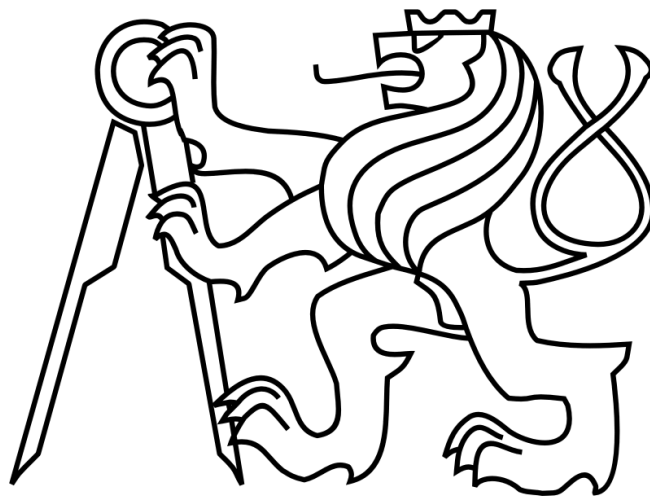


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická – Katedra měření

Studijní program – Inteligentní budovy



Diplomová práce

Optimalizace automatizovaných systémů tvorby vnitřního prostředí pro pěstování rostlin

Optimizing automated systems for creating indoor environments for plant cultivation

Autor

Vedoucí diplomové práce

Praha

Bc. Viviana Ludvíková

Ing. arch. Vojtěch Mazanec, Ph.D.

2024

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Ludvíková** Jméno: **Viviana** Osobní číslo: **476631**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra měření**
Studijní program: **Inteligentní budovy**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Optimalizace automatizovaných systémů tvorby vnitřního prostředí pro pěstování rostlin

Název diplomové práce anglicky:

Optimizing automated systems for creating indoor environments for plant cultivation

Pokyny pro vypracování:

Provedte rešerši současného stavu poznání v oblasti monitorování a řízení u automatizovaných systémů pro tvorbu vnitřního prostředí vhodného pro pěstování rostlin. Součástí rešerše bude seznam technických parametrů a způsobů jejich měření (jakožto i parametry prostředí), které je nutné pro pěstování udržovat. Provedte rozbor současně provozovaného systému ‚Metrorost‘, jednak z hlediska aplikovaných technologií, jednak způsobu řízení. Využijte naměřená data a navrhnete jeho optimalizaci v oblasti využitých monitorovacích prvků a algoritmů řízení. Stanovte vhodná optimalizační kritéria (s ohledem na témata ekonomie a ekologie provozu, kvality prostředí) a vyhodnoťte dopad případných úprav na vhodném modelu.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Raviv, Michael, J. Heinrich Lieth, a Asher Bar-Tal. Soilles Culture - Theory and practice. second. Elsevier, 2019.
- [2] Kozai, Toyoki, a Genhua Niu. An Indoor Vertical Farming System for Efficient Quality Food Production. Elsevier, 2016.
- [3] Katalogové listy firem

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. arch. Vojtěch Mazanec, Ph.D. katedra technických zařízení budov FSv

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **15.02.2024**

Termín odevzdání diplomové práce: **24.05.2024**

Platnost zadání diplomové práce:

do konce letního semestru 2024/2025

Ing. arch. Vojtěch Mazanec, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomantka bere na vědomí, že je povinna vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studentky

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci vypracovala samostatně a že jsem uvedla veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze, dne 20.5.2024

.....

Viviana Ludvíková

Poděkování

Chci velice poděkovat své rodině, mamce, tátovi a sestře, kteří mě po celou dobu trvání studia trpělivě podporují. Další vřelé poděkování, patří mému vedoucímu práce, panu Ing. arch. Vojtěchu Mazanci, Ph.D., za jeho trpělivý, vstřícný a osobitý přístup k naší spolupráci. Velké díky patří Mgr. Ing. Josefu Haberovi, bez jehož ochotné pomoci bych nezvládla dokončit výzkumnou část mé práce na takové úrovni. V neposlední řadě náleží velké díky i mně samotné, za úsilí, které jsem vynaložila a odhodlání, s jakým magisterské studium dokončuji. Děkuji.

Abstrakt

Tato práce se zabývá technologií interiérového pěstování rostlin, analýzou a optimalizací parametrů ovlivňujících růst rostlin v uzavřeném prostředí, kde je pro optimalizaci řízení vytvořen model využívající učení neuronové sítě.

Teoretická část práce poskytuje kontext a význam studovaného tématu. Zahrnuje historický vývoj alternativního pěstování rostlin, funkci rostlin v interiéru a detailní popis parametrů jako jsou teplota, pěstební medium, nebo světelné podmínky. V další části se pak práce zaměřuje na možnosti měření a kontrolu těchto parametrů s pomocí senzorů a akčních členů.

Praktická část práce popisuje konstrukční řešení a technický stav systému Metrorost. Po analýze technického stavu následuje kapitola věnovaná analýze dat, získaných právě měřeními v prostředí Metrorost. Tato analýza poskytuje vhled do současného stavu systému a odhaluje oblasti pro zlepšení. V návaznosti na to jsou navrženy optimalizace systému. Pozornost je obzvlášť věnována optimalizaci řízení vytápění, která je realizována s pomocí neuronové sítě. Vytvořený model umožňuje pohled na chování systému v případě jiných regulačních podmínek, bez nutnosti zkoušet tyto podmínky přímo v provozu systému. Na závěr je právě tento model využit k simulaci chování na základě nově vytvořených podmínek. Výsledky tohoto chování jsou pak porovnány s výsledky, které máme ze skutečného provozu.

Klíčová slova

Interiérové pěstování rostlin, Regulace vnitřního prostředí, Řízení, Optimalizace, Neuronová síť

Abstract

This thesis deals with the technology of indoor plant cultivation, the analysis, and optimization of parameters affecting plant growth in a closed environment, where a model utilizing neural network learning is created for optimization control.

The theoretical part of the thesis provides context and significance of the studied topic. It includes the historical development of alternative plant cultivation, the function of plants indoors, and a detailed description of parameters such as temperature, growth medium, and light conditions. The next part focuses on the possibilities of measuring and controlling these parameters using sensors and actuators.

The practical part of the thesis describes the design solution and the technical state of the Metrorost system. Following the analysis of the technical state, there is a chapter dedicated to the analysis of data obtained from measurements in the Metrorost environment. This analysis provides insight into the current state of the system and reveals areas for improvement. Subsequently, system optimizations are proposed. Special attention is given to the optimization of heating control, which is implemented using a neural network. The created model allows for an understanding of the system's behavior under different regulatory conditions without the need to test these conditions directly in the system's operation. Finally, this model is used to simulate behavior based on newly created conditions. The results of this behavior are then compared with the results from actual operation.

Keywords

Indoor plant environment, Regulation of the internal environment, Controlling, Optimization, Neural Network

Seznam zkratek a symbolů

PAR	Fotosynteticky aktivní záření (photosynthetic activ radiation)
ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav
Ppm	Počet částic na milion (parts per million)
VOCs	Těkavá organická látka (volatile organic compound)
r.h.	Relativní vlhkost (relative humidity)
Δt	Změna teploty obecně
Δt_s	Změna teploty substrátu
Δt_i	Změna teploty interiéru
Δt_p	Změna teploty v podhledu
Δt_v	Změna teploty vody
n.s.	Neuronová síť
CO ₂	Chemická značka oxidu uhličitého
H ₂ O	Chemická značka vody
f-ce	Funkce

Obsah

1. Úvod.....	8
2. Technologie interiérového pěstování.....	10
2.1. Historie.....	10
2.2. Funkce rostlin v interiéru	11
2.3. Parametry vnitřního pěstování rostlin	12
2.3.1. Pěstební médium	12
2.3.2. Zavlažování.....	14
2.3.3. Teplota.....	16
2.3.4. Vlhkost vzduchu a obsah vody v sytkém médiu (půdě)	18
2.3.5. Kvalita vzduchu.....	19
2.3.6. pH vody (půdy).....	20
2.3.7. Obsah nutrientů ve vodě (půdě).....	20
2.3.8. Proudění vzduchu	21
2.3.9. PAR (Světlo)	21
3. Regulace parametrů vnitřního prostředí	24
3.1. Měření teploty	24
3.1.1. Senzory teploty	24
3.1.2. Akční člen	26
3.2. Měření vlhkosti vzduchu	27
3.2.1. Senzory vlhkosti vzduchu	27
3.2.2. Akční členy	29
3.3. Měření vlhkosti substrátu	29
3.3.1. Senzory vlhkosti substrátu	29
3.4. Měření hodnoty CO ₂ ve vzduchu	30
3.4.1. Senzory kvality ovzduší	30

3.4.2.	Akční člen	31
3.5.	Měření intenzity osvětlení	32
3.5.1.	Senzory.....	32
3.5.2.	Akční člen	33
3.6.	Měření hodnoty pH.....	33
3.7.	Měření proudění vzduchu	33
4.	Metrorost – popis současného technického stavu	34
4.1.	Konstrukční řešení.....	35
4.2.	Instalované technologie a vnitřní vybavení Metrorostu.....	40
4.2.1.	Osvětlení	40
4.2.2.	Substrát a rostliny	41
4.2.3.	Zavlažování.....	42
4.2.4.	Vytápění	43
4.2.5.	Senzory a odtokové otvory	43
5.	Analýza získaných dat.....	44
5.1.	Hodnoty CO ₂	44
5.2.	Teplota vzduchu	45
5.3.	Vlhkost vzduchu	48
5.4.	Teplota substrátu	49
5.5.	Vlhkost substrátu, zavlažování a teplota vody	51
5.6.	Osvětlení	52
5.7.	Spotřeba elektrické energie	53
5.8.	Analýza pohledem.....	54
6.	Optimalizace systému	57
6.1.	Díličí navrhované optimalizace	58
6.1.1.	Volba vhodného osvětlení	58

6.1.2.	Optimalizace režimu osvětlení	59
6.1.3.	Zastínění rostlin v noci od veřejného osvětlení	60
6.1.4.	Umístění odtokových otvorů.....	60
6.1.5.	Řízení vytápění	61
6.2.	Diskuse k dílčím navrhovaným optimalizacím	62
7.	Optimalizace řízení vytápění.....	64
7.1.	Tvorba modelu	64
7.2.	Hodnocení vytvořeného modelu	80
7.3.	Diskuse	80
8.	Závěr.....	82
9.	Seznam použité literatury	84
10.	Seznam obrázků	91
11.	Seznam tabulek.....	93

1. Úvod

Od roku 1984 známe pojem biofilie, který popisuje lidskou potřebu sdružovat se s jinými formami života, a existuje mnoho studií potvrzujících pozitivní vliv přírody na psychické zdraví. Přesto lidé v moderním světě tráví více než 80 % svého času uvnitř budov. V poslední době se stále častěji hovoří o řízeném pěstování rostlin jako moderním způsobu, jak integrovat přírodu do městského prostředí. Tato praxe zahrnuje jak okrasné systémy, jako jsou zelené fasády a střechy, tak i výnosné hydroponické pěstírny. S rostoucím důrazem na udržitelnost a zlepšování kvality životního prostředí se technologie řízeného pěstování rostlin stávají stále důležitějšími.

Tato diplomová práce si klade za cíl prozkoumat různé aspekty a technologie spojené s procesem interiérového pěstování, analyzovat současný technický stav konkrétního systému a navrhnout možné optimalizace pro zvýšení efektivity a udržitelnosti.

V začátku práce se budeme zabývat historií interiérového pěstování a významem rostlin v interiéru, následně budou popsány klíčové parametry, které ovlivňují růst rostlin. V další kapitole se práce zaměří na způsoby regulace těchto parametrů pomocí moderních technologií, včetně různých senzorů a akčních členů, které umožňují udržovat optimální podmínky pro růst rostlin.

V praktické části bude analyzován současný technický stav systému Metrorost, který využívá pokročilé technologie pro interiérové pěstování. Bude popsáno konstrukční řešení a instalované technologie, včetně osvětlení, sensoriky, systému zavlažování a vytápění. Na základě analýzy získaných dat budou identifikovány klíčové oblasti pro zlepšení a budou navrženy konkrétní optimalizační opatření.

Závěrečná část práce se zaměří na optimalizaci řízení vytápění pomocí neuronových sítí, což zahrnuje tvorbu funkčního modelu, jeho následné ověřování a aplikaci. Výsledky této optimalizace budou porovnány s původním systémem, což umožní zhodnotit přínosy navržených změn.

Cílem této diplomové práce je přispět k lepšímu porozumění a rozvoji technologií interiérového pěstování rostlin, s důrazem na zlepšení efektivity a udržitelnosti těchto systémů.

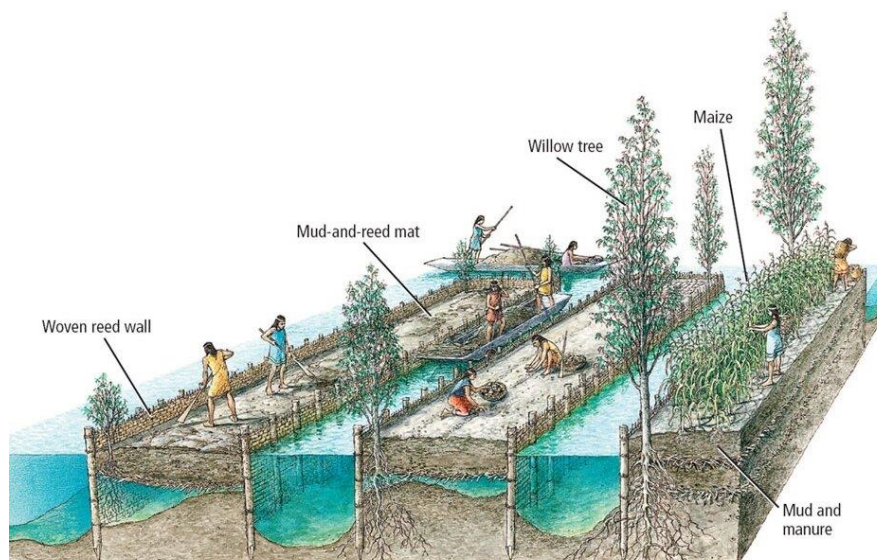
2. Technologie interiérového pěstování

Způsobů, jak rostliny pěstovat ve vnitřním prostředí je mnoho a v první řadě je zapotřebí si nadefinovat, co přesně je myšleno interiéroým pěstováním rostlin v rámci této práce. Nadcházející kapitola 2.1 *Historie* uvádí čtenáře do historie a vývoje alternativního pěstování, které je předchůdcem vnitřního pěstování rostlin, jak ho známe dnes. Po ní následuje rozvinutější kapitola 2.2. *Funkce rostlin v interiéru*.

2.1. Historie

První známé pokusy o alternativním pěstování rostlin probíhaly před 4000 lety ve starověkém Egyptě. Na nástěnných malbách chrámu v Beir el Bahari je možné vidět, jak Egypťané stěhovali vzrostlé stromy zasazené v květináčích, ve kterých byly následně pěstovány v královských sídlech. Právě v důsledku stěhování na velké vzdálenosti se dá předpokládat, že byla půda nahrazena lehčím médiem, které usnadnilo stěhování [1].

Další velmi zajímavou a přínosnou alternativu známe z let 1200–1400 našeho letopočtu, kdy v Mexiku vznikaly tzv. chinampy (Obrázek 1). Jednalo se o uměle vytvořené ostrovy, které pluly na jezeru a sloužily jako plocha pro pěstování rostlin. Šlo o stále vlhkou půdu, kterou nebylo zapotřebí zavlažovat. Kořeny některých rostlin mohly prorůst celou tloušťkou půdy a růst přímo do vody [10,11]. Chinampy by se daly označit za předchůdce dnešních systémů známých jako „deep water culture“ [2].



Obrázek 1 Chinampy – Aztécké plovoucí zahrady [62]

O pár let později, v 17. století, docházelo k rozsáhlejšímu stěhování exotických rostlin do Evropy, kde byly pěstovány v tzv. oranžériích. Ty měly zajistit kvalitní plody exotického ovoce pro bohaté obyvatele. Jednalo se v podstatě o skleníky, ve kterých byly dovezené rostliny a stromy pěstovány v nádobách. Oranžerie v zámku Pillnitz v Drážďanech například chránila rostliny před chladem pouze v zimě. V létě byly rostliny stěhovány ven, a vystaveny tak přímému slunečnímu svitu [1].

2.2. Funkce rostlin v interiéru

Některé z instalací v historii vznikaly za účelem zkrášlit prostředí, ve kterém lidé žili a jiné vznikaly z čistě praktického důvodu. Stejně je tomu i v dnešní době, kdy se do interiéru snažíme vnést plně řízený systém pěstování rostlin. Kromě toho, že jsou rostliny krásné, a jak mnoho výzkumů dokazuje, mají svou přítomností pozitivní vliv na lidskou psychiku[1; 2], mohou také aktivně plnit svou funkci při tvorbě vnitřního prostředí budov a předcházet tak vzniku syndromu Sick Building [3].

Jednou z možností, jak rostliny aktivně využít ve vnitřním prostředí budovy je biofiltrace. Biofiltr zajišťuje čištění vzduchu nebo vody za pomoci mikroorganismů [4; 5]. Botanická bio-filtrace je speciálním druhem a můžeme se v tomto smyslu setkat s pojmem **fytoremediace**. To je souhrnný název pro metodiky (fytoakumulace, fytodegradace, fytovolatilizace, fytostabilizace), které rostliny k odstranění škodlivin využívají [6; 7].

Dalším přínosem rostlin v interiéru mohou být jejich plody. Pro tyto účely většinou v domácnostech pěstujeme byliny jako je bazalka nebo pažitka. Byliny by stejně tak mohly být pěstovány například v kancelářích nebo školách a sloužit jako zdroj pro dochucení oběda během obědové pauzy, případně v místní jídelně/kantýně.

Dalším přínosem rostlin i v tomto typu instalace během letních měsíců by mohla být jejich schopnost snižovat teplotu vzduchu. To je způsobeno přirozenou vlastností rostlin, kterou nazýváme transpirace. Při ní dochází mimo jiné k odpařování vody z povrchu listů, přičemž je odebíráno teplo z okolí [4]. Tato vlastnost nám současně v zimě může vlhkost vzduchu zvyšovat [3].

2.3. Parametry vnitřního pěstování rostlin

Alternativní přístupy, které využívali naši předchůdci, společně s technologickým rozvojem, rostoucími požadavky společnosti a znalostí nutričních požadavků dali za vznik interiérovému a plně řízenému pěstování rostlin. Informace o nutričních požadavcích začali vědci propagovat až v 19. století a k jejich upřesnění pak došlo v první polovině 20. století. Po roce 1970 se výzkumy začaly věnovat studiu pěstebních médií v souvislosti s potřebným množstvím nutrientů a kyslíku [1].

Tato kapitola se věnuje jednotlivým parametrům, které na rostlinu působí a jakým způsobem ji ovlivňují. Jejich hodnoty a vzájemné kombinace jsou důležité především pro komerční pěstování. Vhodnou volbou jsme schopni ovlivnit rychlost růstu, morfologii rostliny i kvalitu plodu.

2.3.1. Pěstební médium

Zavlažování prostorově nevymezené oblasti, například na poli, se zásadně liší od způsobu, jakým budeme zavlažovat uzavřený systém. Aby bylo v uzavřeném systému zajištěno dostatečné provzdušnění půdního média a odtok přebytečné vody, jeho objemová hmotnost by měla být menší v porovnání s objemovou hmotností klasické zemědělské půdy [5].

V Tabulce 1 je uveden přehled nejpoužívanějších materiálů na trhu a jejich dělení [13, 14]. Každý z těchto materiálů má specifické fyzikální (objemová hmotnost, frakce, pórovitost, distribuce pórů, smáčivost, vzlínavost, adsorpce, ...) a chemické (vodivost, interakce mezi kationty a anionty, dostupnost živin, ...) vlastnosti. Na základě těchto charakteristik jsou materiály často kombinovány ve směsích podle žádaných výsledných vlastností [5]. Některé z materiálů je možné mezi sklizněmi dezinfikovat, zbavit je tak nežádoucích mikroorganismů a opětovně je použít [1].

Tabulka 1 Dělení a příklady nejpoužívanějších materiálů pro substráty

Anorganické	Přírodní nemodifikované materiály	písek
		Tuf
		Pemza
	Zpracované materiály	perlit
		Vermikulit
		Granule keramzitu
		Zeolit
		Pěnové sklo
		Minerální vlny
	Skelná vata	
Syntetické organické	Polyurethan	
	Polystyren	
	Polyester fleece	
Organické		Rašelina
		Kokosové vlákno
		Kůra
	Materiály na bázi dřeva	Piliny
		Dřevěné vlákno
		Dřevěná štěpka
	Kompostované materiály	Organický odpad a
	Anaerobní digestát	vedlejší organické produkty
		Biouhel
		Rýžové slupky

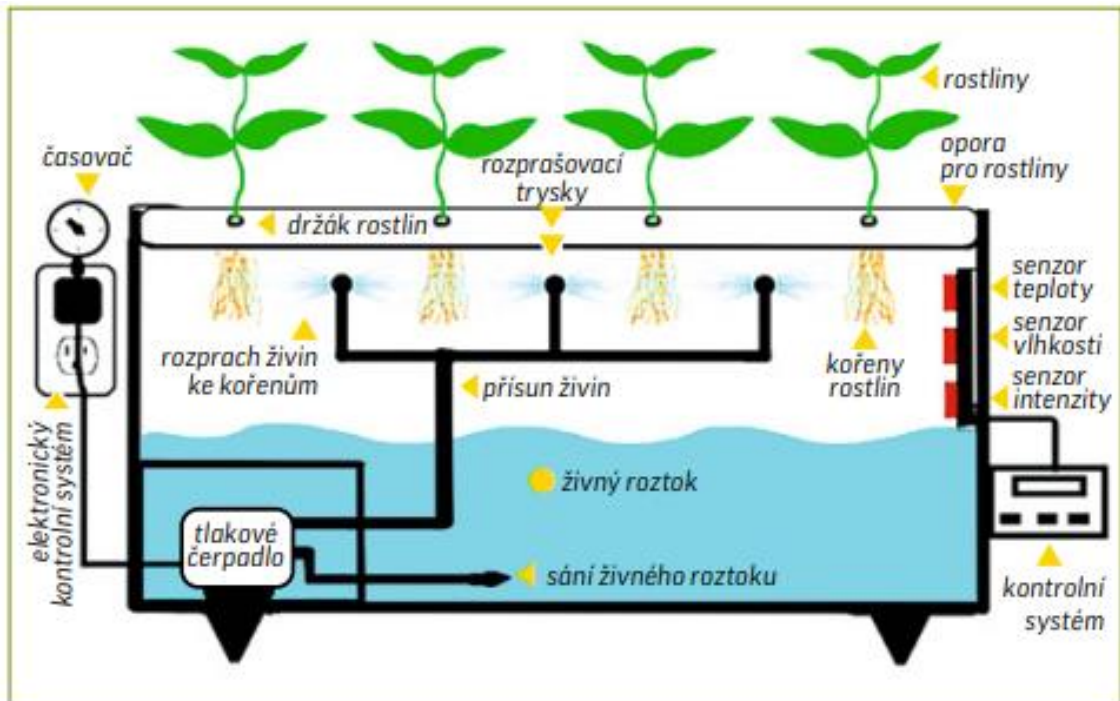
2.3.2. Zavlažování

Způsob zavlažování se odvíjí od toho, v jakém mediu je rostlina pěstovaná. Pokud je pěstovaná v médiu, které je inertní, jedná se o tzv. **hydroponii**. To znamená, že jediným zdrojem nutrientů je pro rostlinu dodaná voda. Obvykle je provozována ve skleníku nebo plně v interiéru. Hydroponie je skvělý nástroj pro zjištění nutričních požadavků jednotlivých druhů rostlin. Znalost těchto potřeb v kombinaci s vývojem technologií, hnojiv i substrátů pak umožňuje efektivní pěstování i na komerčním trhu nebo pro farmaceutické účely [1]. V hydroponických systémech může být voda dodávána různými způsoby. Známé jsou systémy deep-flow, kdy jsou rostliny umístěny na hladině vody hluboké nádrže. Dalším přístupem je tzv. NFT (nutrient film technique). Při této metodě jsou kořeny rostlin v korytu, kde stále cirkuluje tenká vrstva živného roztoku [2].

Další podobný pojem, s jakým se můžeme setkat je **bioponie**, která je specifická použitím pouze přírodních zdrojů požadovaných nutrientů [6]. Konkrétním příkladem je **aquaponie**, která spojuje chov ryb s hydroponickým pěstováním rostlin – tedy akvakulturu a hydroponii. Jde o symbiotické spojení ryb, rostlin a bakterií. Bakterie rozkládají odpadní látky vylučované rybami a zpřístupňují tak obsažené nutrienty rostlinám. Systém je uzavřený a voda v něm neustále cirkuluje. Jedná se proto o velice ekologický způsob jak chovu ryb, tak pěstování rostlin [16; 17].

Dalším přístupem je **aeroponie** (Obrázek 2). Ta se odlišuje způsobem, jakým je voda rostlinám dodávána. Kořenový systém rostlin je volně ve vzduchu a je zavlažován vodou v podobě mlhy. Tímto způsobem je rostlinám zajištěn i dostatečný přístup vzduchu [18; 19].

Jiný přístup zvolíme, pokud jsou rostliny zasazeny v substrátu. V tomto směru známe mnoho technik, využívaných i v klasickém zemědělství. Krátce zmíním nejznámější přístupy.



Obrázek 2 Technologie aeroponie s elektronickým kontrolním systémem [46]

Typ zavlažování, které běžně vidíme na našich polích je sprinklerové neboli postřikové zavlažování. Může být realizováno vícero způsoby, na velkých polích, ve sklenících i na menších záhoncích. Nevýhodou těchto systémů je vysoká míra odpařování do vzduchu. Vzniká tak až 35 % ztráta v důsledku evaporace a foukání větru. Alternativou jsou nízkotlaké sprinklerové systémy, které dodávají vodu z menší výšky a nerozprašují jí tolik, jako vysokotlaké systémy [7].

Mezi nízkotlaké systémy se zařazuje i kapkové neboli mikro-zavlažování. V těchto systémech je voda dodávána přímo k rostlinám nebo k jejich kořenům. Jedná se obvykle o hadice s otvory, které jsou položeny na povrchu nebo mohou být umístěny i do substrátu. Jedná se velmi efektivní způsob, který redukuje evaporaci, protože je voda dodávána přímo k rostlině. Proto je tento systém vhodný i pro distribuci hnojiv [21, 22].

Nejstarší a neprimitivnější metodou zavlažování je povrchové, tzv. zaplavovací nebo brázdové zavlažování. Dochází při něm k menší míře odpařování, nicméně velké ztráty jsou způsobeny odtokem a vsakem mimo požadovanou oblast. Pro zvýšení efektivity této metody jsou zavlažované povrchy tvořeny ve více úrovních, aby voda stékala gravitačně. Protečená voda může být zachycována a opětovně využita. Aby se vůbec předešlo zbytečnému přetoku vody, aplikuje se někdy nárazové zaplavování v intervalech [8].

Na základě vybraného způsobu zavlažování pak volíme, jak budeme zavlažování řídit. Nejjednodušší a nejčastěji používané bude zavlažování v nastavených časových intervalech. V případě sofistikovaného a kompletně řízeného systému se pak nabízí zavlažování na základě změřené vlhkosti půdy. Pokud však rostliny mikro-zavlažujeme, musíme se ptát, kolika senzory a kde vlhkost měřit. Výhodou tohoto systému může být další úspora vody, na druhou stranu však vyžaduje řízení a zdroj elektrické energie [9].

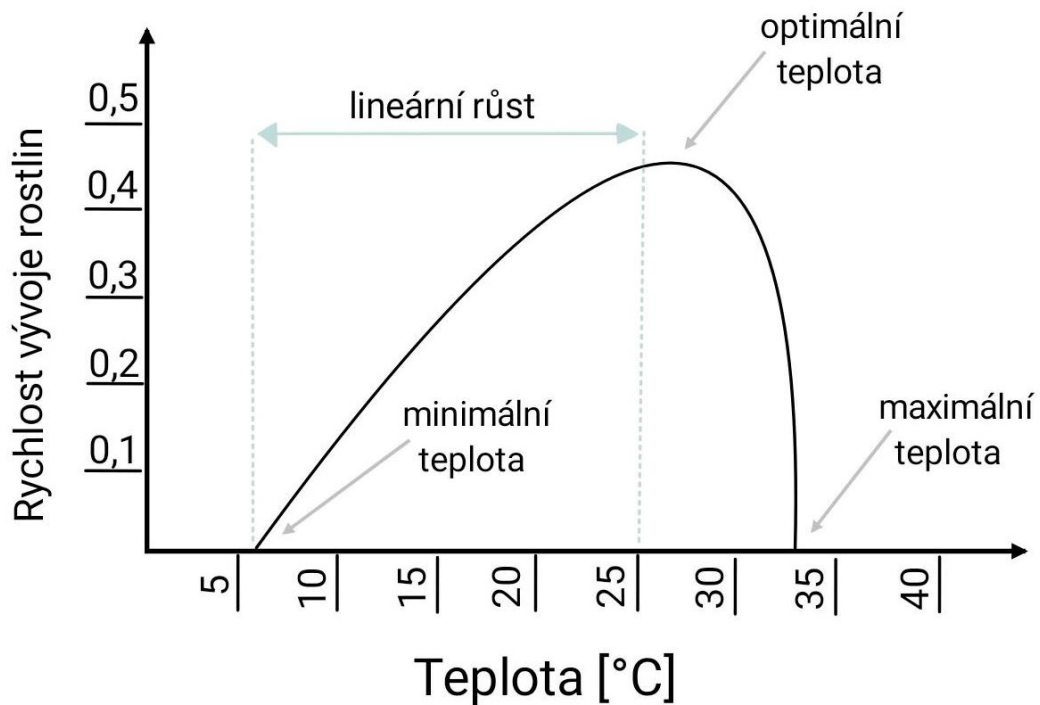
2.3.3. Teplota

Pro rostliny je důležitá jak teplota vzduchu, tak teplota půdy zajišťující správnou funkci kořenů. Rozlišujeme rostliny eurytermní, které snášejí rozsah teplot až 60 °C, mezi ně patří většina suchozemských rostlin. Rostliny, které jsou citlivé na změny teplot nazýváme stenotermní a takové snášejí jen úzký rozsah teplot. Požadovaná teplota se navíc liší nejen pro různé druhy rostlin, ale závisí také na její růstové fázi, v jaké se nachází, zda se jedná o fázi klíčení, růstu nebo tvorby plodů [10].

Vysoké teploty způsobují přehřátí organismu, které rostliny dostane do stavu tzv. strnulosti. Rostlina pak přestává normálně růst, může dojít ke zbarvení poškozené části, změnám tvaru orgánů nebo opadávání listů. Nejcitlivější jsou mladá pletiva rostlin, kořeny, hlízy a cibule. Příliš nízké teploty jsou pro rostliny také nežádoucí. Rozlišujeme poškození chladem a poškození mrazem. Poškození chladem inaktivuje enzymy tylakoidní membrány, ve kterých probíhá fotosyntéza, snižuje se intenzita dýchání, zpomaluje se příjem vody a živin, až se zastavuje růst rostliny. Nejcitlivější jsou pochopitelně tropické rostliny, které nelze otužit. Po vystavení chladu listy a plody rostliny žloutnou nebo hnědnou a nalézáme na nich skvrny a léze [10].

Každý rostlinný druh má své optimum, minimum a maximum pro požadovanou teplotu vzduchu. Obecně však závisí na průměrné denní teplotě vzduchu. Lze tak říct, že rostlina, která bude pěstovaná při teplotách 21 °C/16 °C v intervalech 12 hod/12hod, bude dosahovat stejných výsledků jako rostlina, která bude pěstována při konstantní teplotě 18,5 °C [11].

V obecném grafu na Obrázku 3 je vidět lineární růst v rozmezí teplot přibližně 5 °C – 25 °C. Po překročení optimální teploty křivka prudce klesá a růst rostliny je omezen při 33 °C.



Obrázek 3 Vliv teploty vzduchu na rychlost vývoje rostliny [11]

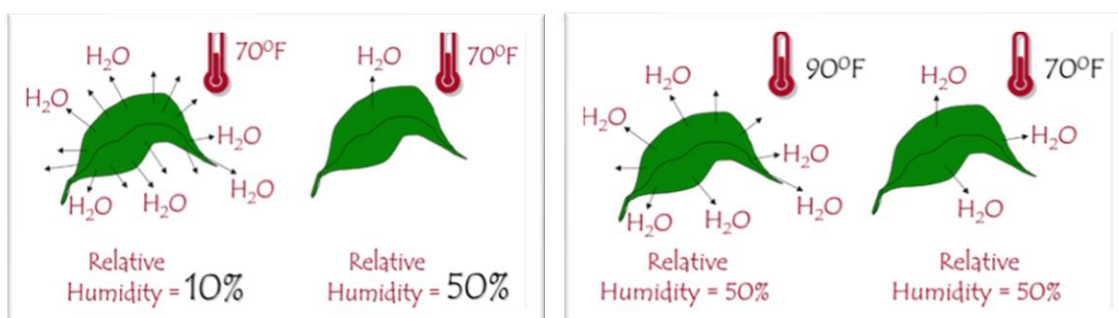
Na Michigan State University byl proveden výzkum s cílem odhadnout druhově specifickou minimální teplotu. Rostliny byly na základě výsledků rozděleny do tří skupin podle jejich reakce, jak je uvedeno v následující Tabulce 2 [11]:

Tabulka 2 Dělení rostlin podle citlivosti na chlad

	T_b (Base temperature)	Průměrná denní teplota
Odolné proti chladu	< 4 °C	16–18 °C
Snášenlivé na chlad	4–7 °C	18–21 °C
Citlivé na chlad	> 8 °C	21–24 °C

2.3.4. Vlhkost vzduchu a obsah vody v sytkém médiu (půdě)

Většina pokojových rostlin pochází z tropického prostředí, kde jsou zvyklé na vysokou hodnotu vzdušné vlhkosti. Ve sklenících, kde je to možné, se relativní vzdušná vlhkost pohybuje od 50 % výš, v domácnostech je hodnota pochopitelně nižší. Vlhkost pod 20 % je považována za nedostatečnou. Při nižší hodnotě relativní vlhkosti vzduchu rostliny odpařují větší množství vody než při vyšší hodnotě za stejné teploty. Pokud zvýšíme okolní teplotu, potřeba vody opět vzroste. Oba případy můžeme vidět na Obrázku 4 [12].



Obrázek 4 Při stejné teplotě rostlina vylučuje více vody do vzduchu při nižší relativní vlhkosti a současně při stejné relativní vlhkosti rostlina vylučuje více vody do vzduchu při vyšší teplotě [12]

V případě nedostatečné vlhkosti ve vzduchu dochází k poškození suchým vzduchem. Dojde ke scvrknutí plodů a vadnutí rostliny. I opačný stav rostlinám škodí, a to nadměrná vlhkost vzduchu a půdy. Na rostlině mohou začít vznikat zduřeniny a edémy [10].

Živá rostlina obsahuje přibližně 90 % vody. Převážná většina rostlin získává vodu především pomocí kořenů z půdy. Některé rostliny mají tzv. vzdušné kořeny, nižší rostliny pak vstřebávají vodu celým povrchem těla. Ideální obsah vody v zóně kořenů je 60–80 % objemu půdních pórů. Při vyšším obsahu dojde k zamokření a příčinou poškození rostliny je nedostatečné zásobení kyslíkem. 20–40 % objemu pórů v půdě by tak měl vyplňovat vzduch [10]. Odhadnout správné množství vody není jednoduchý úkol [9]. Potřeba vody se odvíjí od druhu a velikosti rostliny, velikosti pěstební nádoby, světelné intenzity a teploty vzduchu [12].

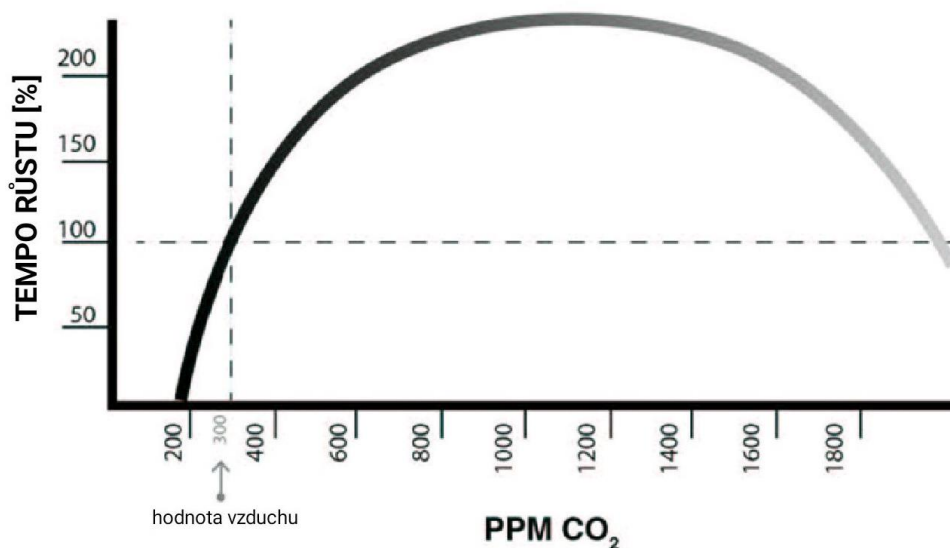
2.3.5. Kvalita vzduchu

Aby rostliny mohly uskutečňovat fotosyntetický proces, při kterém vyrábějí cukry, potřebují dostatek oxidu uhličitého (CO_2), vody (H_2O) a světla. [13] Při nedostatku CO_2 se snižuje intenzita fotosyntézy, nadbytek pak zpomalí až zastaví růst rostlin a jejich dýchání [10] (Obrázek 5). Množství CO_2 , které rostlina potřebuje závisí na ostatních aspektech jako je světlo, teplota okolí, množství nutrientů, vlhkost vzduchu, část dne, roční období nebo růstová fáze rostliny [14].

S ohledem na potřebu CO_2 rozlišujeme dvě skupiny rostlin podle toho, co je prvním produktem jejich fotosyntézy. Jedná se o tzv. C_3 rostliny, které jsou více citlivé na hladinu CO_2 ve vzduchu. Druhou skupinou jsou C_4 rostliny, kam patří například většina druhů trav. V případě že zvýšíme hladinu CO_2 na 800–1000 ppm, zvýší se produkce C_3 rostlin o 40 %–100 % a C_4 rostlin o 10 % - 25 %. V atmosféře se v současnosti koncentrace CO_2 pohybuje kolem 420 ppm [14].

Co se týká kvality vzduchu, další schopností rostlin je redukovat těkavé organické sloučeniny, které jsou z velké části antropogenního původu [3]. VOCs jsou emitovány jako plyny z pevných nebo kapalných látek. V interiéru se může jednat o emise z barev, lepidel, čistících prostředků, stavebního materiálu nebo barev v tiskárnách [15].

2.3.6. pH vody (půdy)



Obrázek 5 Závislost množství CO₂ na růstu rostliny [13]

Hodnota pH ovlivňuje příjem živin rostlin. Vlivem nevhodného pH se některé ionty mohou srážet a tím se stávají špatně (nebo vůbec) vstřebatelné pro rostlinu. Podle nároků rostlin na kyselost nebo zásaditost půdy rozlišujeme tři skupiny: *Acidofilní* rostliny, které vyžadují kyselé půdy s pH <6,7, *neutrofilní* rostliny s pH ±7 a *bazofilní* rostliny, které vyžadují zásadité půdy s pH >7,2. Hodnota pH vyšší než 9 nebo nižší než 3 způsobuje úhyn rostlin [10].

2.3.7. Obsah nutrientů ve vodě (půdě)

Rostliny mají limitovanou potřebu nutrientů a může tak dojít k „předávkování“. Rozpuštěné hnojivo začne v substrátu vytvářet soli, které ničí kořeny rostlin tím, že z nich odstraňují vodu. Přebytečné soli se hromadí jako bílá krusta na povrchu substrátu nebo po okrajích pěstební nádoby. V zimě, kdy jsou méně kvalitní světelné podmínky je potřeba nutrientů nižší než v létě, kdy rostlina aktivně roste [12].

2.3.8. Proudění vzduchu

Proudění vzduchu je pro rostliny důležitý faktor. Bez něho nejsou schopny správně vstřebávat živiny. Proudění vzduchu zajišťuje obměnu složení vzduchu v bezprostředním okolí rostliny a tím je zajištěn přísun potřebných plynů. Umožňuje odpařování vody z povrchu listů při transpiraci [16], čímž dochází k ochlazení povrchu listů a okolí [10].

2.3.9. PAR (Světlo)

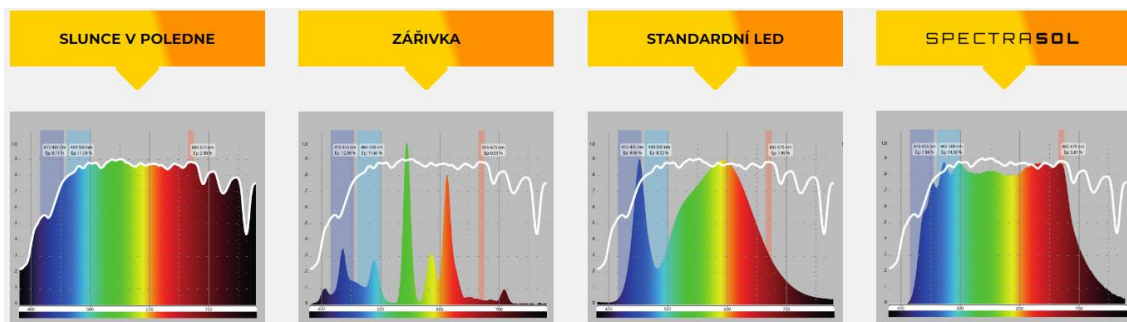
Za *světlo* považujeme viditelnou část elektromagnetického záření o vlnové délce v intervalu 380–780 nm. Rostliny vstřebávají jen část světla, které potřebují k procesu fotosyntézy. Jedná se o záření s vlnovou délkou 400–700 nm a je definováno jako PAR (photosynthetic activ radiation = fotosynteticky aktivní záření). PAR se hodnotí energetickými nebo fotonovými jednotkami. Energetickou jednotkou toku PAR je watt. Fotonovou jednotkou toku je mmol/s, dále pak intenzita ozáření (fotonová ozářenost) mmol/s.m² a (zpravila denní) dávka ozáření mol/m². Výpočty osvětlovacích soustav se běžně provádějí ve fotometrických jednotkách, a proto se někdy uvádějí přepočítávací koeficienty [17].

Intenzita PAR určuje rychlost fotosyntézy a tím množství absorbovaného CO₂. Rychlost fotosyntézy je však v určitém bodě omezena a dosahuje saturační úrovně. Účinnost fotosyntézy je vyšší při malých úrovních ozáření. Pro celkový růst rostliny je důležitá celková denní dávka PAR [17].

Tabulka 3 Stručný přehled typů záření a jejich charakteristik [17]

	Sluneční záření	Viditelné záření	Fotosyntetické záření (PAR)
Měřicí zařízení	Pyranometr, solarimetr	luxmetr	μmolmetr
Vlnová délka	300–3000 nm	380–780 nm	400–700 nm
Jednotka	J.m ⁻² .s ⁻¹ W.m ⁻²	lux	mmol.m ⁻² .s ⁻¹
vliv	Celkové klima	Lidské oko	Růst rostlin

Spektrální citlivost rostlin je jiná než citlivost lidského oka. Větší citlivost se projevuje na okrajích viditelného spektra. Jedná se o barvu modrou do 450 nm, a na opačném konci červenou s maximem vlnové délky 660 nm. Při záření v červené barvě je účinnější fotosyntéza a rostlina více roste. Modrá část světla pak zajišťuje kvalitní morfologii rostlin, více odnoží a množení listů [17].



Obrázek 6 Spektra záření různých zdrojů [40]

Pokud rostliny nemají dostatečné množství světla, přestávají růst, stonky mezi listy (tzv. internodia) jsou delší, nové listy jsou menší, mají světlejší barvu a starší listy umírají [12]. Podle množství světla, které rostliny vyžadují, je možné je rozdělit, jak je uvedeno v Tabulce 4:

Tabulka 4 Rozdělení rostlin podle vyžadované intenzity světla [12]

Potřeba světla	Rozsah intenzity [$\text{mmol}/\text{s}\cdot\text{m}^2$]
Malá	10–29
Střední	30–73
Vysoká	74–200
Velmi vysoká	200 +

Rostlinné biorytmy

Stejně jako ostatní živé organismy i rostliny mají své tzv. endogenní hodiny. I rostliny jsou přizpůsobeny střídání dne a noci (fotoperiodicita) a střídání ročních období. K tomu dochází na základě vyhodnocení vnějších vlivů (synchronizátorů) jako je délka dne a její změny nebo změna teplot vzduchu [18]. Rostliny na základě toho vědí, kdy mají kvést nebo v případě stromů kdy shodit listy a zazimovat se [19]. V případě, že jsou vnější vlivy pozměněny, biorytmus rostlin a tím i jejich zdravý vývoj je narušen [20].

Jedním z projevů fotoperiodicity je u rostlin změna jejich dýchání. Přes den, za přítomnosti světla probíhá tzv. světlé dýchání, v noci pak tmavé dýchání. Ve světlé fázi fotosyntézy dochází ke štěpení molekul vody (fotolýza vody) a k tvorbě molekul ATP (fosforylace). Vedlejším produktem fotolýzy vody je kyslík. Ve tmavé fázi fotosyntézy pak dochází k tvorbě glukózy, která je dále přeměněna na stavební asimiláty jako škrob, bílkoviny a další organické látky [21].

3. Regulace parametrů vnitřního prostředí

V důsledku rostoucí populace a jejích zvyšujících se životních standardů jsou na oblast pěstování rostlin kladeny vysoké nároky. Nejedná se jen o potraviny, ovoce a zeleninu, ale i o okrasné květiny v květináčích nebo květiny řezané. V případě potravin se zvyšuje poptávka po kvalitních potravinách i mimo sezonu jejich přirozeného růstu. Výsledkem těchto trendů je tendence rozšiřovat a automatizovat systémy vnitřního pěstování rostlin [1]. Důsledným plánováním a provedením technologického řešení, které potřebné klimatické podmínky zajistí, je možné zvýšit efektivitu pěstování a snížit nechtěné environmentální dopady [22].

Základním principem regulace je měření a porovnávání regulované veličiny s referenční hodnotou. Jejich rozdíl, tzv. regulační odchylka pak iniciuje změnu v soustavě tak, aby se odchylka zmenšovala [23].

3.1. Měření teploty

V této kapitole bude uveden přehled senzorů pro měření teploty a jejich základní princip fungování. Dále pak základní principy přenosu tepla a akční členy, kterými lze teplotu měnit.

3.1.1. Senzory teploty

Senzory teploty lze rozdělit do dvou hlavních skupin – *dotykové* a *bezdotykové*. Dotykový senzor musí být ve styku s objektem nebo látkou, kterou měříme. Bezdotykové měření naopak probíhá v určité vzdálenosti od měřeného objektu. Tyto senzory snímají infračervené záření, které každý objekt o určité teplotě vyzařuje [24].

Odporové kovové senzory

Senzory pracují s teplotní závislostí odporu materiálu na teplotě. Výhodou těchto senzorů je velký rozsah měřitelných teplot, které ovšem pro naši aplikaci nejsou zapotřebí. Nevýhodou je pomalá reakce na změnu teploty. Takový senzor není vhodný pro systémy s dynamickými změnami teplot. Nejběžnější odporové kovové senzory jsou platinové nebo niklové. Platinové se běžně využívají v místech, kde se měří velmi vysoké teploty (až + 1000 °C). Měřicí rozsah niklových senzorů je oproti platinovým nižší typicky -60 °C až 180 °C [24].

Odporové polovodičové senzory – termistory

Stejně jako kovové senzory, pracují i tyto se závislostí elektrického odporu na teplotě. Oproti kovovým senzorům jsou však citlivější, s menším teplotním rozsahem a horší stabilitou měření. Rozlišujeme dva typy těchto polovodičových senzorů – negistor (NTC) a pozistor (PTC). NTC senzor je vhodný pro měření malých rozsahů jako je právě měření venkovní nebo vnitřní teploty prostředí. PTC senzor má velmi charakteristickou závislost odporu na teplotě [24] a používá se například jako ochrana zařízení proti přehřátí a nadproudu [25] nebo ke stabilizaci napětí v místech, kde požadujeme konstantní teplotu [26].

Monokrystalické polovodičové senzory

Jsou opět založeny na změně odporu v závislosti na teplotě. Jsou více stabilní než termistory, nicméně jsou méně citlivé. Právě proto se využívají v aplikacích s menšími nároky na citlivost nebo například v integrovaných inteligentních systémech [24].

Monokrystalické křemíkové senzory

Jejich funkce je založena na teplotní závislosti napětí PN přechodu. Lze je snadno integrovat, jejich charakteristika je lineární a jsou citlivé na změny. Využívají se například pro kontrolu teploty elektrických zařízení nebo pro teplotně řízený zdroj proudu [24].

Termočlánek

Termočlánek pracuje na principu tzv. Seebeckova jevu. Jedná se o dva různé vodivé materiály, které jsou v jednom bodě spojeny. Vlivem teploty vzniká na jeho koncích elektrické napětí, které měříme. Podle druhu použitých materiálů rozlišujeme několik typů termočláneků. Velikosti senzorů jsou malé, nevýhodou je malá citlivost. Používají se proto pro měření velkých teplotních změn nebo absolutních hodnot teploty. Existuje několik způsobů, jak jsou sondy realizovány – ponorné, dotykové, vpichové, prostorové nebo štěrbinové [24].

Infračervené termočláanky

Vyhodnocování teploty infračervenými termočláanky stojí na již zmiňovaném termočláanky, rozdíl je ve snímání infračerveného záření. Snímací část senzoru je načerněna a absorbuje zaostřené IR záření. Tím se snímací plocha zahřívá a teplota je změřena termočláanky. Jedná se o jednoduchý a levný způsob bezdotykového měření teploty [27].

Bolometry

Stejně jako u IR termočláanky je snímací část načerněna, poté co dojde k absorpci IR záření a následnému zahřátí, je měřena změna vodivosti senzoru, která odpovídá měřené teplotě [27].

Pyroelektrické senzory

Tyto senzory jsou vyráběny z pyroelektrického materiálu. Ten způsobuje vznik elektrického náboje po dopadu IR záření. Tento náboj je následně měřen a vyhodnocován. Základním parametrem je pyroelektrický koeficient, který udává změnu polarizace při změně teploty [27].

3.1.2. Akční člen

Teplotu půdy je možné zvyšovat s pomocí topného kabelu. Je možné ho uložit pouze pod vodivý materiál. Pokud by materiál teplo nevodil, mohlo by docházet k přehřátí.

Pro zvyšování teploty vzduchu existují dva základní principy, jak teplo předávat: *konvekce* (proudění) a *radiace* (sálání).

Rozlišujeme dva typy konvekce – přirozená a nucená. Přirozená konvekce vzniká v důsledku rozdílných teplot a není tolik intenzivní, v porovnání s nucenou. Nucenou konvekci způsobuje vnější zdroj, který dodá energii pro proudění tekutiny. Může se jednat o čerpadlo nebo kompresor [28]. Zařízení, která ohřívají vzduch principem konvekce nazýváme konvektory a můžeme se setkat s konvektory teplovzdušnými nebo teplovodními [44; 45].

Radiace neboli sálání, je princip, kdy tepelná energie zdroje zahřívá plochy, na které dopadá. Nejjednodušším a všem známým příkladem je slunce. K pocitu tepelného komfortu pak stačí nižší teplota okolního vzduchu. Při sálavém vytápění tedy nedochází k ohřívání vzduchu [29]. Sálavé vytápění se provádí v mnoha různých variantách – sálavé stropní panely, nástěnné sálavé panely, infrazářiče, stěnové topné folie, podlahové kabely a rohože nebo známé teplovodní podlahové vytápění [30].

3.2. Měření vlhkosti vzduchu

Podobně jako v předchozí kapitole 3.1. uvedu nejprve senzory s jejich principy a následně akční členy pro zvyšování vlhkosti vzduchu.

3.2.1. Senzory vlhkosti vzduchu

Kapacitní senzory

Podstatou kapacitních senzorů je kondenzátor, který reaguje na změnu vlhkosti změnou kapacity. Tímto senzorem je možné měřit i obsah vlhkosti v pevných látkách. V takovém případě jsou limitem sytké materiály s vysokou vodivostí. Senzory jsou používány ve většině běžných elektronických přístrojích pro měření vlhkosti často v kombinaci s měřením teploty [31].

Odporové senzory

Elektrody připojené ke zdroji střídavého proudu jsou zahřívány průchodem proudu. Zvýšením teploty se odpařuje voda z elektrolytu, čímž se zmenší jeho vodivost, klesá proud a tím i teplota. Naopak při poklesu teploty elektrolytu dochází k absorpci vodních par, zvýší se vodivost, a s rostoucím proudem roste i teplota. Obsah vody v elektrolytu závisí na teplotě elektrolytu, která je funkcí parciálního tlaku vodních par ve vzduchu. Vlhkost je tedy vyhodnocena z měřené teploty [31].

Dilatační hygrometry

Některé organické látky vlivem absorbované vlhkosti změny svou velikost, která je měřena. Používají se lidské vlasy, živočišné blány nebo syntetické organické látky. Nevýhodou dilatačních hygrometrů je velká nelinearita a potřeba časté regenerace [31].

Psychrometrická čidla

Tento způsob měření je založen na tzv. mezním adiabatickém ochlazení. Měření se realizuje dvěma teploměry – tzv. suchým a mokrým teploměrem. Mokrý teploměr je obalený punčoškou, která je nasáklá destilovanou vodou. Jeho ochlazení je závislé na rozdílu parciálního tlaku sytých par při teplotě mokrého teploměru a parciálního tlaku vodních par ve vzduchu. Suchý teploměr není nijak upravený a měří hodnotu teploty vzduchu. Z měřených teplot suchého a mokrého teploměru pak lze dopočítat hodnotu vlhkosti vzduchu [31].

Senzory na principu rosného bodu

Taková měření spočívají ve snímání změny odrazivosti kovového ochlazovaného zrcátka v důsledku jeho orosení. Zrcátko odráží paprsek z LED diody do snímače. Při dostatečném poklesu teploty zrcátka dojde k jeho orosení a tím snížení světelného toku. Se znalostí teploty vzduchu a teploty rosného bodu je pak možné z Mollierova diagramu odečíst hodnotu vlhkosti [31].

Kondenzační metoda

Vzorek vzduchu je prosán přes chladič, kde dojde ke kondenzaci části vodní páry. Hmotnost vodních par v původním vzorku se zjistí jako součet hmotnosti vody, která zkondenzovala a hmotnost vodní páry, která v plynu zůstala. Za chladičem je vodní pára v sytém stavu [31].

3.2.2. Akční členy

Snižování vlhkosti v prostředí rostlin obvykle není potřeba. Nicméně její hodnotu je možné snížit prostým větráním, zvýšením teploty a v krajním případě s pomocí odvlhčovače. Zvyšování relativní vlhkosti je naopak žádoucí [10]. Pro zvyšování vlhkosti v prostředí pěstovaných rostlin jsou vhodné ultrazvukové zvlhčovače. Ty obsahují membrány, které svým kmitáním vytváří studenou páru. Vzniklé mikrokapičky se vstřebávají do okolního vzduchu a neohrožují nijak rostliny [32].

3.3. Měření vlhkosti substrátu

Měření vlhkosti substrátu může být zásadním pro regulaci zavlažování. V této kapitole jsou uvedeny opět senzory s jejich principy. Akčním členem by pak v tomto případě bylo čerpadlo, které dopraví vodu do instalovaného zavlažovacího systému.

3.3.1. Senzory vlhkosti substrátu

Jestliže pro určení vlhkosti půdy je zapotřebí odebrat vzorek, nazýváme tuto metodu destruktivní. Bez narušení celistvosti je metoda nedestruktivní. Podle způsobu měření pak rozlišujeme metody přímé, kdy měřenou veličinou je množství vody v půdě, a nepřímé, kdy měřená veličina je funkcí závislosti na vlhkosti.

Gravimetrická metoda

Při tomto typu měření se váží vlhký a suchý vzorek půdy. Rozdíl těchto dvou hmotností nám udává hmotnost vody odpařené. Tato metoda se užívá pro kalibraci metod nepřímých [33].

Kapacitní metoda

I u této metody se využívají dvě vodivé elektrody, kdy půda mezi nimi se chová jako kondenzátor. Existuje řada modelů, které vyjadřují vztah změřené dielektrické konstanty na vlhkosti [33].

Odporová metoda

Vlhká půda se chová jako polovodivý materiál, jehož vodivost roste s rostoucí vlhkostí. Právě změna vodivosti (odporu) je měřena a na základě této hodnoty je vyhodnocována vlhkost půdy. Při nižších vlhkostech má závislost téměř přímkový tvar s dostatečnou strmostí, ovšem při vysokých vlhkostech je změna odporu tak malá, že se často pohybuje v rozmezí chyb. Pro měření vysokých hodnot vlhkosti je tedy velmi nepřesná. Její další nevýhodou je citlivost na změnu teploty a pomalá reakce na změny vlhkosti, v důsledku jejího technického provedení a používaných materiálů. Pro měření se používají kovové elektrody ve vodivém styku s měřenou půdou [33].

Gamaskopická metoda

Jedná se o nedestruktivní měření, kdy záření γ procházející půdou snižuje svou intenzitu. Absorpce záření je úměrná hmotnosti prozařovaného materiálu, závisí tedy na objemové hmotnosti a vlhkosti. Využívá se především při laboratorních měřeních [33].

Neutronová metoda

Tato metoda využívá termalizace neutronů. Jedná se o nedestruktivní metodu především pro polní měření [33].

3.4. Měření hodnoty CO₂ ve vzduchu

Měření hodnoty CO₂ může být velmi zásadní především pro komerční pěstování, kdy zvýšením množství CO₂ je možné zásadně zvýšit produkci, jak je uvedeno v kapitole 2.3.5. *Kvalita vzduchu*. V případě okrasných systému, může hladina CO₂ sloužit jako informace pro řízení větrání.

3.4.1. Senzory kvality ovzduší

Senzory lze rozdělit na přenosné a stacionární, nebo podle způsobu měření rozlišujeme přístroje pro kontinuální nebo okamžité měření koncentrace. [34] Hodnotu CO₂ měříme s jednotkou ppm (parts per milion), ta označuje, kolik částic CO₂ je v milionu částic vzduchu [35].

Detekční trubičky

Jedná se o jednoduché skleněné trubičky, na kterých je uvedena stupnice hodnot ppm. Trubičkou se prosaje definovaný objem vzduchu, přičemž dojde k chemické reakci detekční vrstvy a k jejímu zbarvení. Na stupnici je pak možné odečíst koncentraci.

Optický infračervený senzory

Senzor je ve vnitřní straně pokryt reflexní vrstvou, na které se odráží infračervené záření. Toto záření je zachytáváno detektorem. Měřítkem koncentrace CO₂ je zeslabení intenzity infračerveného záření, které je absorbováno molekulami CO₂. Pyrodetektor pak převádí výsledky na elektrický signál [34].

Elektrochemický senzor

Sledované molekuly plynu reagují s elektrolytem v uzavřeném těle senzoru. Ten obsahuje kromě elektrolytu také elektrody, mezi kterými vzniká napětí. V důsledku interakce molekul vniká elektrochemická reakce doprovázená vznikem volných elektronů. Elektronika měří tento signál, který odpovídá koncentraci plynu [34].

Polovodičový senzor

Měření koncentrace je založeno na změně vodivosti polovodiče. Na povrchu vrstvy oxidu kovu (oxidy zinku, cínu, wolframu, india) se vytvoří ve vzduchu rovnovážný stav, který se přítomností jiného plynu naruší a způsobí změnu vodivosti [34].

3.4.2. Akční člen

Existují dva způsoby, jak do uzavřeného systému rostlin přivést CO₂. Jednou z možností je přivedení čerstvého vzduchu z okolí. Čerstvý vzduch má obvykle koncentraci 400–450 ppm CO₂. V takovém případě by akčním členem byl ventilátor, který čerstvý vzduch přivede.

Druhou možností je doplňování CO₂ z tlakové láhve přes redukční ventil. Pro rovnoměrné rozptýlení CO₂ v prostoru je současně potřeba instalace cirkulačního čerpadla. Existují komplexní systémy (např. od společnost EcoTechnics) které zajišťují kompletní regulaci dodávky a rozptýlení CO₂ [36].

3.5. Měření intenzity osvětlení

3.5.1. Senzory

Senzory můžeme rozdělit podle toho, v jaké vlnové délce měří. To je zásadní při výběru pro konkrétní typ aplikace a účel měření. Při měření PAR je preferovanou metodou měření kvantové (fotonové), kdy nám přístroj zobrazí množství fotonů dopadajících na plochu za čas. Kvantové senzory jsou designovány tak, aby měřili přímo v PAR spektru [22].

Pyranometry, solarimetry

Tyto přístroje se používají k měření globálního slunečního záření. Pracují na termoelektrickém jevu, kdy termočlánek indikuje teplotní gradient mezi dvěma povrchy. Jeden z povrchů absorbuje prakticky všechno krátkovlnné záření a druhý v povrchů je zastíněn. Stínidlem lze eliminovat přímé sluneční záření a pyranometr měří jen rozptýlené sluneční záření. Takovým přístrojům pak říkáme difuzometry [37].

Luxmetry

Oproti pyranometrům, luxmetry měří už jen viditelnou část spektra. Je založen na fotoelektrickém principu [38].

Fotometry

Fotometry dokáží měřit jen část viditelného světla. Nedokážou měřit v oblasti UV a IR záření a nejsou vhodné pro měření v prostředí rostlin [22].

Kvantový senzor

Kvantový senzor je preferovanou metodou měření, kdy nám přístroj zobrazí množství fotonů dopadajících na plochu za čas. Kvantové senzory jsou designovány tak, aby měřili přímo ve PAR spektru [22].

3.5.2. Akční člen

Z hlediska provozních nákladů je výhodné investovat do speciálních svítidel, které vyzařují střežní oblast světla. Výrazně se tím snižuje instalovaný příkon v porovnání s běžnými typy výbojek. Používají se vysokotlaké sodíkové nebo halogenidové výbojky, nebo světelné zdroje na bázi světelných LED diod. Ty vykazují dlouhou životnost, lze měnit teplotu chromatičnosti, řídit odvod tepla, šetří místo a zajišťují rovnoměrnou distribuci světelného toku [17].

3.6. Měření hodnoty pH

Pro orientační stanovení se používají roztoky acidobazických indikátorů nebo indikátorové papírky. Pro přesnější měření se pak používají pH metry. Měření pH metrem je založeno na měření rovnovážného elektromotorického napětí galvanického článku se dvěma elektrodami, ponořeným v měřeném roztoku. Jedna z elektrod je referenční, se známým konstantní elektrodovým potenciálem. Druhá elektroda je měrná a její potenciál je funkcí pH [39].

3.7. Měření proudění vzduchu

Pro měření rychlosti proudění vzduchu slouží anemometry. Ty v případě interiérového pěstování rostlin nejsou zapotřebí. Proudění vzduchu umožňuje rostlinám uskutečňovat transpiraci. Není ovšem jasně dáno, jakou rychlostí by měl vzduch proudit. Důležité spíše je, aby vzduch proudil ve všech částech prostoru. Abychom toto zjistili, není zapotřebí anemometr, jako spíše matematický model proudění vzduchu v místnosti.

4. Metrorost – popis současného technického stavu

Metrorost je ukázkovým systémem vnitřního pěstování rostlin. Cíleně je umístěn do prostředí metra, kde jsou pro rostliny velmi nepříznivé podmínky. Provoz Metrorostu má ověřit funkčnost komplexního technického řešení, které vytváří vhodné vnitřní prostředí rostlinám. Současně by měl splňovat požadavek minimálních nároků na provoz a údržbu a jistou estetickou kvalitu provedení. Na základě zkušeností pak bude možné uvažovat o dalších podobných aplikacích ve vnitřním prostředí například budov.



Obrázek 7 Fotografie současného stavu Metrorostu

Instalace v metru, obecně ve veřejném prostoru, vytváří požadavek na odolnost proti mechanickému poškození a graffiti vandalismu. Toho bylo docíleno jednak speciálním designem, který umožňuje snadnou výměnu jednotlivých částí a jednak antigraffiti nátěrem.

4.1. Konstrukční řešení

Komplikovaný tvar instalace vyžadoval zvýšenou kontrolu nad návaznostmi jednotlivých prvků konstrukce, které byly modelovány v aplikaci Autodesk Fusion 360. Vymodelované prvky byly následně exportovány pro CNC výrobu.

Spodní deska

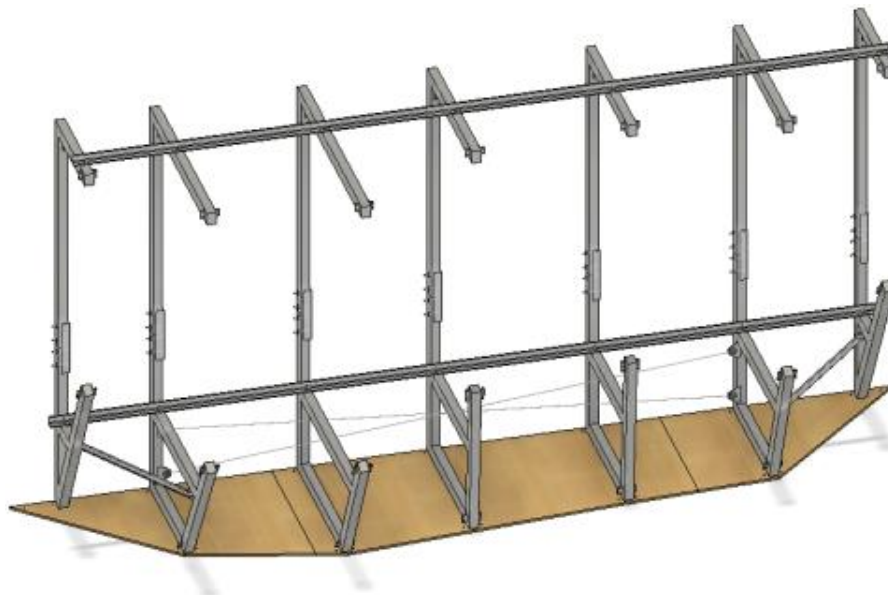
Spodní deska je v kontaktu s podlahou metra a společně se spojovacími prvky definuje pozici ocelových žeber. Je vyrobena z dýhované překližky se sníženou hořlavostí B.



Obrázek 8 3D Model spodní desky

Ocelová konstrukce

Ocelová konstrukce funguje jako hlavní nosný prvek. Je vyrobena z konstrukční oceli S235 s povrchovou úpravou zinkováním proti korozivním vlivům.



Obrázek 9 3D Model ocelové konstrukce

Zadní opláštění

Stejně jako spodní deska je zadní opláštění vyrobeno z dýhované překližky se sníženou hořlavostí. Funkce zadního opláštění je estetická. Zakrývá ocelovou konstrukci, rozvody elektrické energie a vody. Jednotlivé desky jsou spojeny přeplátováním na zadní straně.



Obrázek 10 3D model zadního opláštění na ocelové konstrukci

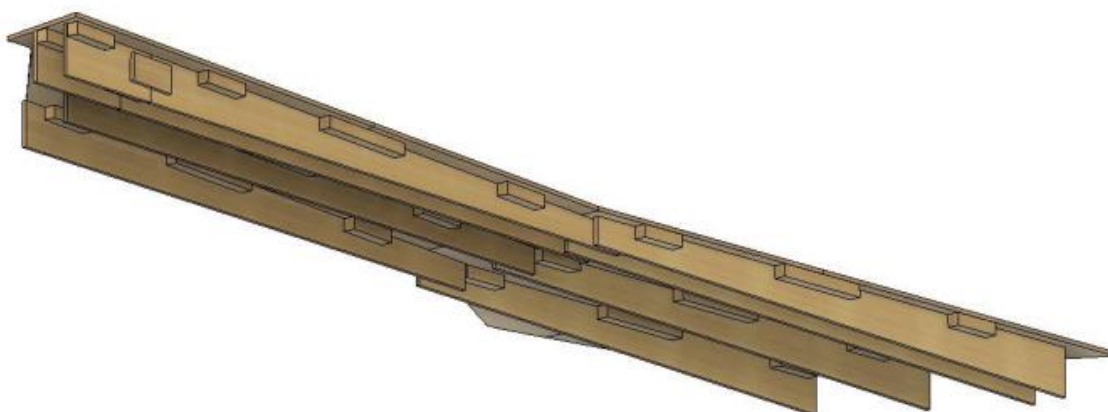
Dno květináče

Dno je opět vyrobeno z překližky se sníženou hořlavostí. Pro odtok přebytečné závlahy je dno vyspádované. Spád 3 % je vytvořen sklonem nosníků.



Obrázek 11 3D model ocelové konstrukce s dnem květináče

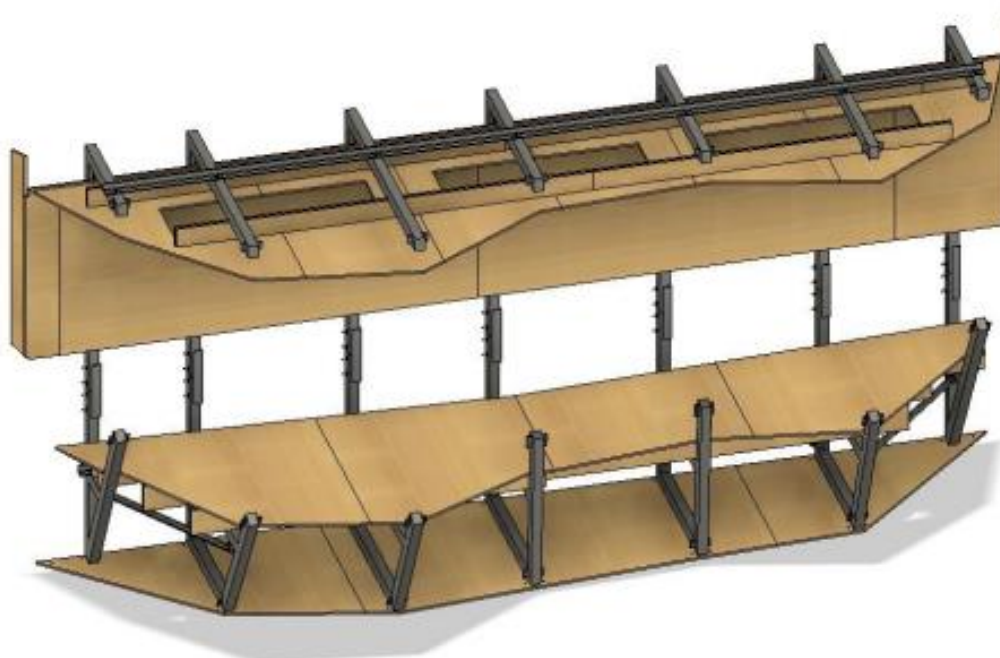
Nosníky jsou spojeny přeplátováním a deska je k nim upevněna pomocí kostek (spojovacích prvků). Dno roznáší rovnoměrně váhu substrátu do nosné konstrukce.



Obrázek 12 Spodní pohled na spojení dva květináče

Podhled

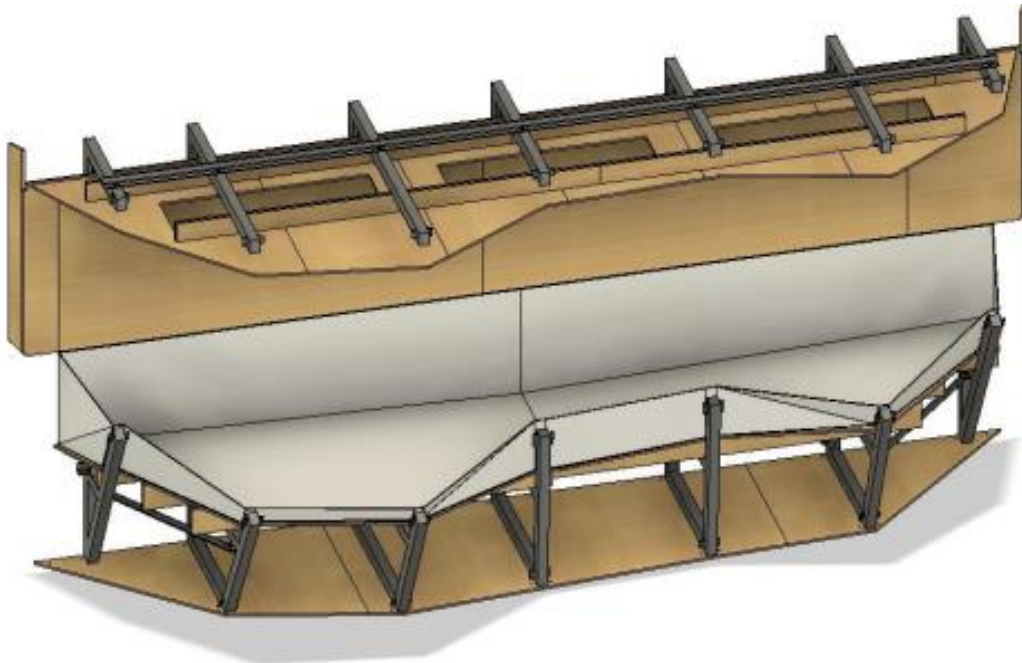
Podhled obsahuje otvory pro umístění tří kusů světel. Jeho funkcí je především zakrytí ocelové konstrukce a rozvodů elektrické energie k osvětlení.



Obrázek 13 Pohled shora na 3D model podhledu

Vana pro substrát

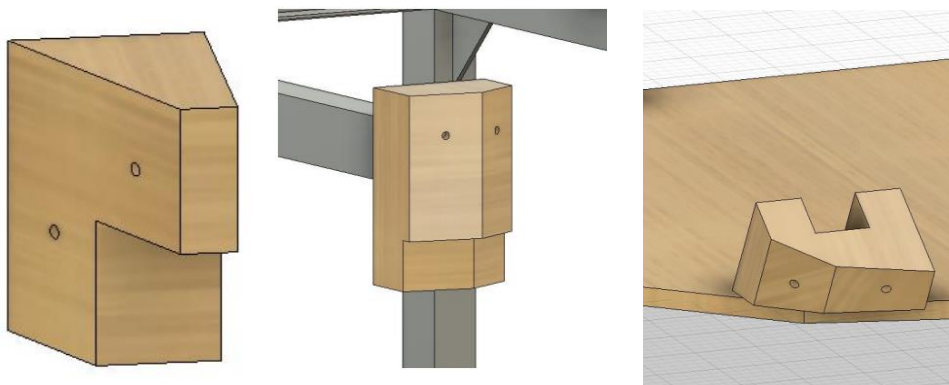
Vana pro substrát je vyrobena z polypropylenových desek svařovaných bazénovou technologií. Vana kopíruje tvar dna a ocelové konstrukce. Jako samotná nemá nosnou funkci. Stejně jako dno květináče je vana vyspádovaná.



Obrázek 14 3D model vany pro substrát umístěné na dně květináče

Spojovací prvky

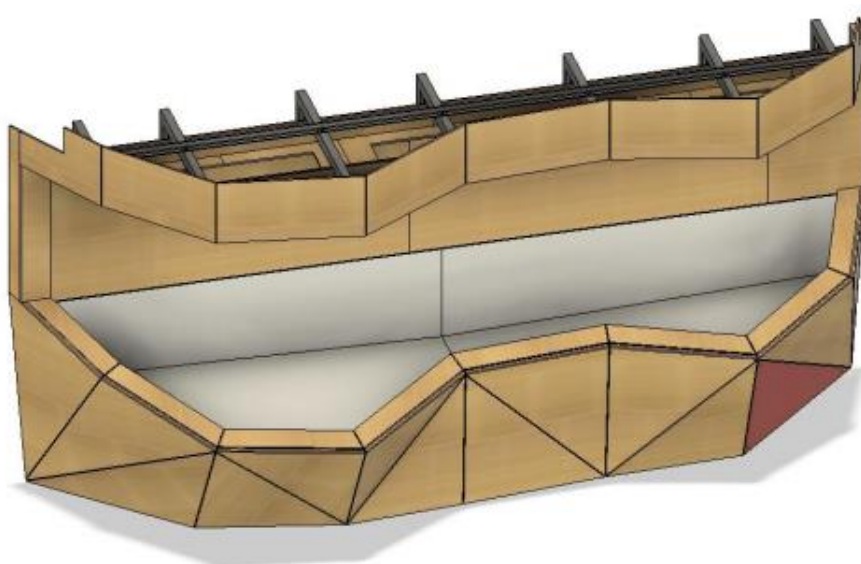
Spojovací prvky zajišťují spojení jednotlivých částí opláštění mezi sebou a jejich spojení s ocelovou konstrukcí. Protože se jedná o nesymetrickou a velmi specifickou tvarovou instalaci, byla zapotřebí vyrobít 8 typů spojek pro konkrétní umístění.



Obrázek 15 3D modely různých tvarů spojovacích prvků

Vnější opláštění

Vnější opláštění zakrývá nosnou konstrukci a plní tak především estetickou funkci. Do jisté míry roznáší váhu substrátu do nosné konstrukce. Prvky vnějšího opláštění jsou napojeny na konstrukci z nepohledové strany pomocí spojovacích prvků. Na obrázku 16 je zvýrazněna jedna speciální deska vnějšího opláštění, která slouží pro vstup do spodní části konstrukce, kde je umístěna vodní nádrž a její řízení. Tato deska je připevněna demontovatelným šroubovým spojem.



Obrázek 16 3D model systému s vnějším opláštěním

Zasklení

Jedná se o ESG tepelné tvrzené sklo o tloušťce 8 mm. Každý díl skla má specifický lichoběžníkový tvar, upravený v návaznosti na konstrukci.



Obrázek 17 3D model systému se zasklením

4.2. Instalované technologie a vnitřní vybavení

Metrorostu

V této kapitole uvedu přehled vnitřního vybavení Metrorostu, které zahrnuje jak technické vybavení (osvětlení, čerpadla, ventilátory, ...) tak netechnické (substrát, rostliny). V Tabulce 5 jsou uvedeny instalované elektrické spotřebiče s jejich základními technickými parametry. Jejich umístění a funkce jsou dále rozvedeny v podkapitolách 4.2.1.- 4.2.5.

Tabulka 5 Příkon jednotlivých spotřebičů a z toho odvozený celkový příkon systému

Zařízení	Napětí [V]	Příkon [W]	Poznámka
Osvětlení	230	135	3 x 45 W
Topný kabel	230	360	17 W/m . 20 m
Čerpadlo	24	96	
PLC Unipi	24	15	
Ventilátory	12	10	2 x 5 W
Celkový součet		616	Instalovaný příkon 370 W (60 %)

4.2.1. Osvětlení

Uvnitř Metrorostu jsou instalované 3 kusy Pro-kognitivního osvětlení SPECTRASOL IBP o rozměrech 1200 mm x 300 mm. SPECTRASOL osvětlení má vyvážené zastoupení všech viditelných vlnových délek a na 97 % se shoduje se světlem ze Slunce podle Brainardovy metody [40]. Osvětlenost vnitřního prostoru je přibližně 1 000 lx s velmi krátkou vzdáleností rostlin od zdroje svícení.

Tabulka 6 Technické parametry použitého osvětlení [41]

Světelný tok	3 x 4 500 lm	+/- 10 %
Příkon	3 x 45 W	+/- 10 %

4.2.2. Substrát a rostliny

Spodní vrstva je tvořena umělým kamenivem (keramzit) o frakci 8–16 mm o objemu přibližně 1 m³. Tato vrstva zajišťuje dobrý odtok vody. Druhou, vrchní vrstvou je směs Managreen M1 a odlehčeného střešního substrátu. Substráty jsou smíchány v poměru 50/50 o celkovém objemu také 1 m³. Směs druhé vrstvy zajišťuje sníženou hmotnost substrátu a složení vhodné pro kvalitní růst rostlin.

V následující Tabulce 7 je uveden přehled vybraných rostlin společně s jejich předpokládanou maximální výškou a přibližnou plochou, kterou zabírají.

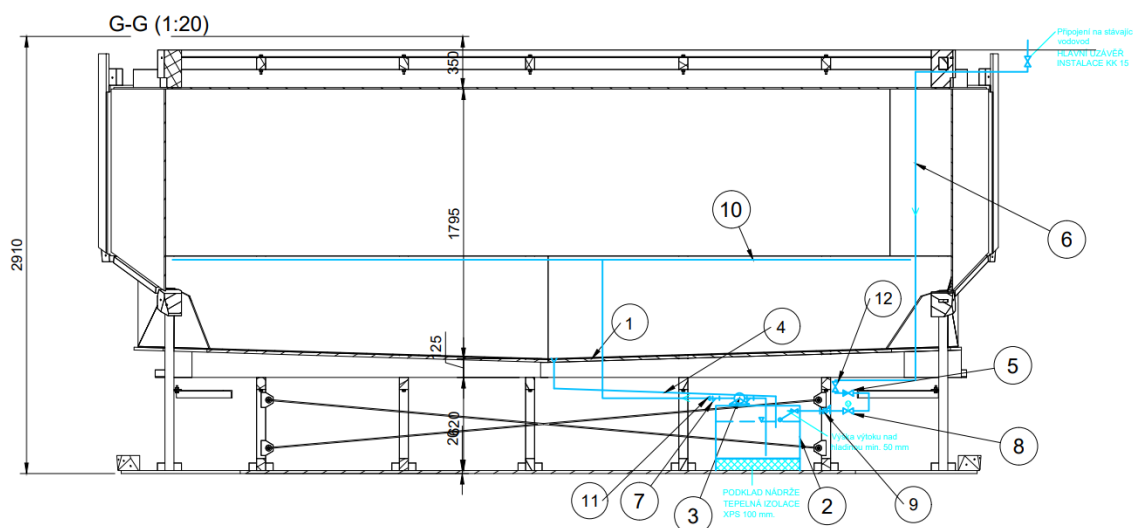
Tabulka 7 přehled vybraných rostlin, jejich výška, plocha a sazený počet

	Ø [cm]	Výška [cm]	Počet [ks]
Epipremnum aureum – Šplhavnice zlatá	10	20	15
Cordyline – Dračinka	13	60	8
Aspidistra elation – Kořenokvětka	13	40	8
Aucuba japonica – Aukuba japonská	20	100	6
Rhapis excelsa – Bambusová palma	25	130	6
Rhapis excelsa – Bambusová palma	35	130	5
celkem			48 kusů

4.2.3. Zavlažování

Základním prvkem celého systému zavlažování je vodní nádrž o objemu 42 l, která je umístěna pod vanou se substrátem. Zajišťuje oddělení od vodovodního řádu a akumulaci přebytečné závlahy. Jako ochrana proti zamrznutí je pod nádrží tepelná izolace tloušťky 100 mm a celá nádrž je obalena tepelnou izolací tloušťky 25 mm. Distribuce závlahy je zajištěna hadicí o průměru 16 mm s tloušťkou stěny 1,1 mm z recyklovaného materiálu LDPE. Jedná se o kapkovou závlahu od české firmy Filament ID, s.r.o. Hadice je vedena po povrchu substrátu s distributory umístěnými u jednotlivých rostlin. Přebytečná závlaha ze substrátu je odvedena pomocí spádu vany k odtoku a odtud potrubím PVC DN32 zpět do nádrže.

Připojení na existující potrubí je provedeno za uzavíracím kohoutem DN15 v podhledu. Potrubí v instalaci je PPR 20x2,8 PN16 a je také opatřeno izolací.



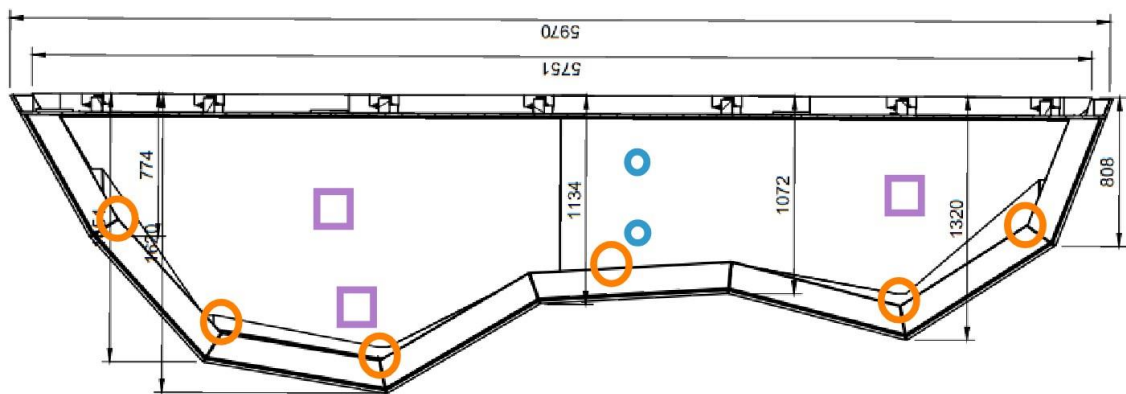
Obrázek 18 Schéma systému zavlažování: 1) Vana, 2) Nádrž na vodu, 3) Čerpadlo, 4) Odtok, 5) Zpětná klapka, 6) Potrubí, 7) Filtr, 8) Solenoid, 9) Vodoměr, 10) Hadice kapkové závlahy, 11) Regulátor tlaku, 12) Kulový kohout

4.2.4. Vytápění

Vytápění Metrorostu je zajištěno pouze topným kabelem, který je umístěn v substrátu. Jedná se o 20 metrů dlouhý topný kabel pro venkovní použití o výkonu 17 W/m. Řízení jeho zapnutí a vypnutí je vázané na vnitřní měřené hodnoty.

4.2.5. Senzory a odtokové otvory

Na Obrázku 19 je znázorněno přibližné umístění některých senzorů a odtokových otvorů pro přebytečnou vodu.



Obrázek 19 Polohy senzorů a odtokových otvorů: Oranžové – senzory teploty a vlhkosti vzduchu, Fialové – senzory vlhkosti půdy, Modré – odtokové otvory

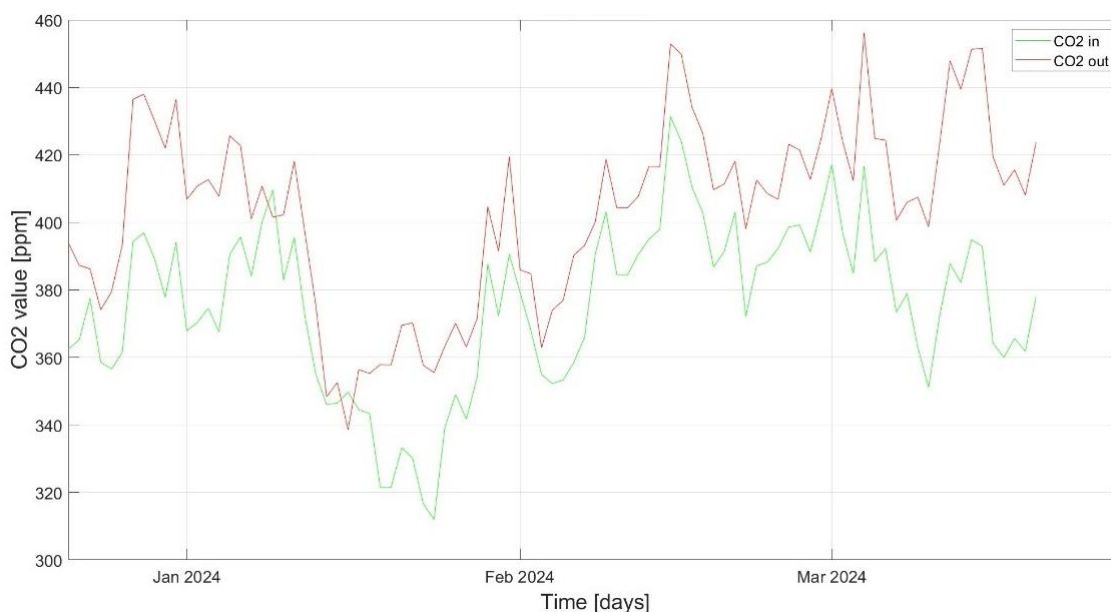
5. Analýza získaných dat

Od instalace celého systému je jeho prostředí měřeno několika senzory. V této kapitole se budu věnovat analýze získaných dat v období od 21.12.2023 – 20.3.2024. Data, která byla měřena od začátku instalace, tedy 2.11.2023 do 20.12.2023 jsou velmi nepřesná, neboť v tomto období ještě docházelo k utváření řízení. Z tohoto důvodu jsou tato data vyloučena z analýzy.

5.1. Hodnoty CO₂

Měření hodnot CO₂ pro Metrorost zajišťují dva senzory. Jeden je umístěn uvnitř (in) a jeden venku (out). V grafu na Obrázku 20 jsou zobrazeny denní hodnoty měření. Červeně je vyobrazena hodnota měřená mimo Metrorost, která je oproti vnitřní hodnotě vyšší průměrně o 28 ppm. Křivky mají podle očekávání velmi podobný trend a vzniklé odchylky budou způsobeny nepřesným měřením zvolených senzorů.

Na Obrázku 20 jsou zobrazeny již upravené měřené hodnoty. Skutečné měřené hodnoty se pohybovaly okolo 200 ppm, což je hodnota nižší, než jaká je běžně v atmosféře. Z tohoto důvodu byla provedena korekce a ke všem měřeným hodnotám byla přičtena hodnota 200. Můžeme tak sledovat trend křivek, absolutní hodnotu však nikoliv.



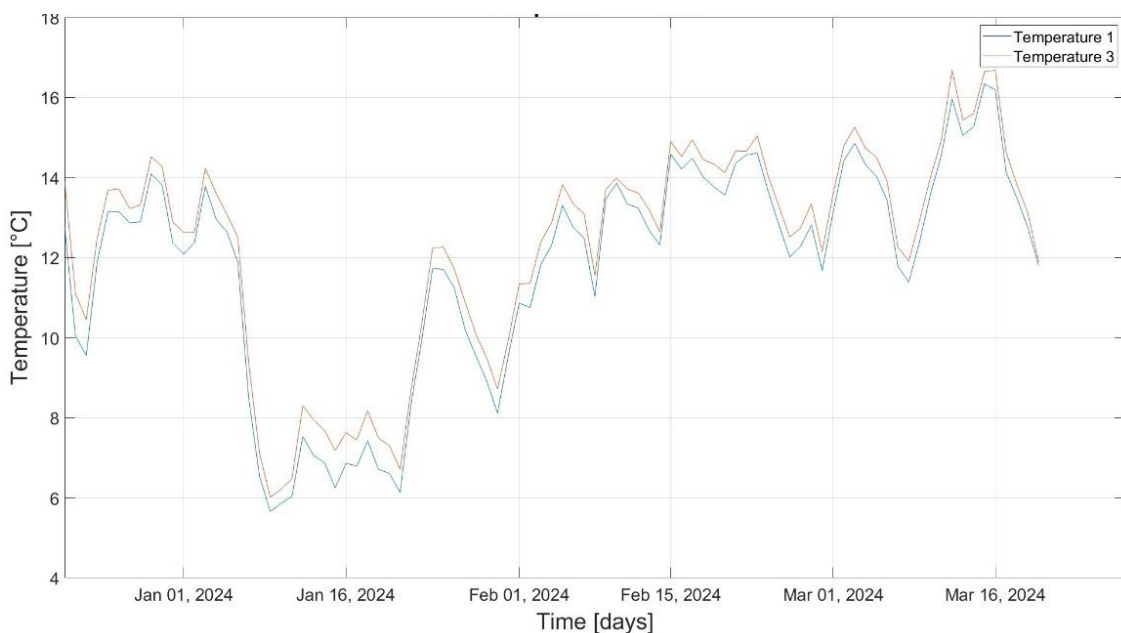
Obrázek 20 Graf zobrazující průběh hodnot CO₂

5.2. Teplota vzduchu

Dva senzory teploty jsou umístěny v podhledu instalace. Dalších 6 senzorů je pak rozmístěno rovnoměrně přímo v prostředí, kde se nacházejí rostliny.

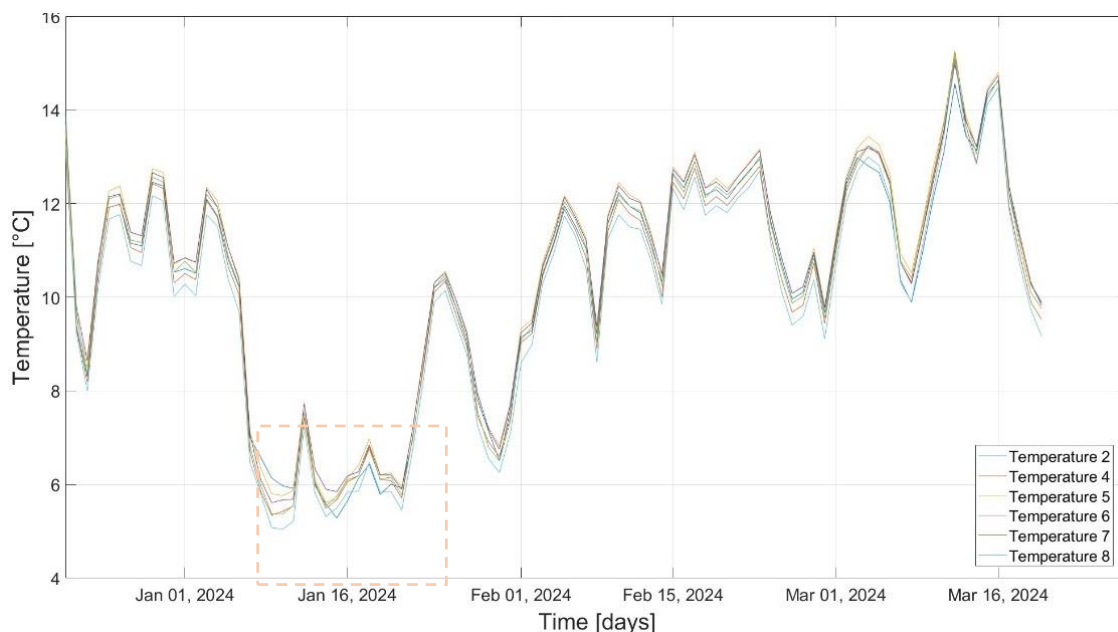
Při bližším pohledu na průměrné denní teploty naměřené v podhledu (Obrázek 21) zjistíme, že jsou téměř totožné. Největší naměřený rozdíl mezi nimi je 1,1 °C a průměrný rozdíl těchto teplot je pouze 0,5 °C.

V grafu je také vidět, že nedochází k žádným zásadním odchylkám a průběhy teplot jsou téměř totožné. Pro další případnou práci s teplotou v podhledu budu používat průměr těchto dvou hodnot.



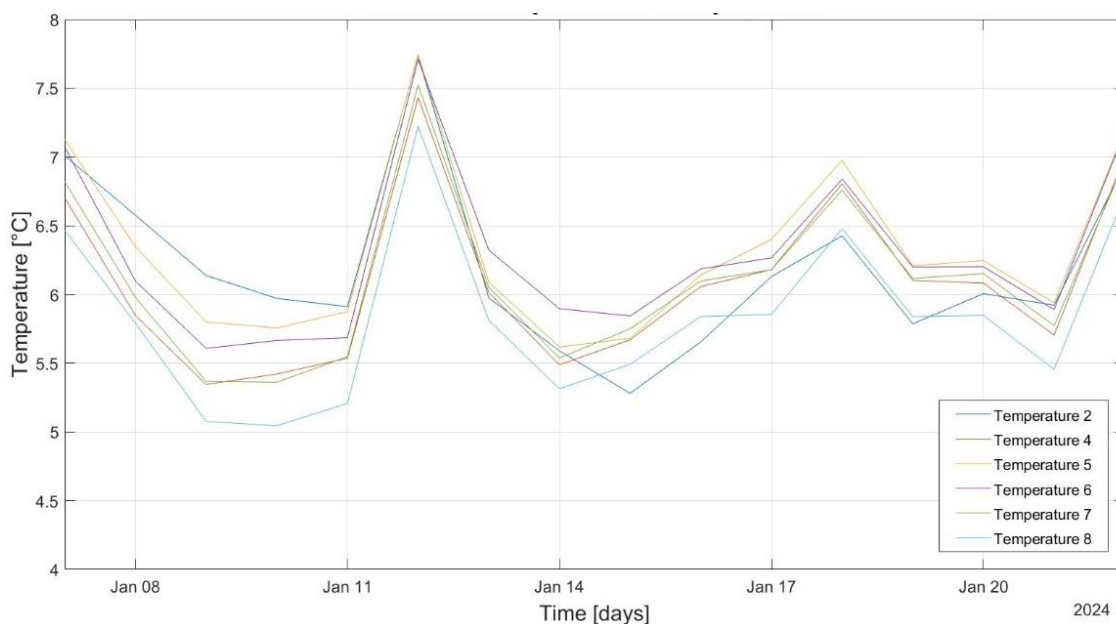
Obrázek 21 Graf teplot v podhledu systému

V dalším kroku jsem si zvlášť porovnala teploty, které jsou měřené přímo v prostředí rostlin. Při pohledu na průběh teplot v celém analyzovaném intervalu (Obrázek 22) je vidět, že nedochází k žádným výrazným výkyvům a průběhy jsou si velmi podobné. Největší rozdíl vzniká mezi *Teplotou 2* a *Teplotou 8* a to přibližně 1 °C.



Obrázek 22 Graf zobrazující průběh denních teplot v prostředí rostlin, čárkovaný rámeček vymezuje oblast znázorněnou na následujícím grafu

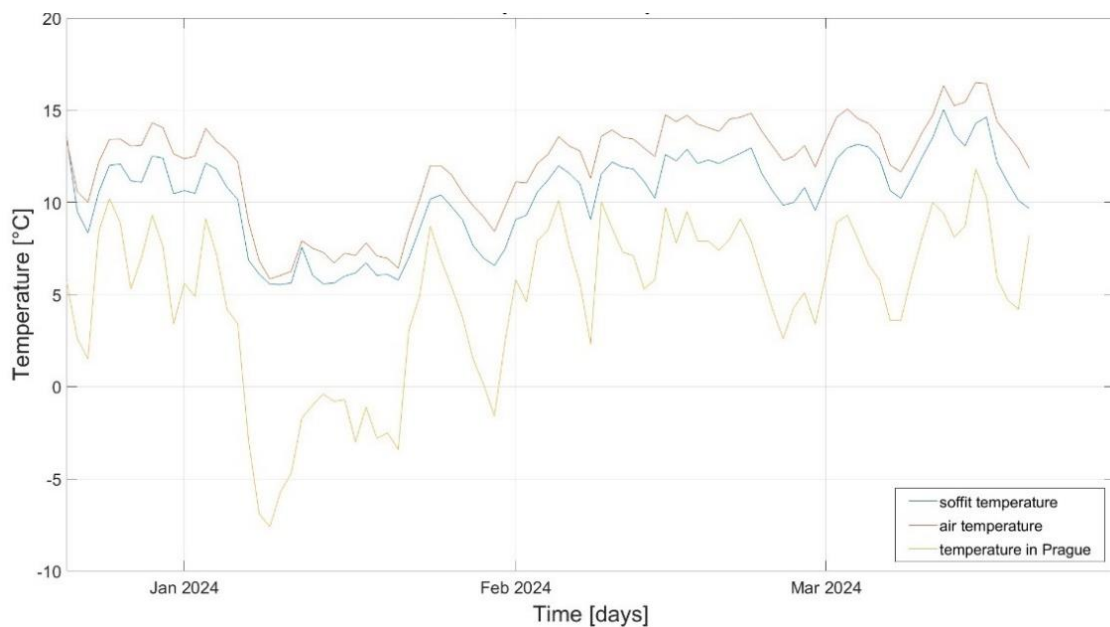
Na Obrázku 23 je část předchozího grafu, která zobrazuje rizikové období (7.1.–22.1. 2024), kdy teploty klesaly nejnižší v celém intervalu analyzovaných dat. Nejnižší naměřená teplota v tomto intervalu je 2,9 °C. V grafu jsou vyobrazeny křivky prokládající průměrné denní teploty.



Obrázek 23 Část předchozího grafu zobrazující rizikové období nízkých teplot

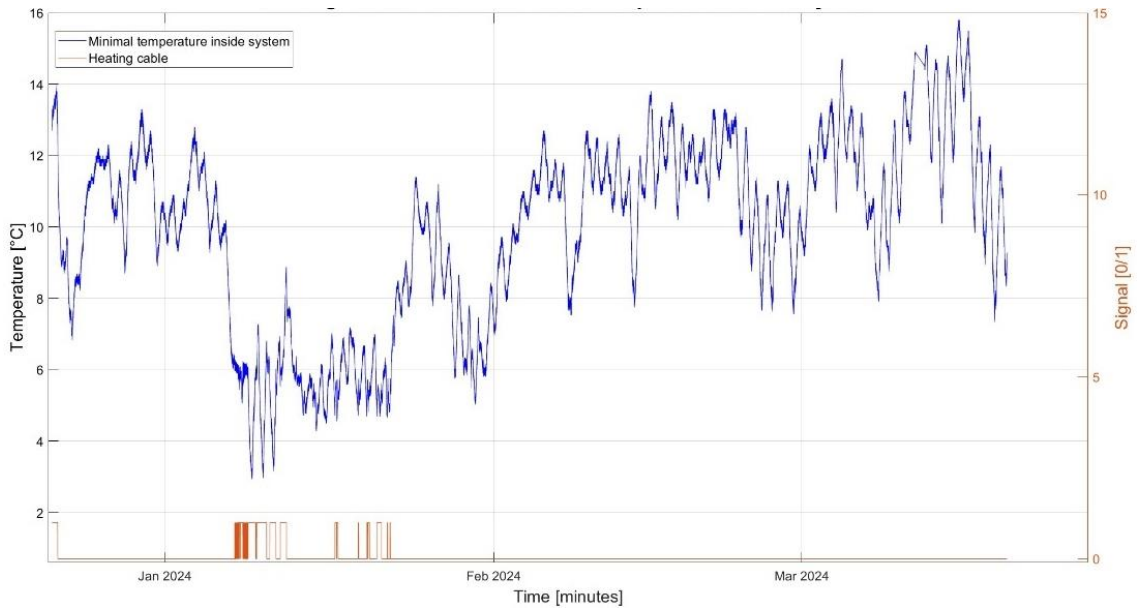
Protože trend jednotlivých teplot (*Temperature 2, 4, 5, 6, 7, 8*) uvnitř systému je stejný, vytvořila jsem křivku, která prokládá průměr denních hodnot ze všech šesti měřených teplot. Tuto hodnotu jsem pak společně s teplotou v podhledu graficky vyobrazila vedle průběhu teplot vzduchu v Praze podle dat od ČHMÚ. V grafu na Obrázku 24 je vidět korelace těchto hodnot.

Špičky, které jsou vidět na teplotě měřené venku, nevznikají na teplotách měřených uvnitř. To bude způsobeno tepelnou setrvačností vestibulu metra.



Obrázek 24 Graf teplot naměřených uvnitř systému a teploty venkovního vzduchu v Praze

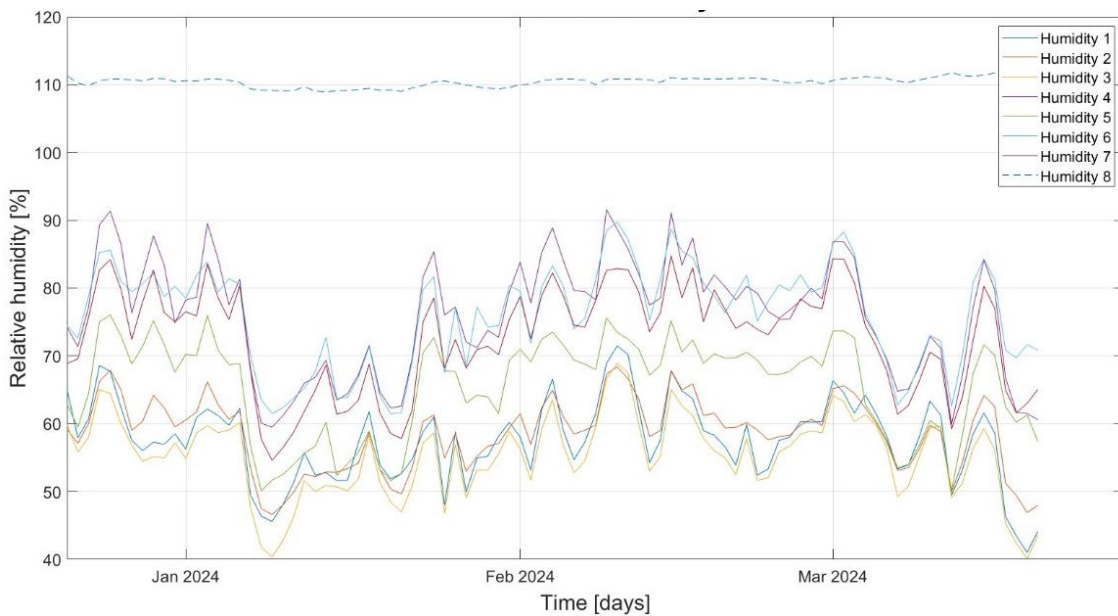
V grafu na Obrázku 25 je zobrazena křivka prokládající nejnižší naměřené hodnoty teploty vzduchu uvnitř systému, měřené v minutových krocích, společně se signálem řízení topného kabelu. Signál z topného kabelu je pouze v pozicích 0 (off) nebo 1 (on).



Obrázek 25 Graf průměrné vnitřní teploty v minutových krocích a signál řízení topného kabelu

5.3. Vlhkost vzduchu

Senzory teploty a vlhkosti vzduchu jsou totožné, máme tedy stejně jako u teplot dvě hodnoty vlhkosti měřené v podhledu a zbylých šest hodnot je přímo z prostoru rostlin (Obrázek 26).

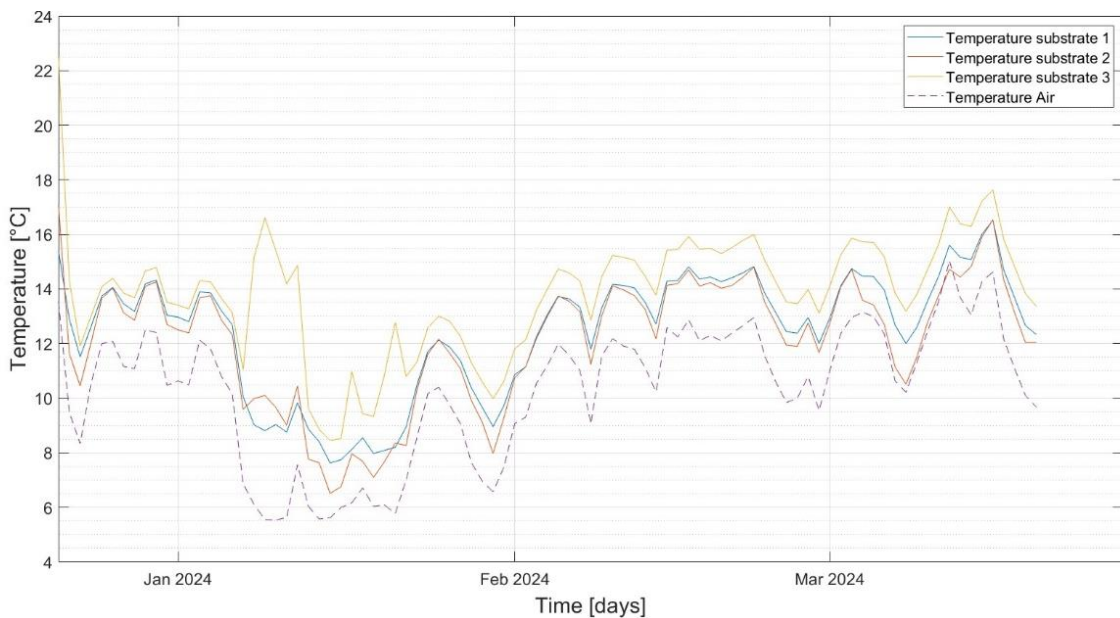


Obrázek 26 Graf průběhu naměřených relativních vlhkostí

Hodnotu, kterou nám naměřil *Senzor 8* můžeme rovnou vyloučit, protože senzor bude pravděpodobně poškozený nebo špatně kalibrovaný. Hodnota 110 % relativní vlhkosti není možná. Ostatní hodnoty mají podobný trend a pohybují se v reálném rozsahu 40–92 % r.h.

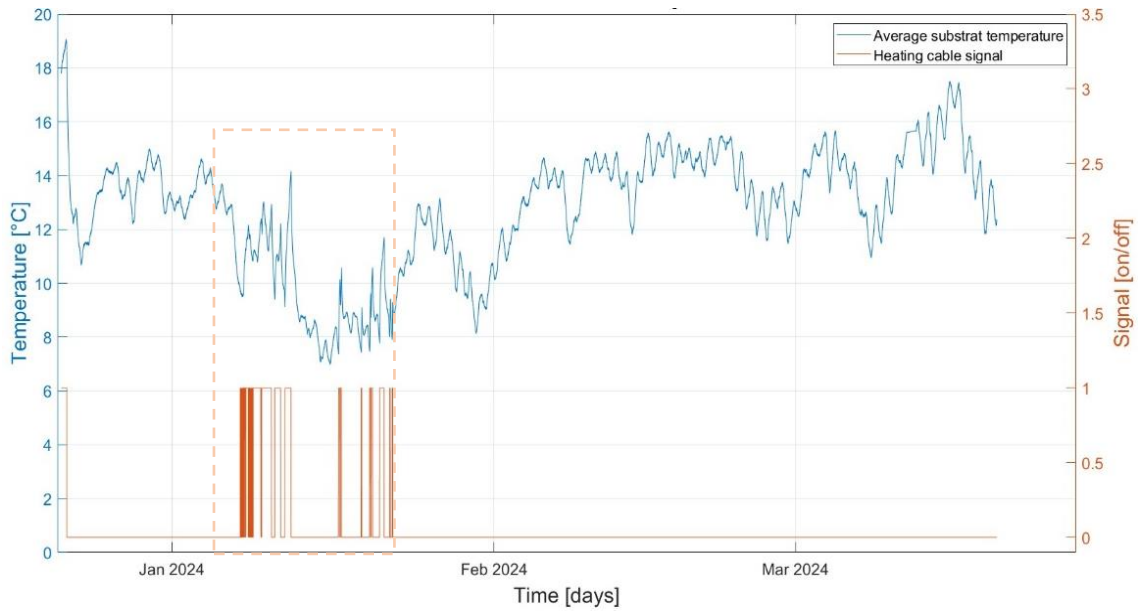
5.4. Teplota substrátu

Na Obrázku 27 jsou v grafu zobrazeny průběhy teplot substrátu společně s průměrnou teplotou v interiéru pro porovnání. Teplota vzduchu je oproti teplotě substrátu logicky nižší, nicméně trendy jsou si velmi podobné. V případě *Teploty substrátu 3* (*Temperature substrate 3*), můžeme v nejchladnějším období (7.1.–22.12.2024) vidět odchylku směrem do vyšších teplot. V tomto období, jak víme z kapitoly 5.2. *Teplota vzduchu*, docházelo k vytápění. Odchylka je tak pravděpodobně způsobena umístěním senzoru v blízkosti topného kabelu.



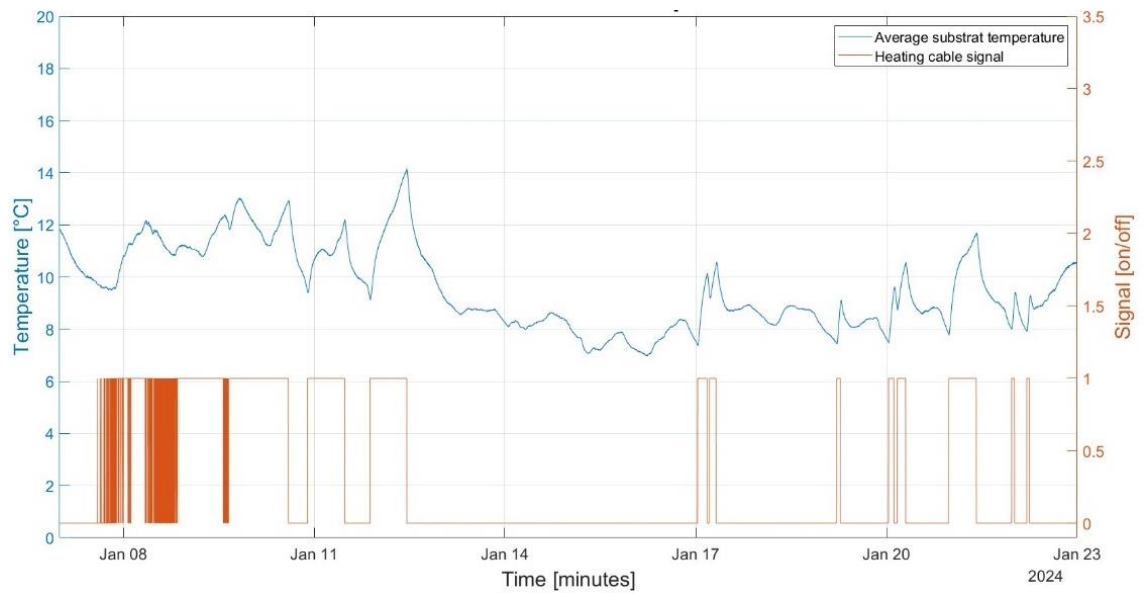
Obrázek 27 Graf průběhu teplot v substrátu

V grafu (Obrázek 28) je zobrazena průměrná teplota substrátu společně se signálem on/off topného kabelu v minutových krocích měření. Průměrná teplota substrátu se v celém analyzovaném období pohybuje v rozmezí 5,9 °C až 23,4 °C.



Obrázek 28 Graf teploty substrátu s řídicím signálem topného kabelu

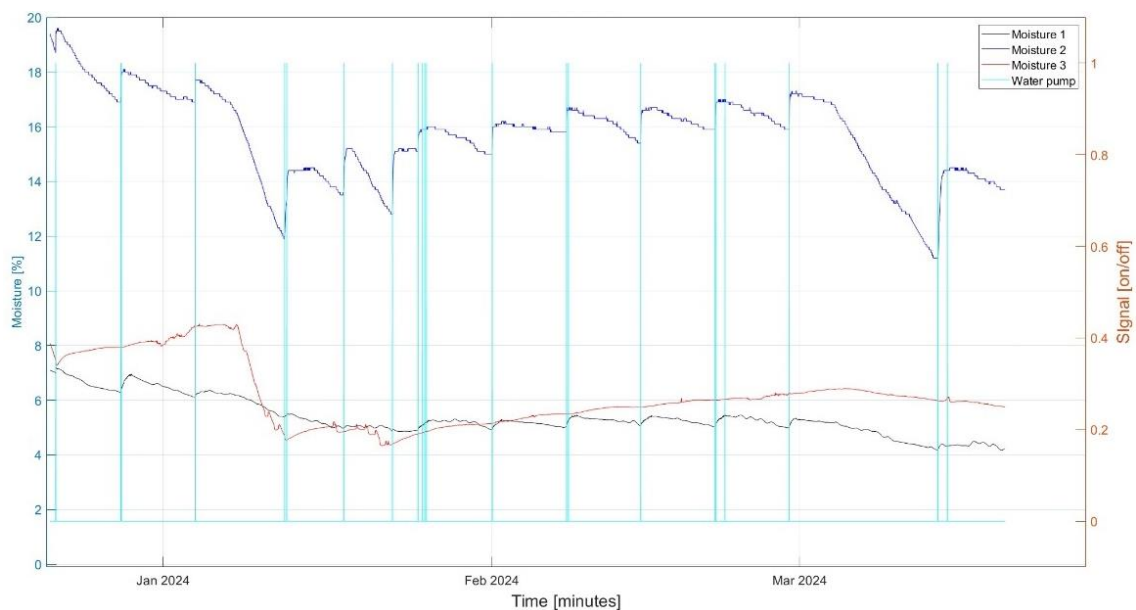
Pro lepší čitelnost je na následujícím Obrázku 29 zobrazena jen vyznačená část grafu, kdy docházelo k vytápění (7.1.-22.1.2024)



Obrázek 29 Část předchozího grafu, teplota substrátu v minutových krocích společně s řídicím signálem topného kabelu v období nejnižších teplot

5.5. Vlhkost substrátu, zavlažování a teplota vody

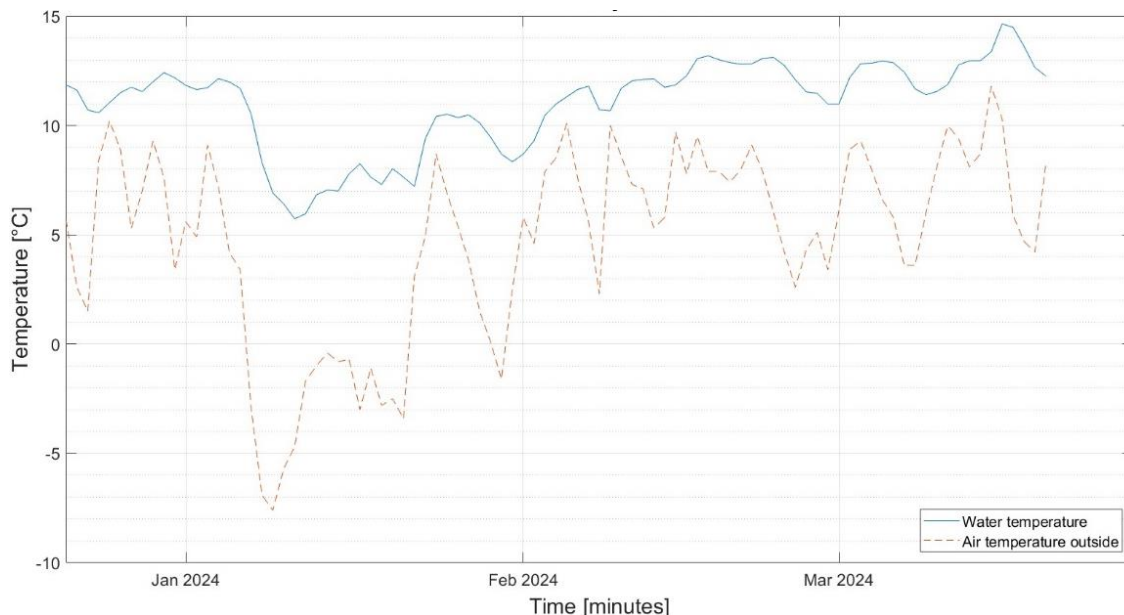
V grafu na Obrázku 30 můžeme vidět naměřené hodnoty vlhkosti substrátu, která byla měřena třemi senzory a signál ON/OFF čerpadla na vodu. Při první instalaci byly senzory vlhkosti nešťastně umístěny do spodní vrstvy keramzitu, který zajišťuje dobrý odtok vody ze substrátu, nicméně jako materiál pro měření senzory není ideální. Při pozdějším vstupu do systému byl jeden ze sensorů posunut a umístěn do vrstvy substrátu. Právě toto je dobře vidět v grafu na Obrázku 30. Hodnota vlhkosti 2 (Moisture 2) viditelně koreluje s frekvencí zavlažování podle očekávání. Pro další práci s daty je tedy relevantní použít jen tuto hodnotu, protože ostatní senzory nám nepřinášejí směrodatné informace.



Obrázek 30 Graf signálu čerpadla na vodu a měřených vlhkostí substrátu

Nedostatkem při měření vlhkosti substrátu jsou nekalibrované senzory měření. Z grafu tak můžeme sledovat trend křivky, absolutní naměřenou hodnotu vlhkosti však nikoliv.

Dalším parametrem, který se týká zavlažování a ovlivňuje nám vnitřní prostředí je teplota vody. Ta se pohybuje v rozmezí 5,6 – 15,3 °C a na Obrázku 31 můžeme vidět určitou korelaci s teplotou vzduchu venku.

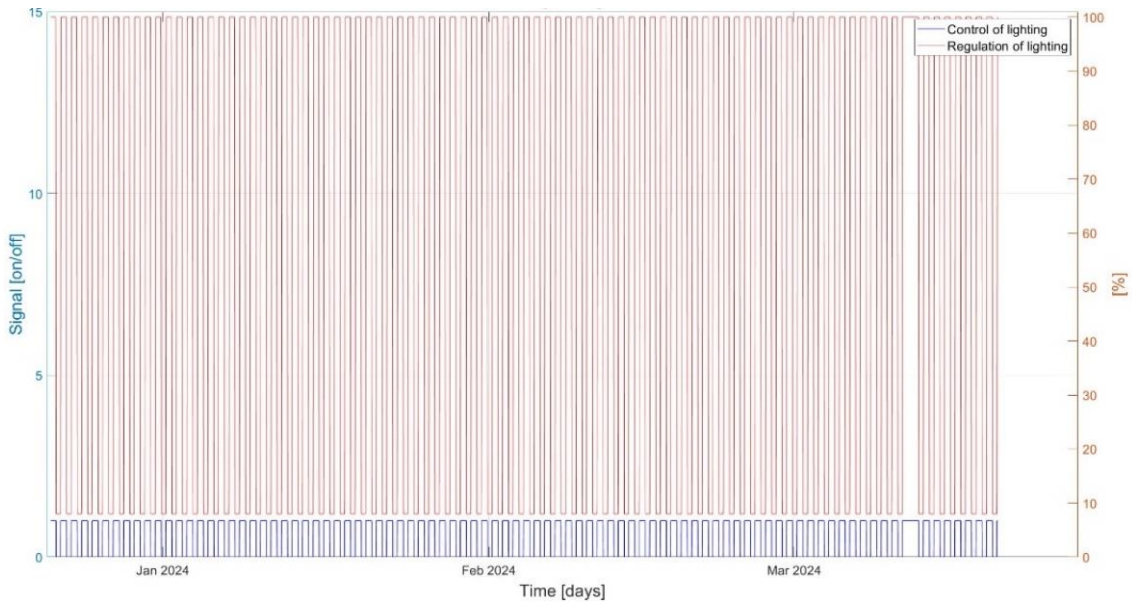


Obrázek 31 Graf zobrazující teplotu vody a teplotu vzduchu venku

5.6. Osvětlení

Modrá křivka grafu z Obrázku 32 nám zobrazuje signál spuštění a vypnutí osvětlení. Pohybuje se tedy pouze v poloze 0 nebo 1.

Druhá křivka (Regulation of lighting), přestože její průběh není tak dobře čitelný, znázorňuje jednoduchou regulaci, ke které dochází. Instalované osvětlení Spectrasol má zabudované řízení s pomocí stmívače. Zapínání a vypínání osvětlení je vytvořeno tak, aby simulovalo přirozený východ a západ slunce, kdy stmívání a rozednívání je plynulé. Při rozsvěcení tak dochází po dobu jedné hodiny k plynulému náběhu do 100 %. Stejně tak je tomu při zhasínání, kdy je světlo po dobu jedné hodiny postupně tlumeno až do zhasnutí. V pozici ON je světlo 14 hodin denně a na výkon 100 % tedy svítí 12 hodin denně.



Obrázek 32 Graf režimu osvětlení

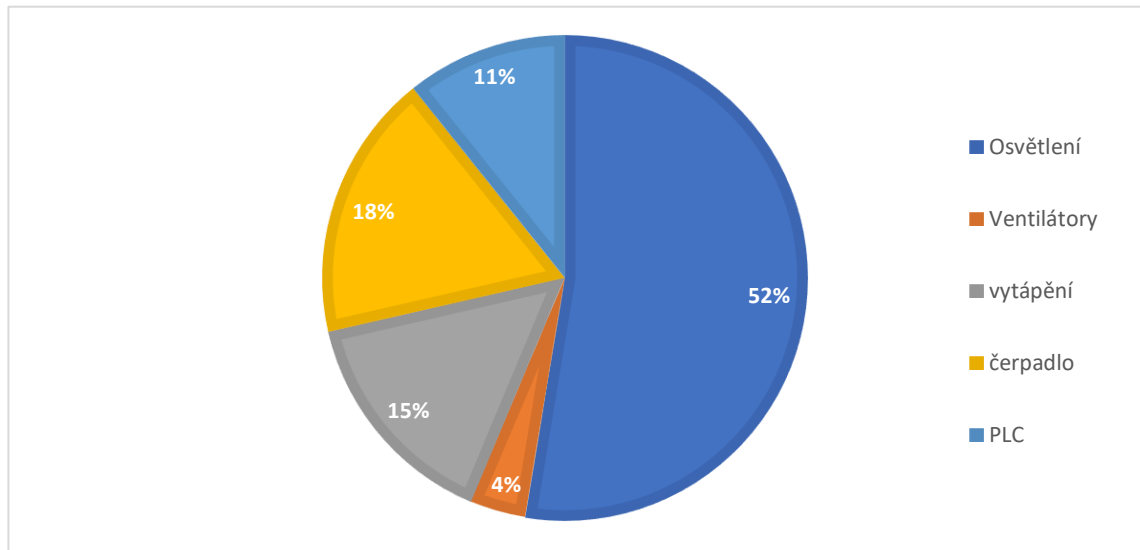
5.7. Spotřeba elektrické energie

Celková naměřená spotřeba elektrické energie v analyzovaném období je 305 kWh. V *Tabulce 8* je uveden rozpis jednotlivých spotřebičů a jejich spotřeba pro dané období. Mezi skutečnou naměřenou hodnotou a hodnotou která byla dopočítána z měření jednotlivých spotřebičů vzniká malý rozdíl. Domnívám se, že rozdíl pochází z řízení osvětlení, které je zajištěno stmívačem.

Tabulka 8 Spotřeba elektrické energie jednotlivých spotřebičů

Spotřebič	Spotřeba v období 21.12.2023-20.3. 2024 [kWh]
Osvětlení	156,8
Ventilátory	11,1
Vytápění	45
Čerpadlo	53,2
PLC	32
Celkem součet	298
Celkem naměřeno	305

Je zřejmé, že největší podíl, téměř 53 %, na spotřebě elektrické energie, tvoří samotné osvětlení. Jak velký podíl tvoří jednotlivé spotřebiče na celkové spotřebě můžeme vidět na Obrázku 33.



Obrázek 33 Podíl spotřebičů na spotřebě elektrické energie

5.8. Analýza pohledem

Na první pohled je viditelné, že v systému není takové množství rostlin, jako je uvedeno v původní dokumentaci. Některé rostliny zimní období nepřežily a musely být ze systému odstraněny. Stále je vidět, že některé z rostlin neprosperují příliš dobře, opadávají, hnědnou a žloutnou jim listy. Na druhou stranu, u jiných rostlin jsou vidět nové malé listy a vypadají, že v prostředí prosperují. Na některých rostlinách jsou vidět oba tyto trendy chování současně. Ve vrchní části rostliny jsou vidět mladé, sytě zelené lístky, ve spodní části rostliny pak suché opadané listy. Taková rostlina je vyfocena na Obrázku 34. Dokumentace jednotlivých detailů přes zasklení není příliš dobrá, nicméně při bližším pohledu můžeme na rostlině vidět právě mladé zelené listy a v jejím pozadí, na substrátu, vidíme ležet suché listy. Domnívám se, že toto by mohlo být způsobeno mimo jiné nedostatečnou distribucí osvětlení ke spodním listům rostlin.



Obrázek 34 Prosperující rostlina s mladými zelenými listy, které současně opadávají listy v její spodní části

Dalším, na první pohled viditelným nedostatkem, je plesnivějící povrch substrátu v levé části Metrorostu. Je vidět, že substrát je vlhký a nedochází k dostatečnému odtoku přebytečné vody. Jedná se o nejpřednější část celého systému a je tedy zřejmé, že voda do těchto míst stéká a vzhledem k umístění odtokových otvorů (Obrázek 19), nemá kam odtéct. Na Obrázku 35 je vidět bílý povlak plísně na povrchu substrátu. Na Obrázcích 36 a 37 je pak zobrazeno, ve které části Metrorostu dochází k usazování vody, společně se zobrazenými otvory pro její odtok.



Obrázek 35 Plesnivějící povrch substrátu



Obrázek 36 Čelní pohled na Metrorost a vyznačená část kde dochází k plesnivění

6. Optimalizace systému

Analyzovaná data jsou ze zimního období. Rostliny jsou v tomto období ve vegetačním klidu [42] a je zapotřebí jim dopřát podmínky, jaké v tomto období potřebují. Protože se jedná o okrasný systém, není cílem vytvořit ideální podmínky pro růst a vývoj rostlin, nýbrž podmínky potřebné pro jejich přežití. Rostlina v tomto období zpomalí nebo zcela zastaví své životní funkce. [42] Z toho logicky vyplývá, že potřeba živin (tedy vody) a zdroje světla, spolu s nízkou teplotou vzduchu, je také nižší.

Cílem optimalizace by tedy mělo být v první řadě zlepšení vnitřního prostředí rostlin v duchu úvahy z předchozího odstavce. Konkrétní požadované hodnoty zlepšení budou uvedeny v následujících kapitolách, vytvořených pro jednotlivé parametry vnitřního prostředí.

Dalším požadovaným efektem optimalizace je úspora elektrické energie a tím úspora provozních nákladů. Systém řízení by měl být nastaven tak, aby ve vnitřním prostředí vytvářel ideální požadované parametry a nebylo dodáváno do systému víc energie, než je potřeba. V takto malém systému jako je Metrorost se pravděpodobně nebude jednat o zásadní úspory. S ohledem na vize a plány obdobných projektů, které mohou být násobně větší, se však ve výsledku i malá úspora může zásadně projevit.

Metrorost jako projekt je považovaný spíše za prototyp, který ukáže chování systému a umožní optimalizaci jeho řízení tak, aby byl provozu schopný bez potřeby ho fyzicky kontrolovat. Pro některé parametry by tak bylo vhodné vzít v úvahu univerzálnost jejich řízení. Znamenalo by to, že řízení by bylo stále stejné bez ohledu na velikost, tvar nebo umístění obdobného systému.

6.1. Dílčí navrhované optimalizace

V této kapitole krátce uvedu některé z optimalizací, které jsou dle mého názoru nejzásadnější pro provoz. Pro jednotlivé návrhy uvádím jen myšlenky, ze které vyplívají a možná řešení, bez hlubšího zabývání se problematikou.

6.1.1. Volba vhodného osvětlení

Osvětlení Spectrasol je vytvářeno a hodnoceno s ohledem na citlivost lidského oka. Na webu Spectrasol je uvedeno hodnocení dle Brainardovy metody, která se zabývá reakcí lidského organismu na různé vlnové délky světla. [43] Potřeba rostlin je ovšem odlišná od potřeb lidského organismu, jak je uvedeno v kapitole 2.3.9. *PAR (Světlo)*. Konkrétně modré světlo do 450 nm potřebují rostliny pro svou kvalitní morfologii. Na webu Spectrasol se však dočteme, že právě oblast 415-455 nm je pro jejich osvětlení potlačena. Současně je zde zastoupeno významné množství vlnových délek, které rostliny nevstřebávají. Vzhledem k tomu, že osvětlení tvoří až 50 % z celkové spotřebované elektrické energie celého systému, je zapotřebí důsledně zvažovat, v jakém spektru a s jakou intenzitou budeme rostlinám světelné záření dodávat.

Osobně se obávám, že v důsledku absence modrého spektra záření by rostliny v delším časovém horizontu nemusely dostatečně prospívat, případně by se mohla projevit jejich nekvalitní morfologie, kdy se prodlužují stonky mezi listy (internodia), nové listy jsou menší, světlejší a starší listy umírají.

Existují speciálně vyvinutá osvětlení právě pro rostliny, které zastupují potřebné vlnové délky. Toto osvětlení má ovšem většinou fialovou barvu. Vzhledem k tomu, že Metrorost plní především funkci estetickou, fialové osvětlení by nevytvářelo tak přirozený a příjemný vizuální dojem. Je tak zapotřebí najít rovnováhu mezi potřebami rostlin a spotřebovávanou energií, kterou bychom měli šetřit nejen s cílem ušetřit provozní náklady.

6.1.2. Optimalizace režimu osvětlení

V kapitolách 6. *Optimalizace systému* a 2.3.9.1. *Rostlinné biorytmy* je zmíněno, jak rostliny střídají svá vegetativní období a řídí se podle podmínek okolního prostředí jako je teplota nebo délka dne. S ohledem na tento fakt bych navrhla optimalizaci režimu osvětlení. Sekundárním efektem tohoto opatření by současně měla být úspora elektrické energie.

V Tabulce 9 jsou uvedeny délky dne při dnech slunovratu a rovnodennosti. V zimním období je tak délka dne i pouhých 8 hodin. Rostliny jsou v tomto období ve vegetačním klidu, kratší čas svícení je proto v kombinaci s nízkou teplotou dostačující. Stejně tak bychom měli přistupovat k umělému osvětlení v systému Metrorost. Na druhou stranu je potřeba brát v úvahu fakt, že systém Metrorost je primárně okrasný a nemůžeme zcela vypnout osvětlení už například v 17 hodin odpoledne, stejně jako zachází slunce.

Tabulka 9 Délky dnů v časech rovnodennosti a slunovratů

	datum	Přibližná délka dne
Březnová rovnodennost	20. – 21.3.	12 h 11 min
Letní slunovrat	20. – 21.6.	16 h 23 min
Zářijová rovnodennost	22. – 23.9.	12 h 13 min
Zimní slunovrat	21. – 22.12.	8 h 3 min

S ohledem na tyto faktory bych navrhovala alespoň částečné stmívání, které světla Spectrasol umožňují. Provedla jsem jednoduchý výpočet, ve kterém jsem nastavila podmínky na základě hodnot z Tabulky 9. V období zimy jsem po značnou část dne utlumila osvětlení na 50 % výkonu. Tímto jednoduchým výpočtem jsem dospěla k roční úspoře 9 % v porovnání se současným nastavením.

6.1.3. Zastínění rostlin v noci od veřejného osvětlení

Jak bylo uvedeno v kapitole 2.3.9.1 *Rostlinné biorytmy*, i rostliny se orientují podle střídání světla a tmy, kdy v každé z těchto fází dochází k jiným vnitřním procesům a jinému druhu dýchání. Odlišit tak tyto dvě fáze je pro prosperitu rostlin důležité. Toto může být narušeno osvětlením, které je v prostoru metra umístěno a svítí trvale celou noc.

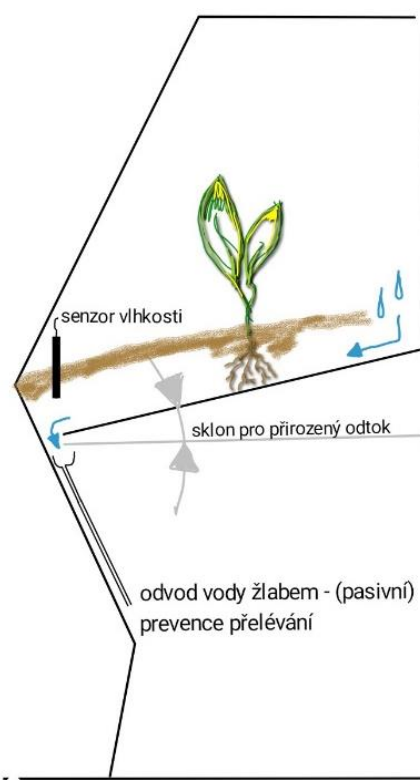
Aby se rostliny mohly řídit svými vnitřními procesy bez negativních vnějších vlivů, bylo by vhodné zajistit jim v noci skutečnou tmu, nebo se k ní alespoň co nejvíce přiblížit.

Protože Metrorost má velmi specifický tvar, je obtížné implementovat zastínění, které by bylo funkční, snadno říditelné a zároveň by nenarušovalo estetiku. Nejjednodušším krokem by bylo zhasnutí nežádoucích světel, která mají ovšem svou funkci a jeho zhasnutí by mohlo mít nežádoucí dopady, jako například zvýšení kriminality. Kompromisní variantou by tak mohla být změna vlnového spektra použitého veřejného osvětlení. Vlnové spektrum by se zvolilo takové, aby byla stále zajištěna dostatečná osvětlenost veřejného prostoru a současně by co nejméně ovlivňovala život rostlin.

6.1.4. Umístění odtokových otvorů

Vzhledem ke vznikající plísni na povrchu substrátu je zřejmé, že umístění odtokových otvorů není nejvhodnější (Obrázek 19) Dno květináče pod substrátem má sklon právě kvůli odtoku vody a dává tedy smysl, aby odtokové otvory byly v nejnižším bodě dna.

Na Obrázku 37 je schematicky nakreslený návrh jiného přístupu pro odvod vody. Jednalo by se o žlab, který by byl po celé délce nejnižší položené hrany květináče. Tímto způsobem by byl zajištěn kvalitní odvod vody ve všech místech substrátu. Současně by bylo možné umístit zdroj zavlažování pouze v horní části květináč a voda by následně gravitačně stékala. Pokud by tímto způsobem byl zajištěn odtok vody, mohly by pak senzory vlhkosti půdy být umístěny například jen v dolní části květináče. Pokud by totiž klesla hodnota vlhkosti v tomto místě, dalo by se předpokládat, že ve zbytku substrátu je vlhkost ještě nižší a mohlo by se na základě této hodnoty regulovat zavlažování.



Obrázek 37 Návrh řešení odtokového žlabu a v souvislosti s tím umístění zdroje vody a senzorky pro měření vlhkosti půdy

6.1.5. Řízení vytápění

Na základě znalostí z rešerše lze udělat závěr, že pro systém Metrorost není cílem dosažení teplot optimálních pro růst rostliny. Tento faktor hraje velkou roli při komerčním pěstování, kdy je růst rostlin a jejich plodů důležitý pro výnos. V našem případě, kdy jsou rostliny pouze okrasné v prostorově vymezeném systému, jejich příliš rychlý růst je nežádoucí. Z toho důvodu je možné připustit v systému nižší teploty vzduchu, které zajišťují pouze přežití rostliny.

V době, kdy vnější teploty vzduchu klesaly nejnižší v analyzovaném období, klesla vnitřní teplota substrátu až na 7 °C a teplota vzduchu uvnitř systému až na 5 °C. Z rešerše víme, že rostliny, které jsou citlivé na chlad snesou nejnižší teplotu vzduchu 8 °C, odolnější rostliny pak 4 °C. Protože nevíme, jak jsou rostliny v Metrorostu vůči chladu odolné, měli bychom připustit variantu menší odolnosti a snažit se tak udržovat v systému minimální teplotu vzduchu právě 8 °C.

Jediným zdrojem tepla je topný kabel umístěný v substrátu, který je regulovaný v závislosti na měřené teplotě substrátu. Průměrný rozdíl mezi průměrnou teplotou substrátu a průměrnou teplotou vzduchu je 2,5 °C. Pokud tedy chceme, aby teplota vzduchu neklesla pod 8 °C, neměla by teplota substrátu klesnout pod 10,5 °C.

6.2. Diskuse k dílčím navrhovaným optimalizacím

Volba vhodného osvětlení pro rostliny je zásadní. Z tohoto důvodu v této kapitole upozorňuji na rozdíly mezi hodnotami skutečného instalovaného osvětlení a hodnotami, které jsou uvedeny v rešerši této práce v kapitole 2.3.9. *PAR (světlo)*. Osvětlení Spectrasol je hodnoceno s ohledem na citlivost lidského oka a z tohoto důvodu je potlačena část modrého spektra, kterou však rostliny pro svůj kvalitní vývoj potřebují.

V návaznosti na to je potřeba zmínit i řízení osvětlení. Z kapitoly 5.7. *Spotřeba elektrické energie* víme, že osvětlení tvoří více jak 50 % spotřeby Metrorostu. Jeho řízení se tak bude zásadně odrážet na výsledných provozních nákladech. Pokud bychom optimalizovali řízení osvětlení, zajistili bychom rostlinám podmínky podobnější těm v přírodě a v porovnání se současným režimem by došlo i k finanční a energetické úspoře.

Zastínění rostlin od veřejného osvětlení je konkrétní problematika týkající se umístění ve vestibulu metra, kde skutečně dochází k intenzivnímu svícení po celou noc. Z kapitoly *Rostlinné biorytmy* víme, že rostliny střídají své vnitřní procesy na základě střídání dne a noci. Tato jejich přirozenost by mohla být světelným smogem neblaze narušena.

Jedním ze zásadních nedostatků, který v Metrorostu nastal, je špatně provedený odvod přebytečné vody, v důsledku čehož se na povrchu substrátu vytváří plíseň. Bez důsledného odvodu přebytečné vody může nastat situace, kdy v substrátu není dostatečné množství vzduchu, který rostliny potřebují.

Metrorost je instalovaný ve vestibulu metra, kde jsou teplotní podmínky velmi podobné těm venkovním. S touto problematikou se při umístění rostlin v interiéru budovy nesetkáme a je charakteristický právě pro tuto instalaci. Řízení vytápění v zimním období je pro rostliny nezbytné a v kombinaci s ostatními parametry je také obtížné. Hodnota teploty substrátu nám totiž ovlivňuje například množství odpařené vody. Od toho se odvíjí vlhkost substrátu, vlhkost a teplota vzduchu, a v návaznosti na to pak potřeba větrání a zavlažování. Současně je potřeba brát ohled na životnost instalovaných komponentů a tomu přizpůsobit frekvenci spínání.

Právě z důvodu provázanosti těchto parametrů je optimalizaci vytápění věnovaná následující kapitola. Zvolila jsem postup s využitím neuronových sítí. Jednotlivé kroky i s výsledky jsou strukturovaně rozvedeny v následující kapitole.

7. Optimalizace řízení vytápění

Z důvodu provázanosti ostatních parametrů s hodnotou teploty, se optimalizaci jejího řízení věnují v celé této kapitole. K modelování chování jsme použili neuronové sítě, s nimiž jsme mohli ověřit chování systému po nastavení vlastních podmínek pro vytápění.

7.1. Tvorba modelu

Do neuronové sítě jsou vloženy parametry (prediktory), na základě kterých se neuronová síť naučí chování výstupního parametru, kterým je teplota substrátu. Správnost a přesnost tohoto procesu, a z něho vzniklé funkce, je následně ověřena porovnáním s dostupnými měřenými daty v jiném časovém období. Po nalezení nejpřesnější funkce popisující chování substrátu je tato funkce dále použita pro predikci spínání topného kabelu v případě, že nastavíme vlastní podmínky pro jeho zapnutí a vypnutí. Z tohoto popisu chování pak zjistíme, zda se zlepšila kvalita vnitřního prostředí s ohledem na požadované teploty (kapitola 6.1.5. Řízení vytápění) a z predikovaného chování topného kabelu budeme moci zjistit, zda došlo k úspoře na spotřebě elektrické energie a porovnat tyto hodnoty s původními hodnotami, ze kterých jsme vycházeli.

V tabulce 10 jsou vypsány jednotlivé kroky celého předpokládaného postupu a jejich dílčí úkoly.

Tabulka 10 Dílčí úkoly plánovaného postupu

I. Učení neuronové sítě	- Tvorba vstupních data-setů
	- Volba časového období k učení
II. Ověření správnosti vzniklé f-ce	- Volba časového období pro zkoušku
	- Ověření, porovnání s původními daty
III. Aplikace vzniklé funkce	- Volba nejvhodnější funkce
	- Stanovení okrajových podmínek
IV. Porovnání s původním řízením	- Srovnání kvality vnitřního prostředí
	- Srovnání spotřeby elektrické energie

V Tabulce 10 je uveden postup, jak byl naplánován před samotným začátkem práce. Jak už to tak bývá, samotný proces nešel podle plánu a při jeho realizaci bylo zapotřebí se občas vrátit o krok zpět, případně jeden z kroků vícenásobně opakovat, aby získané výsledky byly co nejlepší pro další postup. Následující kapitoly tedy popisují skutečný postup práce, který je rozepsaný do jednotlivých kroků. Na závěr bude skutečný postup shrnut v tabulce podobně, jako byl shrnut plánovaný postup v Tabulce 10.

Skutečný postup celého procesu:

I. Učení neuronové sítě (Model)

V první řadě bylo zapotřebí vybrat data, která vložíme do neuronové sítě a zvolit časové období, ve kterém se neuronová síť bude tzv. učit. Učením se v tomto smyslu rozumí hledání vztahů mezi jednotlivými vloženými parametry. Vznikly tak data-sets, které obsahují prediktory a požadovanou odpověď (znázorněnou tučně v tabulce). Všechny prediktory nám v různé míře ovlivňují *teplotu substrátu*, která je pro nás výstupní hodnotou (odpovědí). Mezi všemi těmito parametry hledá neuronová síť souvislosti a vztahy.

Jednotlivé data-sets jsou přehledně uvedeny v následujících Tabulkách 11-3. Bylo zapotřebí se při jejich tvorbě zamyslet nad tím, jaké z dostupných hodnot použijeme. Pro vlhkost půdy byla například vybrána jen jedna ze tří měřených hodnot, protože zbylé dva senzory nejsou vhodně umístěny a nepřinášejí relevantní data. Pro teplotu vzduchu jsem zvolila jinou úvahu a z každého měření (vždy po minutě) jsem vybrala nejnižší naměřenou hodnotu.

Hodnoty, které jsou v data-setech obsaženy jsou rozepsané v první tabulce data-setu 1A, který obsahuje všechny vybrané veličiny. V ostatních data-setech jsou použity stejné hodnoty v různých kombinacích.

Jednotlivé data-sets jsem pojmenovala 1A ,2A, 2B, 3A, 3B a jejich kombinace vznikly na základě úvah o vztazích jednotlivých veličin. Jedná se tedy o volbu na základě subjektivního vnímání těchto vztahů.

Tabulka 11 Data-set 1A s popisem použitých dat

1A	Topný kabel	Signál on/off
	Teplota interiéru	Nejnižší hodnoty ze všech šesti teplot v interiéru
	Teplota podhledu	Nejnižší hodnoty ze dvou teplot v podhledu
	Teplota vody	Jediná měřená hodnota
	Vlhkost substrátu	Hodnoty měřená senzorem č. 2
	Signál zavlažování	Signál on/off
	Signál osvětlení	Signál on/off
	Teplota substrátu	Nejnižší hodnoty ze všech tří teplot substrátu

Tabulka 12 Data-setsy 2A a 2B

2A	Topný kabel	2B	Topný kabel
	Teplota podhledu		Teplota interiéru
	Teplota vody		Teplota vody
	Signál zavlažování		Signál zavlažování
	Teplota substrátu		Teplota substrátu

Tabulka 13 Data-setsy 3A a 3B

3A	Topný kabel	3B	Topný kabel
	Teplota podhledu		Teplota interiéru
	Vlhkost substrátu		Signál osvětlení
	Teplota substrátu		Signál zavlažování
			Teplota substrátu

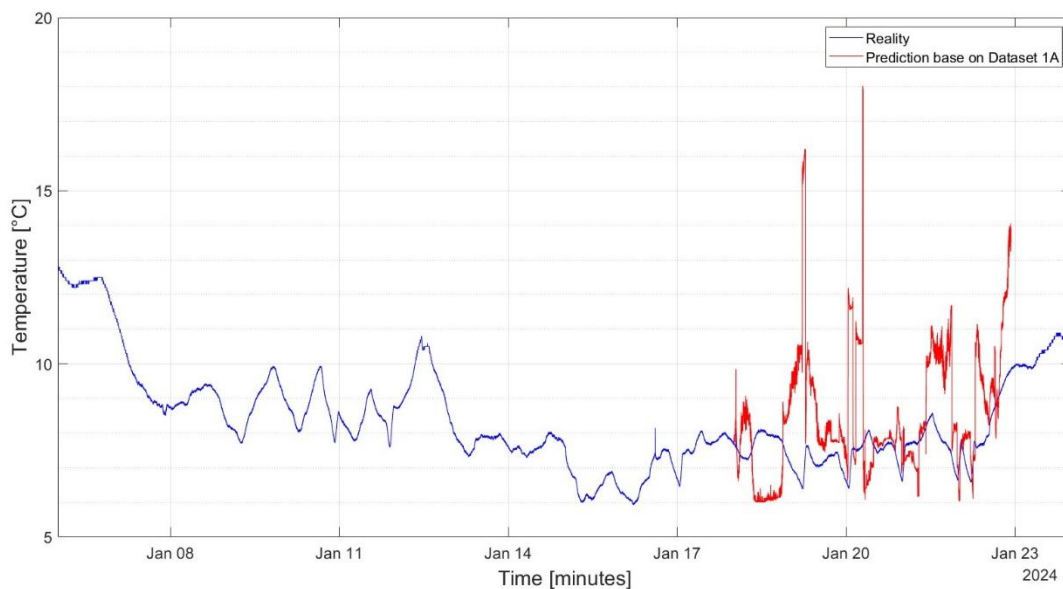
Protože v rámci této optimalizace jde konkrétně o optimalizaci řízení topného kabelu, bylo zapotřebí vybrat z období 7.1.2024 – 22.1.2024, kdy k vytápění docházelo. Na začátku tohoto období nebylo současné řízení vhodně nastaveno (Obrázek 29) a topný kabel spínal velmi často ve velmi krátkých časových intervalech. Toto období bylo v rámci korekce vyloučeno. Pro fázi učení tak byla vybrána data z období 10.1.2024 21:32 – 17.1.2024. 23:57.

II. Ověření správnosti vzniklé funkce (Model)

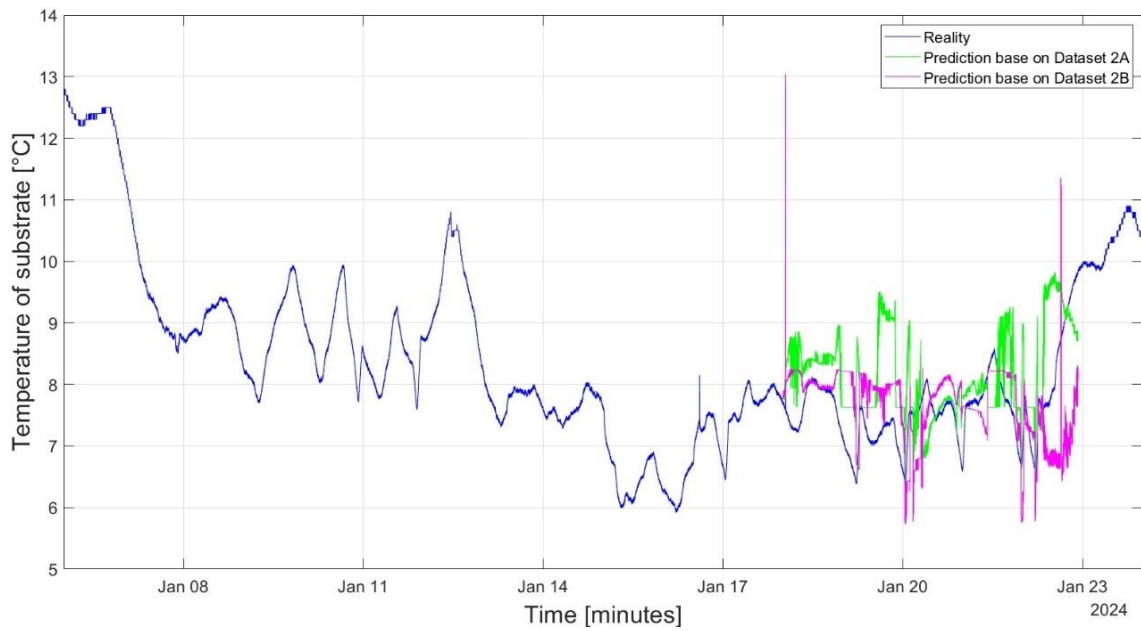
V tomto kroku, byl vložený Data-set rozdělen právě na zmíněné prediktory a na požadovanou odpověď, kterou je teplota substrátu.

Abychom si ověřili správnost vzniklé funkce, byla následně porovnána se skutečným naměřeným průběhem v období 17.1.2024 23:58 – 22.1.2024 22:15. V případě, že zvolený vstupní data-set byl vhodný, měla by výsledná křivka protínající hodnoty vešlé z neuronové sítě být co nejvíce podobná skutečným měřeným datům.

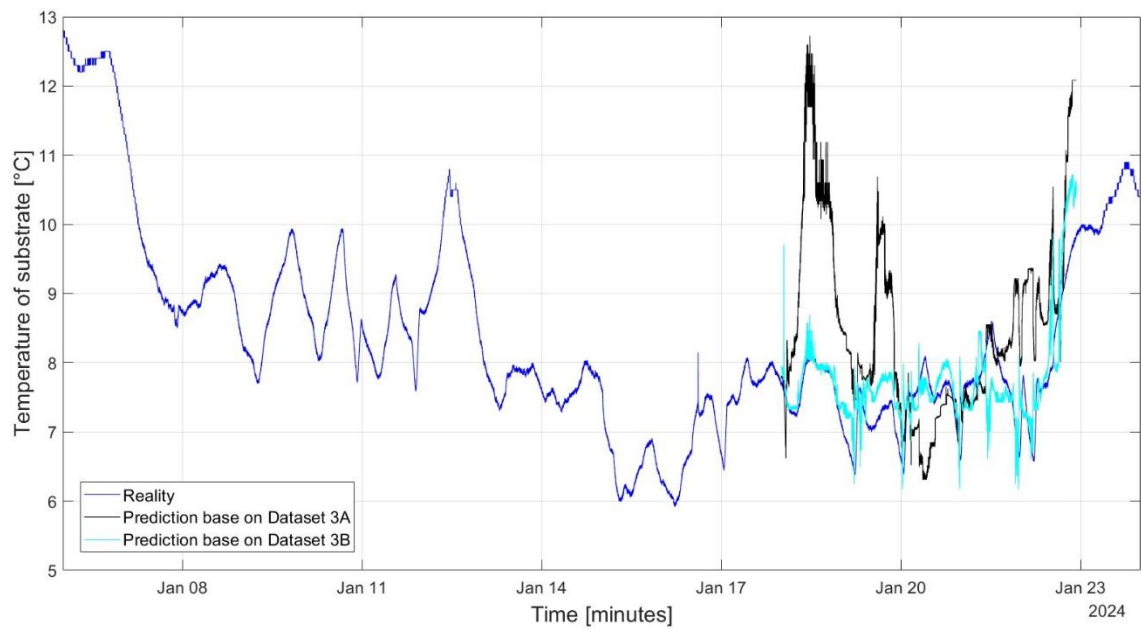
Na následujících Obrázcích 38-41 jsou zobrazeny grafy jednotlivých modelů tvořených na základě různých data-setů. Modrá křivka vždy zobrazuje původní měřenou hodnotu teploty substrátu a červená křivka zobrazuje závislost, kterou vytvořila neuronová síť.



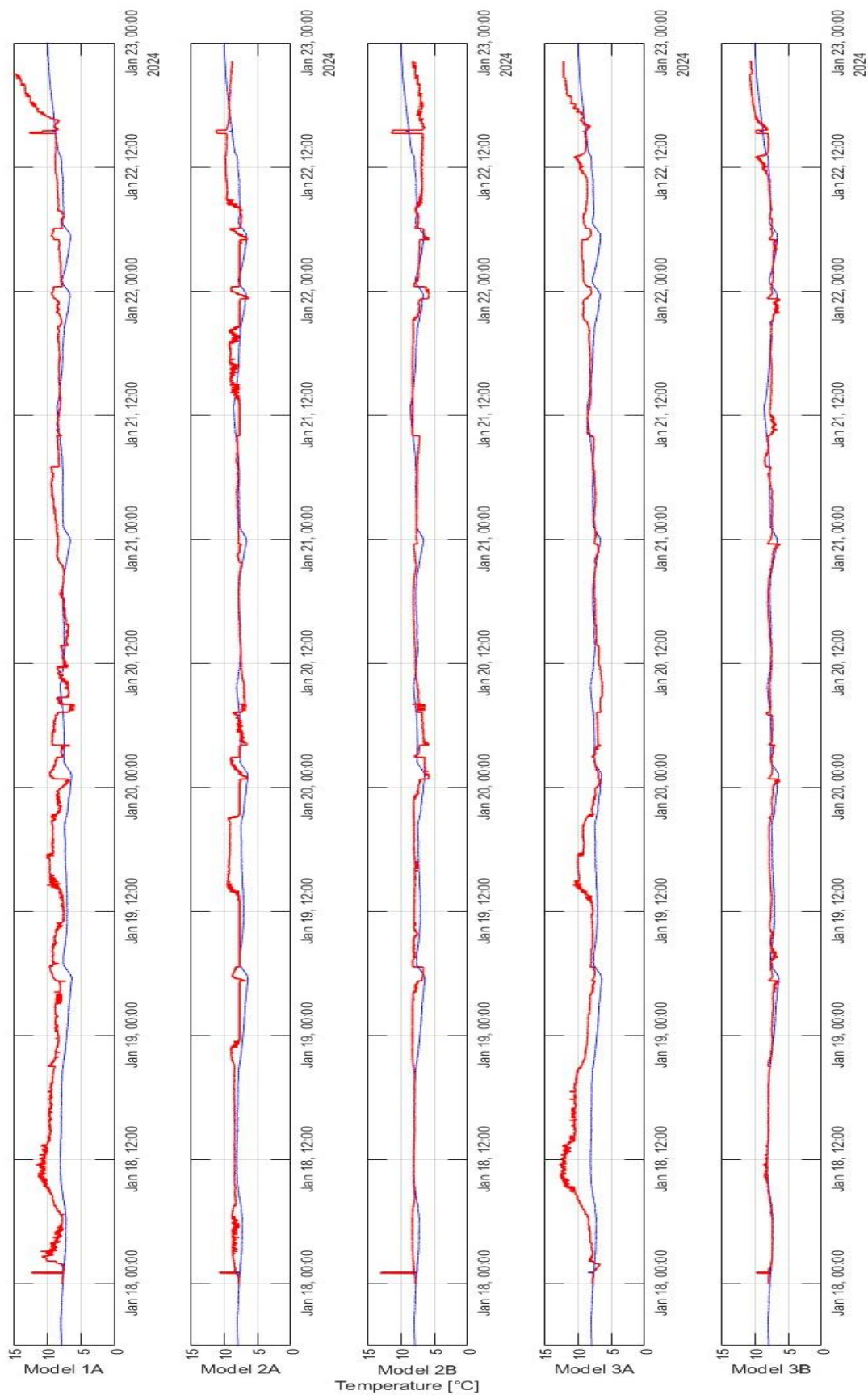
Obrázek 38 Graf skutečné měřené teploty substrátu a závislost vytvořená neuronovou sítí na základě Data-setu 1A



Obrázek 39 Graf skutečné měřené teploty substrátu a závislost vytvořená neuronovou sítí na základě Data-setů 2A a 2B



Obrázek 40 Graf skutečné měřené teploty substrátu a závislost vytvořená neuronovou sítí na základě Data-setů 3A a 3B



Obrázek 41 Porovnání funkcí vytvořených z Data-setů 1A, 2A, 2B, 3A, 3B

Na Obrázcích 38-40 je v grafech lépe vidět, jak jsou hodnoty rozkmitané a je dobře vidět, kdy vytvořené funkce kopírují trendy měřené teploty. Především sledujeme trend stoupání a klesání, jako reakce na zapnutý a vypnutý topný kabel. Na Obrázku 41 jsou hodnoty zobrazeny pod sebou, na kratší časové ose. V tomto grafu nejsou už tolik vidět trendy stoupání a klesání jako v grafech předchozích. Je ovšem mnohem lépe vidět, jak moc vytvořená funkce kopíruje původní měřenou teplotu. Z obou typů grafů je čitelné, že nejlepší chování vykazuje funkce vytvořená na základě Data-setu 3B.

III. Aplikace vzniklé funkce

Při úvahách nad realizací třetí fáze – aplikace, jsme došli k závěru, že potřebujeme znát chování vytvořené funkce pro každý následující krok. Potřebujeme tedy znát, zda oproti hodnotě v čase i , funkce v čase $i+1$ roste, nebo klesá a o kolik. Potřebujeme tedy znát změnu teploty (Δt) pro následující krok.

Z tohoto důvodu bylo zapotřebí se vrátit ke kroku jedna a učit neuronovou síť na jiných vstupních Data-setech, jak je dále rozepsáno v následujícím kroku.

IV. Učení neuronové sítě + ověření správnosti vzniklé funkce (Model-delta)

Prvním pokusem byla změna požadavku na odpověď z původní teploty substrátu na změnu teploty substrátu (Δt_s). Tato hodnota tak byla vložena do Data-setu pro učení neuronové sítě. Nové soubory dat jsem nazvala *Data-sety delta* a jsou přehledně uvedeny v Tabulkách 14-16.

Tabulka 14 Data-set delta 1A

Delta-1A	Topný kabel	Signál osvětlení
	Teplota podhledu	Vlhkost substrátu
	Teplota vody	Změna teploty substrátu (Δt_s)
	Signál zavlažování	
	Teplota interiéru	

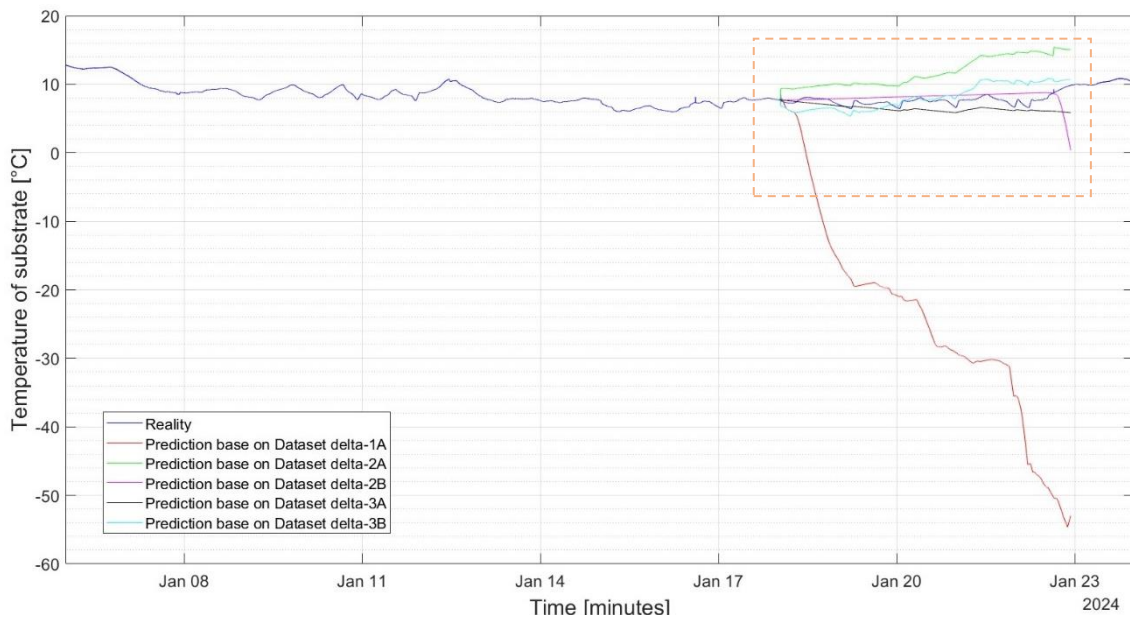
Tabulka 15 Data-sety delta 2A a 2B

Delta-2A	Topný kabel	Delta-2B	Topný kabel
	Teplota podhledu		Teplota interiéru
	Teplota vody		Teplota vody
	Signál zavlažování		Signál zavlažování
	Změna teploty substrátu (Δt_s)		Změna teploty substrátu (Δt_s)

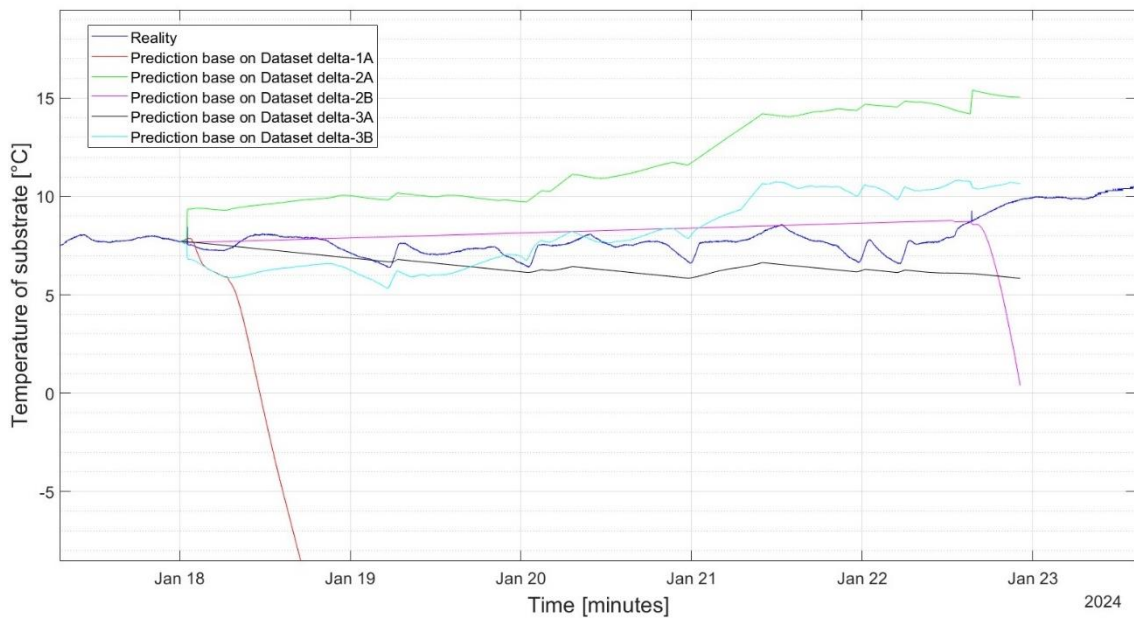
Tabulka 16 Data-sety delta 3A a 3B

Delta-3A	Topný kabel	Delta-3B	Topný kabel
	Teplota podhledu		Teplota interiéru
	Vlhkost substrátu		Signál osvětlení
	Změna teploty substrátu (Δt_s)		Signál zavlažování
			Změna teploty substrátu (Δt_s)

Hodnoty uvedené v Tabulkách 14-16 byly tedy vloženy do neuronové sítě, která opět hledala vzájemné vztahy a naučila se jejich chování. Následně pak, ve fázi testování, byla požadovanou odpovědí změna teploty substrátu (Δt_s). Výsledné hodnoty nejsou tolik rozkmitané jako v předchozím případě. Bylo proto možné je čitelně vyobrazit do jednoho grafu, viditelném na Obrázku 42. V tomto grafu je znázorněna oblast, která je zobrazena na Obrázku 43, pro ještě lepší přehlednost a čitelnost.



Obrázek 42 Srovnání funkcí vzniklých na základě Data-setů delta



Obrázek 43 Bližší pohled na část grafu z předchozího Obrázku 42

Vzniklé křivky jsou velmi nepřesné. Křivka, která se nejvíce podobá skutečným měřeným hodnotám vychází z Data-setu 3B, stejně jako v předchozím případě, nicméně stále není dostatečně přesná. Z tohoto důvodu byl tento krok učení a ověřování znovu opakován s novým Data-setem.

V. Učení n.s. + ověření správnosti vzniklé funkce (Model-delta_delta)

Další myšlenkou bylo učit n.s. na změnách teplot (interiéru (Δt_i), podhledu (Δt_p), vody (Δt_v)), namísto jejich absolutních hodnot a opět pak požadovat jako odpověď změnu teploty substrátu (Δt_s). Vzniklé Data-sets jsem nazvala Data-sets delta_delta a jsou přehledně uvedeny v následujících Tabulkách 17-19.

Tabulka 17 Data-set delta_delta 1A

Delta_delta-1A	Topný kabel	Signál osvětlení
	Změna teploty podhledu (Δt_p)	Vlhkost substrátu
	Změna teploty vody (Δt_v)	Změna teploty substrátu (Δt_s)
	Signál zavlažování	
	Změna teploty interiéru (Δt_i)	

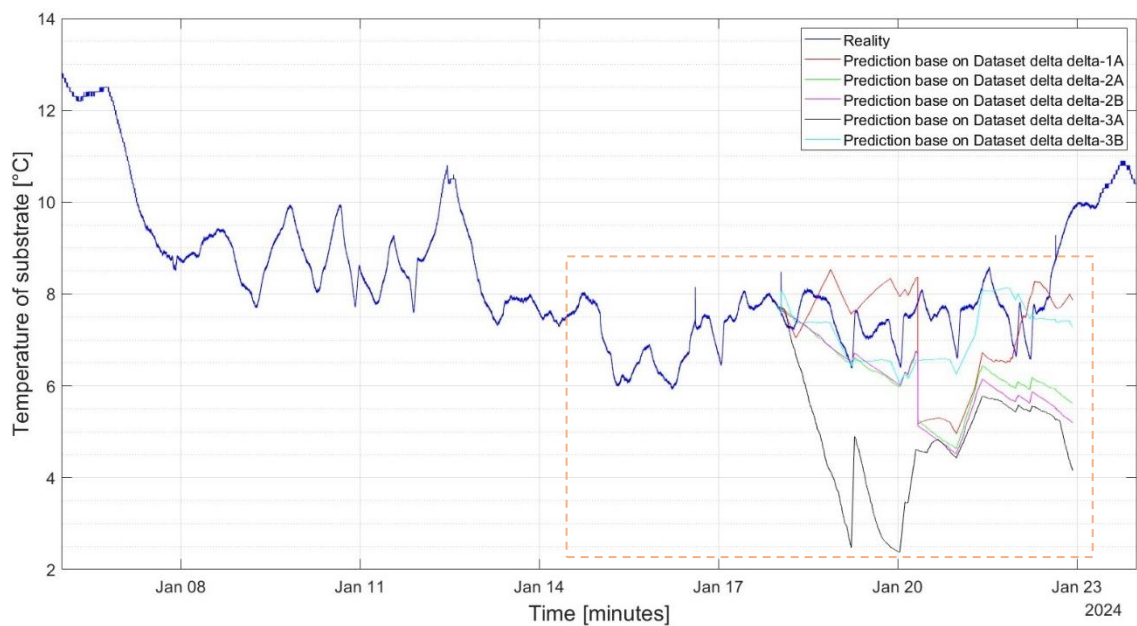
Tabulka 18 Data-sets delta_delta 2A a 2B

Delta_delta-2A	Topný kabel	Topný kabel
	Změna teploty podhledu	Změna teploty interiéru
	Změna teploty vody	Změna teploty vody
	Signál zavlažování	Signál zavlažování
	Změna teploty substrátu (Δt_s)	Změna teploty substrátu (Δt_s)

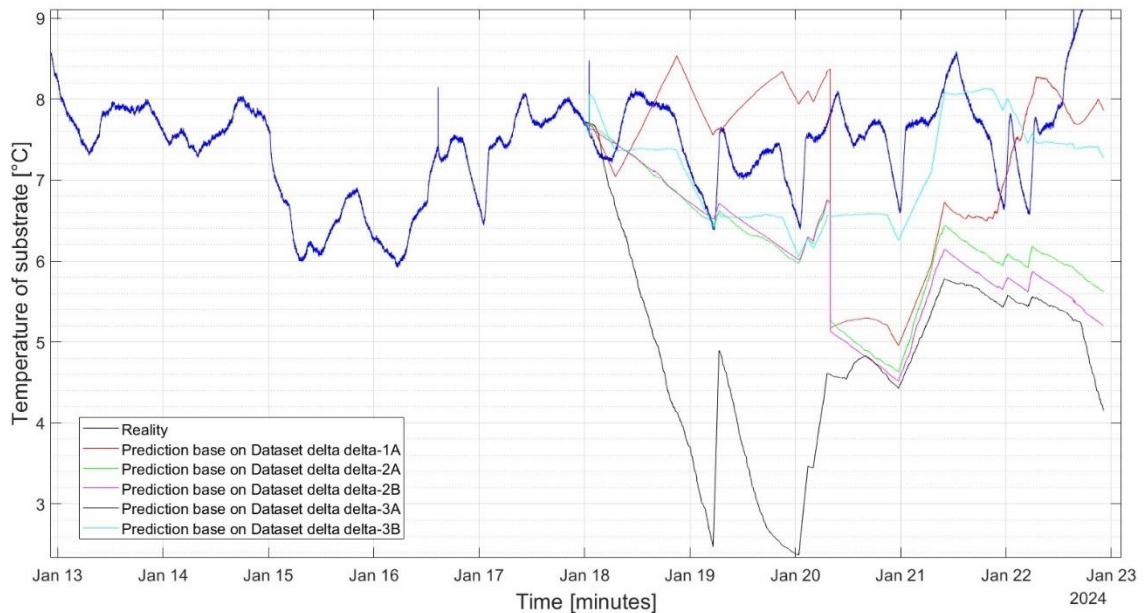
Tabulka 19 Data-sets delta_delta 3A a 3B

Delta_delta-3A	Topný kabel	Topný kabel
	Změna teploty podhledu	Změna teploty interiéru
	Vlhkost substrátu	Signál osvětlení
	Změna teploty substrátu (Δt_s)	Signál zavlažování
		Změna teploty substrátu (Δt_s)

Výsledky učení z Data-setů delta_delta jsou zobrazeny na Obrázku 44. Vyznačená část grafu je pak opět zobrazena na Obrázku 45 pro lepší čitelnost.



Obrázek 44 Srovnání funkcí vzniklých na základě Data-setů delta_delta

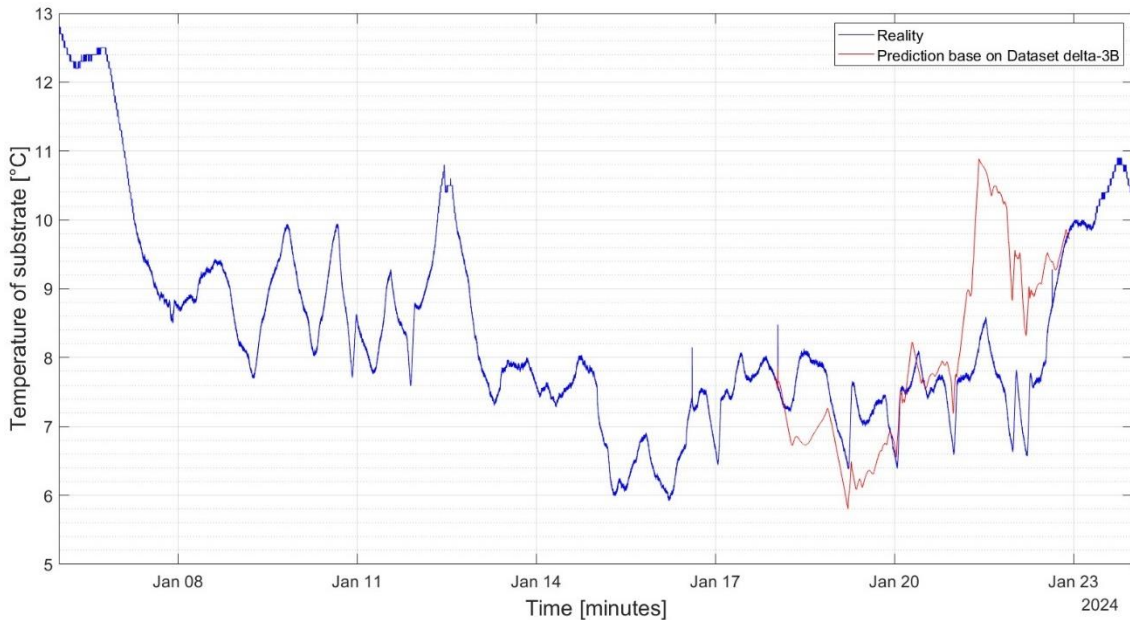


Obrázek 45 Bližší pohled na část grafu z předchozího Obrázku XX

I v tomto případě získáváme nejlepší výsledky na základě Data-setu delta_delta 3B.

VI. Aplikace nejpřesnější dostupné funkce

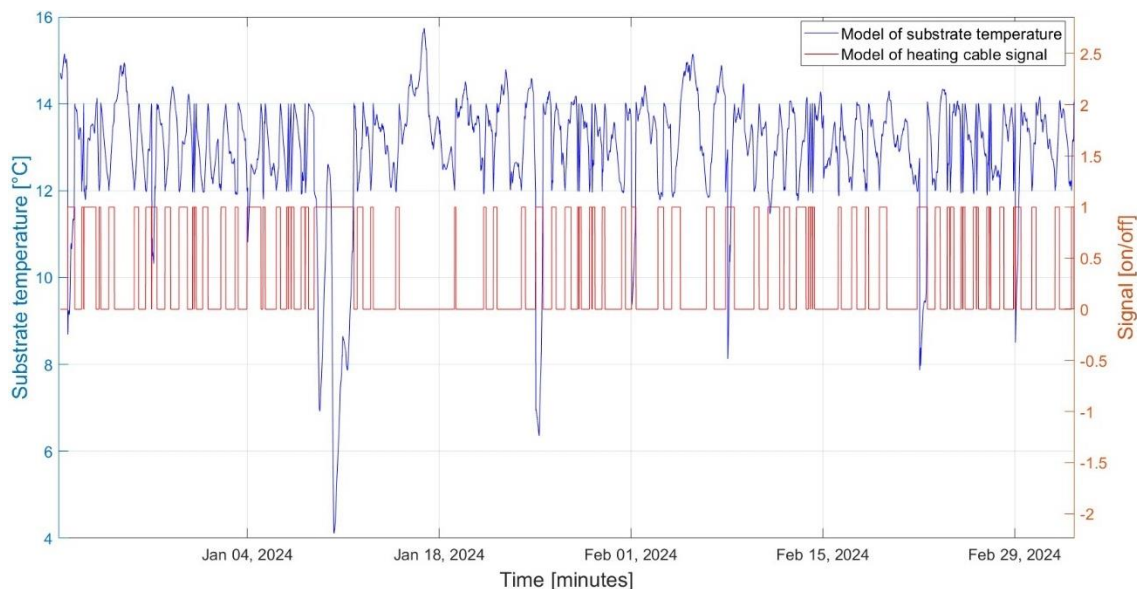
Z porovnání dostupných funkcí se jako nejpřesnější jeví křivka vytvořená na základě data-setu delta 3B (Obrázek 46). Tato funkce je tak v tomto kroku použita pro predikci chování v celém analyzovaném období, tedy od 21.12.2023 do 20.3.2024.



Obrázek 46 Křivka vzniklá na základě Data-setu delta 3B

K tomuto chování je současně připojena podmínka pro spínání topného kabelu. Podmínka vyžaduje zapnutí topného kabelu ve chvíli, kdy teplota substrátu klesne na 12 °C a jeho následné vypnutí až ve chvíli, kdy teplota opět vzroste na 14 °C. Pokud tedy teplota substrátu klesne k 12 °C vlivem okolního chladného vzduchu, měla by s pomocí topného kabelu být udržována v rozmezí 12 °C–14 °C do doby, než teplota substrátu vzroste nad 14 °C.

Výsledné křivky modelového chování teploty substrátu a spínání topného kabelu, jsou zobrazeny na Obrázku 47.



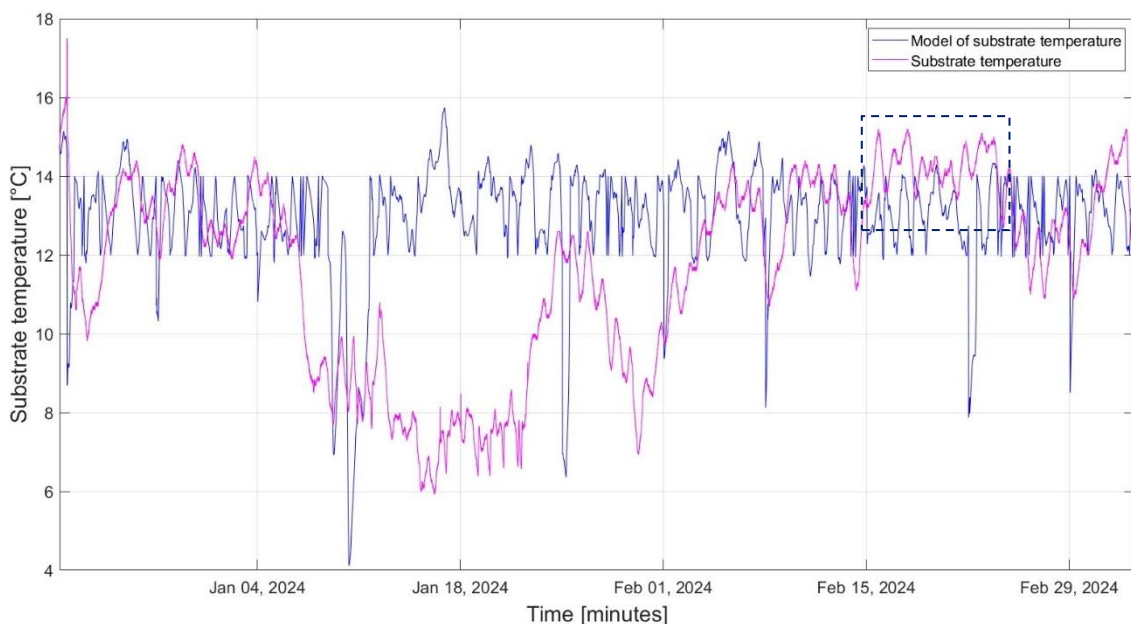
Obrázek 47 Křivka modelového chování teploty substrátu a topného kabelu

Model do značné míry funguje a chová se dle očekávání. Přesto dochází k výkyvům v chování teploty substrátu, která nereaguje na zapnutí topného kabelu růstem.

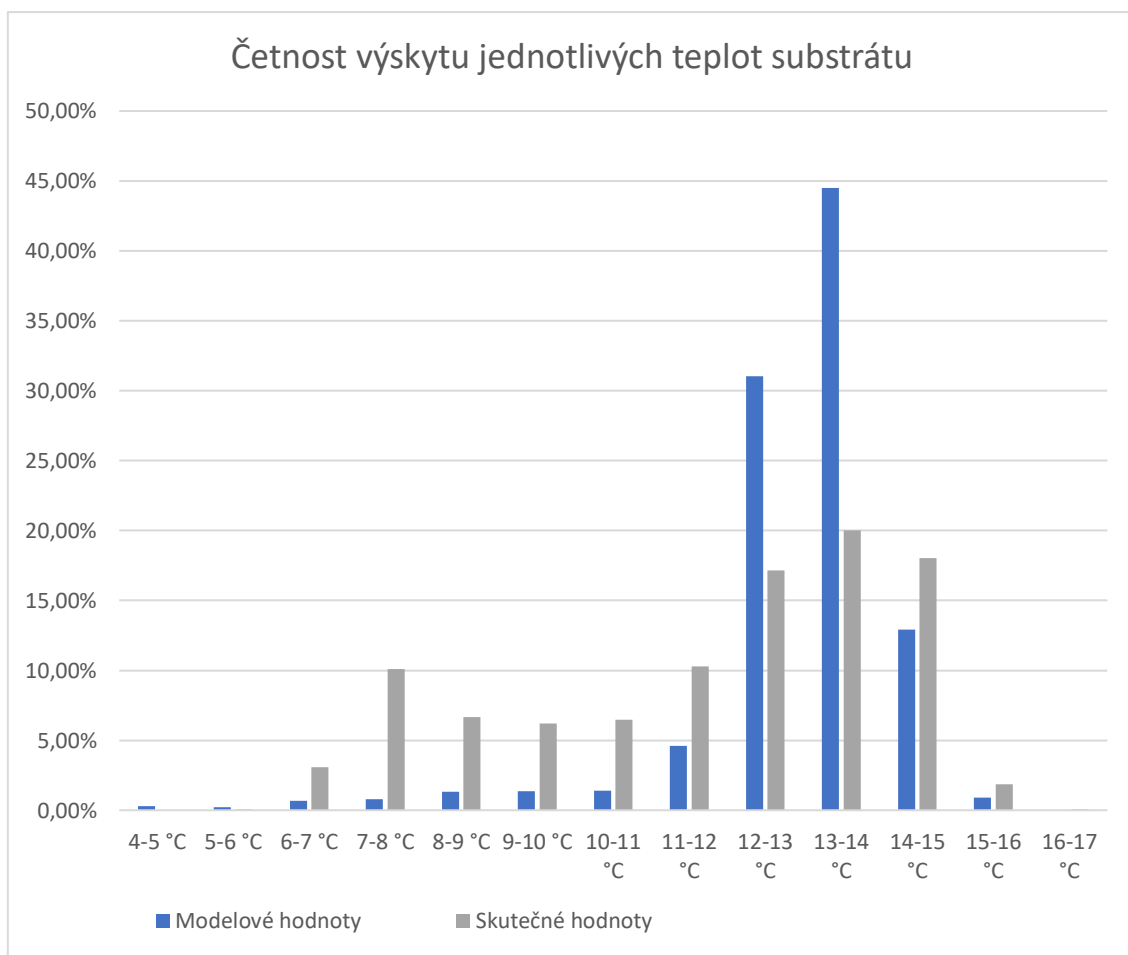
VII. Porovnání s původním řízením

Pokud porovnáme hodnoty získané z tohoto modelu se skutečným stavem ve stejném časovém období (Obrázek 48), dospějeme jednoznačně k závěru, že došlo ke zlepšení kvality vnitřního prostředí. Teploty v modelovém případě neklesaly tak nízko, jako je tomu při současném nastavení řízení, což bylo primárním cílem této optimalizace. Na modelové křivce můžeme vidět občasné výkyvy do nízkých teplot, které by neměly nastávat, neboť modelový topný kabel ve správný moment zapne jak má, nicméně funkce na toto zapnutí nereaguje růstem jak by měla. Bude se pravděpodobně jednat o vliv malého množství vstupních dat a nedostatečně rozsáhlého učení neuronové sítě.

Na histogramu na Obrázku 49 je dobře vidět, jak došlo ke snížení výskytu nízkých teplot v modelové situaci a naopak k navýšení v námi požadovaném rozsahu 12 – 14°C.



Obrázek 48 Porovnání původního chování teploty substrátu s modelovým chováním teploty substrátu



Obrázek 49 Histogram zobrazující četnost výskytu jednotlivých teplot

Pokud bychom v analyzovaném období porovnávali spotřebu elektrické energie, vzrostla téměř 5krát. Nárůst se předpokládal, vzhledem k požadovaným vyšším teplotám v prostředí, nicméně ne tak velký. Pokud se však podíváme na srovnání hodnot měřených a modelových, dojdeme k závěru, že predikce modelového chování pravděpodobně není správná. V grafu totiž můžeme vidět oblasti, kdy původní, měřená hodnota substrátu nebyla ovlivněna topným kabelem a vzhledem k teplotě okolí byla vyšší než 12 °C. Jedna z těchto oblastí je vyznačena čárkovaným rámečkem a v tomto období by se i modelová teplota substrátu měla chovat podobně a neměla by klesat do nižších teplot, kde je zapotřebí modelový topný kabel zapnout.

Na základě získaných dat bych nedělala definitivní závěr týkající se nového nastavení pro řízení topného kabelu, zda je vhodné nebo není. Ideálně by ve vytvořeném modelu mělo být hodnoceno více různých podmínek pro spínání topného kabelu a ty teprve, by mezi sebou byly vzájemně porovnány s ohledem na stanovená kritéria, tedy kvalita vnitřního prostředí a úspora elektrické energie. Domnívám se, že tato varianta nebude příliš úsporná a šlo by navrhnout lepší podmínku pro spínání topného kabelu.

Dalším kritériem, které nebylo dopředu stanovené a které je zapotřebí zohlednit, je životnost instalovaných součástí, která je ovlivněna počtem zapnutí a vypnutí. Toto je kritérium, které se dá zohlednit a v modelových grafech sledovat.

V Tabulce 21 je pro přehlednost shrnut celkový postup tvorby modelu, jak šly jednotlivé kroky chronologicky za sebou.

Tabulka 20 Dílčí úkoly skutečného postupu

I.	Učení neuronové sítě	- Tvorba vstupních data-setů
		- Volba časového období k učení
II.	Ověření správnosti vzniklé funkce	- Volba časového období pro zkoušku
		- Ověření správnosti porovnáním s původními daty
III.	Aplikace vzniklé funkce	- Tvorba funkčního modelu
IV.	Učení n.s. + ověření správnosti vzniklé funkce (Model-delta)	- Tvorba nových vstupních Data-setů-delta
		- Ověření správnosti porovnáním s původními daty
V.	Učení n.s. + ověření správnosti vzniklé funkce (Model-delta_delta)	- Tvorba nových vstupních Data-setů-delta
		- Ověření správnosti porovnáním s původními daty
VI.	Aplikace nejpřesnější dostupné funkce	- Volba nejvhodnější funkce
		- Tvorba okrajových podmínek
VII.	Porovnání s původním řízením	- Srovnání kvality vnitřního prostředí
		- Srovnání energetické náročnosti

7.2. Hodnocení vytvořeného modelu

Z dat, které jsme z modelu získali vyplývá, že do určité míry model skutečně funguje. Je však velice nepřesný. To bude způsobeno malým množstvím dat, které bylo do neuronové sítě vkládáno jako základ pro strojové učení. To je vidět již ve druhém kroku, kde vzniklé funkce ověřujeme. V některých případech je chování výsledných křivek absolutně mimo jakékoliv očekávané hodnoty.

I s malým množstvím dat a malou znalostí práce se strojovým učení vzniknul model chování, se kterým by bylo možné nadále kreativně pracovat.

Jako první se nabízí ověřit preciznost modelu na větším množství vstupních dat a hledat ve fázi ověřování co nepřesnější model vytvořeného chování. Pokud by se podařilo najít modelovou funkci, která věrně kopíruje skutečné dění v systému, podrobnou analýzou dat a prací s modelem by bylo možné sledovat vliv jednotlivých veličin na systém.

V případě, že by vytvořený model skutečně fungoval podle našich očekávání, mohl by v budoucnu fungovat jako prediktivní řízení v reálném čase. V takovém případě by vstupními daty byla předpověď počasí společně s přednastavenými režimy svícení a zavlažování. Na základě těchto hodnot by model stejným způsobem predikoval chování v systému a přizpůsobil mu režim vytápění.

7.3. Diskuse

Cílem této optimalizace bylo vytvoření modelového chování s použitím neuronových sítí, které nám bude věrně popisovat chování určitých parametrů i v případě, že některý parametry a jejich chování změníme oproti původním hodnotám.

V prvním kroku jsme použili strojové učení k nalezení vztahů mezi zadanými parametry. Z druhého kroku, tedy fáze ověřování, jsme získali představu o tom, jak moc je který ze vstupních data-setů vhodný. V ideálním případě by bylo vhodné, se u tohoto kroku pozastavit a s daty dále pracovat, zkusit další kombinace a přístupy, dokud by nebyla nalezena mnohem přesnější funkce chování. Vzhledem k omezenému času pro realizaci a malému množství vstupních dat jsme však k detailnější práci nepřistoupili.

V poslední fázi pak vzniklé modelové chování může ověřovat, jak by se systém choval v případě námi nastavených vnějších podmínek. Tato chování by pak mezi sebou mohla být porovnána a na základě toho zvolena varianta, která dosahuje nejlepších výsledků s ohledem na stanovená kritéria.

Konkrétně v našem případě došlo ke zlepšení vnitřního prostředí. Teploty substrátu neklesaly v modelovém případě tak nízko a jejich průběh byl stabilnější. Teploty se pohybovaly mezi 12 °C a 14 °C bez výrazných dlouhodobých výkyvů. Oproti tomu došlo ke zvýšení spotřeby elektrické energie, a to téměř pětkrát. Z velké míry tento nárůst bude způsoben nepřesností modelu. Nelze tedy udělat definitivní závěr o vhodnosti tohoto konkrétního nastavení.

Vzniká tu dostatečný prostor pro další práci s tímto modelem například v rámci další diplomové práce nebo v navazujícím doktorském studiu. Jedním z nápadů, jak by šlo model dále upřesnit je přidělení váhy jednotlivým parametrům vnitřního prostředí. Některé parametry se vzájemně ovlivňují přímo a velmi, jiné nepřímo a s mnohem menším vlivem. I tento fakt by dle mého názoru bylo možné v modelu zohlednit. Další z možností je, vyzkoušet model při práci s daty v reálném čase, například při práci s předpovědí počasí.

8. Závěr

Tato diplomová práce se zabývá technologií interiérového pěstování rostlin, jehož komplexnost vyžaduje detailní znalosti různých parametrů vnitřního prostředí a jejich regulace. Na začátku byla představena historie interiérového pěstování a funkce rostlin v interiéru, kde bylo zdůrazněno, jaký význam mají rostliny nejen z estetického, ale také z ekologického a psychologického hlediska. Následně byly analyzovány hlavní parametry vnitřního prostředí, které ovlivňují růst a vývoj rostlin, včetně pěstebního média, zavlažování, teploty, vlhkosti vzduchu, kvality vzduchu, pH vody, osvětlení a obsahu nutrientů.

Druhá část práce se zaměřila na metody regulace těchto parametrů prostřednictvím různých senzorů a akčních členů, které umožňují udržovat optimální podmínky pro růst rostlin. Detailní popis jednotlivých typů senzorů a jejich aplikace v praxi poskytuje ucelený přehled o technologiích, které jsou v současné době dostupné pro řízení interiérového pěstování.

V praktické části byl analyzován technický stav systému Metrorost, který byl vybaven moderními technologiemi pro pěstování rostlin v interiéru. Byla popsána konstrukční řešení a instalované technologie, jako je osvětlení, zavlažování, vytápění a sensorika.

Následná analýza získaných dat poskytla hlubší vhled do efektivity jednotlivých parametrů v reálných podmínkách. Měření hodnot CO₂, teploty vzduchu, vlhkosti vzduchu, teploty a vlhkosti substrátu, intenzity osvětlení a spotřeby elektrické energie ukázalo, jak se jednotlivé faktory navzájem ovlivňují a jaké mají dopady na celkovou efektivitu systému.

V rámci optimalizace systému byly navrženy dílčí úpravy, které zahrnovaly volbu vhodného osvětlení, zastínění rostlin v noci od veřejného osvětlení, optimalizaci režimu osvětlení, umístění odtokových otvorů a řízení vytápění. Optimalizace vytápění byla dále podpořena aplikací neuronové sítě, kde bylo využito strojového učení k tvorbě a ověření nově stanovených podmínek, které by mohly zlepšit účinnost systému a snížit spotřebu energie.

Porovnání s původním řízením ukázalo, že nově navržené funkce a optimalizace vedly ke zlepšení kvality vnitřního prostředí, čímž bylo dosaženo hlavního cíle. Na druhou stranu model vykazoval značné navýšení spotřeby elektrické energie, které není žádoucí. Vzniklý nárůst bude však pravděpodobně způsoben nepřesností modelu, nikoliv špatným předpokladem o vhodnosti ověřované podmínky.

Celkově tato práce přinesla především poznatky o chování strojového učení v kontextu řízení parametrů vnitřního pěstování rostlin a informace, které jsme z neuronové sítě schopni získat. Dalším vývojem těchto procesů a analýzou získaných hodnot by pravděpodobně mohlo být dosaženo skutečně přínosných a aplikovatelných výsledků.

9. Seznam použité literatury

- [1] M. Raviv, J. H. Lieth and A. Bar-Tal, "Significance of soilless culture in Agriculture," in *Soilless Culture, Theory and Practice*, 2. ed., Elsevier, 2019, pp. 3-13.
- [2] N. Matttson a J. H. Lieth, „Liquid culture hydroponic system operation,“ v *Soilless culture, Theory and practice*, Elsevier, 2019, pp. 567-570.
- [3] J. Haber, L. Dobiášová a D. Adamovský, „Impact of Plants to Improve the Quality,“ *Vytápění, větrání, instalace*, č. 6, pp. 312-315, červen 2020.
- [4] J. C. Forbes a R. D. Watson, „High temperature injury and temperature control,“ v *Plants in agriculture, USA*, 1992, pp. 100-101.
- [5] A. Bar-Tal, K. U. Saha, M. Raviv a M. Tuller, „Inorganic and synthetic organic components of soilless culture and potting mixtures,“ v *Soilless Culture, Theory and Practice*, Elsevier, 2019, pp. 259-292.
- [6] M. Hermann, „Bioponic 101,“ 7 April 2017. [Online]. Available: <https://www.organicproducenetwork.com/article/62/biaponics-101>. [Přístup získán 2024].
- [7] Water Science School, „Irrigation: Spray or Sprinkler Irrigation,“ 11 June 2018. [Online]. Available: <https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/irrigation-spray-or-sprinkler-irrigation>. [Přístup získán 2024].
- [8] Water Science School, „USGS science for a changing world,“ 13 June 2018. [Online]. Available: <https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/irrigation-methods-furrow-or-flood-irrigation>. [Přístup získán 2024].

- [9] B. A. Krug, „Master the art of watering,“ 26 September 2014. [Online]. Available: <https://www.greenhousegrower.com/production/plant-culture/master-the-art-of-watering/>. [Přístup získán 2024].
- [10] E. Hrudová, „Abionozologie pro rostlinolékaře,“ 2011. [Online]. Available: https://web2.mendelu.cz/af_291_sklad/frvs/hrudova/index.htm.
- [11] R. G. Lopez a E. S. Runkle, „BasicsandBeyond,“ July 2014. [Online]. Available: <https://www.purdue.edu/hla/sites/cea/wp-content/uploads/sites/15/2014/07/BasicsandBeyond-July.pdf>.
- [12] B. V. Pennisi, „Growing indoor plants with success,“ July 2022. [Online]. Available: https://secure.caes.uga.edu/extension/publications/files/pdf/B%201318_6.PDF.
- [13] M. Poudel a B. Dunn, „Greenhouse Carbon Dioxide Supplementation,“ September 2023. [Online]. Available: <https://extension.okstate.edu/fact-sheets/greenhouse-carbon-dioxide-supplementation.html>.
- [14] M. Žák a T. Karlík, „ČT24,“ 14. prosinec 2023. [Online]. Available: <https://ct24.ceskatelevize.cz/clanek/veda/do-dvaceti-let-bude-v-atmosfere-stejna-hladina-oxidu-uhliciteho-jako-v-dobe-kdy-u-nas-zili-344168>.
- [15] United states environmental protection agency, „EPA Indoor air quality,“ 5 March 2024. [Online]. Available: <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/what-are-volatile-organic-compounds-vocs>.
- [16] „Transpirace,“ 26. 9. 2023. [Online]. Available: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Transpirace>. [Přístup získán 2024].
- [17] L. Hladký, „Osvětlení z pohledu rostlin,“ Duben 2010. [Online]. Available: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/41827.pdf>. [Přístup získán 2024].

- [18] P. Kachlík, „Lidské biorytmy a jejich význam,“ 2017. [Online]. Available: <https://telesnakultura.upol.cz/getrevsrc.php?identification=public&mag=tek&raid=32&type=fin&ver=3>.
- [19] J. Krekule a I. Macháčková, „Biologické hodiny rostlin,“ 5. 1. 1996. [Online]. Available: <https://vesmir.cz/cz/casopis/archiv-casopisu/1996/cislo-1/biologicke-hodiny-rostlin.html>. [Přístup získán 2024].
- [20] Z. Bendová, „Umělé osvětlení škodí, pro biorytmus je tma podstatná,“ 17. srpen 2023. [Online]. Available: <https://www.ukforum.cz/rubriky/veda/8976-prirozene-stridani-svetla-a-tmy-je-pro-organismus-zasadni>. [Přístup získán 2024].
- [21] J. Jelínek a V. Zicháček, „Fotosyntéza a dýchání,“ 1996. [Online]. Available: https://is.muni.cz/el/ped/jaro2011/Bi1BP_ZNP2/um/Fotosynteza_a_dychani.pdf. [Přístup získán 2024].
- [22] T. Kozai a G. Niu, „Introduction,“ v *An Indoor Vertical Farming System for Efficient Quality Food Production*, Elsevier, 2016.
- [23] „Regulace (technika),“ 31. 12 2022. [Online]. Available: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Regulace_\(technika\)](https://cs.wikipedia.org/wiki/Regulace_(technika)). [Přístup získán 2024].
- [24] A. Vojáček, „Přehled principů el. měření teploty - 1. díl,“ 24. Červen 2014. [Online]. Available: <https://automatizace.hw.cz/prehled-principu-el-mereni-teploty-1-dil>. [Přístup získán 2024].
- [25] V. Špringl, „Měření teploty - polovodičové odporové senzory teploty,“ 19 Srpen 2004. [Online]. Available: <https://vyvoj.hw.cz/teorie-a-praxe/dokumentace/mereni-teploty-polovodicove-odporove-senzory-teploty.html>. [Přístup získán 2024].

- [26] J. Reichl a M. Všetická, „Termistor,“ [Online]. Available: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/269-termistor>. [Přístup získán 2024].
- [27] A. Vojáček, „Přehled principů el. měření teploty - 2. díl - bezdotykové,“ 30. Červen 2014. [Online]. Available: <https://automatizace.hw.cz/rehled-principu-el-mereni-teploty-2-dil-bezdotykovve>. [Přístup získán 2024].
- [28] R. Zeman, „onlineschool.cz,“ 2023.
- [29] Kotrbatý V.M.Z. spol. s.r.o., „Kde se bere úspora tepla 40 % u stropního sálavého vytápění?,“ 5. 11. 2020. [Online]. Available: <https://vytapani.tzb-info.cz/vytapani-prumyslovych-hal-a-velkych-objektu/21394-kde-se-bere-úspora-tepla-40-u-stropniho-salaveho-vytapani>. [Přístup získán 2024].
- [30] J. Blažíček, „Sálavé elektrické vytápění,“ 14. 4. 2014. [Online]. Available: <https://vytapani.tzb-info.cz/elektricke-vytapani/11073-varianty-salaveho-elektrickeho-vytapani>. [Přístup získán 2024].
- [31] L. Mareš, „Vlhkost vzduchu a její měření,“ 13. 3. 2006. [Online]. Available: <https://vetrani.tzb-info.cz/teorie-a-vypocty-vetrani-klimatizace/3137-vlhkost-vzduchu-a-jeji-mereni>. [Přístup získán 2024].
- [32] „ULTRAZVUKOVÝ ZVLHČOVAČ, NEBO PARNÍ ZVLHČOVAČ - KTERÝ JE TEN PRAVÝ PRO VÁS?,“ 4. 11. 2016. [Online]. Available: <https://www.gavri.cz/clanky-o-zvlhcovacich-vzduchu/ultrazvukovy-parni-zvlhcovac-rozdily/>. [Přístup získán 2024].
- [33] M. Kutílek, „Vlastnosti půdní vody,“ v *Vodohospodářská pedologie*, Praha, ALFA, 1978, pp. 130-136.
- [34] Z. Vafek, „Možnosti měření oxidu uhličitého – měřicí přístroje a čidla,“ 14. 3. 2016. [Online]. Available: <https://vetrani.tzb-info.cz/vnitri-prostredi/13910->

- moznosti-mereni-oxidu-uhliciteho-merici-pristroje-a-cidla. [Přístup získán 2024].
- [35] J. Bureš, „Násobky a díly,“ 2002. [Online]. Available: <https://www.converter.cz/prevody/nasobky-dily.htm#rel>.
- [36] „Evolution Carbon dioxide controller,“ December 2012. [Online]. Available: <https://pjzk94an.s5.cdn-upgates.com/g/g5d68290fe2356-ecotechnics-evolution-co2-controller-navod.pdf>.
- [37] t. s. ČMS, „Pyranometr,“ 2017. [Online]. Available: <http://slovník.cmes.cz/heslo/3117>.
- [38] t. s. ČMS, „slovník.cmes.cz,“ 2017. [Online]. Available: <http://slovník.cmes.cz/heslo/1828>.
- [39] „Měření pH,“ 29. 12. 2023. [Online]. Available: https://www.wikiskripta.eu/w/M%C4%9B%C5%99en%C3%AD_pH.
- [40] „technologie spectrasol,“ 2023. [Online]. Available: <https://www.spectrasol.cz/produkty/technologie/>. [Přístup získán 2024].
- [41] „Spectrasol produkt, produktový list,“ 3. 2023. [Online]. Available: https://www.spectrasol.cz/wp-content/uploads/2024/02/Spectrasol_IBPRAM.pdf. [Přístup získán 2024].
- [42] J. Nedvěd, „Vegetační období a vegetační klid,“ 19. 10. 2015. [Online]. Available: <https://www.praha11.cz/cs/mestska-cast/zivotni-prostredi/verejna-zelen/vegetacni-obdobi-a-vegetacni-klid.html>. [Přístup získán 2024].
- [43] F. Ruml, „VLIV SVĚTLA NA ČLOVĚKA: 5. DÍL – CITLIVOST CIRKADIÁNNÍHO SYSTÉMU,“ 9. 11. 2021. [Online]. Available: <https://svitimprotebe.cz/citlivost/>. [Přístup získán 2024].

- [44] C. T. Morehart, „Mapping ancient chinampa landscapes in the Basin of Mexico: a remote sensing and GIS approach,“ Elsevier, 2012.
- [45] C. T. Morehart, „Chinampa agriculture surplus production, and political change at Xaltocan, Mexico,“ Cambridge University Press, 2016.
- [46] M. Čížek a Z. Komárková, „Metodický postup pro využití technologie aeroponie při novošlechtění a množení sadby brambor,“ Havlíčkův Brod, 2021.
- [47] J. Richtr, „Úvod do akvaponie,“ v *Malá velká voda*, Klíč k soběstačnosti editor, Brno, 2014, pp. 52-60.
- [48] „Co je to RAS a jak funguje?,“ 30. Březen 2022. [Online]. Available: <https://www.futurefarming.cz/co-je-to-ras/>. [Přístup získán 2024].
- [49] W. R. Carlile, M. Raviv a M. Prasad, „Organic Soilless media components,“ v *Soilless culture Theory and Practice*, Elsevier, 2019, pp. 303-359.
- [50] V. I. Lohr, C. H. Pearson-Mims a K. G. Goodwin, „Interior Plants May Improve Worker Productivity and Reduce Stress in a Windowless Environment,“ 1995.
- [51] R. F. S. D. L. F. A. M. Z. Roger S. Ulrich, „Stress recovery during exposure to natural and urban environments,“ Elsevier, 1989.
- [52] G. Soreanu, M. Dixon a A. Darlington, „Botanical biofiltration of indoor gaseous pollutants,“ Elsevier, Romania, Canada, 2013.
- [53] R. Nicolai, K. Janni a D. Schmidt, „Biofilters,“ University of Minnesota, Minnesota, 2005.
- [54] P. Soudek, „Co je to fytořemediace?,“ 8. červen 2009. [Online]. Available: <https://temata.rozhlas.cz/co-je-fytořemediace-7851987>.
- [55] S. G. Moosavi a M. J. Seghatoleslami, „Phytoremediation: A review,“ 2013. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/profile/Mj->

- Seghatoleslami/publication/283746120_Phytoremediation_a_review/links/616491a5e7993f536cc7ab5f/Phytoremediation-a-review.pdf.
- [56] „Drip irrigation,“ [Online]. Available: <https://web.uri.edu/safewater/protecting-water-quality-at-home/sustainable-landscaping/drip-irrigation/>.
- [57] „Fakta o klimatu,“ [Online]. Available: <https://faktaoklimatu.cz/infografiky/cykly-koncentrace-co2><https://faktaoklimatu.cz/infografiky/cykly-koncentrace-co2>.
- [58] Wates Science School, „USGS science for a changing world,“ 11 June 2018. [Online]. Available: <https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/irrigation-drip-or-microirrigation>. [Přístup získán 2024].
- [59] N. Mattson a J. H. Lieth, „Liquid culture hydroponic system operation,“ v *Soilless culture, Theory nad Practice*, Evsevier, 2019, pp. 571-572.
- [60] H. Ensink, „Konvektory v otopných soustavách,“ 3. 4. 2002. [Online]. Available: <https://vytapani.tzb-info.cz/938-konvektory-v-otopnych-soustavach>. [Přístup získán 2024].
- [61] J. Blažiček, „Konvekční elektrické vytápění,“ 21. 2. 2022. [Online]. Available: <https://vytapani.tzb-info.cz/elektricke-vytapani/11256-varianty-konvekcniho-elektrickeho-vytapani>. [Přístup získán 2024].
- [62] B. A. Costa-Pierce, „The Anthropology of Aquaculture,“ 2022.

10. Seznam obrázků

Obrázek 1 Chinampy – Aztécké plovoucí zahrady [62] _____	10
Obrázek 2 Technologie aeroponie s elektronickým kontrolním systémem [46] _____	15
Obrázek 3 Vliv teploty vzduchu na rychlost vývoje rostliny [11] _____	17
Obrázek 4 Při stejné teplotě rostlina vylučuje více vody do vzduchu při nižší relativní vlhkosti a současně při stejné relativní vlhkosti rostlina vylučuje více vody do vzduchu při vyšší teplotě [12] ____	18
Obrázek 5 Závislost množství CO ₂ na růstu rostliny [13] _____	20
Obrázek 6 Spektra záření různých zdrojů [40] _____	22
Obrázek 7 Fotografie současného stavu Metrorostu _____	34
Obrázek 8 3D Model spodní desky _____	35
Obrázek 9 3D Model ocelové konstrukce _____	35
Obrázek 10 3D model zadního opláštění na ocelové konstrukci _____	36
Obrázek 11 3D model ocelové konstrukce s dnem květináče _____	36
Obrázek 12 Spodní pohled na spojení dva květináče _____	37
Obrázek 13 Pohled shora na 3D model podhledu _____	37
Obrázek 14 3D model vany pro substrát umístěné na dně květináče _____	38
Obrázek 15 3D modely různých tvarů spojovacích prvků _____	38
Obrázek 16 3D model systému s vnějším opláštěním _____	39
Obrázek 17 3D model systému se zasklením _____	39
Obrázek 18 Schéma systému zavlažování: 1) Vana, 2) Nádrž na vodu, 3) Čerpadlo, 4) Odtok, 5) Zpětná klapka, 6) Potrubí, 7) Filtr, 8) Solenoid, 9) Vodoměr, 10) Hadice kapkové závlahy, 11) Regulátor tlaku, 12) Kulový kohout _____	42
Obrázek 19 Polohy senzorů a odtokových otvorů: Oranžové – senzory teploty a vlhkosti vzduchu, Fialové – senzory vlhkosti půdy, Modré – odtokové otvory _____	43
Obrázek 20 Graf zobrazující průběh hodnot CO ₂ _____	44
Obrázek 21 Graf teplot v podhledu systému _____	45
Obrázek 22 Graf zobrazující průběh denních teplot v prostředí rostlin, čárkovaný rámeček vymezuje oblast znázorněnou na následujícím grafu _____	46
Obrázek 23 Část předchozího grafu zobrazující rizikové období nízkých teplot _____	46
Obrázek 24 Graf teplot naměřených uvnitř systému a teploty venkovního vzduchu v Praze _____	47
Obrázek 25 Graf průměrné vnitřní teploty v minutových krocích a signál řízení topného kabelu ____	48
Obrázek 26 Graf průběhu naměřených relativních vlhkostí _____	48
Obrázek 27 Graf průběhu teplot v substrátu _____	49
Obrázek 28 Graf teploty substrátu s řídicím signálem topného kabelu _____	50

Obrázek 29 Část předchozího grafu, teplota substrátu v minutových krocích společně s řídicím signálem topného kabelu v období nejnižších teplot	50
Obrázek 30 Graf signálu čerpadla na vodu a měřených vlhkostí substrátu	51
Obrázek 31 Graf zobrazující teplotu vody a teplotu vzduchu venku	52
Obrázek 32 Graf režimu osvětlení	53
Obrázek 33 Podíl spotřebičů na spotřebě elektrické energie	54
Obrázek 34 Prosperující rostlina s mladými zelenými listy, které současně opadávají listy v její spodní části	55
Obrázek 35 Čelní pohled na Metrorost a vyznačená část kde dochází k plesnivění Chyba! Záložka není definována.	
Obrázek 36 Plesnivějící povrch substrátu Chyba! Záložka není definována.	
Obrázek 37 Návrh řešení odtokového žlabu a v souvislosti s tím umístění zdroje vody a senzoriky pro měření vlhkosti půdy	61
Obrázek 38 Graf skutečné měřené teploty substrátu a závislost vytvořená neuronovou sítí na základě Data-setu 1A	67
Obrázek 39 Graf skutečné měřené teploty substrátu a závislost vytvořená neuronovou sítí na základě Data-setů 2A a 2B	68
Obrázek 40 Graf skutečné měřené teploty substrátu a závislost vytvořená neuronovou sítí na základě Data-setů 3A a 3B	68
Obrázek 41 Porovnání funkcí vytvořených z Data-setů 1A, 2A, 2B, 3A, 3B	69
Obrázek 42 Srovnání funkcí vzniklých na základě Data-setů delta	72
Obrázek 43 Bližší pohled na část grafu z předchozího Obrázku 42	72
Obrázek 44 Srovnání funkcí vzniklých na základě Data-setů delta_delta	74
Obrázek 45 Bližší pohled na část grafu z předchozího Obrázku XX	74
Obrázek 46 Křivka vzniklá na základě Data-setu delta 3B	75
Obrázek 47 Křivka modelového chování teploty substrátu a topného kabelu	76
Obrázek 48 Porovnání původního chování teploty substrátu s modelovým chováním teploty substrátu	77
Obrázek 49 Histogram zobrazující četnost výskytu jednotlivých teplot	77

11. Seznam tabulek

<i>Tabulka 1 Dělení a příklady nepoužívanějších materiálů pro substráty</i>	13
<i>Tabulka 2 Dělení rostlin podle citlivosti na chlad</i>	18
<i>Tabulka 3 Stručný přehled typů záření a jejich charakteristik [17]</i>	21
<i>Tabulka 4 Rozdělení rostlin podle vyžadované intenzity světla [12]</i>	22
<i>Tabulka 5 Příkon jednotlivých spotřebičů a z toho odvozený celkový příkon systému</i>	40
<i>Tabulka 6 Technické parametry použitého osvětlení [41]</i>	40
<i>Tabulka 7 přehled vybraných rostlin, jejich výška, plocha a sazený počet</i>	41
<i>Tabulka 8 Spotřeba elektrické energie jednotlivých spotřebičů</i>	53
<i>Tabulka 9 Délky dnů v časech rovnodennosti a slunovratů</i>	59
<i>Tabulka 10 Dílčí úkoly plánovaného postupu</i>	64
<i>Tabulka 11 Data-set 1A s popisem použitých dat</i>	66
<i>Tabulka 12 Data-sety 2A a 2B</i>	66
<i>Tabulka 13 Data-sety 3A a 3B</i>	66
<i>Tabulka 14 Data-set delta 1A</i>	70
<i>Tabulka 15 Data-sety delta 2A a 2B</i>	71
<i>Tabulka 16 Data-sety delta 3A a 3B</i>	71
<i>Tabulka 17 Data-set delta_delta 1A</i>	73
<i>Tabulka 18 Data-sety delta_delta 2A a 2B</i>	73
<i>Tabulka 19 Data-sety delta_delta 3A a 3B</i>	73
<i>Tabulka 20 Dílčí úkoly skutečného postupu</i>	79