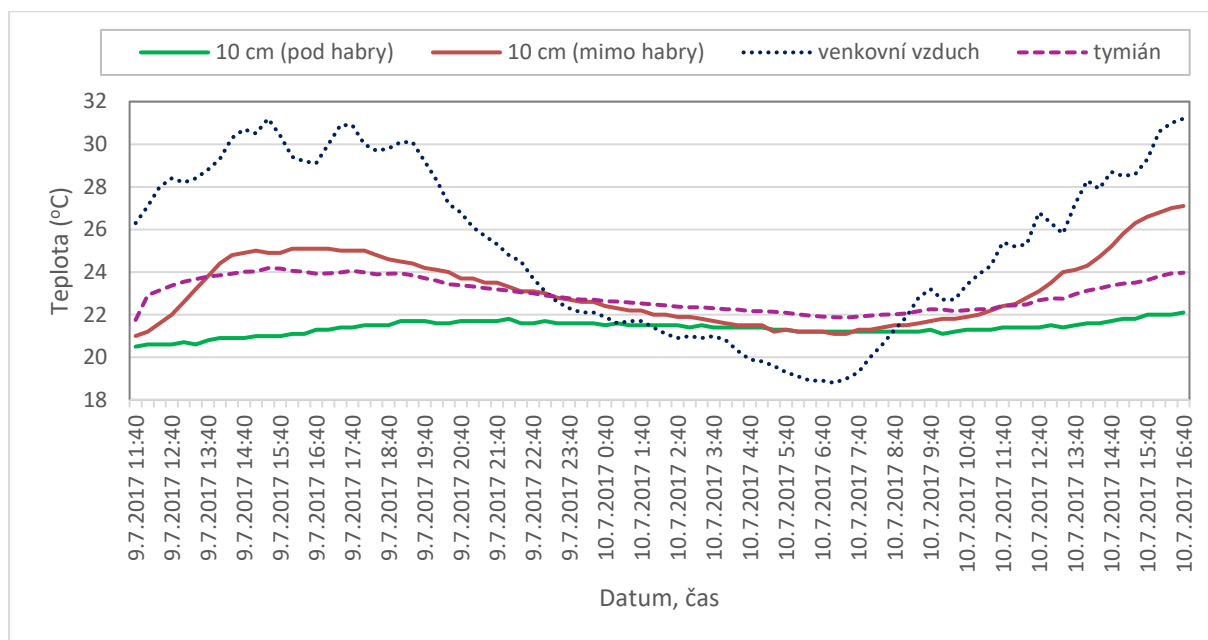
Obr. 4.68 - Objemová vlhkost (%) naměřená pod keří habrů a mimo keře habrů v hloubce 10 cm (30.6.-7.7.2017)



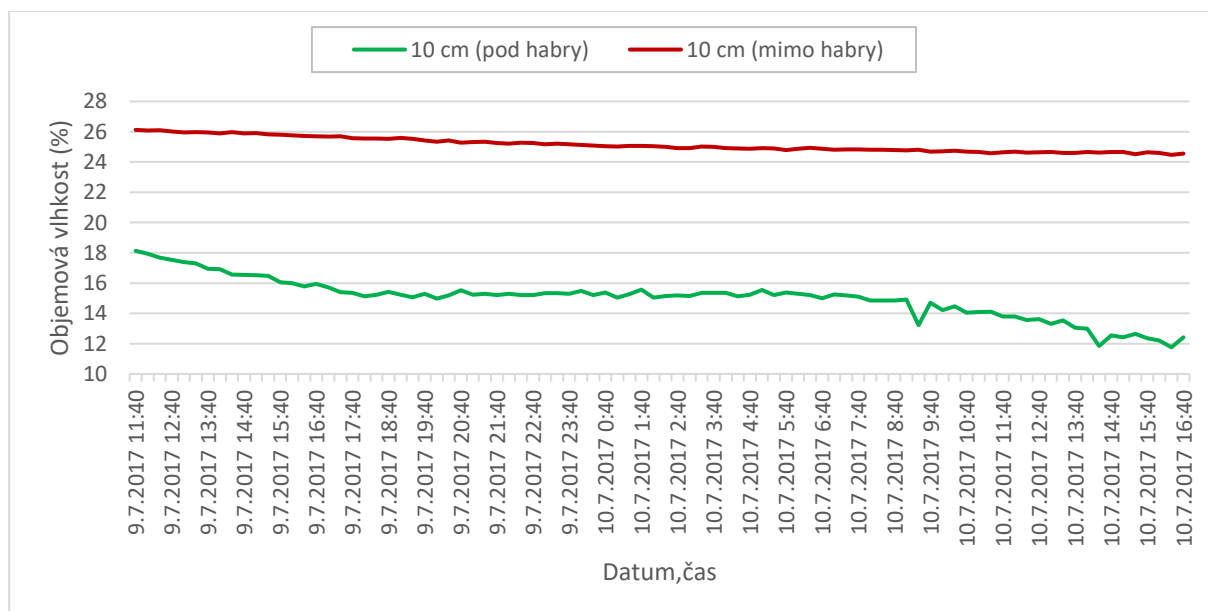
Obr. 4.69 - Naměřené hodnoty salinity pod keří habrů a mimo keře v hloubce 10 cm (30.6.-7.7.2017)

Na dalších grafech je průběh teplot (obr.4.70) a hodnoty objemové vlhkosti (obr. 4.71) v substrátu těsně před bouřkou. Na obr. 4.71 můžeme pozorovat naměřené hodnoty objemové

vlhkosti pod habry. Tyto hodnoty byly výrazně nižší než mimo habry, pravděpodobně v důsledku odčerpávání vody kořeny habrů.



Obr. 4.70 - Průběh teplot v substrátu v hloubce 10 cm pod habry a mimo habry ve srovnání s teplotou v porostu bylinek (tymián) těsně pod povrchem (9.7-10.7.2017)



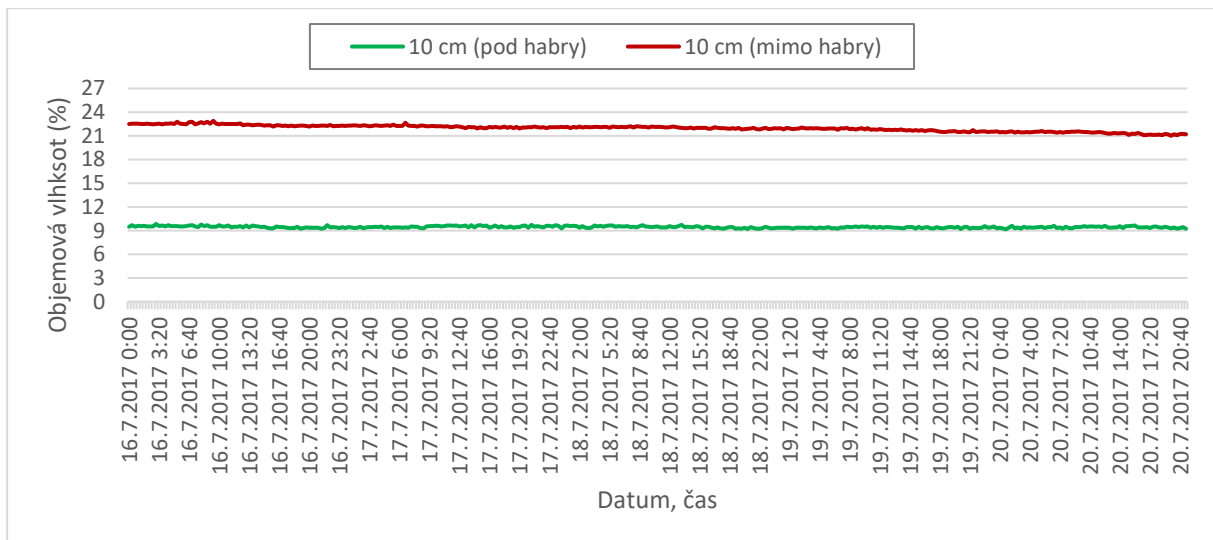
Obr. 4.71 - Hodnoty objemové vlhkosti pod keři habrů a mimo habry v hloubce 10 cm (9.7-10.7.2017)

Měření bylo přerušováno bouřkami a pokračovalo od 16.7 do 20.7.2017 (obr.4.72, obr.4.73). Teplotní čidlo (3) bylo přemístěno do hustšího porostu bylinek, nicméně i tak byl porost již

značně prořídlý. Pod habry v hloubce 10 cm byly opět naměřeny nižší hodnoty objemové vlhkosti než mimo habry (*obr.4.73*).

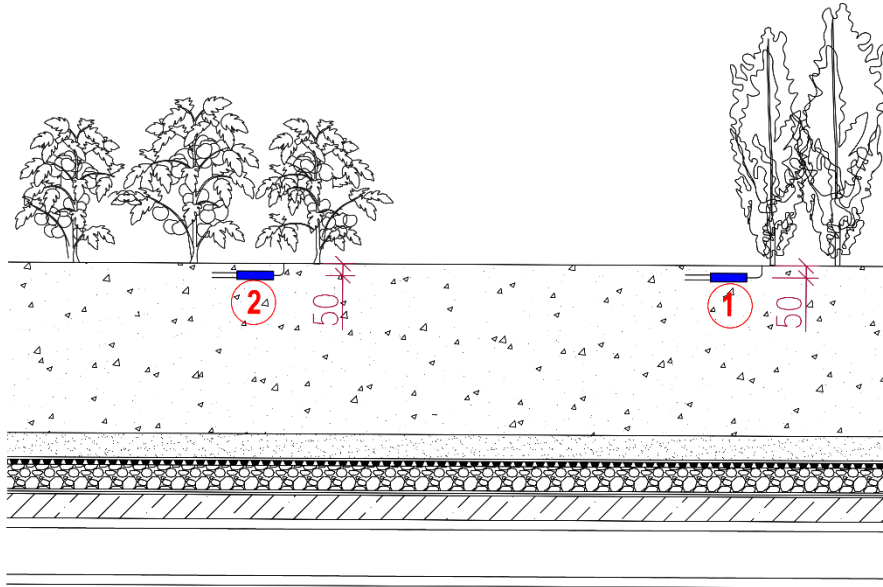


Obr. 4.72- Průběh teplot v substrátu v hloubce 10 cm pod habry a mimo habry ve srovnání s teplotou v porostu bylinek (tymián) těsně pod povrchem (16.7-20.7.2017)

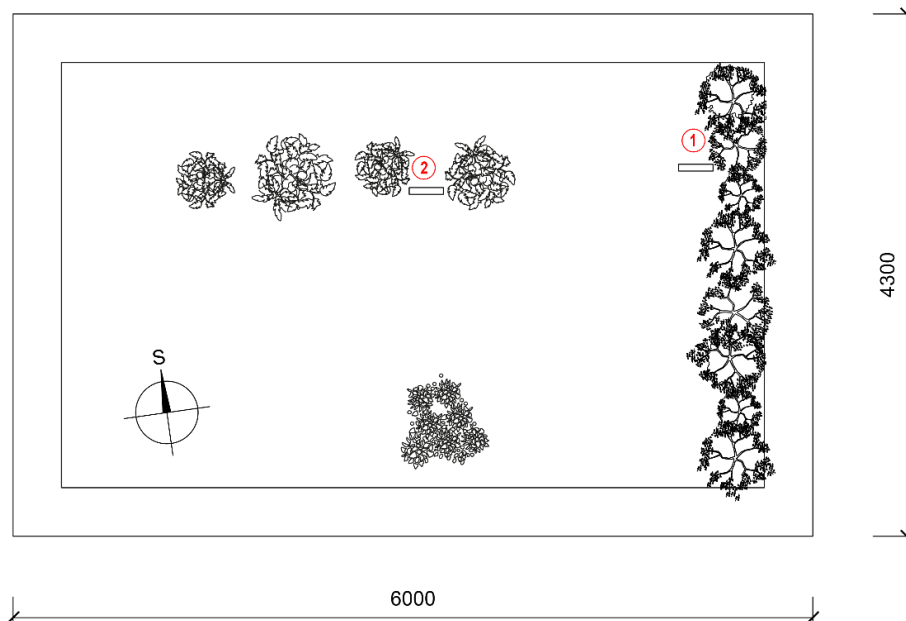


Obr. 4.73 - Hodnoty objemové vlhkosti pod keři habrů a mimo habry v hloubce 10 cm (16.7.-20.7.2017)

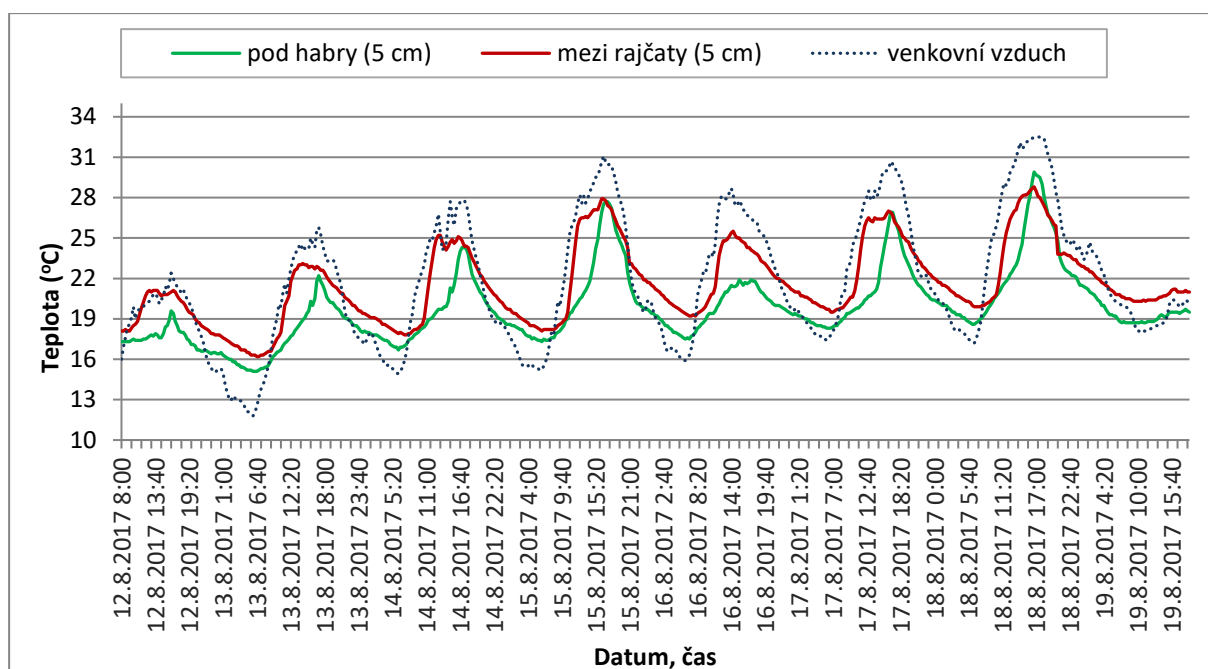
Další měření probíhalo se senzory umístěnými mezi rajčaty a pod keři habrů. Senzor č.1 byl umístěn pod habry směrem do prostoru zahrady a senzor č.2 mezi keře rajčat, která byla od sebe vzdálena přibližně 50 cm. Oba senzory byly umístěny v hloubce 5 cm.



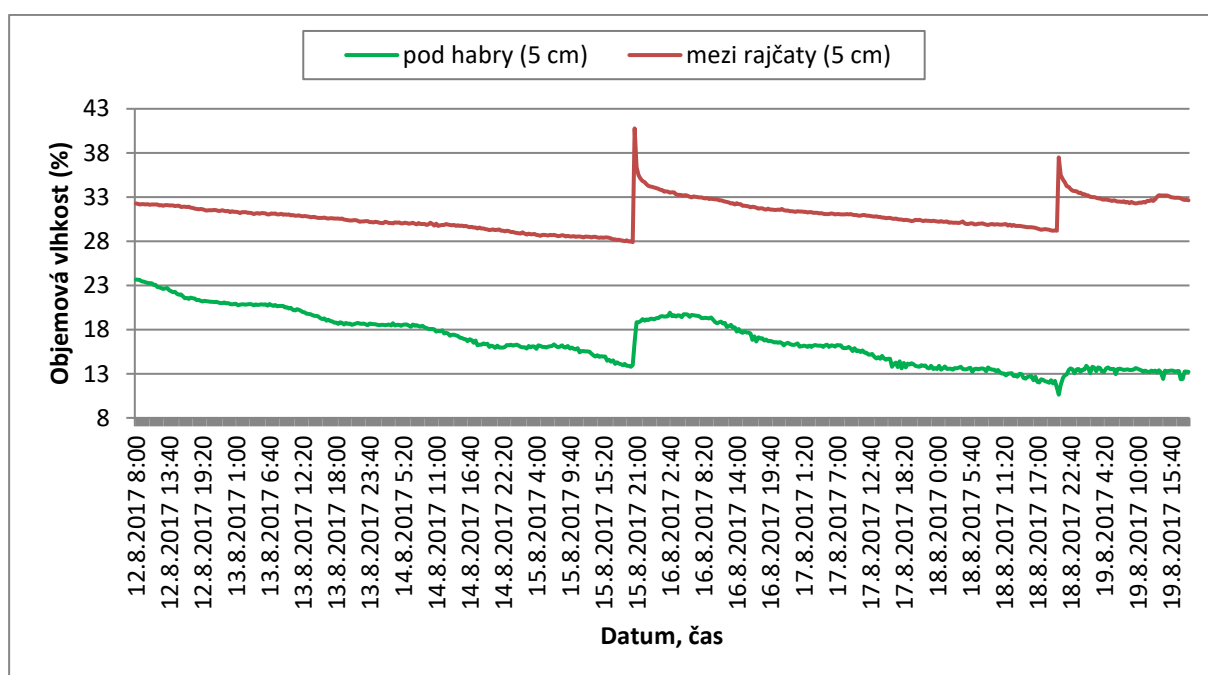
Obr. 4.74 – Umístění senzorů v substrátu střešní zahrady v hloubce 5 cm (1 - pod habry, 2 – mezi rajčaty)



Obr. 4.75 - Půdorysné umístění senzorů v hloubce 5 cm (1 - pod habry, 2 – mezi rajčaty)



Obr. 4.76 - 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)

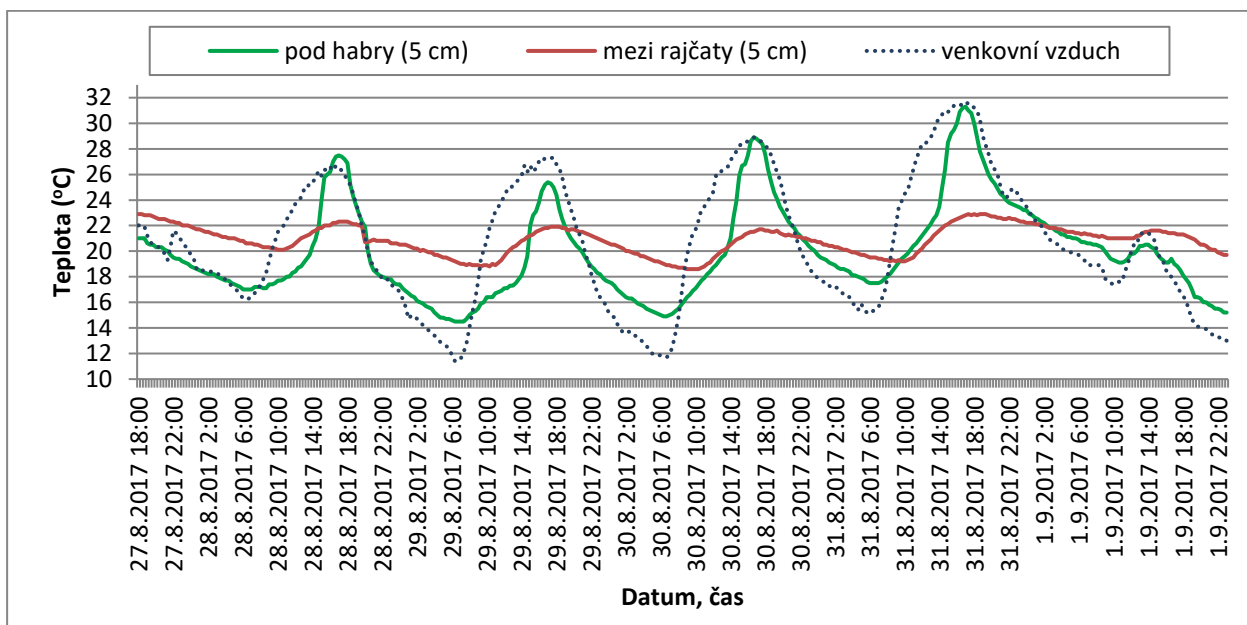


Obr. 4.77 - Hodnoty objemové vlhkosti v substrátu vegetační střechy v hloubce 5 cm pod habry a mezi rajčaty (12.8.-19.8.2017)

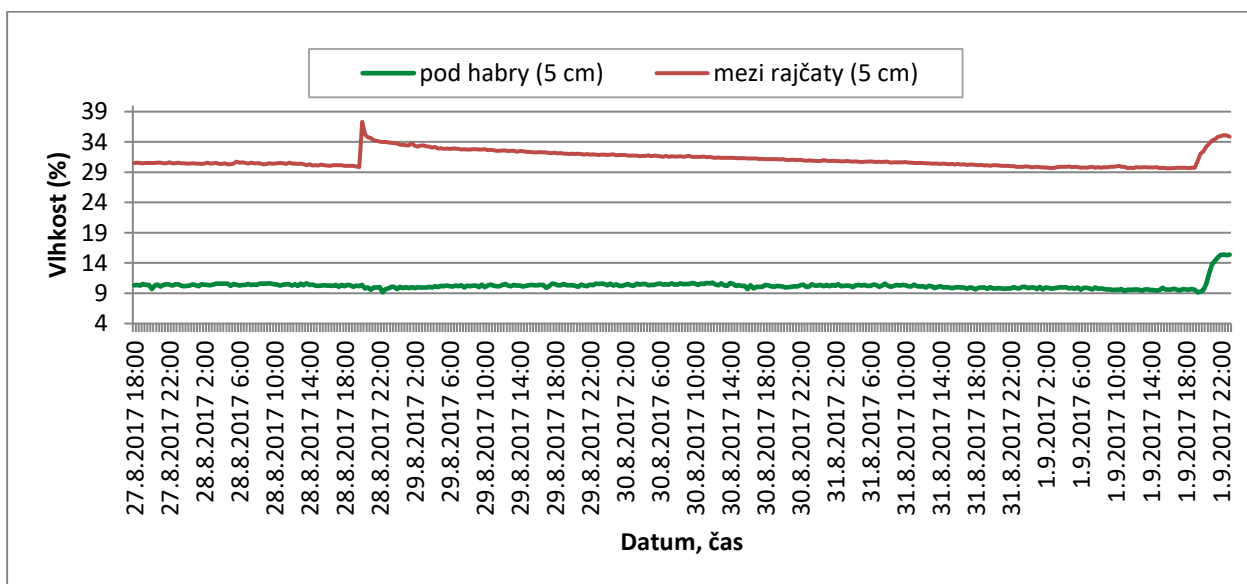
Průběh teplot v hloubce 5 cm mezi rajčaty a pod habry se výrazně neliší. Pod habry se nárůst vyšších teplot projevil později a trval kratší dobu. Vyšší teploty nepatrně snížila zálivka rostlin

– viz graf (obr.4.76). 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.

Na obr.4.78 a obr.4.79 jsou výsledky měření, kdy končilo vegetační období rajčat a listy rajčat začínaly usychat. Nad senzor mezi rajčata byla umístěna část zetlelých a suchých rostlin, což se projevilo snížením teplot v substrátu mezi rajčaty.



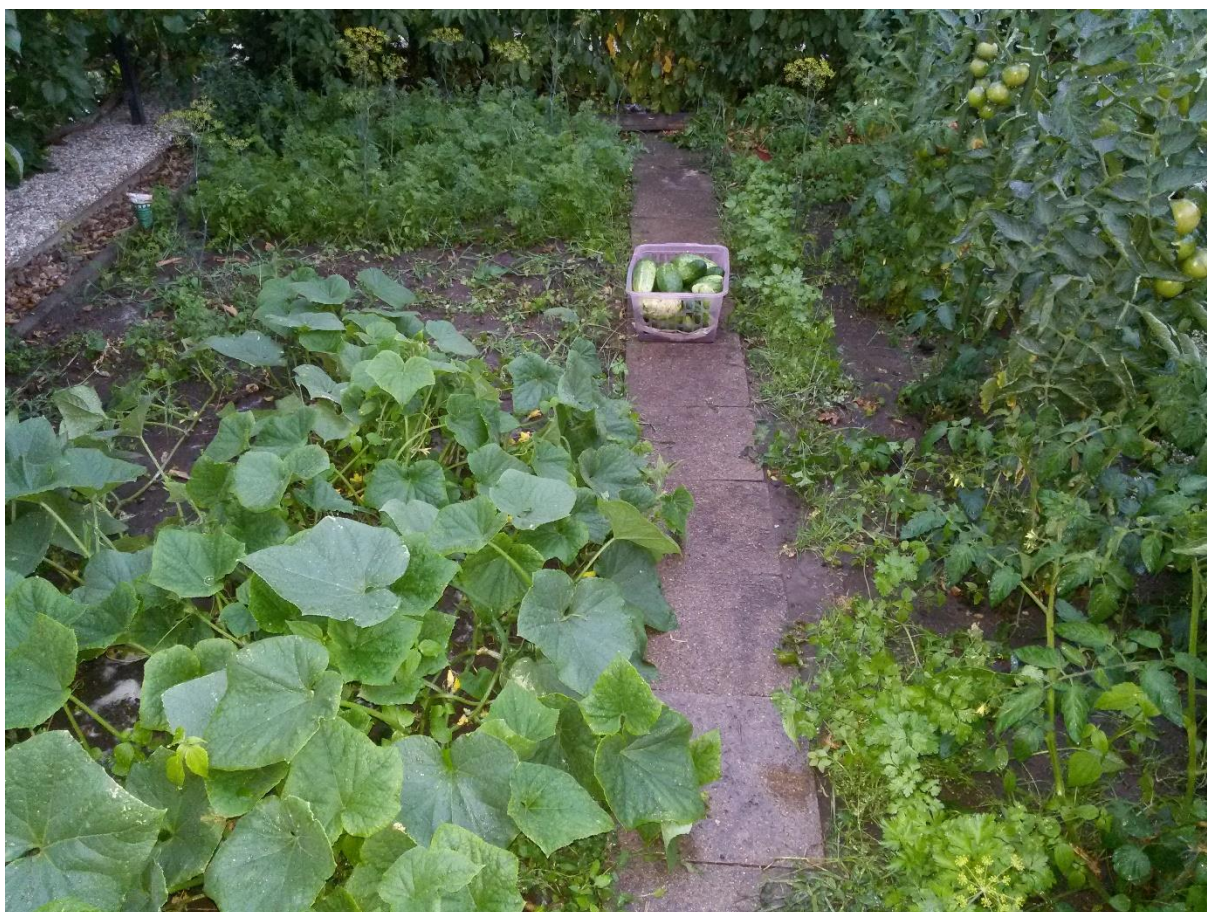
Obr. 4.78 – Průběh teplot pod habry a mezi rajčaty v hloubce 5 cm, mezi rajčata je umístěna část zetlelých a suchých rostlin (27.8.-1.9.2017)



Obr. 4.79 – Hodnoty objemové vlhkosti pod habry a mezi rajčaty v hloubce 5 cm, mezi rajčata je umístěna část zetlelých a suchých rostlin (27.8.-1.9.2017).

Výsledky měření – r. 2018

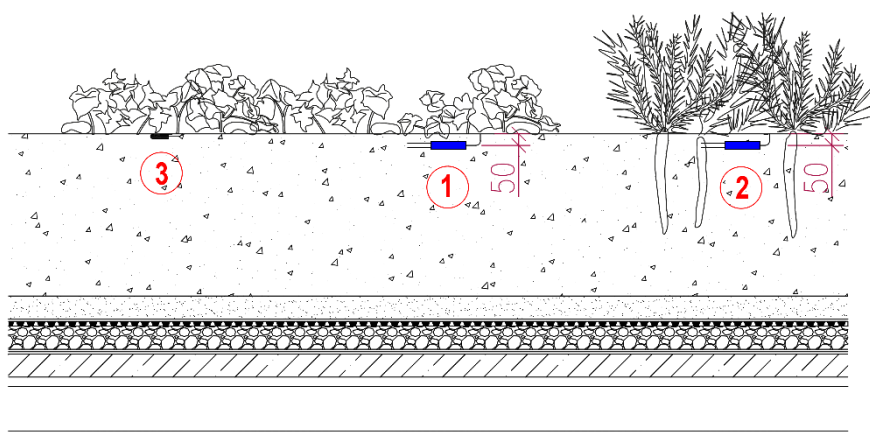
Měření pokračovalo v srpnu r. 2018. Senzor č.1 (39855) byl umístěn v porostu okurek do hloubky 5 cm, senzor č. 2 (39856) do porostu mrkve do stejné hloubky. Teplotní čidlo (3) bylo umístěno pod listy okurek těsně pod povrch.



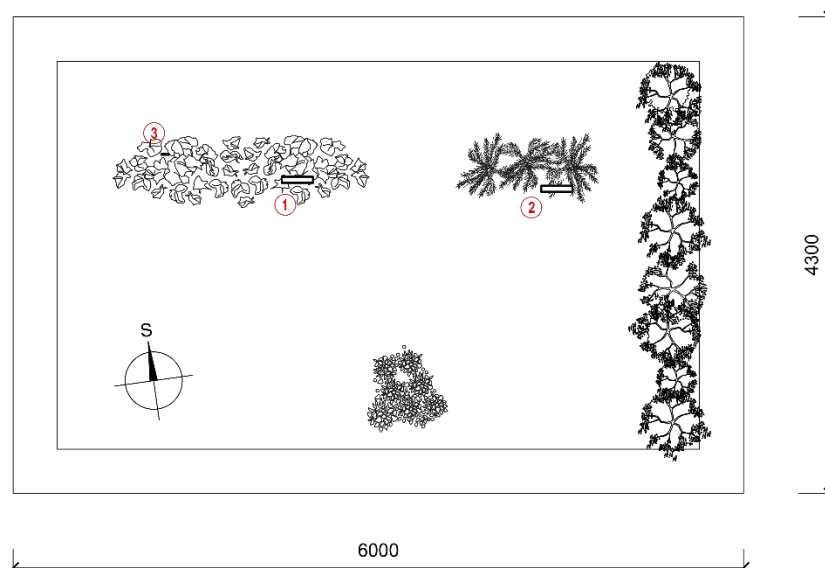
Obr. 4.80 - Střešní zahrada – okurky, mrkev, foto pořízeno 13.7.2018



Obr. 4.81- Umisťování senzoru do porostu okurek do hloubky 5 cm



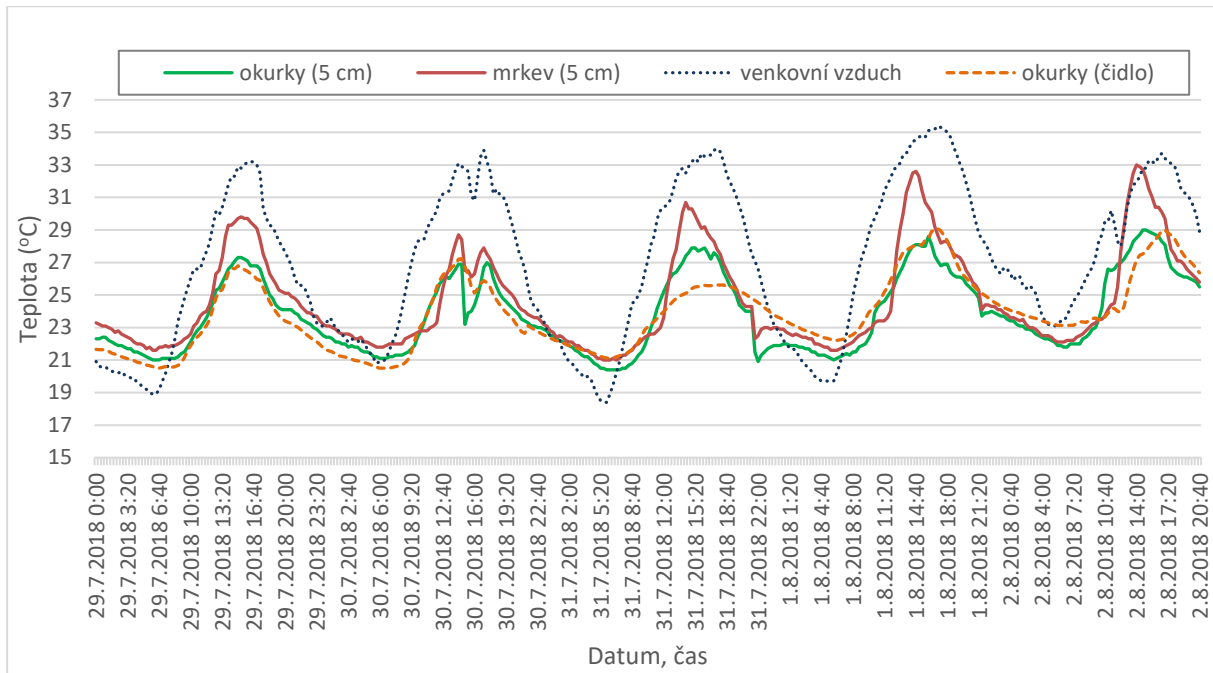
Obr. 4.82 - Rozmístění senzorů v hloubce 5 cm a teplotního čidla těsně pod povrchem (senzor 1- okurky, senzor 2 – mrkev, teplotní čidlo 3-okurky)



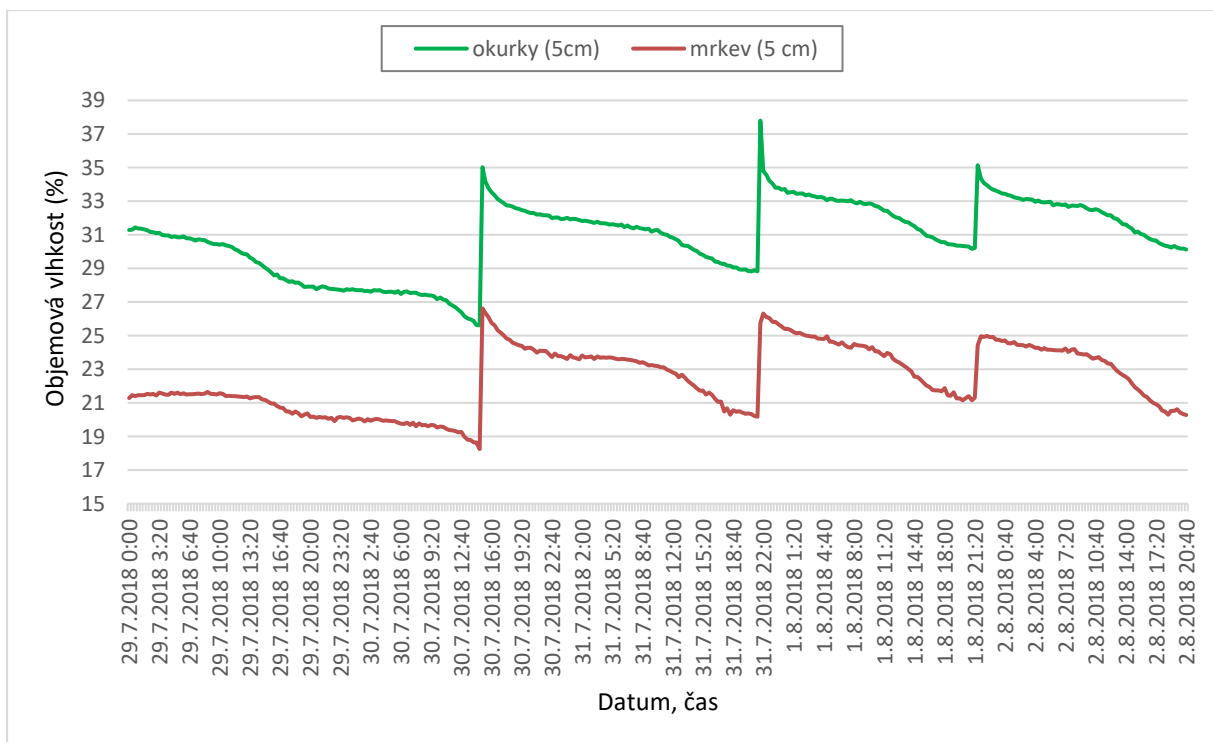
Obr. 4.83 - Půdorysné rozmístění senzorů v hloubce 5 cm a teplotního čidla (senzor 1- okurky, senzor 2 – mrkev, teplotní čidlo 3-okurky)

Na obr. 4.84 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.4.85) jsou zobrazeny nárůsty objemové vlhkosti (%) v hloubce 5 cm při pravidelném zalévání zemědělských plodin. Ačkoli plodiny byly zalévány přibližně stejně, vyšší vlhkost

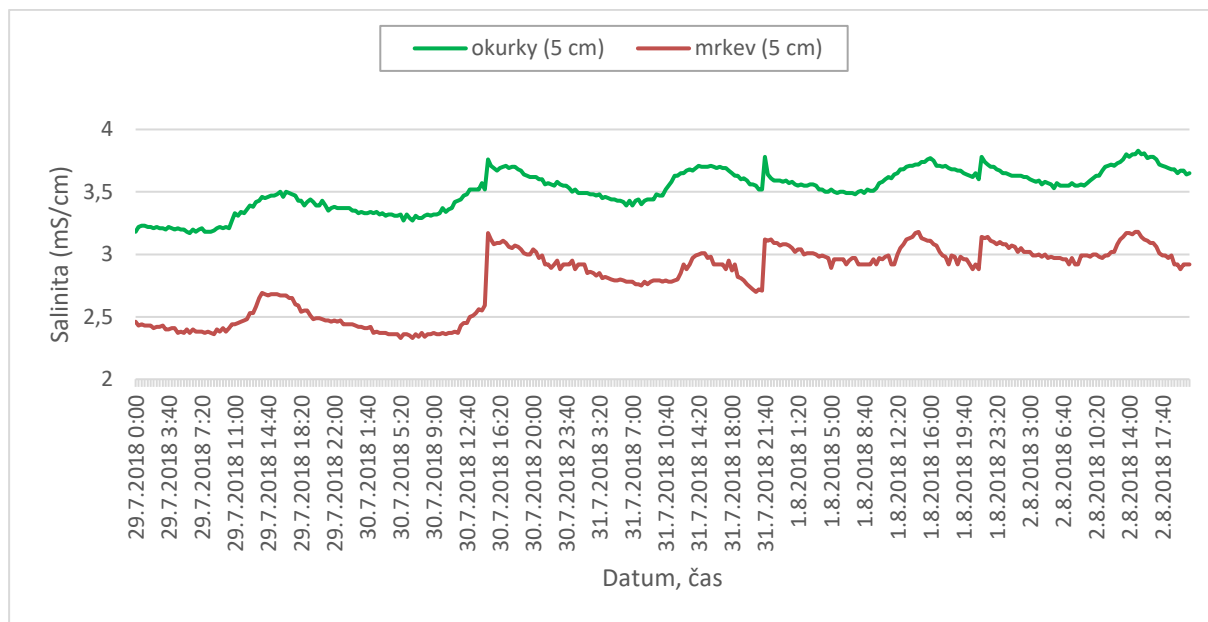
byla zaznamenána pod porostem okurek. Na *obr. 4.86* jsou naměřené hodnoty salinity ve sledovaném období.



Obr. 4.84 - 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. 4.85 - Hodnoty objemové vlhkosti v porostu okurek a mrkve v hloubce 5 cm

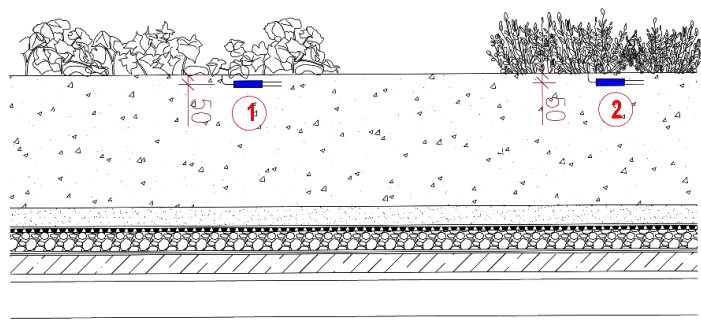


Obr. 4.86 – Hodnoty salinity v porostu okurek a mrkve v hloubce 5 cm

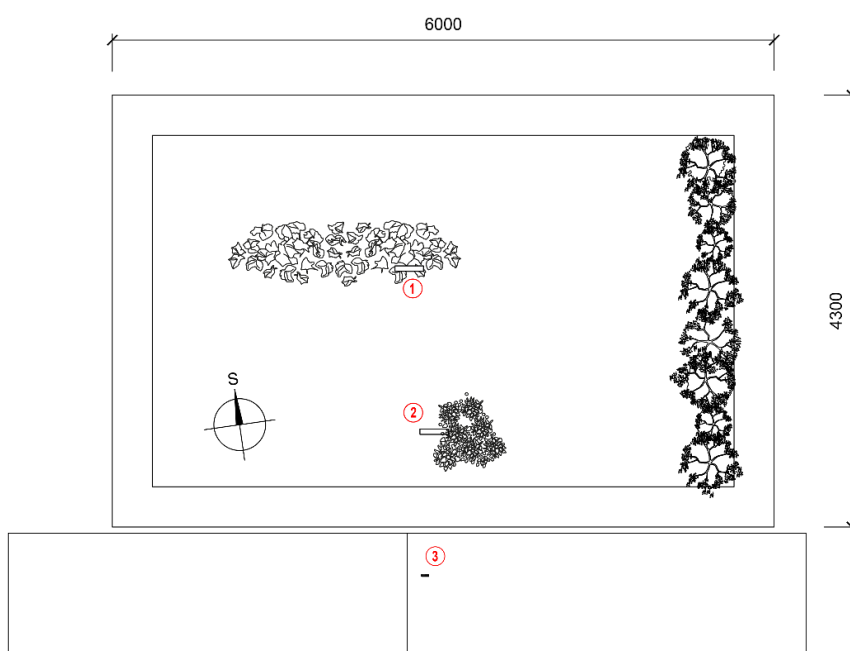


Obr. 4.87 – Střešní zahrada (30.7.2018)

Další měření pokračovalo v porostu okurek a v porostu tymiánu. Senzor (1) byl ponechán v porostu okurek, v hloubce 5 cm. Senzor (2) byl přemístěn z porostu mrkve do porostu tymiánu do stejné hloubky (5 cm). Pro porovnání s teplotou na střešní konstrukci bez vegetace bylo teplotní čidlo střídavě přemísťováno z plechové krytiny (červená barva) do porostu tymiánu a posléze na živičnou krytinu (červená barva) sousedního objektu.



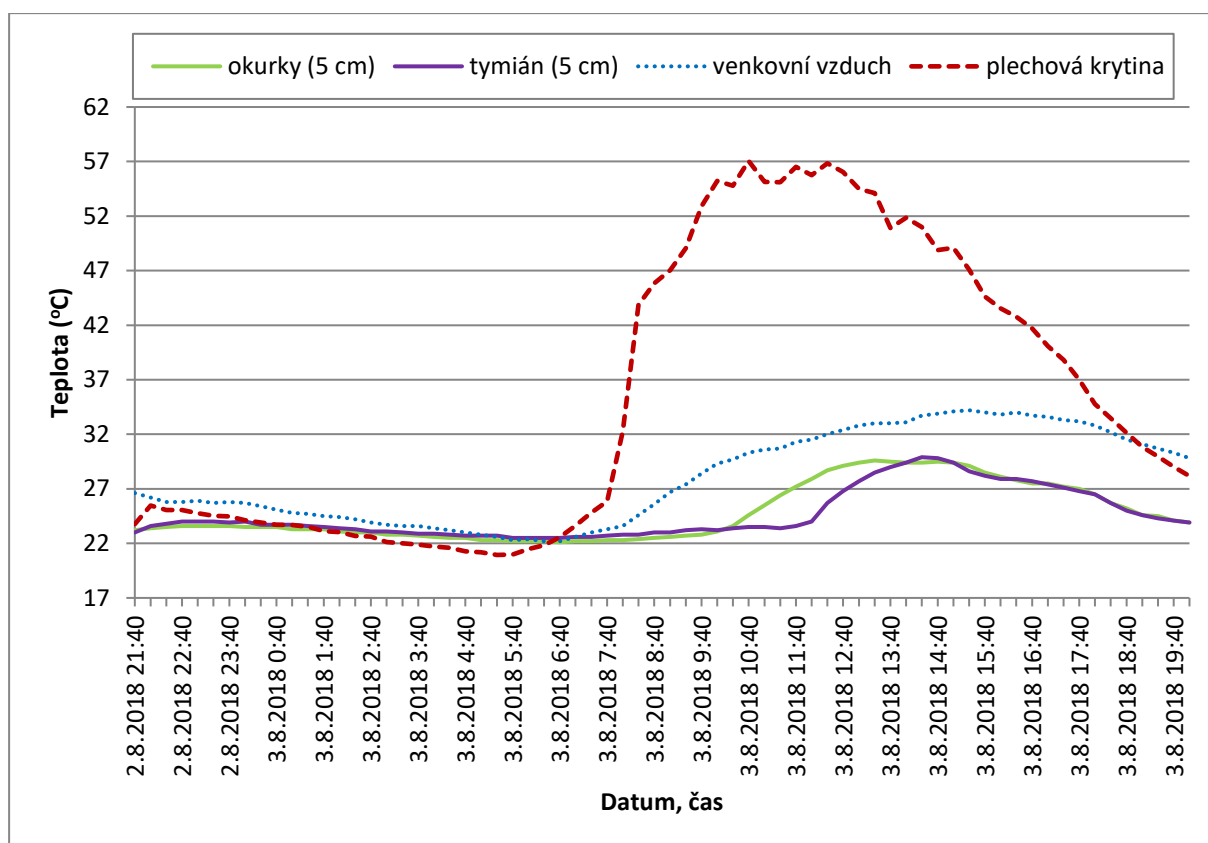
Obr. 4.88 - Umístění senzorů v substrátu vegetační střechy v hloubce 5 cm (1 - okurky, 2 – tymián)



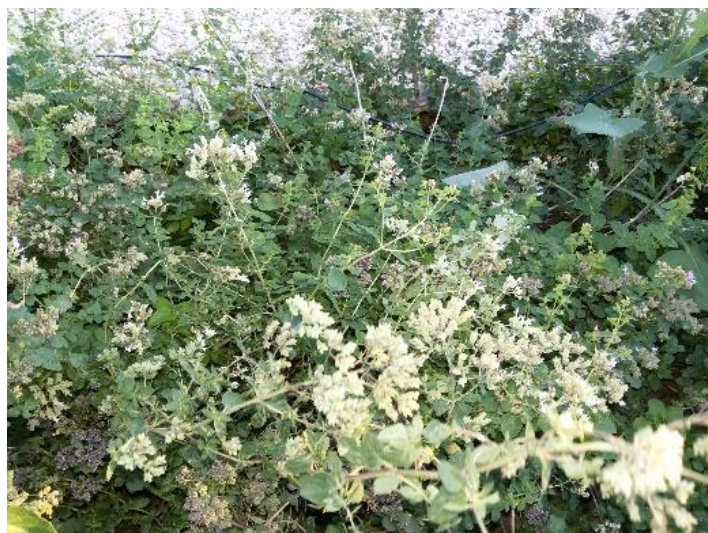
Obr. 4.89 - Půdorysné rozmístění senzorů v substrátu vegetační střechy v hloubce 5 cm a na plechové krytině (1 – okurky, 2 – tymián , 3- plechová krytina)



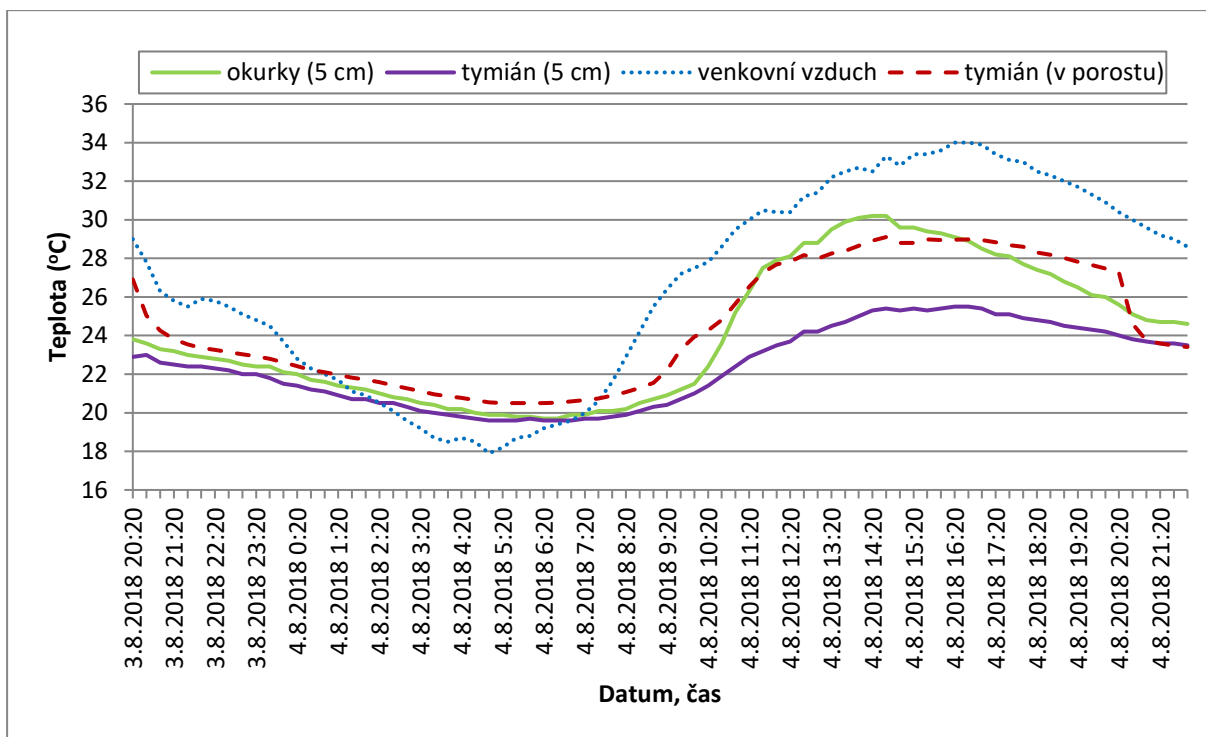
Obr. 4.90 - Umístění teplotního čidla na plechové krytině sousedního objektu



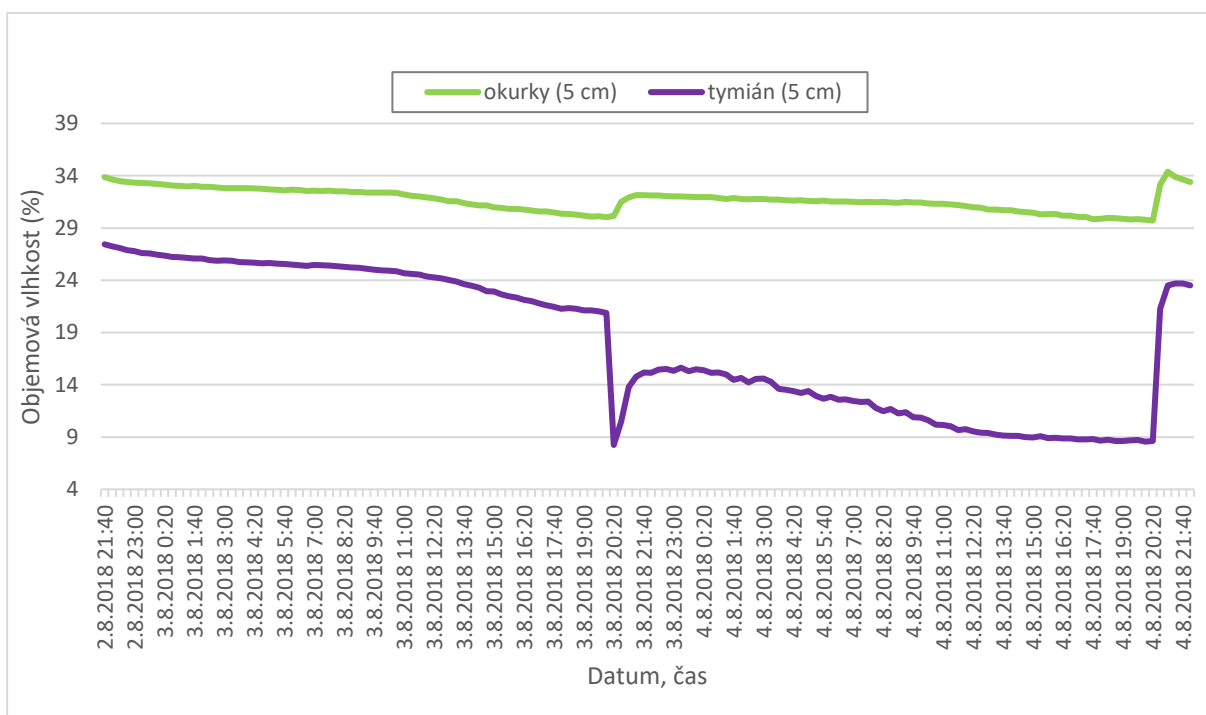
Obr. 4.91 - Průběh teplot v substrátu v hloubce 5 cm (1 -okurky, 2 -tymián), ve srovnání s teplotou venkovního vzduchu a naměřenou teplotou na plechové krytině



Obr. 4.92 – Umístění teplotního čidla (3) v porostu bylinek



Obr. 4.93 - Průběh teplot v substrátu v hloubce 5 cm (1- okurky, 2 – tymián), ve srovnání s teplotou venkovního vzduchu a naměřenou teplotou v porostu tymiánu (3 -teplotní čidlo)

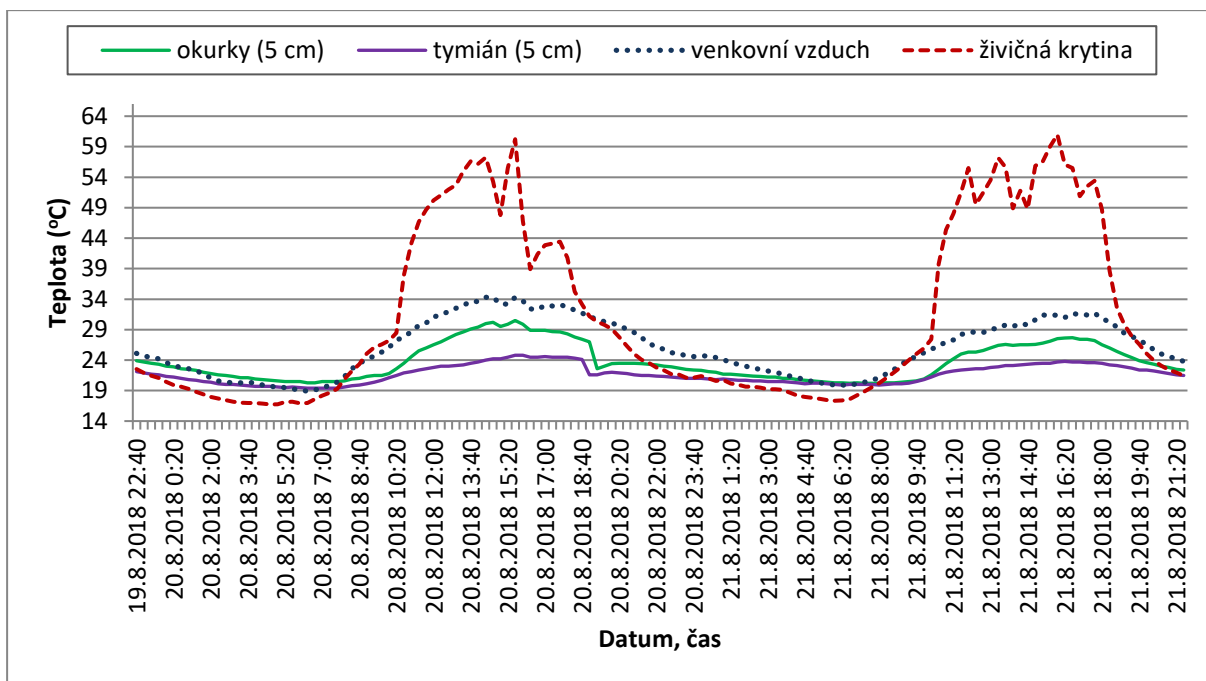


Obr. 4.94 - Hodnoty objemové vlhkosti naměřené v hlouce 5 cm pod okurkami a tymiánem (2.8.2018-4.8.2018)

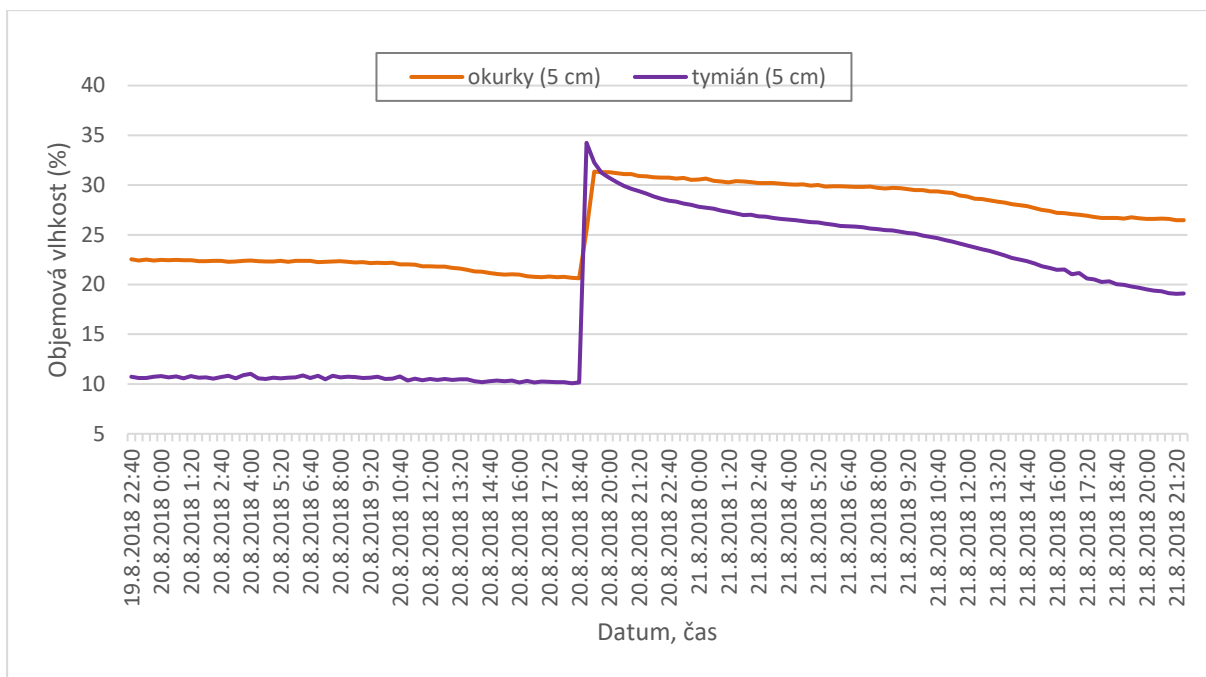
Měření pokračovalo v hloubce 5 cm pod porosty okurek a tymiánu. Porost okurek na konci vegetačního období již byl značně prořídlý. Teplotní čidlo (3) bylo umístěno na živičnou krytinu vedlejšího objektu, sloužícího jako sklad zahradního nářadí a následně opět přemístěno na plechovou krytinu sousedního zahradního domku. Naměřené údaje jsou doplněny o větrné podmínky (rychlost a nárazy větru) a hodnoty globálního záření.



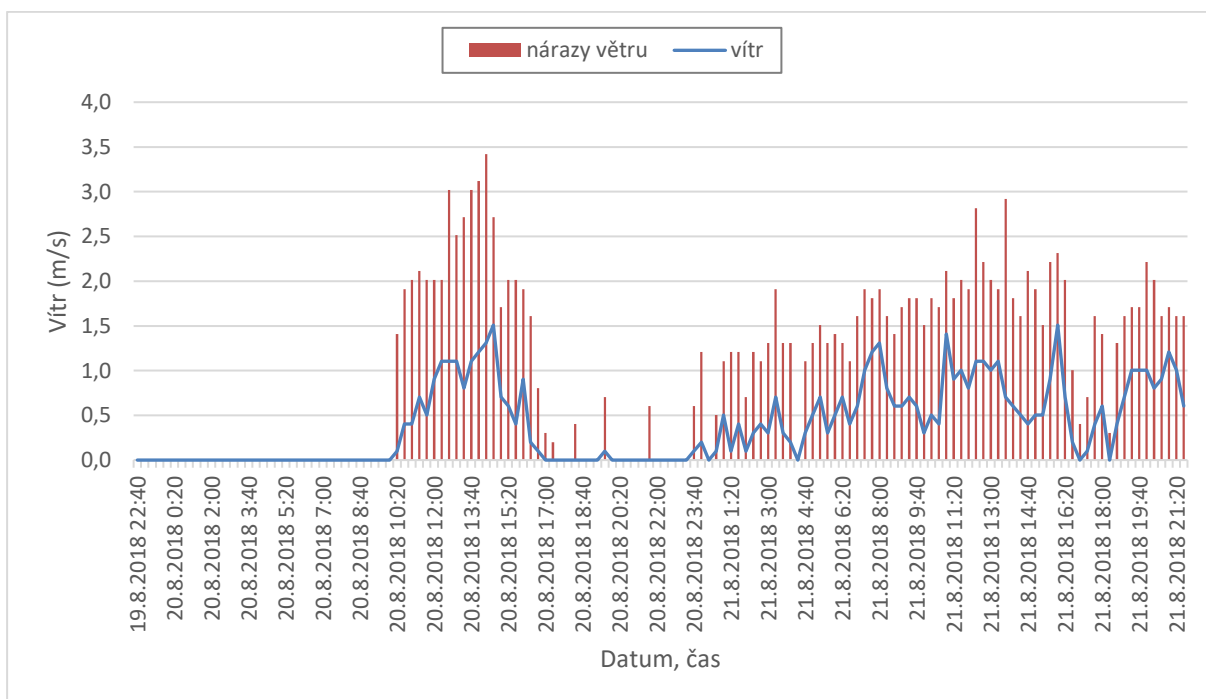
Obr. 4.95 - Plechová a živičná krytina na sousedních objektech (červená barva)



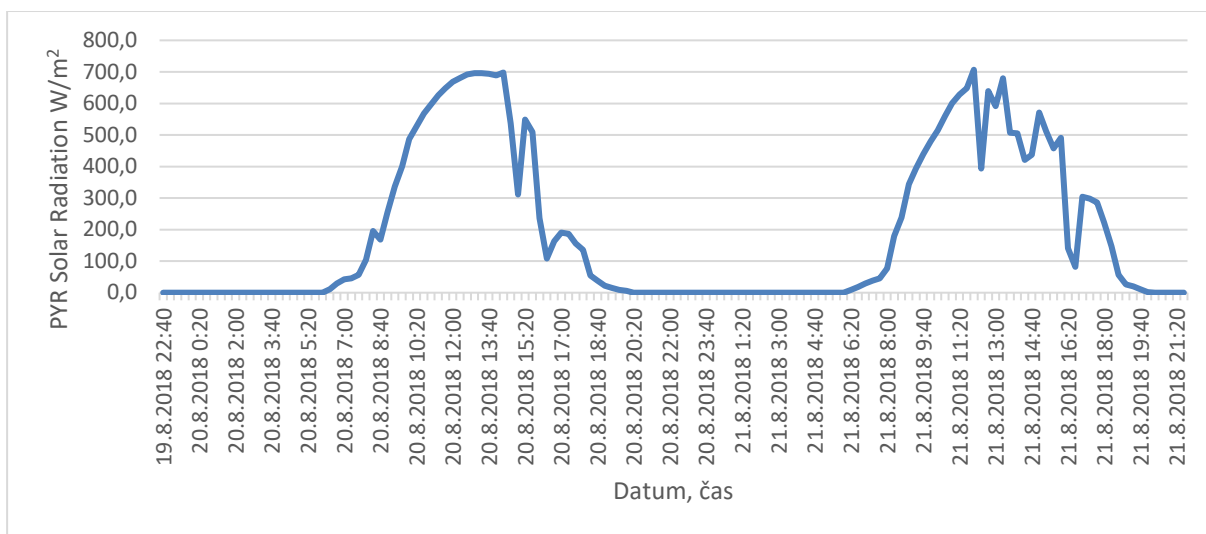
Obr. 4.96 - Průběh teplot v substrátu v hloubce 5 cm (1-okurky, 2- tymián), ve srovnání s teplotou venovního vzduchu a teplotou na živičné krytině (19.8.-21.8.2018)



Obr. 4.97 - Hodnoty objemové vlhkosti v substrátu v hloubce 5 cm (1-okurky, 2-tymián) (19.8.2018-21.8.2018)

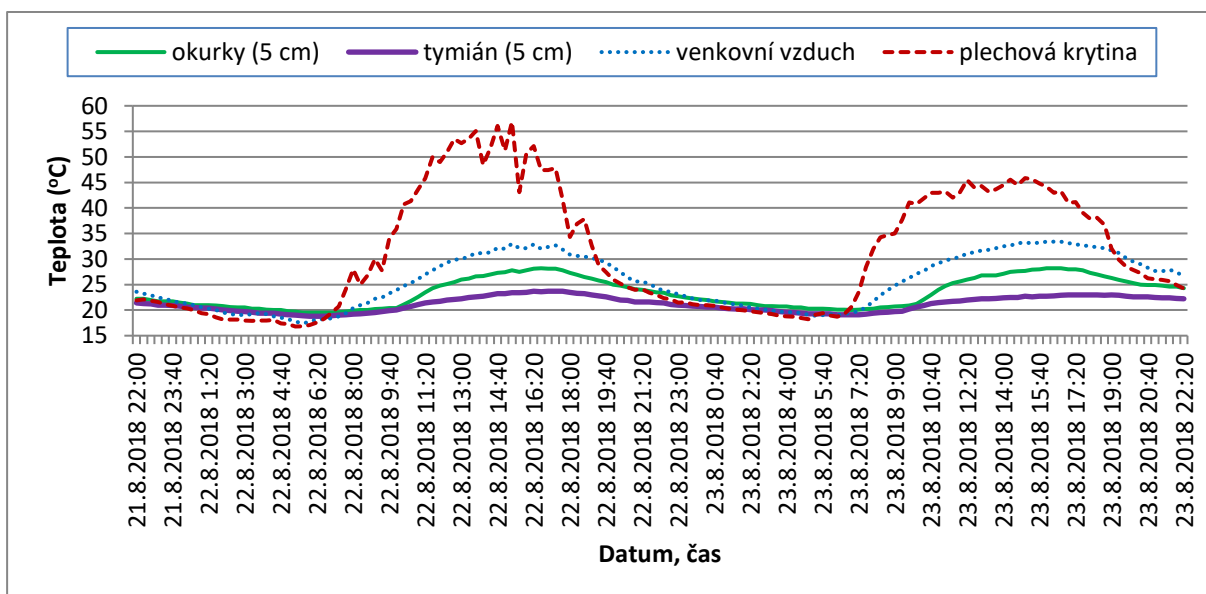


Obr. 4.98 - Naměřené hodnoty průměrné rychlosti větru a nárazové rychlosti větru (19.8.21.8.2018)



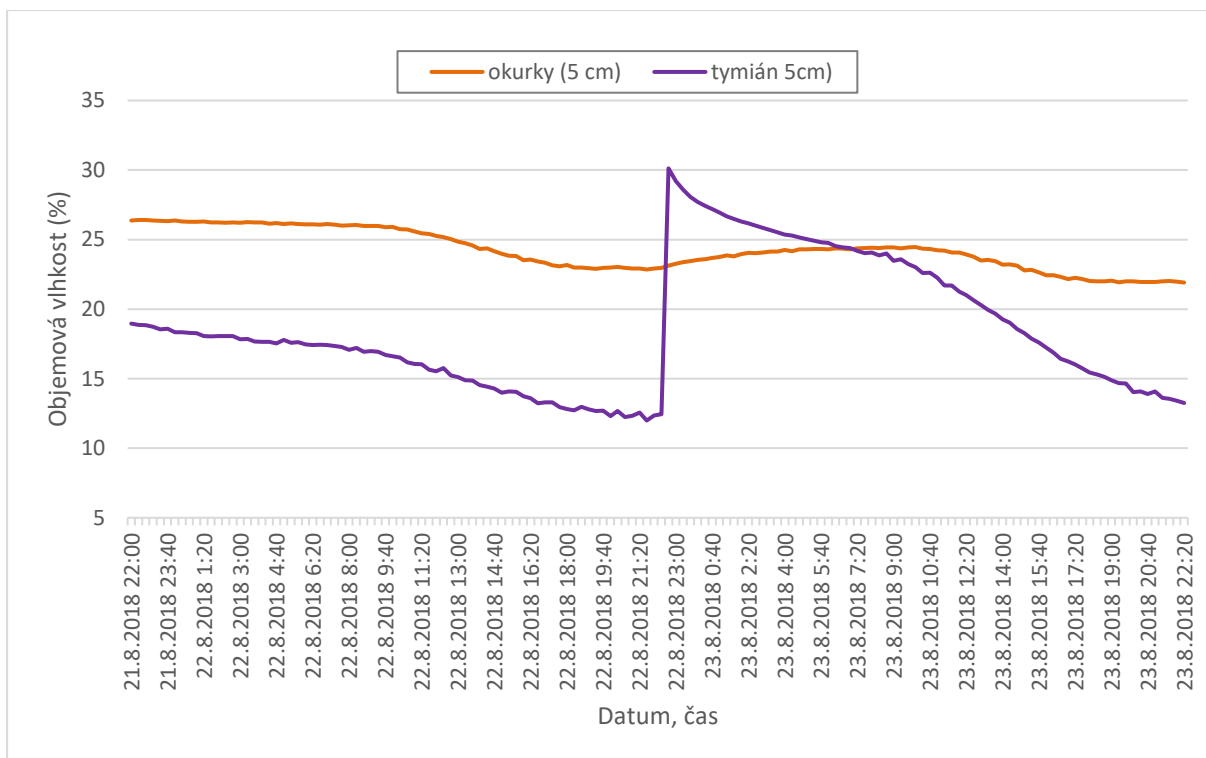
Obr. 4.99 - Naměřené hodnoty globální solární radiace (19.8.-21.8.2018)

Teplotní čidlo (3) bylo opět přemístěno na plechovou krytinu.

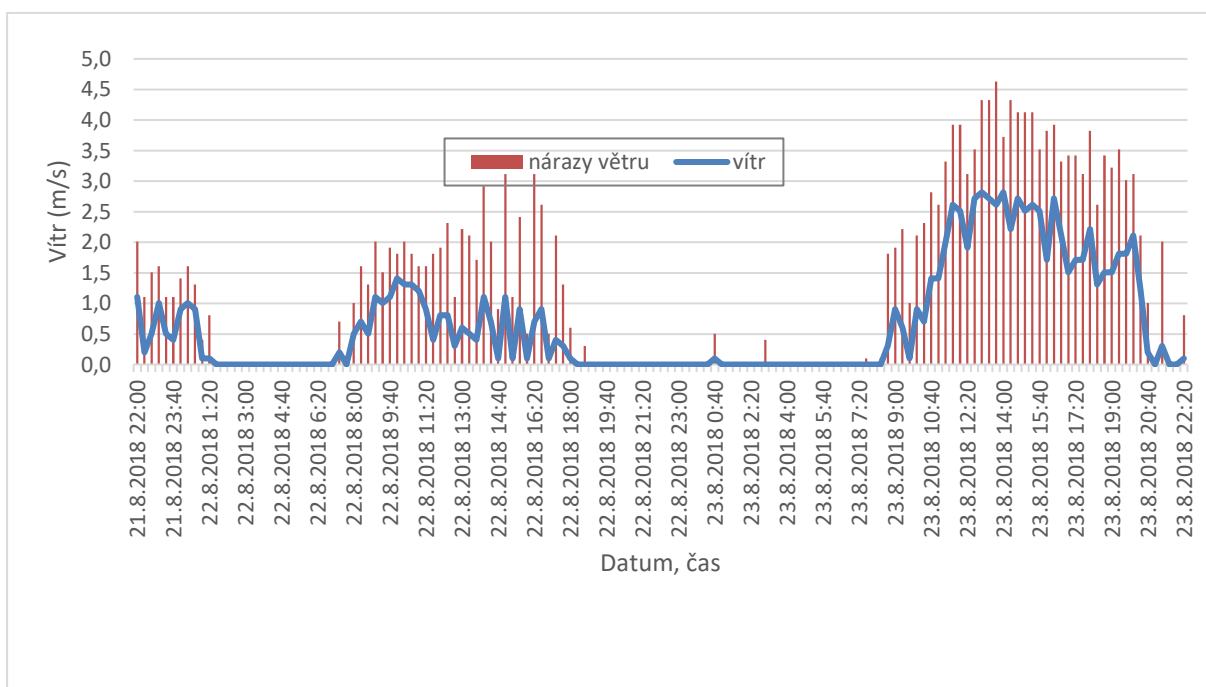


Obr. 4.100 - Průběh teplot v substrátu v hloubce 5 cm (1- okurky, 2- tymián), ve srovnání s teplotou venkovního vzduchu a teplotou na plechové krytině (21.8.2018-23.8.2018)

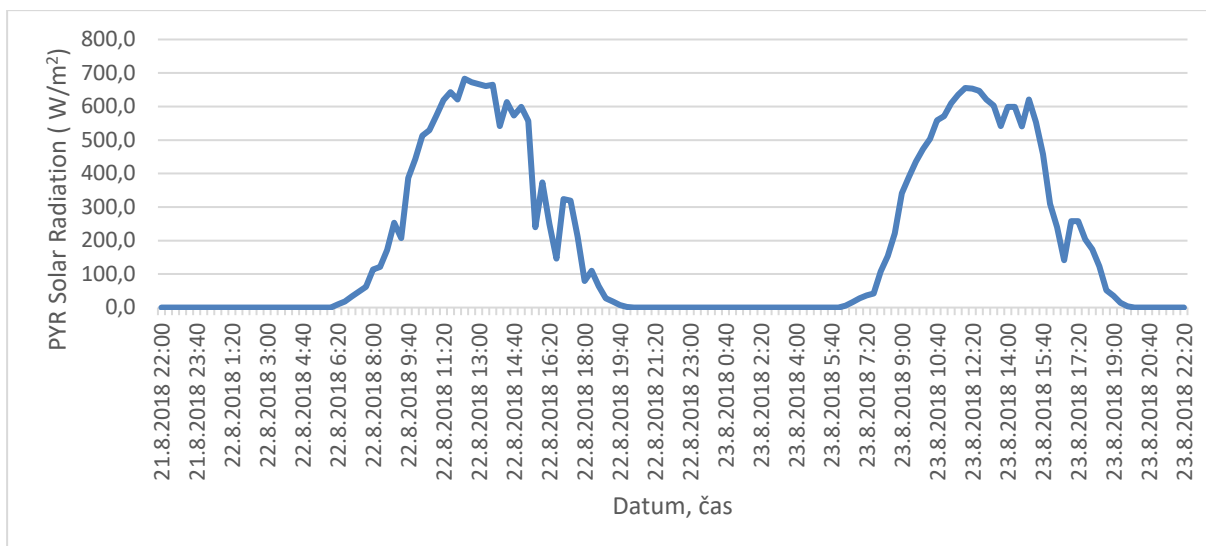
Na obr.4.100 je patrný vliv větrných podmínek na teplotu plechové krytiny. Na plechové krytině došlo ke snížení teplot, zatímco v zemině v hl. 5 cm nedošlo k výrazné změně.



Obr. 4.101 - Hodnoty objemové vlhkosti na vegetační střeše v hloubce 5 cm (1-okurky, 2-tymián) (21.8.2018-23.8.2018)



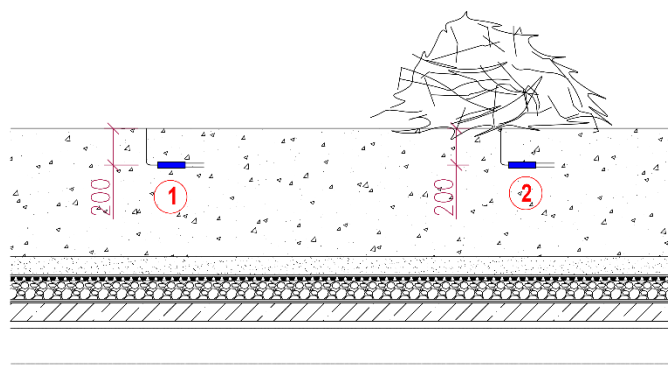
Obr. 4.102 - Naměřené hodnoty průměrné rychlosti větru a nárazové rychlosti větru (19.8.21.8.2018)



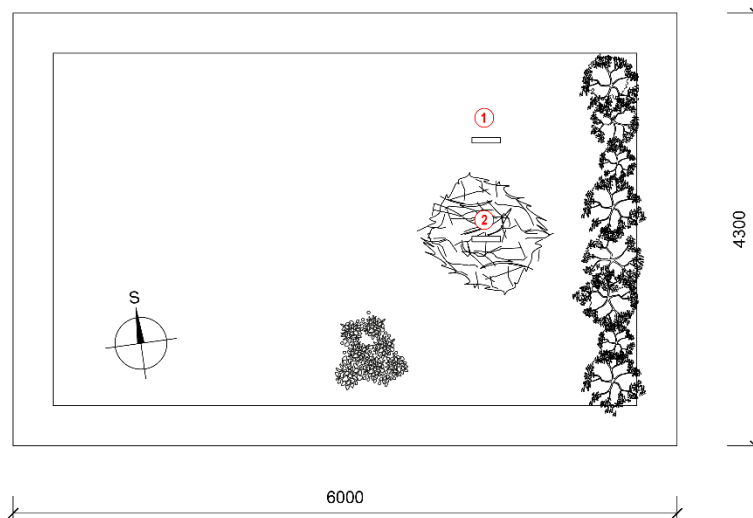
Obr. 4.103 - Naměřené hodnoty globální solární radiace (21.8-23.8.2018)

Na obou površích - plechové i živičné krytině dosáhly teploty v horkých letních dnech téměř 60 °C, 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.

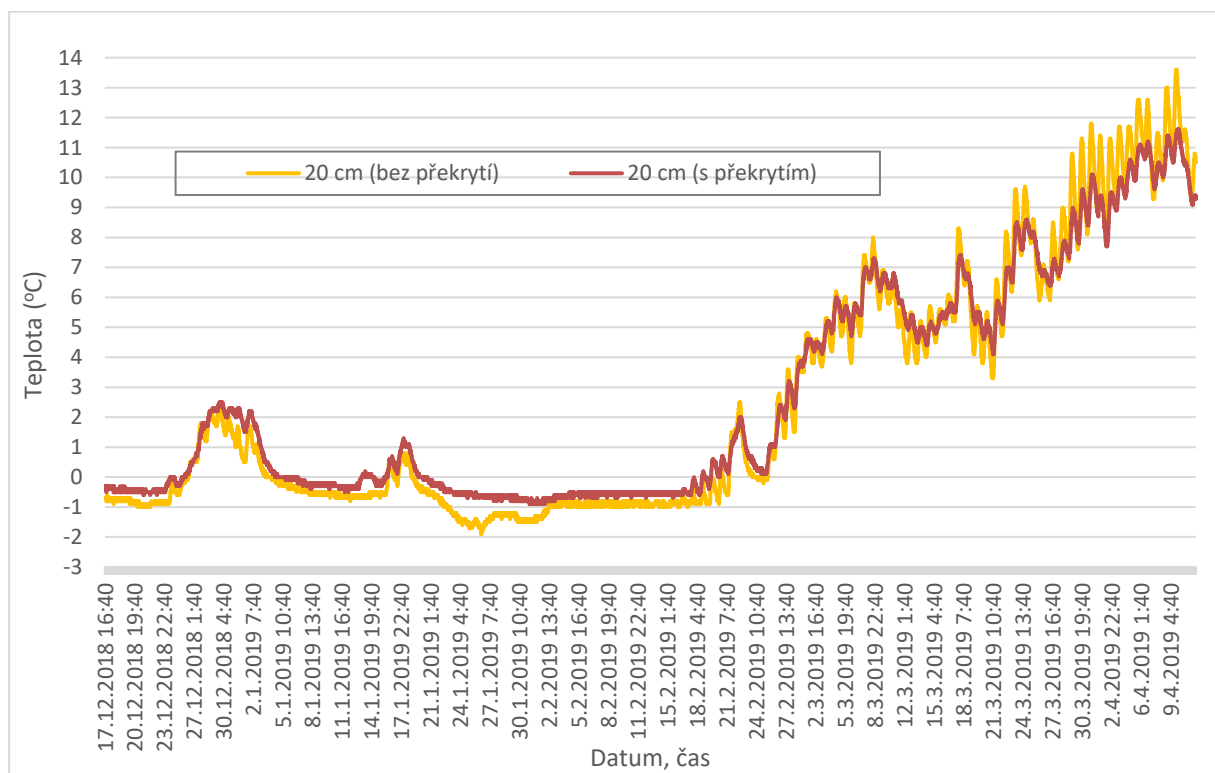
Další měření probíhalo od prosince 2018 do dubna 2019. Oba senzory byly umístěny do hloubky 20 cm. Senzor (1) byl umístěn v hloubce 20 cm bez překrytí, senzor (2) byl překryt vrstvou tlejících rostlin o rozměrech 60 x 60 x 25 cm.



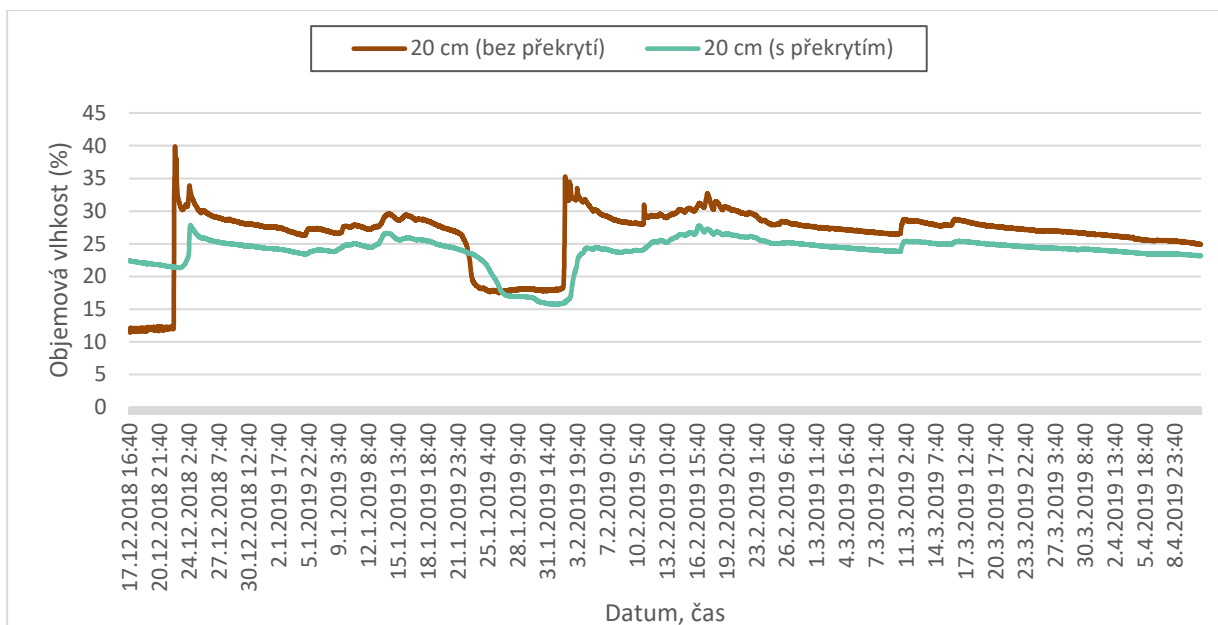
Obr. 4.104 - Umístění senzorů v substrátu vegetační střeše v hloubce 20 cm (1 - bez překrytí, 2 - s překrytím)



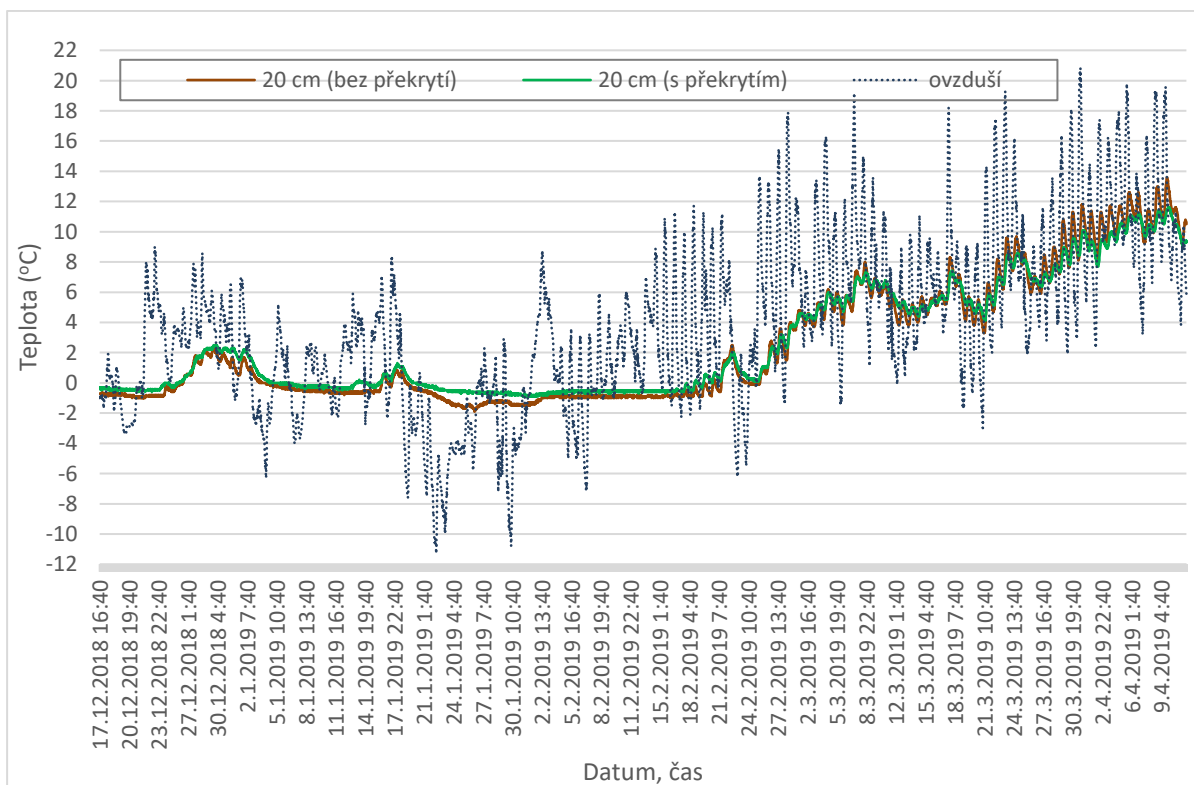
Obr. 4.105 - Půdorysné umístění senzorů na vegetační střeše v hloubce 20 cm (1- bez překrytí ,2 - s překrytím)



Obr. 4.106 - Průběh teplot v substrátu vegetační střechy v hloubce 20 cm (1 - bez překrytí, 2 - s překrytím zetelými rostlinami)



Obr. 4.107- Objemová vlhkost v substrátu vegetační střechy v hloubce 20 cm (1- bez překrytí, 2- s překrytím zetlelými rostlinami) v období od 17.12.2018 do 11.4.2019



Obr. 4.108 - Průběh teplot v substrátu vegetační střechy v hloubce 20 cm (1- bez překrytí, 2- s překrytím zetlelými rostlinami) v porovnání s teplotami venkovního vzduchu (17.12.2018-11.4.2019)

Na *obr. 4.106* je zobrazen průběh teplot v substrátu střešní zahrady v hloubce 20 cm bez překrytí a s překrytím zetlelými rostlinami. Pro větší přehlednost zde nejsou zobrazeny teploty venkovního vzduchu. Průběh teplot v substrátu včetně průběhu teplot venkovního vzduchu je zobrazen na *obr. 4.108*. Na *obr. 4.107* jsou zobrazeny hodnoty objemové vlhkosti. Výraznější pokles objemové vlhkosti na grafu je zapříčiněn zamrznutím vody v substrátu. Teploty v substrátu s překrytím zetlelými rostlinami vykazují mírně vyšší hodnoty především v době, kdy se venkovní teploty pohybovaly pod bodem mrazu (druhá polovina ledna). Se zvyšujícími se teplotami venkovního vzduchu můžeme pozorovat opačný efekt, který se nejvýrazněji projevil ve sledovaném období koncem března a začátkem dubna, kdy teploty venkovního vzduchu začínají stoupat.

Zde bych chtěla zmínit význam tzv. mulčování. Na zahrádkách zůstává půda po skončení vegetačního období bez vegetace, ale i během vegetačního období jsou místa bez rostlin. Na holé půdě se projevuje vliv UV záření, větru a deště negativně. Dochází k vysoušení půdy a k ničení půdních organismů, důležitých pro rozklad organické hmoty. V přírodě je půda chráněná zbytky rostlin, opadaným listím apod. Mulč brání vysychání půdy, šetří tak množství vody k zálivce, významně potlačuje růst plevelů. Rozklad rozprostřené organické hmoty nám pomáhá doplňovat v půdě podíl humusu a zvyšovat tak její úrodnost. Mulč může tvořit čerstvě posekaná tráva, sláma, seno, listí apod. Mulč můžeme rozprostřít i mezi pěstované rostliny (okurky, rajčata aj.).

Mulč může snížit teploty v substrátu na vegetační střeše během letního období – viz *obr.4.78* (zetlelé rostliny mezi rajčaty) a v zimě naopak může mírně omezit promrzání substrátu – viz *obr.4.106*.

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 střechy a na kontaktu se stropní konstrukcí v zimním období. Objekt, na kterém měření probíhala, je nezateplený a netemperovaný.

Program umožňuje výpočet dvourozměrného stacionárního pole teplot a částečných tlaků vodní páry a přibližné roční bilance vodní páry v dvourozměrných stavebních detailech. Součástí výsledků jsou i nejnižší vnitřní povrchové teploty, teplotní faktory a tepelné toky⁶⁶.

Výpočetní program AREA 2017 pro výpočet dvourozměrného stacionárního teplotního pole využívá metodu konečných prvků, která je kompatibilní s mezinárodními normami *EN ISO 10211 a EN ISO 10077-2*. Program v souladu s výše uvedenými normami patří mezi software s vysokou přesností výpočtu.

Výpočet teplotních a tlakových polí v programu Area 2017

Fyzikální jev dvourozměrného teplotního pole je popsán parciální rovnicí (4.1):

Řídící rovnice:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(x, y) \left[\frac{\partial \theta(x, y)}{\partial x} \right] \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda(x, y) \left[\frac{\partial \theta(x, y)}{\partial y} \right] \right] = 0 \quad (4.1)$$

Okrajová podmínka omezující tuto rovnici (4.2):

$$-\lambda(x, y) \left[\frac{\partial \theta(x, y)}{\partial n} \right] = h(\theta - \bar{\theta}) \quad (4.2)$$

kde

(x, y) .. souřadnice bodu v rovině [m],

λ ..součinitel tepelné vodivosti[W.m⁻¹.K⁻¹],

⁶⁶ 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/>

θ .. teplota v bodě [$^{\circ}\text{C}$],

h .. součinitel přestupu tepla [$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$],

$\bar{\theta}$.. teplota v okolním prostředí [$^{\circ}\text{C}$],

$\partial x, \partial y$.. derivace podle x, y a ∂n je derivace podle normály.

Řešení rovnice (4.1) probíhá na souvislé oblasti Ω s hranicí Γ . Na této oblasti s hranicí Γ musí být splněna okrajová podmínka (4.2). Hranice Ω je obecně křivočará (při použití preprocesoru Meshgen). Ve výpočtu se předpokládá rozdělení oblasti Ω na konečný počet oblastí, kde bude funkce $\lambda(x,y)$ konstantní. Funkce $h(x,y)$ a $\bar{\theta}(x,y)$ jsou rovněž uvažovány konstantní po částech hranice Γ .

Řešení rovnice (4.1) je realizováno pomocí metody konečných prvků. Rovnice je pro řešení pomocí MKP upravena Galerkinovou metodou a pomocí Greenovy věty na tvar:

$$K \cdot r = q \quad (4.3)$$

kde:

K je matice vodivosti tělesa:

$$\int_{\Omega} \left[\lambda \frac{\partial N}{\partial x} \cdot \frac{\partial N^T}{\partial x} + \lambda \frac{\partial N}{\partial y} \cdot \frac{\partial N^T}{\partial y} \right] d\Omega$$

r je sloupcová matice:

$$q = \int_{\Gamma} N \cdot h \cdot (\bar{\theta} - N^T \cdot r) d\Gamma$$

kde N je řádková matice bazových funkcí.

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 budou porovnány s naměřenými hodnotami teplot v hloubkách 10 cm a 60 cm a na stopní konstrukci zahradního domku.

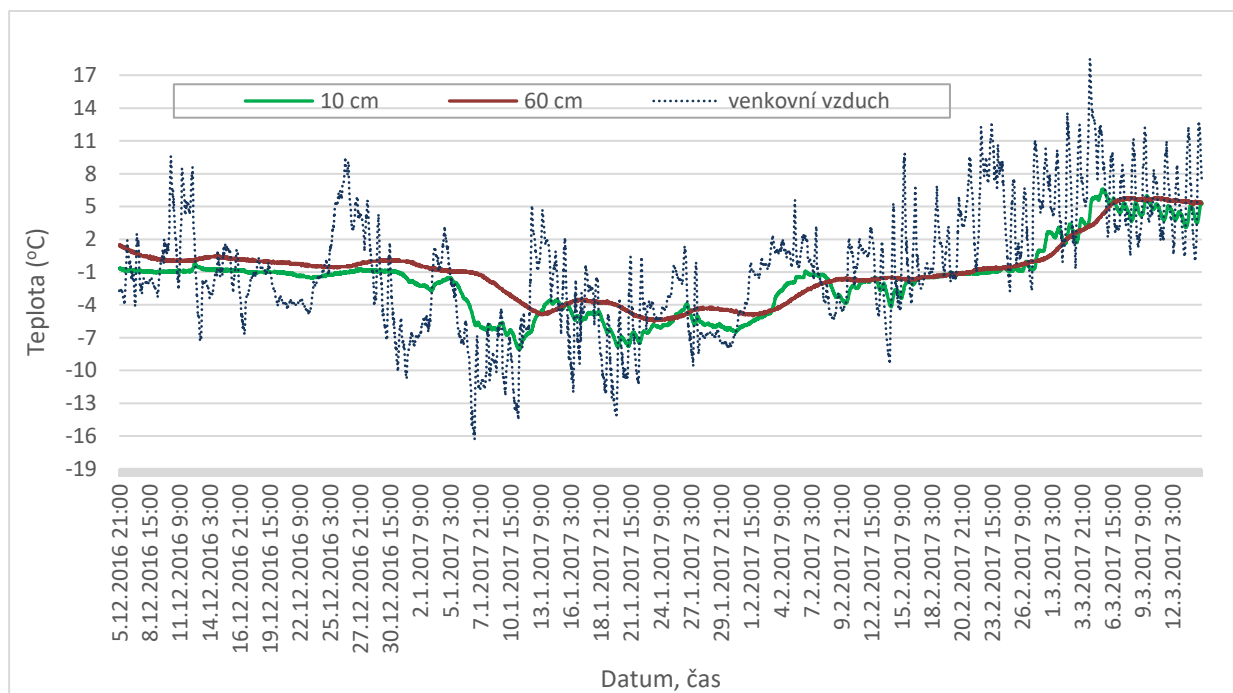
Jedná se o hodnoty naměřené v období s nejnižší zaznamenanou teplotou venkovního vzduchu pro sledované období (příloha č. 3,4). Průběh teplot v zemině v hloubkách 10 cm a 60 cm je znázorněn v grafu obr.4.109 a průběh teplot na stropní konstrukci je znázorněn v grafu obr.4.110. Jak vyplývá z grafů, pokles teploty v konstrukci se projeví se zpožděním v závislosti na hloubce substrátu (může se lišit u stropní konstrukce, která je v interiéru v kontaktu se vzduchem). 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 tabulce č. 4.8. Minimální teplota v interiéru zahradního domku nepřesáhla ve sledovaném období -7,16°C.

Tab. 4.8 Přehled naměřených minimálních teplot

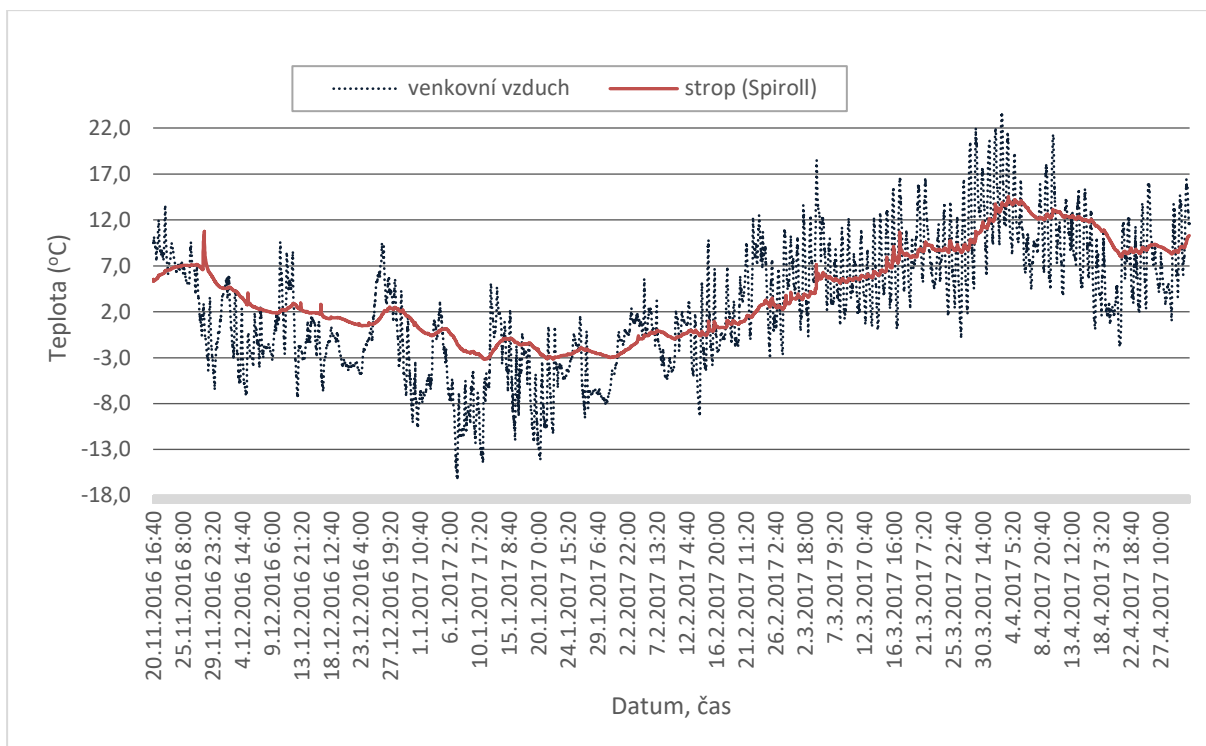
Rok	t _{min} (°C)			
	10 cm 1 (39856)	60 cm 2 (39855)	Spiroll teplotní čidlo	Venkovní vzduch
2016/17	-8,1	-5,5	-3,1	-16,6 (-17,2*)

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

* meteorologická stanice ČHMÚ, (B2BTUR01) Brno-Tuřany



Obr. 4.109 - Průběh teplot v substrátu vegetační střechy v hloubce 10 a 60 cm

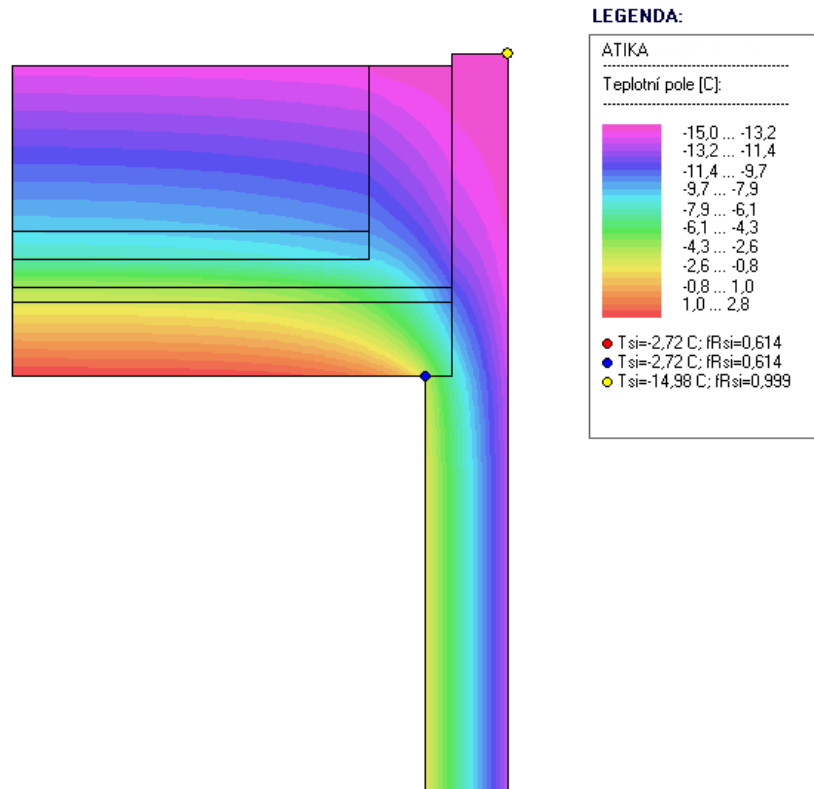


Obr. 4.110 – Průběh teplot na stropní konstrukci zahradního domku (20.11.2016-1.5.2017)

Na obr. 4.111 je znázorněno dvourozměrné teplotní pole u detailu atiky se skladbami konstrukcí odpovídajícími skladbám na zkoumaném objektu. Výpočet byl proveden pro výše uvedené okrajové podmínky (příloha č. 7). Teplota v poli stanovená výpočtem v hloubce 10 cm nabývá hodnoty $-13,9\text{ }^{\circ}\text{C}$. V hloubce 60 cm byla v poli výpočtem stanovena hodnota $-8,9\text{ }^{\circ}\text{C}$. Teplota na stropní konstrukci stanovená výpočtem byla $1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Porovnání výsledků vypočtených a naměřených teplot je v tab.4.9.

Tab.4.9 Naměřené a vypočtené hodnoty teplot v substrátu a na stropní konstrukci

	naměřené teploty ($^{\circ}\text{C}$)	vypočtené teploty ($^{\circ}\text{C}$)	Δt ($^{\circ}\text{C}$)
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. 4.111 – 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.

Při výpočtu byly uvažovány okrajové podmínky pro nezamrzající garáž, kde je teplota interiéru uvažována 5 °C a teplota v exteriéru – 15 °C (lokalita Brno). Teplota naměřená v interiéru zahradního domku v době měření nepřesáhla hodnotu -7,2 °C. I přes uvažování příznivějších okrajových podmínek ve výpočtu byly hodnoty teploty substrátu v hloubkách 10 cm a 60 cm nižší, než hodnoty zjištěné měření. 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 však vykazuje hodnotu nižší, než je hodnota stanovená výpočtem, avšak je nutné poznamenat, že se teplota v interiéru zkoumaného objektu v době měření pohybovala okolo -7,2 °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.

Program simulace⁶⁷ umožňuje provést výpočet dynamické odezvy místnosti na tepelnou zátěž v letním období podle normy *EN ISO 52016-1* a rychlost chladnutí místnosti během otopné přestávky v zimním období podle *ČSN 730540-4*.

Program umožňuje pro hodnocení tepelné stability v letním období stanovit časový průběh teploty vnitřního vzduchu, střední radiační teploty a operativní teploty v interiéru během zvoleného letního dne. Ve výpočtu je možné zohlednit stínění obalových konstrukcí, časově proměnné větrání, tepelnou setrvačnost konstrukcí a chlazení vzduchu.

Výpočet v programu Simulace 2018

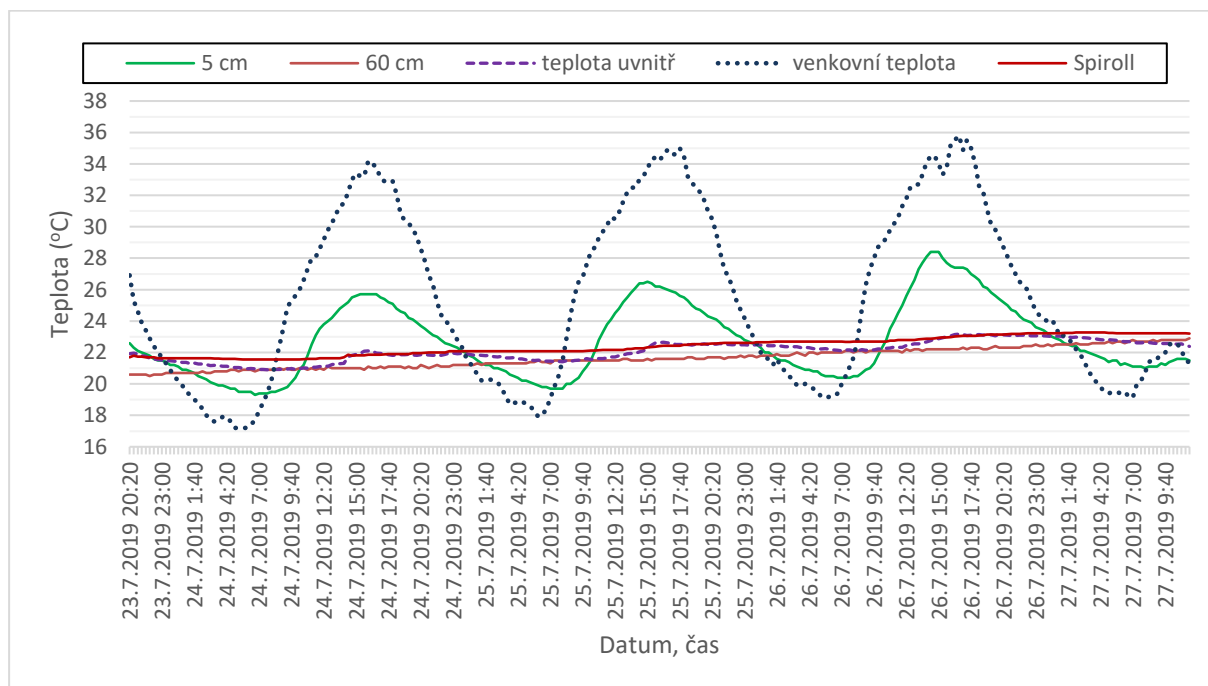
Pro výpočet odezvy místnosti na tepelnou zátěž v letním období program simulace využívá obecný hodinový výpočetní model podle čl. 6.5.6 v *EN ISO 52016-1*. Základ tohoto modelu tvoří opakované sestavování a řešení soustavy bilančních rovnic v jednotlivých hodinách během dne. Tato soustava rovnic postupně vzniká z energetických bilancí (rovnováha mezi tepelnými zisky a ztrátami).

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 (obr 4.112), kdy byla pro sledované období naměřena nejvyšší teplota v exteriéru (35,3 °C).

⁶⁷ 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/>

Pro výpočet teplot během modelového dne pomocí programu Simulace 2018 byly uvažovány teploty venkovního vzduchu a hodnoty intenzity globálního slunečního záření naměřené meteostanicí Em50 (příloha 5,6). Přehled zadaných a vypočtených hodnot je znázorněn v tabulce 4.10. Průběh teplot během modelového dne stanovený výpočtem je uveden v grafu obr.4.113. Pro porovnání výsledků měření s vypočtenými hodnotami byl vytvořen graf, ve kterém jsou znázorněny vypočtené i naměřené teploty v interiéru během modelového dne (obr.4.114).

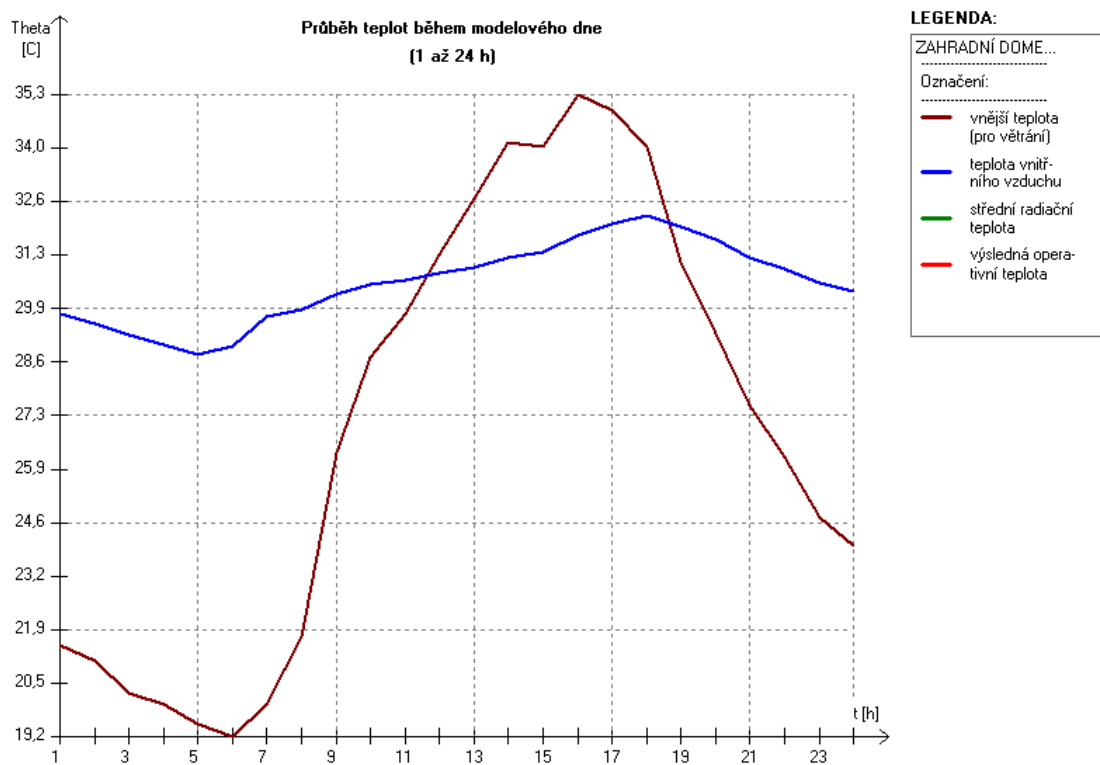


Obr. 4.112 - Průběh teplot v substrátu vegetační střechy v hloubkách 5 a 60 cm, průběh teplot v interiéru a na stropní konstrukci v porovnání s průběhem venkovních teplot

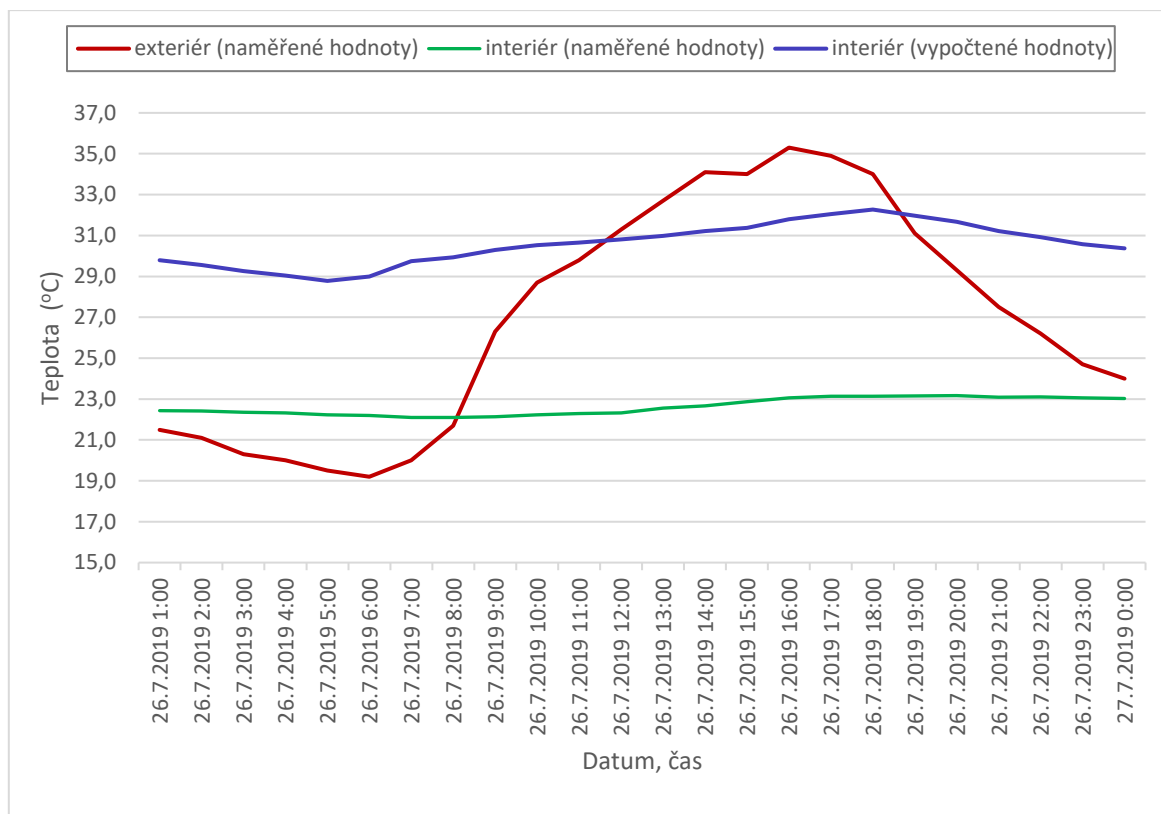
Tab.4.10 – Přehled zadaných a vypočtených hodnot

Den	Teplota (°C) exteriér	Teplota (°C) interiéru	Teplota (°C) stanovená výpočtem	Rozdíl naměřených teplot a teplot stanovených výpočtem	Intenzita globálního slunečního záření (W.m ⁻²)
26.7.2019 1:00	21,5	22,43	29,8	7,37	0,0
26.7.2019 2:00	21,1	22,41	29,55	7,14	0,0
26.7.2019 3:00	20,3	22,36	29,26	6,9	0,0
26.7.2019 4:00	20,0	22,32	29,04	6,72	0,0
26.7.2019 5:00	19,5	22,23	28,78	6,55	0,0
26.7.2019 6:00	19,2	22,2	29	6,8	11,0
26.7.2019 7:00	20,0	22,1	29,74	7,64	45,8

26.7.2019 8:00	21,7	22,1	29,93	7,83	150,1
26.7.2019 9:00	26,3	22,14	30,3	8,16	380,9
26.7.2019 10:00	28,7	22,23	30,53	8,3	518,2
26.7.2019 11:00	29,8	22,29	30,65	8,36	631,7
26.7.2019 12:00	31,3	22,33	30,81	8,48	712,3
26.7.2019 13:00	32,7	22,55	30,98	8,43	754,4
26.7.2019 14:00	34,1	22,67	31,21	8,54	748,9
26.7.2019 15:00	34,0	22,87	31,37	8,5	338,7
26.7.2019 16:00	35,3	23,06	31,79	8,73	582,3
26.7.2019 17:00	34,9	23,14	32,05	8,91	421,1
26.7.2019 18:00	34,0	23,13	32,27	9,14	309,4
26.7.2019 19:00	31,1	23,16	31,97	8,81	56,8
26.7.2019 20:00	29,3	23,17	31,67	8,5	20,1
26.7.2019 21:00	27,5	23,09	31,21	8,12	0,0
26.7.2019 22:00	26,2	23,11	30,92	7,81	0,0
26.7.2019 23:00	24,7	23,06	30,58	7,52	0,0
27.7.2019 0:00	24,0	23,03	30,37	7,34	0,0



Obr. 4.113 - Průběh teplot během modelového dne



Obr. 4.114 – 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 (příloha č. 8). 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 teplot mezi naměřenými teplotami v interiéru a teplotami stanovenými výpočtem je 9,14 °C.

4.6 Závěr

Teploty ve vrstvách intenzivní vegetační střechy jsou závislé na mocnosti a složení substrátu, množství srážek a zálivce rostlin, na lokalitě, extrémních teplotních výkyvech, v letním období na typu střešní vegetace a v zimě na množství napadaného sněhu.

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 přídatná izolace, která druhotně pomáhá snižovat náklady na vytápění.

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.

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. Na problematiku střešních zahrad by bylo vhodné se zaměřit podrobněji v širším měřítku.

5 Seznam použité literatury

- [1] Solar Reflectance. *Https://www.sciencedirect.com* [online]. 2016, 2016 [cit. 2021-12-21]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/solar-reflectance>
- [2] 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>
- [3] 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/>
- [4] ČERMÁKOVÁ, Barbora a Radka MUŽÍKOVÁ. *Ozeleněné střechy*. Praha: Grada, 2009. Stavitel. ISBN 978-80-247-1802-6.
- [5] MINKE, Gernot. *Zelené střechy: plánování, realizace, příklady z praxe*. Ostrava: HEL, 2001. ISBN 80-86167-17-8.
- [6] 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>
- [7] ØsterGro. *Www.kobenhavnergron.dk* [online]. 2019 [cit. 2021-7-26]. Dostupné z: <https://www.kobenhavnergron.dk/place/ostergro/?lang=en>
- [8] Brooklyn Grange: Green roofs. *Www.brooklyngrangefarm.com* [online]. [cit. 2021-7-26]. Dostupné z: <https://www.brooklyngrangefarm.com/green-roofs>
- [9] BS ISO 21348:2007- Space environment (natural and artificial) - Process for determining solar irradiances; Published in Switzerland
<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/53aee542-8f22-4f5f-ba6b-f83d55fd21d6/iso-21348-2007>
- [10] LILIENTHAL Holger, Optische Sensoren in der Landwirtschaft: Grundlagen und Konzepte, JOURNAL FÜR KULTURPFLANZEN, 66 (2). S. 34–41, 2014, ISSN 1867-0911, DOI: 10.5073/JFK.2014.02.01 VERLAG EUGEN ULMER KG, STUTTGART, Dostupné z: <https://silo.tips/download/optische-sensoren-in-der-landwirtschaft-grundlagen-und-konzepte>
- [11] JELÍNEK, Jan a Vladimír ZICHÁČEK. *Biologie pro gymnázia: (teoretická a praktická část)*. 9., rozš. vyd. Olomouc: Nakladatelství Olomouc, 2011. ISBN 978-80-7182-213-4, 579 s.

- [12] BŘÍŽĎALA, Jan. Fotosyntéza. *Http://e-chembook.eu* [online]. [cit. 2021-7-28]. Dostupné z: <http://e-chembook.eu/fotosynteza>
- [13] NOBEL, Park S. *Physicochemical and Environmental Plant Physiology*. 4th edition. Amsterdam, Academic Press (2009), ISBN 978-0-12-374143-1, Pages 604.
- [14] Photosynthetically active radiation. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2021-12-22]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Photosynthetically_active_radiation.
- [15] SAGE, Rowan F. Photosynthetic efficiency and carbon concentration in terrestrial plants: the C₄ and CAM solutions, *Journal of Experimental Botany*, Volume 65, Issue 13, July 2014, Pages 3323–3325, <https://doi.org/10.1093/jxb/eru262>
- [16] Blattflächenindex. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-6-28]. Dostupné z: <https://de.wikipedia.org/wiki/Blattfl%C3%A4chenindex>
- [17] POKORNÝ Radek, Stanovení indexu listové plochy v nesmíšených porostech lesních dřevin, Centrum výzkumu globální změny AV ČR, Brno, <http://www.nusl.cz/ntk/nusl-180899>, ISBN978-80-87902-08-0
- [18] Photosynthesis: Pigments and absorption spectra. *Http://phototroph.blogspot.com/* [online]. 2008 [cit. 2021-7-27]. Dostupné z: <http://phototroph.blogspot.com/2006/11/pigments-and-absorption-spectra.html>
- [19] Metabolismus sacharidů: Fotosyntéza. *Http://web2.mendelu.cz/af_291_projekty2/vseo* [online]. 2021 [cit. 2021-7-27]. Dostupné z: http://web2.mendelu.cz/af_291_projekty2/vseo/print.php?page=1883&typ=html
- [20] Licht- und Schattenblätter. *Lernhelfer.de* [online]. Berlin: © Duden Learnattack GmbH, 2021, 2010 [cit. 2021-7-19]. Dostupné z: <https://www.lernhelfer.de/schuelerlexikon/biologie-abitur/artikel/licht-und-schattenblaetter>
- [21] HLADKÝ, Luděk. Osvětlení z pohledu rostlin. *Světlo* [online]. Praha: FCC PUBLIC, 2010(4), [cit. 2021-12-21]. ISSN 1212-0812. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/casopis/tema/osvetleni-z-pohledu-rostlin--15564>
- [22] PALLARDY, Stephen G. *Physiology of Woody Plants*. 3rd Edit. San Diego: Academic Press, 2008. ISBN 978-0-12-088765-1, 464 str.
- [23] HRUDOVÁ, Eva. Poškození rostlin světlem. *Web2.mendelu.cz* [online]. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, financováno projektem 35 f4d 2011 MŠMT FRVŠ, 2011 [cit. 2021-7-19]. Dostupné z: http://web2.mendelu.cz/af_291_sklad/frvs/hrudova/index_soubory/Page519.htm

- [24] Energetická bilance rostliny (energy budget). *Botany.upol.cz* [online]. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2014 [cit. 2021-7-19]. Dostupné z: http://botany.upol.cz/pagedata_cz/vyukove-materialy/152_ekologie-rostlin-iiii-uprav2014.pdf
- [25] LARCHER, W., WAGNER, J. (2012). Temperatures in the Life Zones of the Tyrolean Alps. *Sitzungsberichte und Anzeiger der mathematisch-naturwissenschaftlichen Klasse*. 213. DOI:10.1553/SundA2009_2010sSI_2010_s31, Dostupné z: www.researchgate.net [2_8_2020]
- [26] VELEBNÝ, Vladimír. *Vodný režim pôdy*. Bratislava: Slovenská technická univerzita, 2000. Edícia skrípt. ISBN 80-227-1373-2, 208 s.
- [27] KUTÍLEK, Miroslav. *Vodohospodářská pedologie*. Praha: SNTL, 1966, 276 s.
- [28] KUTÍLEK, Miroslav. *Vodohospodářská pedologie: vysokoškolská učebnice*. 2., přeprac. vyd. Praha: SNTL, 1978. Řada stavební literatury, 296 s.
- [29] VRBA, Vladimír, HULEŠ, Ludvík: Humus - půda - rostlina (1) Funkce humusu v ekosystému. *Biom.cz* [online]. 2006-09-04 [cit. 2021-07-27]. Dostupné z WWW: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/humus-puda-rostlina-1-funkce-humusu-v-ekosystemu>. ISSN: 1801-2655
- [30] RICHTER, Rostislav. Sorpční schopnost půdy. *Web2.mendelu.cz* [online]. 2004 [cit. 2021-7-27]. Dostupné z: http://web2.mendelu.cz/af_221_multitext/vyziva_rostlin/html/agrochemie_pudy/sorpce.htm
- [31] ŠARAPATKA, B. *Pedologie*. 1. vyd. Olomouc, Univerzita Palackého, 1996. ISBN 80-7067-590
- [32] SEREDA, Oleg. *Mechanika zemin se základy pedologie*. Brno: Vysoká škola zemědělská v Brně, 1988, 96 s.
- [33] Fyzikální vlastnosti mořské vody. *Klimatologie a hydrogeografie pro učitele* [online]. [cit. 2021-10-11]. Dostupné z: https://is.muni.cz/do/rect/el/estud/pdf/ps14/fyz_geogr/web/pages/12-2-fyzikalni-vlastnosti.html
- [34] 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
- [35] *Hydrologie sněhu: Sublimace*. [online]. 2011 [cit. 2021-10-11]. Dostupné z: https://www.chmi.cz/files/portal/docs/poboc/CB/snowmelt/navmenu.php_tab_1_page_5.1.0.htm

- [36] REBA Michele L., POMEROY J., MARKS D. a LINK Timothy E.: Hydrological processes: Estimating surface sublimation losses from snowpacks in a mountain catchment using eddy covariance and turbulent transfer calculations. *Wiley Online Library* [online]. 31 January 2012 [cit. 2021-10-12]. Dostupné z: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/hyp.8372>
- [37] Hydrologické skupiny půd. *Www.vumop.cz* [online]. Praha [cit. 2021-7-27]. Dostupné z: https://www.vumop.cz/sites/default/files/20130529_katalogmap_hydrologicke_charakteristiky.pdf
- [38] Česká meteorologická společnost [online]: Elektronický meteorologický slovník výkladový a terminologický (eMS) [cit 27.07.2021]. Dostupné z: <http://slovník.cmes.cz>
- [39] POTSDAM-INSTITUT FÜR KLIMAFOLGENFORSCHUNG, Bodentemperatur,[online], 1992 [cit. 17-3-2016] , dostupné z https://www.pik-potsdam.de/services/klimawetter-potsdam/klimazeitreihen/bodentemperatur/index_html
- [40] HORA, Petr. : *Vztah teploty vzduchu a půdy různých půdních druhů* [online]. In: . Skalní mlýn, 2.-4.2.2011, s. 11 [cit. 2021-12-22]. ISBN 978-80-86690-87-2. Dostupné z: <http://www.cbks.cz/SbornikSMlyn11/Hora.pdf>
- [41] PAVLŮ, Lenka. *Základy pedologie a ochrany půdy*. V Praze: Česká zemědělská univerzita, 2019. ISBN 978-80-213-2952-2.
- [42] 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
- [43] 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
- [44] 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
- [45] 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)
- [46] Součinitel tepelné vodivosti sněhu. <https://stavba.tzb-info.cz> [online]. [cit. 2021-12-29]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/69-soucinitel-tepelne-vodivosti-snehu>
- [47] KUTÍLEK, Miroslav, Václav KURÁŽ a Milena ČÍSLEROVÁ. *Hydropedologie 10*. Vyd. 2. přeprac. Praha: České vysoké učení technické, 2000. ISBN 80-01-02237-4.
- [48] JANDÁK, Jiří, Eduard POKORNÝ a Alois PRAX. *Půdoznalství*. Vyd. 3., přeprac. Brno: Mendelova univerzita v Brně, 2010. ISBN 978-80-7375-445-7.

- [49] MYSLIL, V., Z. KUKAL, K. POŠMOURNÝ a V. FRYDRYCH. Geotermální energie. *Planeta: Odborný časopis pro životní prostředí* [online]. Praha, 2007, XV(4/2007), 32 [cit. 2021-12-29]. ISSN 1801-6898. Dostupné z: https://prvnigeotermalni.cz/upload/4084e9a33cc28c0fe8e25501a8bc01/geotermalni_energie_myslil_4.pdf
- [50] 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/>
- [51] 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/>

Seznam tabulek:

Tab. 2.1 Index listové plochy u různých druhů porostů

Tab. 2.2 Rozdělení půdy podle procenta obsahu částic menších než 0,01 mm

Tab. 2.3 Výška kapilárního vzlinutí

Tab. 2.4 Hydrologické skupiny půd, Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy

Tab. 2.5 Tepelné vodivosti nejběžnějších zemin a výplně jejich pórů - Drbal (1969)

Tab. 2.6 Tepelné vlastnosti vybraných složek půdy

Tab. 4.1 Nejnižší naměřené teploty v substrátu vegetační střechy (r.2013-14)

Tab. 4.2 Nejnižší naměřené teploty v substrátu vegetační střechy (r. 2014-15)

Tab. 4.3 Nejnižší naměřené teploty v substrátu vegetační střechy a nejnižší naměřená teplota venkovního vzduchu (r. 2016-17)

Tab. 4.4 Přehled výsledků za zimní období

Tab. 4.5 Minimální a maximální teploty během letního dne a průměrná hodnota objemové vlhkosti v % v jednotlivých hloubkových úrovních

Tab. 4.6 Maximální naměřené teploty v jednotlivých hloubkových úrovních v substrátu vegetační střechy a maximální teploty venkovního vzduchu ve sledovaném období v letech 2014 a 2015

Tab. 4.7 Minimální dosažené teploty v zimním období v letech 2018-2020

Tab. 4.8 Přehled naměřených minimálních teplot

Tab.4.9 Naměřené a vypočtené hodnoty teplot v substrátu a na stropní konstrukci

Tab.4.10 Přehled zadaných a vypočtených hodnot

Seznam obrázků:

Obr. 1.1- Příklad „bílých střech“.....	13
Obr. 2.1 - Typy ozelenění střech dle tloušťky substrátu.....	14
Obr. 2.2 - Střešní farma na střeše kancelářské budovy o rozloze 1000 m ² v nizozemském Rotterdamu. Pěstuje se zde zelenina, ovoce, květiny a chovají včely.....	15
Obr. 2.3 - Střešní zahrada o ploše 600 m ² s 90 tunami půdy (Kodaň, Dánsko) na pětipodlažní budově nad aukcí starých automobilů	15
Obr. 2.4 - Jedna ze tří střešních farem v New Yorku (Brooklyn Navy Farm, obdělávaná plocha 6039 m ²). Na třech střechách o rozloze 5,6 akrů (12 542 m ²) půdy je ročně vyprodukováno 80000 lbs (36287,4 kg) ekologicky pěstovaných zemědělských produktů, je zde provozováno i 40 včelínů.	15
Obr. 2.5 - Míra odrazivosti, absorpce a propustnosti listem kukuřice (BBCH Stadium 31).....	20
Obr. 2.6 - Fotosyntetické pigmenty '	26
Obr. 2.7 - Stinný a slunný list.....	28
Obr. 2.8 - Povrchová teplota rostliny v letním období (Tyrolské Alpy, měření W.LARCHER)	30
Obr. 2.9- Průběh teplot během letního dne na spodní straně listu dýně ve srovnání s teplotou okolního vzduchu (zdroj: autor)	31
Obr. 2.10 - Půdní profil v porovnání se skladbou intenzivní vegetační střechy (střešní zahrady)	32
Obr. 2.11- Složení zeminy o objemu V a hmotnosti m	33
Obr. 2.12 - Fázový diagram vody.....	44
Obr. 2.13 Složitost půdního prostředí – pevná fáze (půdní agregáty, zrna), kapalná fáze (voda), plynná fáze (vzduch)	50
Obr. 2.14 - Průběh venkovních teplot a průběh teplot v půdě (Německo, PIK- srpen 2015)	56
Obr. 2.15 - Průběh venkovních teplot a průběh teplot v půdě (Německo, PIK- prosinec 2014).....	56
Obr. 2.16 - Závislost tepelných charakteristik na vlhkosti půdy	61
Obr. 3.1 - Schéma vegetační střechy.....	67
Obr. 3.2 – Intenzivní vegetační vrstva na objektu zahradního domku.....	68
Obr. 3.3 - Vegetační zahrada na střeše zahradního domku osázená zemědělskými plodinami- rajčata, mrkev, paprika (r.2014).....	69
Obr. 3.4 - Úroda rajčat na střeše zahradního domku.....	69

Obr. 3.5- Senzory TRIME-PICO32	70
Obr. 3.6 - Datalogger GlobeLog	70
Obr. 3.7 - Software pro komunikaci s měřícím zařízením GlobeLog (IMKO GmbH)	71
Obr. 4.1 - Umístění senzorů TRIME-PICO32 ve skladbě střešní zahrady.....	72
Obr. 4.2 - Průběh teplot v substrátu intenzivní vegetační střechy v hloubkách 20,40,60 cm	73
Obr. 4.3 - Průběh teplot venkovního vzduchu (zdroj: ČHMÚ, meteorologická stanice (B2BTUR01) Brno-Tuřany).....	73
Obr. 4.4 - Hodnoty objemové vlhkosti v substrátu intenzivní vegetační střechy v hloubkách 20,40 a 60 cm (7.6.2014-14.6.2015)	74
Obr. 4.5- Úhrny srážek v období od 7.6.2014 do 14.6.2015 (zdroj: ČHMÚ, meteorologická stanice (B2BTUR01) Brno-Tuřany)	75
Obr. 4.6 - Průběh teplot v substrátu vegetační střechy v hloubkových úrovních 20, 40 a 60 cm (7.6. - 31.8.2014)	76
Obr. 4.7 - Hodnoty objemové vlhkosti v substrátu vegetační střechy v hloubkových úrovních 20, 40 a 60 cm (7.6.-31.8.2014)	76
Obr. 4.8 - Průběh teplot v substrátu vegetační střechy v hloubkách 20, 40 a 60 cm (1.9. – 30.11.2014)	77
Obr. 4.9 - Hodnoty objemové vlhkosti v substrátu vegetační střechy v hloubkách 20,40 a 60 cm (1.9. – 30.11.2014).....	77
Obr. 4.10 - Průběh teplot v substrátu vegetační střechy v hloubkách 20, 40 a 60 cm (1.12.2014 – 28.2.2015)	78
Obr. 4.11 - Hodnoty objemové vlhkosti v substrátu vegetační střechy v hloubkách 20, 40 a 60 cm (1.12.2014 – 28.2.2015)	78
Obr. 4.12 - Průběh teplot v substrátu vegetační střechy v hloubce 20, 40 a 60 cm (1.3. – 14.6.2015).....	79
Obr. 4.13 - Hodnoty objemové vlhkosti v substrátu vegetační střechy v hloubkách 20,40 a 60 cm (1.3. – 14.6.2015).....	79
Obr. 4.14 - Ukázka z naměřených dat – žlutou barvou je zvýrazněna maximální naměřená teplota v profilu vegetační střechy ve sledovaném období (7.6.2014 - 14.6.2015)	80
Obr. 4.15 - Ukázka z naměřených dat – zelenou barvou je zvýrazněna nejnižší naměřená teplota v profilu vegetační střechy ve sledovaném období (7.6.2014 - 14.6.2015)	81
Obr. 4.16 - Průběh teplot v substrátu intenzivní vegetační střechy v hloubkách 20, 40 a 60 cm (24.3. do 1.4.2014)	82

Obr. 4.17 - Naměřené hodnoty objemové vlhkosti (%) v substrátu intenzivní vegetační střechy v hloubkách 20, 40 a 60 cm (24.3.-1.4.2014).....	82
Obr. 4.18 - Průběh teplot v substrátu intenzivní vegetační střechy v hloubkách 20, 40 a 60 cm (1.4. - 14.4.2014)	83
Obr. 4.19 - Průběh objemové vlhkosti (%) v substrátu intenzivní vegetační střechy v hloubkách 20, 40, a 60 cm (1.4. - 14.4.2014).....	83
Obr. 4.20 - Průběh teplot v substrátu intenzivní vegetační střechy v hloubkách 20, 40 a 60 cm (27.4. - 4.6.2014)	84
Obr. 4.21 - Hodnoty objemové vlhkosti (%) v substrátu intenzivní vegetační střechy v hloubkách 20,40 a 60 cm (27.4. - 4.6.2014).....	84
Obr. 4.22 - Průběh teplot v substrátu intenzivní vegetační střechy (14.6. - 13.8.2015)	85
Obr. 4.23 - Hodnoty objemové vlhkosti (%) v substrátu intenzivní vegetační střechy (14.6-13.8.2015)	85
Obr. 4.24 - Průběh teplot v substrátu intenzivní vegetační střechy v zimním období (3.12.2013 - 4.1.2014)	86
Obr. 4.25 - Naměřené hodnoty objemové vlhkosti v substrátu intenzivní vegetační střechy v zimním období (3.12.2013 - 4.1.2014).....	87
Obr. 4.26 - Průběh teplot v substrátu intenzivní vegetační střechy v zimním období (21.1.- 15.2.2014)	87
Obr. 4.27 – Průběh teplot venkovního vzduchu (zdroj: archivní data ČHMÚ z meteostanice (B2BTUR01) Brno-Tuřany)	88
Obr. 4.28 - Objemová vlhkost (v %) v substrátu intenzivní vegetační střechy v zimním období (21.1.- 15.2.2014)	89
Obr. 4.29 - Průběh teplot v substrátu intenzivní vegetační střechy v hloubkách 20,40 a 60 cm.....	90
Obr. 4.30 – Průběh teplot venkovního vzduchu v období od 29.10 do 3.2.2015 (zdroj: archivní data ČHMÚ z meteostanice (B2BTUR01) Brno-Tuřany)	91
Obr. 4.31 - Naměřené hodnoty objemové vlhkosti (%) v substrátu intenzivní vegetační střechy v zimním období (29.10. 2014 - 3.2.2015)	92
Obr. 4.32 - Průběh teplot v substrátu střešní zahrady během zimního dne (7.1.2015) v hloubkách 20,40 a 60 cm	93
Obr. 4.33 - Naměřená objemová vlhkost v substrátu střešní zahrady v během zimního dne (7.1.2015) v hloubkách 20,40,60 cm.....	93

Obr. 4.34- Průběh teplot v substrátu střešní zahrady v hloubkách 20, 40, 60 cm doplněný o průběh teplot venkovního vzduchu (7.1.2015).....	94
Obr. 4.35 - Průběh teplot v substrátu v hloubce 10 a 60 cm (5.12.2016- 14.3.2017).....	95
Obr. 4.36 - Hodnoty objemové vlhkosti v substrátu v hloubce 10 a 60 cm (5.12.2016 - 14.3.2017) ...	95
Obr. 4.37- Průběh teplot v substrátu v hloubce 10 a 60 cm (5.12.2016 - 14.3.2017) v porovnání s teplotami vzduchu	96
Obr. 4.38 - Vrstva sněhu pokrývající střešní zahradu (1.2-17.2.2017)	97
Obr. 4.39 – Průběh teplot v substrátu střešní zahrady v hloubkách 10 a 60 cm (1.2-17.2.2017) v porovnání s teplotami venkovního vzduchu	97
Obr. 4.40 - Průběh objemové vlhkosti v hloubkách 10 a 60 cm v substrátu střešní zahrady (1.2-17.2.2017)	98
Obr. 4.41 - Průběh teplot v substrátu střešní zahrady v hloubkách 20, 40 a 60 cm (7.6. -30.6.2014)..	99
Obr. 4.42- Průběh teplot venkovního vzduchu v období od 7.6.2014 do 30.6.2014 (zdroj: data ČHMÚ, meteostanice (B2BTUR01) Brno-Tuřany)	100
Obr. 4.43 - Hodnoty objemové vlhkosti v substrátu střešní zahrady v hloubkách 20, 40 a 60 cm (7.6.-30.6.2014)	100
Obr. 4.44 – Typický průběh teplot v substrátu vegetační střechy během letního dne v hloubkách 20, 40 a 60 cm (11.6.2014).....	101
Obr. 4.45 - Naměřená objemová vlhkost v substrátu vegetační střechy během letního dne v hloubkách 20, 40 a 60 cm (11.6.2014).....	101
Obr. 4.46 – Průběh teplot v substrátu vegetační střechy v hloubkách 20,40 a 60 cm (14.6.2015-13.8.2015)	103
Obr. 4.47 – Hodnoty objemové vlhkosti v hloubkách 20,40 a 60 cm ((14.6.2015-13.8.2015)	103
Obr. 4.48 – Průběh teplot v substrátu vegetační střechy v hloubkách 20 a 60 cm (14.6.2015-17.8.2015)	104
Obr. 4.49- Hodnoty objemové vlhkosti v substrátu vegetační střechy v hloubkách 20 a 60 cm (14.6.2015-17.8.2015)	104
Obr. 4.50- Průběh teplot venkovního vzduchu v období od 14.6. do 17.8.2015 (zdroj: data ČHMÚ, meteostanice (B2BTUR01) Brno-Tuřany)	105
Obr. 4.51- Průběh teplot na stropě (Spiroll) zahradního domku v porovnání s teplotami venkovního vzduchu (20.11.2016-1.5.2017).....	106

Obr. 4.52-Průběh teplot v substrátu v hloubce 10 a 60 cm ve srovnání s teplotami na stropní konstrukci uvnitř zahradního domku (27.12.2016 - 3.2.2017).....	107
Obr. 4.53 - 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 - 3.2.2017)	107
Obr. 4.54- 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).....	108
Obr. 4.55 - Průběh teplot na stropě (Spiroll) zahradního domku, uvnitř zahradního domku.....	108
Obr. 4.56- Průběh teplot na stropě zahradního domku v porovnání s teplotami v substrátu vegetační střechy a s teplotami venkovního vzduchu (19.7.-16.8.2015)	109
Obr. 4.57 -Průběh teplot na stropní konstrukci (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)	110
Obr. 4.58 - 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 (11.4.-11.5.2019).....	111
Obr. 4.59 - Průběh teplot na stropní konstrukci (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).....	112
Obr. 4.60- Průběh teplot na stropní konstrukci (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)	112
Obr. 4.61 - Průběh teplot na stropní konstrukci (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)	113
Obr. 4.62- Umístění sondy v hloubce 60 cm na intenzivní vegetační střeše.....	113
Obr. 4.63 - Umístění senzorů v substrátu střešní zahrady v hloubce 10 cm (1 - pod habry,2 –mimo habry, 3- teplotní čidlo v bylinkách)	115
Obr. 4.64 - Půdorysné umístění senzorů na vegetační střeše v hloubce 10 cm (1 - pod habry,2 – mimo habry, 3- teplotní čidlo v bylinkách)	115
Obr. 4.65 – Vegetace na intenzivní vegetační střeše, foto pořízeno 1.8.2017	116
Obr. 4.66 - Průběh teplot v substrátu v hloubce 10 cm pod habry a mimo habry ve srovnání s teplotou v porostu bylinek (tymián) těsně pod povrchem (30.6.-7.7.2017)	117
Obr. 4.67- Umístění bylinek (tymián) na okraji střechy (2018)	117

Obr. 4.68 - Objemová vlhkost (%) naměřená pod keři habrů a mimo keře habrů v hloubce 10 cm (30.6.-7.7.2017)	118
Obr. 4.69 - Naměřené hodnoty salinity pod keři habrů a mimo keře v hloubce 10 cm (30.6.-7.7.2017)	118
Obr. 4.70 - Průběh teplot v substrátu v hloubce 10 cm pod habry a mimo habry ve srovnání s teplotou v porostu bylinek (tymián) těsně pod povrchem (9.7-10.7.2017)	119
Obr. 4.71 - Hodnoty objemové vlhkosti pod keři habrů a mimo habry v hloubce 10 cm	119
Obr. 4.72- Průběh teplot v substrátu v hloubce 10 cm pod habry a mimo habry ve srovnání s teplotou v porostu bylinek (tymián) těsně pod povrchem (16.7-20.7.2017)	120
Obr. 4.73 - Hodnoty objemové vlhkosti pod keři habrů a mimo habry v hloubce 10 cm (16.7.-20.7.2017)	120
Obr. 4.74 – Umístění senzorů v substrátu střešní zahrady v hloubce 5 cm (1 - pod habry,2 –mezi rajčaty).....	121
Obr. 4.75 - Půdorysné umístění senzorů v hloubce 5 cm (1 - pod habry,2 – mezi rajčaty).....	121
Obr. 4.76 - 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).....	122
Obr. 4.77 - Hodnoty objemové vlhkosti v substrátu vegetační střechy v hloubce 5 cm pod habry a mezi rajčaty (12.8.-19.8.2017).....	122
Obr. 4.78 – Průběh teplot pod habry a mezi rajčaty v hloubce 5 cm, mezi rajčata je umístěna část zetlelých a suchých rostlin (27.8.-1.9.2017).....	123
Obr. 4.79 – Hodnoty objemové vlhkosti pod habry a mezi rajčaty v hloubce 5 cm, mezi rajčata je umístěna část zetlelých a suchých rostlin (27.8.-1.9.2017).	123
Obr. 4.80 - Střešní zahrada – okurky, mrkev, foto pořízeno13.7.2018.....	124
Obr. 4.81- Umísťování senzoru do porostu okurek do hloubky 5 cm	124
Obr. 4.82 - Rozmístění senzorů v hloubce 5 cm a teplotního čidla těsně pod povrchem (senzor 1- okurky, senzor 2 – mrkev, teplotní čidlo 3-okurky).....	125
Obr. 4.83 - Půdorysné rozmístění senzorů v hloubce 5 cm a teplotního čidla (senzor 1- okurky, senzor 2 – mrkev, teplotní čidlo 3-okurky)	125
Obr. 4.84 - 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	126
Obr. 4.85 - Hodnoty objemové vlhkosti v porostu okurek a mrkve v hloubce 5 cm.....	126
Obr. 4.86 – Hodnoty salinity v porostu okurek a mrkve v hloubce 5 cm	127

Obr. 4.87 – Střešní zahrada (30.7.2018).....	127
Obr. 4.88 - Umístění senzorů v substrátu vegetační střechy v hloubce 5 cm (1 - okurky,2 – tymián) 128	
Obr. 4.89 - Půdorysné rozmístění senzorů v substrátu vegetační střechy v hloubce 5 cm a na plechové krytině (1 – okurky, 2 – tymián , 3- plechová krytina).....	128
Obr. 4.90 - Umístění teplotního čidla na plechové krytině sousedního objektu	128
Obr. 4.91 - Průběh teplot v substrátu v hloubce 5 cm (1 -okurky, 2 -tymián), ve srovnání s teplotou venkovního vzduchu a naměřenou teplotou na plechové krytině.....	129
Obr. 4.92 – Umístění teplotního čidla (3) v porostu bylinek.....	129
Obr. 4.93 - Průběh teplot v substrátu v hloubce 5 cm (1- okurky, 2 – tymián), ve srovnání s teplotou venkovního vzduchu a naměřenou teplotou v porostu tymiánu (3 -teplotní čidlo).....	130
Obr. 4.94 - Hodnoty objemové vlhkosti naměřené v hlouce 5 cm pod okurkami a tymiánem (2.8.2018-4.8.2018).....	130
Obr. 4.95 - Plechová a živičná krytina na sousedních objektech (červená barva)	131
Obr. 4.96 - Průběh teplot v substrátu v hloubce 5 cm (1-okurky, 2- tymián), ve srovnání s teplotou venovního vzduchu a teplotou na živičné krytině (19.8.-21.8.2018)	131
Obr. 4.97 - Hodnoty objemové vlhkosti v substrátu v hloubce 5 cm (1-okurky, 2-tymián) (19.8.2018-21.8.2018)	132
Obr. 4.98 - Naměřené hodnoty průměrné rychlosti větru a nárazové rychlosti větru (19.8.21.8.2018)	132
Obr. 4.99 - Naměřené hodnoty globální solární radiace (19.8.-21.8.2018)	133
Obr. 4.100 - Průběh teplot v substrátu v hloubce 5 cm (1- okurky, 2- tymián), ve srovnání s teplotou venkovního vzduchu a teplotou na plechové krytině (21.8.2018-23.8.2018).....	133
Obr. 4.101 - Hodnoty objemové vlhkosti na vegetační střeše v hloubce 5 cm (1-okurky,2- tymián) (21.8.2018-23.8.2018).....	134
Obr. 4.102 - Naměřené hodnoty průměrné rychlosti větru a nárazové rychlosti větru (19.8.21.8.2018)	134
Obr. 4.103 - Naměřené hodnoty globální solární radiace (21.8-23.8.2018)	135
Obr. 4.104 - Umístění senzorů v substrátu vegetační střechy	135
Obr. 4.105 - Půdorysné umístění senzorů na vegetační střeše.....	136
Obr. 4.106 - Průběh teplot v substrátu vegetační střechy v hloubce 20 cm (1 - bez překrytí, 2 - s překrytím zetlelými rostlinami).....	136

Obr. 4.107- Objemová vlhkost v substrátu vegetační střechy v hloubce 20 cm (1- bez překrytí, 2- s překrytím zetlelými rostlinami) v období od 17.12.2018 do 11.4.2019	137
Obr. 4.108 - Průběh teplot v substrátu vegetační střechy v hloubce 20 cm (1- bez překrytí, 2- s překrytím zetlelými rostlinami) v porovnání s teplotami venkovního vzduchu (17.12.2018-11.4.2019)	137
Obr. 4.109 - Průběh teplot v substrátu vegetační střechy v hloubce 10 a 60 cm	141
Obr. 4.110 – Průběh teplot na stropní konstrukci zahradního domku (20.11.2016-1.5.2017)	142
Obr. 4.111 – Stacionární dvojrozměrné teplotní pole – detail atiky	143
Obr. 4.112 - Průběh teplot v substrátu vegetační střechy v hloubkách 5 a 60 cm, průběh teplot v interiéru a na stropní konstrukci v porovnání s průběhem venkovních teplot.....	145
Obr. 4.113 - Průběh teplot během modelového dne.....	146
Obr. 4.114 – Průběh naměřených teplot v exteriéru, interiéru a vypočtených teplot v interiéru	147

Seznam použitých zkratek

UHI – městský tepelný ostrov – z *angl. Urban Heat Island*

SRI - index odrazivosti slunečního záření, *angl. Solar Reflectance Index*

UV - ultrafialové záření

VIS – viditelné záření

IR - infračervené záření

DNA - deoxyribonukleová kyselina

TSI – solární konstanta, *angl. Total Solar Irradiance*

LAI – index listové plochy, *angl. Leaf Area Index*

FAR – fotosynteticky aktivní záření, *angl. Photosynthetically Active Radiation* – zkr. *PAR*

PPFD - fotosyntetická hustota fotonového toku, *angl. Photosynthetic Photon Flux Density*

AWC - využitelná vodní kapacita (*angl. available water capacity*)

CO₂ - oxid uhličitý

H₂O – voda

ATP - adenosintrifosfát

CAM - *angl. Crassulacean Acid Metabolism*

NaCl - chlorid sodný

CaCO₃ – uhličitan vápenatý

KCl – chlorid draselný

MgCl₂ – chlorid hořečnatý

NH₃ - amoniak

pH – vodíkový exponent

HDPE – vysokohustotní polyetylen

6 Seznam příloh

Příloha č. 1 – Ukázka z naměřených dat – datalogger GlobeLog (7.6.-15.6.2014)

Příloha č. 2 – Ukázka z naměřených dat - datalogger GlobeLog (7.1.-11.1.2015)

Příloha č. 3. – Ukázka z naměřených dat – datalogger GlobeLog (4.1.-16.1.2017)

Příloha č. 4 – Ukázka z naměřených dat – meteostanice Em50 (4.1.-16.1.2017)

Příloha č. 5 - Ukázka z naměřených dat – datalogger GlobeLog (26.7.2019)

Příloha č. 6. – Ukázka z naměřených dat – meteostanice Em50 (26.7.2019)

Příloha č. 7 – Protokol o výpočtu „Dvourozměrné stacionární pole teplot a částečných tlaků vodní páry“

Příloha č. 8 – Protokol o výpočtu „Tepelná stabilita místnosti v letním období“

Příloha č. 9 – Meteostanice Em50 (foto)

Přílohy kromě přílohy č. 9 jsou umístěny v samostatné složce. Pro velký objem naměřených dat nebylo možné všechna data umístit do příloh. Kompletní data jsou k dispozici u autora.

Příloha č. 9

