

Diplomová práce



**Fakulta elektrotechnická
Katedra měření**

Modulový senzorový systém pro hospodaření s dešťovou vodou

Jakub Starý

**Vedoucí práce: Ing. Pavel Mlejnek, Ph.D.
Studijní program: Inteligentní budovy
Leden 2023**

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Starý** Jméno: **Jakub** Osobní číslo: **466313**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra měření**
Studijní program: **Inteligentní budovy**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Modulový senzorový systém pro hospodaření s dešťovou vodou

Název diplomové práce anglicky:

Modular sensor system for rainwater management

Pokyny pro vypracování:

Zmapujte potřeby rozdílných instalací vodního hospodářství (zeleninová zahrádka, okrasné záhony, trávník apod.) a sepište požadavky na množství a druh senzorových a akčních modulů. Sestavte vhodný systém s ohledem na požadavky budoucího uživatele. Zajistěte vyčítání meteorologických dat předpovědi počasí z webového serveru. Navrhněte algoritmus, který zajistí optimální hospodaření s dešťovou vodou v závislosti na aktuálních měřených hodnotách a předpovědi počasí s ohledem na zavlažovanou vegetaci. Naměřená data zálohujete pro možnost pozdější analýzy. Vytvořte vizualizační panel sloužící pro zobrazování aktuálního stavu systému a historicky naměřených dat.

Seznam doporučené literatury:

[1] Bainbridge, D. A.: Úsporné zavlažování zahrady – Jak ušetřit až 90 procent vody, Esence, 2016, 978-80-7549-121-3
[2] Polinova, M.; Salinas, K.; Bonfante, A.; Brook, A. Irrigation Optimization Under a Limited Water Supply by the Integration of Modern Approaches into Traditional Water Management on the Cotton Fields. Remote Sens. 2019, 11, 2127.
<https://doi.org/10.3390/rs11182127>

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Pavel Mlejnek, Ph.D., katedra měření FEL

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

Datum zadání diplomové práce: _____ Termín odevzdání diplomové práce: _____

Platnost zadání diplomové práce:
do konce letního semestru 2022/2023

Ing. Pavel Mlejnek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen 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 studenta

Poděkování

Jako první bych rád poděkoval svému vedoucímu diplomové práce panu Ing. Pavlu Mlejnkovi, Ph.D., který mi radil od samého návrhu na téma diplomové práce až po její finále. Velmi si vážím odborných i stylizačních rad, které jsem od něj dostal, a za plodné diskuze, které jsme nad dílčími problémy vedli.

Tato práce byla motivována velkou zahradou, o kterou se s veškerou péčí staral můj tatínek. Jemu patří poděkování za veškerou zručnost, kterou jsem se od něj mohl naučit a za zázemí, které mi poskytl.

Velmi děkuji své mamince, která mě ve studiu již od útlého věku vždy podporovala a byla mi oporou ve všech náročných chvílích mého studia.

Poděkování patří i mé budoucí ženě Ing. Martině Liberské, kterou jsem poznal při studiu na ČVUT. Děkuji jí za cenné postřehy a srdečný zájem o mou práci.

Poděkovat chci i technické univerzitě ČVUT v Praze za odborné vzdělání, kvalitní vyučující, poutavé předměty, neopakovatelné okamžiky a životní příležitosti.

Prohlášení

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

Jakub Starý

Ve Velkém Oseku, 10. ledna 2023

Abstrakt Abstract

Tato práce se zabývá návrhem, tvorbou a oživením modulového sensorového systému pro hospodaření s dešťovou vodou. Při návrhu je kladen důraz na nízkou cenu a dostupnost komponent.

První část je věnována řešení pasivních způsobů snížení potřeby vody a komerčně dostupným závlahovým systémům. Dále pak měřicím sensorům a výběru konkrétních modelů vhodných pro tento projekt.

Dále jsou uvedeny typy instalací s různými požadavky a vypracován návrh, jaké sensorové moduly v těchto případech zvolit. Práce obsahuje i postup návrhu optimální velikosti nádrže na dešťovou vodu s ekonomickým vyhodnocením.

Druhá část práce se věnuje tvorbě modulů. Nejprve jsou definována dílčí zapojení a následně vypracovány plošné spoje pro půdní sensorový modul, modul hladiny v nádrži a modul výstupních signálů. Je sestaven i srážkový modul včetně podrobného návrhu člunkového snímače i 3D modelu radiačního štítu. Většina krytů sensorových modulů je optimalizována pro 3D tisk. Všechny moduly používají komunikační protokol Modbus.

V poslední části práce je zvolen řídicí algoritmus pro optimální hospodaření s dešťovou vodou, který je doplněn o vazbu na aktuální stav naplněnosti nádrže a předpověď počasí. Je zpracován i vizualizační panel a ukládání měřených dat do online uložště.

Klíčová slova:

Sensorový systém, Modbus, Závlahové systémy, Dešťová voda, Člunkový srážkoměr, Optimální velikost nádrže

Vedoucí práce:

Ing. Pavel Mlejnek, Ph.D.
Katedra měření: T2:B3 – 72
Technická 1902/2
166 27, Praha 6

This thesis focuses on the design, creation and animation of a modular sensor system for rainwater management. The design primarily focuses on the cost and availability of components.

The first part is devoted to the research of passive functions to reduce water demand on commercially available irrigation systems. This is followed by the measurement sensors and the selection of sensors and specific models suitable for this project.

Additionally, types of installations with different requirements are presented and a suggestion is made as to which sensor modules to choose in these use cases. The work also includes a procedure for the design of optimal size for the rainwater tank including an economic evaluation.

The second part of the thesis covers the design of the modules. First, the sub circuits are defined and then the printed circuit boards for the soil sensor module, the tank level module and the output signal module are developed. The precipitation module is also built, including a detailed design of the tipping bucket rain gauge sensor as well as a 3D model of the radiation shield. Most of the sensor module enclosure is optimized for 3D printing. All modules use the Modbus communication protocol.

In the last part of the work, a control algorithm for optimal rainwater management is selected, which is extended with a link to the current tank filling level and weather forecast. A visualization panel and the storage of measured data in an online repository is also implemented.

Keywords:

Sensor system, Modbus, Irrigation systems, Rainwater, Tipping bucket rain gauge, Optimum tank size

Title translation:

Modular sensor system for rainwater management

Obsah

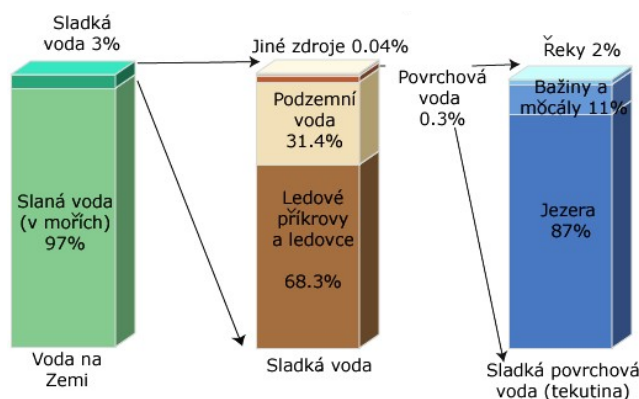
| | | | |
|---|-----------|--|--|
| 1. MOTIVACE..... | 1 | | |
| 1.1. Voda na Zemi a sucho..... | 1 | | |
| 1.2. Zákony spojené s využíváním vody..... | 2 | | |
| 1.3. Občané, voda a déšť..... | 3 | | |
| 1.4. Navrhované řešení..... | 3 | | |
| 2. ÚVOD..... | 5 | | |
| 2.1. Závlahové systémy..... | 5 | | |
| 2.1.1. Zakopané nádoby a trubky..... | 6 | | |
| 2.1.2. Hluboko vložené trubky..... | 6 | | |
| 2.1.3. Kapková závlaha a porézní hadice..... | 7 | | |
| 2.1.4. Zachytávání srážkové vody..... | 7 | | |
| 2.1.5. Výběr rostlin a krajinytvorba..... | 8 | | |
| 2.1.6. Gardena..... | 9 | | |
| 2.1.7. Kärcher..... | 9 | | |
| 2.1.8. Irimon..... | 10 | | |
| 2.1.9. Feidler..... | 11 | | |
| 2.1.10. Shrnutí..... | 11 | | |
| 2.2. Měřicí senzory..... | 12 | | |
| 2.2.1. Srážkoměry..... | 12 | | |
| 2.2.2. Senzory teploty..... | 13 | | |
| 2.2.3. Senzory vlhkosti vzduchu..... | 13 | | |
| 2.2.4. Senzory vlhkosti půdy..... | 14 | | |
| 2.2.5. Senzor výšky hladiny..... | 15 | | |
| 2.2.6. Senzory větru – anemometry..... | 16 | | |
| 2.2.7. Shrnutí a zvolené senzory..... | 17 | | |
| 2.3. Komunikační protokol a sběrnice..... | 17 | | |
| 2.4. Blokové schéma..... | 18 | | |
| 3. POUŽITÍ SENZOROVÉHO SYSTÉMU..... | 20 | | |
| 3.1. Typy instalací a jejich požadavky..... | 20 | | |
| 3.1.1. Zeleninová zahrada..... | 20 | | |
| 3.1.2. Okrasná zahrada..... | 21 | | |
| 3.1.3. Hřiště a školní zahrady..... | 21 | | |
| 3.2. Výpočet velikosti nádrže..... | 21 | | |
| 3.3. Konkrétní řešení..... | 26 | | |
| 3.3.1. Základní škola Velký Osek..... | 26 | | |
| 3.3.2. Velký Osek..... | 27 | | |
| 3.3.3. Červené Pečky..... | 28 | | |
| 3.3.4. FIRSLIFE..... | 29 | | |
| 4. NÁVRH MODULŮ..... | 31 | | |
| 4.1. Řídicí deska..... | 31 | | |
| 4.2. Napájecí obvod..... | 32 | | |
| 4.3. Komunikační obvod..... | 33 | | |
| 4.4. Zapojení použitých senzorů..... | 33 | | |
| 4.4.1. Vodotěsný teploměr DS18B20..... | 33 | | |
| 4.4.2. Kapacitní senzor vlhkosti SKU:SEN0193..... | 34 | | |
| 4.4.3. Ultrazvukový senzor vzdálenosti HC-SR04..... | 35 | | |
| 4.4.4. Senzor teploty a vlhkosti SHT21..... | 35 | | |
| 4.4.5. Magnetický senzor polohy MC-38..... | 36 | | |
| 4.4.6. Senzor rychlosti větru WH-SP-WS01..... | 37 | | |
| 4.5. Půdní senzorový modul..... | 38 | | |
| 4.5.1. Popis funkce..... | 38 | | |
| 4.5.2. Schéma zapojení..... | 38 | | |
| 4.5.3. Deska plošného spoje..... | 39 | | |
| 4.5.4. Pouzdro..... | 40 | | |
| 4.6. Modul hladiny v nádrži..... | 40 | | |
| 4.6.1. Popis funkce..... | 40 | | |
| 4.6.2. Schéma zapojení..... | 41 | | |
| 4.6.3. Deska plošného spoje..... | 42 | | |
| 4.6.4. Pouzdro..... | 42 | | |
| 4.7. Srážkový modul..... | 43 | | |
| 4.7.1. Návrh člunkového snímače..... | 43 | | |
| 4.7.1.1. Geometrie..... | 43 | | |
| 4.7.1.2. Analýza výpočtů..... | 47 | | |
| 4.7.1.3. Sběrací trychtýř..... | 50 | | |
| 4.7.2. Radiační štít..... | 51 | | |
| 4.7.3. Popis funkce..... | 51 | | |
| 4.7.4. Schéma zapojení..... | 52 | | |
| 4.7.5. Deska plošného spoje..... | 53 | | |
| 4.7.6. Pouzdro..... | 53 | | |
| 4.8. Modul výstupních signálů..... | 53 | | |
| 4.8.1. Popis funkce..... | 54 | | |
| 4.8.2. Schéma zapojení..... | 55 | | |
| 4.8.3. Deska plošného spoje..... | 56 | | |
| 4.8.4. Pouzdro..... | 56 | | |
| 5. PŘEDPOVĚĎ POČASÍ..... | 58 | | |
| 5.1. Webové předpovědi počasí..... | 58 | | |
| 5.1.1. Azure Maps - Microsoft..... | 58 | | |
| 5.1.2. Point forecast - Meteosource..... | 58 | | |
| 5.1.3. Meteoblue..... | 58 | | |
| 5.1.4. OpenWeather..... | 59 | | |
| 5.1.5. AccuWeather..... | 59 | | |
| 5.1.6. Yr.no..... | 59 | | |
| 5.2. Výběr předpovědi..... | 59 | | |
| 6. ŘÍDICÍ ALGORITMUS..... | 60 | | |
| 6.1. Aktivní způsoby optimalizace..... | 60 | | |
| 7. ZÁLOHOVÁNÍ MĚŘENÝCH DAT..... | 63 | | |
| 7.1. Cloudové řešení..... | 63 | | |
| 7.1.1. Thingspeak..... | 63 | | |
| 7.1.2. Google Cloud..... | 63 | | |
| 7.1.3. SQL Databáze + Grafana..... | 64 | | |
| 7.1.4. Google spreadsheet..... | 65 | | |
| 7.2. Výběr cloudového řešení..... | 65 | | |
| 7.3. Vizualizační panel..... | 65 | | |
| 8. ZÁVĚR..... | 67 | | |
| 9. DISKUZE..... | 70 | | |

1. MOTIVACE

Cílem každého pěstitele, ať už na úrovni zemědělských družstev či domácího zahrádkáře, je maximalizovat kvalitu a množství úrody, které pěstuje. Součástí úspěšného procesu mohou být hnojiva, ochranné postřiky, kvalitní půda či dostatečný přísun slunce. Ale nejdůležitější složkou je přístup k vodě, bez které je úspěšné hospodaření téměř nemožné. Společně s rozvojem řídicích systémů a snahou o automatizování nejrůznějších procesů dochází i na samočinné zavlažování. Základní problém, se kterým se setkávám je, že řídicí systémy zavlažování pracují povětšinou s neomezeným množstvím vody, neplánují dopředu a často zavlažují jen dle časového harmonogramu. I v kontextu dnešních snah o úspory napříč všemi oblastmi se nabízí navrhnout systém, který bude s vodou hospodařit optimálně. Mimo využití pitné vody z veřejných vodovodů se nabízí zaměřit se na používání vody dešťové, její akumulaci a plánování spotřeby v závislosti na počasí či aktuální potřebě rostlin. Tímto způsobem lze maximalizovat úspory nejen pitné vody, ale i finančních prostředků, které by na ni byly vynaloženy.

1.1. VODA NA ZEMI A SUCHO

Voda je jedním z nejdůležitějších podmínek pro život. Na Zemi se vyskytuje ve formě slané vody v mořích a oceánech a ve formě sladké. Množství sladké vody je téměř 30x menší. Vyskytuje se v jezerech, močálech a řekách, z velké většiny pak ale v ledovcích nebo jako podzemní voda. [1]



Obr. 1.1.: Rozdělení vody na Zemi [1]

Vodohospodářství v České republice je v porovnání s ostatními státy EU na relativně vysoké úrovni (zadržení vod v přirozených tocích sítí nádrží a přehrad, distribuce pitné vody, sběr odpadních vod s nízkými ztrátami, míra obnovy vodárenských potrubí). [2]

Avšak nelze zabránit změnám počasí, které naše podnebí v posledních letech stále častěji narušují. Období sucha se prodlužují a deště jsou intenzivnější a krátkodobé. Suchý rok 2020 byl již pátý v pořadí a tentokrát ještě intenzivnější vzhledem k chybějícímu

sněhu na horách. Označuje se tak za nejhorší suché období za posledních 500 let. Stavby se pohybovaly na pětinnových průměrech. [3]

V roce 2022 i přes zdánlivě časté a intenzivní deště sucho výrazně neustupuje. Očekává se pokles letních výnosů v zemědělství. Mimo evropské státy je zasažena i oblast Číny, kde vysychají vodní plochy, zastavuje se lodní doprava, vodní energetika a následně nadnárodní výrobní závody. [4, 5]

1.2. ZÁKONY SPOJENÉ S VYUŽÍVÁNÍM VODY

Na konci dubna roku 2020 byla svolána tisková konference ministerstva životního prostředí (dále jen MŽP) informující o aktuálnosti tohoto problému a nepříznivých výhledech do budoucna. V souvislosti s extrémně suchým rokem 2020 ministerstvo žádalo o navýšení investic z 2,5 na 6 miliard korun. Dotace byly poskytovány na stavbu zelených střech, obnovu přirozených funkcí krajiny za účelem zadržení vody, péči o zdroje pitné vody a vodohospodářské projekty a na program Dešťovka podporující akumulaci dešťové vody. V letošním roce 2022 MŽP na boj se suchem vyhradilo 10 mld. Kč. Tyto peníze jsou určeny na využití dešťové vody, vytváření tůní a malých vodních nádrží nebo podporu šetrného hospodaření na zemědělské půdě. Vyjma ministerstva se snaží se suchem bojovat i jednotlivé kraje. Rada Karlovarského kraje z krajského rozpočtu schválila udělení dotací na podporu prevence proti suchu ve výši 5 mil. Kč. [6, 7, 8]

Z pohledu legislativy je použití vody řízeno dle Vodního zákona a dle Zákona o vodovodech a kanalizacích. Zákony o hospodaření s dešťovou vodou jsou: Zákon č.183/2006 Sb., o územním plánování a stavebním řádu (stavební zákon) a jeho prováděcí vyhláška č. 501/2006 Sb., o obecných požadavcích na využívání území. Dále pak 5 odst. 3 a § 27 zákona č. 254/2001 Sb., o vodách a o změně některých zákonů (vodní zákon) v platném znění. Dle zákona je povinnost dešťovou vodu na pozemku zasakovat. Pouze v krajním případě, pokud není možno jinak, je poslední možnost tuto vodu odvést do kanalizace, kde se z ní stává odpadní voda a podléhá tak zákonům o odpadní vodě. Vyřešení nakládání se srážkovou vodou je podmínkou získání stavebního povolení. V dnešní době se mimo vsaku na pozemku nabízí možnost vodu akumulovat a používat ji k zálivce nebo případně po úpravě ke splachování WC nebo v jiných zařízovacích předmětech. [9, 10]

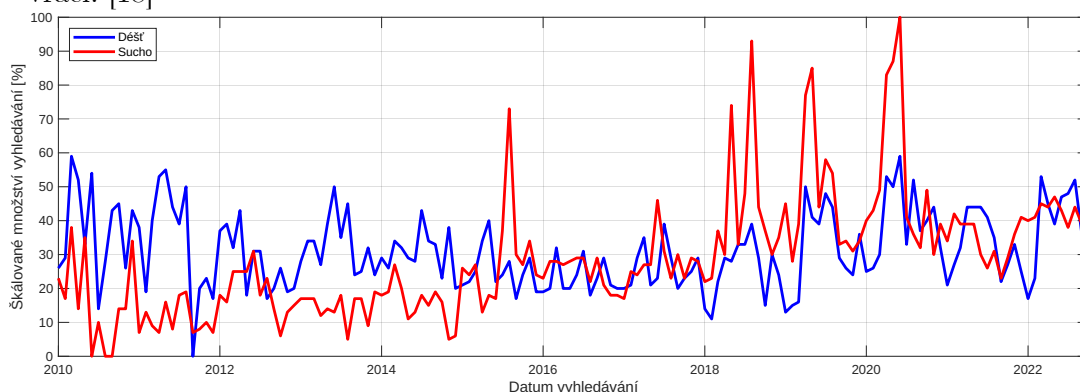
Na stavební opatření spojená s využitím srážkové a odpadní vody v domácnosti či zahradě lze žádat dotaci. Dlouho běžící program „Dešťovka“ byl již ukončen, ale v nové etapě „Nová zelená úsporám“ pod opatřením typu „Dešťovka“ lze žádat dále. Na využití dešťové vody pro zálivku je maximální výše dotace stanovena jako 20 000 Kč + 3 500 Kč x objem akumulačních nádrží v m³ (platné k 3. lednu 2023) [11]. Celková výše podpory je omezena na max. 50 % celkových přímých realizačních výdajů a zároveň maximálně 55 tis. Kč. Cílem dotace je snížit množství odebírané pitné vody z povrchových a podzemních zdrojů. [12, 13]

S intenzivnějšími suchy stát zavádí razantnější opatření, které dle nové novely zákona umožňuje obcím v období sucha zakázat zalévání zahrad a napouštění bazénů z veřejného vodovodu. Například městský úřad v Kolíně tohoto využil a hned 6. dubna 2020 vydal omezení užívání pitné vody z vodovodu pro veřejnou potřebu pouze k pitným, hygienickým a smluvně technologickým účelům platný od 15. dubna do 15. července. Zakazoval zalévání zahrádek, kropení travnatých porostů,

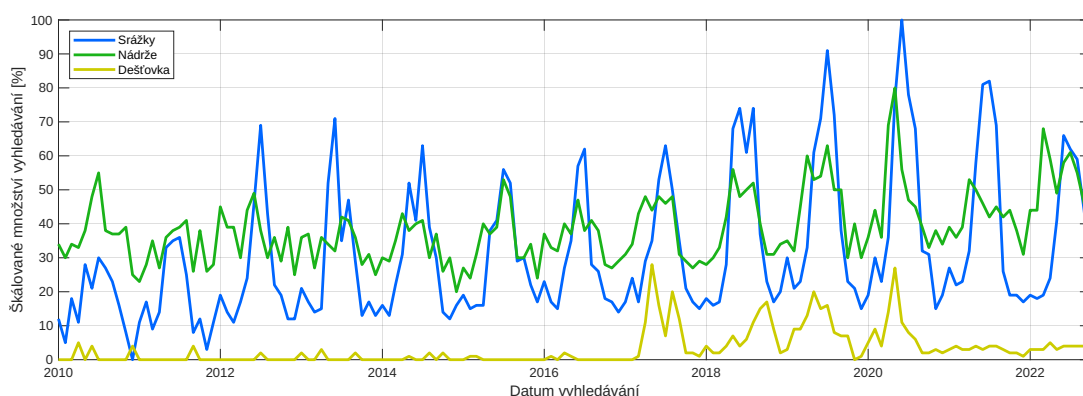
napouštění bazénů, mytí aut, dopouštění vlastních zdrojů (vlastní studny, dešťové akumulace) apod. [14, 15, 16]

1.3. OBČANÉ, VODA A DĚŠŤ

V současné chvíli zájem veřejnosti o vývoj sucha pomalu roste. V posledních několika letech dokonce ve vyhledávání převýšila frázi „děšť“ [17]. Zároveň lidé pravidelně v letních obdobích vyhledávají fráze „srážky“, což perfektně koreluje s vyhledávanou frází „nádrže“. V zimních měsících tento zájem opadá, ale již na jaře se vrací. [18]



Obr. 1.2.: Vyhledávání frází „Sucho“ a „Děšť“ na Google [17]



Obr. 1.3.: Vyhledávání frází „Srážky“, „Nádrže“ a „Dešťovka“ na Google [18]

Z Obr. 1.2 je patrné, že před rokem 2015 se o „suchu“ mluvilo výrazněji méně, než mezi roky 2018 a 2020, kdy jsme pocítovali důsledky nedostatku deště. V roce 2022 je pojem „sucho“ vyhledávám téměř třikrát častěji než před rokem 2015.

Z Obr. 1.3 je zřejmé, že dotační program Dešťovka přišel ve správnou chvíli, před obdobími sucha mezi roky 2018 a 2022. Ve veřejnosti vzbudil zájem o akumulární nádrže, který přetrvává i v roce 2022 i přestože tento rok byl výrazně deštivější než roky předchozí.

1.4. NAVRHOVANÉ ŘEŠENÍ

Vzhledem k tomu, že využívání vody z vodovodního řadu pro účely závlahy je omezeno zákony, nabízí se využívat vodu dešťovou. Tato alternativa je rozumná jak z ekonomického hlediska, tak i z pohledu snížení spotřeby pitné vody. Nejenže dochází ke

snížení množství vody, kterou je třeba zasakovat nebo odvést mimo pozemek [1], ale zároveň lze s použitím řízeného zavlažování zvýšit produkci plodin [2]. Zásadní roli při plánování spotřeby akumulované vody, hraje akumulované množství, aktuální potřeba zavlažované zeleně a předpověď počasí.

Optimální hospodaření v tomto případě znamená snahu vystačit s akumulovaným množstvím vody mezi obdobími intenzivních dešťů a rozplánovat spotřebu tak, aby zavlažovaná zeleně období sucha přežila, případně i plodila. V ideálním případě lze tohoto stavu dosáhnout pouze za použití dešťové vody.

2. ÚVOD

V této práci jsem se zabýval rešerší historických a moderních zavlažovacích systémů dostupných na trhu, jakým způsobem fungují a jaké benefity nabízejí. Dále pak rešerší senzorů, které lze použít a výběrem konkrétních modelů. Následně jsem navrhl a vytvořil modulární systém, který má za cíl monitoring zavlažovaného prostoru a ovládání akčních členů. V další fázi jsem se zabýval návrhem vhodných kombinací modulů pro zavlažování okrasné zahrady, zeleninové zahrádky a zeleně v bytových domech. Dalším úkolem bylo zvolit, naprogramovat a odladit komunikační protokol mezi jednotlivými senzory a zpracovat algoritmus, který bude na základě aktuálního stavu, potřeby zeleně a předpovědi počasí hospodařit s vodou. Jako poslední je důležité měřená data ukládat a mít k nim jednoduchý přístup, pro pozdější analýzu.

Cílem práce je vytvořit systém, který je cenově dostupný a do kterého je snadné programově zasáhnout a modifikovat jej. Použité komponenty jsou dostupné a jejich výměna je co nejjednodušší. Ceny uváděné v této kapitole jsou platné k září 2022.

2.1. ZÁVLAHOVÉ SYSTÉMY

Původ cíleného zavlažování pochází z období Mezopotámie 6 000 př. n. l., dále se rozšiřoval do Egypta a Sýrie. Časem se začaly vyvíjet první dopravníky a vodní čerpadla, které usnadňovaly zavlažování i ve větší vzdálenosti od řek. V dnešní době existuje široká škála zavlažovacích technik, které fungují především v průmyslovém zemědělství. [19, 20, 21, 22]

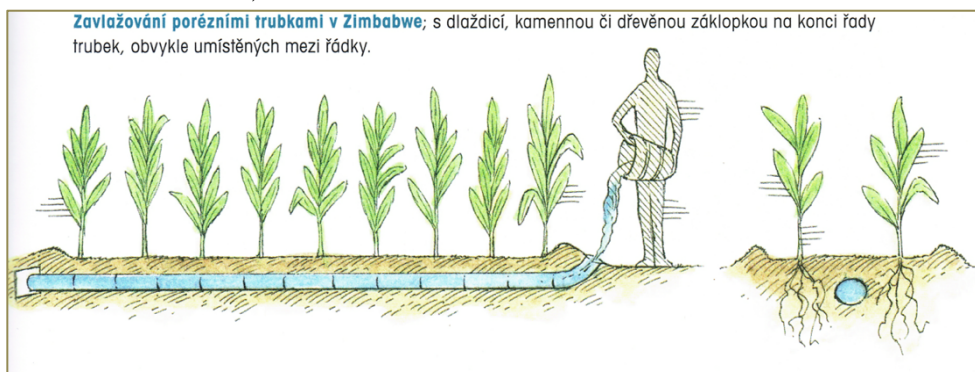


Obr. 2.1.: Historie zavlažování [23, 24, 25]

Zavlažovací techniky mají za úkol přemístit vodu k rostlinám. Se zavlažováním však čím dál častěji souvisí i optimalizace spotřeby vodních zdrojů. Základní rozdělení je na pasivní a aktivní způsoby. Pasivní částí se označuje vlastní způsob zavlažování, tj. jak dostat vodu k zavlažovaným rostlinám. Aktivní částí je myšlen způsob zachytávání dešťové vody a optimalizace rozhodování, jak s ní hospodařit.

2.1.1. ZAKOPANÉ NÁDOBY A TRUBKY

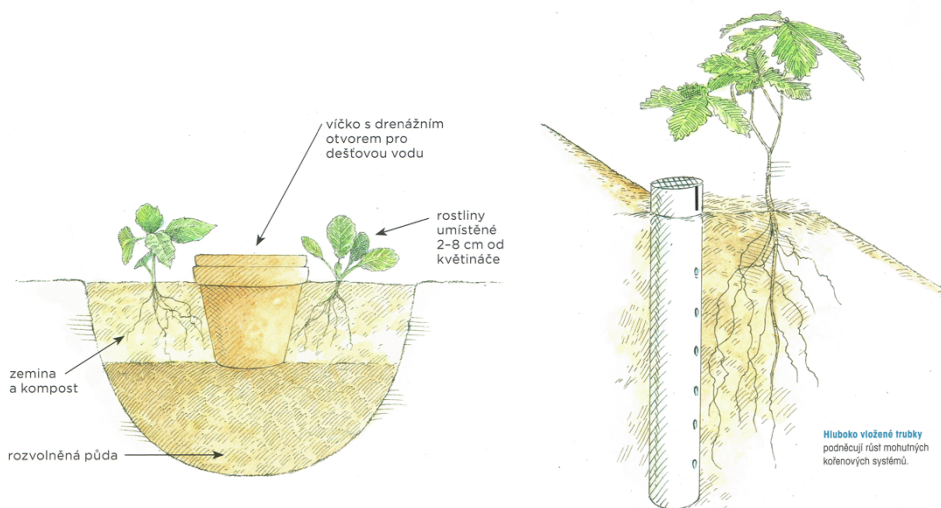
Zakopané hliněné nádoby jsou jedním z nejeftivnějších dosud známých systémů, který má své kořeny pravděpodobně před mnoha tisíci lety v Číně. Neglazovaný hrnec nebo trubice naplněná vodou zakopaná v zemi poskytuje blízkým rostlinám řízené zavlažování ve formě kapilárního toku. Systém trubek se začínal používat až kolem roku 1860, avšak vysoké pořizovací náklady a technické problémy (např. křehkost trubek) omezovaly jeho vývoj.



Obr. 2.2.: Zakopaná hliněná porézní trubka [26]

Ve francouzském Avignonu se podařilo tímto způsobem snížit spotřebu vody o cca 80 % a zároveň zvýšit produkci kukuřice, melounů a brambor.

Výhodou je, že vedení vody přímo k rostlině omezuje růst plevelů. Často tento způsob nachází uplatnění v suchých oblastech Indie, Pákistánu, Íránu, na Středním východě a v Latinské Americe. [26]



Obr. 2.3.: Zakopaná hliněná nádoba (vlevo) a hluboko vložená trubka [26]

2.1.2. HLUBOKO VLOŽENÉ TRUBKY

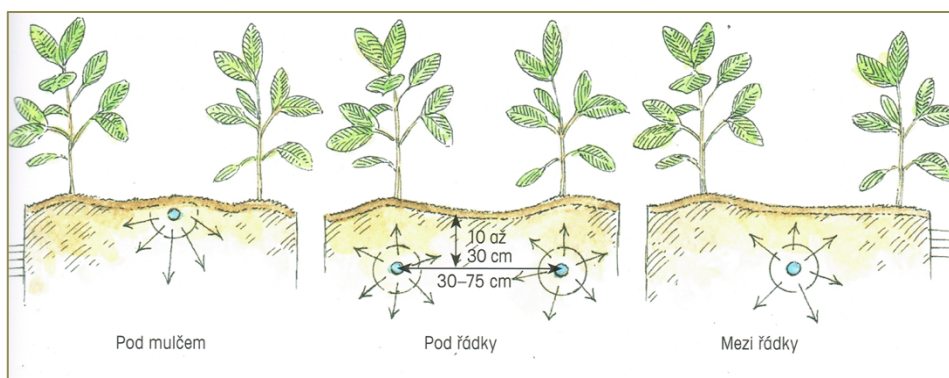
Jedná se o systém svisle zaražených trubek přivádějících vodu hlouběji pod povrch půdy, což ji výrazně chrání před vypařováním. Skvělých výsledků tato metoda dosahuje při sadbě stromů či keřů, a to i v pouštních oblastech.

Obdobou této varianty jsou porézní kapsle. Jedná se o uzavřené hliněné nádoby umístěné pod povrchem, do kterých se ze zásobníku přivádí voda. [26]

2.1.3. KAPKOVÁ ZÁVLAHA A PORÉZNÍ HADICE

Porézní neboli průsaková hadice je vyrobena z recyklované gumy a její průsak závisí na velikosti pórů a tlaku vody. Na rozdíl od hliněných nádob nebo trubek hadice nevypouští vodu podle toho, kolik ji rostlina potřebuje, a není proto tak efektivní. Je vhodné použít 74 nebo 25 mikronový filtr zabráňující ucpání hadice znečištěnou vodou. [26]

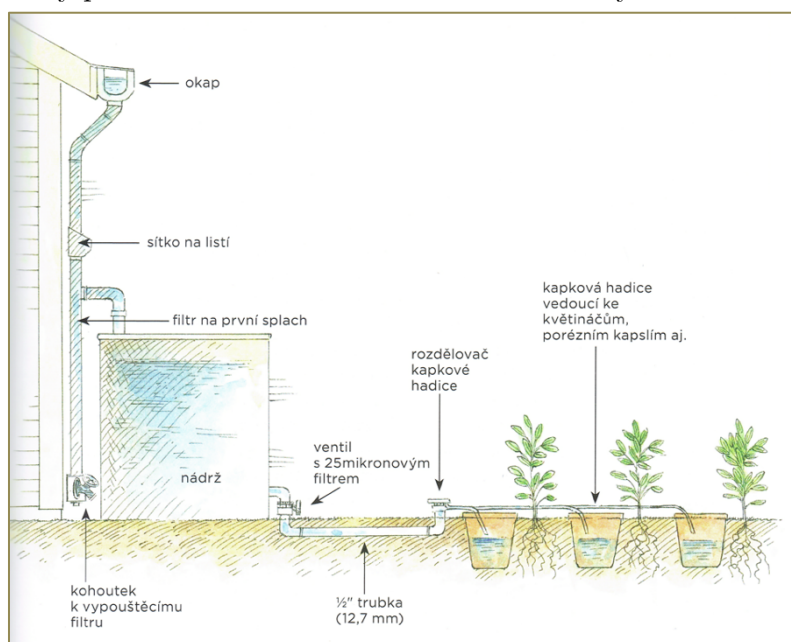
Kapková závlaha je obdoba porézní hadice s tím rozdílem, že se jedná o trubici z plastu, která je na určitých místech perforovaná a tím dochází k úkapu. Oproti porézní hadici se ukládá na povrch záhonu. [27]



Obr. 2.4.: Porézní hadice a její různé druhy položení [26]

2.1.4. ZACHYTÁVÁNÍ SRÁŽKOVÉ VODY

Již starověké civilizace vyvíjely systémy pro sběr a akumulaci dešťové vody, kterou využívaly pro zásobování zemědělců i ve velmi suchých oblastech.



Obr. 2.5.: Základní systém zachytávání srážkové vody s automatickým plněním porézních kapslí [26]

V dnešní době se nejčastěji voda zachytává ze střech či jiných zpevněných ploch. Vhodné je, aby plocha byla relativně čistá a nepropustná. Pro odvod z plochy je

nutný žlab a svod doplněný sítkem na listy. Filtrace prvního splachu umožňuje dešti smýt střechu od ptačího trusu, prachu a dalších nečistot, první část znečištěné vody je separována a po skončení deště vypuštěna.

Uchování vody se provádí v nádržích. Je třeba, aby voda přes zimu nezamrzla, případně byla vypuštěna, zabrání se tak poškození nádrže. Návrhu vhodné velikosti nádrže jsem se věnuji v kapitole 3.2. Z důvodu zamezení růstu řas se doporučuje nádrž neprůhledná. V případě potřeby vyššího tlaku vody se nádrž umísťuje co nejvýše pod okap. [26]

2.1.5. VÝBĚR ROSTLIN A KRAJINOTVORBA

Snížení potřeby vody lze provést vhodným výběrem rostlin, které pochází z podobného klimatu, tedy jejich nároky na vodu odpovídají lokálním možnostem. Odřidy odolné suchu byly historicky selektovány. Například modrá kukuřice Hopi se přizpůsobila rozvinutím hlubokého a rychlerostoucího kořenového systému. Předpěstování umožňuje rostlinám uzavřít svůj životní cyklus ještě před obdobím horka a sucha. Trávník, který je třeba zalévat je vysokým spotřebitelem vody a je možné ho nahradit alternativními rostlinami nebo skalkovou výsadbou. Zajištění propustnosti půdy je klíčové pro vsak vody při intenzivních deštích. Propustnost je možné zlepšit hloubkovým rozvolněním nebo přidáním organického materiálu či písku. Používání mulče snižuje vypařování vody z povrchu a zabraňuje růstu plevelů. Tam, kde je to možné, lze využít pro zálivku šedou odpadní vodu. [26]

Designování krajiny pro zvýšení akumulace dešťové vody zabraňuje povodním a napomáhá udržet srážkovou vodu v krajině. Většinou se jedná o valy v místech kopců, které tvoří lokální přehradu a zabraňují vodě rychle odtéct. V městských oblastech se s úspěchem využívá mezer v obrubnicích tak, aby dešťová voda mohla volně odtékat a zároveň se využívá jako intenzivní závlaha pro zeleň. [26, 28]



Obr. 2.6.: Způsoby odvodnění cest [29, 30]

Mezi závlahové systémy patří i automatické zavlažovací technologie, kterých je v současné době na trhu dostupných několik druhů. Tyto systémy především cílí na pohodlí obsluhy.

2.1.6. GARDENA

Německá společnost Gardena je celosvětově úspěšná značka, která nabízí široký sortiment v oblasti zahradního vybavení. Patří do skupiny Husqvarna Group. Již od roku 1978 se zabývá inteligentním využitím vody za účely zavlažování, odvodnění a zásobování. Po roce 1985 vyvinula systém automatického zavlažování. [31]

V současné chvíli ve svém portfoliu nabízí například Micro-Drop-System, Sprinklersystem nebo mlhovací hadici. Dále nabízí produkt řízeného zavlažování. Zavlažovací počítače, jsou připojeny na zdroj vody a fungují jako elektromagnetický ventil. Je možné využít vícekanálový rozvod, který rozdělí zavlažovanou plochu na několik samostatně zavlažovaných okruhů. Uživatel rozhoduje, kdy a jak často chce zavlažovat. Nejlevnější variantou jsou zavlažovací hodiny (manuální nastavení času) za cenu 890 Kč. Vyšší verze je zavlažovací počítač Master (týdenní kalendář) za cenu 2 790 Kč. Jako doplněk je možné zakoupit půdní senzor vlhkosti a senzor deště a rozdělovač pro 6 různých oblastí. Nově Gardena přichází s řízením Smart, které se ovládá prostřednictvím aplikace. Je ve verzi pro 1 okruh nebo pro 6 okruhů. Součástí nabídky je i senzor vlhkosti půdy. Nabídka Smart řízení v sadě se senzorem vlhkosti se pohybuje okolo 10 000 Kč. [32, 33]



Obr. 2.7.: (Zleva) zavlažovací hodiny, zavlažovací počítač Master, sada smart [33]

2.1.7. KÄRCHER

Německá společnost Alfred Kärcher GmbH & Co. KG je celosvětově operující podnik zaměřující se na čisticí přístroje a systémy. V roce 2007 vstoupila firma do oblasti zahradního sortimentu zahrnující čerpadla pro zavlažování, odvodňování, zásobování domácností vodou a rozsáhlé příslušenství. [34]



Obr. 2.8.: (Zleva) zavlažovací automat, SensoTimer [35]

Nabízí Rain System, který je tvořen sítí nadzemních trubcí s rozstříkovači. Automatické zavlažování, je řešeno hodinami nebo zavlažovacím automatem (manuální nastavení času) za cenu 1 880 Kč. Nabízí i řešení SensoTimer, který obsahuje bezdrátový senzor vlhkosti půdy. Senzor obsahuje tzv. pad, který je třeba pro udržení optimální funkčnosti jednou ročně měnit. Cena systému se dvěma senzory je 4 990 Kč a sada dvou náhradních padů senzoru se prodává za 310 Kč. [36, 35]

2.1.8. IRIMON

Firma Irimon je českou společností zaměřující se na návrh a instalaci závlahových systémů pod značkou Hunter. Od roku 1997 poskytují komplexní služby v oblasti profesionálních automatických závlah. [37]

Jejich sortiment je rozdělen na dvě části, Professional Line a Distributor Line. Distributor Line je vytvořena za účelem nenáročné instalace a především pro domácnosti. Je zde možno zakoupit ovladače jedné až šesti sekcí. Tyto řídicí moduly se pohybují s cenou od 1 200 do 1 600 Kč. Nabízí jak bateriovou, tak ze sítě napájenou verzi. Je možné dokoupit senzor srážek za 792 Kč. Cena samostatných elektro ventilů je 349 Kč (24V verze) a 553 Kč (9V verze). [38]



Obr. 2.9.: (Zleva) ovládací jednotka Distributor Line, ovládací jednotka pro 24 sekcí [38]

Professional Line je určena pro složitější systémy a tomu odpovídají i vlastnosti. Model pro připojení 6 sekcí je za cenu 6 250 Kč. S rostoucím počtem sekcí roste i cena až k systému s 24 sekcemi a cenou 15 690 Kč. Systém je možné doplnit meteostanicí (vnitřní a vnější teplota, vlhkost, srážky, tlak vzduchu, rychlost větru, intenzitu slunečního záření a UV index). Cena této meteostanice je 5 750 Kč. Irimon nabízí systém vzdálené správy ovládací jednotky, přístup k datům z letištních meteostanic ze sítě Weatherunderground, notifikaci v případě poškození kabelů nebo ventilů (abnormální průtok), denní úpravu závlahových kalendářů na základě počasí a přístup k informacím o zavlažování až 30 dnů zpět. Tato služba v rámci zakoupení jejich produktu stojí symbolickou 1 Kč. [38]



Obr. 2.10.: (Zleva) Multisenzor, vlhkostní sonda, čidlo srážek, teploty a větru [38]

Značka Hunter nabízí i jednotlivé senzory jako např. dešťový (Rain Klik), větrný (Wind Klik), půdní vlhkosti (Soil Klik), průtoku (Flow Klik) a nadřazený systém Solar Sync, který upravuje délku plánované závlahy na základě měření denní evapotranspirace, kdy je schopen ušetřit až 30 % spotřebované vody. [39]

2.1.9. FEIDLER

Z průmyslového odvětví v České republice působí firma Fiedler, která byla založena roku 1990 a původně vyráběla mikroprocesory. V roce 1997 vznikla první řídicí a monitorovací jednotka. Do roku 2008 byl počet instalovaných monitorovacích jednotek přes 1000 i mimo Evropu. V současnosti úzce spolupracují s Jihočeskou univerzitou a spravují více než 10 000 telemetrických stanic. Ve spolupráci s ČHMÚ provozují server hladiny.cz, kde jsou aktuální stavy řek. Vyvíjí jak telemetrické zařízení pro vodohospodářství, tak i řídicí jednotky. [40]

Jejich řídicí jednotka je zaměřena na sběr dat. Jedná se o programovatelný automat PLC, který umí přímo ovládat 14 výstupních relé. Vstupem je až 32 analogových kanálů pro připojení senzorů a 40 binárních kanálů pro sledování chodů a poruch. Veškeré vstupy a výstupy lze rozšířit přídatnými moduly. Cena základní řídicí jednotky je přes 22 000 Kč. [41]



Obr. 2.11.: Multikanálová telemetrická stanice [41]

2.1.10. SHRNUÍ

Uvedené produkty se liší především robustností provedení, úrovní inteligence řídicího algoritmu a přesností měření, na kterém pak řízení zakládají. Všechny produkty však pracují s neomezeným množstvím vody, která je jim poskytována. Hlavním cílem je tuto vodu co nejvíce ušetřit. Z mého pohledu je v této oblasti nejpracovavější systém Hunter, který jako jediný kalkuluje s předpovědí počasí a mění intenzitu zalévání v závislosti na velkém množství relevantních parametrů. Zároveň i jeho cena je příznivá.

Vzhledem k opatřením, které zavádí obce v oblasti zákazu používání pitné vody pro závlahu (kapitola 1.2), jsou předchozí systémy používající vodu z veřejného vodovodu nevyužitelné. Je možné je dále provozovat z vlastních studen, což ale nenapomáhá stavu spodních vod v okolí. Nejlepší řešení je pak použít naakumulovaný zdroj dešťové vody.

2.2. MĚŘICÍ SENZORY

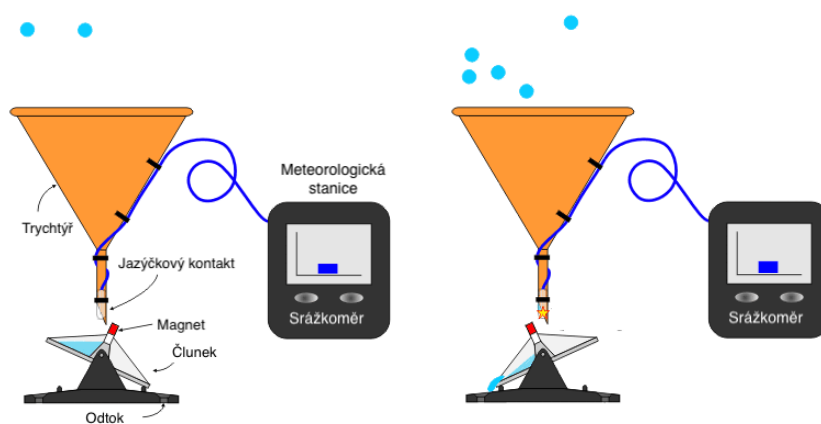
Hlavní požadavky na měřicí senzory jsou robustnost provedení a zároveň příznivá cena. Důraz na přesnost není klíčový, neboť postačuje měření teploty na jednotky stupně Celsia, vlhkost půdy a vzduchu v řádech desítek procent, srážky na jednotky mm, množství akumulované vody s odchylkou na 50 l a rychlost větru na jednotky m/s.

2.2.1. SRÁŽKOMĚRY

Z pohledu srážkoměrů lze mluvit o několika vlastnostech deště, které lze měřit. Mimo jeho množství a intenzitu je možné měřit velikost, tvar a rychlost dešťové kapky. Tím se zabývají studie z roku 1900 až 1960 [42, 43, 44], ve kterých se snaží měřit velikost a rychlost dešťových kapek pomocí chemicky ošetřených papírů nebo nylonového síta potaženého cukrem nebo sazemí. Tyto metody však nebyly přesné a v poslední době byly nahrazeny automatizovanými přístroji používající fotogrametrii, laserové měření nebo disdrometr. [45]

Pro vyvíjený systém je důležité měření množství a intenzity srážek. Nejjednodušším způsobem, jak měřit množství srážek je ocejchovaná nádoba, většinou ve tvaru kónického válce. Zde je nutné po každém dešti provést odečet a nádobu vylít. Tato nádoba se nazývá Ombrometr. Přístroj dokáže měřit pouze množství srážek. Lze ho doplnit nádobou s plovákem, na který je připojeno registrační zařízení, které zapisuje aktuální intenzitu deště na otáčející se papír. Je tak možné odečítat průběžnou intenzitu deště v závislosti na množství vody pod plovákem. Toto zařízení se potom nazývá Ombrograf a vytvořený záznam je Ombrogram. [46, 47]

Další variantou je nahrazení plováku člunkovým mechanismem, který se skládá ze dvou částí. Po naplnění jedné z částí dojde k překlopení a vyprázdnění a začne se srážkovou vodou naplňovat část druhá. Každé překlopení se odečítá a výsledné množství srážek se vypočte v závislosti na objemu člunku a velikosti zachytné plochy. Lze tak získat rozlišení až 0,1 mm. Detekce překlopení se provádí bezkontaktně, většinou magnetickým senzorem. [48]



Obr. 2.12.: Člunkový srážkoměr a jeho princip [49]

Další z variant odečtu množství srážek je váhový srážkoměr, který obsahuje nezakrytou nádobu, která je umístěna na váze. Jedná se o další velice jednoduché řešení, které používá několik výrobců. Je však citlivé na větší předměty, které

mohou do nádoby spadnout a způsobit chybu měření. Dále je třeba vyřešit způsob vylévání nádoby. [47]

Jako bezkontaktní varianta měření deště se používá optický srážkoměr. Tento používá 4 odražené infračervené paprsky uvnitř průhledného kulového krytu. Pokud na povrch senzoru dopadne dešťová kapka, způsobí zvýšený rozptyl světla, který je zaznamenán detektorem infračervených paprsků. Řídící elektronika je schopna vyhodnotit kapky o velikosti 0,5 mm a eliminovat okolní světelné změny včetně stárnutí povrchu snímače. Popsaný senzor nabízí ve svém sortimentu již zmíněná firma Fielder. Jeho cena je 2 980 Kč. V jejich nabídce je i člunkový srážkoměr za 16 450 Kč a detektor deště s kapacitním senzorem, který slouží k detekci dešťových nebo sněhových srážek. Po dobu trvání deště je tento senzor vytápěn. Jeho cena je 2 760 Kč. [50, 51]

2.2.2. SENZORY TEPLOTY

Senzory teploty se rozdělují na kontaktní a bezkontaktní. Bezkontaktní snímače k detekci teploty používají termočlánkové baterie, bolometry, pyroelektrické detektory nebo polovodičové detektory. Pro měření teploty vzduchu se běžně používají senzory kontaktní. Ty se dále dělí na elektrické (změna elektrických vlastností), dilatační (již zmíněné kapalinové a plynové) a speciální (šumové, akustické, atd.). Pro jednoduchost použití jsem se rozhodl použít teploměry elektrické. První varianta je kovový odporový teploměr. Tento senzor využívá změnu odporu v závislosti na teplotě. Používají se platinové, niklové nebo měděné senzory. Každý kov má definovaný vlastní koeficient závislosti odporu na teplotě. Jejich závislost je možné popsat jednoduchými polynomy, případně lze použít i linearizovaný model při akceptování nižší přesnosti. V rozsahu 0 – 100 °C je u platinového senzoru chyba nonlinearity 0,145 K.

Další skupinu tvoří polovodičové senzory teploty. Opět se s teplotou mění odpor. U termistorů NTC (negastory) odpor s rostoucí teplotou klesá. U termistorů PTC (pozistory) je tomu naopak. Jejich závislosti bohužel nejsou lineární. Oproti odporovým teploměrům mají větší citlivost a jejich cena je výrazně nižší.

Poslední nejpoužívanější variantou jsou monokrystalické teploměry s PN přechodem, kde se s rostoucí teplotou snižuje prahové napětí PN přechodu. Vykazují velmi dobrou citlivost, ale jejich rychlost a odolnost je nižší.

Měřit teplotu lze také pomocí termočlánků. Termočlánek je tvořen spojením dvou materiálů. Je-li vystaven tento spoj měřené teplotě, dojde na opačném konci termočlánku ke vzniku napětí. Tento konec ale musí mít udržovanou známou teplotu. Termočlánky se používají pro vysoké rozsahy teplot s nutností přesného měření. [52]

2.2.3. SENZORY VLHKOSTI VZDUCHU

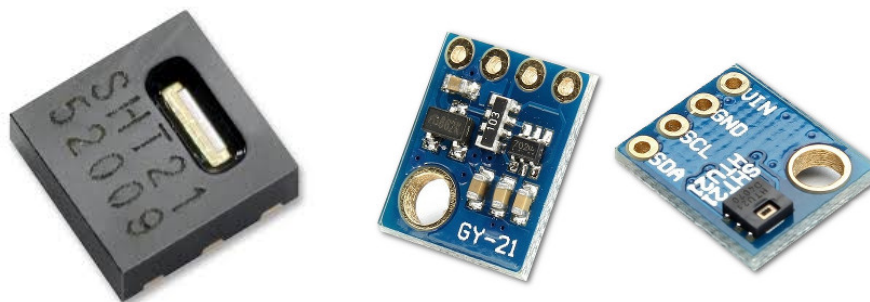
Základní metody měření vlhkosti vzduchu jsou psychrometrická, hygrometrická a metody rosného bodu. Metody psychrometrická je založena na měření teploty dvěma teploměry. Jeden z teploměrů měří teplotu vzduchu a druhý je obalen mokrou tkaninou, z které se voda odpařuje. Toto odpařování způsobí odebrání tepla z „mokrého“ teploměru, tím se vytvoří rozdíl teplot na dvou použitých teploměrech.

Rozdíl teplot se nazývá psychometrická diference a je nepřímo úměrná relativní vlhkosti vzduchu. [53]

Hygrometrická metoda funguje na principu schopnosti některých látek udržovat svou vlhkost na úrovni vlhkosti okolního prostředí. Díky tomu pak mění své vlastnosti jako je například velikost, hmotnost, elektrický odpor nebo kapacita. Historicky nejstarším vlhkoměrem pracujícím na tomto principu je lidský vlas.

Metoda rosného bodu jako první určuje teplotu rosného bodu. Je to teplota, při které je vzduch maximálně nasycen vodní parou. Na základě této teploty se vypočte vlhkost vzduchu.

Na trhu je dostupných několik senzorů. Jedním z nich je senzor Si7005 od firmy Silicon Laboratories. Při výrobě je kalibrován a data jsou uložena v paměti. Pracuje na kapacitním principu stejně jako další senzor SHT11 od švýcarské firmy Sensirion. Oba poskytují kalibrovaný digitální signál přes komunikační rozhraní I²C. Firma Sensirion má v nabídce i senzor s typovým označením SHT21, který umí měřit vlhkost vzduchu (kapacitní princip) i jeho teplotu (PN přechod). Každý senzor je kalibrován. V úsporném režimu má velmi nízkou spotřebu elektrického proudu 0,15 μ A. Komunikačním rozhraním je opět I²C. [54]



Obr. 2.13.: Senzor teploty a vlhkosti vzduchu SHT21 [55] [56]

2.2.4. SENZORY VLHKOSTI PŮDY

Vlhkost půdy lze nejpřesněji stanovit přímou metodou - gravimetrickou. Ta spočívá v odběru vzorku půdy, jejím zvážení a následném vysušení. Po vysušení proběhne další vážení a hmotnostní rozdíl přímo odpovídá množství vody, které vzorek obsahoval. Tento princip je však velmi časově náročný a z tohoto důvodu se používají metody nepřímé, které jsou nedestruktivní a výsledek je znám okamžitě. Kalibrace pro konkrétní typ půdy se provádí srovnáním s výsledky gravimetrické metody.

První typ metody je Time Domain Reflectometry (TDE). Jak název napovídá, měří se čas, za který impuls proběhne mezi dvěma měřicími jehlami. Vlhkost půdy mění její dielektrické vlastnosti. Porovnáním vyslaných a odražených pulzů se stanovuje vlhkost půdy. Druhý typ je Frequency Domain Capacitance (FD) a Frequency Domain Reflectometry (FDR). V tomto případě je půda považována za kondenzátor, který mění svou kapacitu v závislosti na vlhkosti půdy. Střídáním různých frekvencí se hledá rezonanční frekvence obvodu. V případě FD metody je relativní permitivita půdy stanovena z doby nabíjení kondenzátoru. [57]

Česká zemědělská univerzita v Praze vydala certifikovanou metodiku lokálního monitoringu půdních vlhkostí na zemědělských pozemcích ohrožených suchem. V metodice mimo jiné porovnávají výběr čidel pro měření půdní vlhkosti. Většina

senzorů musí být zakopána a připojena k čtecím a záznamovým zařízením. Dalším problémem je vysoká cena senzoru a datalogeru. V roce 2014 byl ve spolupráci ČVUT a firmy Tomst vyvinut senzor TMS 3 (v roce 2022 již existuje varianta TMS 4), který řadu problémů eliminoval. Jeho hlavní výhodou je relativně nízká pořizovací cena. [58]

Senzor TMS 4 měří vzdušnou i půdní teplotu spolu s půdní vlhkostí. Je napájen z baterie s životností 10 let. Obsahuje integrovaný datalogger a je možné ho použít i v drsných podmínkách [59, 60]. Jeho cena je 2 178 Kč [61]. Pro porovnání cena profesionální sondy PR2 Soil Moisture Profile Probe je 1 340 € (32 415 Kč). [62]

Pro měření vlhkosti půdy lze využít i nízkonákladové senzory SKU:SEN0193. Tyto senzory byly vyvinuty čínskou skupinou DFRobot a otestovány na japonské univerzitě. Používají kapacitní metodu FD. Cena senzoru je 7,14 \$ (168 Kč) [63]. Ze zprávy z univerzity v Japonsku [64] vyplývá, že senzor oproti testovanému SM-200, též uváděn v metodice ČZU, má vyšší odchylky, ale v řádu do 10 %. Přesnost zmiňované sondy PR2 Soil Moisture Profile Probe je 4 %.



Obr. 2.14.: (Zleva) senzor SKU:SEN0193, senzor TMS-4, sonda PR2 Soil Moisture Profile Probe [62, 59, 65]

2.2.5. SENZOR VÝŠKY HLADINY

Měření výšky hladiny je jedním ze základních zjišťování množství sledovaného materiálu. Měří se výška, ale často se tato hodnota přepočítává na objem. V souvislosti se zjišťováním množství v nádržích, je nutné při výpočtu zohlednit geometrii nádrže, kdy výška s objemem nemusí růst lineárně. Pro vizuální kontrolu se využívá nejčastěji průhledových stavoznaků, případně obtoků. Základní dělení lze provést na mechanické, hydrostatické, elektrické a bezkontaktní. [66]

Mechanické hladinoměry využívají ve většině případů plovák. Plovák plave na hladině měřené kapaliny, je vyveden přes kladku lankem s protizávažím. Výška hladiny se provádí odečtením polohy protizávaží nebo se převádí na elektrický signál senzorem polohy. Další typ hladinoměru využívá ponorné těleso. Je založen na Archimedově zákonu. Na ponořené těleso působí vztlaková síla, která odpovídá tíze objemu kapaliny, který je plovákem vytlačěn. Tato síla se odečítá většinou pomocí protipružiny a diferenčního transformátoru s pohyblivým jádrem. [66]

Hydrostatické hladinoměry fungují na principu měření hydrostatického tlaku na dně nádrže. Je možné tento typ měřičů doplnit i o měření atmosférického tlaku nad nádrží a zpřesnit tak výsledky měření. Z rozdílu tlaku se vypočítá výška hladiny.

Pro zvláště agresivní látky se ke dnu zavede odolná trubice, do které se přivádí vzduch pod tlakem. Tlak se pomocí regulátoru průtoku zvyšuje tak dlouho, až dojde k překonání hydrostatického tlaku na konci trubice zavedené na dno a vzduch se z trubice uvolní ve formě bublinek, které jsou vidět na hladině. [66]

Z kapitoly hladinoměů fungujících pomocí změny elektrických vlastností lze zmínit kapacitní princip, kdy se měřená kapalina nebo směs využívá jako dielektrikum. V případě elektricky vodivých kapalin lze využít jako jednu z elektrod právě kapalinu samotnou a jako dielektrikum použít teflon, kterým se obalí druhá ponořená elektroda. Vodivostní hladinoměry využívají změnu vodivosti mezi ponořenými elektrodami se změnou výšky zaplavení elektrod. [66]

Kategorie bezkontaktních hladinoměů je založena na měření tranzitního času od vyslání signálu do příjmu po odrazu od hladiny. Lze použít ultrazvuk, případně radar. Ultrazvuk využívá akustický signál, radar pak elektromagnetické záření okolo frekvence 10 GHz šířící se rychlostí světla. Lze měřit jak pulzní metodou, kdy se vyšle pulz a čeká se, za jak dlouho se impuls vrátí, tak i frekvenční metodou, kdy se časem mění frekvence a zjišťuje se fázový posun odraženého signálu od aktuálního. Po speciální aplikaci lze využít hladinoměry s radioaktivním zářením, které úměrně klesá s tloušťkou vrstvy měřeného materiálu. Tato metoda se používá pouze v extrémních případech, kdy nelze využít jiné metody. Například vzhledem k silně agresivním látkám, extrémně vysokým tlakům nebo teplotám. [66]

2.2.6. SENZORY VĚTRU – ANEMOMETRY

Vítr patří mezi nejvíce proměnlivý prvek počasí. Pro místo měření větru se volí výška přibližně 10 m bez zastínění vysokými předměty, budovami atd. Měří se směr větru a jeho rychlost. Protože vítr i ve velmi krátkém čase mění svoji intenzitu, měří se většinou průměr rychlosti za 10 minut a rychlost větru v nárazech. Jako náraz je definováno zvýšení o 5 m/s nad průměr, nejdéle však po dobu 20 s. Se stoupající rychlostí větru klesá pocitová teplota řádově o jednotky stupně Celsia oproti průměrné teplotě. Zároveň dochází k výraznějšímu vysychání půdy, a proto je nutné rychlost větru měřit. [67]

Snímač směru větru je tvořen střelkou a směrovkou. Střed otočné části snímače je připevněn k senzoru natočení. Vyhodnocení směru větru se provádí bezkontaktně. Mimo okamžitý směr se provádí i průměrování za delší časový úsek. [68]

Rychlost větru lze měřit snímačem nazývaným anemometr. Je několik variant těchto snímačů. Mechanické, které energii větru převádějí na rotační pohyb nebo na vychýlení z ustálené polohy. Mohou k tomu používat misky, lopatky nebo výkyvnou desku. Další varianta jsou aerodynamické anemometry, kdy proudící vzduch vytváří tlak, který se porovnává s tlakem statickým. Termická metoda pracuje na již zmíněném účinku větru na odvodu tepla, a tedy na snížení teploty. Případně lze měřit energii potřebnou na udržení stálé teploty snímače. Značkovací anemometry fungují na principu tepelného nebo chemického značkování, díky kterému lze zjistit rychlost i směr větru. Akustické ultrazvukové anemometry měří změny šíření zvuku v atmosféře a odvozují rychlost i směr větru. Lze také použít anemometry založené na Dopplerově principu s pomocí meteorologických radarů. [69, 70]

2.2.7. SHRNUTÍ A ZVOLENÉ SENZORY

Jako senzor množství a intenzity srážek jsem do připravovaného systému zvolil překlápěcí člunkový mechanismus doplněný o bezkontaktní magnetický senzor, který je připojen na jednotku sledující množství a intenzitu překlápění. Z těchto hodnot provádím výpočet množství a intenzity srážek.

Pro měření vlastností vzduchu jsem zvolil kombinovaný senzor pro měření teploty a vlhkosti s typovým označením SHT21.

Měření teploty půdy provedu pomocí digitálního teploměru DS18B20, který se vyrábí ve vodotěsné verzi a jeho cena se pohybuje v rozmezí 50-100 Kč. Hlavní výhodou je odolné pouzdro a přímý výstup teploty.

Měření vlhkosti půdy provedu pomocí nízkonákladového senzoru kapacitního principu. Je třeba provést jeho kalibraci pomocí gravimetrické metody pro půdu, do které je umístěn. Cena modelu SKU:SEN0193 se pohybuje okolo 200 Kč.

K měření rychlosti větru používám anemometr WH-SP-WS01, který pracuje na mechanickém principu pomocí bezkontaktního magnetického jazýčkového kontaktu. Cena senzoru se pohybuje okolo 300 Kč.

Měření výšky hladiny v nádržích a ve studni provádím bezkontaktním ultrazvukovým senzorem. Hlavní výhodou je především jeho nízká cena (50-70 Kč).



Obr. 2.15.: (Zleva) voděodolné provedení teploměru DS18B20, ultrazvukový senzor HC-SR04, anemometr WH-SP-WS01 [71, 72, 73]

2.3. KOMUNIKAČNÍ PROTOKOL A SBĚRNICE

Komunikace mezi moduly probíhá na vzdálenosti typicky několik desítek metrů, rychlost v tomto případě není kritická, avšak potvrzení přijetí zpráv je vhodné. Topologii požadují co nejvíce flexibilní.

V inteligentních budovách se v dnešní době používají různé komunikační standardy. V této práci zmíním pouze ty, které připadají v úvahu pro moji práci. Prvním z nich je EIB/KNX, který je celosvětově rozšířený. Má varianty fyzické topologie jako kroucený drát, powerline (stávající silové kabely), radiofrekvenční přenos nebo IP přenos přes síť. Pro kroucený pár je přenos logické „0“ symbolizován krátkým poklesem napětí (max. 104 μ s) a poté nárůst na původní hodnotu. Přenos logické „1“ odpovídá nečinnému stavu sběrnice. Přístup na sběrnici používá CSMA/CA (priorita rámců, odmlčení vysílače s menší prioritou). [74, 75, 76]

Další často používaný protokol je M-Bus, který slouží především k vyčítání měřičů odběru na vzdálenosti v řádu kilometrů. Používá sériovou linku RS-232 a přistupuje ke sběrnici jako Master-Slave. Topologie je přímá, kruh nebo hvězda. Logická „1“ je z pohledu Mastera napěťová úroveň 36 V a logická „0“ je 24 V. Z pohledu Slave je logická „1“ < 1,5 mA a logická „0“ je vyjádřena spotřebou 11-20 mA. [74, 77]

Dále lze uvést sběrnici LON, která je určena pro rozsáhlé sítě a není kladen důraz na rychlost komunikace. LON nemá fyzickou vrstvu pevně definovanou a lze ji tak použít na kroucenou dvojlinku, koaxiální kabel, optické vedení, rádiový přenos nebo síťový rozvod 230 V. Od toho se pak odvíjí, jakým způsobem budou reprezentovány jednotlivé bity. Ke spojení se sběrnici se používal Neuron chip, ale po standardizování v EIA lze použít i jiné mikroprocesory. Pro řízení přenosu a směrování paketů používá architekturu peer-to-peer, což znamená, že na síti není pouze jeden master, ale zařízení si mohou data mezi sebou přeposílat napřímo. [74, 78, 79, 80]

Následující často a celosvětově používaný protokol je BACnet, který se nejčastěji používá při komunikaci po Ethernetu (BACnet/IP) nebo po RS-485 (Master/Slave – Token Passing). BACnet je spíš nadřazený komunikační protokol, který definuje „Objekt“ (seznam položek a jim náležící vlastnosti či hodnoty), „Služby“ (definice příkazů, které si mohou jednotky vyměňovat a co znamenají) a „Komunikace“ (Způsob přenášení zpráv). [74, 81, 82]

Posledním z protokolů, který zmíním je Modbus. Jedná se o otevřený protokol často používaný programovatelnými automaty. Ke sběrnici přistupuje jako Master/Slave. Odesílaná zpráva je zabezpečena pomocí CRC. Jako fyzickou vrstvu je možné použít RS-232, RS-422, RS-485, optické vlákno nebo rádiový přenos, případně ethernet pro Modbus TCP. Protokol Modbus existuje ve dvou různých variantách ASCII a RTU. RTU je povinná, ASCII volitelná. [74, 83, 84]

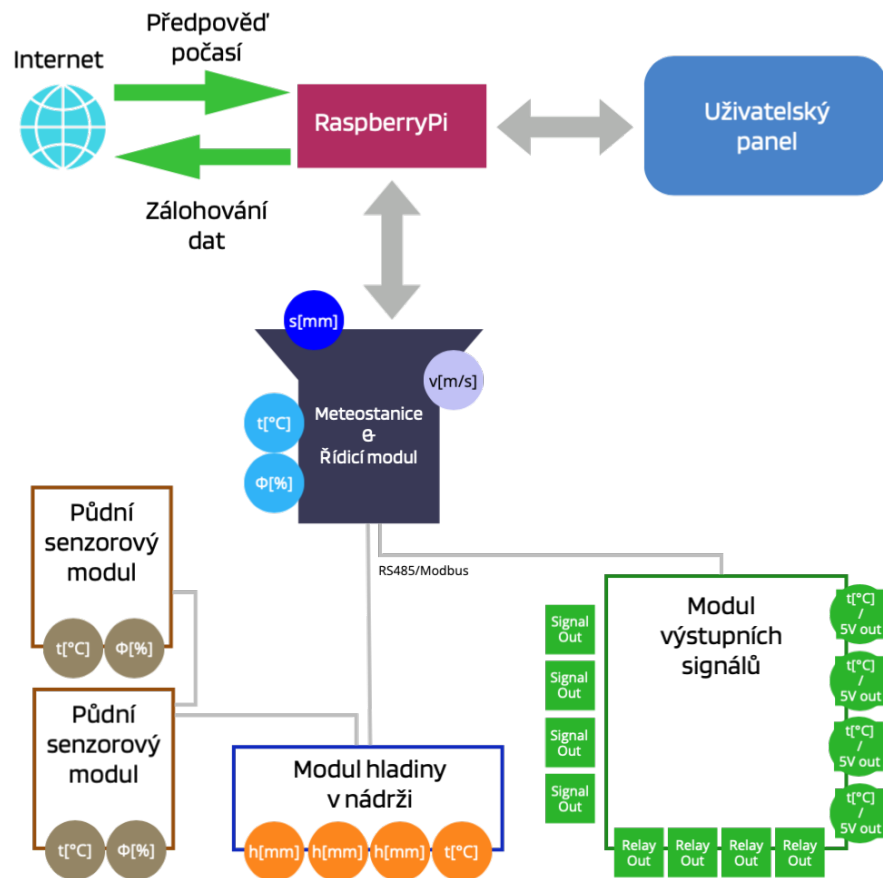
Pro svoji práci jsem se rozhodl použít protokol Modbus a sběrnici RS-485 vzhledem k její odolnosti proti elektromagnetickému rušení, možné vzdálenosti až 1200 m a libovolné topologii vyjma kruhu. Detekce logického stavu probíhá na principu rozdílového napětí a převodník mezi logickými úrovněmi TTL a RS-485 je cenově dostupný MAX485. Modbus volím z důvodu jednodušší implementace a možnosti vytvořené měřicí moduly připojit k různým PLC, čímž docílím větší variability systému. [85]

2.4. BLOKOVÉ SCHÉMA

Celý systém se skládá z modulů, které spolu vzájemně komunikují prostředním sběrnice. Systém je rozdělen na dvě základní části.

První část tvoří minipočítač RaspberryPi, který je připojen k internetu, kde získává data o předpovědi počasí a archivuje aktuální měřená data do cloudu. RaspberryPi je připojen k uživatelskému displeji.

Druhá část je tvořena vlastním měřicím systémem. Hlavní řídicí modul je meteo stanice, která získává data o aktuálním počasí. Tento modul kombinuje anemometr, srážkoměr, senzor teploty a vlhkosti vzduchu. K tomuto modulu jsou prostřednictvím sběrnice připojeny jednotlivé moduly. Půdní sensorové moduly měří teplotu a vlhkost půdy. Modul hladiny v nádrži měří výšku hladiny v nádrži a teplotu vody. Ovládání výstupních periferií je realizováno prostřednictvím čtveřice reléových modulů, čtveřice galvanicky oddělených výstupů a čtveřice volitelných výstupů nebo připojení čtyřech senzorů teploty.



Obr. 2.16.: Blokové schéma navrhovaného systému

Celý projekt jsem vytvořil jako open-source z komponentů, které jsou hojně používané a i v této době skladových nedostatků jsou dostupné z několika různých zdrojů. Jednoduchost jsem se snažil zachovat i při výběru hlavního procesoru a programovacího jazyku a prostředí. Čím jednodušší totiž přístup bude, tím roste pravděpodobnost, že práce bude inspirací pro širší komunitu a vyvíjený systém bude úspěšně implementován ve větším počtu instalací.

3. POUŽITÍ SENZOROVÉHO SYSTÉMU

Cílem projektu bylo vytvořit systém na optimální hospodaření s dešťovou vodou. Tedy senzorové moduly, které samostatně provádí měření a řídicí systém, který rozhoduje, jakým množstvím vody si může dovolit zavlažovat.

Vzhledem k variabilitě systému je možné používat jen jeho část nebo programově upravit pro široké spektrum aplikací. Část systému lze provozovat jako meteostanici v režimu dlouhodobého měření a následně navrhnout optimální množství, počet senzorů nebo velikost akumulární nádrže. Lokální podmínky, se mohou lišit v závislosti na okolí zavlažovaného prostoru, typu půdy, zastínění pozemku a dalších detailech, které hydro-meteorologická mapa nezohledňuje. V další fázi lze na základě měřených dat provést analýzu a systém rozšířit o vhodné senzory a akční členy, které se připojí k předem instalované meteostanici.

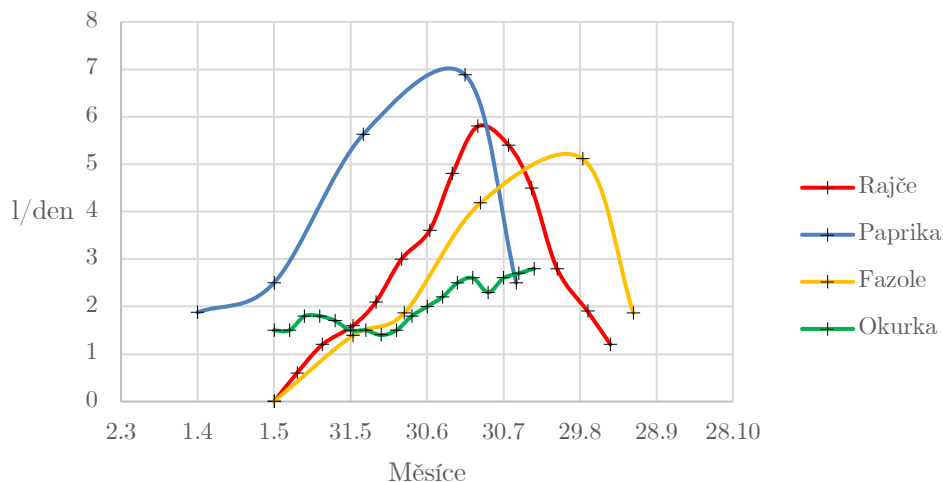
V případě, že jsou vstupní podmínky jasné, lze systém navrhnout přímo s ohledem na počet zavlažovaných okruhů, objemy a počet nádrží nebo množství čerpadel.

3.1. TYPY INSTALACÍ A JEJICH POŽADAVKY

V této práci uvedu 3 různé typy instalací, které se liší strategií hospodaření s dešťovou vodou. Jsou zde především různé požadavky na maximální absenci zavlažování, ale i množství nebo profil spotřeby v roce.

3.1.1. ZELENINOVÁ ZAHRADA

Typickým českým koníčkem je zahradničení. Nejčastěji Češi pěstují bylinky a květiny, dále pak zeleninu nebo ovoce. Nejčastější bylinku jsou pažitka, bazalka, petržel a máta. Ze zeleniny to jsou rajčata, papriky a okurky. [86]



Obr. 3.1.: Spotřeba vody rostlinami v průběhu roku [87, 88, 89]

Z Obr. 3.1 je zřejmé, že potřeba vody pro různé druhy rostlin se v průběhu sezóny mění, začíná v průběhu května a končí na konci září. Jedná se o čistou potřebu, která se dá pokrýt dešťovými úhrny. Často však dochází k jejich deficitu a v tom případě je třeba potřebu pokrýt zavlažovacím systémem. [90]

Cílem algoritmu je zaměřit svoji pozornost právě na toto období a v něm se snažit poskytnout v suchém období dostatek vody tak, aby rostliny zdravě plodily. Úhyn rostlin je v tomto případě nepřijatelný a zavlažování je vyžadováno i za cenu příspěvku ze studny nebo vodovodu. Co se týče typu závlahy, nejspornější je kapková případně podpovrchová závlaha.

3.1.2. OKRASNÁ ZAHRADA

Tento typ zahrady je tvořen především trávnikem, případně záhony s kvetoucími rostlinami. Závlaha kvetoucích záhonů je typově podobná zavlažování zeleninové zahrady. V období kvetení dochází ke zvýšené potřebě vody, avšak částečné vyschnutí není kritické. Naopak u trávniku v letních měsících může docházet ke zprahnutí, zežloutnutí. V létě vyžaduje trávník okolo 25 litrů na metr čtvereční za týden. Úsporu vody a lepší kondici trávniku lze v letním měsících docílit sečením na 5-8 cm, což zamezí vysychání půdy. Častými typy závlah jsou sprinklery, jejichž účinnost je nižší, ale nízké jsou i investiční náklady, například oproti podpovrchové závlaze. [91, 92]

3.1.3. HŘIŠTĚ A ŠKOLNÍ ZAHRADY

Školní zahrady a hřiště jsou tvořeny především travnatými porosty, které vyžadují péči i mimo závlahu, vzhledem k jejich častému zatěžování. U areálů tohoto typu jsou ideální podmínky pro instalaci podpovrchových akumulčních nádrží velkého objemu, které dokážou obrovské množství dešťové vody z rozsáhlých střešních ploch akumulovat pro použití v suchých letních obdobích.

V jižní Africe na fotbalovém stadionu se podařilo instalovat jímací systém s akumulční nádrží v suterénu o objemu 3 000 m³ vody. Zdá se to hodně, ale denní spotřeba na závlahu trávniku je 100 m³. Tímto způsobem se podařilo pokrýt 80 % z celkové poptávky dešťovou vodou. [93]

3.2. VÝPOČET VELIKOSTI NÁDRŽE

Pro dimenzování velikosti nádrže na dešťovou vodu v dnešní době existují online kalkulačky. Pro jejich porovnání jsem zvolil návrh realizace pro základní školu ve Velkém Oseku a zavlažování travnatého hřiště. Projekt má následující parametry:

- Roční úhrn srážek: 550 mm (dle hydrometeorologické mapy - Kolín)
- Plocha střechy: 950 m² (půdorysná plocha střechy pro zachyt vody)
- Plocha zahrady: 1500 m² (plocha určená k zalévání)

Tab. 3.1.: Porovnání webových kalkulaček doporučené velikost nádrže

| Webová kalkulačka | Objem ze střechy [m ³] | Doporučená nádrž [m ³] |
|-------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Bocr.cz [94] | 31,50 | 12,915 |
| Destovka.eu [95] | 24,5 | 17,8 |
| Aliaxis [96] | 30,6 | 14,7 |

Výsledky několika online dostupných výpočtových modelů se výrazně liší, přestože pracují se stejnými vstupními daty, což pro zákazníka může být lehce matoucí.

První rozdíly ve výpočtu lze vidět již v prvním sloupci „Objem ze střechy“, kde je rozdíl 29 %. S doporučenou velikostí nádrže pak souvisí cena nádrže a cena její instalace, rozdíl je 38 %.

Nejpřesnější predikci a následné určení velikosti nádrže lze dosáhnout analýzou měřených dat přímo z místa. Do výpočtů je důležité zahrnout denní úhrny srážek, průměrnou a maximální teplotu a vlhkost vzduchu, dále pak průměrnou rychlost větru. Další zpřesnění lze získat pomocí evaporace (výpar z půdy) či transpirace (výpar z rostlin), dobou a intenzitou slunečního svitu. Nejpřesnější hodnoty lze získat pouze měřením v konkrétní lokalitě. Zohlední se zde proudění vzduchu, zastínění v průběhu roku, vlastnosti půdy a její schopnost zadržet vodu atd.

Takto konkrétní data lze získat instalováním jednotlivých měřicích modulů, které jsem v této práci vytvořil, na vhodná místa, provést dlouhodobé měření (ideálně 1 rok) a z akumulovaných dat provést analýzu. V případě, že tyto data k dispozici nejsou, lze využít 123/1998 Sb. Zákon o právu na informace o životním prostředí, kdy v souladu s ním Český hydrometeorologický ústav (dále „ČHMÚ“) zveřejňuje denní klimatologické charakteristiky naměřené na stanicích ve správě ČHMÚ za období 1996-2021. [97]

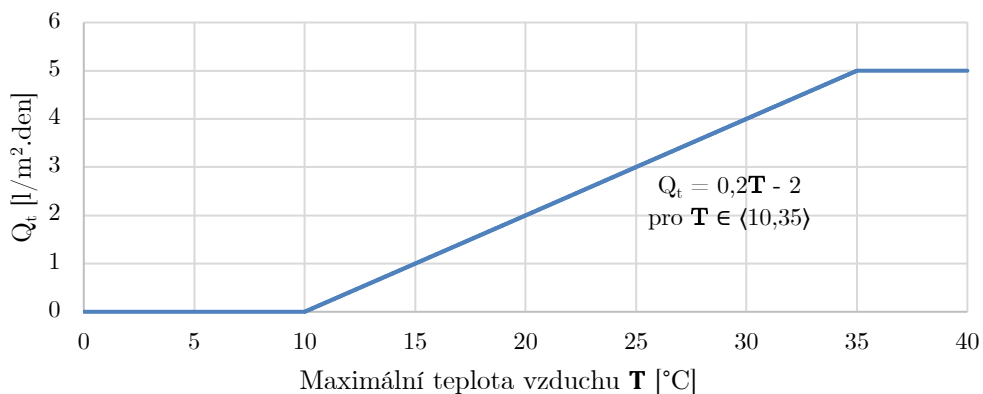
Pro ukázkou jsem se rozhodl ukázat použití dat ČHMÚ, v případě potřeby je lze dále zpřesňovat. Jako konkrétní realizaci jsem zvolil již zmíněné travnaté hřiště u základní školy ve Velkém Oseku.

Dílčím cílem výpočtu je získat denní potřebu vody na metr čtvereční travnatého povrchu,

$$Q_S = Q_t \cdot k_\phi \cdot k_v \cdot k_t \quad [l/m^2] \quad (3.1)$$

kde $Q_t [l/m^2]$ je potřeba vody dána maximální denní teplotou vzduchu, $k_\phi [-]$ je korekce na vlhkost vzduchu, $k_v [-]$ je korekce na rychlost větru a $k_t [-]$ je korekce na dobu slunečního svitu.

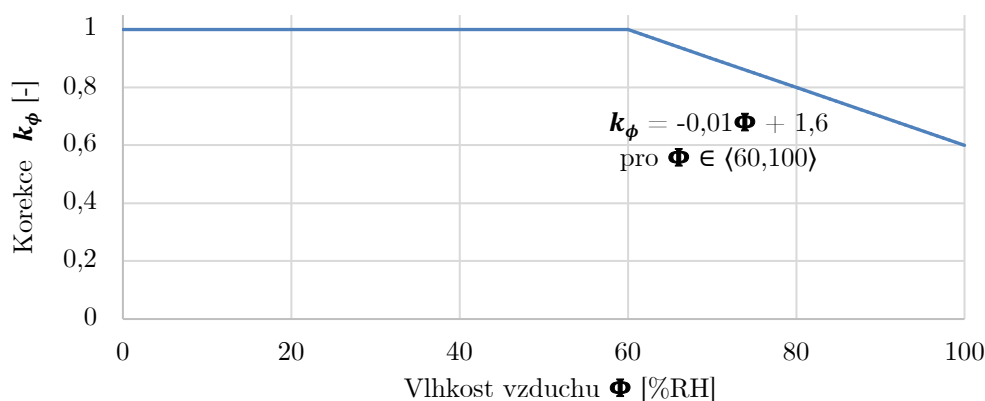
Potřeba vody dle denní teploty $Q_t [l/m^2]$ je dána normou DIN 18035-2 Sportovní hřiště – Část 2: Závlaha travníkových a mlatových ploch. [92]



Obr. 3.2.: Denní potřeba vody v závislosti na nejvyšší denní teplotě [92]

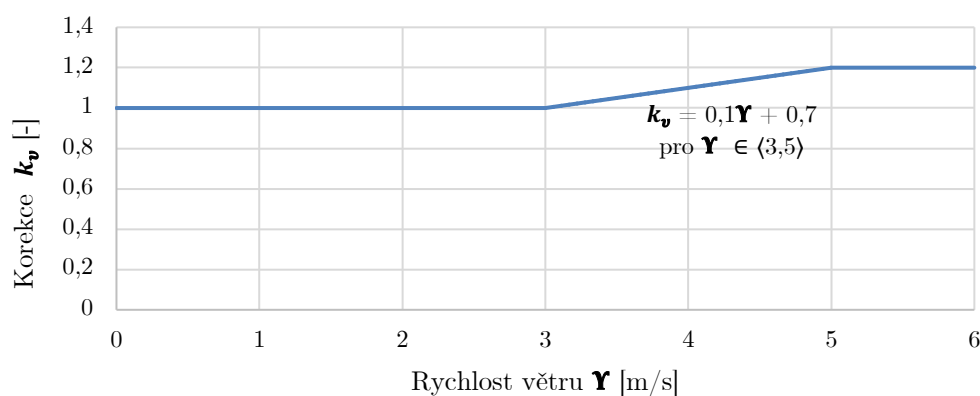
Následující korekce jsem zavedl bezrozměrné tak, aby mírně upravovaly denní potřebu vody. Průběhy jsem zvolil na základě analýzy hodnot v průběhu roku a osobní zkušenosti. Je možné je dalším výzkumem nadále zpřesňovat.

Korekce $k_\phi[-]$ upravuje denní potřebu vody tak, že s rostoucí vlhkostí dochází k menšímu odparu, tudíž nižší potřebě vody.



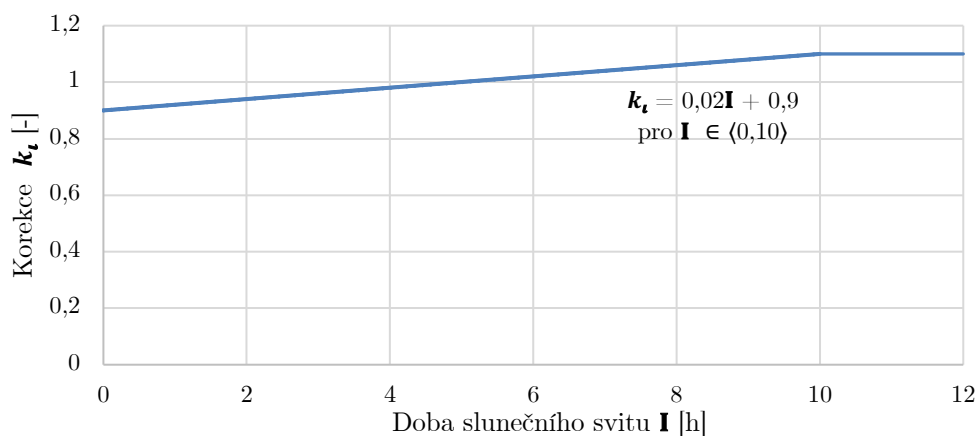
Obr. 3.3.: Graf korekce na vlhkost vzduchu

Korekce $k_v[-]$ upravuje denní potřebu vody tak, že se silnějším větrem dochází k většímu odparu, tudíž vyšší potřebě vody.



Obr. 3.4.: Graf korekce na rychlost větru

Korekce $k_i[-]$ upravuje denní potřebu vody tak, že s delší dobou slunečního svitu dochází k většímu odparu, tudíž vyšší potřebě vody.



Obr. 3.5.: Graf korekce na dobu slunečního svitu

Výsledkem je denní potřeba vody $Q_s[l/m^2]$, kterou je třeba pokrýt. Nemusí to nutně být z akumulčních nádrží, ale může pomoci dešť. Tedy výsledná potřeba $Q[l/m^2]$ je

$$Q = Q_s - S [l/m^2] \quad (3.2)$$

kde S je množství srážek s jednotkou $[mm]$, což odpovídá $[l/m^2]$.

$$[l/m^2] = [dm^3/m^2] = [0,001 m^3/m^2] = [0,001 m] = [mm] \quad (3.3)$$

Po výpočtu mohou nastat tři případy. $Q = 0$, což znamená, že potřebu vody přesně pokrýl dešť. $Q > 0$, což znamená, že dešť nebyl vůbec nebo byl nedostatečný a je třeba potřebu pokrýt z externích zdrojů. $Q < 0$, což znamená, že dešť bylo více, než je aktuální potřeba a v tomto případě není třeba zavlažovat. Pakliže by byl dešť dostatečně intenzivní může pokrýt potřebu i na několik dalších dní. Tento fakt jsem zavedl pomocí proměnné $s_p[l/m^2]$, která vyjadřuje aktuální srážky a přebytek z minulých dní $s_a[l/m^2]$, (ten má smysl započítávat jen když je větší než $1 l/m^2$). Virtuální přebytek z minulých dní nemá takovou efektivní hodnotu jako čerstvý dešť, a proto jej započítávám s poměrem 0,6. I pro velmi silné deště se ukázalo, že tento způsob saturuje přibližně pětidenní potřebu, což odpovídá skutečnosti. Přebytek z minulých dní $s_a[l/m^2]$ vyjadřuje kolik vody můžeme pro další den využít, resp. kolik zbylo po odečtení aktuální potřeby Q_{s_d} od aktuálních srážek S_d se zbytkem z minulého dne $s_{a_{d-1}}$, dohromady tedy s_{p_d} , pak platí

$$s_{p_d} = \begin{cases} S_d + 0,6 \cdot s_{a_{d-1}}, & s_{a_{d-1}} \geq 1 \\ S_d, & s_{a_{d-1}} < 1 \end{cases} \quad (3.4)$$

$$s_{a_d} = \begin{cases} s_{p_d} - Q_{s_d}, & s_{p_d} - Q_{s_d} \geq 0 \\ 0, & s_{p_d} - Q_{s_d} < 0 \end{cases} \quad (3.5)$$

kde index d označuje aktuální den a $d - 1$ označuje den předchozí. Pro započtení této korekce na srážky je vzorec 3.2. pro výslednou potřebu třeba upravit a ošetřit záporný stav, tedy

$$Q = \begin{cases} Q_{s_d} - s_{p_d}, & Q_{s_d} - s_{p_d} \geq 0 \\ 0, & Q_{s_d} - s_{p_d} < 0 \end{cases} \quad (3.6)$$

Dále jsem sestavil výpočty pro akumulční nádrž. Ta je s každým záznamem o srážkách plněna vodou o objemu, který je dán rozlohou střechy a zároveň je z ní v případě potřeby odčerpávána voda pro pokrytí denní potřeby. Dle zadaného objemu nádrže nemůže dojít k akumulování většího množství vody, i když by byla k dispozici. Zároveň pokud dojde k vyčerpání nádrží, vypočte se, kolik vody je třeba dodat z externích zdrojů.

Na základě tohoto algoritmu jsem pro dvouroční denní data (2017 - 2018) analyzoval, jaký vliv má velikost akumulční nádrže na úsporu vody.

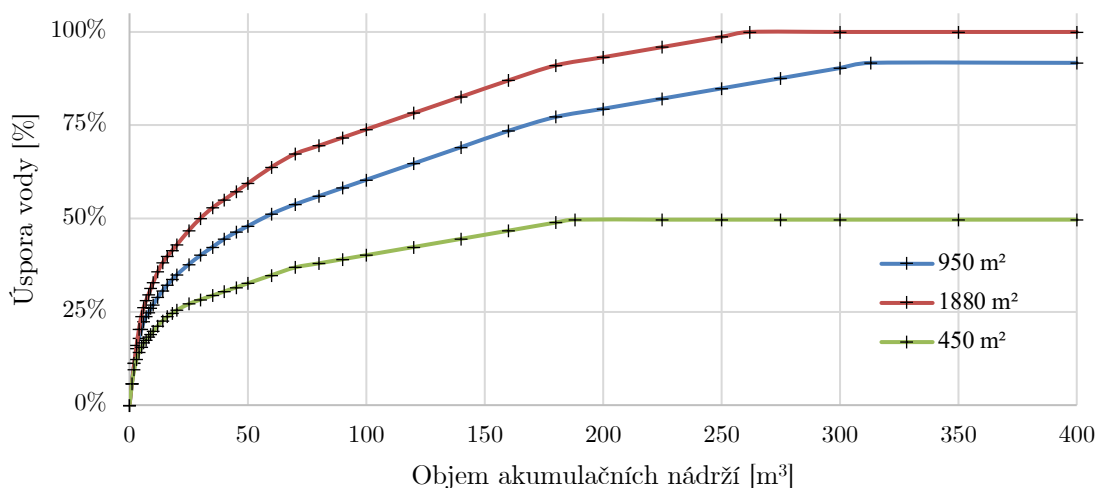
Celková roční potřeba vody pro travnaté hřiště, kterou je třeba dodat po odečtení vlivu deště je $570 m^3$. Obr. 3.6 je výsledkem analýzy předchozích definic pro simulaci s reálnými daty. Je zřejmé, že první akumulované m^3 mají nejvýraznější vliv na úsporu vody. Obdobný průběh vlivu akumulace na míru úspor je možné nalézt pro bateriová uložení fotovoltaických systémů nebo pro tloušťku zateplení u domů.

Pro střešní plochu 950 m^2 a objem nádrží 50 m^3 lze dosáhnout až 50 % úspor. Pro dosažení 75% úspory je třeba 140 m^3 nádrží a maximální úspory 92 % lze dosáhnout při 313 m^3 akumulčních nádrží.

Větší nádrž již míru úspory nezvyšuje, neboť je nedostatečný nátok ze střechy a v průběhu měsíce srpna jsou nádrže prázdné, přestože během zbytku roku dokážou akumulovat veškerou dostupnou dešťovou vodu. Pro zvýšení míry úspor je třeba zvětšit střešní plochu.

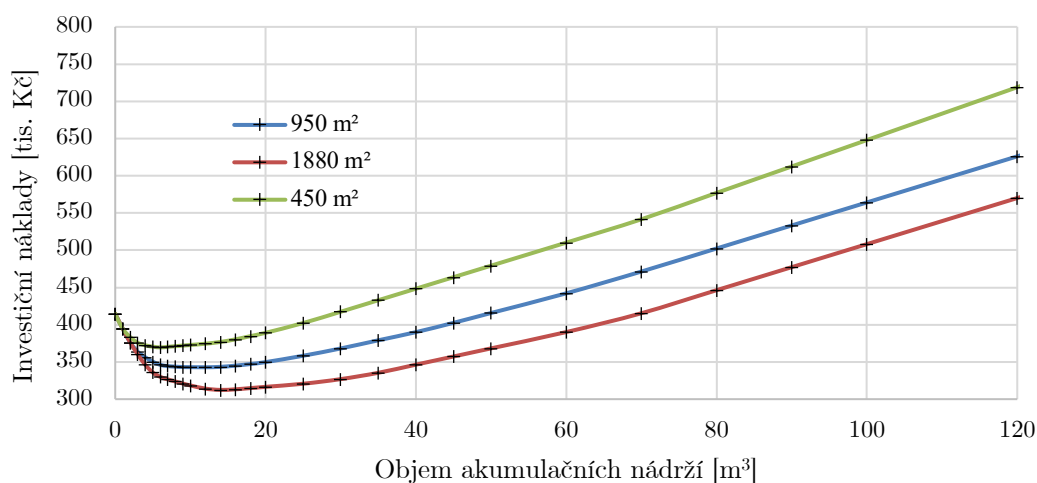
Provedl jsem analýzu pro střešní plochu 1880 m^2 a s nádrží o velikosti 262 m^3 je možné celý rok zavlažovat bez potřeby vody z externích zdrojů. V případě nádrže s objemem 50 m^3 se úspory zvýšily na 60 % a pro dosažení úspor 75 % je třeba nádrží s objemem 105 m^3 .

Pro ukázkou, jaký má vliv snížení střešní plochy na úspory vody, jsem provedl analýzu pro střešní plochu 450 m^2 . Maximálních úspor lze dosáhnout s nádrží o velikosti 188 m^3 a to 50 %.



Obr. 3.6.: Vliv objemu nádrží na možné úspory vody pro střešní plochu 950 m^2

Dalším sledovaným parametrem je ekonomická výhodnost investice. Není-li akumulované vody dostatek, je třeba ji dodat nákupem od provozovatele vodovodu. V horizontu 20 let jsem hledal optimální velikost akumulčních nádrží. Cenu vody pro průmyslové účely jsem kalkuloval $45,29 \text{ Kč/m}^3$ a cenu akumulčních nádrží 4000 Kč/m^3 . Cenový odhad je platný pro prosinec roku 2022. [98, 99]



Obr. 3.7.: Vliv objemu nádrží na celkové náklady investice

Tab. 3.2.: Optimální velikost nádrže s ohledem na odvodněnou plochu

| Odvodněná plocha [m ²] | Objem nádrže [m ³] | Cena investice [tis. Kč] | Míra úspor vody [%] |
|---------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|------------------------|
| 450 | 6 | 370 | 16,7 |
| 950 | 12 | 343 | 28,9 |
| 1880 | 14 | 312 | 38,2 |

Dle Tab. 3.2 je zřejmé, že s rostoucí odvodněnou plochou střechy dochází k větším úsporám vody a cena celkové investice (zahrnující instalaci nádrže a cenu spotřebované vody za 20 let provozu) klesá, a to i přes rostoucí objem akumulací nádrže. Pouze roste cena vstupní investice, která souvisí s náklady na pořízení větších nádrží a odvodnění větší plochy střech.

Stále však do hry vstupuje možnost omezení používání vody pro závlivku vydané obcemi v obdobích sucha. V tomto případě i přes volné finanční prostředky na nákup vody nemusí být možné zavlažování z vodovodu realizovat a jediným zdrojem tak bude voda akumulovaná v zásobnících.

3.3. KONKRÉTNÍ ŘEŠENÍ

Pro lepší představu uvedu typický návrh pro čtyři různé, avšak konkrétní instalace. Pro dvě z nich jsem systém přímo vyvinul, další dvě jsou vzorové instalace, kde by bylo možné systém použít.

3.3.1. ZÁKLADNÍ ŠKOLA VELKÝ OSEK

Základní školu ve Velkém Oseku jsem vybral jako modelový případ zavlažování travnatého hřiště. Pozemek je tvořen rozsáhlou školou a zahradou určenou k závlaze o celkové rozloze přes 1 500 m². Plocha střech využitelná pro sběr dešťové vody je 950 m², v případě potřeby je možné ji rozšířit dalších 930 m² přístavby (celkem 1 880 m²). Hlavním požadavkem je závlaha multifunkčního hřiště. Vedle budovy školy je prostor k instalaci až 400 m³ nádrží. Hřiště se aktivně používá po celý rok. Závlahu v tomto případě navrhuji sprinklerovou z ekonomických důvodů.

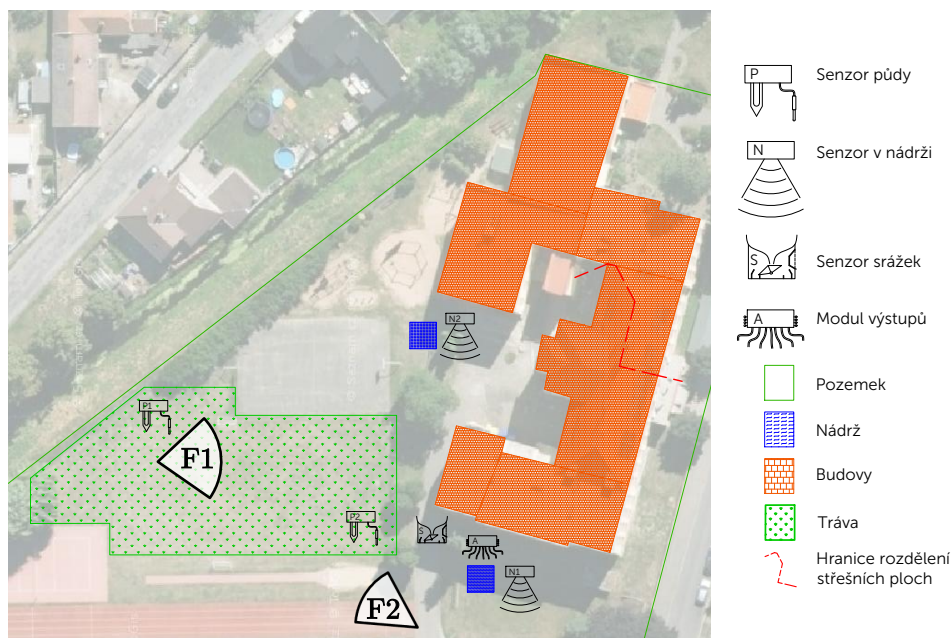


Obr. 3.8.: Travnaté hřiště základní školy, pohled F1 a F2

Dle předchozí analýzy, (Obr. 3.6, Obr. 3.7 a Tab. 3.2), která má stejné parametry jako tento projekt, bych doporučil instalaci dvojice nádrží s celkovým objemem minimálně 14 m³ (Úspora 38 %/Investice 312 tis. Kč), lépe však 30 m³ (Ú 50 %/I 327 tis. Kč) nebo 70 m³ (Ú 67 %/I 415 tis. Kč), což odpovídá stejné

částce, v případě zavlažování pouze z vodovodu – nádrž 0 m³ (Ú 0 %/I 415 tis. Kč). Rozdělení na dvě nádrže navrhuji, protože se jedná o rozsáhlou střešní plochu a spádování odpadního potrubí do jednoho místa by bylo problematické.

Do plochy hřiště jsem navrhl dvojici půdních senzorů na opačných stranách hřiště. Do nádrží s objemem 2x7/2x35 m³ (dle možností investora) navrhuji umístit 2 senzory hladiny.



Obr. 3.9.: Situační výkres a legenda základní škola Velký Osek – MZS-S-101, včetně pohledů F1 a F2

3.3.2. VELKÝ OSEK

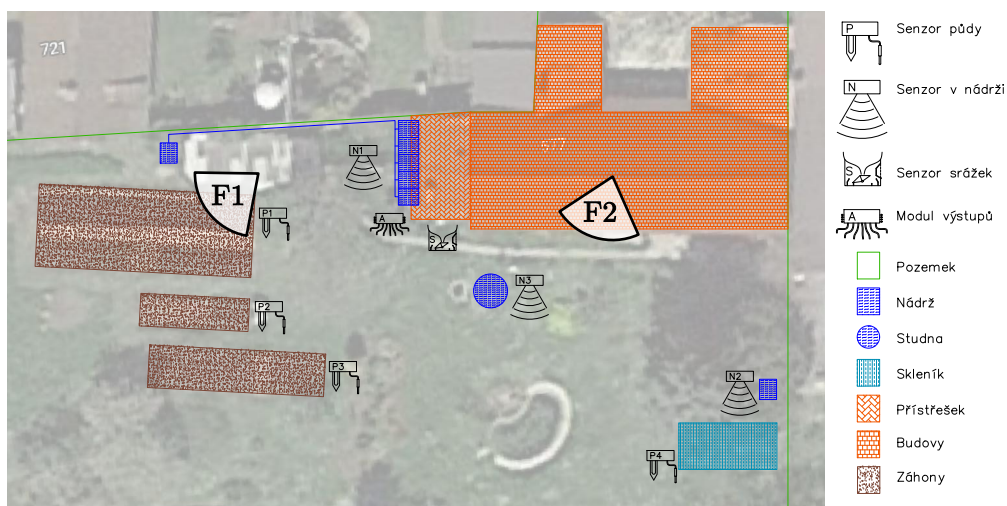
Velký Osek je mým domovem, a právě zde jsem se rozhodl systém testovat a využívat. Pozemek je tvořen dvěma stávajícími domy a zahradou o celkové rozloze přes 1 800 m². Hlavním požadavkem je závlaha zeleninové zahrady, která sestává ze záhonů a skleníku. Je zde instalována nádrž na 6 m³ rozdělena na 5 m³ pod střechou a 1 m³ u záhonů (z prostorových důvodů), dále je u skleníku umístěna samostatná nádrž s objemem 1 m³. Součástí zahrady je i studna s pitnou vodou, kterou lze využít v případě akutního nedostatku vody. Zahrada se aktivně pro pěstování používá od března do listopadu. Přebytky vody lze odvádět k ovocným stromům nebo drenážním systémem zasakovat pod záhony. Závlaha je povrchová kapková.

Řídicí algoritmus zajišťuje závlahu několika okruhů záhonů, převážně s rajčaty, bazalkou, mrkví a paprikami. Dále je zavlažován skleník s paprikami a sadbou. Dešťová voda je sbírána ze střechy o celkové ploše 100 m².

V každém záhonu včetně skleníku jsou umístěny senzory vlhkosti, každý záhon má vlastní okruh závlahy. Ve spojených nádržích s objemem 6 m³ je umístěn senzor hladiny, stejně tak v nádrži u skleníku, kterou je možno plnit automaticky čerpadlem ze spojených nádrží. Třetí senzor hladiny je umístěn ve studni, z které lze v případě potřeby vody čerpadlem do akumulčních nádrží doplnit.



Obr. 3.10.: Zeleninový záhon a zahrada ve Velkém Oseku, pohled F1 a F2



Obr. 3.11.: Situační výkres a legenda Velký Osek – VO-S-101, včetně pohledů F1 a F2

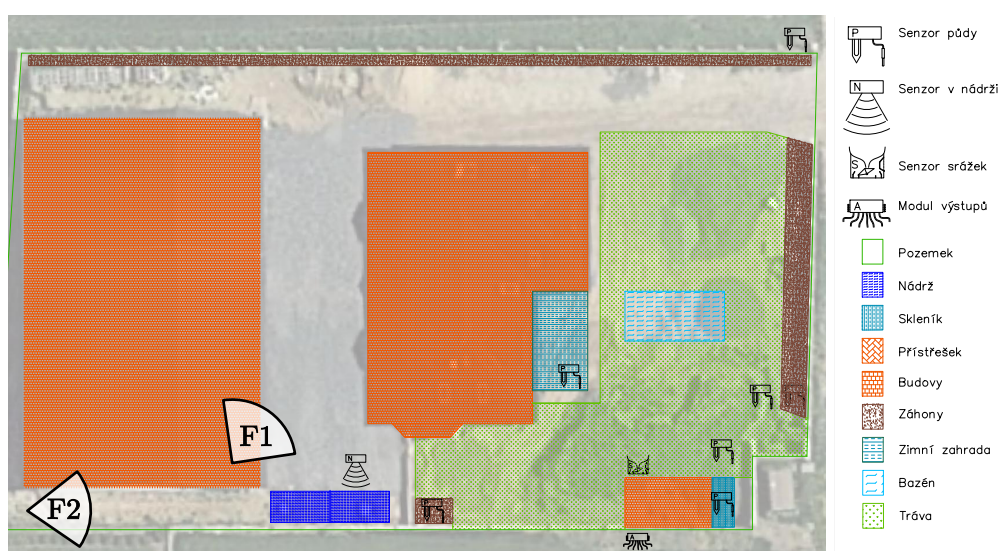
3.3.3. ČERVENÉ PEČKY

Projekt v Červených Pečkách představuje novostavbu. Jedná se o komplex rodinného domu s firemním skladem, zahradou, okrasnými záhony, malým skleníkem a zimní zahradou. Celková rozloha je 2400 m², plocha střech využitá pro sběr dešťové vody je 480 m² a plocha určená k závlaze je přibližně 500 m². Hlavním požadavkem je závlaha trávy a okrasných záhonů. Je zde instalována nádrž na 24 m³. Přebytky vody se odvádí drenážním systémem a zasakují na pozemku v prostoru za skladem. Závlaha záhonů je povrchová kapková, závlaha trávy pomocí sprinklerů.

V každém záhonu včetně skleníku a zimní zahrady jsou umístěny senzory vlhkosti, stejně tak v travnatých plochách. Každý záhon má vlastní okruh závlahy, okruh trávy je společný pro celou plochu. V akumulční nádrži je umístěn senzor hladiny.



Obr. 3.12.: Stavba v Červených Pečkách a drenážní systém, pohled F1 a F2



Obr. 3.13.: Situační výkres a legenda Červené Pečky – CP-S-101, včetně pohledů F1 a F2

3.3.4. FIRSTLIFE

FIRSTLIFE je soutěžní projekt studentů ČVUT, v rámci mezinárodní soutěže Solar Decathlon, jehož cílem je navrhnout, postavit a provozovat inovativní dům. Ročník 2022 byl zaměřen na udržitelnou výstavbu a řešení zvýšení ubytovací kapacity měst a to přístavbou, vestavbou do proluky nebo nástavbou. Právě nástavbu si vybrali studenti ČVUT a vypracovali projekt rozšíření studentských kolejí Na Větrníku. V týmu jsem působil od října 2021 jako elektrikář a mimo návrhu elektroinstalace, fotovoltaiky a řízení objektu jsem vypracoval i návrh zavlažování zelené plochy na střeše včetně rostlin na atikách.

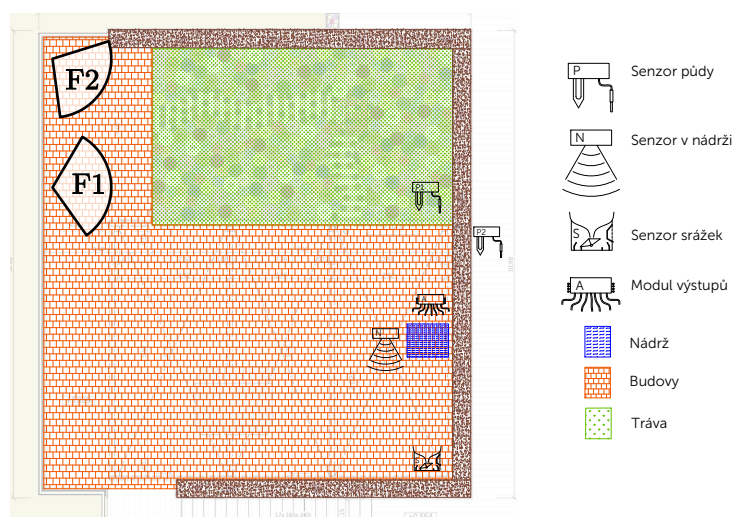
Během jara 2022 jsme dům postavili na Univerzitním centru energeticky efektivních budov v Buštěhradu a v květnu ho rozebrali a odvezli na kamionech do německého Wuppertalu, kde jsme ho znovu postavili, zprovoznili a soutěžili se 17 týmy z Evropy a Asie.



Obr. 3.14.: Demonstrační jednotka, týmová fotka, zelená střecha, rostliny na atice, pohled F1 a F2

Plocha střech využitá pro sběr dešťové vody je 110 m² a plocha určená k závlaze je přibližně 36 m². Hlavním požadavkem je závlaha zelené střešní plochy a okrasných rostlin na atice. Je zde instalována nádrž na 0,2 m³. Závlaha je povrchová kapková.

V zelené ploše a u rostlin na atice je umístěn senzor vlhkosti. V akumulční nádrži je umístěn senzor hladiny. Na pergole je umístěn srážkoměr a anemometr.



Obr. 3.15.: Situační výkres a legenda FIRSTLIFE – FL-S-101, včetně pohledů F1 a F2

4. NÁVRH MODULŮ

Vzhledem k tomu, že jednotlivé moduly jsou určeny pro použití ve venkovním prostředí a cílem je, aby žádný z modulů nebylo nutné přes zimu odpojovat nebo uklízet, je při návrhu nutné tyto okolnosti zohlednit. Základním požadavkem je odolnost proti stříkající vodě. To je zabezpečeno profilovaným okrajem, který je možné opatřit gumovým těsněním mezi částmi krytů modulů. Prostupy kabelů jsou opatřeny gumovou kabelovou průchodkou s vhodným průměrem. Odolnost proti UV záření je zajištěna použitím UV stabilních materiálů. Pro 3D tištěné kryty jsem zvolil filament ASA. Dále jsem při výběru každé použité součástky kontroloval její doporučenou provozní teplotu, případně volil součástky, které mají pracovní rozsah minimálně od $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

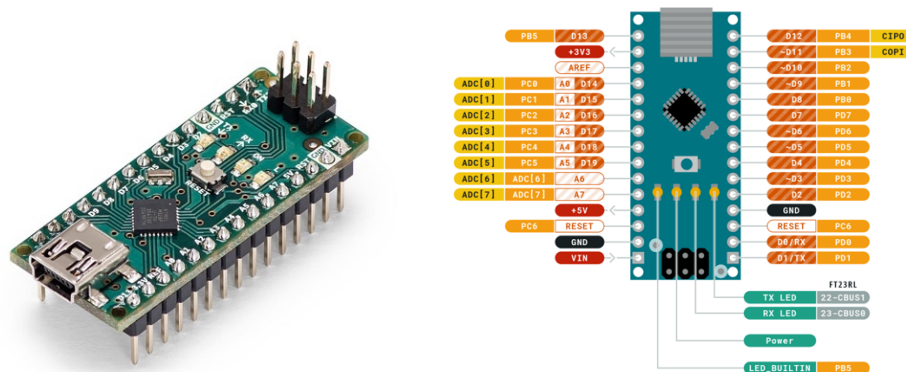
Jednotlivé moduly jsou napájeny prostřednictvím přívodního kabelu, který slouží jak pro komunikaci, tak pro napájení. Zvolil jsem kabel typu UTP, vzhledem k příznivé ceně i požadavkům na kroucený dvou pár pro komunikační rozhraní. Vzhledem k tomuto rozhodnutí jsem dbal i na elektrickou spotřebu jednotlivých modulů, aby nedocházelo ke zbytečným úbytkům na sběrnici.

Senzory u všech měřicích modulů jsou připojeny prostřednictvím svorkovnic či konektorů. V případě poruchy nebo poškození je lze jednoduše vyměnit. Stejným způsobem lze vyměnit řídicí procesorovou desku, která je připojena přes řadové konektory.

4.1. ŘÍDICÍ DESKA

Hlavním požadavkem na řídicí desku jednotlivých modulů byla její univerzálnost, snadná výměna, cenová dostupnost, dostatečný počet vstupů a výstupů, snadné programování chipu a široká komunita programátorů.

Z tohoto důvodu jsem zvolil desku Arduino, konkrétně modul Arduino NANO s procesorem ATmega 328. Tato deska je relativně malá a poskytuje dostatečný výpočetní výkon pro spolehlivou funkci. Zároveň se cena této desky pohybuje okolo 100 Kč. Umožňuje to rychlejší odladění programu a snazší připojení. Její rozměry jsou $18 \times 45\text{ mm}$.



Obr. 4.1.: Foto desky Arduino NANO a pinout diagram [100]

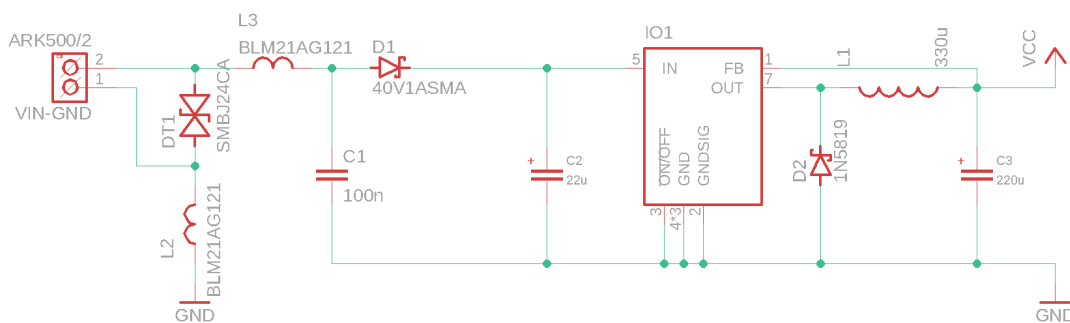
Rozsah vstupního napájení je 5 – 12 V. Frekvence taktu procesoru je 16 MHz. Velikost dostupné flash paměti je 30 KB, velikost EEPROM je 1 KB a velikost SRAM je 2 KB. Deska má 22 digitálních vstupně-výstupních pinů. Šest z nich má možnost výstupu signálem PWM. Dále pak 8 výstupních analogových pinů. Maximální proud pinem je 40 mA.

Deska má vyvedenou dvojici pinů TX a RX pro sériovou komunikaci UART používající TTL logiku. Pomocí dalších pinů je možné komunikovat prostřednictvím SPI synchronního sériového datového protokolu. Další komunikační rozhraní je I²C (TWI) vyvedeno pomocí dvojice pinů. [100]

4.2. NAPÁJECÍ OBVOD

Hlavním cílem napájecího obvodu je bezpečně stabilizovat napětí za účelem napájení modulu. Přívodní kabel typu UTP bude přenášet signál komunikačního protokolu MODBUS a zároveň zde budou zdvojené kabely pro přívod napájecího napětí. Zvolil jsem výrazně vyšší napětí, nežli je standartní napětí pro řídicí desku Arduino. Cílem bylo zabezpečit menší úbytky napětí a zachovat dostatečně velkou napěťovou rezervu, aby pro stabilizaci stačilo použít stabilizátor typu buck. Na vstupu obvodu je ochranný transil s feritovou perlou proti zemi a další v sérii. Toto zapojení chrání proti naindukovaným napěťovým špičkám. Dále pak Schottkyho dioda a příslušné kondenzátory, které zprostředkovávají ochranu proti přepólování.

Jako stabilizátor jsem zvolil obvod LM2574 s výstupním proudem 0,5 A a napětím 5 V. Jedná se o impulzní stabilizátor a ztráty na něm jsou oproti lineárním stabilizátorům výrazně nižší. Tento stabilizátor je zapojen dle doporučení výrobce v obvodu se stabilním výstupním napětím.

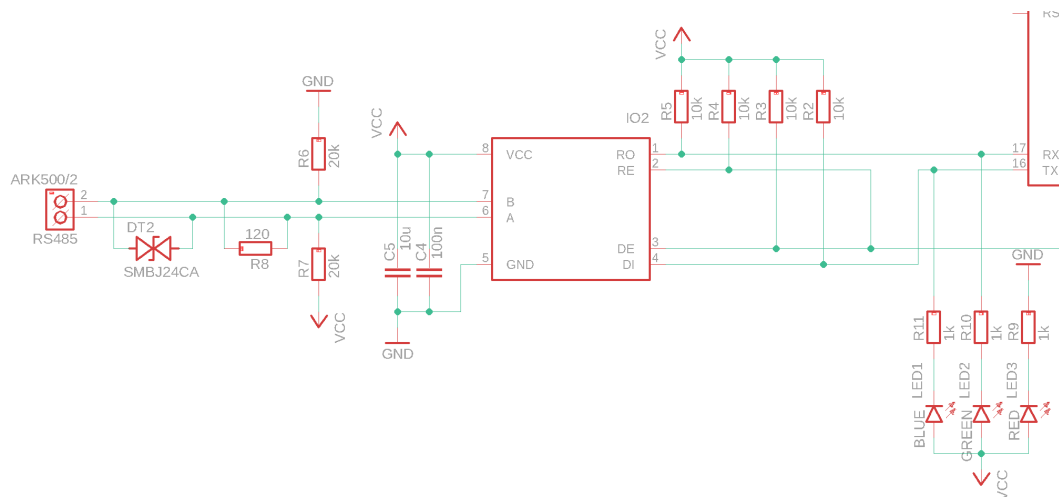


Obr. 4.2.: Schéma zapojení stabilizátoru napětí

- C1 – Keramický kondenzátor, 100 nF/100 V, 1206
- C2 – Elektrolytický kondenzátor, 22 uF/100 V, 6,3 x 11 mm, RM = 2,5 mm
- C3 – Elektrolytický kondenzátor, 220 uF/25 V, 6,3 x 11 mm, RM = 2,5 mm
- D1 – Schottkyho dioda, 40 V/1 A, SMA
- D2 – Schottkyho dioda 1N5819, 40 V/1 A, DO41
- DT1 – Bipolární transil, 28,1 V/600 W, SMB
- IO1 – Spínaný regulátor napětí LM2574N-5, 5 V/0,5 A, DIP8
- L1 – Tlumivka radiální, 330 uH/500 mA, 8,5 x 14 mm, RM = 5 mm

4.3. KOMUNIKAČNÍ OBVOD

Komunikační obvod převádí signál mezi napěťovou úrovní TTL, kterou na svých výstupech Tx a Rx používá Arduino, a úrovní sběrnice RS-485. Jako obvod jsem zvolil MAX485, který je pro tyto aplikace určen a zapojil jsem ho dle doporučení výrobce. Mimo standardní zapojení jsem doplnil transil mezi komunikačními vodiči A a B, který má za cíl zvýšit odolnost proti naindukovaným napěťovým špičkám. Na straně TTL logiky jsem piny Rx a Tx doplnil o dvojici LED, které vizualizují probíhající komunikaci.



Obr. 4.3.: Schéma zapojení komunikačního obvodu

C4 – Keramický kondenzátor, 100 nF/100 V, 1206

C5 – Keramický kondenzátor, 10 uF/16 V, 1206

DT2 – Bipolární transil, 6,8 V/600 W, SMB

IO2 – Převodník MAX485, SO8

R2, R3, R4, R5 – Rezistor, 10 k Ω , 1206

R6, R7 – Rezistor, 20 k Ω , 1206

R8 – Rezistor, 120 Ω , 1206

R9, R10, R11 – Rezistor, 1 k Ω , 1206

LED1 – LED, modrá/120 mcd, 1206

LED2 – LED, zelená/360 mcd, 1206

LED3 – LED, červená/115 mcd, 1206

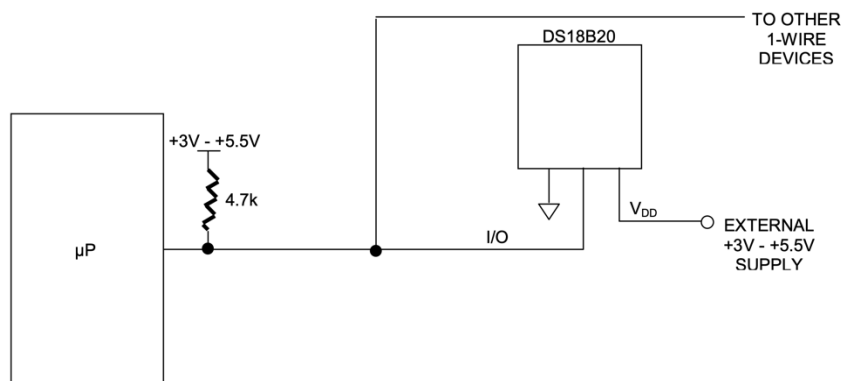
4.4. ZAPOJENÍ POUŽITÝCH SENZORŮ

V této práci používám několik senzorů, které jsou vyčítány deskou Arduino NANO. Protože se některé senzory vyskytují ve více měřicích modulech, uvádím níže vzorové zapojení jednotlivých senzorů, včetně dohledaných parametrů a způsobu vyčítání měřené hodnoty.

4.4.1. VODOTĚSNÝ TEPLOMĚŘ DS18B20

Senzor DS18B20 komunikuje s řídicím obvodem pomocí jednoho vodiče. Napájecí napětí je v rozsahu 3,0 – 5,5 V. Měří v rozsahu -55°C až +125°C. Přesnost je

uváděna $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ v rozsahu -10°C až $+85^{\circ}\text{C}$. Senzor používá přímý převod teploty na digitální signál. Rozlišení senzoru je nastavitelné od 9 do 12 bitů. [101]



Obr. 4.4.: Schéma zapojení senzoru DS18B20 [101]

Komunikace s Arduino NANO probíhá za pomoci dvou knihoven OneWire a DallasTemperature. Jako první se vytvoří instance OneWire pro komunikaci s OneWire zařízeními a dále se pomocí knihovny DallasTemperature vytvoří reference. Poté je zahájena komunikace, vyšle se požadavek na výčet senzoru a teplota se vypíše.

```

OneWire oneWire(NumberOfDigitalPinOnArduino);
DallasTemperature sensors(&oneWire);

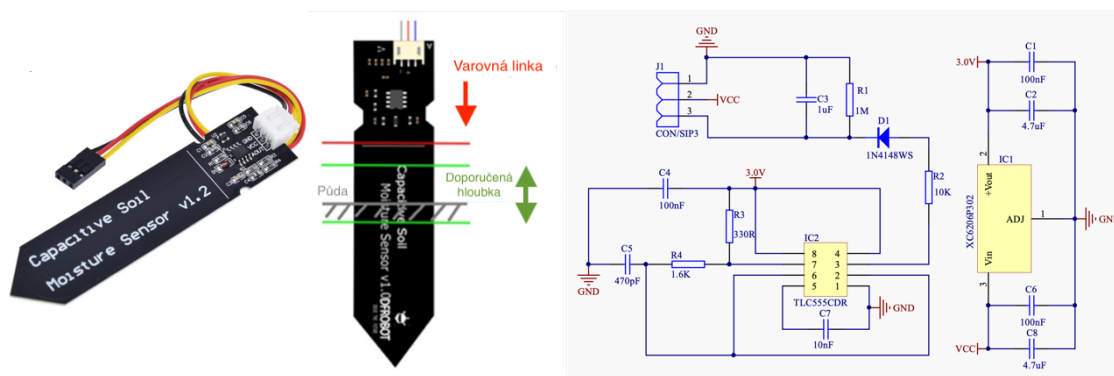
sensors.begin(); //Start up the library

sensors.requestTemperatures(); //Send the command to get temperatures
sensors.getTempCByIndex(0); //Temperature in Celsius

```

4.4.2. KAPACITNÍ SENZOR VLHKOSTI SKU:SEN0193

Senzor SKU:SEN0193 je kapacitní senzor vlhkosti půdy s analogovým napěťovým výstupem v rozsahu 0,0 V až 3,0 V. Napájecí napětí je v rozsahu 3,3 – 5,5 V. Spotřeba je uváděna 15 mA. Senzor se připojuje žlutým vodičem na analogový napěťový vstup desky Arduino NANO. [102]



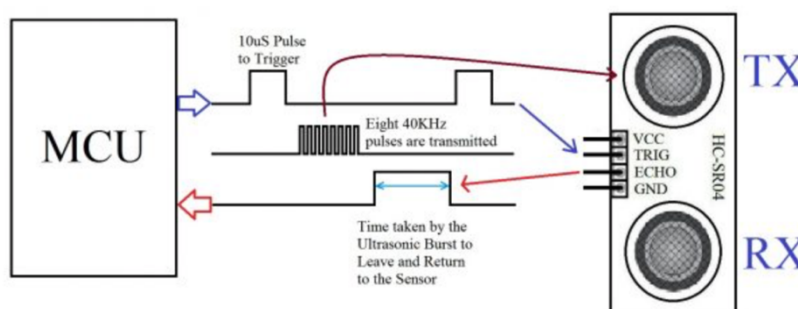
Obr. 4.5.: (Zleva) senzor SKU:SEB0193 s připojovacím kabelem, doporučená hloubka umístění senzoru, vnitřní schématické zapojení senzoru [102, 103]

Komunikace s Arduino NANO probíhá výčtem vstupní analogové hodnoty. Dále je třeba programově vyřešit kalibraci, ta se provádí porovnáním s výsledky gravimetrické hodnoty. Pro získání procentuální vlhkosti, se zanesou do programu hodnoty, kterou senzor měřil pro suchou půdu a pro vodou nasycenou půdu. Poté se hodnota analogového signálu namapuje v předem daném rozmezí na hodnoty od 0 % (suchá půda) do 100 % (nasycená půda). [103]

```
soilMoistureValue = analogRead(NumberOfDigitalPinOnArduino);
soilmoisturepercent = map(soilMoistureValue, DryValue, WetValue, 0, 100);
```

4.4.3. ULTRAZVUKOVÝ SENZOR VZDÁLENOSTI HC-SR04

Senzor vzdálenosti HC-SR04 funguje na ultrazvukovém principu a umožňuje měření v rozsahu 2 – 400 cm s přesností ± 3 mm. Napájecí napětí je 5 V, spotřeba 40 mA. Měřicí úhel je 15° . Po přijetí signálu na pinu Trigger modul odešle ultrazvukový signál. Při přijetí odraženého signálu dojde k nárůstu napětí na pinu Echo. Měření času a následný výpočet vzdálenosti zařizuje řídicí systém, ke kterému je senzor připojen. [104]



Obr. 4.6.: Zapojení senzoru HC-SR04 a časový diagram [105]

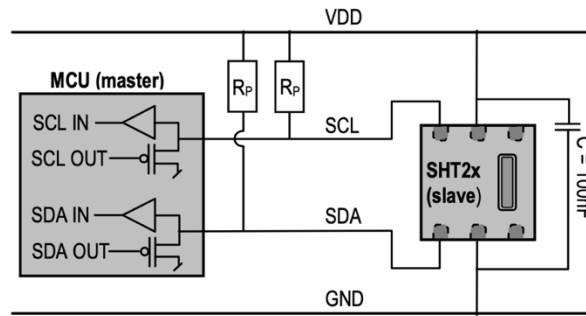
```
digitalWrite(trigPin, HIGH); //trigPin HIGH for 10 microseconds
delayMicroseconds(10);
digitalWrite(trigPin, LOW);

//Reads the echoPin, returns the sound wave travel time in microseconds
duration = pulseIn(echoPin, HIGH);

distance = duration*0.034/2; //Calculating the distance in cm
```

4.4.4. SENZOR TEPLoty A VLHKOSTI SHT21

Kombinovaný senzor teploty a vlhkosti vzduchu SHT21 má rozměry 3x3 mm. Senzor vlhkosti je na kapacitním principu a senzor teploty je polovodičový s PN přechodem. Ten měří v rozsahu -40°C až $+125^\circ\text{C}$ s typickou přesností $0,3^\circ\text{C}$. Vlhkost je měřena v rozsahu 0-100% RH s přesností 2% RH. Napájecí napětí je v rozsahu 2,6 – 3,6 V a spotřeba 0,3 mA. Rozlišení senzorů je 12bitové, což odpovídá $0,04^\circ\text{C}$ a 0,04% RH. [106]



Obr. 4.7.: Schéma zapojení senzoru SHT21 [106]

Pro komunikaci senzor používá I²C rozhraní. Tedy mimo napájení vyžaduje připojení pinů SDA a SCL na stejně označené piny na desce Arduino NANO. Při programovém vyčítání senzoru se nejprve vytvoří instance senzoru, poté je zahájena komunikace a vyšle se požadavek na výčet senzoru. Senzor po měření odešle hodnoty o teplotě a vlhkosti. [106]

```
SHT2x sht;
sht.begin(); //Start up the library

sht.read(); //Send the command to get data
sht.getTemperature() //Temperature in Celsius
sht.getHumidity() //Humidity in %RH
```

4.4.5. MAGNETICKÝ SENZOR POLOHY MC-38

Jedná se o párový senzor s magnetem a detektorem přiblížení. Běžně se používá v zabezpečovací technice na dveřích a oknech. Senzor je navržen jako NO, tedy při přiblížení magnetu a senzoru dojde k sepnutí. Maximální proud senzorem je 100 mA, dovolené napětí až 200 VDC a maximální dovolený příkon 3 W. [107]

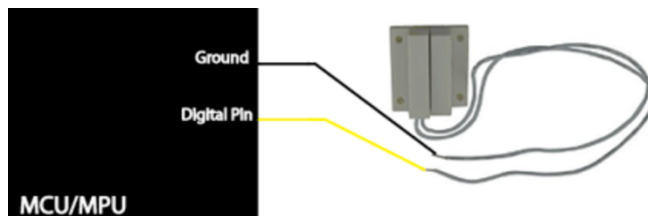
Na senzoru jsem provedl vlastní měření. Odpor sepnutého kontaktu je 0,6 Ω, pro rozepnutý stav je odpor >20 MΩ. Dále jsem provedl měření pro různé polohy a vzdálenosti, kdy dochází k sepnutí a rozepnutí.

Tab. 4.1.: Výsledky měření spínání magnetického senzoru MC-38

| Pozice | Nákres | Sepnutí [mm] | Rozepnutí [mm] | Hystereze [mm] |
|--------|--------|--------------|----------------|----------------|
| 1 | | 8,5 | 13,5 | 5 |
| 2 | | 10 | 14,5 | 4,5 |
| 3 | | 4,5 | 9,5 | 5 |
| 4 | | 7,5 | 11,5 | 4 |

Tento senzor jsem použil pro detekování překlopení člunkového senzoru srážek. Konkrétně jsem zvolil variantu 4, která má nejmenší hysterezi a zároveň vhodný rozsah spínání pro geometrii člunkového mechanismu.

Vyčítání a vyhodnocení signálu se provádí připojením senzoru k digitálnímu vstupnímu pinu.

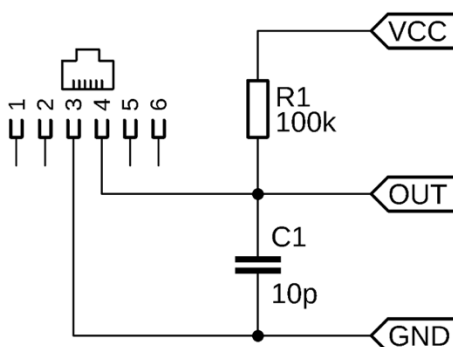


Obr. 4.8.: Schéma zapojení senzoru MC-38 [107]

```
bool MagnetState = digitalRead(magnet_switch_pin);
```

4.4.6. SENZOR RYCHLOSTI VĚTRU WH-SP-WS01

Tento typ anemometru obsahuje magnetický jazýčkový kontakt, kde převodní konstanta je 1 impulz = 0,33 m/s. Čidlo je opatřeno konektorem RJ11 na kabelu o délce cca 40 cm. Je zapojen pomocí dvojice vodičů doplněných o odpor a kondenzátor. [73]



Obr. 4.9.: Schéma zapojení senzoru WH-SP-WS01 [73]

```
bool WindPulse = digitalRead(wind_switch_pin);
```

4.5. PŮDNÍ SENZOROVÝ MODUL

Základní modul, který slouží k měření vlhkosti a teploty půdy je půdní sensorový modul. V návrhu sensorového systému pro různé lokace je vhodné zvolit nejméně jeden kus půdního sensorového modulu do zavlažovacího sektoru. Cílem řídicího systému je udržovat optimální úroveň vlhkosti pro daný sektor. Optimální úroveň závisí na rostlinách, které v sektoru rostou, jejich aktuální růstové fázi i ročním období.

4.5.1. POPIS FUNKCE

Senzorový modul obsahuje dvojici senzorů. První je voděodolný teplotního senzor DS18B20, který se umísťuje do půdy. Doporučená hloubka se liší dle typu rostlin, pro trávu 5 cm, pro zeleninu 5-10 cm, pro stromy a keře 10-15 cm. Druhý senzor je SKU:SEN0193, který je třeba pro danou půdu kalibrovat pomocí gravimetrické metody. [103, 108]

Půdní sensorový modul má data uložena v holding registrech. Svoje měření aktualizuje automaticky každou minutu, nebo po zápisu do určeného registru MeasureNow provede okamžitou aktualizaci. Automatické měření lze libovolně zapínat či vypínat zápisem do registru AutoMeasure. Vypnutí tohoto režimu vede ke snížení spotřeby modulu. Dále má senzor viditelnou LED diodu, která slouží pro lokalizaci senzoru a interakci s uživatelem. Lze jí rozsvítit zápisem do registru LedDiod.

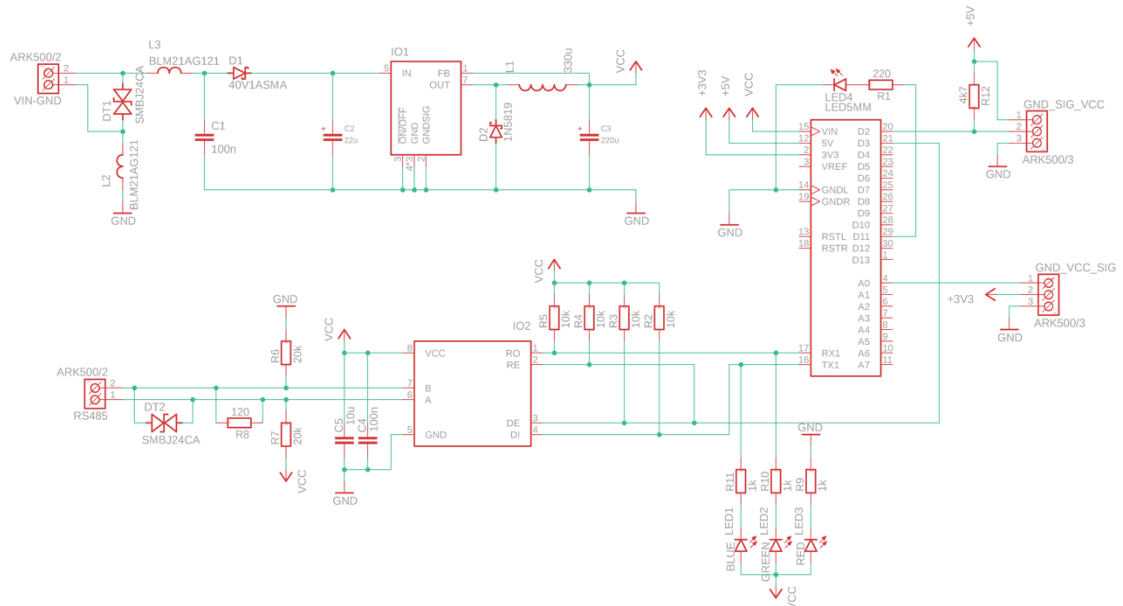
Tab. 4.2.: Popis registrů půdního sensorového modulu

| Holding reg. Adresa | Jednotka | Název | Obsah/Popis |
|------------------------|----------|-------------|--|
| 0 | 0,01°C | Temperature | Teplota půdy v setinách °C |
| 1 | 0,1%RH | Humidity | Vlhkost v rozsahu 0-99,9% RH |
| 100 | - | DryValue | Hodnota pro kalibraci Suchá Půda |
| 101 | - | WetValue | Hodnota pro kalibraci Nasycená Půda |
| 200 | - | AutoMeasure | Automatické měření 1 min 0 – vypnuto, 1 – zapnuto |
| 201 | - | MeasureNow | Aktualizuje měření zápisem hodnoty 1 |
| 300 | - | LedDiod | PWM rozsvícení diody zápisem hodnoty 1-255 |

4.5.2. SCHÉMA ZAPOJENÍ

Schéma na straně senzorů vychází ze zapojení doporučených výrobcem. Sensory jsou připojeny do šroubovacích svorkovnic na desce modulu. Modul obsahuje stabilizátor napětí, obvod pro komunikaci na sběrnici RS-485 a příslušné ochrany. Modul pracuje v režimu Slave. Po dotazu od Mastera dojde k přepnutí do vysílacího režimu pomocí výstupního pinu desky Arduino NANO. Digitální teploměr DS18B20

komunikuje po sběrnici OneWire a kapacitní vlhkoměr SKU:SEN0193 je vyčítán analogovým vstupem desky Arduino NANO. Led dioda pro lokalizaci modulu je ovládána analogovým výstupním pinem a lze ji plynule stmívat.

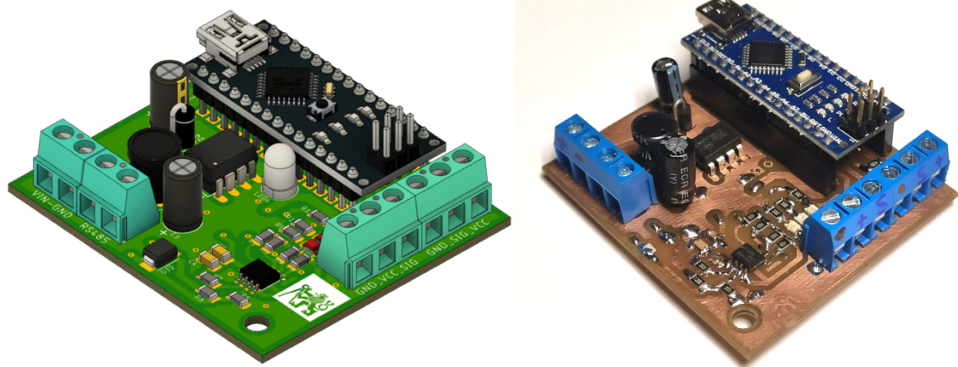


Obr. 4.10.: Schéma zapojení půdního sensorového modulu

- | | |
|--|--|
| <p>C1 – Keramický kondenzátor, 100 nF/100 V, 1206 C2 – Elektrolytický kondenzátor, 22 uF/100 V, 6,3 x 11 mm, RM = 2,5 mm C3 – Elektrolytický kondenzátor, 220 uF/25 V, 6,3 x 11 mm, RM = 2,5 mm C4 – Keramický kondenzátor, 100 nF/100 V, 1206 C5 – Keramický kondenzátor, 10 uF/16 V, 1206 D1 – Schottkyho dioda, 40 V/1 A, SMA D2 – Schottkyho dioda 1N5819, 40 V/1 A, DO41 DT1 – Bipolární transil, 28,1 V/600 W, SMB DT2 – Bipolární transil, 6,8 V/600 W, SMB IO1 – Spínaný regulátor napětí LM2574N-5, 5 V/0,5 A, DIP8 IO2 – Převodník MAX485, SOS</p> | <p>L1 – Tlumivka radiální, 330 uH/500 mA, 8,5 x 14 mm, RM = 5 mm R1 – Rezistor, 220 Ω, 1206 R2, R3, R4, R5 – Rezistor, 10 kΩ, 1206 R6, R7 – Rezistor, 20 kΩ, 1206 R8 – Rezistor, 120 Ω, 1206 R9, R10, R11 – Rezistor, 1 kΩ, 1206 R12 – Rezistor, 4,7 kΩ, 1206 LED1 – LED, modrá/120 mcd, 1206 LED2 – LED, zelená/360 mcd, 1206 LED3 – LED, červená/115 mcd, 1206 LED4 – LED, červená/115 mcd, 5 mm</p> |
|--|--|

4.5.3. DESKA PLOŠNÉHO SPOJE

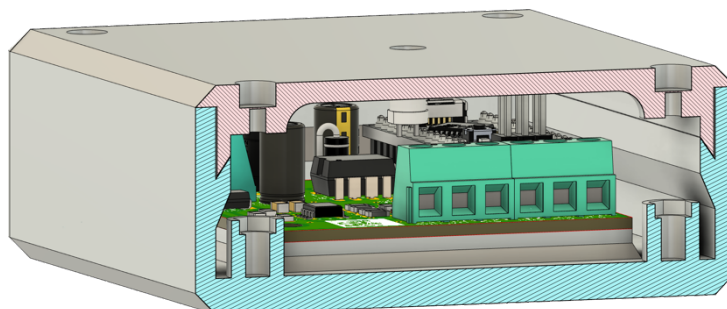
Výsledný rozměr desky je 60 x 54 mm. Na delší straně deska obsahuje čtyřpinovou svorkovnici pro připojení napájení a vodičů RS-485. Na kratší straně jsou umístěny dvě třípinové svorkovnice. Jedna je určena pro připojení teplotního senzoru a druhá pro připojení senzoru vlhkosti půdy.



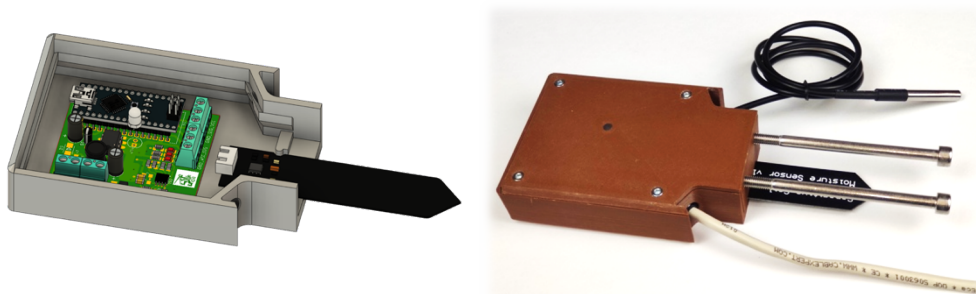
Obr. 4.11.: 3D model a foto osazeného půdního sensorového modulu

4.5.4. POUZDRO

Pouzdro jsem navrhl s ohledem na vertikální umístění modulu. Dovnitř pouzdra jsem navrhl ostrý okrajový profil, který zabraňuje vniku vody k plošnému spoji. Pouzdro je dvoudílné s dvěma prostupy na napájecí kabel a kabel teploměru. Z pouzdra částečně vystupuje snímací část kapacitního senzoru vlhkosti půdy, který se zasune do půdy. Pouzdro obsahuje výřez pro LED, která je zalita transparentním lepidlem. Pouzdro jsem později doplnil o dvojici nerezových šroubů umístěných podél senzoru vlhkosti půdy. Po umístění modulu do země slouží nerezové tyče především jako ochrana proti naklonění pouzdra, které by mohlo vést k přelomení snímací desky vlhkostního senzoru.



Obr. 4.12.: Řez pouzdem v místě šroubových spojů, růžově horní část, modře spodní část pouzdra



Obr. 4.13.: 3D model a reálný prototyp půdního sensorového modulu

4.6. MODUL HLADINY V NÁDRŽI

Tento modul měří výšku hladiny v nádrži a teplotu vody. V návrhu sensorového systému se typicky volí jeden kus tohoto modulu pro každou oddělenou nádrž nebo soustavu nádrží. Řídicí systém získává informaci o množství akumulované vody a následně volí strategii zavlažování.

4.6.1. POPIS FUNKCE

Senzorový modul obsahuje čtveřici senzorů. Trojici senzorů tvoří nezávislé ultrazvukové senzory vzdálenosti HC-SR04. V případě poruchy jednoho z nich nadržazený systém vyhodnotí výraznou odchylku od ostatních a vyhlásí varování, že je senzor poškozen a je třeba jej vyměnit. I přes tuto poruchu je schopen pokračovat dál, neboť má relevantní informaci z dalších dvou senzorů. Čtvrtým senzorem je voděodolný teplotní senzor DS18B20, který je umístěn ve vodě v nádrži.

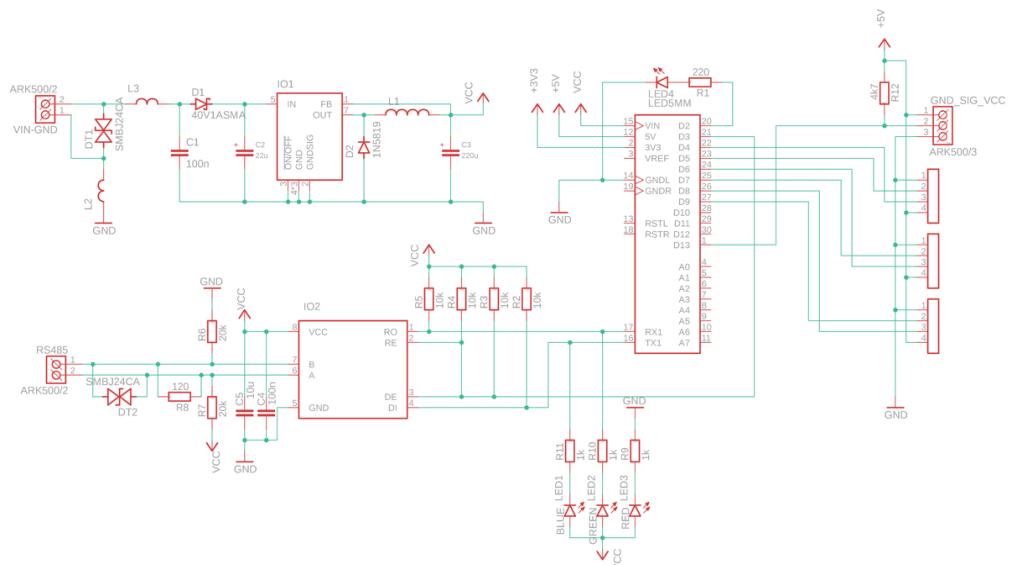
Modul hladiny v nádrži má data uložena v holding registrech. Svoje měření aktualizuje automaticky každou minutu, nebo po zápisu do určeného registru MeasureNow provede okamžitou aktualizaci. Automatické měření lze libovolně zapínat či vypínat zápisem do registru AutoMeasure. Vypnutí tohoto režimu vede ke snížení spotřeby modulu. Dále má senzor viditelnou LED diodu, která slouží pro lokalizaci senzoru a interakci s uživatelem. Lze jí rozsvítit zápisem do registru LedDiod.

Tab. 4.3.: Popis registrů modulu hladiny v nádrži

| Holding reg. Adresa | Jednotka | Název | Obsah/Popis |
|---------------------|----------|---------------|--|
| 0 | 0,01°C | Temperature | Teplota vody v setinách °C |
| 2 | cm | Vzdálenost S1 | Měřená vzdálenost senzorem 1 |
| 3 | cm | Vzdálenost S2 | Měřená vzdálenost senzorem 2 |
| 4 | cm | Vzdálenost S3 | Měřená vzdálenost senzorem 3 |
| 200 | - | AutoMeasure | Automatické měření 1 min 0 – vypnuto, 1 – zapnuto |
| 201 | - | MeasureNow | Aktualizuje měření zápisem hodnoty 1 |
| 300 | - | LedDiod | PWM rozsvícení diody zápisem hodnoty 1-255 |

4.6.2. SCHÉMA ZAPOJENÍ

Připojení senzorů vychází ze zapojení doporučených výrobcem. Modul obsahuje stabilizátor napětí, obvod pro komunikaci na sběrnici RS-485 a příslušné ochrany. Modul pracuje v režimu Slave. Po dotazu od Mastera dojde k přepnutí do vysílacího režimu pomocí výstupního pinu desky Arduino NANO. Digitální teploměr DS18B20 komunikuje po sběrnici OneWire a jednotlivé ultrazvukové senzory jsou připojeny na digitální vstupy a výstupy desky Arduino NANO. Led dioda pro lokalizaci modulu je ovládána analogovým výstupním pinem a lze ji plynule stmívat.



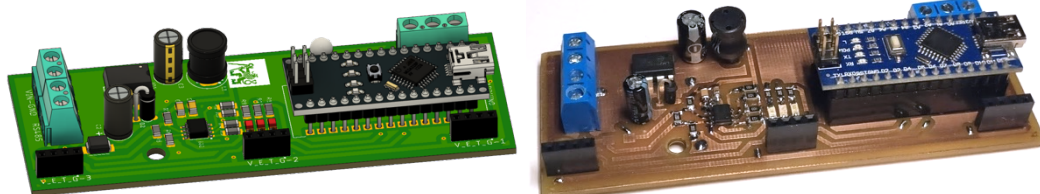
Obr. 4.14.: Schéma zapojení modulu hladiny v nádrži

C1 – Keramický kondenzátor, 100 nF/100 V, 1206
 C2 – Elektrolytický kondenzátor, 22 uF/100 V, 6,3 x 11 mm, RM = 2,5 mm
 C3 – Elektrolytický kondenzátor, 220 uF/25 V, 6,3 x 11 mm, RM = 2,5 mm
 C4 – Keramický kondenzátor, 100 nF/100 V, 1206
 C5 – Keramický kondenzátor, 10 uF/16 V, 1206
 D1 – Schottkyho dioda, 40 V/1 A, SMA
 D2 – Schottkyho dioda 1N5819, 40 V/1 A, DO41
 DT1 – Bipolární transil, 28,1 V/600 W, SMB
 DT2 – Bipolární transil, 6,8 V/600 W, SMB
 IO1 – Spínaný regulátor napětí LM2574N-5, 5 V/0,5 A, DIP8
 IO2 – Převodník MAX485, SO8

L1 – Tlumivka radiální, 330 uH/500 mA, 8,5 x 14 mm, RM = 5 mm
 R1 – Rezistor, 220 Ω, 1206
 R2, R3, R4, R5 – Rezistor, 10 kΩ, 1206
 R6, R7 – Rezistor, 20 kΩ, 1206
 R8 – Rezistor, 120 Ω, 1206
 R9, R10, R11 – Rezistor, 1 kΩ, 1206
 R12 – Rezistor, 4,7 kΩ, 1206
 LED1 – LED, modrá/120 mcd, 1206
 LED2 – LED, zelená/360 mcd, 1206
 LED3 – LED, červená/115 mcd, 1206
 LED4 – LED, červená/115 mcd, 5 mm

4.6.3. DESKA PLOŠNÉHO SPOJE

Výsledný rozměr desky je 40 x 107 mm. Na delší straně deska obsahuje trojici čtyřpinových řadových konektorů pro připojení ultrazvukových senzorů vzdálenosti. Na kratší straně deska obsahuje čtyřpinovou svorkovnici pro připojení napájení a vodičů RS-485. Na opačném konci je třípinová svorkovnice pro připojení teplotního senzoru.



Obr. 4.15.: 3D model a foto osazeného modulu hladiny v nádrži

4.6.4. POUZDRO

Pouzdro bylo navrženo s ohledem na vertikální umístění senzoru nad hladinou vody a jsou na něm připraveny kotvící otvory pro libovolný držák. Je navrženo jako dvoudílné s dvěma prostupy pro napájecí kabel a kabel teploměru. Oba díly jsou na straně ultrazvukových senzorů tvarovány tak, aby sevřely ultrazvukové senzory na místě a maximálně fixovaly jejich pozici a zároveň omezily vstup vzdušné vlhkosti do vnitřní části pouzdra. Zbytek pouzdra je opatřen stejným ostrým okrajovým profilem jako půdní sensorový modul. Pouzdro obsahuje výřez pro LED, který je zalit transparentním lepidlem.



Obr. 4.16.: 3D model a reálný prototyp modulu hladiny v nádrži

4.7. SRÁŽKOVÝ MODUL

Srážkový modul jsem zvolil jako hlavní a řídicí, který vykonává funkci Mastera na sběrnici. Obsahuje hlavní algoritmus řízení a optimalizace dešťového hospodářství v závislosti na informacích o předpovědi počasí, které přijímá od RaspberryPi. Chtěl jsem zabezpečit co největší stabilitu a nezávislost systému, takže jsem zvolil tuto variantu oproti možnosti řídit systém pomocí RaspberryPi. Zároveň tento modul jako jediný bude umístěn na budově, nejbližše stabilizovanému zdroji napájení a bude nejvíce odolný případným nečekaným událostem, které by mohly vést k poškození modulu.

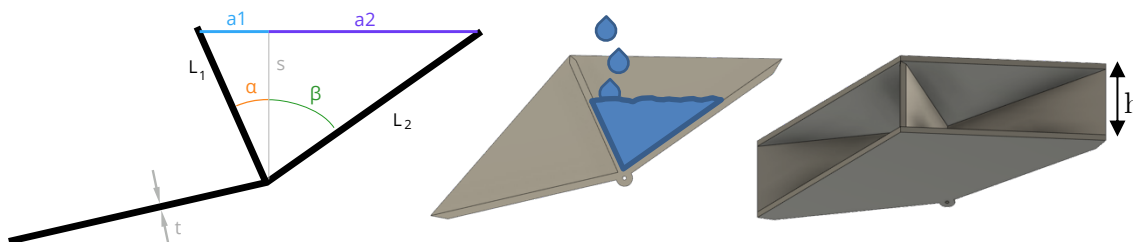
Modul mimo srážek měří intenzitu větru, teplotu a vlhkost vzduchu. Srážky jsem se rozhodl měřit pomocí člunkového srážkoměru, jehož naklápění je detekováno magnetickými kontakty MC-38 v poloze 4, dle Tab. 4.1.

V případě potřeby použít tento modul v externím systému jako meteorostanici komunikující přes Modbus, je možné tento modul provozovat v režimu Slave a řízení přenechat jinému nadřazenému kontroléru.

4.7.1. NÁVRH ČLUNKOVÉHO SNÍMAČE

4.7.1.1. GEOMETRIE

Nejprve jsem zakreslil základní geometrii člunku a určil dvojici úhlů od svislé osy, jejichž velikost bylo cílem určit. Za použití goniometrických funkcí jsem analyticky vyjádřil délky jednotlivých částí člunku.



Obr. 4.17.: Geometrie člunku – úhel **alfa** a **beta**, svislá osa **s**, pomocná geometrie **a₁** a **a₂**, délka ramen **L₁** a **L₂**, tloušťka **t** a šířka **h**

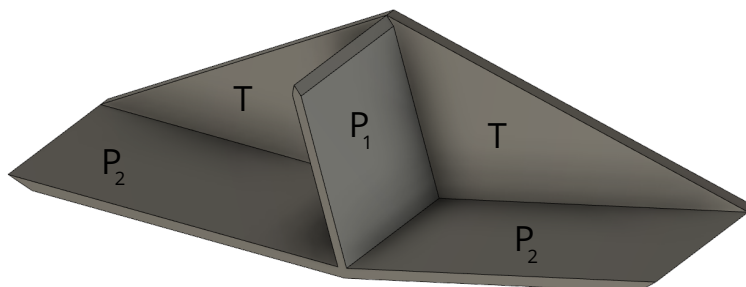
Délku L_1 jsem zvolil fixně a to 35 mm, stejně tak šířku člunku $h = 23,5$ mm (odpovídá rozměru senzoru MC-38, který bude na člunku umístěn) a tloušťku materiálu $t = 0,2$ cm. Pak pro jednotlivé rozměry platí,

$$s = L_1 \cdot \cos(\alpha) \quad (4.1)$$

$$L_2 = \frac{s}{\cos(\beta)} \quad (4.2)$$

$$a_1 = \sqrt{(L_1^2 - s^2)}, \quad a_2 = \sqrt{(L_2^2 - s^2)} \quad (4.3)$$

Dále je třeba vypočítat hmotnost jednotlivých dílů člunku. Materiál jsem zvolil PLA, tedy hustota $\rho_{PLA} = 1,25 \text{ g/cm}^3$.



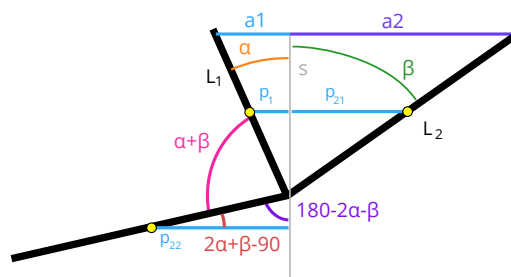
Obr. 4.18.: Popis stěn člunku

$$P_1 = \rho_{PLA} \cdot L_1 \cdot h \cdot t, \quad P_2 = \rho_{PLA} \cdot L_2 \cdot h \cdot t \quad (4.4)$$

$$T = \rho_{PLA} \cdot \frac{(a_1 + a_2) \cdot s}{2} \quad (4.5)$$

$$T_1 = \rho_{PLA} \cdot \frac{a_1 \cdot s}{2}, \quad T_2 = \rho_{PLA} \cdot \frac{a_2 \cdot s}{2} \quad (4.6)$$

Pro zjištění, kdy dojde k překlopení člunku je důležité znát momenty sil, které působí na jednotlivé části. K tomu je třeba znát polohu těžiště jednotlivých dílů, respektive jejich vzdálenost od svislé osy. Pro části P_1 a P_2 je zřejmé, že jsou uprostřed délky jejich stěn.

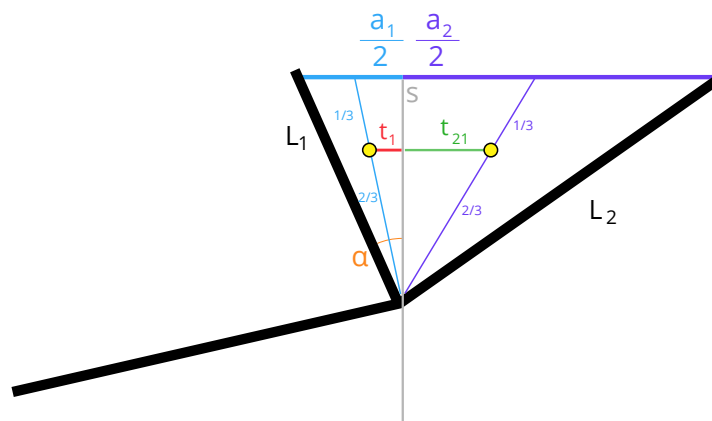


Obr. 4.19.: Popis polohy těžišť desek P_1 a P_2

$$p_1 = \frac{L_1}{2} \cdot \sin(\alpha), \quad p_2 = \frac{L_2}{2} \cdot \sin(\beta) \quad (4.7)$$

$$p_{22} = \frac{L_2}{2} \cdot \cos(2\alpha + \beta - 90) \quad (4.8)$$

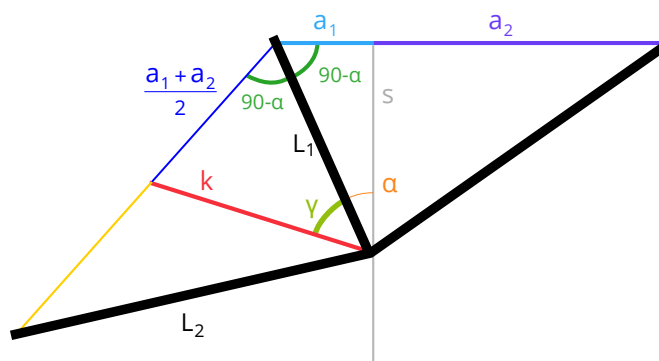
Při výpočtu polohy těžiště trojúhelníkové stěny T jsem nejprve stěnu virtuálně rozdělil na dvě části. Tu, která je vlevo od svislé osy a tu, která je vpravo od osy. Tato úprava podstatně zjednoduší výpočet vzhledem k faktu, že poloha těžiště pro trojúhelník se nachází ve dvou třetinách délky těžnice. Lze tedy tyto polohy vypočítat z prosté podobnosti trojúhelníků.



Obr. 4.20.: Popis polohy těžišť rozdělené desky T – horní část člunku

$$t_1 = \frac{a_1}{2} \cdot \frac{2}{3}, \quad t_{21} = \frac{a_2}{2} \cdot \frac{2}{3} \quad (4.9)$$

Pro výpočet polohy těžiště desky T – dolní části člunku musíme nejprve provést několik dílčích výpočtů. Nejprve zjistíme délku osy strany za pomoci cosinové věty.



Obr. 4.21.: Popis polohy těžiště rozdělené desky T – dolní část člunku

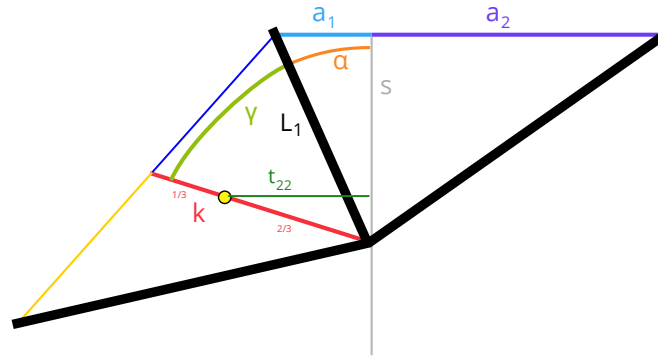
$$k = \sqrt{\left(\frac{a_1 + a_2}{2}\right)^2 + l^2 - 2 \cdot \left(\frac{a_1 + a_2}{2}\right) \cdot l_1 \cdot \cos(90 - \alpha)} \quad (4.10)$$

Následně lze úhel gama vypočítat pomocí sinové věty.

$$\frac{k}{\sin(90 - \alpha)} = \frac{\left(\frac{a_1 + a_2}{2}\right)}{\sin(\gamma)} \quad (4.11)$$

$$\gamma = \arcsin\left(\left(\frac{a_1 + a_2}{2}\right) \cdot \frac{\sin(90 - \alpha)}{k}\right) \quad (4.12)$$

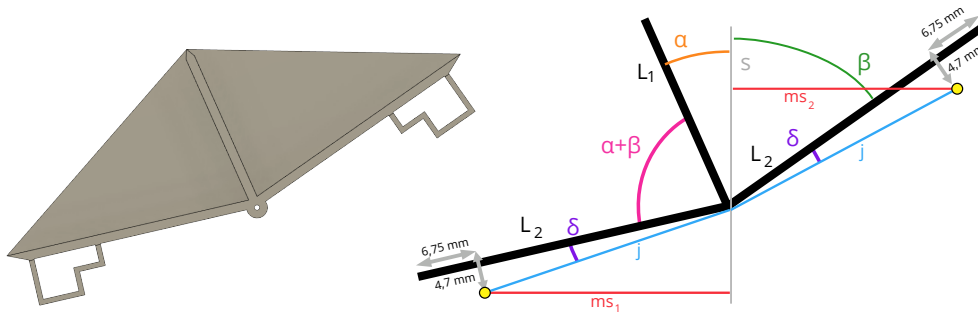
Nyní lze přestoupit k určení vzdálenosti polohy těžiště desky T od osy, dle následující geometrie.



Obr. 4.22.: Popis vzdálenosti těžiště desky T od svislé osy

$$t_{22} = \frac{2}{3} \cdot k \cdot \sin(\alpha + \gamma) \quad (4.13)$$

Součástí člunku je i magnet senzoru MC-38, který je umístěn na konci desek P2. Polohu jeho těžiště vůči člunku jsem experimentálně změřil a nachází se 6,75 mm od okraje a 4,7 mm pod deskou P2. Magnet včetně PLA úchytu váží **MS = 5,2 g**.



Obr. 4.23.: (Zleva) vizualizace člunku s úchyty na magnety MC-38, popis geometrie vzdálenosti magnetů od osy

$$\delta = \arctan\left(\frac{0,47}{L_2 - 0,67}\right) \quad (4.14)$$

$$k_2 = \sqrt{(l_2 - 0,675)^2 + 0,47^2} \quad (4.15)$$

$$\begin{aligned} ms_1 &= k_2 \cdot \sin(180 - 2\alpha - \beta - \delta) \\ ms_2 &= k_2 \cdot \sin(\beta + \delta) \end{aligned} \quad (4.16)$$

Dále je třeba zjistit polohu a množství vody, které postupně naplňuje horní část člunku. V algoritmu, který simuluje překlápění v závislosti na množství vody jsem zvolil iterační postup, který postupně zvyšuje virtuální hladinu uvnitř člunku po desetinně milimetru od nuly až po maximální délku osy **s** a v každém okamžiku porovnává momenty sil, které na člunek působí zleva a zprava od osy. Překlopení je detekováno vyrovnáním, resp. nárůstem sil na pravé straně vlivem stoupající hladiny. Protože se plní pouze horní člunek, lze využít předchozí výpočty a délku osy **s** nahradit výškou hladiny **r** a pro výpočet pozice těžiště vlevo **vp1** a vpravo **vp2**

od osy použít podobnost trojúhelníků. Namísto pomocných rozměrů a_1 a a_2 , použijeme ar_1 a ar_2 .

$$ar_1 = r \cdot \arctan(\alpha), \quad ar_2 = r \cdot \arctan(\beta) \quad (4.17)$$

$$vp_1 = \frac{ar_1}{3}, \quad vp_2 = \frac{ar_2}{3} \quad (4.18)$$

Nyní zbývá vypočítat hmotnost vody vlevo VP_1 a vpravo VP_2 od osy na základě znalosti hustoty vody $\rho_{H_2O} = 1 \text{ g/cm}^3$.

$$VP_1 = \rho_{H_2O} \cdot h \cdot \frac{ar_1 \cdot r}{2}, \quad VP_2 = \rho_{H_2O} \cdot h \cdot \frac{ar_2 \cdot r}{2} \quad (4.19)$$

Nyní jsou všechny dílčí výsledky známy a lze vyjádřit momenty sil, které působí na člunek vlevo a vpravo osy.

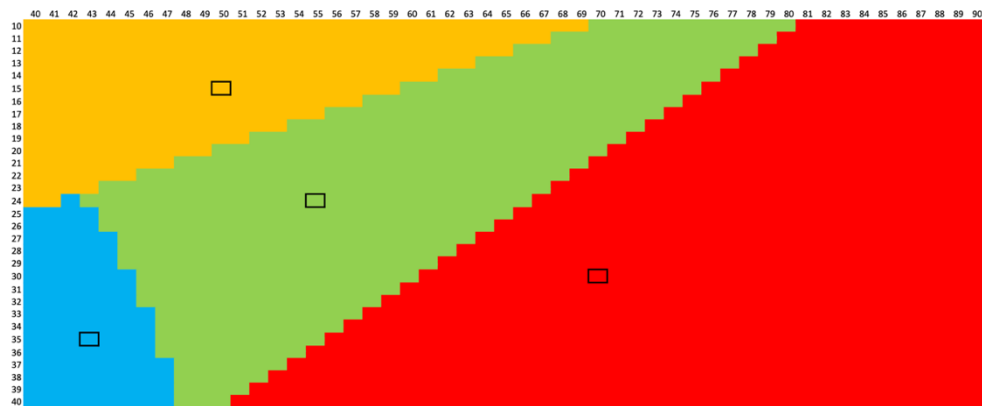
$$M_L = P_1 \cdot p_1 + P_2 \cdot p_{22} + 2 \cdot T_1 \cdot t_1 + 2 \cdot T \cdot t_{22} + VP_1 \cdot vp_1 + MS \cdot ms_1$$

$$M_R = P_2 \cdot p_{21} + 2 \cdot T_2 \cdot t_{21} + VP_2 \cdot vp_2 + MS \cdot ms_2 \quad (4.20)$$

4.7.1.2. ANALÝZA VÝPOČTŮ

V Matlabu jsem napsal skript, který umožní zadání libovolné kombinace úhlů, délky ramene, šířky člunku, tloušťku stěny a velikosti sběracího trychtýře. Tento nejprve vypočte momentové působení pevných částí člunku a poté začne výpočtově zvyšovat hladinu v člunku. Pakliže dojde k vyrovnání momentových sil, dojde k překlopení a tuto výšku hladiny zaznamená a přepočítá ji na množství vody v ml, které dle velikosti trychtýře převede na rozlišení senzoru v mm srážek. Je zde možnost zadat i velikost střechy, takže dojde k přepočtu, kolik litrů dešťové vody nateče ze střechy, pokud člunkový mechanismus překlopí právě jednou.

Tento výpočet jsem nechal opakovaně běžet pro úhly alfa od 10 do 40 stupňů a úhel beta od 40 do 90 stupňů.

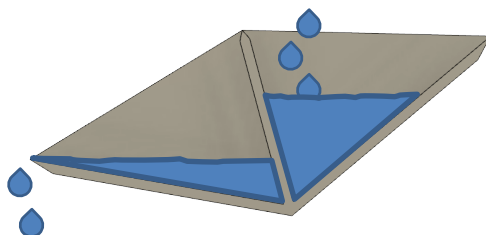


Obr. 4.24.: Vizualizace výsledků simulace dynamiky člunku, svisle alfa, vodorovně beta

Již při výpočtu jsem objevil zjevné omezení na tvar člunku. Pokud by byla kombinace ve **žluté** oblasti, nedojde k úplnému vylití vody po překlopení. Toto omezení je dáno rovnicí 4.21.

$$2 \cdot \alpha + \beta > 90^\circ \quad (4.21)$$

Pro lepší představu jsem zvolil kombinaci 15 a 50 stupňů – na Obr. 4.24 označeno černým obdélníkem ve **žluté** oblasti.

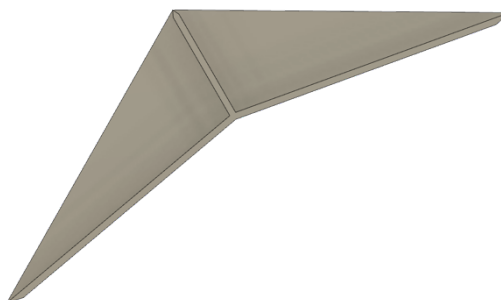


Obr. 4.25. *Nevyhovující tvar člunku ze **žluté** oblasti*

Další omezení je pro kombinace úhlů v **červené** oblasti. Výsledný člunek ztrácí svoji nestabilitu při překlápění vlivem posunu těžiště pod osu rotace člunku. Toto omezení je dáno rovnicí

$$2 \cdot \alpha + 2 \cdot \beta > 180^\circ \quad (4.22)$$

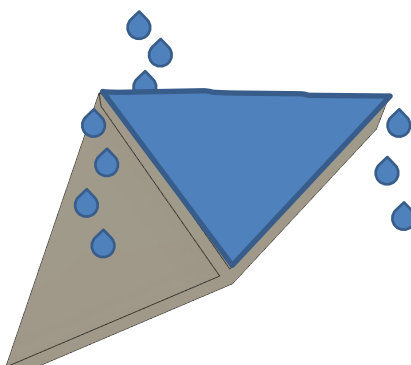
Pro lepší představu jsem zvolil kombinaci 30 a 70 stupňů – na Obr. 4.24 označeno černým obdélníkem v **červené** oblasti.



Obr. 4.26. *Nevyhovující tvar člunku z **červené** oblasti*

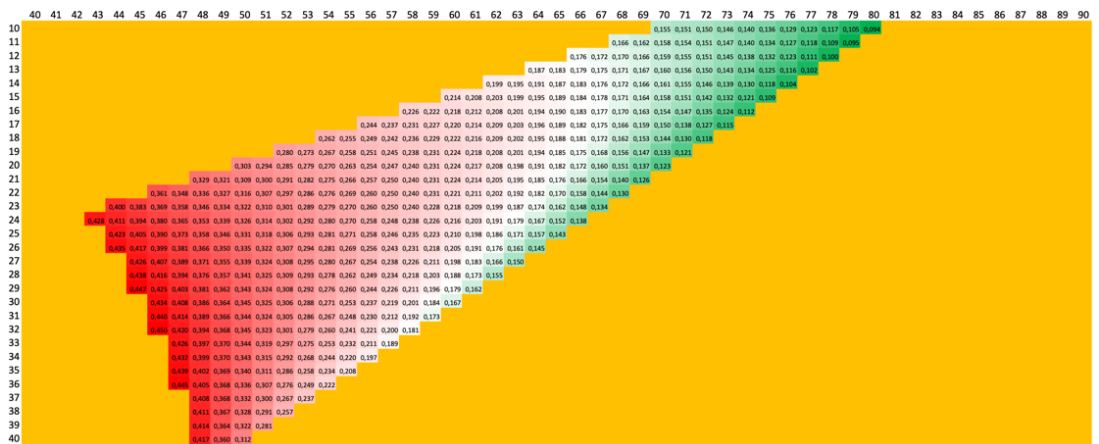
Modrá oblast již nepředstavuje teoretické omezení, ale vyplývá ze simulací. Pro tyto kombinace úhlů nedojde k překlápění člunku ani při naplnění po okraj.

Pro lepší představu jsem zvolil kombinaci 35 a 43 stupňů – na Obr. 4.24 označeno černým obdélníkem v **modré** oblasti.

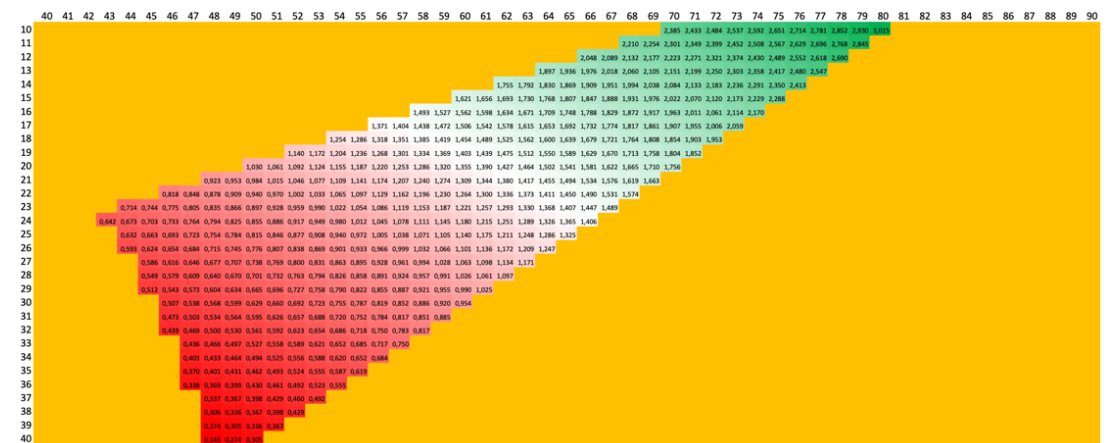


Obr. 4.27. *Nevyhovující tvar člunku z **modré** oblasti*

Jako poslední zbývá **zelená** oblast, ve které dojde k převrnutí a je mimo teoretická omezení. Výstupem skriptu v Matlabu byla hodnota rozlišení a míra převrnutí, která nese údaj velikosti derivace průběhu momentových sil. Jednodušeji řečeno, jak moc je člunek těsně před převrnutím nestabilní. Tyto údaje jsem barevně naškáloval a vynesl do grafu. Zeleně jsou označeny lepší hodnoty, červeně pak hodnoty parametrově horší.

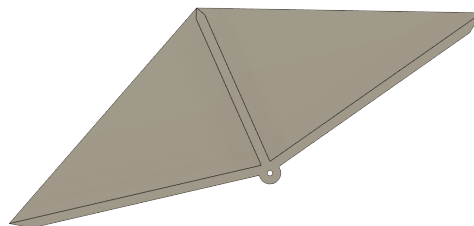


Obr. 4.28.: Analyzované hodnoty rozlišení člunkového senzoru pro různé kombinace úhlů, zeleně vysoké rozlišení (0,1 mm/převrhnutí), červeně nízké rozlišení (0,45 mm/převrhnutí)



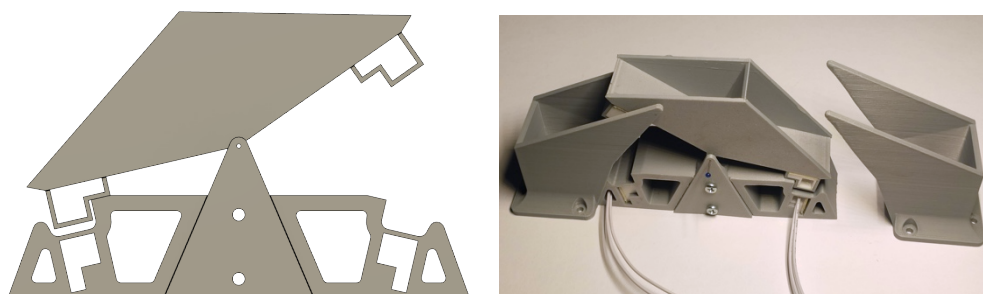
Obr. 4.29.: Analyzované hodnoty míry převrhnutí pro různé kombinace úhlů, zeleně vysoká nestabilita před převrhnutím, červeně nízká nestabilita před převrhnutím

Z Obr. 4.28 a Obr. 4.29 vyplývá, že pro nízké hodnoty úhlu beta jsou parametry člunku horší než pro vyšší hodnoty. Rozhodl jsem se zvolit kombinaci úhlů 24 a 55 stupňů s rozlišením 0,27 mm při použití trychtýře s průměrem 22 cm, na Obr. 4.24 označen černým obdélníkem v zelené oblasti.



Obr. 4.30.: Zvolený tvar člunku ze zelené oblasti

Dále jsem člunek doplnil o snímací magnety a vytvořil platformu, na které se bude překlápět, a dvojici sběracích trychtýřů pro odvod vody.



Obr. 4.31.: Navržená konstrukce člunkového snímače optimalizovaná pro 3D tisk a reálný model s magnetickými snímači MC-38

4.7.1.3. SBĚRACÍ TRYCHTÝŘ

Velikost sběrací plochy přímo odpovídá výslednému rozlišení snímače. Je vhodné, aby snímač měl rozlišení v řádech desetin mm. Rozhodl jsem se použít trychtýř ve skleněném provedení, kde je možnost aplikovat sprej pro zvýšení účinku stékání vody, běžně označován jako tekuté stěrače. To umožní velmi rychle detekovat déšť bez nutnosti smáčení povrchu. Sklo je navíc odolné vůči povětrnostním vlivům, je chemicky stálé, prakticky inertní a vykazuje vysokou odolnost proti působení vody, vodní páry i kyselinám a roztokům solí. Další výhodou skla je snížená emisivita v oblasti infračervených vlnových délek, tedy nebude docházet k promrzání povrchu vlivem sálání proti jasné obloze. [109, 110]

V technickém provedení jsem měl na výběr skleněný trychtýř s dlouhou stopkou nebo skleněný demižon. Oba vyžadovaly sklářskou úpravu (zkrácení stopky – provedl odborný sklenář, rozpůlení demižonu – provedl jsem svépomocí). Demižon má v řezné rovině sběrnou plochu 550 cm^2 , což při stejných parametrech člunku odpovídá rozlišení $0,19 \text{ mm}$. Skleněný trychtýř má sběrnou plochu 292 cm^2 a odpovídající rozlišení $0,35 \text{ mm}$.



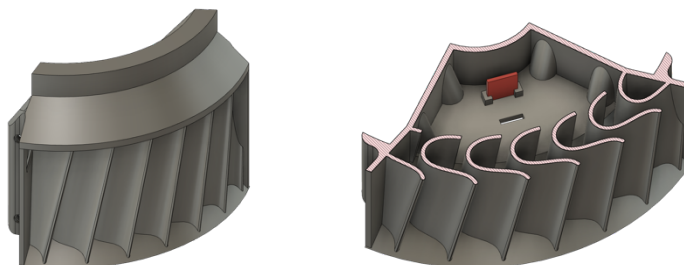
Obr. 4.32.: Skleněný demižon a trychtýř

4.7.2. RADIČNÍ ŠTÍT

Srážkový modul mimo měření srážek monitoruje teplotu a vlhkost vzduchu. K tomu používá kombinovaný senzor SHT21. Aby měření teploty a vlhkosti vzduchu nebylo zatíženo chybou způsobenou sáláním slunce nebo zvýšenou konvekcí způsobenou intenzivním prouděním vzduchu kolem senzoru, je třeba okolí senzoru chránit proti svitu slunce a působení větru. K tomu se používají radiační kryty. Jsou navrženy tak, aby slunce v žádném úhlu nepronikalo přímo k senzoru, a aby zpomalovaly proudění vzduchu kolem senzoru na minimum. [111, 112]

Mimo materiálové požadavky jsou na radiační štíty kladeny i geometrické nároky. Je třeba, aby vzduch měl dostatečný přístup k senzoru. Lamely by měly být navrženy tak, aby minimalizovaly dělení proudů vzduchu a nedocházelo k turbulencím. Radiační štít by dále neměl být vystaven přímému slunečnímu svitu ani ozáření odraženému od zdi či země. [113]

Na základě těchto požadavků jsem navrhl vlastní geometrii radiačního štítu integrovaného do měřicího tubusu srážkového senzoru.



Obr. 4.33.: Radiační štít, vpravo v řezu (senzor SHT21 označen červeně)

4.7.3. POPIS FUNKCE

Tento modul jsem zvolil jako řídicí (Master sběrnice). Řídí tedy celý systém, sbírá data a dává povely ostatním modulům. Role mastera by se teoreticky mohl zhostit kterýkoli modul, avšak nejvýhodnější je tento. Jako základ jsem zvolil desku Arduino Mega, která je výkonnější než Arduino NANO, má větší paměť i více sériových portů UART. Jeden z nich jsem využil pro komunikaci na sběrnici RS-485 a druhý na komunikaci s RaspberryPi.

Dále je k desce připojen senzor větru s impulzním výstupem. Měření probíhá počítáním impulzů za určitý čas a následný převod na rychlost větru. Člunkový srážkoměr má dva magnetické kontakty, které se střídavě spínají. Řídicí systém počítá počet překlopení. Přes I²C je připojen senzor teploty a vlhkosti vzduchu SHT21, který je vyčítán periodicky. Modul má data uložena v holding registrech.

Pakliže modul pracuje v režimu Slave, tak svoje měření aktualizuje automaticky každou minutu, nebo po zápisu do určeného registru MeasureNow provede okamžitou aktualizaci. Automatické měření lze libovolně zapínat či vypínat zápisem do registru AutoMeasure. Vypnutí tohoto režimu vede ke snížení spotřeby modulu. Dále má senzor viditelnou LED diodu, která slouží pro lokalizaci senzoru a interakci s uživatelem. Lze jí rozsvítit zápisem do registru LedDiod.

Veškerá data ze srážkového modulu i z dalších modulů, které jsou připojeny na sběrnici, jsou pravidelně odesílány RaspberryPi, který zprostředkovává zálohování dat v cloudovém úložišti. Při každém výpočtu aktuální strategie hospodaření

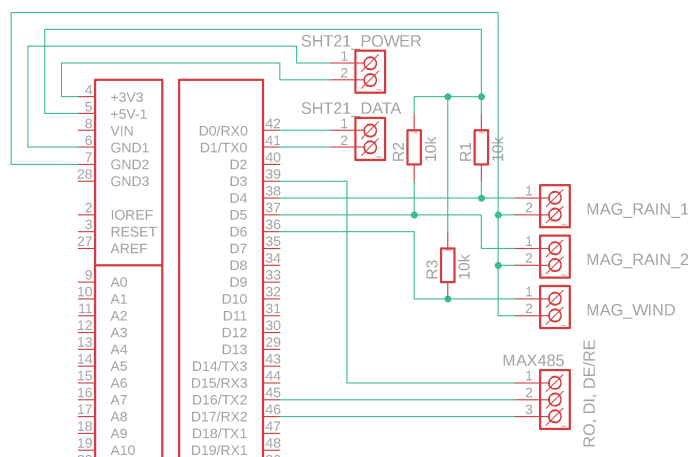
s vodou se modul dotazuje RaspberryPi na nejnovější data o předpovědi počasí. Nejdůležitějšími parametry jsou množství předpovídaných mm vody na následujících 24 hodin a na celý týden dopředu. Dále jsou důležitá maxima a minima teplot a předpovídaná oblačnost.

Tab. 4.4.: Popis registrů srážkového modulu

| Holding reg. Adresa | Jednotka | Název | Obsah/Popis |
|---------------------|----------|-------------|--|
| 0 | 0,01°C | Temperature | Teplota vzduchu v setinách °C |
| 1 | 0,1%RH | Humidity | Vlhkost v rozsahu 0-99,9% RH |
| 5 | - | Rainfall | Počet překlopení člunku |
| 6 | 0,01 m/s | Windspeed | Rychlost větru v setinách m/s |
| 200 | - | AutoMeasure | Automatické měření 1 min 0 – vypnuto, 1 – zapnuto |
| 201 | - | MeasureNow | Aktualizuje měření zápisem hodnoty 1 |
| 300 | - | LedDiod | PWM rozsvícení diody zápisem hodnoty 1-255 |

4.7.4. SCHÉMA ZAPOJENÍ

Magnetické kontakty člunkového snímače jsou připojeny na digitální vstupy s pomocnými rezistory určující napěťovou úroveň v případě rozepnutých kontaktů. Jazýčkový magnetický kontakt anemometru je připojen stejným způsobem na digitální vstup. Senzor teploty a vlhkosti vzduchu SHT-21 je připojen na napájecí napětí 3,3 V a datovou komunikaci na sériové periferní rozhraní SDA a SCL. Komunikační spojení, společně s napájením modulu Arduino Mega je realizováno pomocí USB kabelu připojeného do Raspberry Pi. Převod komunikace na sběrnici RS-485 je realizován pomocí externího modulu s MAX485.



Obr. 4.34.: Schéma zapojení srážkového modulu

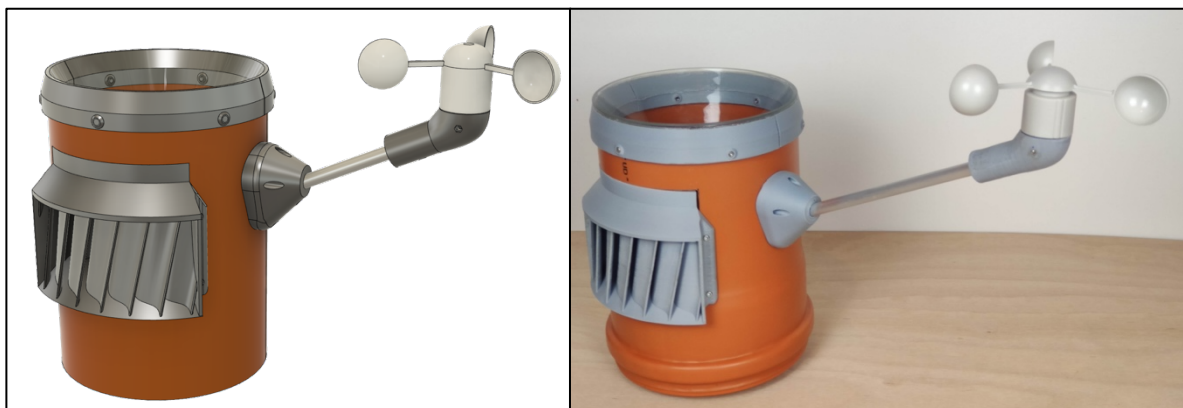
4.7.5. DESKA PLOŠNÉHO SPOJE

Desku plošného spoje jsem pro tento modul nevyhotovoval. V současné chvíli je řídicí modul v testovací fázi a jednotlivé senzory jsou k desce Arduino Mega připojeny pomocí řadových konektorů přímo na desce. Pakliže se zapojení v průběhu testování ukáže jako vyhovující, navrhnu speciální shield-modul, který se bude přímo na desku nasazovat a do něhož budou jednotlivé senzory a komunikační vodiče připojeny.

4.7.6. POUZDRO

Původním návrhem bylo kryt sensorového modulu vyhotovit na 3D tiskárně, což se vzhledem k velikosti ukázalo jako zbytečně časově i materiálově náročné. Zvolil jsem tedy alternativu a použil jako základ pro vnější válcovitý tvar pouzdra odpadní trubku KGEM s dimenzí DN200. Jako základ jsem zvolil nejkratší délku 500 mm společně s vnitřní hrdlovou zátkou. Uvnitř zátky je umístěn člunkový modul se sběracími trychtýři pro odvod vody pod srážkový modul. Dešťová voda je zachytávána skleněným trychtýřem, který je opatřen 3D tisknutým okrajem, pomocí kterého je trychtýř připevněn k trubkovému krytu modulu. Na sběracích trychtýřích člunkového srážkoměru je připevněno plexisklo chránící řídicí desku Arduino Mega a převodník na sběrnici RS-485 před přímým kontaktem s vodou.

Senzor teploty a vlhkosti vzduchu SHT-21 je umístěn uvnitř radiačního štítu, který je integrován do trubkového krytu modulu. Anemometr je umístěn na hliníkové tyči vedle srážkového modulu tak, aby nedocházelo ke vzájemnému ovlivňování obou snímačů. K pouzdru je připojen komunikační a zároveň napájecí kabel k RaspberryPi a datový kabel sběrnice RS-485.



Obr. 4.35.: 3D model a reálný prototyp srážkového modulu

4.8. MODUL VÝSTUPNÍCH SIGNÁLŮ

Tento modul slouží k ovládání externích periférií. Vytvořil jsem ho tak, aby k němu bylo možné připojit široké množství zařízení. Obsahuje čtveřici přepínacích relé, čtyři galvanicky oddělené výstupy s možností externího napájení a čtveřici galvanicky neoddělených výstupů, které lze v případě potřeby změnit na vstupy osazené senzorem teploty.

4.8.1. POPIS FUNKCE

Modul je ovládán příkazy ze sběrnice a dle zápisu do jednotlivých registrů spíná příslušné výstupy. Čtveřice relé je ovládána binární hodnotou, 0 – rozepnuto, 1 – sepnuto.

Čtveřice galvanicky oddělených výstupů je připojena na PWM výstupy desky Arduino NANO, což umožňuje ovládat další typy zařízení. Výstup se ovládá zápisem do registru v rozsahu 0(GND)-255(UCC). Aby byl výstup galvanicky oddělen, je třeba připojit externí napájení na připravené piny desky a to s hodnotou až 30 V. Pakliže galvanické oddělení není vyžadováno, je možné jej propojkou spojit s napájením modulu s napětovou úrovní 5 V nebo 24 V. Výstupní hradlo je tvořeno CMOS technologií umožňující výstupní proud až 2 A.

Poslední čtyři výstupy je možné nakonfigurovat jako výstupy. V tom případě jsou výstupy galvanicky neoddělené s napětím 5 V. V případě potřeby na ně lze připojit teplotní čidla. To může být výhodné ve chvíli, kdy jsou ovládána pomocí relé například výkonová čerpadla. Pokud příslušný senzor umístíme na správné místo na čerpadle, lze pomocí něj odhalit případnou poruchu a přívod elektrického proudu vypnout automaticky. Obdobným způsobem je možné realizovat například řízené vytápění na určitou teplotu bez nutnosti umisťovat do prostoru další modul.

Volba konfigurace použití galvanicky neoddělených výstupů/měření teploty se provádí zápisem do registru Mode a to do jeho čtyřech nejnižších bitů.

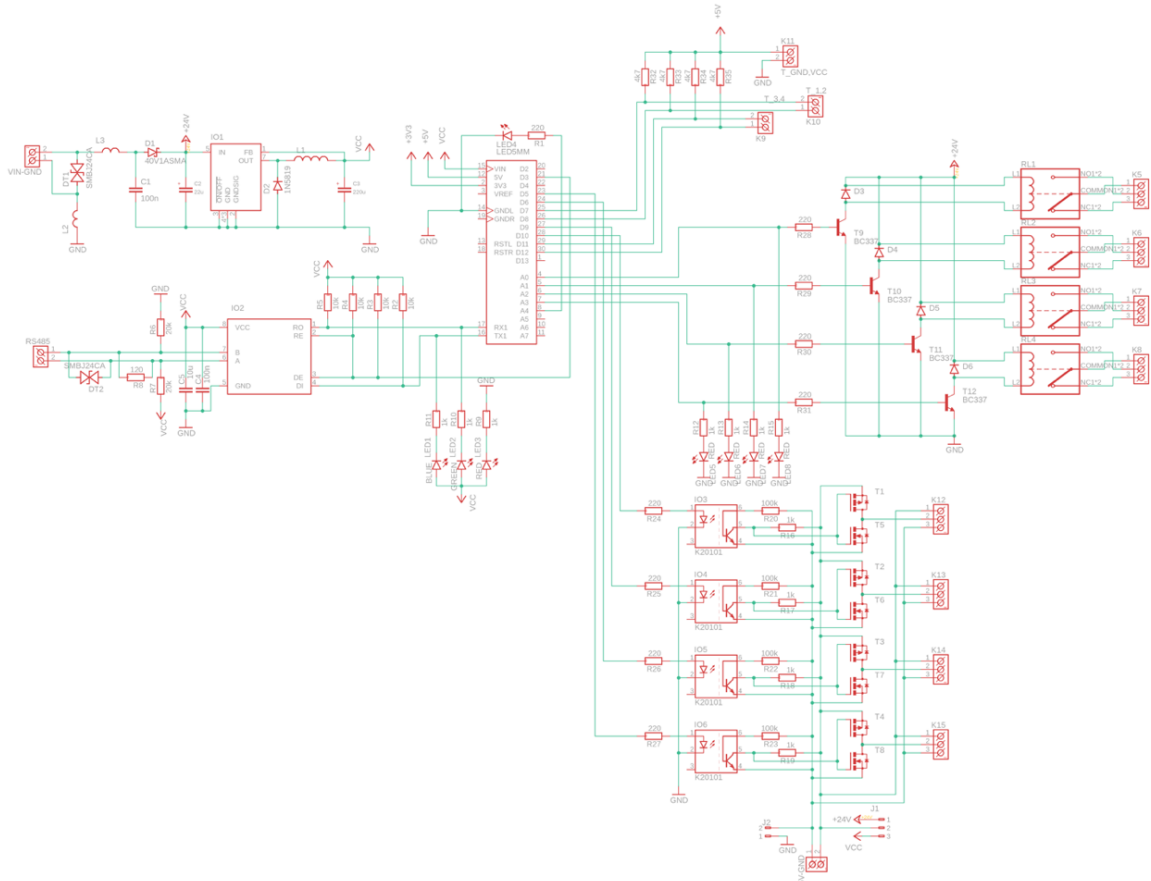
Tab. 4.5.: Popis registrů modulu výstupních signálů

| reg. Adr. | Jed-notka | Název | Obsah/Popis | reg. Adr. | Jed-notka | Název | Obsah/Popis |
|-----------|-----------|-----------------|---|-----------|-----------|---------------|--------------------------------------|
| 0 | - | Relay 1 | Výstupní relé 1 | 8 | - | Out 1 | Galvanicky neoddělený výstup 1 |
| 1 | - | Relay 2 | Výstupní relé 2 | 9 | - | Out 2 | Galvanicky neoddělený výstup 2 |
| 2 | - | Relay 3 | Výstupní relé 3 | 10 | - | Out 3 | Galvanicky neoddělený výstup 3 |
| 3 | - | Relay 4 | Výstupní relé 4 | 11 | - | Out 4 | Galvanicky neoddělený výstup 4 |
| 4 | - | PwmOut 1 | Pwm galvanicky oddělený výstup 1 | 12 | 0,01°C | Temperature 1 | Teplota senzoru 1 v setinách °C |
| 5 | - | PwmOut 2 | Pwm galvanicky oddělený výstup 2 | 13 | 0,01°C | Temperature 2 | Teplota senzoru 2 v setinách °C |
| 6 | - | PwmOut 3 | Pwm galvanicky oddělený výstup 3 | 14 | 0,01°C | Temperature 3 | Teplota senzoru 3 v setinách °C |
| 7 | - | PwmOut 4 | Pwm galvanicky oddělený výstup 4 | 15 | 0,01°C | Temperature 4 | Teplota senzoru 4 v setinách °C |
| - | - | - | - | - | - | - | - |
| 200 | - | AutoMeasurement | Automatické měření 1 min 0 – off, 1 – on | 201 | - | MeasureNow | Aktualizuje měření zápisem hodnoty 1 |
| 300 | - | LedDiod | PWM rozsvícení diody zápisem hodnoty 1-255 | 400 | - | Mode | Volba Out/Temperature Bitově 1/0 |

Modul výstupních signálů má data uložena v holding registrech. V případě připojení alespoň jednoho teplotního senzoru svoje měření aktualizuje automaticky každou minutu, nebo po zápisu do registru MeasureNow provede okamžitou aktualizaci. Automatické měření lze libovolně zapínat či vypínat zápisem do registru AutoMeasure. Dále má senzor viditelnou LED diodu, která slouží pro lokalizaci senzoru a interakci s uživatelem. Lze ji rozsvítit zápisem do registru LedDiod.

4.8.2. SCHÉMA ZAPOJENÍ

Pro případ zapojení senzorů jsou na desce připraveny pomocné rezistory, dle doporučeného zapojení. Vstupy jsou vyvedeny na svorkovnici vedle reléových výstupů. Všechny senzory mají jednu společnou napájecí svorkovnici, pouze signál je oddělen. Relé mají spínací obvod tvořen NPN tranzistorem a ochrannou diodou. Jsou spínány napětím 24 V, které je odebíráno z komunikační sběrnice. Tranzistor je spínán signálem s napětím 5 V z desky Arduino NANO. Zde je galvanické oddělení realizováno prostřednictvím spínací cívky relé, která je odděluje od výstupních kontaktů. Tyto kontakty jsou vyvedeny na svorkovnici. Každé relé má jednonásobný přepínací kontakt. Posledním prvkem jsou čtyři galvanicky oddělené výstupy. Galvanické oddělení je realizováno pomocí tranzistorového optočlenu. Napájení spínacích obvodů výstupu je možné z externího zdroje přes oddělenou svorkovnici. Pro jednodušší testování jsem na desku umístil i možnost napájení výstupních obvodů přímo z napětí dostupného na desce. V tomto případě však dojde ke galvanickému spojení. Toto spojení je možné vytvořit pomocí dvojice jumperů. Výstupní obvod je tvořen dvojicí MOS tranzistorů s P a N kanálem.

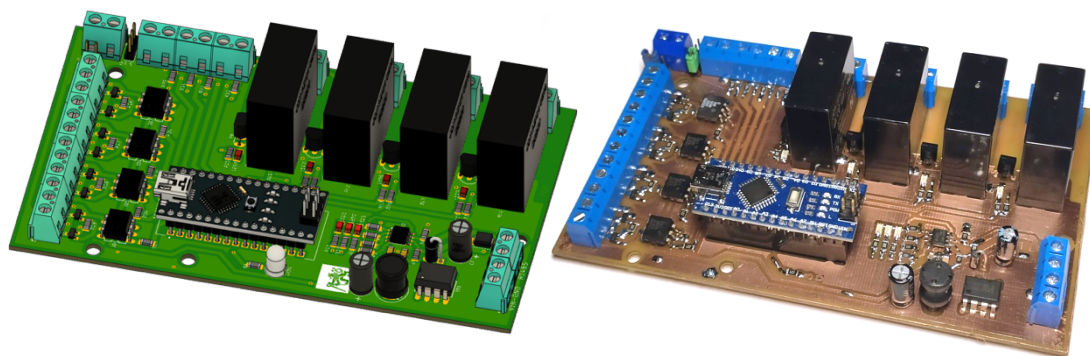


Obr. 4.36.: Schéma zapojení modulu výstupních signálů

| | |
|--|--|
| C1 – Keramický kondenzátor, 100 nF/100 V, 1206 | R6, R7 – Rezistor, 20 k Ω , 1206 |
| C2 – Elektrolytický kondenzátor, 22 uF/100 V, 6,3 x 11 mm, RM = 2,5 mm | R8 – Rezistor, 120 Ω , 1206 |
| C3 – Elektrolytický kondenzátor, 220 uF/25 V, 6,3 x 11 mm, RM = 2,5 mm | R9, R10, R11 – Rezistor, 1 k Ω , 1206 |
| C4 – Keramický kondenzátor, 100 nF/100 V, 1206 | R12, R13, R14, R15 – Rezistor, 1 k Ω , 1206 |
| C5 – Keramický kondenzátor, 10 uF/16 V, 1206 | R16, R17, R18, R19 – Rezistor, 1 k Ω , 1206 |
| D1 – Schottkyho dioda, 40 V/1 A, SMA | R20, R21, R22, R23 – Rezistor, 100 k Ω , 1206 |
| D2 – Schottkyho dioda 1N5819, 40 V/1 A, DO41 | R24, R25, R26, R27 – Rezistor, 220 Ω , 1206 |
| D3, D4, D4, D6 – Ochranná dioda, 800 V/1 A, DO213 | R28, R29, R20, R31 – Rezistor, 220 Ω , 1206 |
| DT1 – Bipolární transil, 28,1 V/600 W, SMB | R32, R33, R34, R35 – Rezistor, 4,7 k Ω , 1206 |
| DT2 – Bipolární transil, 6,8 V/600 W, SMB | RL1, RL2, RL3, RL4 – Relé 24 V, 250 VAC/16 A/600 W/ 5 000 VA |
| IO1 – Spínaný regulátor napětí LM2574N-5, 5 V/0,5 A, DIP8 | T1, T2, T3, T4 – Tranzistor: P-MOSFET, -30 V/-2 A/900 mW, SOT23 |
| IO2 – Převodník MAX485, SO8 | T5, T6, T7, T8 – Tranzistor: N-MOSFET, 30 V/2,6 A/1115 mW, SOT23 |
| IO3, IO4, IO5, IO6 – Optočlen s tranzistorem, 5,3 kV, DIP6 | T9, T10, T11, T12 – Tranzistor: NPN, 45 V/0,5 A/625 mW, TO92 |
| J1, J2 – Řadové kolíky, 2,54 mm | LED1 – LED, modrá/120 mcd, 1206 |
| L1 – Tlumivka radiální, 330 uH/500 mA, 8,5 x 14 mm, RM = 5 mm | LED2 – LED, zelená/360 mcd, 1206 |
| R1 – Rezistor, 220 Ω , 1206 | LED3 – LED, červená/115 mcd, 1206 |
| R2, R3, R4, R5 – Rezistor, 10 k Ω , 1206 | LED4 – LED, červená/115 mcd, 5 mm |

4.8.3. DESKA PLOŠNÉHO SPOJE

Výsledný rozměr desky je 81 x 137 mm. Na delší straně desky je čtveřice trojpinových konektorů pro připojení reléových výstupů. Poté je na desce čtveřice svorkovnic pro připojení signálových vodičů teplotního senzoru a společná dvoupinová svorkovnice pro jejich napájení. Jako poslední je na desce umístěna svorkovnice, pro připojení napájení obvodu galvanicky oddělených výstupů. Vedle ní je umístěn trojpinový jumper, pomocí kterého lze napájet obvody napětím, které je na desce a to konkrétně 5 V nebo 24 V. V tomto případě je nutné spojit i nulový potenciál. K tomu slouží dvoupinový jumper. Je-li využito pro napájení výstupních obvodů napětí z desky, výstupy nejsou galvanicky odděleny. Na kratší straně deska obsahuje čtyřpinovou svorkovnici pro připojení napájení a vodičů RS-485. Na opačném straně je čtveřice trojpinových svorkovnic galvanicky oddělených výstupních signálů.



Obr. 4.37.: 3D model a foto osazeného modulu výstupních signálů

4.8.4. POUZDRO

V tomto případě není pouzdro utěsněné proti vniku vlhkosti nebo vody. Jedná se o kryt, který slouží primárně k ochraně uživatele před dotykem živých částí. Je zde umožněn přímý přístup ke svorkovnicím, který je po zapojení možné překrýt vrchní částí pouzdra. Pouzdro na zadní straně obsahuje kotvící otvory pro snazší umístění modulu do technické místnosti.



Obr. 4.38.: Reálný prototyp modulu výstupních signálů, vpravo pohled na kotvící otvory

5. PŘEDPOVĚĚ POČASÍ

Předpověď počasí hraje v oblasti optimalizace spotřeby a zvýšení výnosů klíčovou roli. Výzkumy z posledních let ukazují, že oproti ručnímu zavlažování lze pomocí automatizovaného s vazbou na předpověď počasí uspořit až 70 % zdrojů vody. Zároveň výsledky výzkumu, který zkoumal růst a výnosy rýže, ukázaly zvýšení výnosů o 29 %. [114, 115]

Automatické zavlažování se závislostí na předpovědi počasí nabízí firma Loxone nebo již zmíněný Hunter resp. jeho nadstavba Hydrowse. [116, 117]

Úspěšnost předpovědi se za posledních 50 let pro jednodenní předpověď zvýšila z 83 na 97 %, pro třídní předpověď to bylo zlepšení ze 73 na 92 %. Vzhledem k vysoké chaotičnosti meteorologických jevů jsou, i přes rostoucí výpočetní výkony, přesné předpovědi počasí na delší dobu než týden téměř neuskutečnitelné. [118, 119]

Na internetu jsou dostupné různé předpovědi počasí vycházející z různých meteorologických modelů. V této práci mě zajímaly především ty předpovědi, které mají možnost online stahování aktuálních předpovědí přes API.

5.1. WEBOVÉ PŘEDPOVĚDI POČASÍ

5.1.1. AZURE MAPS - MICROSOFT

Společnost Microsoft vytvořila placenou službu Azure Maps, která v sobě kombinuje informace o počasí, dopravě, snímky planety a různé varianty grafického zpracování. Informace o počasí jsou dostupné i historicky. Minutovou předpověď lze získat na 120 minut, hodinovou předpověď lze získat až na 10 dní a čtvrtedenní předpověď až na 15 dní. Do 1000 dotazů je služba zdarma, pro více se platí od 4,5 \$ za 1000 dotazů. [120, 121]

5.1.2. POINT FORECAST - METEOSOURCE

Meteosource poskytuje výhradně data o počasí. Minutová předpověď na hodinu dopředu, hodinová na 7 dní a denní na 30 dní dopředu. Lze si vyžádat i historická data. Předpověď počasí vzniká nejprve kombinací historických údajů, dále upřesněním na jednotlivé regiony, poté započítává data z meteorologických stanic a s využitím radarů a aktuálních dat ze stanic zpřesňuje minutovou a hodinovou předpověď. Do 400 dotazů za den je služba zdarma, dále pak od 200 Kč/měsíc. [122]

5.1.3. METEOBLUE

Služba meteoblue poskytuje přes stovku parametrů počasí. Má předpověď na 7 a 14 dní. K dispozici jsou historická data, webkamery, pylové a astrologické zpravidajství, data důležitá pro letectví a zemědělství. Tato služba je placená, zákazník

si kupuje kredity a poté jimi platí za konkrétní požadovaná data. Deset základních dotazů za hodinu po dobu celého roku stojí 72,6 €. [123]

5.1.4. OPENWEATHER

Služba OpenWeather nabízí minutová data na hodinu, hodinová data na 2 dny a denní data na 8 dní. Lze si vyžádat i historická data na 40 let zpět. 1000 dotazů za den je zdarma a za každý další se platí 0,0014 €. Je nutné se registrovat a přihlásit k odběru. Lze nastavit i upozornění, kdy při překročení určitého limitu dojde k odeslání upozornění. [124]

5.1.5. ACCUWEATHER

AccuWeather dodává data o předpovědi počasí pro 85 % ze všech výrobců telefonů. Poskytuje volně denní data na 5 dní, hodinová na 12 hodin a maximálně 50 dotazů denně. Jsou k dispozici i satelitní snímky nebo alarmová volání. [125]

5.1.6. YR.NO

Norský portál yr.no vznikl v roce 2007 a poskytuje předpověď počasí na základě evropského meteorologického modelu. Yr.no poskytuje svoje data volně bez omezení počtu dotazů, jedinou podmínkou je do zprávy se žádostí uvést jakýkoli identifikační údaj. Poskytuje hodinová data ve formátu JSON na 10 dní. V datech jsou informace o tlaku, vlhkosti a teplotě vzduchu, směr a rychlost vzduchu, oblačnost a předpokládané srážky. [126]

5.2. VÝBĚR PŘEDPOVĚDI

Hledal jsem předpovědní model, který bude poskytovat základní informace o předpovědi, bude dostatečně spolehlivý a ideálně zadarmo. Všechny tyto požadavky splňuje portál yr.no, jehož předpověď osobně používám a s přesností předpovědi jsem spokojen. Přístup přes API je bezproblémový a v datech se dá snadno orientovat. Z těchto důvodů jsem zvolil předpověď právě z yr.no.

6. ŘÍDICÍ ALGORITMUS

Celý systém je řízen deskou Arduino Mega, která rozhoduje o strategii zavlažování. Sbírá data z modulů a odesílá je prostřednictvím Raspberry Pi k archivaci. Současně z Raspberry Pi získává data o předpovědi počasí na následujících 10 dní. Hlavním cílem je vystačit si při zavlažování pouze s akumulovanou dešťovou vodou v nádržích a omezit potřebu vody z externích zdrojů (studna, vodovod) na minimum. Tohoto cíle se systém snaží dosáhnout aktivním způsobem, tj. pomocí programového algoritmu. Mimo to lze snížit spotřebu vody i jinými pasivními způsoby, viz kapitola 2.1. Pro dosažení optimálního minima je třeba oba tyto způsoby kombinovat.

6.1. AKTIVNÍ ZPŮSOBY OPTIMALIZACE

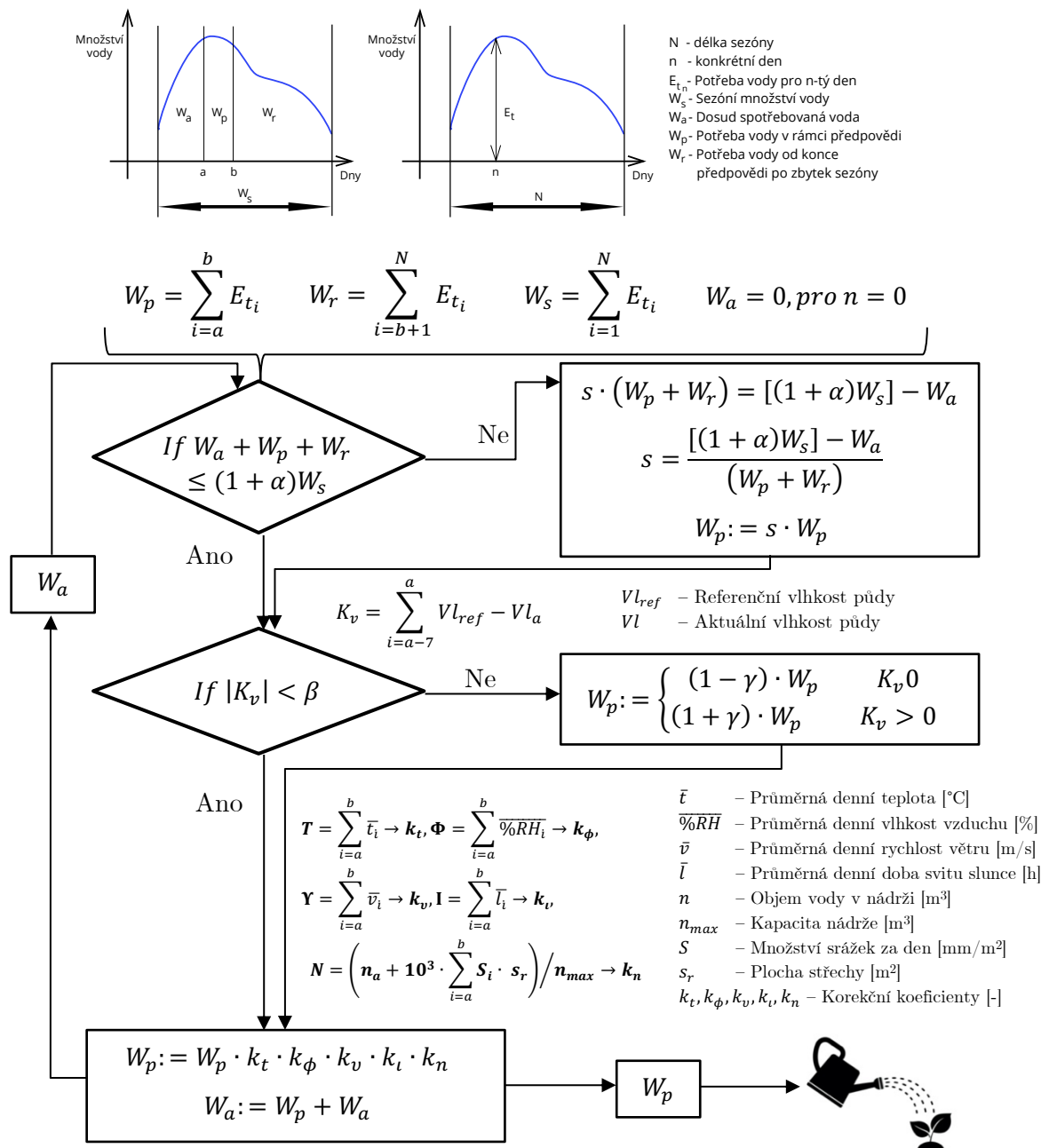
Nedostatek vody představuje nejvýraznější enviromentální faktor, který omezuje růst a výnosy plodin. Pro jejich zvýšení je zásadní dobře načasovaná dostupnost vody. V minulém století spotřeba vody oproti nárůstu obyvatel rostla dvojnásobně. První odvětví, které tuto změnu pocítilo, bylo zemědělství, kde došlo ke snížení schopnosti udržet produkci potravin. Z toho důvodu vyvstala potřeba vývoje optimálních technik zavlažování. [127, 128, 129, 130]

Určení správného množství vody závisí především na klimatických faktorech s typicky vysokou mírou nejistoty. Pro výpočet potřeby vody se používá Allenova metoda založená na potenciální evaporizaci společně s plodinovým koeficientem. Tato metoda je orientovaná na maximální výnos bez ohledu na omezené množství vody a nemaximalizuje faktor množství výnosu na množství použité vody. Tyto nedostatky lze kompenzovat řízením na základě zpětné vazby ze zavlažovaného prostoru. [130, 131, 132, 133]

V roce 2019 byl publikován vylepšený optimalizační algoritmus spotřeby vody, který zohledňuje týdenní předpověď, dlouhodobý výhled cyklu plodin a výsledky agronomické prohlídky plodin. Skládá se ze tří částí. [130]

První část se týká krátkodobého a dlouhodobého plánování na základě předpovědi počasí. Sezónní množství vody W_s závisí na jednotlivých plodinách (viz: Obr. 3.1). Při každé kalkulaci dojde k výpočtu množství vody, která bude dodána v rámci předpovědi deštěm W_p , množství vody, které zbývá v rámci sezóny dodat W_r a z paměti se vyčte množství vody, které již bylo dodáno W_a . [130]

V druhé fázi se tyto hodnoty v součtu porovnají se sezónním množstvím vody, které je třeba plodině dodat. Vzhledem k tomu, že se hodnota W_s považuje za konstantní, může W_p , vlivem silných dešťů, vést k časově lokálnímu překročení množství a výraznému snížení množství vody pro zbývajících období. Tomu se zabráňuje kontrolou překročení maximální hranice s prahovou hodnotou α . V případě přebytku algoritmus proporcionálně sníží W_p a W_r tak, aby odpovídaly W_s . [130]

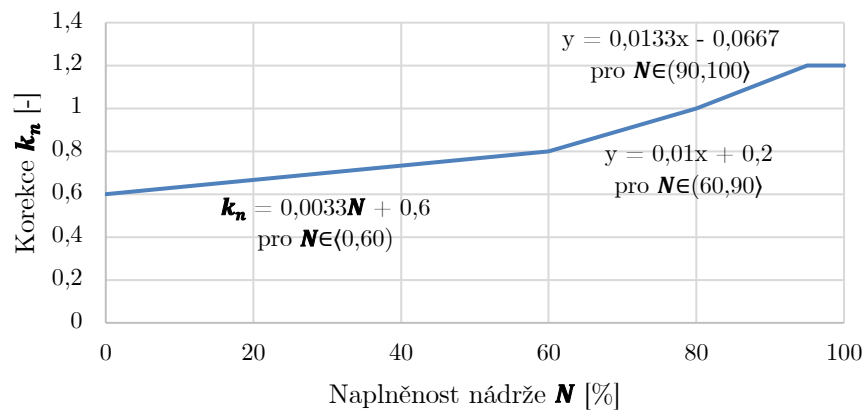


Obr. 6.1.: Řídicí algoritmus optimalizace zavlažování reflektující vliv počasí a akumulovaného množství vody

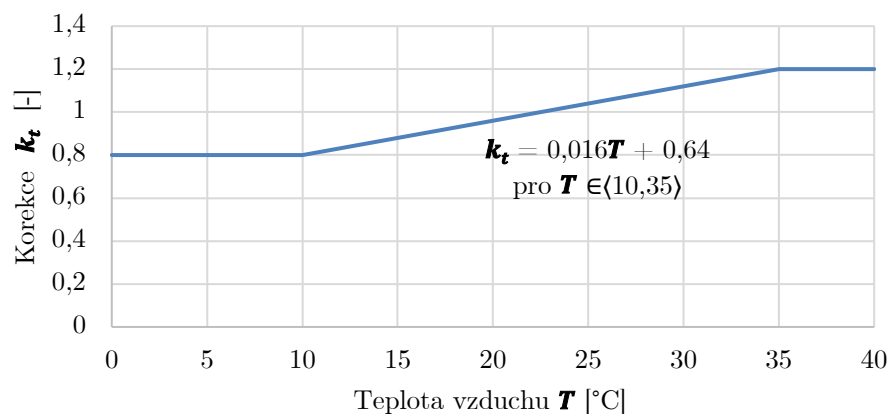
Třetí část se týká optimalizace na základě zpětné vazby ze zavlažované plochy. Obecně lze využít dostupné údaje: rychlost růstu, vodní potenciál rostliny, vlhkost půdy. Algoritmus vyžaduje referenční hodnotu řídicího parametru a hodnoty získané ze zavlažované oblasti týden nazpět. Velikost rozdílů se sečte a porovná, zda nepřesahuje prahovou hodnotu β . V případě překročení se množství vody zvýší nebo sníží o parametr γ . [130]

Osobně jsem algoritmus doplnil o čtvrtou fázi, která reflektuje množství akumulované vody s ohledem na aktuální předpověď a vydává doporučení, zda je nutné s vodou šetřit či nikoli. Uživateli je umožněno míru šetření upravovat referenčním množstvím vody v nádržích, které je zlomové pro rozhodnutí, zda šetřit nebo ne.

Algoritmus zohledňuje množství vody, které je systém v případě deště schopen akumulovat. Zároveň reflektuje vliv vlhkosti vzduchu, rychlosti větru a oblačnost dle návrhu korekčních faktorů v kapitole 3.2 (Obr. 3.3, Obr. 3.4 a Obr. 3.5). Korekční faktory pro teplotu jsem navrhl dle normy DIN 18035-2 (Obr. 3.2) a korekční faktor pro naplněnost nádrže jsem navrhl dle vlastních zkušeností.



Obr. 6.2.: Graf korekce na množství akumulované vody



Obr. 6.3.: Graf korekce na teplotu vzduchu

7. ZÁLOHOVÁNÍ MĚŘENÝCH DAT

Získaná data ze senzorů řídicí deska používá pro plánování zavlažování. Mým požadavkem bylo, aby měřená data byla ukládána a bylo je možné použít pro pozdější analýzu, hledání závislostí a zlepšení algoritmu hospodaření s dešťovou vodou.

Analýzou reálných dat lze zjistit, jak rychle dochází k vysychání půdy vlivem teploty, vlhkosti vzduchu nebo rychlosti větru. Jak dobře je zemina schopna vodu akumulovat či propouštět. V případě nezvykle vysoké ztráty vody v nádržích lze odhalit jejich poškození. Lze určit množství vody, která je třeba ke smáčení střechy před tím, než dojde k odtoku do nádrží. Dále pak dopravní zpoždění nátoky vody pro mrhnutí, mírné nebo intenzivní deště.

První způsob ukládání měřených dat je lokální uložení u řídicího systému. To by v případě potřeby analyzovat data bylo nutné fyzicky navštívit a data vyčíst. V dnešní době s rozvíjícím se internetem věcí je častější způsob ukládání dat do sdíleného uložení, které je dostupné online.

Posledním mým požadavkem bylo grafické zobrazení měřených hodnot a s tím spojený vizualizační panel, na kterém bude možné zobrazit aktuální i historické hodnoty.

7.1. CLOUDOVÉ ŘEŠENÍ

Cloudový způsob ukládání dat umožňuje přístup z různých platform i míst. Data jsou uložena v datovém centru, které provozuje poskytovatel cloudové služby. Do určité velikosti jsou datová uložení zdarma, později uživatel platí dle velikosti datové schránky případně dle počtu přístupů na server s požadavky. [134]

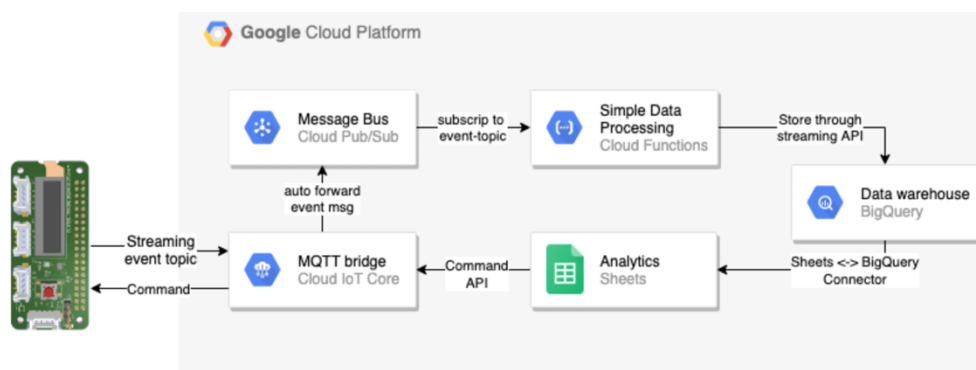
7.1.1. THINGSPEAK

Platforma Thingspeak slouží pro agregování, analýzu a vizualizaci dat v cloudu. Umožňuje analyzovat a zpracovávat data pomocí MATLABu. Dle počtu přístupů nabízí několik verzí licence. Neplacená verze umožňuje až 8200 zpráv za den s minimálním odstupem 15 sekund. Placená licence umožňuje upload dat každou sekundu a jeho cena závisí na charakteru použití. Nejlevnější je studentská licence za 79 \$/rok a dále domácí za 95 \$/rok. [135]

7.1.2. GOOGLE CLOUD

Jeden z produktů firmy Google je Cloud. Nabízí širokou paletu nástrojů a možností, jakým způsobem je možné s daty pracovat. Vysoký výpočetní výkon, rozsáhlé uložení, databázový systém, analýza v reálném čase nebo strojové učení. U různých služeb se velmi liší cena i nezaplatněné množství výpočetních operací. Lze si velmi detailně zvolit konkrétní množství dat či výpočtů, které se budou v rámci aplikace

realizovat a Google přesně vypočítá cenu, která za službu náleží. Při správném nastavení se platí pouze za to, co se reálně využije. [136]

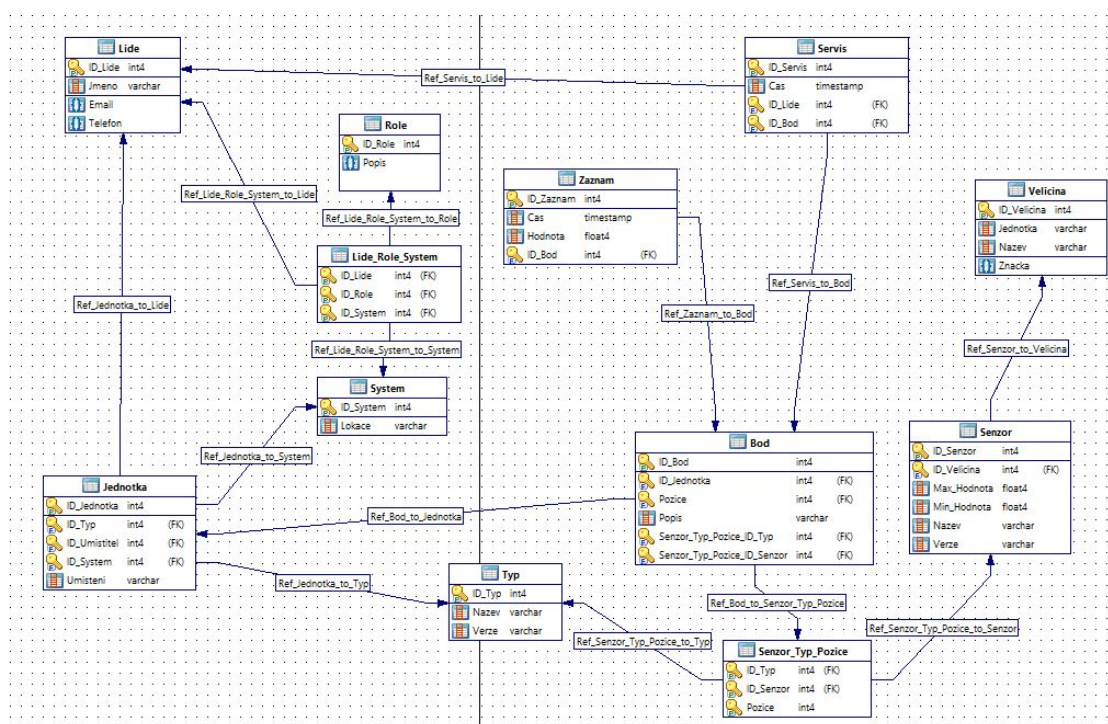


Obr. 7.1.: Příklad struktury služeb sloužící pro ukládání dat z RaspberryPi Zero přes IoT do Google Sheets [137]

7.1.3. SQL DATABÁZE + GRAFANA

SQL je dotazovací jazyk sloužící pro správu a organizaci dat uložených v databázi počítače. Ukládaná data musí mít určitou strukturu a měly by mezi nimi vzniknout určité relace. SQL jazyk pak umožňuje snadno řešit dotazy nad databází a velmi rychle vyhledávat různé skupiny dat. Grafana je open source systém umožňující mimo jiné vytváření grafických výstupů z dat uložených v databázi právě pomocí dotazovacího jazyka SQL. Ke zprovoznění této varianty je třeba počítačového serveru, který lze vytvořit nebo pronajmout. [138, 139]

V případě potřeby či výhodnosti s ohledem na návaznost na další systémy jsem vypracoval vzorovou strukturu databáze pro několik řízených systémů, několik typů uživatelů, různé druhy senzorů kombinující různé měřené veličiny, různé vývojové modely senzorů i záznamy o servisu.



Obr. 7.2.: Databázová struktura ukládání dat

7.1.4. GOOGLE SPREADSHEET

Další produkt, který Google nabízí je spreadsheet. Jedná se o online dostupný tabulkový soubor. Je možné k němu vzdáleně přistupovat pomocí API. Lze získat přístup k jednotlivým listům uvnitř sdíleného souboru tabulek na Google uložišti, do kterého je možné zapisovat či měnit formátování buněk. [140]

Počet přístupů je limitován na 300 za minutu s doporučenou maximální velikostí zprávy 2 MB a tato služba je zcela zdarma.

7.2. VÝBĚR CLOUDOVÉHO ŘEŠENÍ

Mé rozhodnutí výběru cloudového řešení bylo především ovlivněno cenou dané varianty, a proto jsem se rozhodl využít řešení Google spreadsheet přístupu přes API. Oproti Grafaně ztrácí jednoduchost tvorby grafů, která v Goodle spreadsheetu vyžaduje trochu zručnosti a oproti Thingspeaku ztrácí možnost využít výpočetní výkon MATLABu pro optimalizaci hospodaření s dešťovou vodou. Vzhledem k tomu, že primárně má systém fungovat nezávisle, a to i v případě výpadku internetového připojení, je vhodnější náročnější výpočty realizovat na lokálním RaspberryPi, nežli na cloudovém uložišti. MATLAB navíc umí ze skriptu generovat kód C/C++ a tak je převod na lokální platformu výrazně jednodušší.

Data ze senzorů jsou ukládána do příslušných registrů na řídicí desce Arduino a následně odeslány do RaspberryPi ve formátu, který jsem pro tuto výměnu dat definoval. Pakliže modul měří více veličin, jsou ve zprávě odděleny znakem středník(;) a jednotlivé moduly jsou od sebe odděleny znakem lomeno(/). Moduly jsou seřazeny dle své adresy na Modbus sběrnici. Každá adresa má svůj vyhrazený slot mezi dvěma znaky lomeno (/).

1836;80/276;272;278/1942;72

Předchozí zpráva symbolizuje zprávu s hodnotami třech modulů. První modul má dva senzory, druhý modul má tři senzory a třetí modul má dva senzory. Moduly jsou ve zprávě seřazeny podle adres na Modbus lince. RaspberryPi tuto zprávu přijímá a jednotlivé hodnoty zapisuje do řádku ve spreadsheetu. Na první místo řádku umístí čas a na druhý datum. Jednotlivé moduly oddělí formátováním buňky ve formě tlustého okraje.

| | A | B | C | D | E | F | G | H | I |
|---|----------|------------|------|----|-----|-----|-----|------|----|
| 1 | 16:10:27 | 30.11.2022 | 1836 | 80 | 276 | 272 | 278 | 1964 | 72 |
| 2 | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | |

Obr. 7.3.: Ukázka odeslaných dat z měřicích modulů

RaspberryPi, ani první list Google Spreadsheetu neinterpretuje význam dat, ten je mu doplněn až na dalších listech, kde je možné realizovat výpočty či vykreslení do grafů.

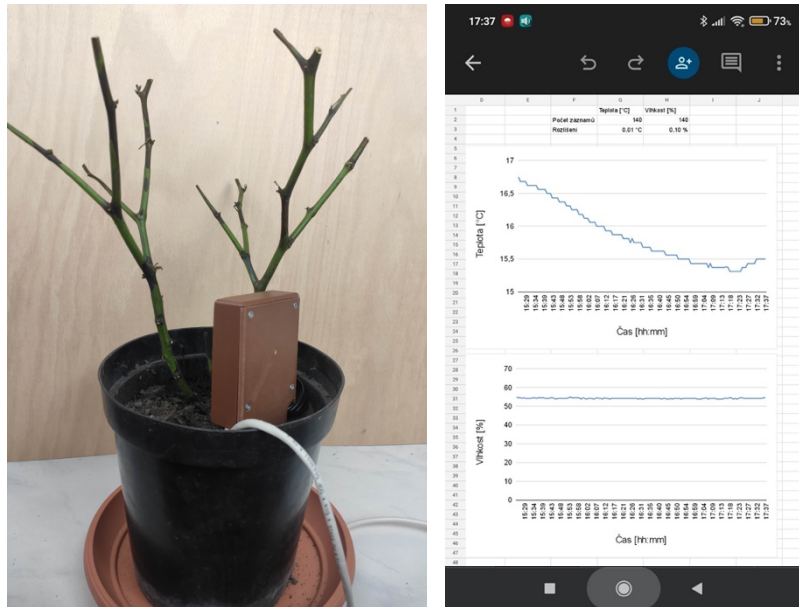
7.3. VIZUALIZAČNÍ PANEL

Měřená data jsou agregována v tabulkovém souboru. Nad těmito daty je možné v reálném čase dělat analýzu pomocí funkcí vkládaných do listů spreadsheetu. Takto

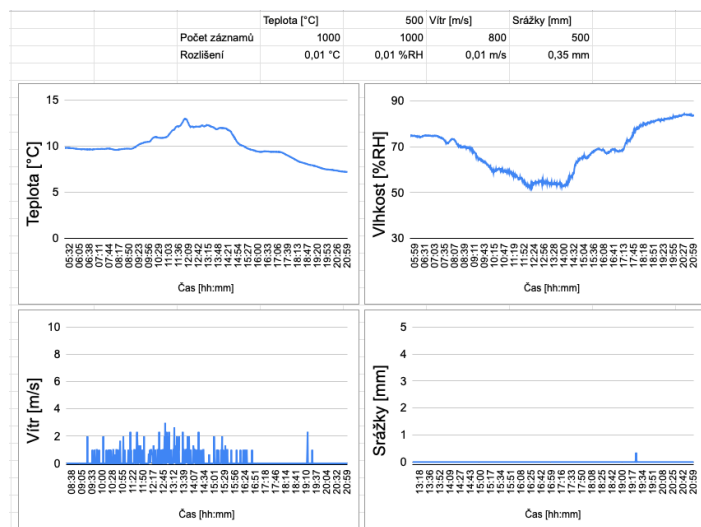
jsem vypracoval i živě aktualizovaný vizualizační panel pro každý sensorový modul. Pro každou měřenou veličinu lze jednotlivě zvolit počet historických hodnot od současného okamžiku, které se zobrazí do grafu. Ten se s každou nově zapsanou hodnotou aktualizuje.

Výhodou řešení od Googlu je možnost přístupu z různých platform. Po analýzu dat a programování výpočtů je uživatelsky nejprívětivější počítač, pro náhled a kontrolu dat je nejrychlejší telefon. Pro trvalý náhled je nejvhodnější použít tablet. Tabulky lze libovolně přesouvat a snadno tak modifikovat vzhled panelu.

Pro účely ukázky měřených dat jsem zvolil zapojení půdního modulu v květináči s přezimující chilli paprikou Scorpion Trinidad Moruga. Ta byla na konci plodící sezóny zakrácena a zbavena listů. V průběhu února začne znovu obrůstat. Aby se tak stalo, je třeba ji udržovat v teple, na světle a s vlhkostí půdy okolo 50 %. Srážkový modul jsem umístil do venkovního prostředí, aby měřil reálná data o teplotě, vlhkosti, rychlosti větru a srážkách.



Obr. 7.4.: (Zleva) chilli paprika s půdním modulem, vizualizační panel při přístupu z telefonu zobrazující teplotu a vlhkost půdy měřenou půdním modulem



Obr. 7.5.: Hodnoty veličin měřené srážkovým modulem zobrazené na vizualizačním panelu při přístupu z PC

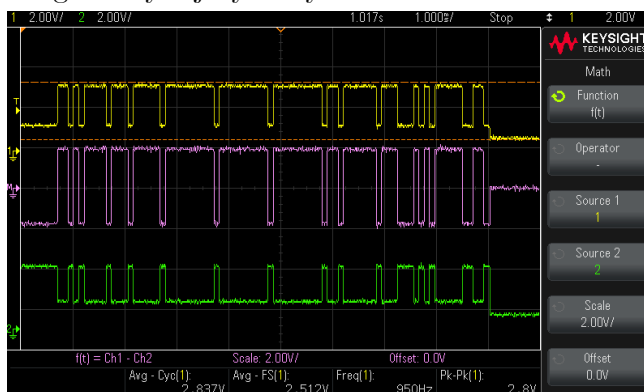
8. ZÁVĚR

V této práci jsem se zabýval návrhem, tvorbou a zprovozněním modulového senzoro-
vého systému pro hospodaření s dešťovou vodou. Hlavní motivací je úspora vody pro
závlahu s cílem použít pouze dešťovou vodu bez nutnosti zavlažování externími zdroji.
Tato potřeba vyvstává s intenzivnějšími obdobími sucha, ale i novými zákony, které mo-
hou odběr vody pro závlahu omezit. Povědomí občanů v této oblasti v posledních letech
roste a zájem o akumulaci vody je podpořen i dotačními tituly.

V první části práce jsem se zabýval způsoby snížení potřeby vodních zdrojů. Při pou-
žití správného způsobu zavlažování, lze snížit spotřebu vody až o 80 % a zároveň zvýšit
produkcí prodiv. Mezi tyto způsoby patří především podpovrchové rozvody s kontinuální
a plošnou propustí vody. Důležitou roli hraje i výběr rostlin a krajiny tvorba. V městském
prostředí, kde jsou plochy vsaku omezeny existující způsoby, jak vodu efektivně využít
v zelených páslech podél vozovky.

Dále jsem provedl průzkum trhu a porovnal komerčně dostupné zavlažovací systémy.
Ve většině případů se jedná o automatické zavlažovací technologie na bázi časových ho-
din, které nereflktují omezené množství vody určené pro závlahu. Jejich cena (platné
pro září 2022) se pohybuje od hobby řešení za 10 tis. Kč až po profesionální řídicí systémy
za 40 tis. Kč a výše. Systém, který vyšel z průzkumu jako nejsofistikovanější je od firmy
Hunter - Irimon. Jako jediný do strategie zalévání zahrnuje předpověď počasí a jeho cena
je příznivá.

Poté jsem provedl rešerši měřicích senzorů a vybral vhodné varianty pro použití v mě-
řicích modulech. Pro měření srážek jsem zvolil člunkový srážkoměr, jehož návrhem jsem
se podrobně zabýval v kapitole 4.7.1. Na základě analytického vyjádření geometrie, hmot-
nosti a momentů sil působících na překlopení člunku, jsem sepsal skript v MATLABU.
Pomocí něj je možné simulovat překlopení člunku a vypočítat rozlišení snímače pro jeho
různé tvary a rozměry. Na základě analýzy jsem zvolil vyhovující tvar s rozlišením
0,35 mm, viz. Obr. 4.30. Dále jsem vybral vhodný senzor teploty a vlhkosti vzduchu. Pro
půdní modul jsem se rozhodl pro kapacitní vlhkoměr a voděodolný teploměr. Pro měření
výšky hladiny v nádrži jsem zvolil ultrazvukový senzor a pro měření rychlosti větru jsem
vybral anemometr s magnetickým jazýčkovým kontaktem.



Obr. 8.1.: Komunikace Modbus – žádost o výčet senzoru

Dále jsem jako komunikační protokol mezi jednotlivými moduly zvolil Modbus. Velikost FLASH paměti použité desky Arduino NANO nebyla bohužel dostatečně velká pro zkompilování knihovny Modbus, tak jsem jednotlivé příkazy pro čtení, zápis, broadcast a k nim příslušné odpovědi naprogramoval a odladil od základu sám. Jednotlivé moduly je díky podporovanému komunikačnímu protokolu Modbus možné použít i v jiných aplikacích s různým řídicím systémem.

Dále jsem vypracoval blokové schéma, ve kterém jsem upřesnil jednotlivé moduly, navrhl jsem způsob zálohování dat a vyčítání předpovědi počasí prostřednictvím RaspberryPi.

Než jsem přikročil k návrhu vlastních modulů, věnoval jsem se použití sensorového systému a zpracování několika odlišných vzorových instalací. Zároveň jsem vytvořil tabulkový soubor, který slouží k návrhu optimální velikosti nádrže na dešťovou vodu. Počítá s meteorologickými daty z ČHMÚ a simuluje dvouroční vodní bilanci zvolené velikosti nádrže. Výsledkem je množství vody, které je třeba dodat z externích zdrojů. Výpočet jsem doplnil o ekonomickou část, kde lze v horizontu 20 let nalézt optimální velikost nádrže s ohledem na velikost investice a kalkulovanou velikost úspor.

V druhé části práce jsem se věnoval návrhu jednotlivých modulů. S ohledem na umístění sensorů do venkovního prostředí jsem volil materiály odolné UV záření, součástky s dostatečným teplotním rozsahem i spojovací materiál v nerez. Jako univerzální řídicí desku jsem zvolil Arduino NANO. Poté jsem navrhl napájecí obvod s impulzním stabilizátorem a komunikační obvod převádějící signál mezi napětovou úrovní TTL a úrovní sběrnice RS-485. Veškeré používané senzory jsem nejprve otestoval a ověřil, že budou vhodné pro můj projekt. Následně jsem vypracoval schéma zapojení pro půdní sensorový modul, modul hladiny v nádrži a modul výstupních signálů. Pro tyto moduly jsem vyhotovil desku plošného spoje, kterou jsem osadil součástkami a oživil. Zároveň jsem pro moduly navrhl obsah registrů Modbus a definoval v jakých jednotkách budou ukládat data. Mimo registry obsahující hodnoty sensorů jsem doplnil i registry, pomocí kterých lze upravovat chování jednotlivých modulů.



Obr. 8.2.: Osvit, leptání a hotový dvouvrstvý plošný spoj

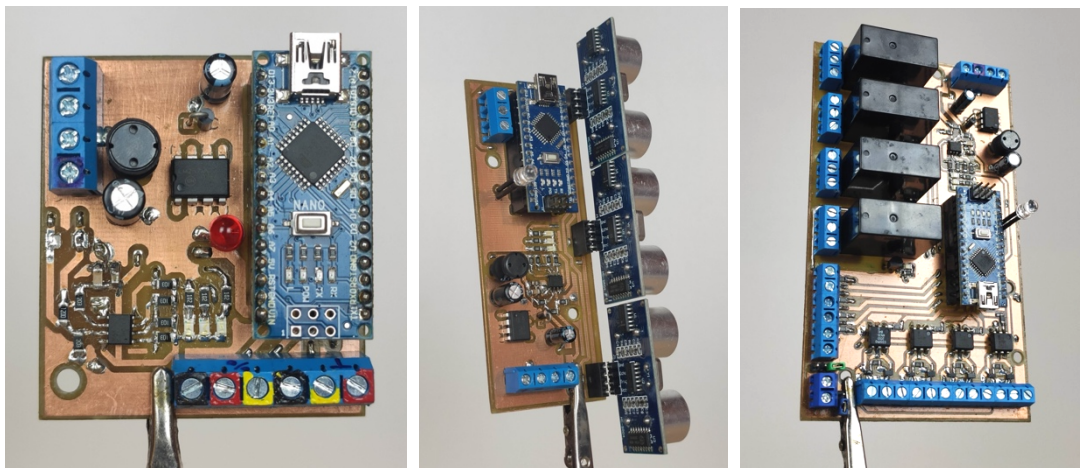
Pro vytvoření srážkového modulu bylo třeba integrovat několik sensorů do jednoho pouzdra. Zvolil jsem trubku s průměrem 200 mm, do které jsem integroval člunkový srážkoměr a sběrací trychtýř. Navrhl jsem model radiačního štítu pro sensor teploty a vlhkosti vzduchu. Anemometr jsem umístil na hliníkovou tyč mimo pouzdro modulu tak, aby jím nebyl ovlivňován.

V další části jsem se zabýval výběrem internetové předpovědi počasí. Rozhodl jsem se pro norský portál yr.no, z kterého pomocí API vyčítá RaspberryPI předpověď ve

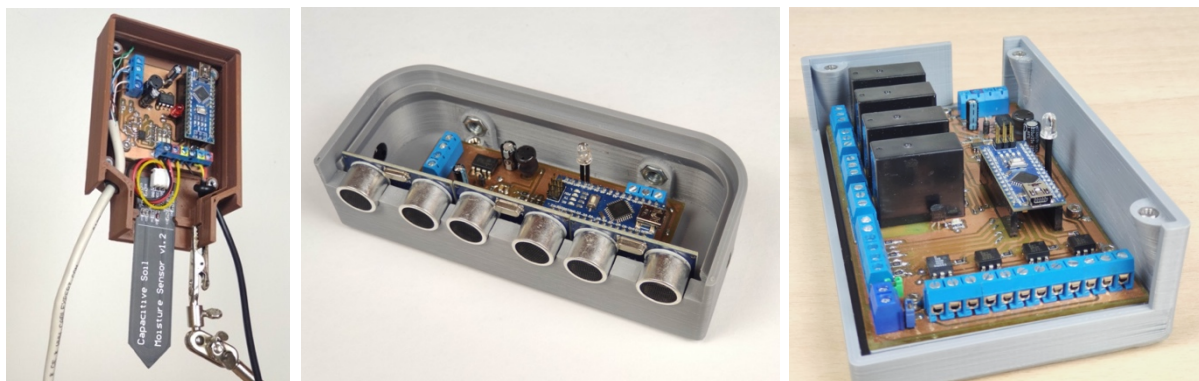
formátu JSON na následujících 10 dní a odesílá ji na žádost do srážkového modulu, který řídí celý systém.

Poté jsem se věnoval zapracování optimalizačního algoritmu spotřeby vody. Jako základ jsem zvolil publikovaný algoritmus [130], který jsem doplnil o čtvrtou fázi, která reflektuje množství akumulované vody společně s předpovědí počasí a vyhodnocuje, zda je třeba s vodou šetřit či nikoli.

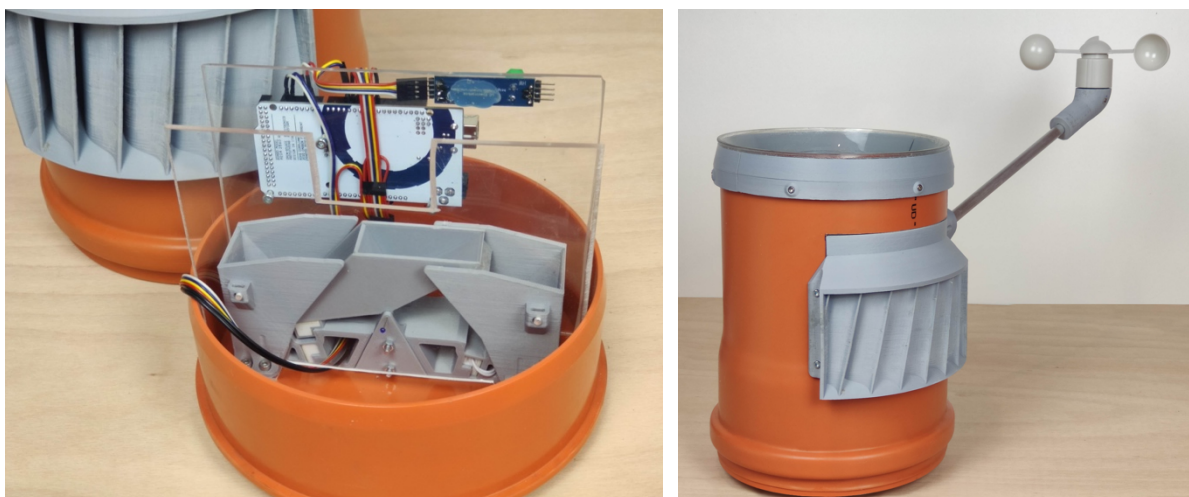
Poslední část se týkala zálohování měřených dat. Rozhodl jsem se využít produktu Google Spreadsheet, do kterého lze zapisovat data pomocí API. Zároveň lze nad daty dělat analýzu a graficky je zpracovávat. Toho jsem využil pro tvorbu vizualizačního panelu.



Obr. 8.3.: Plošné spoje modulů



Obr. 8.4.: Moduly v krytech



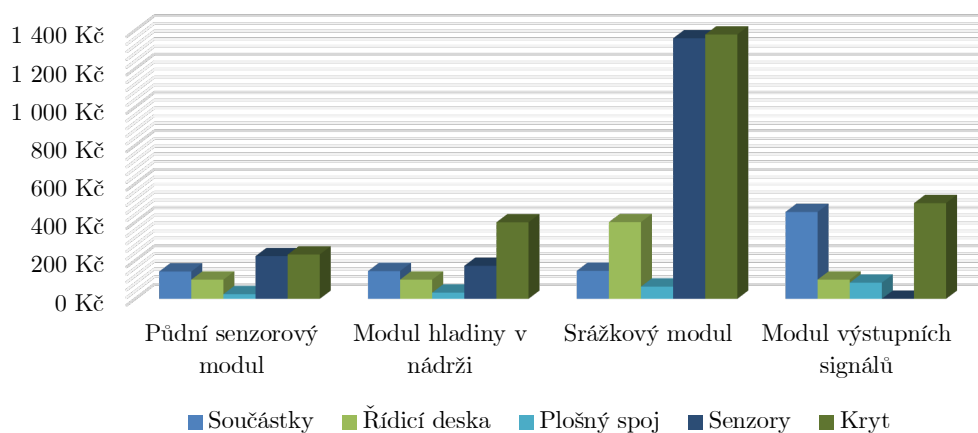
Obr. 8.5.: Srážkový modul

9. DISKUZE

Neboť mým cílem bylo vytvořit cenově dostupný systém, rozhodl jsem se na konci práci provést ekonomickou analýzu a vyčíslit cenu jednotlivých modulů. Cenu jsem rozdělil na několik částí. První z nich jsou elektrotechnické součástky. Ty jsem vybíral tak, aby i v dnešní době skladových nedostatků byly stále dostupné. Při ohlédnutí v lednu 2023 byly jejich skladové zásoby stále dostačující. Druhou položkou je řídicí deska, v mém případě Arduino NANO a Mega. Tyto desky jsou do modulu vkládány a připojeny na řadové kolíky, což v případě potřeby umožňuje snadno vyměnit nebo použít v jiné aplikaci. Další položkou je plošný spoj, který jsem pro prototypy vyhotovil svépomocí, po odladění v testovací fázi budou vyhotoveny ve větším množství profesionálním způsobem. Následující položkou tvoří senzory a poslední je kryt, který je ve většině případů vyhotoven na 3D tiskárně. Započítal jsem cenu tiskového času i cenu materiálu.

Tab. 9.1.: Položková cena modulů

| | Půdní sensorový modul | Modul hladiny v nádrži | Srážkový modul | Modul výstupních signálů |
|---------------|-----------------------|------------------------|-----------------|--------------------------|
| Součástky | 142 Kč | 145 Kč | 146 Kč | 453 Kč |
| Řídicí deska | 100 Kč | 100 Kč | 400 Kč | 100 Kč |
| Plošný spoj | 25 Kč | 32 Kč | 64 Kč | 84 Kč |
| Senzory | 223 Kč | 172 Kč | 1 358 Kč | 0 Kč |
| Kryt | 231 Kč | 399 Kč | 1 378 Kč | 499 Kč |
| Celkem | 721 Kč | 848 Kč | 3 346 Kč | 1 136 Kč |



Obr. 9.1.: Porovnání cenových položek modulů

Nejdražší je srážkový modul. To je dáno především vysokou cenou za 3D tisk pro radiační štít a člunek. Modul obsahuje i výkonnější řídicí desku, nahrazuje tedy řídicí systém, které je v systémech automatického zavlažování dodáván samostatně. U modulu

hladiny v nádrži by bylo vhodné optimalizovat velikost pouzdra, které tvoří jeho největší položku, podobně jako pro modul výstupních signálů. V systému zavlažování je typicky největší počet půdních sensorových modulů. Snížení ceny by bylo tedy vhodné přednostně řešit právě u tohoto modulu.

Při porovnání s cenami komerčně dostupných systémů uváděných v kapitole 2.1 je mé řešení cenově dostupnější. Nabízí možnost propracovanějšího způsobu řízení zavlažování a lze systém snadno modifikovat pro řízení jiných aplikací. Benefitem je i vizualizační panel a přístup k historicky měřeným datům pro potřeby pozdější analýzy.

V současné chvíli provádím testování jednotlivých modulů, zkouším odolnost a přesnost měření. Dle aktuálního stavu všechny senzory měří příslušné veličiny s dostatečnou přesností a v této oblasti se zatím nevyskytuje žádný problém. Bylo by vhodné senzory podrobit porovnání s kalibrovanými měřidly a zjistit vzájemnou odchylku. Pouzdra jsou vyhotovena z materiálu ASA, který dlouhodobě testuji ve venkovním prostředí a po třech letech nejví známky degradace. U modulu hladiny v nádrži očekávám vznik koroze vlivem zvýšené vlhkosti prostředí a s ní související poruchu ultrazvukových sensorů. To byl jeden z důvodů, proč jsem do modulu hladiny v nádrži umístil trojici těchto snímačů. Jejich cena je nízká a výměna velmi jednoduchá. Pakliže k první poruše dojde v řádu nižších jednotek měsíců, bude nutné zvolit jiný princip měření výšky hladiny, který bude robustnější, avšak očekávám jeho vyšší cenu. Jediný ze sensorů, který zatím nebyl plně otestován přírodními podmínkami je člunkový srážkoměr. K překlápění vlivem zachytávání stékající vody dochází.



Obr. 9.2.: Člunkový srážkoměr při testování

V přírodních podmínkách k němu zatím došlo pouze jednou při mrholení. Je třeba ověřit jeho vypočítanou hodnotu rozlišení v kapitole 4.7.1. To lze provést souběžným měřením srážkového modulu a kalibrovaného srážkoměru a vyhodnotit, zda příslušný počet překlápění člunku odpovídá měřenému množství kalibrovaného srážkoměru. Zvýšení přesnosti či detekování začátku deště ještě před prvním překlápěním člunku je možné doplněním senzoru o tenzometrické měření jeho hmotnosti. Objem potřebný k překlápění člunku je 10,3 ml. Případně pro nižší intenzity srážek by bylo možné použít snímač s kapacitním nebo optickým principem, popřípadě systém počítající kapky vody. [50, 51, 141]

Při konstrukci krytu srážkoměru jsem použil odpadní trubku KGEM, která se ukázala svým tvarem pro tento účel ideální. Dle vyjádření výrobce lze trubky skladovat ve volném prostranství nejdéle po dobu dvou let, jinak je třeba výrobek chránit proti UV záření. Zároveň při teplotách pod -5°C roste jejich křehkost [142]. Je tedy vhodné povrch materiálu opatřit venkovním nátěrem. Pakliže bude docházet k degradaci materiálu, bude nutné hledat jeho alternativu.

V jarních měsících 2023 začnu uvádět systém do provozu v lokalitách Velký Osek a Červené Pečky dle návrhu v kapitolách 3.3.2 a 3.3.3. Algoritmus pro snížení spotřeby vody použiji dle kapitoly 6.1. Po několika nezávislých rozhovorech s odborníky na řízení vyplynul z debat návrh na řízení systému pomocí neuronové sítě. Ta umí zpracovávat několik různých vstupních údajů a na jejich základě určit vhodný výstup. Vzhledem k velkému počtu vstupních parametrů do řídicího algoritmu je neuronová síť jedním z možných usnadnění výpočtu. Avšak i ta potřebuje množství příkladů pro své učení. Můj systém bude v roce 2023 sbírat data a na jejich základě bude možné hledat vhodný optimalizační model.

V příštích letech lze provést analýzu účinnosti optimalizačního algoritmu. Pro okrasné zahrady může být parametrem množství vody, které je třeba dodat z externích zdrojů, aby byla zajištěna prosperita rostlin. Lze tuto hodnotu porovnávat s minulými roky nebo jiným způsobem zavlažování a cílem je minimalizace této veličiny. Pro zeleninové zahrady lze pozorovat vliv řízení na velikost produkce. Zde je vhodnější porovnávat různé systémy řízení v průběhu jednoho roku z důvodu sezónních výkyvů produkce. Sledovaným kritériem může být velikost produkce, ale i spotřeba vody na množství plodin.

Bibliografie

- [1] A. Ruda, „Voda na Zemi,“ [Online]. Available: https://is.muni.cz/do/rect/el/estud/pdf/ps14/fyz_geogr/web/pages/07-voda.html. [Přístup získán prosinec 2022].
- [2] O. Vlasák, „Vodohospodářství v ČR je v porovnání s EU na vysoké úrovni,“ 19. března 2018. [Online]. Available: <https://www.nase-voda.cz/vodohospodarstvi-cr-je-porovnani-eu-na-vysoke-urovni/>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [3] Redakce TZB-info a ČTK, „Katastrofické sucho – MŽP chce dalších 3,5 miliardy na zadržování vody,“ 30. dubna 2020. [Online]. Available: <https://voda.tzb-info.cz/destova-voda/20596-katastroficke-sucho-mzp-chce-dalsich-3-5-miliardy-na-zadrzovani-vody>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [4] ČTK, „Sucho v Evropě je nejhorší za nejméně 500 let. Česko je podle odborníků zasaženo relativně málo,“ 23. srpna 2022. [Online]. Available: https://www.irozhlas.cz/veda-technologie/priroda/sucho-evropska-komise-vystraha-zmena-klimatu_2208231750_afo?fbclid=IwAR0lUEguUGWyOkGQT5WHztSinu3dObycgIgT_TJZ_DLm_-ELOU0G7_pPAXM. [Přístup získán prosinec 2022].
- [5] K. Hávová, „Rok sucha. Čína zažívá dopady klimatické změny, stojí doprava i energetika,“ 22. srpna 2022. [Online]. Available: <https://forbes.cz/rok-sucha-cina-zaziva-dopady-klimaticke-zmeny-stoji-doprava-i-energetika/>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [6] ČTK, „Sucho přichází nepravidelně, jedno z nejhorších bylo v roce 1947,“ 30. dubna 2020. [Online]. Available: <https://ekolist.cz/cz/zpravodajstvi/zpravy/sucho-prichazi-nepravidelne-jedno-z-nejhorsich-bylo-v-roce-1947>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [7] ČTK, „Na boj proti suchu vynaloží ministerstvo životního prostředí přes 10 mld. Kč,“ 26. dubna 2022. [Online]. Available: <https://www.ceskenoviny.cz/zpravy/na-boj-proti-suchu-vynalozi-ministerstvo-zivotniho-prostredi-pres-10-mld-kc/2197507>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [8] R. Kořínek, „Na prevenci proti suchu vyčlenil Karlovarský kraj pět milionů korun,“ 10. října 2022. [Online]. Available: <https://nasregion.cz/na-prevenci-proti-suchu-vycclenil-karlovarsky-kraj-pet-milionu-korun-298951/>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [9] Redakce TZB-info, „Dešťová voda,“ [Online]. Available: <https://voda.tzb-info.cz/destova-voda>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [10] M. Kraus, „Odvod dešťové vody: Co říká zákon?,“ 5. května 2022. [Online]. Available: <https://zakra.cz/blog/odvod-destove-vody-zakon/>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [11] Státní fond životního prostředí, „Závazné pokyny pro žadatele a příjemce podpory programu Nová zelená úsporám v rámci Národního plánu obnovy RODINNÉ DOMY, str. 29,“ 1. června 2022. [Online]. Available: https://novazelenausporam.cz/files/documents/storage/2022/06/07/1654591457_NZÚ%20RD%20Závazné%20pokyny_01-06-2022.pdf. [Přístup získán prosinec 2022].
- [12] Státní fond životního prostředí, „Dotace pro vlastníky či stavebníky rodinných a bytových domů na využití srážkové a odpadní vody v domácnosti i na zahradě,“ 2017. [Online]. Available: <https://www.dotacedestovka.cz>. [Přístup získán prosinec 2022].

- [13] Státní fond životního prostředí, „Dotace pro rodinné domy,“ [Online]. Available: <https://novazelenausporam.cz/rodinne-domy/>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [14] J. Novotný, „Kraje budou moci za sucha regulovat spotřebu vody včetně zákazu zalévání,“ 15. února 2020. [Online]. Available: <https://www.novinky.cz/domaci/clanek/kraje-budou-moci-za-sucha-regulovat-spotrebu-vody-vcetne-zakazu-zalvani-40313569>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [15] Město Kolín, „Omezení využití pitné vody,“ 28. března 2020. [Online]. Available: http://www.mukolin.cz/prilohy/UredniDeska11765/158395.2020_28035.20_oop_omezeni_vyuziti_pitne_vody.pdf. [Přístup získán září 2020].
- [16] J. Jirků, „Žádost o omezení užívání pitné vody,“ 9. března 2020. [Online]. Available: https://www.brezany1.cz/wp-content/uploads/2020/03/priloha_761015540_0_Zadost-o-omezeni-uzivani-pitne-vody.pdf. [Přístup získán prosinec 2022].
- [17] Alphabet Inc., „Google Trends,“ prosinec 2022. [Online]. Available: <https://trends.google.cz/trends/explore?date=2010-01-01%202022-10-18&geo=CZ&q=děšť,sucho>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [18] Alphabet Inc., „Google Trends,“ prosinec 2022. [Online]. Available: <https://trends.google.cz/trends/explore?date=2010-01-01%202022-10-18&geo=CZ&q=srážky,nádrže,dešťovka>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [19] Clever Prototypes, „Co je Zavlažování?,“ 2022. [Online]. Available: <https://www.storyboardthat.com/cs/innovations/zavlazeni>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [20] Úsporné Závlahy s.r.o., „Historie zavlažování,“ 8. srpna 2020. [Online]. Available: <https://usporne-zavlahy.cz/historie-zavlazovani/>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [21] Wikipedia, „Zavlažování - Irrigation Zavlažování,“ 2022. [Online]. Available: <https://cs.abcdef.wiki/wiki/Irrigation>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [22] H. Hrudová, „Závlahové systémy s využíváním dešťové vody,“ 7. února 2017. [Online]. Available: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/67954>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [23] R. Bhateja, "Top 15 Most Important Events in Ancient Mesopotamia," 14. listopadu 2022. [Online]. Available: <https://www.ancienthistorylists.com/mesopotamia-history/events-ancient-mesopotamia/>. [Accessed prosinec 2022].
- [24] K. Millard, "Farming," [Online]. Available: <http://www.users.waitrose.com/~millard/egypt/pages/farming.html>. [Accessed prosinec 2022].
- [25] M. Francis, „Archimedes Screw Water Irrigation Method,“ 23. prosince 2014. [Online]. Available: <https://thehomesteadsurvival.com/archimedes-screw-water-irrigation-method/>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [26] D. A. Bainbridge, Úsporné zavlažování zahrady - Jak ušetřit až 90 procent vody, Sv. 1 z 2978-80-7549-121-3, Esence, 2016.
- [27] Filament ID s.r.o., „Kapková závlaha,“ [Online]. Available: <https://www.ukapovka.cz/>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [28] B. Lancaster, „Before & after photos of green infrastructure in Dunbar/Spring,“ 11. ledna 2022. [Online]. Available: <https://dunbarspringneighborhoodforesters.org/2022/>

- 01/before-after-photos-of-green-infrastructure-in-dunbar-spring/. [Přístup získán prosinec 2022].
- [29] B. Lancaster, „Water Harvesting,“ [Online]. Available: <https://dunbarspringneighborhoodforesters.org/work-learn-stewarding-parties-guides/water-harvesting/>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [30] C. Childress, „Curb Cuts for Water Harvesting, Cleansing,“ 9. března 2021. [Online]. Available: <https://greenbeanconnection.wordpress.com/2021/03/09/curb-cuts-for-water-harvesting-cleansing/>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [31] GARDENA s.r.o., „O značce GARDENA,“ [Online]. Available: <https://www.gardena.com/cz/o-nas/gardena/>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [32] GARDENA s.r.o., „Automatické zalažování - Zahrada,“ [Online]. Available: <https://www.gardena.com/cz/produkty/zavlaha/automatic-irrigation/#garden>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [33] GARDENA s.r.o., „Zavlažovací počítače,“ [Online]. Available: <https://www.gardena.com/cz/produkty/zavlaha/rizeni-zavlazovani/>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [34] Kärcher spol. s.r.o., „O společnosti Kärcher,“ [Online]. Available: <https://www.karcher.cz/cz/o-nas/o-firme/o-spolecnosti-kaercher.html>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [35] Kärcher spol. s.r.o., „Automatické zavlažování,“ [Online]. Available: <https://www.karcher.cz/cz/dum-a-zahrada/zavlazovaci-systemy/automaticke-zavlazovani.html>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [36] Kärcher spol. s.r.o., „Zavlažovací systémy,“ [Online]. Available: <https://www.karcher.cz/cz/dum-a-zahrada/zavlazovaci-systemy.html>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [37] IRIMON spol. s.r.o., „Kdo jsme,“ [Online]. Available: https://www.irimon.cz/clanek_kdo_jsme. [Přístup získán prosinec 2022].
- [38] IRIMON spol. s.r.o., „Interaktivní ceníky a katalogy IRIMON,“ [Online]. Available: https://malooobchod.irimon.cz/clanek_mo_ceniky. [Přístup získán prosinec 2022].
- [39] Hunter Industries ResCom and Golf Irrigation, „Solar Sync Product Guide: Smart Irrigation Control Made Simple,“ 27 srpen 2013. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=7taNNhtBbjA>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [40] FEIDLER AMS s.r.o., „Profil společnosti,“ 2017. [Online]. Available: <https://www.fiedler.company/cs/spolecnost>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [41] FEIDLER AMS s.r.o., „Ceník,“ 2022. [Online]. Available: <https://www.fiedler.company/cs/ke-sta-en/cen-k>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [42] J. Wiesner, "Beitrage zur Kenntniss des troischen regens (About Contributions to the knowledge of the tropical rain)," *Atmos. Electr.*, p. 1397–1434, 1895.
- [43] J. Pearson a G. Martin, „An evaluation of raindrop sizing and counting techniques,“ *Sci. Rep.*, p. 1–17, 1957.
- [44] D. Blanchard, „Raindrop Size Distribution and Associated Phenomena in Hawaiian Rains,“ *Woods Hole Oceanographic Institution: Woods Hole*, 1952.
- [45] G. Kathiravelu, T. Lucke a P. Nichols, „Rain Drop Measurement Techniques: A Review,“ 21. ledena 2016. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2073-4441/8/1/29/htm>. [Přístup získán prosinec 2022].

- [46] Wikipedia, „Srážkoměr,“ 5. srpna 2021. [Online]. Available: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Sr%C3%A1%C5%BEkom%C4%9Br>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [47] J. Krejčí, „NÁVRH SRÁŽKOMĚRU ERGS 2500,“ 13. září 2017. [Online]. Available: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/73448>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [48] FEIDLER AMS s.r.o., „Člunkové srážkoměry,“ březen 2015. [Online]. Available: <https://www.fiedler-magr.cz/sites/default/files/dokumenty/sr03-v1.pdf>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [49] m. Kifissia, „Meteorology instruments - The Rain Gauge,“ 6. srpna 2015. [Online]. Available: http://www.kifissiameteo.gr/Lesson08_Instrument_RainGauge.html. [Přístup získán prosinec 2022].
- [50] FEIDLER AMS s.r.o., „Optický srážkoměr RG-11,“ [Online]. Available: <https://www.fiedler.company/cs/produkty/meteorologick-stanice-senzory/de-ov-sr-ky/optick-sr-kom-r-g-11>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [51] FEIDLER AMS s.r.o., „Detektor deště RDH11,“ [Online]. Available: <https://www.fiedler.company/cs/produkty/senzory-sn-ma-e-meteorologick-stanice/de-ov-sr-ky/detektor-de-t>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [52] P. Ripka, V. Haasz a V. Petrucha, „Senzory a měření,“ 2022. [Online]. Available: <https://moodle.fel.cvut.cz/course/view.php?id=2000>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [53] Wikipedia, „Psychrometr,“ 17. května 2022. [Online]. Available: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Psychrometr>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [54] M. Chlad, „Bezdrátový senzor teploty a relativní vlhkosti vzduchu,“ 5. června 2014. [Online]. Available: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=88320. [Přístup získán prosinec 2022].
- [55] An Avnet Company, „SHT21,“ [Online]. Available: <https://cz.farnell.com/sensirion/sht21/humidity-temp-sensor-digital-dfn/dp/1855468>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [56] Learning Arduino, „SHT21 humidity and temperature sensor example,“ [Online]. Available: <http://arduinolearning.com/code/sht21-humidity-and-temperature-sensor-example.php>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [57] Česká zemědělská univerzita Praha, „Nepřímé metody měření půdní vlhkosti,“ 2. ledna 2012. [Online]. Available: <http://hydropedologie.agrobiologie.cz/neprime.html>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [58] R. Kodešová, O. Jakšík, A. Klement, M. Fér, A. Nikodem a L. Brodský, „Metodika lokálního monitoringu půdních vlhkostí na zemědělských pozemcích ohrožených suchem,“ 2015. [Online]. Available: https://www.spucr.cz/frontend/webroot/uploads/files/2016/06/pn_me_014-vfp_monit_p_vlast3387.pdf. [Přístup získán prosinec 2022].
- [59] TOMST s.r.o., „TMS-4,“ [Online]. Available: <https://tomst.com/web/en/systems/tms/tms-4/>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [60] J. Wild, M. Kopecký, M. Macek, M. Šanda, J. Jankovec a T. Haase, „Climate at ecologically relevant scales: A new temperature and soil moisture logger for long-term microclimate measurement.,“ *Agricultural and Forest Meteorology*, č. 268, p. 40–47, 2019.

- [61] TOMST s.r.o., „TMS 4 základní,“ [Online]. Available: <https://eshop.tomst.com/home/87-tms-3.html>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [62] AlphaOmega-Electronics, „PR2 Soil Moisture Profile Probe,“ [Online]. Available: <https://www.alphaomega-electronics.com/en/delta-t/1270-pr2-sonda-de-humedad-para-suelo.html>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [63] Digi-Key Electronics, „SEN0193,“ [Online]. Available: <https://www.digikey.com/product-detail/en/dfrobot/SEN0193/1738-1184-ND/6588605>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [64] E. A. A. D. Nagahage, I. S. P. Nagahage a T. Fujino, „Calibration and Validation of a Low-Cost Capacitive Moisture Sensor to Integrate the Automated Soil Moisture Monitoring System,“ 4. července 2019. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2077-0472/9/7/141/htm>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [65] AzoSensors, „PR2 Soil Moisture Profiling Monitor,“ [Online]. Available: <https://www.azosensors.com/equipment-details.aspx?EquipID=1114>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [66] K. Kadlec a M. Kmínek, „Měření výšky hladiny,“ únor 2005. [Online]. Available: <http://uprt.vscht.cz/kminekm/mrt/F4/F4k44-hlad.htm>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [67] V. Smolka, „Měření a zaznamenávání větru,“ 11. března 2016. [Online]. Available: <https://www.in-pocasi.cz/clanky/teorie/vitr-11.3.2016/>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [68] FEIDLER AMS s.r.o., „WD360 - snímač směru větru,“ [Online]. Available: <https://www.fiedler.company/cs/produkty/meteorologick-stanice -sn-ma-e-idla/ rychlost-sm-r-v-tru/wd360-sn-ma -sm-ru-v-tru>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [69] Wikipedia, „Anemometr,“ 27. září 2021. [Online]. Available: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Anemometr>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [70] FEIDLER AMS s.r.o., „Snímače rychlosti a směru větru,“ [Online]. Available: <https://www.fiedler.company/cs/produkty/snimace/ rychlost-smer-vetru>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [71] Hadex spol. s r.o., „Teplotní sonda DS18B20 100cm,“ [Online]. Available: <https://www.hadex.cz/r255-teplotni-sonda-ds18b20-100cm/>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [72] ECLIPSE s.r.o., „Ultrazvukový měřič vzdálenosti HC-SR04 pro jednodeskové počítače,“ [Online]. Available: <https://dratek.cz/arduino/846-eses-ultrazvukovy-meric-vzdalenosti -hc-04-pro-jednodeskove-pocitace.html>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [73] K. Láska, „WH-SP-WS01 čidlo rychlosti větru - anemometr,“ [Online]. Available: <https://www.laskakit.cz/wh-sp-ws01 -cidlo-rychlosti-vetru-anemometr/>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [74] V. Matz, „Systémy používané v "inteligentních" budovách - přehled komunikačních protokolů,“ 25. října 2010. [Online]. Available: <https://vytapeni.tzb-info.cz/mereni-a-regulace/6879-systemy-pouzivane-v-inteligentnich-budovach -prehled-komunikacnich-protokolu>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [75] kng.org, „KNX základy,“ [Online]. Available: https://www.knx.org/wAssets/docs/downloads/Marketing/Flyers/KNX-Basics/KNX-Basics_cz.pdf. [Přístup získán prosinec 2022].
- [76] Wikipedia, „CSMA,“ 18. února 2022. [Online]. Available: <https://cs.wikipedia.org/wiki/CSMA>. [Přístup získán prosinec 2022].

- [77] OMS-Group, „Wired M-Bus Documentation,“ [Online]. Available: <https://m-bus.com/documentation>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [78] M. Linhart, „Komunikační sběrnice LON (Local Operating Network),“ 2004. [Online]. Available: https://wiki.control.fel.cvut.cz/mediawiki/images/e/e3/Dp_2004_linhart_martin.pdf. [Přístup získán prosinec 2022].
- [79] A. Vojáček, „Sběrnice LonWorks - 1.část - Úvod,“ 5. dubna 2005. [Online]. Available: <https://automatizace.hw.cz/clanek/2005040501>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [80] Real Time Automation Inc., „A plan for product enhancement LonWorks,“ [Online]. Available: <https://www.rtautomation.com/technologies/lonworks/>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [81] Domat Control System s.r.o., „BacNet – Stručný úvod do základů,“ [Online]. Available: <https://www.domat-int.com/cs/bacnet-strucny-uvod-do-zakladu>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [82] A. Vojáček, „Úvod do BACnetu - Building Automation and Controls Network,“ 26. dubna 2012. [Online]. Available: <https://automatizace.hw.cz/uvod-do-bacnetu-building-automation-and-controls-network>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [83] A. Vojáček, „Modbus,“ 7. července 2004. [Online]. Available: <https://automatizace.hw.cz/clanek/2004070701>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [84] A. Ronešová, „Přehled protokolu Modbus,“ květen 2005. [Online]. Available: <http://home.zcu.cz/~ronesova/bastl/files/modbus.pdf>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [85] Redakce HW serveru, „RS 485 & 422,“ 15. ledna 1998. [Online]. Available: <https://vyvoj.hw.cz//teorie-a-praxe/dokumentace/rs-485-422.html>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [86] Redakce Prima receptář, „Víte, kolik procent Čechů doma zahradičí?,“ 15. dubna 2010. [Online]. Available: <https://prima-receptar.cz/vite-kolik-procent-cechu-doma-zahradnici/>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [87] A. C. C.S. Tan - Research, „Irrigation Scheduling For Tomatoes - Water Budget Approach,“ únor 1990. [Online]. Available: <http://omafra.gov.on.ca/english/crops/facts/90-049.htm>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [88] F. a. A. O. o. t. U. Nations, „Land & Water, Pepper,“ [Online]. Available: <https://www.fao.org/land-water/databases-and-software/crop-information/pepper/en/>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [89] F. A. Hashem, M. Medany, E. A. El-Moniem a M. Abdallah, „Influence of green-house cover on potential evapotranspiration and cucumber water requirements,“ 2011. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/figure/The-average-of-evapotranspiration-under-polyethylene-sheet-black-net-and-white-net-of_fig1_257236667. [Přístup získán prosinec 2022].
- [90] Grundfos Sales Czechia and Slovakia s.r.o., „Zavlažování III – Plodiny a voda,“ 16. srpna 2013. [Online]. Available: <https://voda.tzb-info.cz/10235-zavlazovani-iii-plodiny-a-voda>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [91] BM Česko s.r.o., „Péče o trávník v létě,“ 10. srpna 2022. [Online]. Available: <https://www.baumax.cz/rady-profesionalu/pece-o-travnik-v-lete,892.html>. [Přístup získán prosinec 2022].

- [92] T. Litschmann, M. Straková a P. Přidal, „Praktické zkušenosti s kapkovou závlahou trávníku,“ 2002. [Online]. Available: <http://www.amet.cz/kapkovkatravnik.htm>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [93] Grundfos Sales Czechia and Slovakia s.r.o., „Využití dešťové vody pro fotbalový stadion i jeho zázemí,“ 19. listopadu 2012. [Online]. Available: <https://voda.tzb-info.cz/uspory-voda-kanalizace/9304-vyuziti-destove-vody-pro-fotbalovy-stadion-i-jeho-zazemi>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [94] BOCR Trading s.r.o., „Konfigurátor velikosti nádrže na dešťovou vodu,“ [Online]. Available: <https://www.bocr.cz/konfigurator/>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [95] Climate CZ s.r.o., „Kalkulačka velikosti nádrže,“ [Online]. Available: <https://eshop.destovka.eu/kalkulacka-velikosti-nadrze/>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [96] Aliaxis Česká republika s.r.o., „Kalkulátor velikosti nádrže,“ [Online]. Available: <https://www.aliaxis.cz/cs/produkty/inzenyrske-site/nadrze-na-destovou-vodu/kalkulator-velikosti-nadrze>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [97] Český hydrometeorologický ústav, „Denní data dle zákona 123/1998 Sb.,“ [Online]. Available: <https://www.chmi.cz/historicka-data/pocasi/denni-data/Denni-data-dle-z-123-1998-Sb>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [98] Obec Velký Osek, „Kanalizace - provoz,“ [Online]. Available: <https://www.velkyosek.cz/obec-197/kanalizace/provoz/>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [99] M. Kraus, „Cena a návratnost retenční nádrže na dešťovku,“ 1. června 2021. [Online]. Available: <https://zakra.cz/blog/cena-a-navratnost-retencni-nadrze-na-destovou-vodu/>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [100] Arduino, „Arduino Nano,“ [Online]. Available: <https://store.arduino.cc/collections/boards/products/arduino-nano>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [101] Dallas semiconductor, „DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire® Digital Thermometer,“ [Online]. Available: <https://cz.mouser.com/pdfDocs/DS18B20-2.pdf>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [102] DFRobot, „SKU:SEN0193,“ [Online]. Available: https://wiki.dfrobot.com/Capacitive_Soil_Moisture_Sensor_SKU_SEN0193. [Přístup získán prosinec 2022].
- [103] Murtiningrum a F. Muzdrikah, „Calibration of Capacitive Soil Moisture Sensor (SKU:SEN0193),“ srpen 2018. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/329492087_Calibration_of_Capacitive_Soil_Moisture_Sensor_SKUSEN0193. [Přístup získán prosinec 2022].
- [104] Digi-Key Electronics, „Ultrasonic Ranging Module HC - SR04,“ [Online]. Available: <https://www.digikey.cz/htmldatasheets/production/1979760/0/0/1/hc-sr04.html>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [105] G. Ligo, „Interfacing HC-SR04 Ultrasonic Sensor with PIC Microcontroller,“ 12. srpna 2014. [Online]. Available: <https://electrosome.com/hc-sr04-ultrasonic-sensor-pic/>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [106] Sensirion, „Datasheet SHT21,“ [Online]. Available: https://sensirion.com/media/documents/120BBE4C/63500094/Sensirion_Datasheet_Humidity_Sensor_SHT21.pdf. [Přístup získán prosinec 2022].

- [107] Components101, „MC-38 - Magnetic Switch for Home Alarm System,“ 25 květen 2021. [Online]. Available: <https://components101.com/sensors/mc38-magnetic-switch-sensor-pinout-features-datasheet-working-alternative-application>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [108] K. M. Weather Data Library, „Soli Temperature,“ [Online]. Available: <https://mesonet.k-state.edu/about/soiltemp/data/>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [109] V. Mácha, „Analýza časových řad srážek na vybraném území,“ duben 2015. [Online]. Available: <https://theses.cz/id/yuovm4/15420365>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [110] K. Timberlake, „Investigating Low-E Coating Technology for Glass,“ 29. ledna 2014. [Online]. Available: <https://kierantimberlake.com/updates/investigating-low-e-coating-technology>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [111] A. Janáček, „Radiční štít pro snímač venkovní teploty,“ 24. října 2009. [Online]. Available: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=16018. [Přístup získán prosinec 2022].
- [112] J. A. Hubbard, „An Inexpensive Alternative Solar Radiation Shield for Ambient Air Temperature Micro-Sensors,“ prosinec 2011. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/266075427_An_Inexpensive_Alternative_Solar_Radiation_Shield_for_Ambient_Air_Temperature_Micro-Sensors. [Přístup získán prosinec 2022].
- [113] J. Barani, „How to design a solar radiation shield for weather station temperature sensors?,“ 6. června 2022. [Online]. Available: <https://www.baranidesign.com/faq-articles/2022/6/6/how-to-design-a-solar-radiation-shield-for-weather-station-temperature-sensors-3cjb7>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [114] A. Varaprasad, Kambhammettu a K. R. Satish, „Role of Short-Term Weather Forecast Horizon in Irrigation Scheduling and Crop Water Productivity of Rice,“ srpen 2021. [Online]. Available: <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29WR.1943-5452.0001406>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [115] J. C. D. Cruz, M. V. C. Caya a A. H. Ballado, „Evapotranspiration-based Irrigation System for Mustard Green Crop Cultivation using Public Weather Forecast,“ 8. srpna 2020. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9232454>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [116] Loxone Electronics GmbH, „Automatické zavlažování s Loxone,“ [Online]. Available: <https://www.loxone.com/cscz/produkty/inteligentni-automaticke-zavlazovani/>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [117] Hunter, „Hydrawise Smart Controller and Water Management Software,“ [Online]. Available: <https://www.hydrawise.com/content/hydrawise-smart-controller-and-water-management-software>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [118] Český hydrometeorologický ústav, „Dlouhodobá úspěšnost předpovědi počasí,“ [Online]. Available: <https://www.chmi.cz/predpovedi/predpovedi-pocasi/ceska-republika/uspesnost-predpovedi-pocasi/roci>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [119] E. Kalnay, „“Fighting chaos” in weather and “Fighting chaos” in weather and climate prediction climate prediction,“ 17. června 2010. [Online]. Available: <https://www2.atmos.umd.edu/~ekalnay/pubs/Chaos-Predictability-EnKF-WMOtalk.pdf>. [Přístup získán prosinec 2022].

- [120] Microsoft Corporation, „Azure Maps,“ [Online]. Available: <https://azure.microsoft.com/cs-cz/products/azure-maps/>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [121] Microsoft Corporation, „Weather,“ [Online]. Available: <https://learn.microsoft.com/en-us/rest/api/maps/weather>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [122] Meteosource, „Předpověď počasí,“ [Online]. Available: <https://www.meteosource.com/cs/api-predpoved-pocasi>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [123] Meteoblue, „Počasí,“ [Online]. Available: <https://www.meteoblue.com/cs/>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [124] OpenWeather, „Weather forecasts,“ [Online]. Available: <https://openweathermap.org>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [125] AccuWeather, „AccuWeather APIs,“ [Online]. Available: <https://developer.accuweather.com>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [126] Norwegian Meteorological Institute a Norwegian Broadcasting Corporation, „Yr for developers,“ [Online]. Available: <https://developer.yr.no>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [127] E. J. Olesen a M. Bindi, „Consequences of climate change for European agricultural productivity, land use and policy,“ 19. února 2002. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1161030102000047>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [128] J. Gornall, R. Betts a E. Burke, „Implications of climate change for agricultural productivity in the early twenty-first century,“ 27. září 2010. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1098/rstb.2010.0158>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [129] J. R. PORTER, „Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change,“ *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*, 2014.
- [130] M. Polinova , K. Salinas , A. Bonfante a A. Brook , „Irrigation Optimization Under a Limited Water Supply by the Integration of Modern Approaches into Traditional Water Management on the Cotton Fields,“ 12. září 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/rs11182127>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [131] R. Allen, L. Pereira, D. Raes a M. Smith, „Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56,“ 1998. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/235704197_Crop_evapotranspiration-Guidelines_for_computing_crop_water_requirements-FAO_Irrigation_and_drainage_paper_56. [Přístup získán prosinec 2022].
- [132] P. Droogers, G. Kite a Murray-Rust, „Use of simulation models to evaluate irrigation performance including water productivity, risk and system analyses,“ červen 2000. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s002710000012>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [133] M. Smith, R. Allen a L. Pereira, „Revised FAO methodology for crop-water requirements,“ 1. června 1998. [Online]. Available: <https://www.osti.gov/etdweb/biblio/676839>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [134] Redakce dTest, „Jak vybrat cloudové úložiště,“ 31. srpna 2017. [Online]. Available: <https://www.dtest.cz/clanek-6032/jak-vybrat-cloudove-uloziste>. [Přístup získán prosinec 2022].

- [135] The MathWorks Inc., „License Options,“ [Online]. Available: <https://thingspeak.com/prices>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [136] Alphabet Inc., „Google Cloud,“ [Online]. Available: <https://cloud.google.com>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [137] C. Wang, „Sensor data collection and analytics with IoT Core,“ 25. září 2019. [Online]. Available: <https://cloud.google.com/community/tutorials/cloud-iot-enviro-board-workshop>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [138] Technická univerzita Ostrava, „Základy SQL,“ [Online]. Available: <http://books.fs.vsb.cz/SQLReference/Sadovski/SQL-PRVN.HTM>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [139] Grafana Labs, „MySQL,“ [Online]. Available: <https://grafana.com/grafana/plugins/mysql/>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [140] Alphabet Inc., „Google Workspace,“ [Online]. Available: <https://developers.google.com/sheets/api>. [Přístup získán prosinec 2022].
- [141] S.-H. Kwon a K. W. Kim, „Rain Drop Counting Measurement Sensor with Energy Harvesting Technology of Water Motion,“ 19. února 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/proceedings2131393>. [Přístup získán leden 2023].
- [142] OSMA zpracování plastů s.r.o., „KG-Systém (PVC), str. 27,“ [Online]. Available: <https://www.novakz.cz/ceniky/OSMA/Katalogy%20výrobků/KG.pdf>. [Přístup získán leden 2023].