

**Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích
Přírodovědecká fakulta**

Návrh a realizace mobilní meteostanice

Diplomová práce

Bc. Petr Chytra

Školitel: Ing. Ladislav Ptáček, Ph.D.

České Budějovice 2022

Bibliografické údaje

Chytra, P., 2022: Návrh a realizace mobilní meteostanice. [Design and implementation of a portable weather station, Mgr. Thesis, in Czech.] – 104 p., Faculty of Science, University of South Bohemia, České Budějovice, Czech Republic.

Anotace

Tato diplomová práce se zabývá návrhem a realizací mobilní meteostanice, která umožňuje měřit teplotu vzduchu, relativní vzdušnou vlhkost, atmosférický tlak a především koncentrace suspendovaných částic v ovzduší, na které je práce zaměřena. Přenosná meteostanice musí být kompaktní a mít vlastní zdroj elektrické energie pro napájení. Součástí práce je také provádění vlastních měření ve vybraných lokalitách.

Annotation

This diploma thesis deals with the design and implementation of a portable weather station which allows you to measure air temperature, relative humidity, atmospheric pressure and especially the concentration of suspended particles in the air on which the work is focused. The portable weather station must be compact and have its own power supply. Part of the work is also the implementation of own measurements in selected localities.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem autorem této kvalifikační práce a že jsem ji vypracoval pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu použitých zdrojů.

V Českých Budějovicích dne 11.4.2022

Bc. Petr Chytra

Poděkování

Touto cestou bych chtěl vyjádřit poděkování vedoucímu práce Ing. Ladislavu Ptáčkovi, Ph.D. za trpělivost, cenné rady a čas, který mi věnoval. Mé poděkování patří též Českému hydrometeorologickému ústavu za poskytnutou součinnost při monitorování kvality ovzduší.

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Cíle práce	2
3	Seznam používaných zkratk.....	3
4	Úvod do meteorologie	4
4.1	Počasí a meteorologie.....	4
4.1.1	Měření teploty	5
4.1.2	Měření vlhkosti vzduchu.....	6
4.1.3	Měření tlaku vzduchu.....	6
4.1.4	Měření koncentrace suspendovaných částic	7
5	Teoretická část	10
5.1	Koncept meteostanice.....	10
5.2	Principy jednotlivých součástí.....	11
5.2.1	Senzory a způsoby měření	11
5.2.1.1	Snímače teploty	11
5.2.1.2	Snímače vlhkosti	13
5.2.1.3	Snímače tlaku	15
5.2.1.4	Snímače suspendovaných částic.....	16
5.2.2	Řídicí systém.....	17
5.2.3	Komunikační systém.....	20
5.2.3.1	Sigfox	20
5.2.3.2	LoRaWAN.....	20
5.2.3.3	NB-IoT	21
5.2.3.4	GSM síť	21
5.2.4	Napájení	22
5.2.4.1	Akumulátory.....	22
5.2.4.2	FV panely	23

5.3	Software	24
5.3.1	Solidworks	24
5.3.2	PrusaSlicer	25
5.3.3	Fritzing	25
5.3.4	Aduino IDE	26
6	Praktická část.....	27
6.1	Návrh konstrukce	27
6.1.1	Simulace proudění vzduchu skrze radiační štít	31
6.2	Výroba konstrukce	33
6.3	Výběr komponent	36
6.3.1	Senzor teploty a vlhkosti vzduchu.....	36
6.3.2	Senzor atmosférického tlaku	38
6.3.3	Senzor prachových částic	38
6.3.4	Řídicí deska a komunikační modul	41
6.3.5	Ostatní komponenty.....	42
6.4	Elektro zapojení	44
6.5	Programování.....	48
6.6	Sestavení meteostanice	54
6.7	Webová služba.....	57
7	Testování	59
7.1	Test odolnosti.....	59
7.2	Měření spotřeby meteostanice	63
7.3	Ukládání dat	65
7.4	Náhled živých dat na ThingSpeak	65
7.5	Předpokládané náklady na provoz meteostanice	67
8	Ověření správnosti měření	68
9	Provedená měření a jejich analýza	81
9.1	Dlouhodobé měření v Trhových Svinech	81

9.2	Porovnání: Město, okraj města, venkov	83
9.3	Porovnání lokalit v blízkosti silnice č. II/156: Město, okraj vesnice	85
9.4	Tlaková vlna po výbuchu sopky v Tichomoří.....	87
10	Diskuze výsledků měření.....	89
11	Závěr	91

1 Úvod

Motivací k této práci bylo již dlouholeté pozorování usazování prachu v domácnosti. Jelikož v posledních letech se střídavě pohybuji mezi dvěma domácnostmi v různých městech, pozoroval jsem rozdílné množství usazeného prachu za stejný časový interval.

První domácnost se nachází u hlavní silnice v Trhových Svinech. Druhá pak na okraji Nových Hradů. Subjektivně bych ohodnotil, že v domácnosti v Trhových Svinech se usadí za týden stejné množství prachu, které se na Nových Hradech usadí za měsíc. S tím se pojí například otázka, jak velký vliv má například silniční doprava na koncentraci prachových částic v ovzduší v daném místě.

V České republice měří Český hydrometeorologický ústav koncentrace prachových částic především ve větších okresních městech, a to většinou pouze v jediné lokalitě. Není tedy možné například zjistit, jak se liší koncentrace prachových částic v centru města, na sídlišti nebo na samotném okraji města. Z toho důvodu jsem chtěl v rámci diplomové práce navrhnout a realizovat přenosnou meteostanici, která bude umět změřit koncentraci prachových částic v ovzduší. Díky možnosti přesunu stanice by bylo teoreticky možné například i lokalizovat emisní ohnisko v dané lokalitě.

Aby se uplatnil potenciál navrhované meteostanice, měla by být stanice vybavena krom senzoru, který detekuje koncentrace prachových částic v ovzduší, také čidlem teploty, relativní vlhkosti vzduchu a tlaku.

2 Cíle práce

Cílem diplomové práce je návrh a realizace mobilní a energeticky nezávislé meteostanice. Ta bude měřit teplotu, relativní vlhkost vzduchu, atmosférický tlak a koncentraci prachových částic v ovzduší. Řídicí systém stanice bude postaven na platformě Arduino, či jí podobné. Při návrhu bude brán zřetel na velikost stanice, její tvar a s tím související stupeň krytí IPxx.

Mezi rysy stanice, na které bude při návrhu kladen největší důraz, patří především kompaktnost, která by měla usnadnit přenášení a umístování stanice v dané lokalitě. Stanice by měla dosahovat menších rozměrů a být uživatelsky přívětivá. Velikost stanice bude naopak při návrhu negativně ovlivňována požadavkem na energetickou soběstačnost a bude tedy nutné nalézt kompromisní řešení. Napájení meteostanice bude realizováno pomocí akumulátoru a malého fotovoltaického panelu s cílem zajistit meteostanici v provozu po dobu minimálně jednoho měsíce.

Naměřená data budou ukládána na SD kartu a současně přenášena bezdrátově. Uživatel bude mít k datům zajištěn přístup online. Pro tento účel bude použita již některá z existujících webových služeb, nebo zprovozněny vlastní webové stránky s vizualizací dat.

S hotovou meteostanicí bude provedeno měření v těsné blízkosti meteostanice pod správou Českého hydrometeorologického ústavu pro ověření správnosti měření. Následně budou provedena vlastní měření zejména ve městech a přilehlých aglomeracích, kde mají měření, zejména prachových částic, největší význam.

3 Seznam používaných zkratek

ARM	Advanced RISC Machine
CAD	Computer Aided Design
DPS	Deska plošných spojů
EDGE	Enhanced Data Rates for GSM Evolution
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only
FDM	Fused Deposition Modeling
FFF	Fused Filament Fabrication
GND	Ground (uzemnění)
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Groupe Spécial Mobile
I/O	Input/output
I ² C	Inter-Integrated Circuit
IDE	Integrated Development Environment
IoT	Internet of Things
LED	Light-emitting diode
LoRaWAN	Long Range Wide Area Network
LTE	Long Term Evolution
MPPT	Maximum Power Point Tracking
NB-IoT	Narrow Band IoT
PM	Particulate matter
PWM	Pulse Width Modulation
RAM	Static Random Access Memory
SPI	Serial Peripheral Interface
UART	Universal asynchronous receiver-transmitter
USB	Universal Serial Bus

Tabulka 1: Seznam používaných zkratek

4 Úvod do meteorologie

Počasí ovlivňuje lidstvo od jeho samotného počátku, kdy se lidé přizpůsobovali jeho vlivům. V minulých tisíciletích s rozvojem zemědělství se však lidé snažili přijít na různé spojitosti, které vedou ke změnám počasí, jelikož mělo veliký vliv na úrodu. S tím souvisí i počátek meteorologie [1].

Lidé ve starém Egyptě již dokázali rozeznat nástup období prudkých dešťů, které mělo vliv na zničení úrody. Jako první sepsal své poznatky o změnách počasí Aristoteles ve 4. století př. n. l. v díle *Meteorologica*. Další větší rozvoj meteorologie nastal s obdobím kolonizací a mořeplavectvím, kdy bylo nutné pro úspěšnou plavbu předpovídat změny atmosféry a vybrat vhodné období pro plavbu [1].

K pozorování počasí se v 17. století n.l. přidalo i měření meteorologických veličin a celý obor meteorologie se stal více systematický [1]. Prvním průkopníkem se stal Galileo Galilei, když sestrojil svůj termoskop (skleněná trubička s baňkou na konci). Ten fungoval na principu změny tlaku v systému způsobeného postupným ochlazováním termoskopu (vzduchu v baňce) na okolní teplotu. Jelikož druhý konec trubičky byl ponořen v kapalině, snižoval se tlak uvnitř systému a vlivem podtlaku v trubičce stoupala hladina kapaliny. Tento vynález však stále nebyl opatřen stupnicí. Od této doby se stále zdokonalují přístroje pro měření a z jejich výsledků se lidé snaží předpovídat změny atmosféry. Od roku 1775 se na pražském Klementinu začala měřit tzv. klementinská řada, která je měřena soustavně až dodnes [2].

4.1 Počasí a meteorologie

Pojem počasí označuje aktuální stav zemské atmosféry. Lze jej popsat pomocí meteorologických prvků jako je teplota, vlhkost vzduchu, atmosférický tlak, úhrn srážek a jiných. V současné době jsou již meteorologické veličiny měřeny pomocí automatizovaných meteostanic, které jsou umístěny po celém světě. V České republice se o síť těchto stanic stará Český hydrometeorologický úřad. Naměřená meteorologická data se poté používají pro tvorbu numerických modelů počasí (například mezinárodní model ALADIN), díky čemuž je možné tvořit předpovědi počasí [1].

Existuje jistá konvence pro měření meteorologických prvků, která zajišťuje, že naměřené hodnoty lze porovnávat napříč stanicemi. Například tlak měřený na různých místech Země se liší v závislosti na nadmořské výšce. Proto se atmosférický tlak změřený na stanici

přepočítává na tlak v úrovni hladiny moře. Díky tomu lze určit oblasti s vyšším či nižším tlakem vzduchu. Také byly stanoveny podmínky, jak a kdy jsou dané meteorologické prvky určovány. Například čas odečtu měřených hodnot a umístění měřicích přístrojů, aby naměřené hodnoty nebyly ovlivněny [1]. Například pro měření teploty, relativní vzdušné vlhkosti a atmosférického tlaku se využívá tzv. meteorologické budky. Ta chrání čidla před přímým slunečním svitem, ale zároveň umožňuje proudění vzduchu kolem měřicích přístrojů. V praxi se také využívají tzv. radiační kryty, které mají menší rozměry a jsou určena pro elektronické měřicí přístroje, ze kterých není nutné odečítat naměřené hodnoty vizuálně, ale data jsou z nich automaticky odesílána. Radiační kryt tedy slouží podobně jako meteorologická budka, ale je určen především pro automatizované stanice. [2].



Obrázek 1: Meteorologická budka [44]



Obrázek 2: Radiační kryt

Měřených meteorologických prvků je velké množství. Níže budou uvedeny měřené meteorologické prvky, kterými se zabývá tato práce.

4.1.1 Měření teploty

Teplota je základní stavová veličina. Teplota vzduchu se standardně měří ve 2 metrech nad zemí s rozlišením 0,1 °C. Doplnkově se však měří například i přízemní teplota vzduchu ve výšce 0,05 m nad zemí nebo teplota během noci ve výšce 5 m nad povrchem, kdy není potřeba mít senzor ukrytý v radiační budce, jelikož během noci není ovlivněn slunečním svitem [2]. K měření teploty se využívají kapalinové teploměry, které jsou v dnešní době nahrazovány elektronickými teploměry. Ty se vyznačují přesnějším měřením a rychlejší reakcí na změnu teploty. Vzácněji lze na meteostanicích nalézt například deformační (bimetalové) teploměry, které nalézají využití u samozapisujících přístrojů [1].

4.1.2 Měření vlhkosti vzduchu

Vzdušná vlhkost označuje, kolik vodní páry obsahuje vzduch. Častěji se však udává tzv. relativní vlhkost vzduchu φ , která udává poměr mezi množstvím vodních par ve vzduchu e k množství vodních par E , které by plně nasycený vzduch obsahoval při stejném tlaku a teplotě. Platí úměra, že čím je vzduch chladnější, tím dokáže pojmout méně vodních par. Platí tedy následující vztah

$$\varphi = \frac{e}{E} \cdot 100 [\%] . \quad (4.1)$$

K měření vlhkosti vzduchu se využívají zejména vlasové vlhkoměry (hygrometry), které využívají principu změny délky vlasu se změnou vlhkosti, psychometry nebo elektronické vlhkoměry [1].

S vlhkostí vzduchu souvisí i tzv. rosný bod. Ten označuje teplotu t_{dp} , při které se vzduch vlivem izobarického ochlazování stane nasyceným, aniž by do něj byla dodána z prostředí další vodní pára. Pokud se sníží teplota t pod teplotu rosného bodu, začne docházet ke kondenzaci vodní páry ve formě rosy či mlhy [1]. Teplota rosného bodu lze spočítat dle vztahu

$$t_{dp} = \frac{243,5 \cdot \ln\left(\frac{\varphi}{100} \cdot e^{\frac{17,67 \cdot t}{243,5+t}}\right)}{17,67 - \ln\left(\frac{\varphi}{100} \cdot e^{\frac{17,67 \cdot t}{243,5+t}}\right)}, \quad (4.2)$$

který obsahuje empiricky získané konstanty a dosahuje přesnosti výsledku $\pm 1 \%$ (za normálních podmínek) [3].

4.1.3 Měření tlaku vzduchu

Atmosférický tlak představuje tíhu sloupce vzduchu, který působí na jednotku plochy. Měří se pomocí barometrů. Nejčastěji používaný analogový barometr v meteorologii je rtuťový barometr, u kterého se odečítá výška rtuťového sloupce [1]. Častěji se však udává tlak v pascálech, respektive v hPa, a proto dochází k přepočtu, kdy $1 \text{ hPa} \doteq 0,75 \text{ torr (mmHg)}$ [4].

Atmosférický tlak (tíha sloupce vzduchu) závisí především na nadmořské výšce. Čím vyšší nadmořská výška, tím nižší je atmosférický tlak. Proto se udává tzv. atmosférický tlak přepočtený na hladinu moře. Díky tomu je možné porovnat atmosférické tlaky v různých lokalitách. Za normální atmosférický tlak (na hladině moře) je považována hodnota 1013,25 hPa, čemuž odpovídá 760 mm rtuťového sloupce [4]. Dále závisí atmosférický tlak na teplotě a vlhkosti vzduchu [2]. Základním vztahem je barometrická rovnice (4.3), která

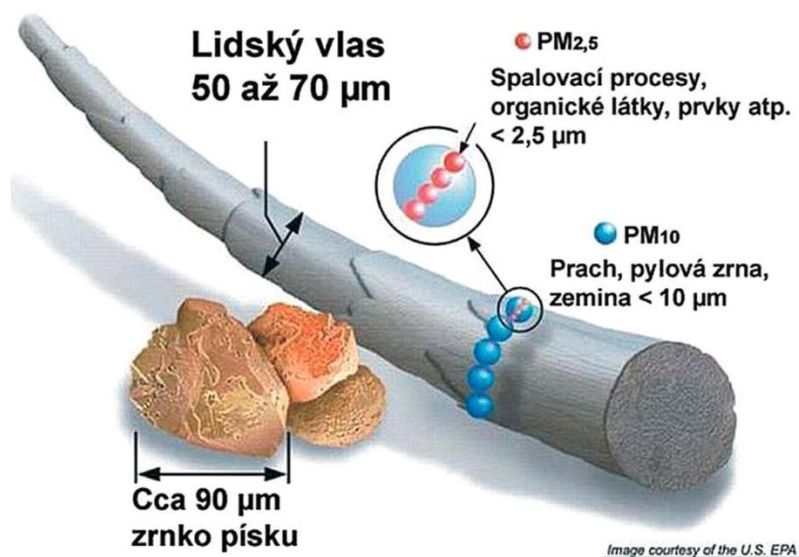
určuje tlak při změně nadmořské výšky. Pokles tlaku s nadmořskou výškou je exponenciální. To vyjadřuje vztah

$$p_a = p_0 \cdot e^{-\frac{\rho_0 \cdot g \cdot h}{p_0}}, \quad (4.3)$$

kde p_a je zjišťovaný tlak v nadmořské výšce h , p_0 představuje referenční tlak (tedy atmosférický tlak při hladině moře), ρ_0 značí hustotu vzduchu a g tíhové zrychlení. Tento vztah však počítá s konstantní teplotou, což ve skutečnosti není pro velké výškové rozdíly splněno.

4.1.4 Měření koncentrace suspendovaných částic

Suspendované částice neboli prachové částice se označují zkratkou PM. Jedná se o směs různorodých částic vyskytujících se v ovzduší. Ty mohou být jak pevného, tak kapalného skupenství. Suspendované částice se označují dle jejich velikosti. Například soubor všech částic menších než $4 \mu\text{m}$ nese označení $\text{PM}_{4.0}$. V praxi se nejčastěji měří částice PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ a PM_{1} [5].



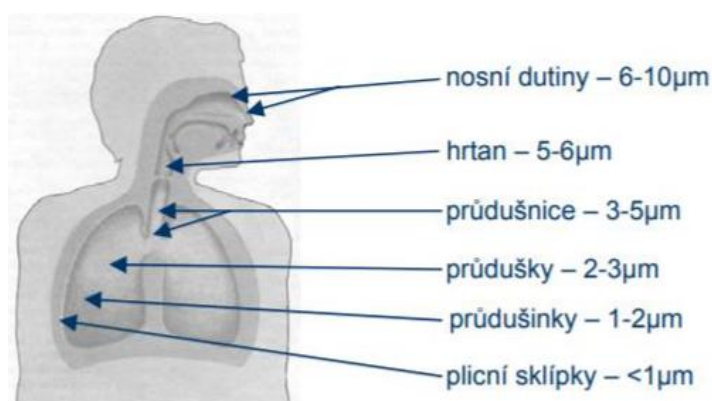
Obrázek 3: Porovnání velikostí suspendovaných částic s lidským vlasem [41]

Částice se do ovzduší mohou uvolňovat přírodní cestou – např. erozí půdy nebo výbuchem sopky, ale i činností člověka (tzv. antropogenní zdroje) – např. spalovacím procesem či stavebními pracemi. Zdroje suspendovaných částic lze rozdělit na primární a sekundární. Primární částice jsou emitovány do ovzduší přímo například již při zmíněném výbuchu sopky či procesu spalování. Zatímco sekundární částice si lze představit jako znovu zviřené (resuspendované) částice nebo částice, které vznikly jako produkt chemické reakce dvou suspendovaných částic. Sekundární částice jsou tedy typické pro městské oblasti, kdy například vlivem dopravy dochází ke znovu zviření usazených polétavých částic [5].

V České republice jsou stanoveny tři imisní limity zákonem o ochraně ovzduší [5]:

- Roční průměrná koncentraci PM_{10} – $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$
- Denní průměrná koncentrace PM_{10} – $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$
 - možné překročení 35x za rok
- Roční průměrná koncentrace $PM_{2,5}$ – $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$

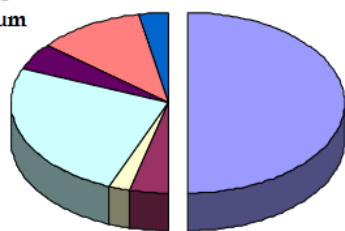
Částice menší než $2,5 \mu\text{m}$ jsou označovány za jemné částice. Ty jsou člověku potenciálně nejvíce nebezpečné, jelikož mohou pronikat hlouběji do dýchacích cest, což lze pozorovat na obrázku č. 4. Díky své nižší hmotnosti navíc setrvávají v ovzduší déle než částice větších rozměrů. Patrně nejčastěji dochází vlivem prachu v prostředí k dráždění sliznic dýchacích cest a očí. Delší pobyt v prašném prostředí může vést až k zánětu průdušek, zánětu spojivek a chronickému kašli. V ovzduší se vyskytují nejen prachové částice, které si běžní lidé představí pod pojmem prach. Suspendované částice zahrnují také různé toxické či karcinogenní částice [6].



Obrázek 4: Porovnání průniku suspendovaných částic o různých velikostech do dýchacích cest [6]

Chemické složení suspendovaných částic v ovzduší je různé. Liší se především dle velikosti částic. Vliv na složení má však i lokalita, kde například ve městské zástavbě jsou zastoupeny jiné chemické složky než v přírodě. Na obrázku č. 5 je možné pozorovat chemické složení a přibližné zastoupení jednotlivých složek prachových částic ve městě. Není možné přesné určení procentuálního zastoupení jednotlivých složek, ale jistý typický poměr existuje. Z obrázku je zřejmé, že přibližně poloviční podíl částic větších než $2,5 \mu\text{m}$ zabírají částice vzniklé při spalovacích procesech [7].

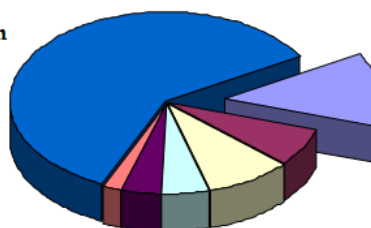
Větší
částice
> 2,5 μm



spalovací procesy
chloridy
dusičnany
nerozpustné složky

Na, K, Mg, Ca
sírany
amonné soli

Malé
částice
< 2,5 μm



spalovací procesy
chloridy
dusičnany
nerozpustné složky

Na, K, Mg, Ca
sírany
amonné soli

Obrázek 5: Chemické složení prachových částic ve městské zástavbě [7]

5 Teoretická část

Tato část práce je zaměřena na přiblížení problematiky týkající se jednotlivých prvků meteostanice. Budou zde popsány principy měření jednotlivých meteorologických veličin, ale i možné technologie napájení, řídicí systém a v neposlední řadě i možnosti bezdrátového přenosu dat.

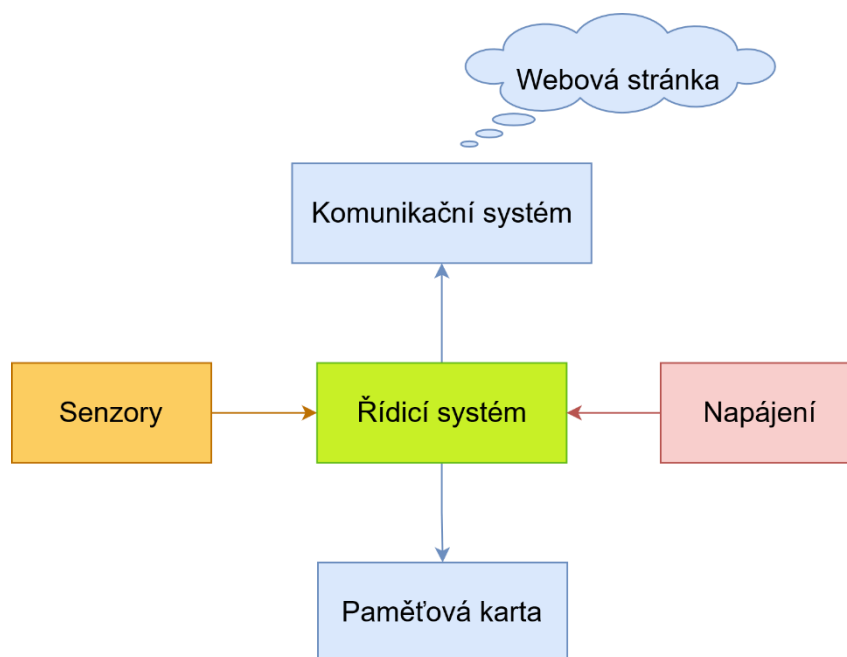
5.1 Koncept meteostanice

Před návrhem meteostanice bylo nutné zaobírat se návrhem jejího konceptu. Byly stanoveny požadavky na senzory, systém napájení, řídicí desku, tvar a velikost konstrukce. Hlavní důraz byl kladen na kompaktnost meteostanice, aby se dala snadno přenášet. Od toho se odvíjí velikost elektroniky a čidel tak, aby je bylo možné umístit do meteostanice. Již v cílech práce byl stanoven provoz meteostanice po dobu minimálně jednoho měsíce, z toho vyplývají požadavky na kapacitu akumulátoru, který rovněž zabírá podstatnou část objemu meteostanice.

Navrhovaná přenosná meteostanice bude mít zautomatizované ukládání naměřených dat. Z toho důvodu lze využít jako základ meteostanice obsluhu nepřístupnou, ale menší konstrukci radiačního krytu.

Co se týče samotného principu provozu meteostanice, ta by měla být schopna po zapnutí zjistit přesný čas. Následně změřit meteorologické veličiny a zapsat je na paměťovou kartu. Poté odeslat změřená data ještě na webovou stránku, kde budou data živě k nahlédnutí. Pro úsporu energie bude následně nezbytné, aby stanice přešla do stand-by módu, ze kterého bude následně probuzena a začne znovu měřit. Základní blokové schéma meteostanice je vyobrazeno na obrázku č. 6.

Na celkovou realizaci stanice byl stanoven rozpočet 10 000 Kč. Bylo tedy nutné tento fakt zohlednit při výběru jednotlivých komponent a materiálů na výrobu stanice. Nejvíce se tato skutečnost projevila při výběru čidel, bylo tedy vždy nutné volit kompromis mezi stále přijatelnou přesností měření a cenou.



Obrázek 6: Blokové schéma konceptuálního modelu

5.2 Principy jednotlivých součástí

5.2.1 Senzory a způsoby měření

V této kapitole budou popsány nejčastější principy měření meteorologických veličin, jako je teplota, vzdušná vlhkost, tlak a koncentrace prachových (suspendovaných) částic.

5.2.1.1 Snímače teploty

Nejstarší teploměry využívaly principu dilatace pevné látky či kapaliny vyvolané vlivem teploty. Dnes se až na výjimky využívají elektronické teploměry. Ty využívají k měření teploty senzory, jimž se mění jejich elektrické vlastnosti v závislosti na teplotě. Mezi tyto teploměry patří odporové snímače či termoelektrické teploměry. Dále je možné měřit teplotu povrchu předmětů i za pomoci infračervených bezkontaktních teploměrů [6] [8].

Dilatační teploměry

Princip dilatačních teploměrů souvisí s roztažností látek, nejčastěji pevných a kapalných. Vlivem jejich ohřátí či zchlazení dojde ke změně jejich objemu, délky nebo i tlaku v uzavřeném systému teploměru. Výhodou těchto teploměrů je relativně jednoduchá konstrukce. Proto se stále využívají jako orientační měřidla teploty například v domácnostech. Z fyzikální podstaty by bylo možné dosáhnout vysokých přesností, ale stupnice mívají poměrně hrubé rozlišení [6].

Nejčastěji se lze setkat se skleněnými kapalinovými teploměry. Využívají se však i bimetalické teploměry či plynové teploměry [6].

Bezdotykové teploměry

Bezdotykové teploměry fungují na principu snímání vyzařované energie, kterou vyzařuje každé těleso, které má vyšší teplotu než $-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ (absolutní nula). Tyto teploměry pak zachytávají a měří infračervené záření. Skládají se obvykle z optiky, která soustředí záření na snímač, který přemění záření na elektrickou veličinu, která je následně měřena. Tyto teploměry mají obvykle široký rozsah měřitelných teplot, ale přesnosti měření se pohybují obvykle mezi 1 – 2 % [6] [8].

Tyto teploměry se využívají v oblastech, kde není vždy bezpečné měřit teplotu předmětů kontaktně (například v elektrotechnice). Využití nacházejí i v lékařství či v podobě termokamer ve stavebnictví [6].

Elektronické teploměry

Základním principem elektronických teploměrů je, že snímač převádí informaci o teplotě na elektrickou veličinu, kterou je následně možné měřit. Jedná se zejména o změnu odporu snímače [6] [8].

Existují **kovové odporové snímače**, u nichž s rostoucí teplotou dochází ke zvětšování kmitů v krystalické mřížce. Tím dochází i k častějším srážkám s volnými elektrony. S rostoucí teplotou tedy roste i odpor snímače. Používají se platinové či niklové snímače, které se vyznačují širokým měřitelným rozsahem teplot (například 0 až $800\text{ }^{\circ}\text{C}$) při zachování relativně lineární závislosti v celém rozsahu. Výhodou je také jejich stabilita, která se v čase moc nemění. Asi nejznámější je platinový snímač s označením Pt100, z něhož vyplývá, že při $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ by měl mít odpor $100\text{ }\Omega$ [8].

Polovodičové odporové snímače (termistory) existují dvojího typu: NTC s negativním součinitelem odporu (negistor) a PTC s kladným součinitelem odporu. PTC se využívají často jako tepelné pojistky u vinutí elektrických strojů. Využívá se při tom skokové změny odporu po dosažení Curieovy teploty. K měření se využívají většinou NTC snímače, a proto se pro ně vžil označení termistor. Díky negativnímu součiniteli odporu se při rostoucí teplotě snižuje odpor polovodiče. Výhodou termistorů je jejich vysoká citlivost díky exponenciální závislosti odporu na teplotě, kdy změna teploty o jeden řád znamená změnu odporu až o několik řádů. To je však zároveň i nevýhoda, jelikož tyto snímače nejsou lineární jako kovové odporové snímače. Zde je tedy problém s kalibrací tohoto snímače. Často se

například využívají pro měření jen v užším rozsahu teplot, kde lze jejich závislost odporu na teplotě aproximovat lineární funkcí [8].

V neposlední řadě se lze také setkat s **termoelektrickými snímači teploty**. Jejich princip využívá tzv. Seebeckova jevu. Zjednodušeně se jedná o dva vodiče z různých materiálů, které jsou na jednom konci spojené. Na volných koncích se pak při rozdílu teplot vytváří termoelektrické napětí. Tyto snímače jsou vhodné především pro měření velkých rozsahů a vysokých teplot dosahujících běžně až + 2500 °C. Výhodou je při měření širokých rozsahů jejich lineární závislost. Tyto snímače jsou nicméně málo citlivé [8].

5.2.1.2 Snímače vlhkosti

Vzdušná vlhkost je tvořena vodními párami ve vzduchu. V meteorologii se asi nejčastěji vyjadřuje ve formě tzv. relativní vlhkosti od 0 – 100 %, která se počítá jako podíl množství vodních par ve vzduchu k množství vodních par plně nasyceného vzduchu - viz rovnice (4.1). Je ji však možné vyjádřit jako absolutní vlhkost, která značí hmotnostní podíl vodních par ve vzduchu [6] [9].

K měření vzdušné vlhkosti se využívá mnoho různých principů. Jsou často založeny na změně chemických či fyzikálních vlastností materiálů, které vlhkost absorbují. Výběr základních metod měření vzdušné vlhkosti jsou vysvětleny níže [9].

Psychrometrická metoda

Psychrometrická metoda využívá ke zjištění vzdušné vlhkosti rozdílu teplot měřených na dvou teploměrech. Nejčastěji se využívají kapalinové teploměry. Jeden teploměr je tzv. suchý, umístěn v prostředí jako při měření klasické teploty vzduchu. Druhý teploměr, nazývaný mokrý, má však obalený konec teploměru tkaninou (punčoškou), která je z části ponořena do vody. Voda tedy vzlíná po tkanině a udržuje ji stále vlhkou. Mokrý teploměr naměří vždy nižší teplotu než suchý, jelikož je mu odebíráno výparné teplo potřebné na odpaření vody z punčošky. Teplota se ustálí na hodnotě, kdy je prostředí schopné dodávat dostatečné teplo pro odpařování vody. Princip je tedy založen na měření tzv. mezního adiabatického ochlazení. Čím větší je vzdušná vlhkost, tím vyšší teplotu naměří mokrý teploměr. Vzdušná vlhkost se poté zjišťuje na základě rozdílu teplot na suchém a mokrém teploměru. Psychrometr je konstrukčně jednoduchý, rychlý a stabilní. Problémem jsou však teploty vzduchu pod bodem mrazu [6] [10].

Gravimetrická metoda

Gravimetrická metoda je založena na měření hmotnosti. Využívá se tzv. sušidlo, tedy absorbující látka, která absorbuje vlhkost z plynu o známém objemu. Zjišťuje se hmotnost sušidla před a po absorpci vlhkosti z plynu (vzduchu). Z přírůstku hmotnosti a známém objemu plynu lze určit vlhkost. Tato metoda je považována za nepřesnější, ale zároveň zdlouhavou. V praxi se využívá především laboratorně pro kalibrační účely [10].

Dilatační metoda

Již z názvu metody vyplývá, že se jedná o metodu, při níž dochází ke změně délky v závislosti na absorbované vlhkosti. V praxi se využívá k měření odmaštěný lidský vlas, či koňská žíně. Vlas je napínán pružinou a případná změna délky se projevuje změnou polohy ukazatele na stupnici. S vyšší vzdušnou vlhkostí se prodlužuje délka vlasů. Závislost prodloužení vlasu na vlhkosti však není lineární, ale spíše logaritmická. Vlas se při změně relativní vlhkosti z 0 % na 100 % protáhne o přibližně 3 % své původní délky. Výhodou je však spolehlivost této metody i při teplotách pod bodem mrazu. Je však nutné vlasy regenerovat, tedy vystavit je prostředí s vysokou vlhkostí. To však není problém u venkovních teploměrů, jelikož především v noci dosahuje vlhkost často hodnot rosného bodu [6] [10].

Elektronické vlhkoměry

Odporová metoda využívá změny vodivosti materiálu, který je schopen absorbovat vlhkost. Často je používáno tzv. Dunmoreovo provedení, které jako hygroskopickou látku používá polyvinylalkohol s přídavkem chloridu lithného. Elektrody jsou platinové a napařené na keramickém podkladu do tvaru hřebínku. Pro měření odporu se využívá střídavé napětí, aby nedocházelo k polarizaci elektrod. Tyto snímače nedokáží pokrýt vždy celé pásmo relativní vlhkosti. Toho lze však docílit užitím vícero snímačů, které mají různé koncentrace lithné soli. Odporové snímače jsou však citlivé na tvorbu kondenzátu a nedají se využívat při vyšších teplotách. Využívají se především díky jejich velké přesnosti a jemnému rozlišení [9] [10].

Kapacitní metoda využívá principu kondenzátoru s látkou absorbující vlhkost coby dielektrikum. V praxi je dielektrikum vyrobeno z polymeru schopného vázat vzdušnou vlhkost skrze perforovanou elektrodu. I přes malé množství absorbované vody jsou změny kapacity dobře měřitelné. Celkově se tyto snímače vyznačují také vyšší přesností, nicméně pomaleji reagují na změnu vlhkosti. Závislost kapacity na relativní vzdušné vlhkosti je v celém rozsahu téměř lineární, což je další předností tohoto typu snímače [9] [10].

5.2.1.3 Snímače tlaku

Atmosférický tlak je základní meteorologickou veličinou. Tlakové spády mezi oblastmi vyššího (anticyklóny) a nižšího tlaku vzduchu (cyklóny) mají za následek proudění vzduchu neboli vítr, jelikož dochází v atmosféře ke snaze o vyrovnání tlaků. Na základě tlaku vzduchu vznikají také předpovědi počasí, kdy s vyšším tlakem roste i pravděpodobnost hezkého počasí. Pro tlak vzduchu se ujala jednotka hPa, kdy za normální tlak je při hladině moře považován tlak 1013,25 hPa [11].

Tlak vzduchu představuje tíhu sloupce vzduchu na jednotku plochy. Pro měření atmosférického tlaku se používají barometry. Ty mohou být založeny na vícero fyzikálních principech, přičemž ty základní jsou vysvětleny níže.

Kapalinové barometry

V meteorologii stále používané kapalinové barometry jsou založeny na principu Torriceliho pokusu. Takový barometr se skládá z nádoby obsahující kapalinu a z jedné strany zatavené trubičky. Trubička se naplní kapalinou a poté se volný konec ponoří do nádoby s kapalinou, během otáčení je volný konec ucpaný. Hladina v trubičce se poté sníží a ustálí se ve výšce nad volnou hladinou v nádobě, která odpovídá atmosférickému tlaku. Jedná se o princip, kdy je atmosférický tlak v rovnováze s tlakem, který vytváří sloupec kapaliny. Jako kapalina je využíván líh, voda, tetrachlor či rtuť. Měří se výška sloupce kapaliny a dle jejich známých vlastností (hustota) lze vypočítat atmosférický tlak. Konstrukčních řešení tohoto barometru existuje více, všechny však využívají stejného principu. Kapalinové barometry se vyznačují spolehlivostí a jednoduchostí [11] [12].

Deformační barometry

Pro měření tlaku lze také využít elastických vlastností některých materiálů. Princip spočívá v deformaci a změně tvaru materiálu při změně tlaku. Jako příklad lze uvést tzv. aneroid, což je měřicí přístroj, který obsahuje kovovou krabičku, která je však vzduchoprázdná. Při zvýšení atmosférického tlaku dojde k její větší deformaci a naopak. Deformace je přenášena na stupnici ukazující atmosférický tlak. Je důležité podotknout, že deformace musejí být elastické, tedy v oblasti Hookova zákona [12].

Elektronické barometry

Mezi elektronické barometry patří **piezoelektrické snímače tlaku**. Využívají přitom známého piezoelektrického jevu. Pokud na krystal působí síla (v tomto případě tíha atmosféry) v kolmém směru na optickou osu krystalu, objeví se na druhém kolmém směru na optickou

osu napětí. To lze měřit a následně určit tlak. Krystaly bývají často vyrobeny z SiO_2 či BaTiO_3 . Piezoelektrický element je poté získán vyříznutím destičky, která má hrany rovnoběžné s význačnými osami krystalu. Plochy, na kterých vzniká náboj jsou poté opatřeny elektrodami. Ve snímači jsou tyto elementy často používány dva, aby se zvýšil zisk vzniklého náboje. Tyto snímače jsou tepelně odolné až do $550\text{ }^\circ\text{C}$, nicméně jsou ale zároveň tepelně závislé. Mezi výhody patří jejich rychlá odezva, a proto se hodí především pro dynamické procesy [12].

Dalším typem jsou velmi často používané **piezorezistivní snímače tlaku**. Monokrystalický křemík (měřicí element) je v tomto případě dotován přísadami. Tím dochází ke změně vlastností krystalu, jehož měrný odpor se stává velmi závislý na mechanickém namáhání. Dotovaná místa vytváří jakési vodivostní cestičky, které jsou uspořádány do tvaru Wheatsonova můstku. Krystal je obvykle uložen v silikonovém oleji a vnější tlak je na něj přenášen pomocí membrány. Tyto snímače se vyznačují dlouhodobou stabilitou, dobrou reprodukovatelností měření, malou hysterezí a dobrou citlivostí [12].

Kapacitní snímače tlaku využívají také principu deformace. V tomto případě se deformuje tenká vodivá membrána, která zároveň slouží jako elektroda kondenzátoru. Druhá elektroda je pevná. Jako dielektrikum se využívají inertní plyny, vzduch, či silikonové oleje. Zvýšením tlaku se prohne membrána, a tím se změní kapacita snímače. Závislost kapacity snímače na tlaku je typicky hyperbolická. Se zvyšujícím se tlakem, klesá kapacita. V oblasti největšího poklesu je tento snímač velmi citlivý a dosahuje vysokého rozlišení. V praxi se tedy pro pokrytí širšího rozsahu tlaků používá více těchto snímačů s upravenými vlastnostmi pro měření menších rozpětí tlaků [12].

5.2.1.4 Snímače suspendovaných částic

Pro měření koncentrace suspendovaných částic se využívají především metody postavené na principech, které jsou uvedeny níže.

Gravimetrická metoda – zjištění koncentrace suspendovaných částic

Tato metoda je založena na zjišťování hmotnosti filtru před a po vystavení prachových částic. Nejdříve je velmi přesně zjištěna hmotnost filtru, který je schopen zachytit částice od určité velikosti. Následně se vloží filtr do měřicího přístroje. Přístrojem proudí přesně definované množství vzduchu. Nejčastěji se nechává vzduch proudit přes filtr 24 hodin. Poté se opět zjistí přesná hmotnost filtru [13]. Při známém hmotnostním přírůstku a objemu vzduchu, který za daný interval prošel skrze filtr, je možné jednoduše spočítat koncentraci suspendovaných částic dané frakce. Tato metoda je opravdu velmi přesná, ale jednorázová, a proto se využívá jako tzv. referenční [14].

Radiometrická metoda

Radiometrická metoda je založena na podobném principu jako metoda gravimetrická, avšak místo zjišťování hmotnosti filtru se využívá princip absorpce β záření suspendovanými částicemi zachycenými filtrem. Nejprve se měří absorpce čistého filtru, který bývá vyroben ze sklených vláken. Prošlé záření se zachytává pomocí Geiger-Müllerovy trubice. Tato hodnota je referenční. Poté se nechá přes filtr proudit přesný průtok vzduch obsahující prachové částice. Po jisté době se opět změří β záření, které prošlo skrze filtr se zachycenými částicemi. Z rozdílu měřených záření, známém průtoku vzduchu a intervalu měření lze určit koncentraci prachových částic. Výběrem filtru lze sledovat jen určité frakce suspendovaných částí. Metoda také vykazuje vysoké přesnosti, nicméně je více náročná na provoz [14].

Optické metody

Optické metody jsou postaveny na principu absorpce či rozptýlení elektromagnetického záření na suspendovaných částicích. Jako zdroje elektromagnetického záření se užívají lasery či LED [14].

Metoda měření transmise světla je založena na principu pohlcení či rozptýlení světelného paprsku na suspendovaných částicích proudícím skrze paprsek. V ose paprsku je umístěn detektor elektromagnetického záření. Dle intenzity dopadajícího světla na tento detektor se vyhodnocuje ztráta intenzity, která odpovídá koncentraci prachových částic ve vzduchu. Tuto metodu lze úspěšně použít i pro větší koncentrace částic ve vzduchu [13] [14].

Metoda měření rozptylu světla je podobná předchozí metodě. V tomto případě není detektor záření umístěn v ose paprsku, ale většinou kolmo na paprsek. Světlo vycházející ze zdroje je rozptylováno na suspendovaných částicích a rozptýlené záření je následně měřeno. S vyšší koncentrací částic ve vzduchu tedy roste intenzita rozptýleného záření. Tato metoda je oproti předchozí více citlivá na velmi nízké koncentrace částic v ovzduší [13] [14].

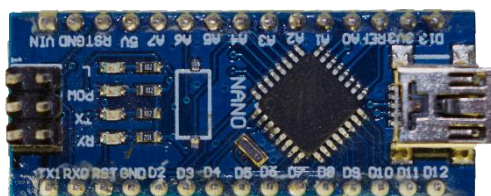
5.2.2 Řídicí systém

V oblasti řídicího systému byl v cílech práce stanoven požadavek pro aplikaci mikropočítače platformy Arduino, či jí podobné platformy. Arduino je známé především svou uživatelskou přívětivostí a širokou komunitou lidí, kteří ji používají. Je tedy velmi využívaná začátečníky, kteří začínají s programováním elektroniky. Kromě toho lze na trhu nalézt i jiné platformy, jako jsou vývojové desky s čipem od firmy Espressif nebo známé RaspberryPi. Tato kapitola je zaměřena na porovnání vybraných vývojových desek pro využití v navrhované přenosné meteostanici. Níže jsou uvedeny přehledy vybraných vývojových desek rozdělených dle platform.

Arduino

Platforma Arduino je Open Source. Díky tomu jsou veřejně přístupná schémata těchto vývojových desek. Proto lze nalézt na trhu i klony těchto desek, které však neoplývají kvalitou zpracování. Firma Arduino prodává více typů desek, které se liší svou velikostí, použitým mikročipem, počtem I/O pinů a dalšími vylepšeními (například rozšíření o WiFi modul). Pro účely meteorostanice byla patrně nejvhodnější deska Arduino Nano, která je zmenšenou verzí nejznámějšího Arduino Uno.

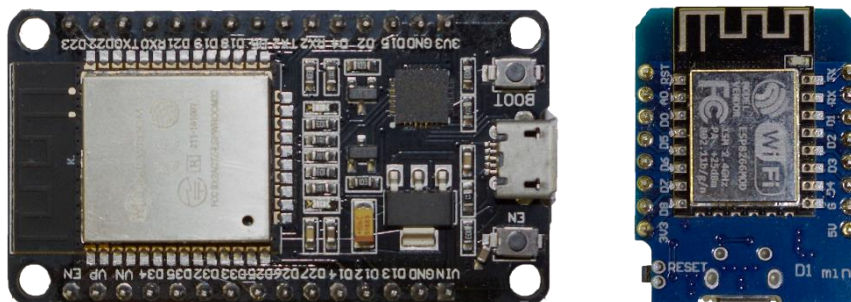
Arduino Nano obsahuje čip ATmega328p s frekvencí 16 MHz od firmy Atmel stejně jako Arduino Uno. Jeho rozměry jsou 45 x 18 mm a deska je navržena pro umístění do DPS. Její nevýhodou je menší paměť v porovnání s konkurenčními deskami. Deska je vybavena mini-USB portem a Serial převodníkem. Je vhodná pro méně náročné aplikace.



Obrázek 7: Vývojová deska Arduino Nano

Espressif

Společnost Espressif vyrábí mikrokontroléry **ESP8266** a výkonnější **ESP32**. Tyto čipy následně jiní výrobci osazují na své vývojové desky. Jejich pracovní frekvence je mnohem vyšší než u Arduina s Atmelem. Samotné čipy jsou také vybaveny WiFi modulem a ESP32 navíc Bluetooth technologií. Vývojové desky s těmito mikrokontroléry se využívají v aplikacích s potřebou bezdrátové konektivity, jelikož obsahují již výše uvedené komunikační moduly. Mezi známé vývojové desky s ESP8266 patří například Wemos D1 mini. S ESP32 se lze často setkat na desce NodeMCU ESP32.



Obrázek 8: Vývojová deska NodeMCU ESP32 (vlevo), Wemos D1 mini s ESP8266 (vpravo)

RaspberryPi

RaspberryPi proslul svými mini počítači, osazenými procesory s ARM architekturou, které mají standardní výstupní porty typu HDMI, USB, RJ-45 a další. Využití tedy našly jako malé počítače s nízkou spotřebou, na kterých může být provozován OS Linux, a v aplikacích, které nejsou výpočetně náročné a běží v režimu 24/7. Firma začala vyrábět i menší desky s omezenými funkcemi. Pro meteostanici by patrně byla nejvhodnější vývojová deska **RaspberryPi Pico** s rozměry 51 x 21 mm. Srdcem desky je mikrokontrolér RP2040. Deska disponuje kromě I/O pinů také micro-USB portem.



Obrázek 9: Vývojová deska RaspberryPi Pico

Přímé porovnání parametrů těchto vybraných desek lze nalézt v tabulce č. 2.

	Arduino Nano	Wemos D1 mini ESP 8266	NodeMCU ESP32	RaspberryPi Pico
Mikrokontrolér	ATmega328p	ESP8266	ESP32	RP2040
Architektura	8 bit RISC	32 bit LX106	32 bit LX6	32 bit ARM Cortex-M0+
Počet jader	1	1	2	2
Frekvence	16 MHz	až 160 MHz	až 240 MHz	až 133 MHz
Napětí (log. úrovně)	5 V	3,3 V	3,3 V	3,3 V
Digitální I/O piny	14	16	36	26
Digitální piny s PWM	6	16	32	16
Analogové piny	8	1	15	3
Sběrnice SPI/I ² C/UART	1/1/1	1/1/1	4/2/2	2/2/2
Wi-Fi/Bluetooth	---/---	ano/---	ano/ano	---/---
Paměť Flash	32 kB	4 MB	4 MB	2 MB
Paměť RAM	2 kB	128 kB	520 kB	264 kB
Paměť EEPROM	1 kB	65 B	---	---
Spotřeba	19 mA – 180 mA	15 μ A – 400 mA	20 mA – 240 mA	N/A
Spotřeba v režimu Hlubokého spánku	23 μ A	0.5 μ A	5 μ A	2 mA
Rozměry	45 x 18 mm	34 x 26 mm	52 x 31 mm	51 x 21 mm

Tabulka 2: Přehled parametrů vybraných vývojových desek [15] [16]

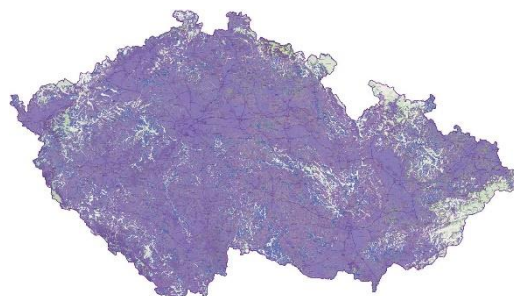
5.2.3 Komunikační systém

V cílech této práce bylo stanoveno, že meteostanice bude odesílat data na internet, aby se dala pozorovat online. Technologií, které by se daly použít pro spojení, je v dnešní době několik. Avšak pro zamýšlenou přenosnou meteostanici nemá smysl uvažovat například Wi-Fi připojení, jelikož tyto sítě jsou krátkého dosahu. Takže například v lese by meteostanice neměla spojení se světem.

Nároky na bezdrátovou technologii, kterou by šlo využít, jsou především: pokrytí větší části České republiky, cena za posílání dat po síti a nároky na napájení, resp. spotřebu energie. Při těchto požadavcích lze využít technologie zaměřující se na IoT jako je LoRaWAN, Sigfox, NB-IoT nebo klasické GSM [17].

5.2.3.1 Sigfox

Společnost Sigfox z Francie, která staví za pomoci české firmy SimpleCell svou síť pro IoT, pokryla již 94 % rozlohy České republiky za pomoci 320 vysílačů na frekvenci 868 MHz. Zařízení musí obsahovat vlastní komunikační čip, který se identifikuje dle 32bitové Sigfox ID. Technologie je koncipována tak, aby každé zařízení poslalo denně pouze 140 zpráv po 12 B. Komunikace může být obousměrná, nicméně koncové zařízení může přijmout maximálně 4 zprávy denně po 8 B. Rychlost přenosu je 100 bit/s. Proud potřebný k vysílání činí 5 – 45 mA. Dosah ve volném terénu dosahuje 50 km, ale ve městě je signál dostupný maximálně do 3 km od vysílače. Koncové zařízení se navíc nesmí během vysílání pohybovat [17] [18].



Obrázek 10: Pokrytí ČR sítí Sigfox [18]

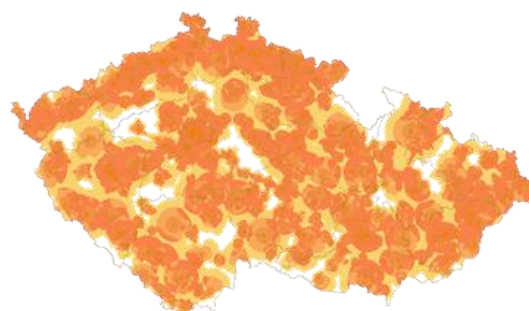
Odeslaná data předá vysílací stanice do cloudu společnosti Sigfox, kde k nim mají uživatelé přístup. Cena balíčku při využívání 140 odeslaných a 4 přijatých činí 247 Kč / rok [18].

5.2.3.2 LoRaWAN

Tato technologie je volně přístupná. Soukromé společnosti mohou stavět vlastní síť na této technologii. V ČR takovou síť provozuje CRA (České Radiokomunikace) i například společnost Starnet. V Evropě mohou být tyto sítě stavěny na frekvencích 433 MHz nebo 868 MHz. Každá z těchto společností má různé pokrytí ČR a své vlastní podmínky

pro používání. Například u CRA musí být každé koncové zařízení schváleno, a tím dochází i k vyšší bezpečnosti sítě. Síť má ve volném prostoru dosah až 20 km a v městské zástavbě mezi 2 – 5 km. Přenos dat po této síti je možný rychlostí od 300 bit/s do 50 000 bit/s.

V tomto případě není obousměrná komunikace tak omezená jako v případě Sigfoxu. Výhodou je nízká spotřeba energie při odesílání dat [17].



Obrázek 11: Pokrytí ČR sítí LoRaWAN od CRA (2019) [17]

Počet možných odeslaných a přijatých zpráv se liší dle společností. Data jsou také ukládána na úložištích daných společností. Cenově vychází výhodněji společnost Starnet. Ta za 250 odeslaných a 25 přijatých zpráv denně z jednoho zařízení účtuje ročně 299 Kč [19].

5.2.3.3 NB-IoT

Tato síť je v ČR provozována mobilními operátory. Nejvýznamnější z nich jsou však společnosti Vodafone a O2. Ty mají dominantní postavení na trhu, jelikož mají největší pokrytí touto sítí v ČR. T-Mobile zatím tuto síť zprovozňuje a testuje ve větších městech. Nejde o samostatně vytvořenou síť,



Obrázek 12: Pokrytí ČR sítí NB-IoT od Vodafone [17]

nýbrž se využívá již existující LTE síť, ze které se část pásma vyhradí pouze pro IoT zařízení. Zařízení tedy musí obsahovat SIM kartu. Rychlost přenosu dat může dosahovat až 200 kbit/s. Vysílač má dosah přibližně 20 km. Ceny se liší dle nabídky operátorů, například O2 nabízí přenos 10 MB za 56 Kč / měsíc [17].

5.2.3.4 GSM síť

GSM sítě jsou využívány v telekomunikacích. Jejich funkce byla doplněna i o přenos dat (GPRS, EDGE). Dají se tedy využívat i na připojení k internetu. GPRS nabízí rychlost přenosu až 80 kbit/s. Později byly nahrazeny rychlejšími 3G, 4G a 5G sítěmi. Jejich výhodou je především široké pokrytí ČR. Ceny za přenesený MB se liší dle operátorů. Například společnost Oskarta nabízí přenos 1 MB dat za 1 Kč a účtuje každý započatý 1 kB. Je nutné mít v zařízení modul se SIM kartou, který má od předchozích řešení největší spotřebu energie během provozu [20].

5.2.4 Napájení

5.2.4.1 Akumulátory

Přenosná meteostanice dle cílů práce musí být energeticky nezávislá a provozuschopná po dobu minimálně jednoho měsíce. Pro uskutečnění tohoto cíle je nezbytné, aby meteostanice obsahovala vlastní nezávislý zdroj el. energie - akumulátor.

Akumulátor má výhodu oproti primárním článkům (bateriím) v možnosti opětovného nabíjení. Existuje více typů akumulátorů. Mezi ty nejpoužívanější patří olověné akumulátory, lithium-iontové (Li-Ion), lithium-polymerové (Li-Pol), lithium-železo-fosfátové (LiFePO₄), nikl-kadmiové (NiCd) a nikl-metal-hydridové (NiMh) akumulátory. Dvě posledně jmenované technologie jsou dnes již překonány Li-Ion, Li-Pol i LiFePO₄ akumulátory. Ty vykazují delší životnost, vyšší nabíjecí a vybíjecí proudy a netrpí na „paměťový efekt“. Olověné akumulátory jsou využívány především v automobilovém průmyslu. Dokáží poskytnout obrovské vybíjecí proudy, ale v poměru rozměry/kapacita a hmotnost/kapacita zaostávají za Li-Ion, Li-Pol a LiFePO₄ [21] [22].

Li-Ion

Jmenovité napětí jednotlivých Li-Ion článků je dáno normami. Proto se můžeme setkat s uváděnou hodnotou 3,6 V a 3,7 V (3,7 V pochází z USA). Plně nabitý článek má pak 4,2 V. Výhodou těchto článků je malé samovybíjení. Nevýhodou je vyšší vnitřní odpor a menší nabíjecí a vybíjecí proud [21].

Li-Pol

Li-Pol akumulátor je vylepšenou verzí Li-Ion akumulátoru. Elektrolyt je tvořen vrstvou polymeru a díky tomu lze tyto články vyrábět v různých tvarech. Jmenovité napětí jednotlivých článků je také 3,6 V, resp. 3,7 V. Výhodou je nižší hmotnost a o trochu vyšší nabíjecí a vybíjecí proudy [21].

LiFePO₄

LiFePO₄ akumulátory jsou asi nejnovějším běžně užívaným typem. Využívají se hojně ve fotovoltaických systémech pro ukládání nespotřebované energie z panelů. Jednotlivé články mají jmenovité napětí 3,2 V. V nabitém stavu pak napětí činí 3,6 V. Dokáží poskytnout vysoké vybíjecí proudy a životnost dosahuje běžně kolem 4000 cyklů [21] [22].

Kromě jmenovitého napětí a kapacity uvádějí výrobci akumulátorů nabíjecí a vybíjecí proud. Ten bývá často výrobcem uváděn jako tzv. „C-rate“. Například pro Li-Ion akumulátor je běžně uváděn vybíjecí proud 2C a nabíjecí proud 0,5C. „C-rate“ je vztažen ke kapacitě

akumulátoru. Proud odpovídající 1C znamená proud, kterým se akumulátor nabije (vybije) za jednu hodinu. Pokud bychom měli článek s kapacitou 3000 mAh a maximální doporučený vybíjecí proud 2C, činil by tedy dvojnásobek proudu 1C, tedy $I = 2 \times 3000 = 6000$ mA. Nabíjecí proud bývá u Li-Ion akumulátorů 0,5C, což odpovídá v našem případě hodnotě 1500 mA [21].

5.2.4.2 FV panely

Aby meteostanice mohla být umístěna v dané lokalitě delší dobu než jeden měsíc, bylo by vhodné meteostanici osadit fotovoltaickým panelem, který by ji mohl alespoň částečně dobíjet a prodloužit tak dobu provozu meteostanice.

Fotovoltaický článek mění sluneční záření na elektrickou energii. Princip FV článku tkví v diodě s minimálně jedním PN přechodem. Vlivem ozáření se v článku tvoří nabitě částice (elektron-díra), které jsou díky PN přechodu oddělovány, a tím vzniká napěťový rozdíl. Minimální energii, kterou dopadající foton musí článku dodat, je 1,1 eV, což odpovídá záření s vlnovou délkou menší než 1100 nm. Články se spojují sériově i paralelně a vytváří fotovoltaický panel. Jako materiál na výrobu FV článků se používá krystalický křemík ve formě plátků s tloušťkou 0,2 – 0,5 mm. Existují v zásadě tři typy panelů: monokrystalické, polykrystalické a amorfní [23].

Monokrystalické panely

Monokrystalické články se vyrábějí z polykrystalických ingotů metodou pomalého tažení monokrystalického křemíku přímo z taveniny. Mívají vyšší účinnost (14 – 17 %) než polykrystalické. Nicméně výroba je o něco náročnější, což se projevuje na ceně panelů [23].

Polykrystalické panely

Polykrystalické články jsou asi nejvíce používaným typem panelů díky svému poměru cena/výkon. Čistý roztavený křemík se odlévá do forem, díky čemuž má lepší využitelnost. Trochu nižší je však účinnost článků, která se pohybuje kolem 13 – 16 % [23].

Amorfní panely

Amorfní panely se vyrábějí rozkladem sloučenin křemíku ve vodíkové atmosféře. Následně jsou tímto způsobem vyrobené tenké vrstvy nanášeny na skleněné či plastové podložky. Jak z názvu vyplývá, tyto vrstvy jsou amorfní, tudíž nemají pravidelnou krystalickou mřížku. Na články se spotřebuje mnohem méně materiálu než na předchozí typy, což se odráží na nižší ceně panelů. Jejich účinnost je však o dost nižší (5 – 12 %). Díky své

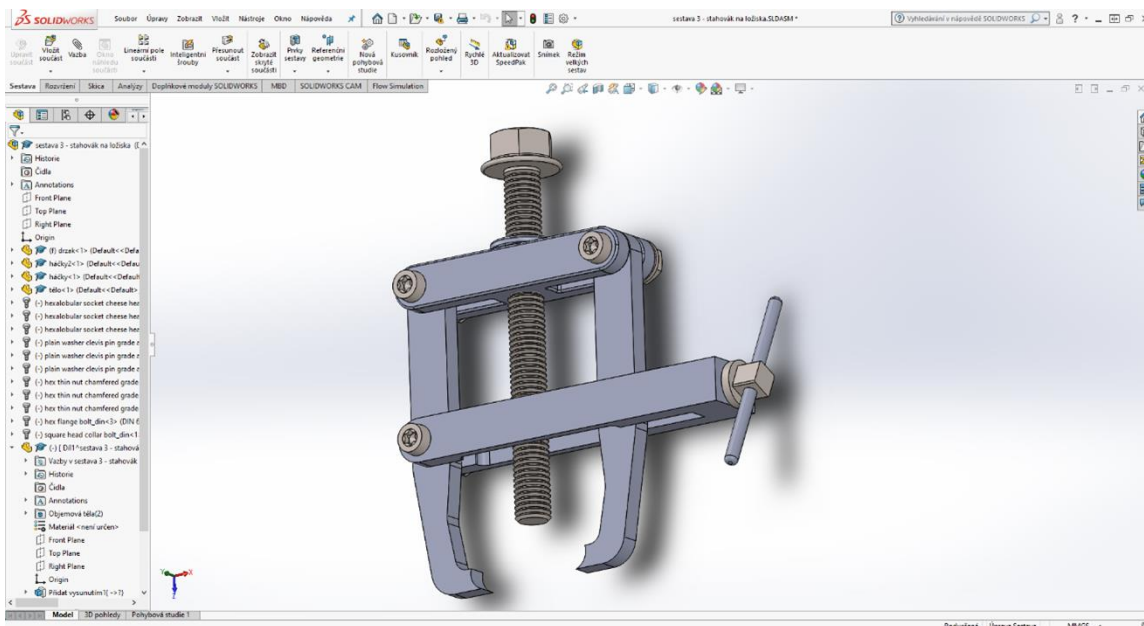
struktura však vyrábějí více energie při rozptýleném záření (při zatažené obloze) než panely mono a polykrystalické [23].

5.3 Software

Během návrhu a realizace meteostanice jsem použil speciální vývojářské programy. Jedná se o CAD software Solidworks, který slouží k tvorbě 3D modelů. Jelikož licence tohoto programu je velmi drahá, byla využita školní verze určená pro vzdělávací instituce. Pro 3D tisk byl využit software PrusaSlicer. Ten převádí vytvořený 3D model na pokyny pro tiskárnu. K tvorbě el. zapojení byl využit program Fritzing, který obsahuje Arduino a jiné vývojové desky, včetně všech možných rozšiřujících modulů. V neposlední řadě posloužil software Arduino IDE, ve kterém je možné programovat Arduino a jiné vývojové desky.

5.3.1 Solidworks

Program Solidworks patří mezi CAD software. Slouží primárně k tvorbě 3D modelů. Proces vytváření modelu začíná vždy u 2D skici, která se následně pomocí jedné z metod převede do prostoru. Nejčastěji se využívá vytažení skici do prostoru, nebo rotace skici kolem vybrané osy. Hotové modely lze skládat a vytvářet tzv. sestavy. Program umožňuje také tvorbu technických výkresů. Solidworks preferuje ukládání souborů ve formátu s příponou .sldprt. Na obrázku níže lze vidět prostředí programu Solidworks s vytvořeným ukázkovým modelem.

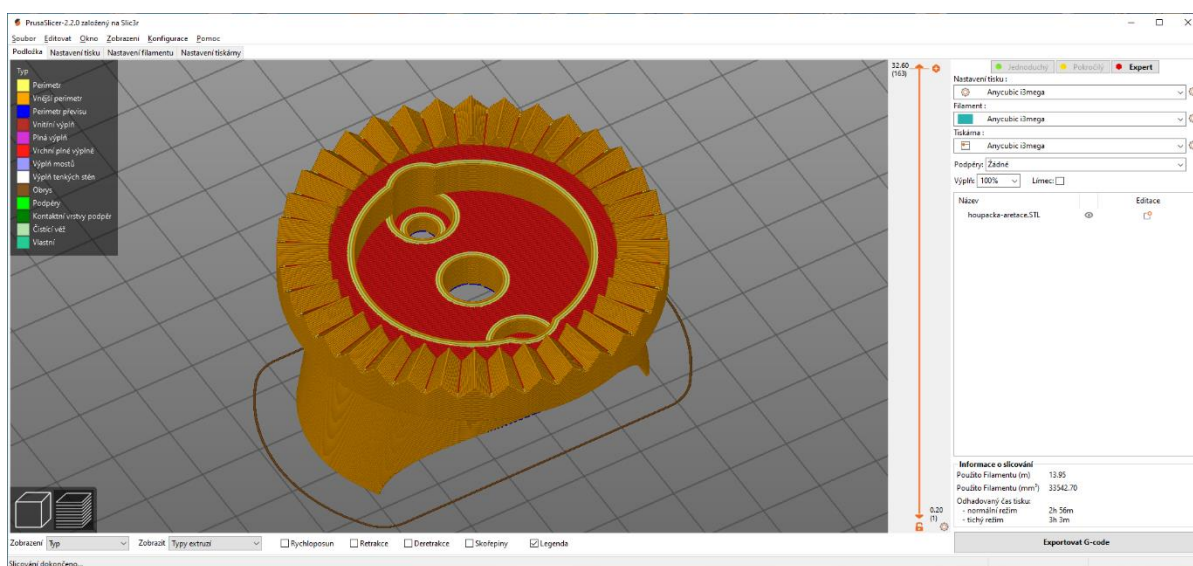


Obrázek 13: Prostředí programu Solidworks

Solidworks je opravdu komplexní software. Pomocí rozšiřujících balíčků je možné vytvářet například i elektro-mechanické systémy. Lze také provádět analýzy konstruovaných modelů například různými typy namáhání a objevit slabá místa ještě před výrobou těchto dílů. Za alternativní software lze považovat například program AutoCAD, který nabízí podobné funkce [24].

5.3.2 PrusaSlicer

Software PrusaSlicer je volně dostupný program, který se využívá při 3D tisku. Model vytvořený v CAD softwaru se vloží do PrusaSliceru, který obsahuje parametry 3D tiskárny. Jak již název napovídá, program model rozřeže na jednotlivé vrstvy a navrhne dle vnitřních algoritmů nejlepší trajektorii tiskové hlavy 3D tiskárny vrstvu po vrstvě. Výstupem je tzv. G-code, což jsou univerzální příkazy, pomocí nichž se řídí nejen 3D tiskárny. Ten například obsahuje, jakými rychlostmi a na které souřadnice se má pohybovat tisková hlava. Ukázka z prostředí programu PrusaSlicer je vyobrazena na obrázku níže [25].



Obrázek 14: Prostředí programu PrusaSlicer

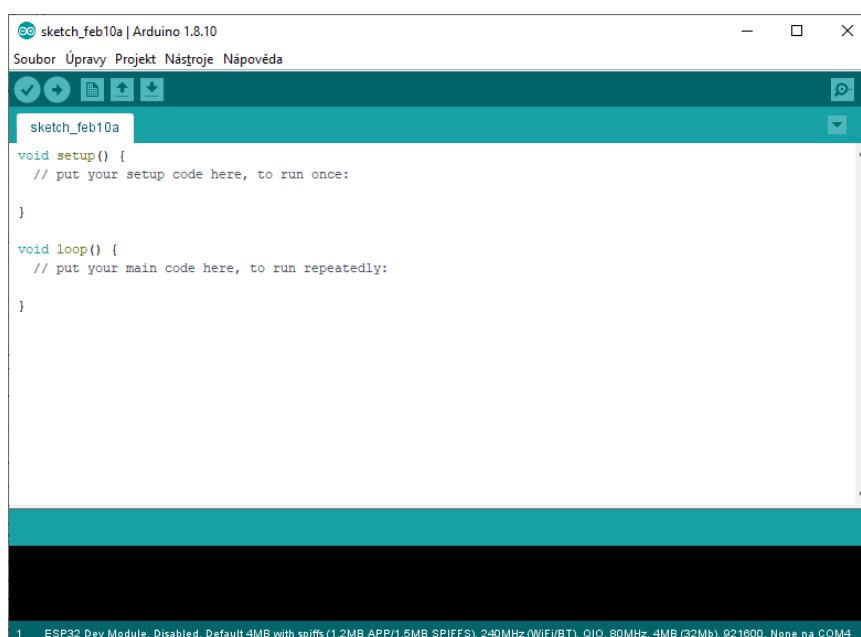
5.3.3 Fritzing

Software Fritzing je volně dostupný program, který obsahuje předpřipravené vývojové desky a různé doplňkové moduly. Slouží primárně k vizualizaci zapojení, tvorbě el. schémat a návrhu plošných spojů. Částečně zastává i funkci Arduino IDE, jelikož lze v jeho prostředí programovat vybrané vývojové desky.

5.3.4 Arduino IDE

Arduino IDE je vývojové prostředí, které slouží k programování vývojových desek Arduino. Doinstalováním balíčků lze však tento výčet doplnit i o vývojové desky jiných platforem. Program je volně dostupný na operační systémy Windows, Linux i MacOS.

Programovací jazyk se nazývá Wiring, který je založen na C++ a byl vytvořen pro snadné programování mikrokontrolérů bez hlubší znalosti hardwaru. Pro naprogramování je vždy nutné vybrat správný mikrokontrolér a port, ke kterému je připojen k počítači. Vytvořené zdrojové kódy programů jsou ukládány jako soubory s příponou .ino. Na obrázku níže je vyobrazeno prostředí programu [26].



Obrázek 15: Prostředí programu Arduino IDE

Jak lze z obrázku vypožorovat, struktura zdrojového kódu se dělí na dvě základní funkce. První je funkce `setup(){}`, která se provede vždy jako první při spuštění mikrokontroléru, a to pouze jednou. Proto jsou v ní prováděny inicializace sériové komunikace či nastavování vstupně-výstupních portů [26].

Druhá funkce `loop(){}` pak většinou obsahuje tu část kódu, která se má opakovat. Tato funkce totiž funguje jako nekonečná smyčka. V této funkci bývá většinou umístěn právě hlavní kód programu [26].

6 Praktická část

Tato část práce je věnována samotné realizaci mobilní meteostanice. Jsou zde popisovány fáze od tvorby konstrukce až po programování meteostanice.

6.1 Návrh konstrukce

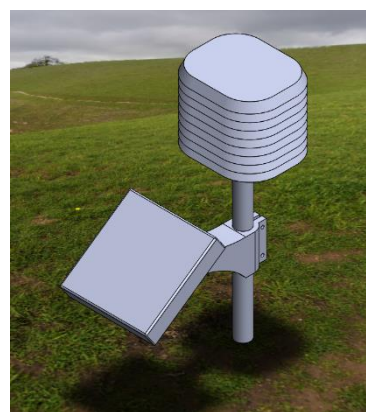
Při návrhu konstrukce přenosné meteostanice bylo nutné zvolit tvar a umístění všech prvků meteostanice při zachování kompaktnosti, odolnosti konstrukce nejen proti povětrnostním vlivům, ovlivnění měření vlivem rozmístění komponent a možnosti umístit meteostanici prakticky kdekoliv. Postupem času jsem navrhnul tři koncepty. Pro každý z nich jsem si vytvořil ilustrační fotomontáž a zvážil výhody a nevýhody.

Koncept č. 1 počítal s umístěním fotovoltaického panelu na střeše meteostanice, s čidly ve středu radiačního krytu a zbylou elektronikou umístěnou ve spodní části. S tímto konceptem se pojí především problematika absorpce světelného záření fotovoltaickým panelem, čímž bude zahříván nejen samotný panel, ale i okolní konstrukce vlivem vedení tepla. To by mohlo stát za případným ovlivněním měření teploty. Výhodou je však dobrá kompaktnost a přenositelnost stanice. Navíc je možné při tomto řešení instalovat stanici i bez stojanu.



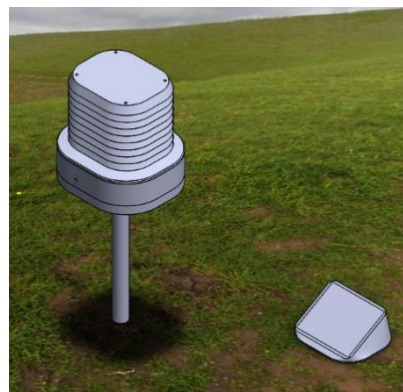
Obrázek 16: Koncept konstrukce č. 1

Koncept č. 2 řeší umístění FV panelu na samostatné rameno přidělané k tyči stojanu meteostanice. Akumulátory by byly umístěny do krabíčky, která by sloužila jako podklad pro FV panel. Radiační kryt by poté obsahoval jak senzory, tak také řídicí a komunikační systém. Tímto řešením by se oddělila konstrukce radiačního krytu se snímači a řídicí elektronikou od FV panelu a akumulátorů. Tím by se zamezilo případnému ovlivnění měření teploty vlivem vedení tepla od FV panelu. Nicméně, stoupající teplý vzduch od povrchu panelu by mohl být při určitém směru větru unášen do radiačního krytu k teploměru. Při tomto rozmístění by se také zhoršila kompaktnost, a navíc by bylo nutné umístit meteostanici vždy na stojan.



Obrázek 17: Koncept konstrukce č. 2

Koncept č. 3 je krajní řešení, kdy bylo uvažováno o samostatném umístění FV panelu poblíž meteostanice ve vzdálenosti do 2 metrů. Akumulátory a zbylá elektronika by byla umístěna pod radiačním krytem jako v případě konceptu č. 1. V tomto řešení lze vyloučit vliv FV panelu na měřenou teplotu. Je to však nejméně kompaktní řešení a instalace meteostanice by v takovém případě mohla být za zhoršených prostorových podmínek složitější.



Obrázek 18: Koncept konstrukce č. 3

Stručné porovnání konceptů je uvedeno v tabulce níže:

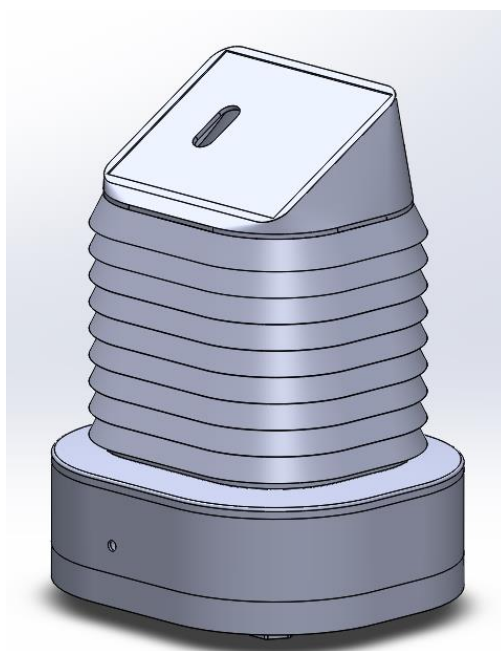
	Koncept č. 1	Koncept č. 2	Koncept č. 3
Kompaktnost	Výborná	Dostačující	Nejhorší
Umístění bez stojanu	Ano	Ne	Ano
Ovlivnění měřené teploty	Vedením tepla (lze omezit izolační výplní v konstrukci)	Prouděním teplého vzduchu (nelze omezit)	Bez vlivu

Tabulka 3: Porovnání konceptů konstrukce meteostanice

Po úvaze jsem nakonec zvolil koncept č. 1. Ten totiž z mého pohledu představuje asi nejlepší kompromis mezi přenositelností a možným vlivem ohřátého FV panelu na měření teploty. Umístění meteostanice bez stojanu pak lze využít například při měření ve městě na parapetu okna, jelikož není možné často umístit meteostanici na jiné místo, aby nebyla například zcizena či poškozena. Při konstruování byl brán zřetel na možnosti přenosu tepla od FV panelu k senzoru teploty, a proto již bylo při návrhu počítáno s využitím tepelně izolačních materiálů pro výplně dutin mezi FV panelem a samotným tělem radiačního krytu. Pro modelování všech částí konstrukce meteostanice byl použit CAD software Solidworks.

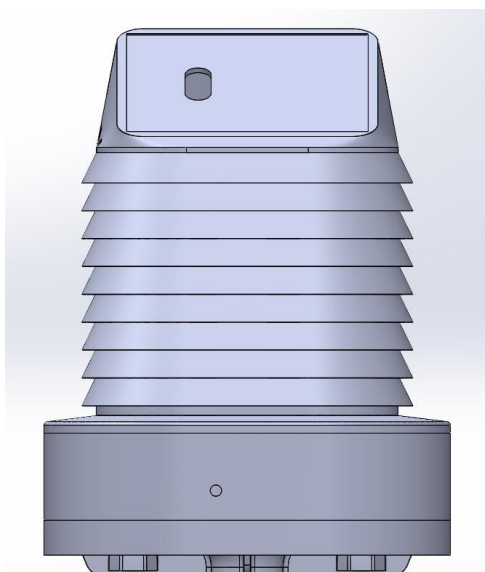
Při konstruování bylo nutné zohlednit i možnost srážek a povětrnostních vlivů. Bylo tedy nutné navrhnout konstrukci tak, aby se voda nedostala do spodní části meteostanice s řídicí deskou, akumulátory a ostatní elektronikou a co nejvíce se eliminoval průnik srážek k samotným snímačům. Zároveň ale bylo důležité zabezpečit proudění vzduchu skrze radiační kryt k senzorům. V neposlední řadě byl kladen důraz na vhodné tvary jednotlivých částí tak, aby šly co nejsnáze tisknout na 3D tiskárně.

Na následujících obrázcích jsou vyobrazeny pohledy a řezy vymodelovanou meteostanicí.

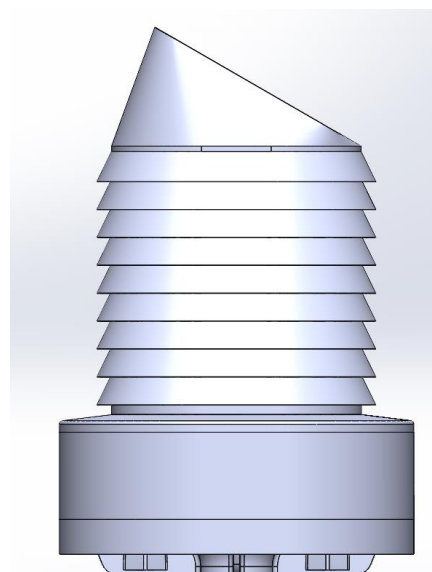


Obrázek 19: 3D pohled navržené konstrukce
meteostanice

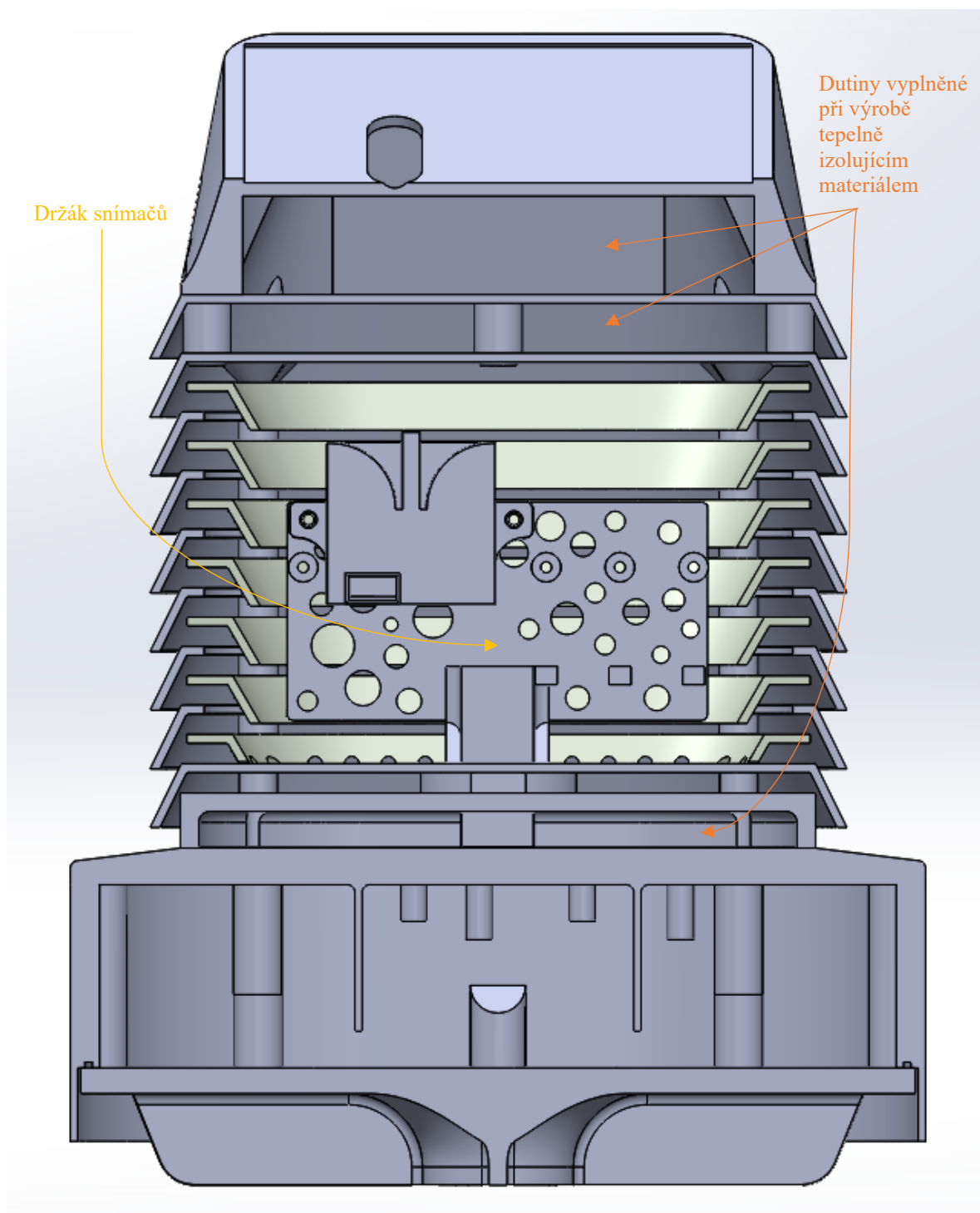
Sklon střechy, na které je umístěn fotovoltaický panel, byl zvolen jako kompromis mezi největší účinností panelu v zeměpisných šířkách ČR [27] a přijatelnou velikostí plochy pro umístění panelu, který při tomto sklonu vzniká na střeše meteostanice. Byl tedy zvolen sklon 30° . Konstrukce se skládá z mnoha částí, které jsou spojeny čtyřmi závitovými tyčemi, které procházejí téměř skrze všechny části. Spodní box pro elektroniku a akumulátory je opatřen drážkami pro těsnění, aby se zamezilo vniknutí vody, a navržen pro vhodné uchycení elektroniky a akumulátorů.



Obrázek 20: Přední pohled konstruované
meteostanice



Obrázek 21: Boční pohled konstruované
meteostanice



Obrázek 22: Řez navrhovanou konstrukcí přenosné meteostanice

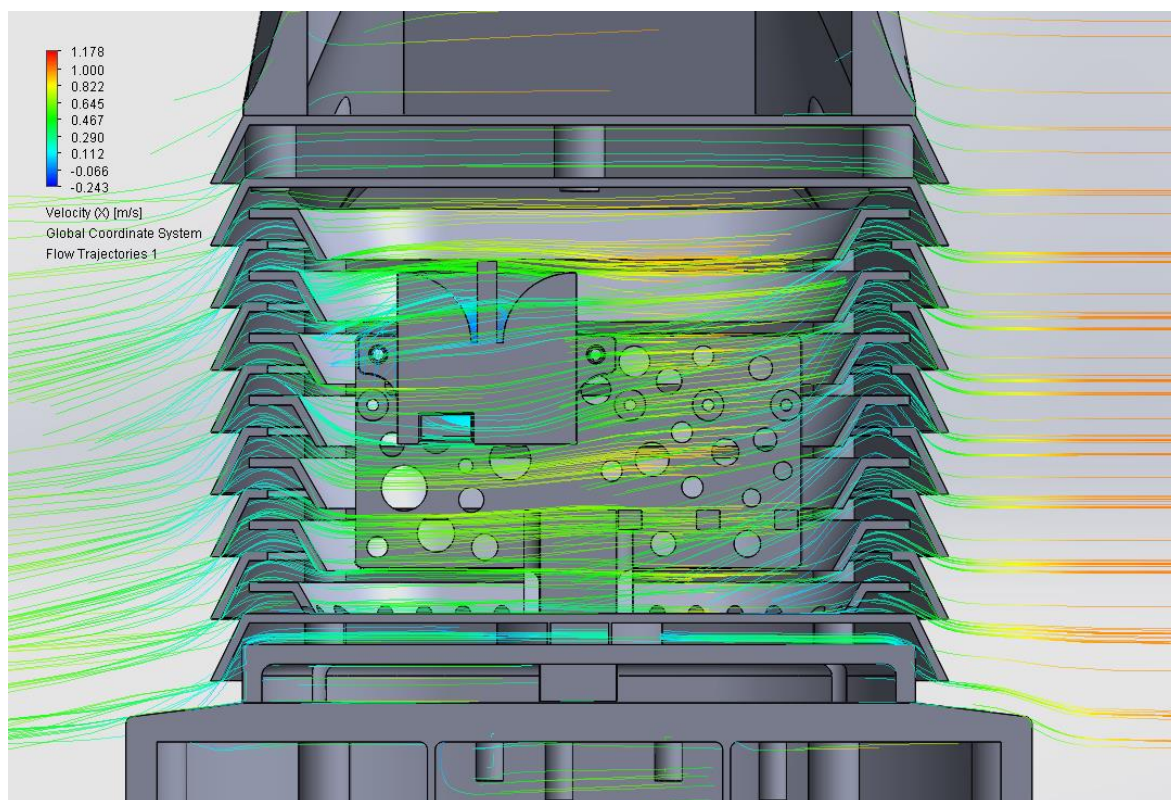
Uvnitř radiačního krytu se nachází držák pro jednotlivé snímače. Pro kabely vedoucí k těmto snímačům od řídicí desky a vodiče od FV panelu je vymezena dutá část uchycení držáku, která vede až do spodního boxu.

6.1.1 Simulace proudění vzduchu skrze radiační štít

Pro ověření konstrukce a tvaru radiačního štítu jsem využil možnost doplňku Flow Simulation v programu Solidworks. Ten umožňuje simulovat proudění plynů či kapalin uzavřenými i otevřenými systémy. Použití tohoto rozšíření mi bylo umožněno nejmenovanou strojírenskou firmou, která používá software Solidworks ve verzi Premium.

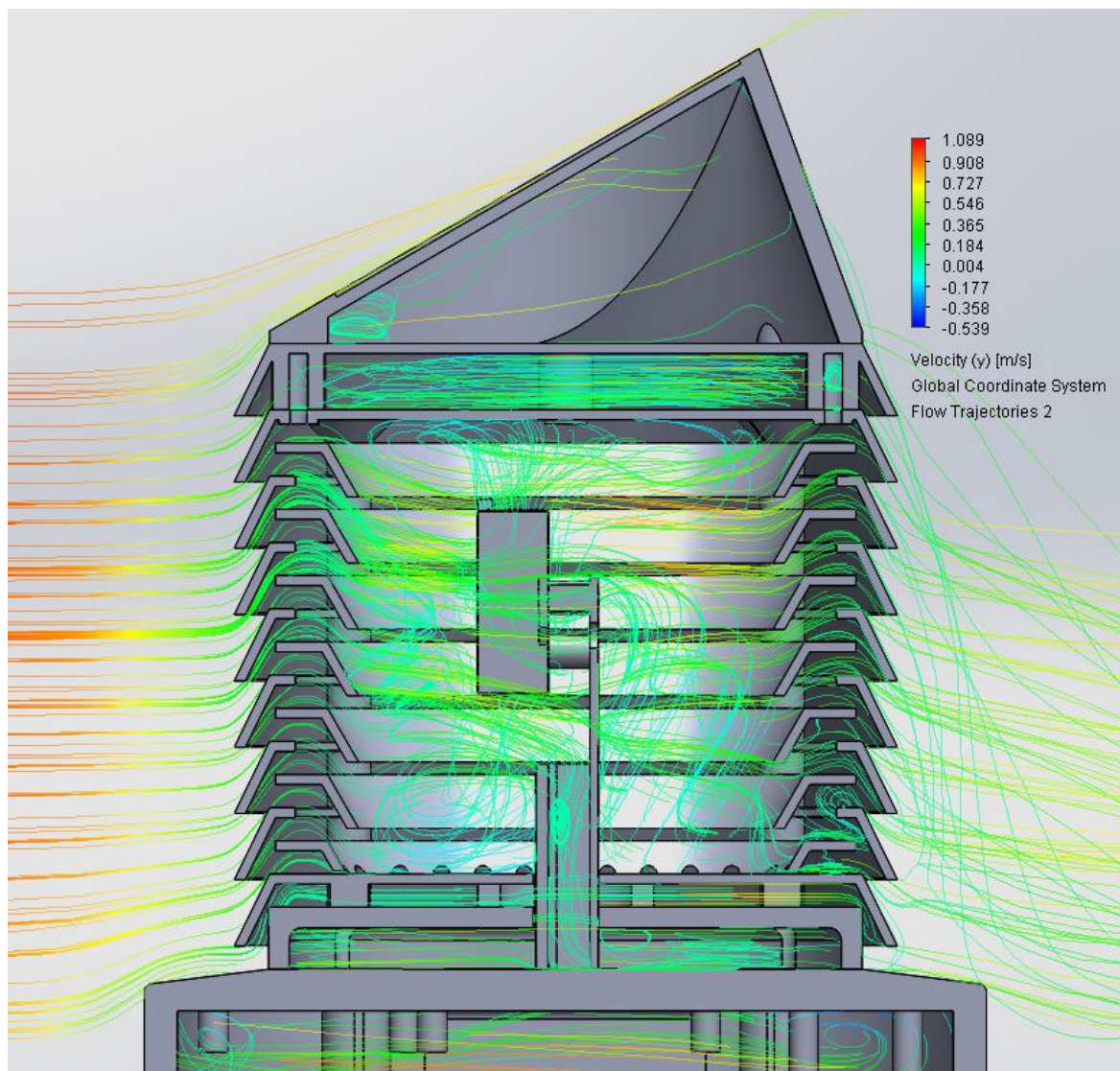
Provedl jsem dvě simulace. U obou simulací bylo studováno proudění vzduchu rychlostí 1 m/s, které reprezentuje běžné povětrnostní podmínky. Simulace byla provedena nejprve pro směr proudění v ose x (z boku meteostanice). Poté byla spuštěna simulace pro směr osy y. Tyto dvě na sebe kolmé simulace byly zvoleny z důvodu, že tvar radiačního krytu není symetrický a taktéž vnitřní uspořádání držáku senzorů se liší pro oba význačné směry.

Na obrázku č. 23 je vyobrazen výsledek simulace proudění vzduchu meteostanicí ve směru osy x. Přítok vzduchu má rychlost 1 m/s a jedná se o laminární proudění. Je třeba zmínit, že vnitřní uspořádání radiačního štítu není reálné. Simulace byla provedena pouze na vymodelované konstrukci a ve skutečnosti je držák osazen senzory, od nichž vedou kabely, což jistě proudění uvnitř radiačního krytu jistou mírou ovlivňuje. Simulace však poskytuje základní představu o proudění vzduchu skrze radiační kryt. Barevné čáry představují proudnice (trajektorie pohybu jednotlivých částic).



Obrázek 23: Simulace proudění vzduchu radiačním krytem ve směru osy x rychlostí 1 m/s (přítok vzduchu zprava)

Na obrázku č. 24 je vyobrazen výsledek simulace proudění vzduchu meteostanicí ve směru osy y. Přítok vzduchu má stejně jako v předchozí simulaci rychlost 1 m/s.



Obrázek 24: Simulace proudění vzduchu radiačním krytem ve směru osy y rychlostí 1 m/s (přítok vzduchu zleva)

Z výsledku první simulace (dle osy x) lze usoudit, že proudění vzduchu skrze radiační kryt si zachovává svoji laminární podobu. Protékání vzduchu skrze meteostanici rovnoběžně s osou x tedy není příliš ovlivněno konstrukcí meteostanice.

Naopak výsledek druhé simulace (dle osy y) je značně odlišný. Po překonání „žeber“ radiačního krytu se laminární proudění mění především na proudění turbulentní, a tím se snižuje průtok vzduchu meteostanicí v tomto směru. Na druhou stranu je výstupní rychlost částic vzduchu z meteostanice o trochu vyšší než v ose x. Také v ose y je vstupní a výstupní plocha do radiačního krytu větší, a to při kombinaci s o něco vyšší výstupní rychlostí částic vzduchu kompenzuje možný nižší průtok vzduchu díky turbulentnímu proudění, které vzniká uvnitř radiačního krytu.

Je také nutné uvést, že výše uvedené snímky ze simulací jsou pouze 2D řezy meteostanicí. Při bližším průzkumu 3D modelu není vznikající turbulentní proudění v radiačním krytu až tak moc dominantní, jak se jeví z 2D pohledu. Navíc jsou provedené simulace spíše ideálním případem. Ve skutečnosti bude vektor proudění vzduchu orientovaný většinou jiným směrem než ve směru jedné z os, přítok vzduchu patrně nebude mít stoprocentně laminární charakter a uvnitř radiačního krytu budou ve skutečnosti navíc zabudovány snímače, které nejsou v simulačním modelu obsaženy.

Z výsledků simulace především považuji za důležité, že tvar navrhovaných „žeber“ radiačního krytu nemá příliš velký vliv na změnu proudění skrze meteostanici a umožňují poměrně dobrou výměnu vzduchu uvnitř meteostanice. Ta je důležitá pro měření teploty a koncentrace prachových částic.

Konstrukce radiačního krytu by měla být vždy nejlépe symetrická, aby se odstranily nežádoucí vlivy nesymetrického proudění z různých směrů. To však u konstruované meteostanice nebylo možné z důvodu prostorového umístění všech senzorů uvnitř radiačního krytu, požadovaného tvaru pro umístění FV panelu na střeše meteostanice a také kvůli maximálním rozměrům, které lze vytisknout na 3D tiskárně. Pro tyto důvody považuji výše uvedenou konstrukci jako nejlepší dosažený kompromis.

6.2 Výroba konstrukce

Navrženou konstrukci meteostanice bylo nutné vyrobit. Již předem jsem se rozhodl pro metodu 3D tisku. Konstruované části jsem navrhoval pro co nejsnazší následný tisk. Byla zvolena technologie FDM (neboli také FFF) tisku. Při této metodě je materiál zahříván na tavnou teplotu a vtlačován do trysky. Současným pohybem trysky vznikají slabé vrstvy nanášeného materiálu. Ty se vrství na sebe a tím vzniká požadovaný produkt [25].

Metoda 3D tisku je vhodná pro tvorbu prototypů při jednodusové výrobě díky svým nízkým nákladům. Nevýhodou je pak delší čas potřebný na výrobu daného produktu. Tištěné díly také mají v porovnání s díly vyrobené pomocí vstřikolisů horší mechanické vlastnosti, jelikož mají díky tvorbě po vrstvách horší soudržnost materiálu (jednotlivých vrstev). Lze však snadno například tisknout duté díly nebo díly s jistou procentní výplní [25].

Pro 3D tisk se využívají různé materiály ve formě struny. Mezi nejběžněji používané materiály patří PLA, PET-G, ABS, ASA, Nylon, PC (polykarbonát) či jiné kompozitní materiály [28].

Výše zmíněné materiály se liší svými vlastnostmi. U meteostanice se nepředpokládá výrazné mechanické namáhání. Naopak nejdůležitější vlastnost je odolnost materiálu proti UV záření, jelikož tomu je meteostanice vystavena každý den a některé materiály vlivem UV záření degradují a mají tendenci se rozpadat. Pro výrobu konstrukce meteostanice byly do užšího výběru vybrány tři materiály: PET-G, ASA a PC. Jejich srovnání je uvedeno v tabulce níže [28]:

	PET-G (polyethylentereftalát glykol)	ASA (akrylonitril-styren-akrylát)	PC (polykarbonát)
Teplotní odolnost	80 °C	93 °C	113 °C
UV odolnost	Ne	Ano	Ne
UV stabilita	Ano	Ano	Ano
Hygroskopický	Málo	Středně	Hodně
Snadný tisk větších dílů	Ano	Ano	Ne

Tabulka 4: Porovnání vybraných materiálů pro výrobu konstrukce meteostanice [28]

Pro výrobu konstrukce meteostanice jsem zvolil ASA především díky své UV odolnosti a poměrně snadnému tisku. Pro radiální kryty a meteorologické budky je obecně doporučována bílá barva z důvodu vysoké reflektance záření. Pokud by bylo sluneční záření ve větší míře absorbováno, konstrukce by se vlivem záření zahřívala více než okolní vzduch, a to by negativně ovlivňovalo měření teploty. Proto byl taktéž vybrán co nejvíce bílý materiál.



Obrázek 25: Přehled všech vytištěných částí konstrukce meteostanice

Na obrázku č. 25 jsou vyfoceny všechny díly, které jsem vytisknul pro konstrukci mé meteostanice. Během tisku jsem zjistil, že není možné vytisknout všechny díly z materiálu ASA. Bylo to kvůli vysoké přilnavosti k tiskové podložce, největší díly nešly od podložky odtrhnout bez poškození. Proto byl spodní box meteostanice, u kterého nastaly zmíněné problémy, vytištěn z PET-G. Ten sice není UV odolný, ale UV stabilní. Jinak řečeno, po delší expozici UV záření se může měnit například barva materiálu, ale materiál by neměl nějak výrazně degradovat, alespoň tedy ne v rámci několika let.

Konstrukce meteostanice je defacto tvořená čtyřmi částmi: střechou, radiačním krytem, držákem senzorů a spodním boxem. Radiační kryt a spodní box meteostanice jsou spojeny pomocí závitových tyčí. Střecha s FV panelem je pak přidělována k radiačnímu krytu samostatně.



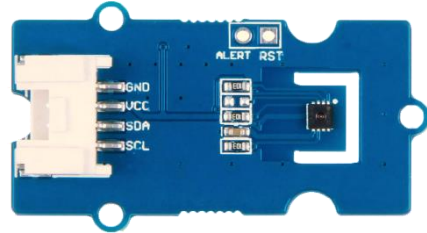
Obrázek 26: Hlavní části složené konstrukce meteostanice

6.3 Výběr komponent

V této kapitole popisují všechny komponenty, které jsem zvolil pro konstrukci stanice. Jejich výběr vychází z teoretických požadavků, popsanych v úvodních kapitolách. Zároveň jsem při jejich výběru přihlížel k ceně a v neposlední řadě též k dostupnosti součástek na trhu.

6.3.1 Senzor teploty a vlhkosti vzduchu

Pro měření teploty a relativní vzdušné vlhkosti byl vybrán senzor **Sensirion SHT35**, který je osazen na modulu Seede Studio Grove – SHT35 o rozměru 20 x 40 mm. Modul je vyobrazen na obrázku č. 27. Senzor v sobě integruje také A/D převodník a komunikační rozhraní (I²C). Senzor je postaven na technologii CMOSens®, která kombinuje technologie CMOS a MEMS. K napájení modulu je možné použít standardní napětí 3,3 V nebo 5 V [29].



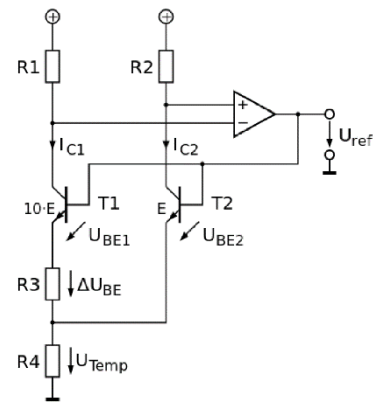
Obrázek 27: Modul měření teploty a vlhkosti pomocí senzoru Sensirion SHT35

Měření teploty

Snímání teploty je založeno na principu technologie band-gap. Ta je spojena především s vytvářením napěťové reference (u té je však teplotní závislost nežádoucí). Zjednodušeně lze říci, že teplota je snímána na principu teplotní závislosti polovodiče. Schéma měření je vidět na obrázku č. 28. Teplota je určována ze snímání napětí na rezistoru R4, které se mění s teplotou. To se děje zásluhou napětí na PN přechodu mezi bází a emitorem, které je teplotně závislé. Pokud je porovnáváno napětí na těchto dvou PN přechodech, které jsou vystaveny stejné teplotě, přičemž plocha přechodů je rozdílná, bude rozdílný i proud těmito tranzistory. Rozdíl napětí ΔU_{BE} lze poté popsat vztahem

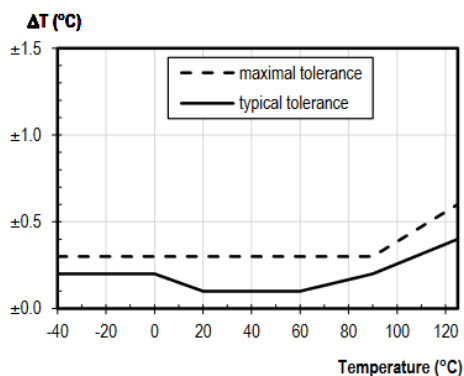
$$\Delta U_{BE} = \frac{kT}{q} \cdot \ln \left(\frac{I_{C1}}{I_{C2}} \right), \quad (6.1)$$

kde T je teplota v Kelvinech, q značí náboj elektronu, k je Boltzmanova konstanta a I_{C1} a I_{C2} odpovídají proudům jednotlivými tranzistory. Naměřené napětí je pak dále převáděno pomocí A/D převodníku na digitální hodnotu, která je následně linearizována a dále přepočítána na teplotu [30] [31].



Obrázek 28: Schéma měření pomocí technologie band-gap [30]

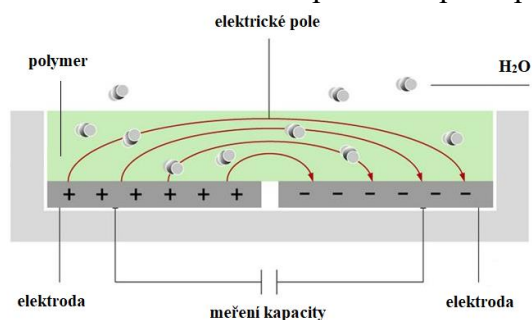
Teplotní senzor Sensirion SHT35 se vyznačuje rozsahem měření od - 40 °C do 125 °C. Rozlišení senzoru je poté 0,01 °C. Typická přesnost měření mezi 20 – 60 °C je dle výrobce $\pm 0,1$ °C. Maximální a typické nejistoty měření v závislosti na naměřené teplotě jsou uvedeny na obrázku č. 29 [29].



Obrázek 29: Závislost přesnosti měření teploty pomocí SHT35 v celém měřeném rozsahu [29]

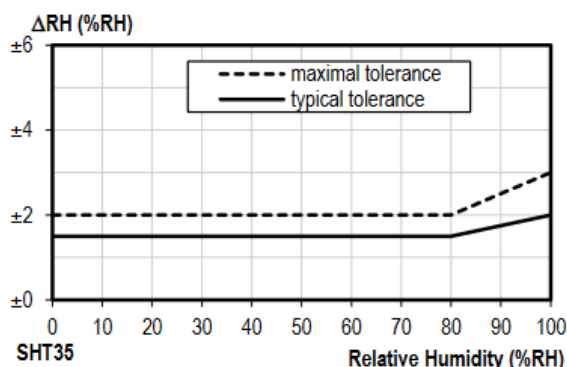
Měření vlhkosti

Snímání vlhkosti je u senzoru Sensirion SHT35 založeno na kapacitním principu měření. Ten je založen na absorpci vody ze vzduchu do hygroskopického polymeru, který je zároveň dielektrikem kondenzátoru. S rostoucím či klesajícím množstvím absorbované vody v polymeru se mění kapacita kondenzátoru, díky čemuž je možné určit vzdušnou vlhkost.



Obrázek 30: Princip kapacitního měření vlhkosti [42]

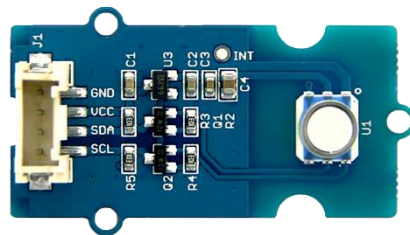
Senzor je schopen měřit relativní vlhkost v rozsahu 0 – 100 %, přičemž jeho typická přesnost měření v rozsahu 0 – 80 % činí $\pm 1,5$ %. Maximální a typické nejistoty měření v závislosti na naměřené relativní vlhkosti jsou uvedeny na obrázku č. 31. Senzor poskytuje rozlišení měření rovné 0,01 % [29].



Obrázek 31: Závislost přesnosti měření relativní vzdušné vlhkosti pomocí SHT35 v celém měřeném rozsahu [29]

6.3.2 Senzor atmosférického tlaku

Pro měření atmosférického tlaku byl vybrán senzor **Hoperf HP206C**, který je osazen na modulu od firmy Seeed Studio o rozměru 20 x 41 mm. Modul je vyobrazen na obrázku č. 32. S řídicí deskou senzor komunikuje přes I²C sběrnici a taktéž obsahuje 24-bitový A/D převodník [32]. Mimo to obsahuje senzor také méně přesné čidlo teploty. Senzor navíc splňuje krytí IP68. K napájení modulu je možné použít standardní napětí 3,3 V nebo 5 V.



Obrázek 32: Modul měření atmosférického tlaku senzorem Hoperf HP206C

Měření atmosférického tlaku u senzoru HP206C je založeno na piezorezistivním principu. Ten je založen na změně odporu dopovaného monokrystalu při změně tlaku působícího na krystal. Senzor umožňuje měření v rozsahu 300 – 1200 hPa. Díky 24-bitovému A/D převodníku dokáže senzor měřit s rozlišením 0,01 hPa, což přibližně odpovídá změně nadmořské výšky o 10 cm. Za podmínek od 0 °C do 50 °C a atmosférickém tlaku 700 – 1100 hPa je uváděná maximální nejistota měření dle výrobce $\pm 1,5$ hPa. Mimo interval teplot 0 – 50 °C je maximální odchylka měření uváděna jako ± 3 hPa [32].

Kromě tlaku je v senzoru ukryto i čidlo teploty, které však měří s výrazně menší přesností než senzor SHT35 (v rozmezí -10 °C až 70 °C činí nejistota měření ± 1 °C). Sám senzor však změřenou teplotu používá pro určení nadmořské výšky, kterou počítá dle algoritmu výrobce (algoritmus není výrobcem uveden). Vzhledem k nepřesnému měření teploty se údaj o nadmořské výšce dá považovat spíše za orientační [32].

6.3.3 Senzor prachových částic

Pro měření koncentrace prachových částic pomocí přenosné meteostanice připadalo v úvahu použití senzoru měřícího pomocí jedné z optických metod. Gravimetrické a radiometrické přístroje bývají sice velmi přesné, nicméně i prostorově objemné. Naopak přístroje postavené na optickém principu se dají vměstnat do menší krabičky.

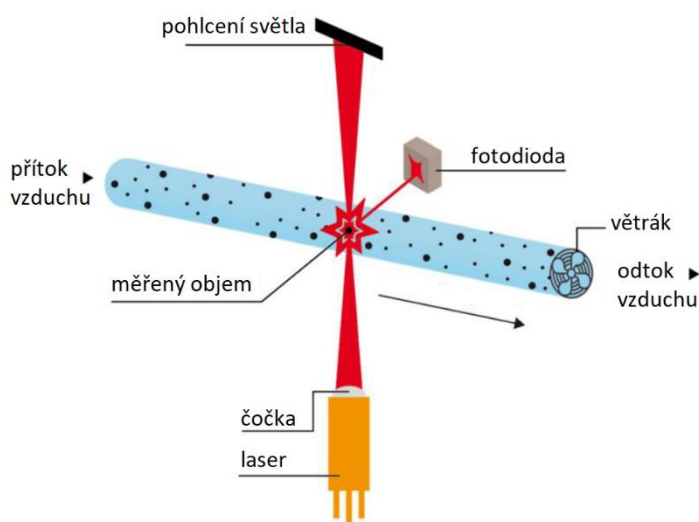
Pro použití v přenosné meteostanici byl nakonec vybrán senzor **Sensirion SPS30**, který má rozměry 41 x 41 x 12 mm. Ten je schopen měřit koncentrace suspendovaných částic pro frakce PM₁, PM_{2,5}, PM₄ a PM₁₀. Měřený rozsah koncentrace



Obrázek 33: Senzor koncentrace prachových částic Sensirion SPS30

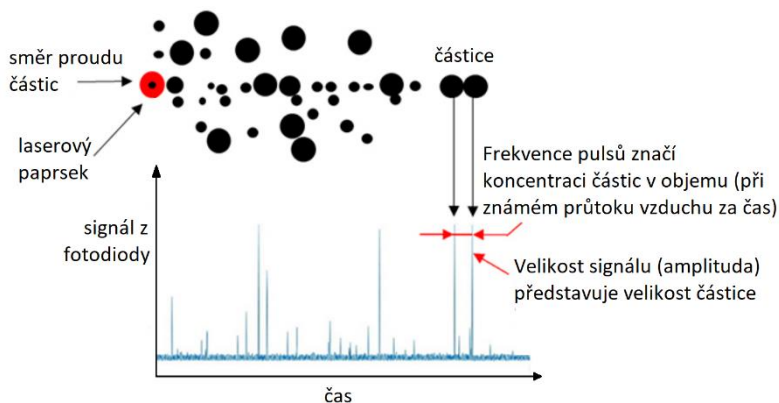
odpovídá $0 - 1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Senzor také poskytuje údaj o počtu částic frakcí $\text{PM}_{0,5}$, PM_1 , $\text{PM}_{2,5}$, PM_4 a PM_{10} na cm^3 v rozsahu $0 - 3000$ částic/ cm^3 . Přístroj dokáže komunikovat s řídicí deskou pomocí rozhraní UART, nebo I²C. Pro napájení je zapotřebí napětí $4,5 - 5,5 \text{ V}$ a průměrná spotřeba senzoru odpovídá proudu 55 mA [33].

Senzor funguje na optické metodě, která je založena na detekci rozptýleného světla na suspendovaných částicích. Tento princip je znázorněn na obrázku č. 34. Uvnitř senzoru se nachází jako zdroj světelného záření laser o vlnové délce $\lambda = 660 \text{ nm}$ [33]. Jeho paprsek je zaostřen do kanálku, kterým proudí nasávaný vzduch. Jestliže vzduch obsahuje poléťavé částice, část světla je na těchto částicích rozptýlena. Toto rozptýlené záření je následně detekováno pomocí fotodiody, která převádí světelné záření na el. proud [34].



Obrázek 34: Princip detekce prachových částic senzorem Sensirion SPS30 [34]

Výstup signálu vycházejícího z fotodiody má poté průběh jako na obrázku č. 35. Výška jednotlivých pulsů představuje velikost částic. Čím větší plochu má částice, tím více světla se na jeho povrchu rozptýlí a dopadne na fotodiodu. Časový interval mezi pulzy poté představuje koncentraci prachových částic dané frakce. Koncentrace částic v objemu lze zjistit na základě známého průtoku vzduchu senzorem za čas. Koncentrace suspendovaných částic se



Obrázek 35: Analýza signálu z fotodiody a jeho význam pro určení koncentrace suspendovaných částic, upraveno z [35]

uvádí v jednotkách $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Samotné zjištění hmotnosti detekovaných částic dané frakce je však výrobcem považována za jeho know-how a algoritmus není zveřejněn. Aby senzor dokázal detekovat jednotlivé částice (pulzy na fotodiodě), je nutné, aby paprsek světla byl velmi dobře zaostřen [35]. Senzor vzorkuje signál z fotodiody vždy 1 s a poté provede analýzu signálu a výpočet koncentrací a počtu částic. Částice větší než $10\text{ }\mu\text{m}$ se projeví ještě silnějšími signály na fotodiodě a senzor tedy dokáže tyto částice detekovat a z měření vyloučit [33].

Přesnost měření daná výrobcem je shrnuta v tabulce níže:

		Přesnost měření
Hmotnostní koncentrace prachových částic PM_1 a $\text{PM}_{2,5}$	0 – $100\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\pm 10\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$
	100 – $1000\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\pm 10\text{ }\%$
Hmotnostní koncentrace prachových částic PM_4 a PM_{10}	0 – $100\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\pm 25\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$
	100 – $1000\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\pm 25\text{ }\%$
Počet částic $\text{PM}_{0,5}$, PM_1 a $\text{PM}_{2,5}$ v objemu	0 – $1000\text{ částic}/\text{cm}^3$	$\pm 100\text{ částic}/\text{cm}^3$
	1000 – $3000\text{ částic}/\text{cm}^3$	$\pm 10\text{ }\%$
Počet částic PM_4 a PM_{10} v objemu	0 – $1000\text{ částic}/\text{cm}^3$	$\pm 250\text{ částic}/\text{cm}^3$
	1000 – $3000\text{ částic}/\text{cm}^3$	$\pm 25\text{ }\%$

Tabulka 5: Přesnosti měření senzoru prachových částic Sensirion SPS30 udávané výrobcem [33]

Každý senzor je výrobcem zkalibrován. Výstupní charakteristika hmotnostní koncentrace se kalibruje dle frakce $\text{PM}_{2,5}$ a přístroje TSI DustTrak™ DRX 8533. Charakteristika počtu prachových částic v objemu se kalibruje taktéž dle frakce $\text{PM}_{2,5}$ a přístroje TSI OPS 3330 [33].

Senzor Sensirion SPS30 získal certifikaci MCERTS, kterou vytvořila Agentura pro životní prostředí Spojeného království. Tato certifikace je postavena na mezinárodních a evropských standardech. Senzor prošel testy MCERTS a splňuje tedy evropskou normu EN 15267 pro monitorování kvality ovzduší. Shoda s touto normou a standardem MCERTS znamená, že odchylka měření senzoru je menší než $5\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$. Certifikát vydává Sira Certification Service, jež je akreditován dle ISO/IEC 17065 UKAS a je součástí Kanadské asociace pro standardy (CSA Group). Je nutné podotknout, že senzor získal tuto certifikaci pouze pro měření koncentrací frakce $\text{PM}_{2,5}$ v rozsahu 0 – $75\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$. Nicméně i to je ukazatel toho, že senzor přes svoji malou velikost a poměrně nízkou cenu (při srovnání s konkurencí) dokáže relativně přesně monitorovat kvalitu ovzduší. Dokonce v daném rozsahu přesněji, než deklaruje sám výrobce [36].

Senzor umožňuje i čištění, kdy se zvýší otáčky ventilátoru na maximální výkon, a tím dojde k pročištění kanálku pro proudění vzduchu. Pro názornost je na obrázku č. 36 ukázán tento senzor v rozloženém stavu.



Obrázek 36: Rozložený senzor prachových částic Sensirion SPS30 [43]

6.3.4 Řídicí deska a komunikační modul

Výše zmíněné senzory podporují komunikaci přes sběrnici I²C, která probíhá za pomoci dvou fyzických vodičů. Tím bylo eliminováno přebytečné množství kabelů vedoucích ze spodního boxu meteostanice do radiačního krytu.

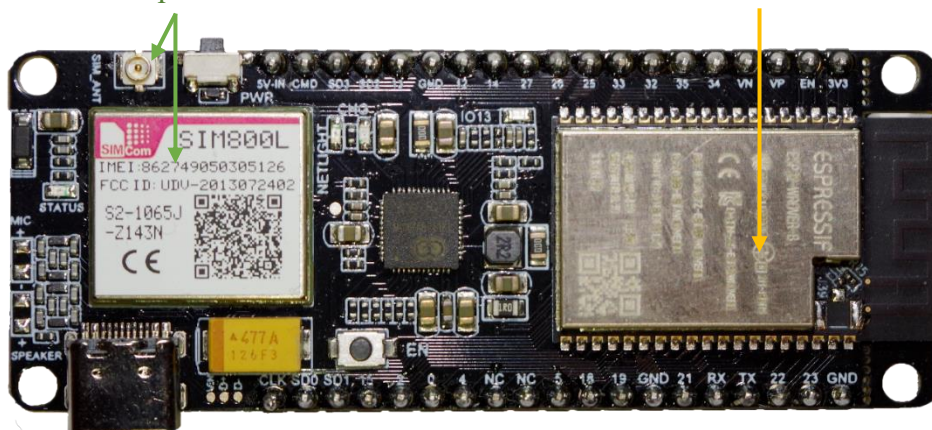
Zprvu bylo uvažováno o využití řídicí desky Arduino Nano. Nicméně v průběhu studia datasheetů, testování jednotlivých čidel a komunikace s nimi byla objevena překážka v podobě nízkého bufferu pro I²C sběrnici u Arduina Nano. Nebylo tedy možné načíst všechna data ze senzoru prachových částic. Načítaly se pouze hmotnostní koncentrace všech frakcí suspendovaných částic, ale na počet částic v objemu již nezbylo místo v dočasné paměti.

Také bylo rozhodnuto o použití používání klasické GSM sítě pro odesílání dat z meteostanice. Hlavním důvodem bylo největší pokrytí ČR a také pravděpodobně nejnižší náklady na odesílání dat při zachování neomezené velikosti odesílaných dat a neomezeného množství odesílaných zpráv. Jedinou nevýhodou jsou vysoké energetické nároky na odesílání dat oproti jiným technologiím.

Po průzkumu trhu byla objevena komerčně vyráběná vývojová deska **LilyGO TTGO T-Call**. Ta je osazena výkonným mikročipem **ESP32** a zároveň i GSM/GPRS modulem **SIM800L** pro bezdrátovou komunikaci.

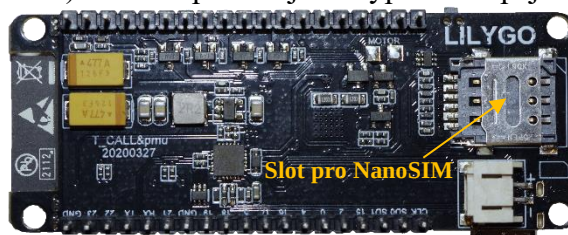
Komunikační modul SIM800L
a konektor pro ext. anténu

Mikrokontrolér ESP32



Obrázek 38: Řídící deska LilyGO TTGO T-Call s čipem ESP32 a komunikačním modulem SIM800L

Použitím této řídící desky bylo tedy dosaženo zminiaturizování elektronické části a zajištění vhodného napájení pro GSM/GPRS modul přímo na této desce. Tento komunikační modul má totiž vysoké špičkové proudy (až 2 A) a také potřebuje netypické napájení 3,7 – 4,2 V. SIM karta je vkládána do slotu na druhé straně desky, kde se nachází i konektor pro připojení akumulátoru. Parametry mikročipu ESP32 a jeho funkcí jsou uvedeny v tabulce č. 2.



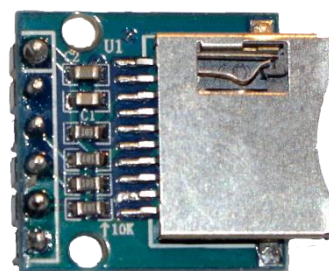
Obrázek 37: LilyGO TTGO T-Call – spodní strana

Modul SIM800L komunikuje s čipem ESP32 pomocí UART rozhraní. Deska se dělá i s čipem AXP192 starajícím se o power management této desky. Tento čip komunikuje přes I²C s mikrokontrolérem ESP32 a dají se tak nastavovat různé parametry napájení. Jedním z nich může být například nabíjecí napětí a maximální nabíjecí proud připojeného akumulátoru. Dále jde třeba nastavit úroveň napětí, při kterém se má akumulátor odpojit, aby nedošlo k jeho úplnému vybití a poškození.

6.3.5 Ostatní komponenty

Modul paměťové karty

Základním předpokladem měřicího zařízení je zaznamenávání naměřených dat. Pro tyto účely jsem vybral způsob ukládání na microSD kartu. Byl vybrán klasický modul s napájecím napětím 3,3 V a komunikující s řídící deskou přes sběrnici SPI.



Obrázek 39: Modul microSD karty

Fotovoltaický panel

Pro prodloužení doby měření meteostanice byl vybrán polykrystalický FV panel o velikosti 136 x 110 mm. Jmenovité napětí panelu činí 6 V a výstupní proud až 333 mA. Panel tedy poskytuje výkon až 2 W. Výkon panelu, respektive jeho velikost, byla předurčená konstrukcí střechy meteostanice. Byl zvolen největší (nejvýkonnější) panel, který šel na střechu se svými rozměry umístit.

Akumulátor

Jako zásobárna elektrické energie meteostanice byly vybrány průmyslové Li-Ion články s označením 18650. To především kvůli své modularitě, nižší ceně a dostupnosti, přičemž navrhovaná meteostanice nemá vysoké nároky na napájení, a proto tedy tyto články naprosto vyhovují potřebám. Tyto články mají v průměru 18 mm a na délku 65 mm. Nominální napětí článku činí 3,7 V a při maximálním nabití dosahuje napětí 4,2 V. Kapacita těchto článků dosahuje maximálně 3500 mAh. Běžnější jsou však články s kapacitou mezi 2000 – 3000 mAh.



Obrázek 40: Li-Ion články

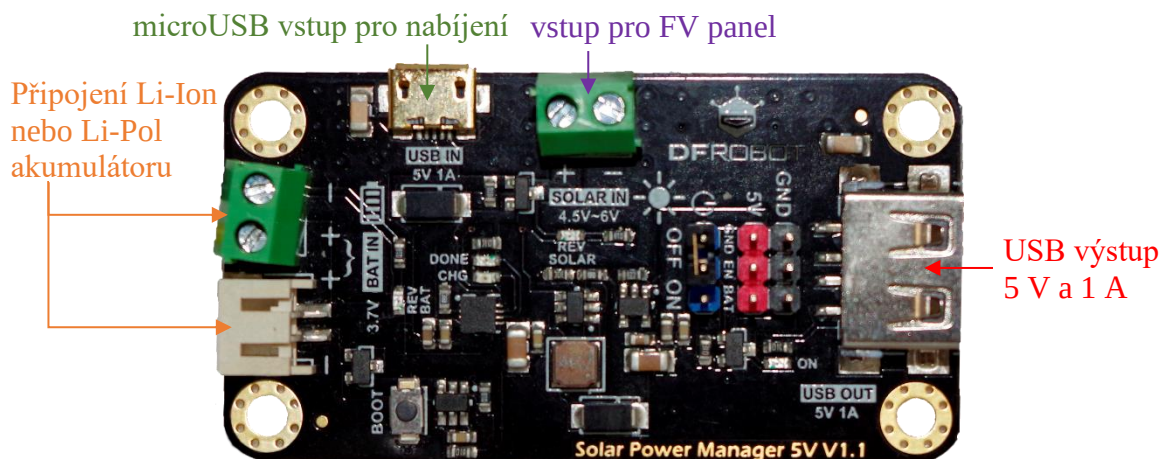
Nakonec bylo použito pro napájení meteostanice 12 ks Li-Ion článků 18650 s kapacitou 2200 mAh zapojených paralelně. Celková kapacita akumulátoru meteostanice je 26400 mAh. Potřebná kapacita byla při návrhu předběžně vypočtena z odběru proudů jednotlivých komponent uváděných v datasheetech tak, aby meteostanice vydržela alespoň jeden měsíc v provozu. Výpočet byl však orientační. Největší spotřebu energie odebírá GSM/GPRS modul, jenž může odebírat nárazově i 2 A. Problémem pro výpočet byla také neznámá doba měření a doba, kterou stanice stráví mezi měřeními v režimu „hlubokého spánku“ s velmi nízkým odběrem energie.

Pro výpočet byl použit průměrný proud 30 mA (1 min. měření s 138 mA + 4 min. spánek s odběrem 3 mA). Při 744 hodinách v měsíci byla vypočtena kapacita 22320 mAh. Z důvodů držáku Li-Ion článků, které jsou pro 3 články, bylo použito 12 článků s kapacitou 26400 mAh.

Regulátor nabíjení

Pro spojení fotovoltaického panelu a akumulátoru je nutné snížit napětí z panelu. K tomu slouží solární regulátor DFRobot - Solar Power Manager 5v (DFR0559). Ten obsahuje také MPPT technologii, která se snaží sledovat nejvýkonnější bod panelu a zvýšit účinnost při nabíjení akumulátoru. FV panely je potřeba zatěžovat podle toho, jaký je v té dané chvíli osvit panelů [37]. Tuto funkci lze přirovnat automobilu s automatickou převodovkou, která

zařadí rychlostní stupeň dle stoupavosti terénu a aktuální rychlosti vozidla tak, aby byl motor schopný dodat v daný moment co nejvyšší výkon. MPPT se snaží sledovat maximální bod výkonu panelu a dodat do zátěže vždy maximální možný výkon.



Obrázek 41: Solární regulátor DFRobot - Solar Power Manager 5V V1.1 (DFR0559).

Regulátor má rozměry 33 x 63 mm a kromě regulační části je zároveň deska osazena výstupním regulátorem napětí na 5 V, které je použito pro napájení veškeré elektroniky uvnitř meteostanice. Tento Step-UP měnič dokáže dodávat proud až 1 A.

Solární regulátor vyžaduje rozsah vstupního napětí z FV panelu 4,5 – 6 V a maximální nabíjecí proud je 900 mA. Nabíjet akumulátor je možné i skrze microUSB port proudem 1 A. Zároveň tato deska obsahuje různé ochrany, jako je ochrana proti podbití, přepólování a další.

6.4 Elektro zapojení

Před samotným zapojením všech komponent bylo zapotřebí vytvořit schéma zapojení. Při jeho návrhu jsem nejprve musel vymezit určité piny řídicí desky pro komunikaci se senzory, která probíhá po I²C sběrnici. Sběrnice využívá dvou vodičů a pro připojení k řídicí desce se využívají piny 21 a 22.

GSM/GPRS modul je připojen vnitřně pomocí jednoho ze dvou dostupných UART rozhraní. Modul však používá i další piny mikrokontroléru například pro jeho vyrestartování. Dále je na desce připojen přes I²C čip AXP192 starající se o power management desky, který má také připojeny ještě další piny, které slouží například pro posílání impulsu mikrokontroléru z důvodu dosažení nízkého napětí. Tyto I/O piny tedy nešlo použít pro ostatní komponenty.

Paměťová karta pak využívá komunikace přes SPI protokol, který vyžaduje čtyři vodiče. Nicméně některé předurčené hardwarové piny pro SPI byly již použity GSM/GPRS

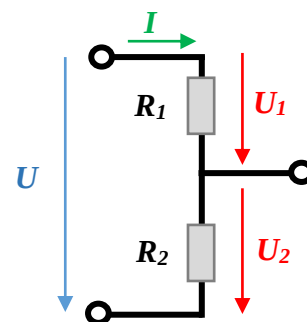
modulem. Proto bylo využito tzv. softwarového SPI, který zprovozní tuto komunikaci na kterýchkoliv I/O pinech.

Senzory jsou napájeny 5 V větví, která je přiváděna i pro napájení celé řídicí desky. SD karta a bzučák jsou napájeny 3,3 V větví přímo z řídicí desky. Napětí 5 V zabezpečuje Step-UP měnič, který je součástí regulátoru dobíjení, ke kterému je připojen FV panel a akumulátor. FV panel je připojen a dobíjí akumulátor, i když je meteostanice vypnutá vypínačem.

Jelikož je přiváděno napětí 5 V přímo na řídicí desku, nedá se využít naplno potenciálu čipu AXP192, který by při připojení akumulátoru přímo na desku dokázal poskytovat informace zejména o napětí akumulátoru. Z tohoto důvodu bylo nutné zajistit analogové odečítání napětí akumulátoru přímo mikrokontrolérem ESP32. Na jeho analogový vstup však lze přivést maximálně napětí 3,3 V. Proto bylo zapotřebí snížit maximální napětí akumulátoru (4,2 V) pomocí napěťového děliče. Hodnoty rezistorů byly vypočteny dle vztahu:

$$U_2 = U \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}. \quad (6.2)$$

Pro maximální možné napětí $U_2 = 3,3$ V byly zvoleny rezistory $R_1 = 470$ k Ω a $R_2 = 1$ M Ω . Z toho plyne, že maximální napětí akumulátoru smí dosahovat hodnoty $U \doteq 4,85$ V, což je pro Li-Ion článek naprosto vyhovující. Díky velikosti odporů je proud děličem naprosto zanedbatelný a není třeba s ním uvažovat do spotřeby meteostanice.

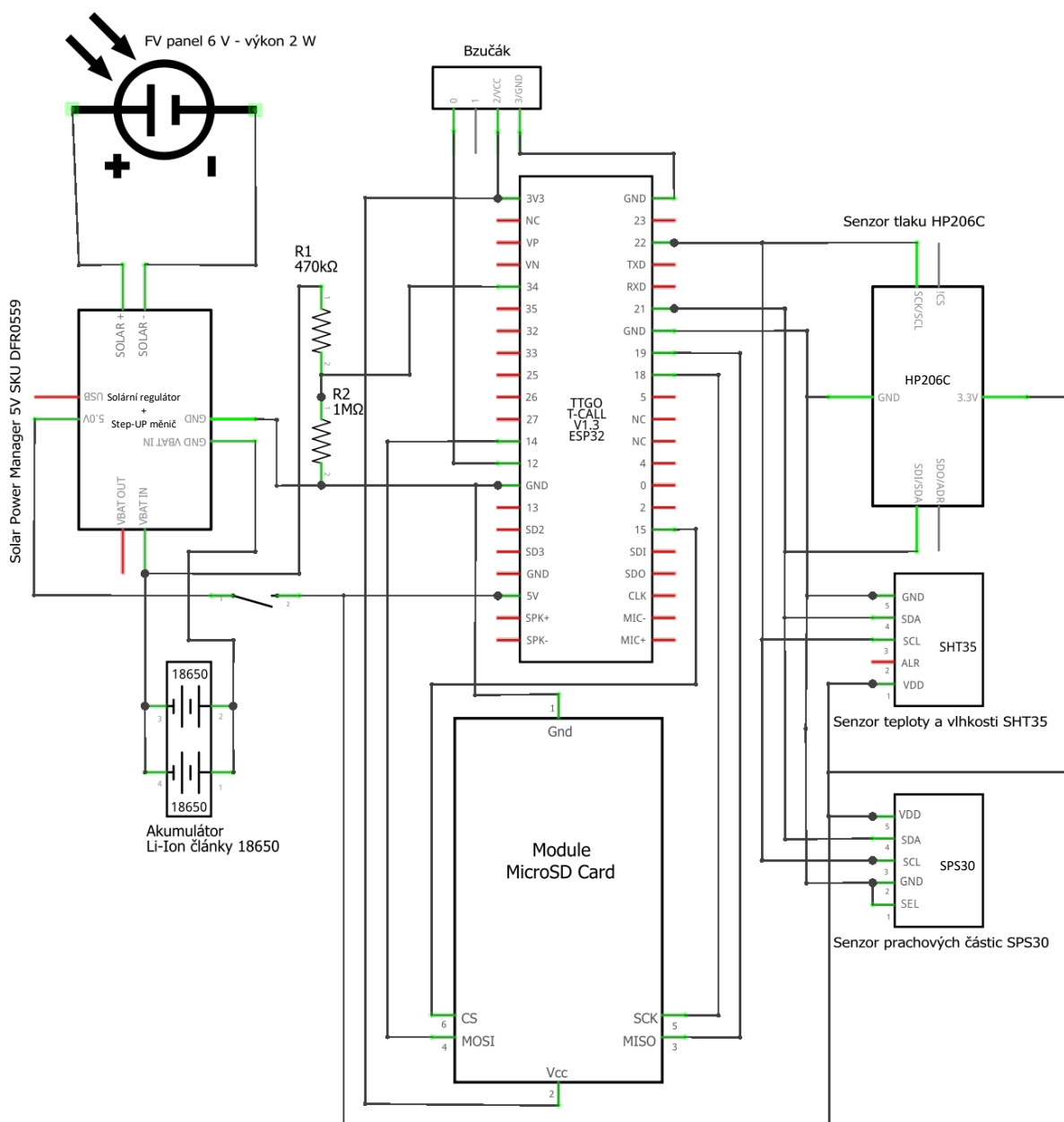


Obrázek 42: Napěťový dělič

K řídicí desce je navíc ještě připojen bzučák. Byl zvolen modul s aktivním bzučákem, který je osazen tranzistorem pro jeho spínání. Díky tomu není nutné proudově zatěžovat výstupní pin ESP32. Pro spínání byl využit pin č. 12. Bzučák má především funkci upozornění na poruchu, jelikož při zapnutí sestavené meteostanice nemá obsluha zpětnou vazbu, zda meteostanice funguje. Bzučák by tedy v případě nějaké chyby během prvního měření začal vydávat zvukové signály.

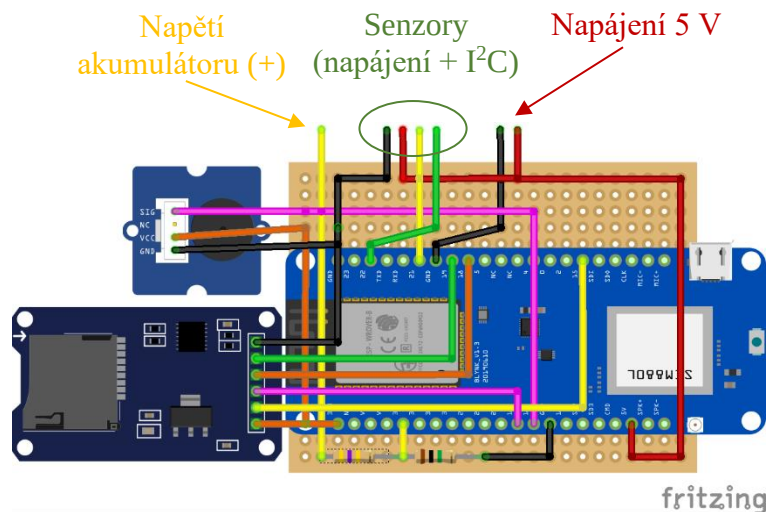
Základní představu o zapojení lze vidět na obrázku č. 44, který byl vytvořen v softwaru Fritzing.

Celkovému zapojení elektronické části meteostanice odpovídá schéma, které je vyobrazeno níže.



Obrázek 45: Elektrické schéma zapojení meteostanice

Navržený obvod nevyžaduje složitější způsoby propojení (oboustranný plošný spoj, přemostění vodiči, apod.). Je to především díky použití stejné sběrnice pro senzory, čímž je omezeno množství potřebných spojů. Proto mohl být pro testování využit univerzální plošný spoj. Pro jeho realizaci byla předpřipravena předloha, která je vyobrazena na obrázku č. 46.



Obrázek 46: Grafická předloha (schéma) plošného spoje

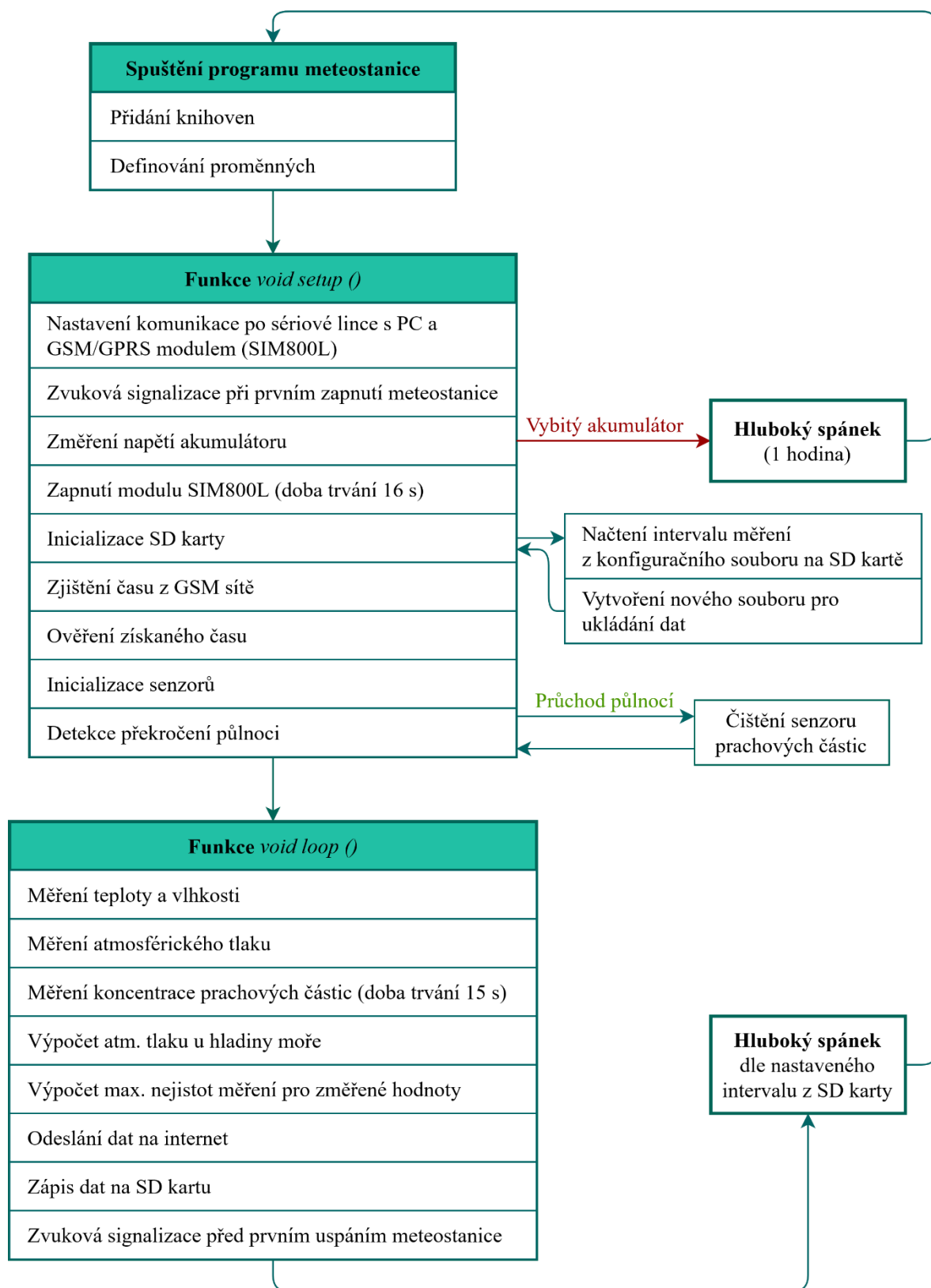
6.5 Programování

Pro programování meteostanice bylo využito prostředí Arduino IDE, kde lze doinstalováním balíčku rozšířit možnosti programování i pro vývojové desky obsahující mikročip ESP32. Pro usnadnění programování bylo využito již vytvořených knihoven.

Zdrojový kód je velmi rozsáhlý a je kompletně k dispozici jako příloha této práce. S ohledem na jeho veliký rozsah jej nepředstavuji celý, ale uvádím jeho algoritmus a základní strukturu. Tak budou stručně představeny jednotlivé po sobě jdoucí procesy. Dále zde uvádím ukázky ze zdrojového kódu pro měření dat či získání času pomocí GSM sítě.

Použité knihovny

- **Seeed_SHT35.h** – knihovna usnadňující komunikaci a načítání dat ze senzoru teploty a vlhkosti Sensirion SHT35
- **sps30.h** – knihovna usnadňující komunikaci a načítání dat ze senzoru měřícího koncentrace prachových částic v ovzduší Sensirion SPS30
- **HP20x_dev.h** – knihovna usnadňující komunikaci a načítání dat ze senzoru HP206C měřícího atmosférický tlak, teplotu a poskytuje přibližnou nadmořskou výšku
- **Wire.h** – knihovna pro komunikaci přes I²C sběrnici, obsažena již v Arduino IDE
- **mySD.h** – knihovna pro používání paměťových karet, která vnitřně využívá knihovny **SPI.h** (knihovna pro komunikaci přes SPI) a **SD.h** (základní knihovna obsažena v Arduino IDE pro práci s SD kartami)
- **ESP32Time.h** – knihovna pro práci s časem
- **axp20x.h** – knihovna použitá pro komunikaci a správu čipu AXP192 starající se o power management desky



Obrázek 47: Funkční diagram programu meteostanice

Běh meteostanice byl navržen tak, aby doba chodu trvala méně než 1 minutu. Tím bylo dosaženo možnosti měřit v minutových intervalech. Pro snadnější nastavování meteostanice byla využita přítomnost paměťové karty. Pokud se na ní nachází soubor *config.txt*,

meteostanice si z něj načte interval mezi měřeními a zda má odesílat data na internet. Soubor *config.txt* musí mít strukturu *X...X;Y*, kde *X...X* představuje interval v sekundách (60 – 86400 s), následuje středník a *Y* musí být 1, nebo 0. Zapnutému odesílání dat na internet odpovídá hodnota 1. Pokud konfigurační soubor na microSD kartě není, použijí se defaultní hodnoty (interval rovný 5 minutám a zapnuté odesílání na internet).

Po dokončení měření a uložení dat na paměťovou kartu dochází k přechodu řídicí desky do režimu Hlubokého spánku. V tom má celá meteostanice velmi nízký odběr proudu. V tomto režimu zůstává až do probuzení, které obstarává RTC část mikrokontroléru. Bohužel tento vnitřní obvod pro měření času není přesný a při delších časech vzniká časový rozdíl v řádu sekund od reálného času. Proto je vždy čas po probuzení meteostanice synchronizován z GSM sítě. Pokud není zjištěn čas z GSM sítě například z důvodu nízkého signálu či nepředvídatelné odpovědi na žádost o čas, je použit nepřesný čas z vnitřního RTC obvodu. Jelikož při hlubokém spánku je vypnutý procesor, dochází i ke smazání všech uložených proměnných. Pro hodnoty nastaveného intervalu, počtu měření či časové informace o minulém probuzení, které je nutné uchovat i při Hlubokém spánku, se využívá paměti v RTC obvodu, která je napájena i v tomto režimu.

Pro ovládání GSM/GPRS modulu nebyla použita žádná knihovna, jelikož se tento modul jednoduše ovládá pomocí tzv. AT příkazů, které se odesílají do modulu přes sériovou linku. Příkazy mají tvar například *AT+CCLK?*, což je požadavek o zaslání aktuálního času. Odpověď se dostaví ve formátu *+CCLK: "22/02/28,19:33:42+04"*. Na konci uvedený údaj *+04* udává časové pásmo (počet čtvrt hodin). Zdrojový kód funkce získání času je vyobrazen na obrázku č. 48. Pro ukázkou (z důvodu zkrácení) neobsahuje kód části, které slouží k odhalení jiné než předpokládané odpovědi nebo žádné odpovědi.

S naměřenými daty se na paměťovou kartu ukládá také proměnná *chybaProgramu*, do které se zapisují případné číselné kódy vzniklých chyb, jež mohou během chodu meteostanice nastat. To je výhodné, jelikož tato informace je jedinou přesnou zpětnou vazbou pro obsluhu. Pomocí této funkce lze zpětně odhalit možné problémy, které v průběhu měření vznikly. Také se v programu počítají maximální nejistoty měření pro změřené hodnoty (dle přesnosti měření udávané výrobcem) a jsou společně s naměřenými hodnotami ukládány na paměťovou kartu, aby se obsluze usnadnila pozdější práce s daty. Program využívá také knihovnu *utilities.h*, která není knihovnou v pravém slova smyslu, ale jsou v ní uloženy funkce poskytované výrobcem řídicí desky pro nastavení čipu AXP192 a navázání komunikace s GSM/GPRS modulem.

Zjištění času:

```
void zjistCas() {
    String retezec;
    int i = 0;

    while(i < 3) {
        smazSerialAT();
        SerialAT.print("at+cclk?\r\n"); // příkaz pro získání času pomocí SIM modulu
        delay(20);
        if (SerialAT.available() > 0) { // uložení přijaté zprávy s časem
            while (SerialAT.available() > 0) {
                retezec += (char)SerialAT.read();
            }
        }
        else { // pokud nepřijata žádná data, opakovat
            .....zkráceno.....
            continue;
        }
        if ((retezec.indexOf("ERR")) != -1) { // pokud nastane chyba, opakovat
            .....zkráceno.....
            continue;
        }
        else if ((retezec.indexOf("ERR")) == -1) { // čas přijat (chybový text ERR nenalezen)
            // oříznutí časové informace ze zprávy
            retezec = retezec.substring(retezec.indexOf("CCLK: \") + 7, retezec.lastIndexOf("\") - 1);

            // informace o roku je na pozici 0 - 2 celkového Stringu retezec převedena na int
            rok = retezec.substring(0, 2).toInt();
            mesic = retezec.substring(3, 5).toInt();
            den = retezec.substring(6, 8).toInt();
            hodina = retezec.substring(9, 11).toInt();
            minuta = retezec.substring(12, 14).toInt();
            sekunda = retezec.substring(15, 17).toInt();

            // hrubá kontrola správného časového údaje
            if(den > 31 || den < 1 || mesic > 12 || mesic < 1 || rok < 22 || rok > 70 ||
            hodina > 24 || hodina < 0 || minuta > 60 || minuta < 0 || sekunda > 60 || sekunda < 0) {
                Serial.println("Získaný čas je patrně nesprávný!!!");
                Serial.println(" ");
                chybaProgramu = chybaProgramu + " 8{" + String(den) + "." + String(mesic) + "." + String(rok)
                + " " + String(hodina) + ":" + String(minuta) + ":" + String(sekunda) + "}";
                delay(1000);
                i++;
                if(i == 3) {
                    Serial.println("Nepodařilo se ani potřetí získat čas od operátora!!!");
                    Serial.println(" ");
                    rok = 0;
                    chybaProgramu += " 9";
                }
                continue;
            }
        }
        vypisCas();
        break;
    }
}
```

Obrázek 48: Ukázka zdrojového kódu funkce pro zjištění času přes GSM síť (zkráceno)

Pro měření meteorologických veličin a koncentrace prachových částic byly využity knihovny pro dané senzory. Za zmínku stojí jen způsob měření koncentrace, kdy je dle výrobce nutné mít senzor v režimu měření po jistou dobu, aby se hodnoty koncentrací ustálily. Při nižší koncentraci uvádí výrobce dobu až 30 s. V praxi byly změřené hodnoty koncentrací vždy ustáleny po 10 – 15 s. Proto se pro měření využívá pevná doba 15 s. Nejdříve se zapne měřicí mód a po 5 s se začnou opakovaně zjišťovat i hodnoty koncentrací (každou

vteřinu), které se vypisují po sériové lince. V paměti zůstanou vždy jen poslední naměřené hodnoty.

Ukázky zdrojových kódů měření jednotlivých veličin jsou uvedeny na následujících obrázcích.

Měření teploty:

```
void mereniTeplotaVlhkost() {
  if (NO_ERROR != tepCidlo.read_meas_data_single_shot(HIGH_REP_WITH_STRCH, &teplota, &vlhkost)) {
    Serial.println("Data ze senzoru teploty/vlhkosti se nepodařilo načíst!!!");
    Serial.println(" ");
    chybaProgramu += " 12";
    if(pocetZapnuti == 0) { // zvuková signalizace chyby během 1. měření
      pipnuti(2000);
      delay(1000);
      pipnuti(2000);
      delay(1000);
      pipnuti(2000);
    }
  }
  else {
    Serial.println("Data ze senzoru teploty/vlhkosti:");
    Serial.print("teplota = ");
    Serial.print(teplota);
    Serial.println(" °C");
    Serial.print("vlhkost = ");
    Serial.print(vlhkost);
    Serial.println(" %");
    Serial.println(" ");

    //při vysoké vlhkosti je možné (vhodné) zahřát senzor pro přesnější změřeni
    if (vlhkost > 80 && intervalMereni >= 180) {
      zahratiSenzoru();
      if (NO_ERROR != tepCidlo.read_meas_data_single_shot(HIGH_REP_WITH_STRCH, &teplota, &vlhkost)) {
        Serial.println("Data ze senzoru teploty/vlhkosti se nepodařilo načíst!!!");
        Serial.println(" ");
        chybaProgramu += " 13";
        if(pocetZapnuti == 0) { // zvuková signalizace chyby během 1. měření
          pipnuti(2000);
          delay(1000);
          pipnuti(2000);
          delay(1000);
          pipnuti(2000);
        }
      }
      else {
        Serial.println("Data ze senzoru teploty/vlhkosti:");
        Serial.print("teplota po zahrati = ");
        Serial.print(teplota);
        Serial.println(" °C");
        Serial.print("vlhkost po zahrati = ");
        Serial.print(vlhkost);
        Serial.println(" %");
        Serial.println(" ");
      }
    }
    delay(10);
  }
}
```

Obrázek 49: Ukázka zdrojového kódu měření teploty a relativní vlhkosti

Měření koncentrace prachových částic:

```
void mereniPrachu() {
    char serial[SPS30_MAX_SERIAL_LEN];
    uint16_t dataPripravena;

    ret = sps30_start_measurement();
    if (ret < 0) {
        Serial.println("Nejde spustit měření prachu!!!");
        chybaProgramu += " 14";
    }
    delay(5000);

    for (int i = 0; i < 10 ; i++) {
        int k = 0;
        do {
            ret = sps30_read_data_ready(&dataPripravena);
            if (ret < 0) {
                .....zjištěna chyba - zkráceno.....
            }
            else if (!dataPripravena) {
                .....zjištěna chyba - zkráceno.....
            }
            else {
                break;
            }
            delay(100);
        } while (k < 11);

        ret = sps30_read_measurement(&prachData);
        if (ret < 0) {
            Serial.println("Nelze přečíst naměřená data!!!");
            chybaProgramu += " 17";
        }
        else {
            Serial.println("Data ze senzoru prachových částic:");
            Serial.print("PM 1.0: ");
            Serial.println(prachData.mc_1p0);
            Serial.print("PM 2.5: ");
            Serial.println(prachData.mc_2p5);
            Serial.print("PM 4.0: ");
            Serial.println(prachData.mc_4p0);
            Serial.print("PM 10.0: ");
            Serial.println(prachData.mc_10p0);
            Serial.println(" ");
            Serial.print("NC 0.5: ");
            Serial.println(prachData.nc_0p5);
            Serial.print("NC 1.0: ");
            Serial.println(prachData.nc_1p0);
            Serial.print("NC 2.5: ");
            Serial.println(prachData.nc_2p5);
            Serial.print("NC 4.0: ");
            Serial.println(prachData.nc_4p0);
            Serial.print("NC 10.0: ");
            Serial.println(prachData.nc_10p0);
            Serial.println(" ");
            Serial.print("Typical partical size: ");
            Serial.println(prachData.typical_particle_size);
            Serial.println(" ");
        }
        delay(1000);
    }
    ret = sps30_stop_measurement();
    if (ret < 0) {
        Serial.println("Nelze vypnout průběžné měření prachu!!!");
        chybaProgramu += " 18";
    }
}
```

Obrázek 50: Ukázka zdrojového kódu měření koncentrací suspendovaných částic (zkráceno)

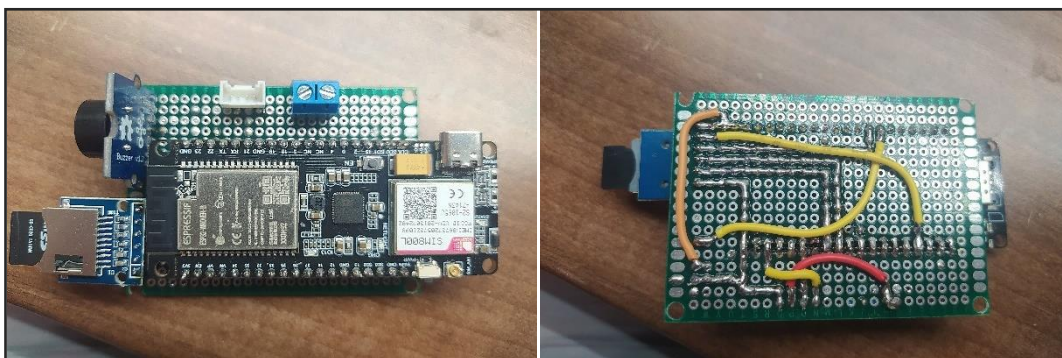
Měření tlaku:

```
void mereniTlaku() {  
    Serial.println("Data ze senzoru tlaku:");  
  
    float t = HP20x.ReadTemperature() / 100.0;    // hodnota teploty z čidla tlaku se neukládá  
    Serial.print("teplota = ");  
    Serial.print(t);  
    Serial.println(" °C");  
  
    tlak = HP20x.ReadPressure() / 100.0;  
    Serial.print("tlak = ");  
    Serial.print(tlak);  
    Serial.println(" hPa");  
  
    nadVyska = HP20x.ReadAltitude() / 100.0;  
    Serial.print("nadmořská výška = ");  
    Serial.print(nadVyska);  
    Serial.println(" m. n. m.");  
    Serial.println(" ");  
  
    delay(10);  
}
```

Obrázek 51: Ukázka zdrojového kódu měření tlaku

6.6 Sestavení meteostanice

Před samotným sestavováním meteostanice bylo nutné vyrobit plošný spoj, na kterém měla být osazena řídicí deska, modul pro microSD kartu, bzučák a napěťový dělič. Aby se řídicí deska a modul SD karty mohly vyjmout a případně vyměnit, bylo použito připájení patice, do které jsou tyto komponenty zasazeny. Plošný spoj byl vyroben dle předlohy na obrázku č. 46.



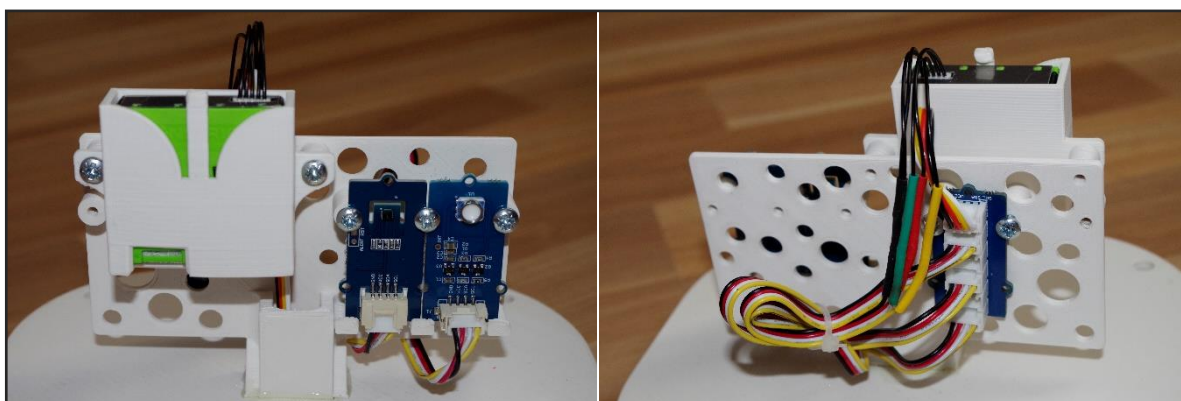
Obrázek 52: Výroba plošného spoje

Po vyzkoušení funkčnosti plošného spoje byla elektronická část nainstalována do konstrukce meteostanice. Ve spodním boxu byl umístěn plošný spoj, akumulátor, regulátor dobíjení, anténa GSM/GPRS modulu a vypínač. Na střechu byl usazen FV panel a v radičním krytu byly nainstalovány senzory a rozdělovač napájení a I²C sběrnice. Skrze radiční kryt vedou vodiče od FV panelu a kabel pro připojení senzorů. Navíc byly vyplněny dutiny ve střeše meteostanice pěnovým polystyrénem, aby se co nejvíce omezilo předávání tepla

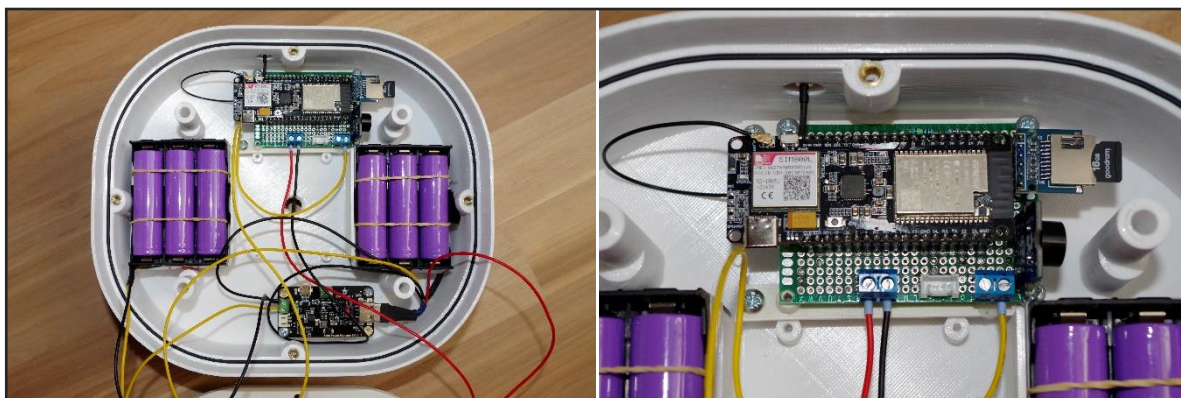
od tmavého FV panelu směrem ke snímači teploty. Taktéž byl izolován přechod mezi spodním boxem a radiačním krytem, kdyby docházelo k zahřívání akumulátoru, k čemuž za normálních podmínek při dobíjení či vybíjení akumulátoru v meteostanici nedochází. Tepelně izolované dutiny jsou vyobrazeny na obrázku č. 22.



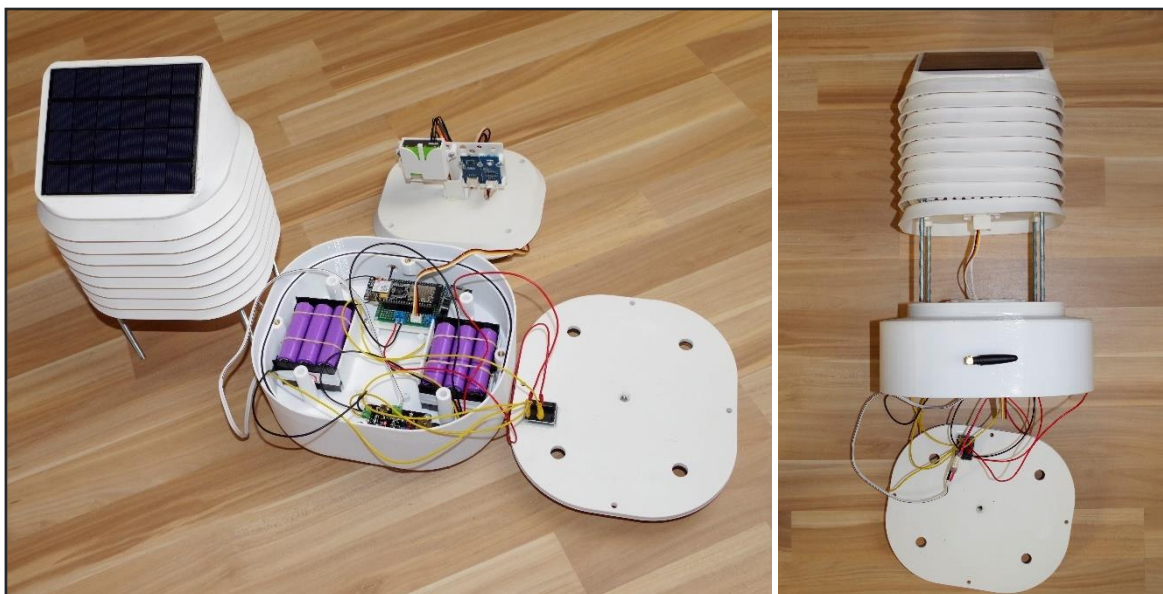
Obrázek 53: Instalace FV panelu a tepelná izolace střechy meteostanice



Obrázek 54: Instalace senzorů na držák



Obrázek 55: Instalace elektroniky do spodního boxu meteostanice (vlevo) a detail plošného spoje s řídicí deskou (vpravo)



Obrázek 56: Sestavení přenosné meteostanice

Kompletně sestavenou meteostanici lze umístit na vytvořený stojan, který je vysoký přibližně 1 metr. Stojan je vhodné použít pro měření teploty, aby nebyla měřena teplota těsně nad povrchem. Nicméně ani metrový stojan není správné řešení, jelikož se teplota měří správně 2 m nad povrchem. Realizovaná meteostanice má však být přenosná a použití vyššího stojanu by bylo již komplikovanější z důvodu zabezpečení proti povětrnostním vlivům. Konstrukce meteostanice je však navržena i tak, aby šla jen položit na pevný povrch bez stojanu.



Obrázek 57: Kompletní zhotovená mobilní meteostanice

6.7 Webová služba

Aby navrhovaná mobilní meteostanice dávala plnohodnotný smysl, bylo zapotřebí použít platformu pro živý náhled aktuálních dat. Pro tyto účely jsem na samém počátku této práce uvažoval buď o použití již existující platformy, nebo vytvoření vlastního řešení především z důvodu návrhu řešení „na míru“.

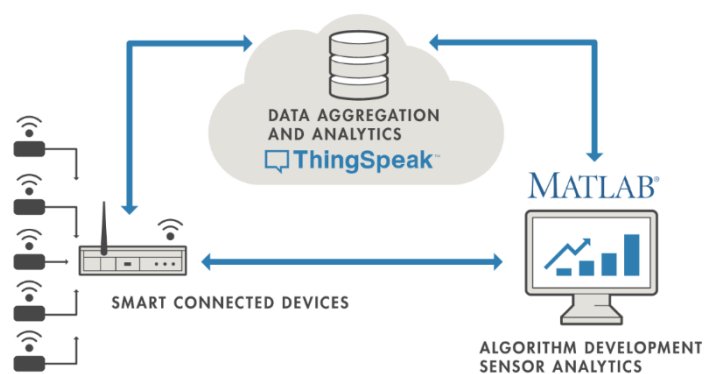
Existujících řešení je velké množství. Mezi ty známější platformy lze zařadit například ThingSpeak, Blynk, ThingsBoard či Arduino Cloud IoT. Tyto platformy jsou většinou zpoplatněné, přičemž některé z nich nabízejí i užití zdarma pro určité menší množství zapojených zařízení, od kterých jsou data sbírána, či počet přijatých dat za jednotku času.

Při porovnání existujících platform mi vyšla nejlépe platforma **ThingSpeak**, která umožňuje sbírat, vizualizovat a analyzovat data v prostředí cloudu. Tato služba je zaměřena na IoT a sběr dat přímo z koncových zařízení. Data jsou odesílána do vytvořených kanálů (projektů), přičemž v každém kanálu se může ukládat až osm různých hodnot (veličin). Každý kanál lze poté samostatně nastavovat a vizualizovat v něm uložená data. Pro užití zdarma nabízí ThingSpeak používání až 4 kanálů a 3 000 000 odeslaných zpráv s daty za rok (8200 zpráv/den), což při použití v meteostanici, která je navržena tak, aby byla data měřena v nejkratším intervalu odpovídajícím jedné minutě, představuje využití přibližně 1/6 z celkového ročního limitu odeslaných zpráv.

ThingSpeak využívá pro přenos dat REST API (GET, POST, PUT DELETE). K odeslání dat do daného kanálu tedy stačí odeslat HTTP požadavek obsahující API klíč daného kanálu a odesílaná data. Data se však dají z daného kanálu taktéž číst či smazat [38].

Jelikož za platformou ThingSpeak stojí společnost MathWorks, která vyvíjí software MATLAB, je možné využít tento software přímo na platformě ThingSpeak. Tato nadstavba přináší výhodu a volnost v podobě tvorby vlastní vizualizace dat (pokud nedostačuje ta standardně implementovaná) či jejich analýzy. To je nesporná výhoda této platformy.

Data se dají z ThingSpeak i exportovat, což u přenosné meteostanice znamená, že pokud jsou data odesílána, obsluha si je může stáhnout z cloudu a nemusí mít k meteostanici fyzický přístup. Jednotlivým kanálům se dá nastavit parametr sdílení, tudíž můžou být měřená data i veřejně dostupná. Nevýhodou této služby může být ukládání pouze osmi různých dat v jednom kanálu. V praxi to lze vyřešit využitím více kanálů v rámci jednoho projektu.



Obrázek 58: Koncepce platformy ThingSpeak [38]

Jelikož jsou nabízené služby platformy ThingSpeak pro potřeby navrhované meteostanice bez poplatků a zároveň obsahují doplněk v podobě implementovaného MATLABu, díky kterému je možné vytvářet vlastní vizualizace aktuálních dat, byla tato platforma po dohodě s vedoucím práce vybrána jako plně dostačující, a bylo upuštěno od návrhu vlastního webového rozhraní.

7 Testování

Po kompletaci přenosné meteostanice či jejích částí přišla na řadu testovací fáze, kdy byla ověřena funkčnost jednotlivých řešení.

7.1 Test odolnosti

První z provedených testů byl test odolnosti meteostanice vůči vnějším vlivům, především tedy odolnost proti vniknutí vody. Pro elektrická zařízení se udává tzv. stupeň krytí IP, který je zanesen v normě ČSN EN 60529. Označovaný výrobek nese označení kódem IPXY, kde číslice na pozici X představuje ochranu před vniknutím cizích předmětů a ochranu před nebezpečným dotykem. Číslice na pozici Y pak udává odolnost proti vniknutí vody. IP kód může ještě navíc obsahovat doplňková písmenka, která specifikují další odolnosti, ale ta bývají udávána u přístrojů jen zřídka. V následujících tabulkách je uvedeno rozšifrování a význam IP kódu.

Stupeň krytí	Ochrana před vniknutím cizích těles	Ochrana před nebezpečným dotykem
IP0X	bez ochrany	bez ochrany
IP1X	velkých ($\varnothing > 50$ mm)	dlaní
IP2X	malých ($\varnothing > 12,5$ mm)	prstem
IP3X	drobných ($\varnothing > 2,5$ mm)	nástrojem větším než 2,5 mm
IP4X	velmi drobných ($\varnothing > 1$ mm)	nástrojem (drátem) větším než 1 mm
IP5X	prachu – částečně	jakýmkoliv nástrojem
IP6X	prachu – zcela	jakýmkoliv nástrojem

Tabulka 6: Přehled a význam stupně krytí IP - ochrana před vniknutím cizích těles a ochrana před nebezpečným dotykem [39]

Stupeň krytí	Ochrana před vniknutím vody
IPX0	bez ochrany
IPX1	chráněno proti kapající vodě (dešti)
IPX2	chráněno proti kapající vodě (dešti) při odklonu do 15° od vertikální osy
IPX3	chráněno proti stříkající vodě – voda stříkající v úhlu 60° od vertikální osy
IPX4	chráněno proti stříkající vodě – voda stříkající ze všech úhlů
IPX5	chráněno proti tryskající vodě – voda tryskající ze všech úhlů
IPX6	chráněno proti intenzivně tryskající vodě
IPX7	chráněno proti ponoření do vody – do hloubky 1 m po dobu 30 minut
IPX8	chráněno proti potopení do vody na nepřetržitou dobu (za podmínek stanovených výrobcem zařízení)

Tabulka 7: Přehled a význam stupně krytí IP - ochrana před vniknutím [39]

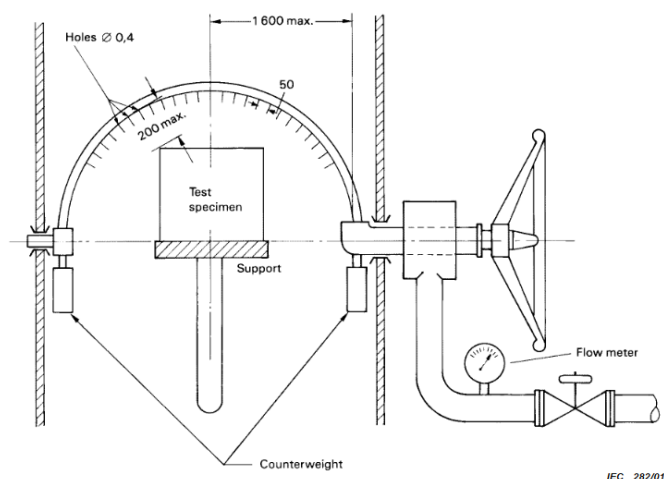
V tabulkách jsou uvedeny pouze stručné významy, co které IP kódy znamenají. Aby však dané zařízení (přístroj) získalo danou certifikaci IP, musí být na něm provedeny testy

akreditovanou laboratoří. Typy zkoušek a podmínky, za jakých mají být prováděny, stanovuje norma ČSN EN 60529.

Pro meteostanici, která měří koncentraci prachových částic, je samozřejmě nutné, aby mohl k danému snímači proudit vzduch. Proto se nemá smysl zabývat odolností meteostanice proti vniknutí cizích předmětů, ale meteostanice by jistě splňovala krytí IP2X.

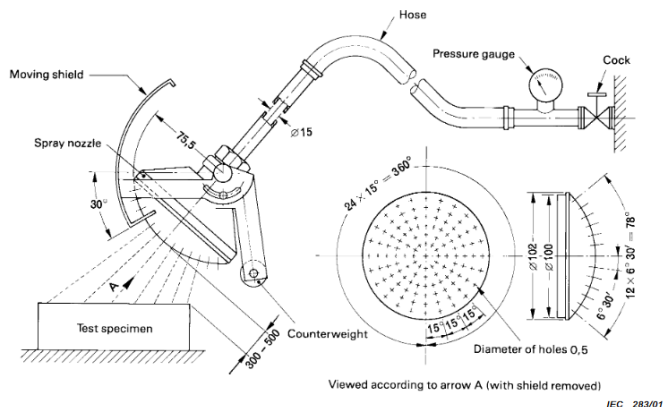
Důležité je však vniknutí vody do útroby meteostanice, kde se nachází elektronická část. Standardně je meteostanice vystavena dešti, v horších případech vichřicím s deštěm, kdy vítr unáší kapky vody pod většími úhly od vertikální osy. Už z modelu radiačního krytu je patrné, že pokud by voda stříkala na meteostanici zespodu, jistě by se voda dostala dovnitř radiačního krytu skrze mezery jeho jednotlivých „žeber“. Proto je zřejmé, že stupně krytí IPX4 realizovaná meteostanice nedosahuje. Proto má smysl uvažovat o krytí IPX3. Zkouška tohoto stupně krytí se může provádět dvěma způsoby:

- Oscilující proděravěnou trubičkou ve tvaru půlkruhu. V trubičce jsou po 5 cm vytvořeny otvory o průměru 0,4 mm. Trubička osciluje kolem zkoušeného předmětu v úhlu $\pm 60^\circ$ od vertikální osy a protéká jí proud vody $Q = \text{počet_otvorů} \cdot 0,07 \text{ [l/min]}$. Tento test se provádí po dobu 10 minut [39].



Obrázek 59: Zkušební zařízení pro krytí IPX3 pomocí trubičky dle IEC 60529 (rozměry v milimetrech), převzato z [39]

- Stříkáním na testované zařízení pomocí rozprašovací trysky, která se hýbe a stříká na zařízení pod úhly $\pm 60^\circ$ od vertikální osy. Průtok tryskou musí být 10 l/min při tlaku mezi 50 kPa až 150 kPa. Délka testu musí být minimálně 5 minut [39].



Obrázek 60: Zkušební zařízení pro krytí IPX3 pomocí trysky dle IEC 60529 (rozměry v milimetrech), převzato z [39]

Vlastní test

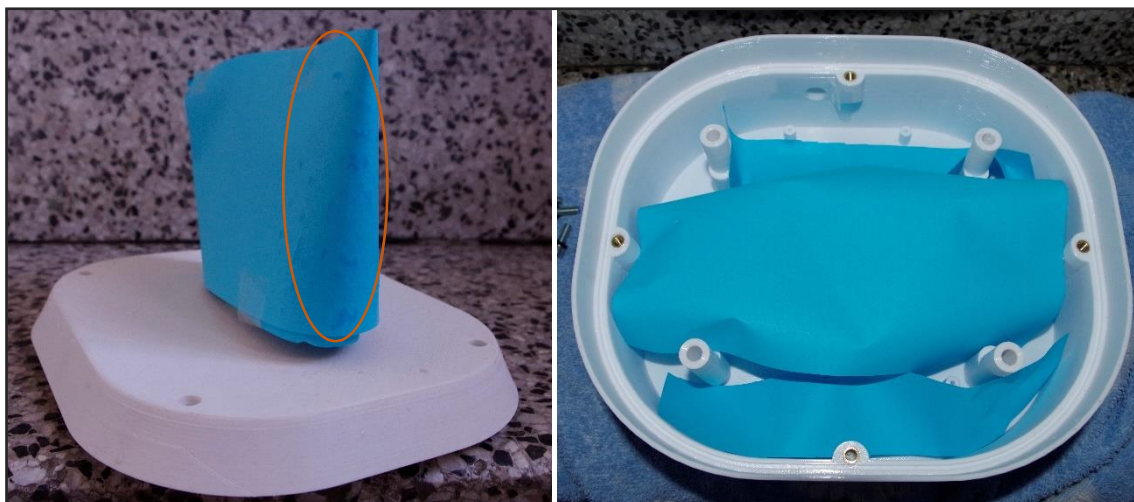
U realizované meteostanice nešlo o získání certifikace na daný stupeň krytí, nýbrž o zjištění, zda lze meteostanici použít v praxi, kde bude jistě vystavena vlivu počasí. Proto bylo provedeno vlastní testování voděodolnosti stanice, při kterém bylo snahou vycházet ze způsobu testování dle IPX3.

Pro vlastní test jsem zvolil metodu s tryskou, kterou je stříkáno na přístroj pod úhly $\pm 60^\circ$ od vertikální osy při průtoku vody 10 l/min. Byla použita tryska s proměnlivou šířkou proudu vody připojená na vodovodní řád. Při testu bylo měněno nastavení trysky tak, aby se vyzkoušelo stříkání na meteostanici úzkým proudem vody až po rozprašování. Průtok byl změřen pro dvě krajní nastavení trysky, kdy hodnoty průtoku odpovídaly při úzkém paprsku vody $Q_1 = (10,5 \pm 0,1)$ l/min a při rozprašování $Q_2 = (8,9 \pm 0,1)$ l/min. Průběžně byl také měřen maximální sklon stříkání od vertikální osy pomocí akcelerometru v mobilním telefonu. Celkově trval test přibližně 20 minut, jelikož byla nastavována různá nastavení trysky a měněna vzdálenost trysky od meteostanice. Je nutné zmínit, že jsem neměřil tlak vody ve vodovodním řádu během testování.



Obrázek 61: Fotografie z vlastního testování voděodolnosti meteostanice

Pro detekci vody uvnitř meteostanice jsem využil modrého savého papíru. Ten jsem umístil do spodního boxu pro elektroniku a do radiačního krytu na držáku pro jednotlivá čidla. Ve spodním boxu pro elektroniku nebyla detekována žádná voda. V prostoru snímačů bylo detekováno několik málo kapiček na části, která je nejbližší radiačnímu krytu. Obě části po provedeném testu jsou zachyceny na následujících fotografiích.



Obrázek 62: Výsledek provedeného testu voděodolnosti, držák pro snímače (vlevo) a box pro elektroniku (vpravo)

Výsledek testu lze považovat za překvapující v dobrém slova smyslu. Spodní box byl navržen tak, aby voda neměla možnost se do boxu za normálních podmínek dostat, což bylo testem ověřeno. Nicméně do radiačního krytu, respektive do části umístění snímačů, vniklo jen velmi malé množství vody, a to pouze na část, která je v těsné blízkosti samotného „žebrování“ radiačního krytu. Test neměl sloužit jako ověření stupně krytí, nýbrž inspirace (předloha) pro testování meteostanice podle testu dané normou ČSN EN 60529.

Z výsledků lze usoudit, že v případě certifikace stupně krytí by celá realizovaná meteostanice dosáhla stupně krytí IP22. Spodní box pro elektroniku by patrně dosáhl i vyššího stupně krytí IP23. Do radiačního krytu se v průběhu vlastního testu jisté minimum vody dostalo, nicméně nelze stanovit, zda například nebyly podmínky vlastního testu obtížnější oproti testu prováděnému dle normy. Za daných okolností by v případě radiačního krytu mohlo být také dosaženo odolnosti IP23. Nicméně i malé množství vody, které se do radiačního krytu dostalo, by patrně nemělo žádný vliv na jednotlivé senzory. Senzor prachových částic je umístěn ve svém vlastním krytu, senzor tlaku je voděodolný a čidlo teploty a vlhkosti vzduchu je umístěno ve středu meteostanice, kam se tedy dle testu žádná voda nedostala.

Za shrnutí testu lze považovat konstatování, že meteostanice může být provozována za normálních podmínek ve venkovním prostředí.

7.2 Měření spotřeby meteostanice

Na prototypu elektroniky bylo po naprogramování provedeno orientační měření spotřeby, které následně posloužilo pro zpřesnění výpočtu výdrže provozu meteostanice na akumulátor. Kvůli různým hodnotám proudu v průběhu chodu meteostanice, kdy největší výkyvy proudu nastávají při používání GSM/GPRS modulu, který může odebírat až 2 A, jsem si zapůjčil multimetr UNI-T 181A. Ten dokáže zaznamenávat hodnoty proudu v čase a zjistit jejich průměrnou hodnotu.

Při měření odběru el. proudu byly naměřeny hodnoty uvedené v tabulce č. 8. Maximální hodnota proudu dosáhla hodnoty $I_{\text{MAX}} = (1,328 \pm 0,017)$ A. Tento odebíraný špičkový proud byl však odebírán po dobu v řádu milisekund při odesílání dat na internet.

Maximální naměřená hodnota el. proudu	$(1,328 \pm 0,017)$ A
Průměrná hodnota odběru el. proudu během provozu meteostanice	$(108,1 \pm 0,3)$ mA
Průměrná hodnota odběru el. proudu během režimu Hlubokého spánku	$(2,49 \pm 0,02)$ mA
Odběr meteostanice během měření koncentrace prachových částic	$(142,28 \pm 0,3)$ mA

Tabulka 8: Přehled odebíraných proudů v různých režimech meteostanice

Proud byl měřen přímo na vývodu z akumulátoru, na kterém bylo naměřeno při spuštění meteostanice napětí $U = (3,726 \pm 0,002)$ V. Jelikož byl akumulátor složen z 12 ks Li-Ion článků 18650 zapojených paralelně, bylo dosaženo vytvoření poměrně tvrdého zdroje napětí, takže napětí na akumulátoru se v průběhu měření odběru proudu téměř neměnilo. Pokud budeme brát hodnotu napětí za konstantní v době měření, lze z naměřených hodnot vypočítat spotřebu realizované meteostanice, která při zapnutém stavu činí v průměru $(402,8 \pm 1,1)$ mW a při režimu Hlubokého spánku $(9,28 \pm 0,07)$ mW. Jmenovitý výkon FV panelu činí 2 W, což se zdá jako výrazně vyšší výkon, než potřebuje samotná meteostanice k provozu. Je ovšem nutné si uvědomit, že to je za ideálních podmínek a při správné orientaci na jih. Navíc například v zimě je podstatně kratší doba svitu slunečního záření. Dle prováděných testů bylo zjištěno, že výkon FV panelu je dostačující, jestliže panuje jasná obloha a meteostanice je správně orientována. V takovém případě dochází k dobíjení akumulátoru a energii v něm uloženou je následně možné využít ve dnech s oblačnou oblohou.

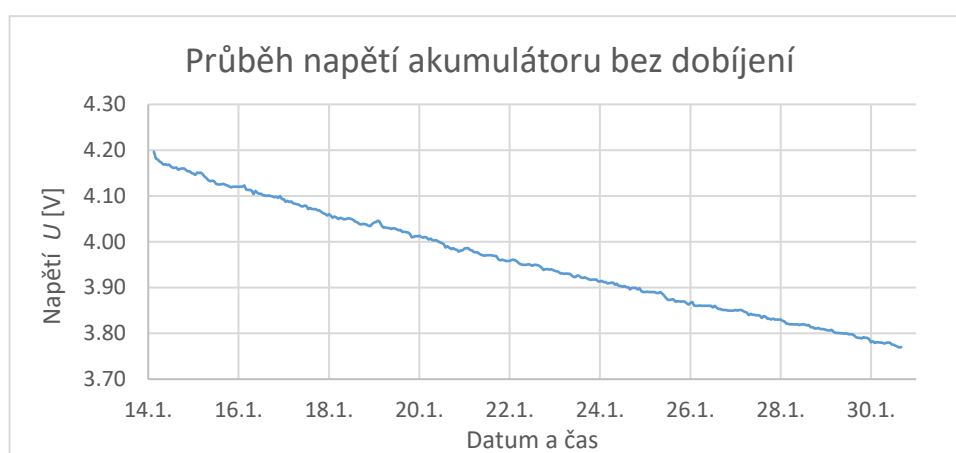
Přibližný výpočet provozu na akumulátor

Samotný zapnutý stav meteostanice trvá přibližně 53 s a následně je elektronika „uspána“. Za předpokladu, že by byl nastaven interval měření 5 minut, činil by průměrný

proudový odběr hodnotu $I_{AVG} = 23,2$ mA. To by při kapacitě akumulátoru 26400 mA znamenalo výdrž přibližně 47,5 dne, čehož lze dle zjištění z praxe reálně dosáhnout.

Testování výdrže provozu na akumulátor

Během prvního měření nebyl zapojen FV panel, a proto nedocházelo k dobíjení meteostanice. Toto měření trvalo přibližně 17 dní a během této doby kleslo napětí akumulátoru ze 4,2 V na 3,77 V. Napětí je měřeno pomocí vnitřního obvodu s A/D převodníkem umístěného na řídicí desce. Přivádějící napětí je navíc sníženo napěťovým děličem, proto jsou měřená napětí spíše orientační a nelze je považovat za přesné hodnoty. Při porovnání s multimetrem se napětí lišilo vždy v rozsahu $\pm 0,04$ V.



Graf 1: Průběh napětí akumulátoru bez dobíjení po dobu 17 dní

Dle [40] značí konečné napětí 3,77 V zbývající kapacitu přibližně 65 %, což platí při nízkých odběrech proudu. To znamená, že akumulátor by teoreticky vydržel dalších 31 dní provozu. V konečné fázi by tedy meteostanice dle výsledku mohla být v provozu čistě na energii z akumulátoru po dobu 48 dní, což je v souladu s teoretickým odhadem. Je nutné podotknout, že meteostanice vydrží patrně zmíněných 48 dní, ale tento údaj byl zjištěn a ověřen pro pětiminutový interval měření. Při častějším měření pak logicky bude délka provozu kratší.

Testování dobíjení meteostanice z FV panelu

Jak dokáže instalovaný FV panel meteostanici dobíjet lze pozorovat na grafu níže. Meteostanice byla zprvu umístěna na nevhodném místě orientována směrem na východ. Přibližně v polovině průběhu měření byla meteostanice přemístěna na nové místo s orientací na jih, což se projevilo rostoucím napětím akumulátoru. Dle průběhu je tedy zřejmé, že za vhodných podmínek, jako je orientace meteostanice na jižní stranu a jasné počasí, dokáže instalovaný FV panel meteostanici dobíjet. Tím je prakticky prodloužena doba provozu

meteostanice na neomezenou dobu. Pokud by napětí akumulátoru kleslo pod 3 V, program by uvedl elektroniku meteostanice do režimu Hlubokého spánku s velmi nízkou spotřebou na delší dobu. Pokud by byl akumulátor po probuzení již částečně dobit, meteostanice by dále pokračovala v normálním režimu.



Graf 2: Průběh napětí akumulátoru s dobíjením pomocí instalovaného FV panelu

7.3 Ukládání dat

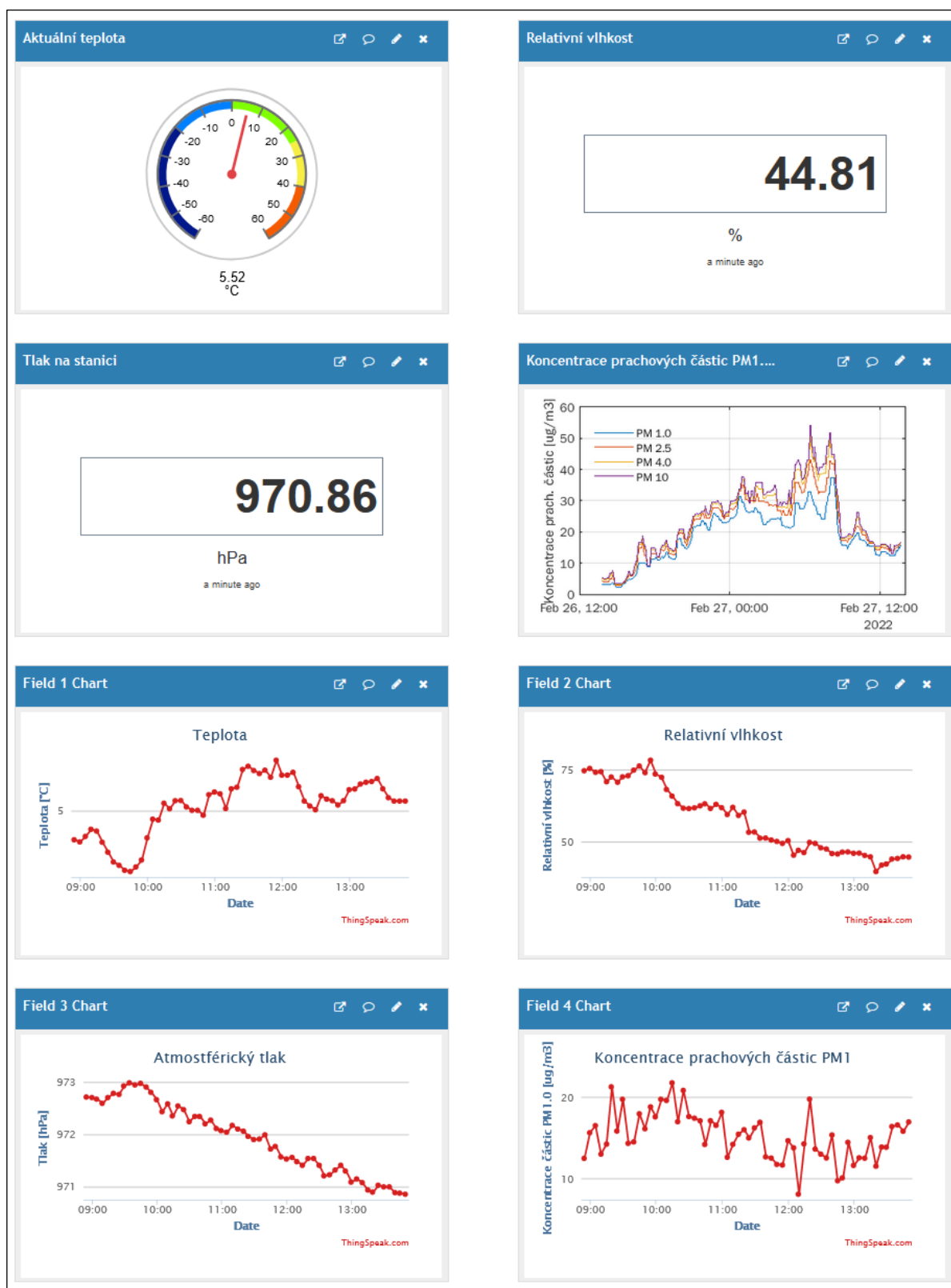
Změřená data ukládá meteostanice na paměťovou kartu do kořenového adresáře do textového souboru s názvem DATA.txt. Ukládání probíhá spolehlivě. Vyskytl se problém pouze po rychlém odpojení paměťové karty od počítače. Je tedy nezbytné vždy danou kartu nejdříve „bezpečně odebrat“ z PC.

Meteostanice ukládá datum, čas, napětí akumulátoru, teplotu vzduchu, relativní vzdušnou vlhkost, atmosférický tlak na stanici, přibližnou nadmořskou výšku (poskytovanou senzorem tlaku), přibližný atmosférický tlak přepočtený na hladinu moře (na základě přibližné nadmořské výšky), koncentrace suspendovaných částic PM₁, PM_{2,5}, PM₄ a PM₁₀, počet suspendovaných částic PM_{0,5}, PM₁, PM_{2,5}, PM₄ a PM₁₀ v objemu a průměrnou velikost částice. Dále jsou automaticky ukládány i maximální odchylky pro dané naměřené hodnoty dle údajů výrobců jednotlivých čidel. Poslední je vždy uložena případná chybová hláška z programu meteostanice, která slouží jako zpětná vazba, kdyby v průběhu měření nastala nějaká porucha.

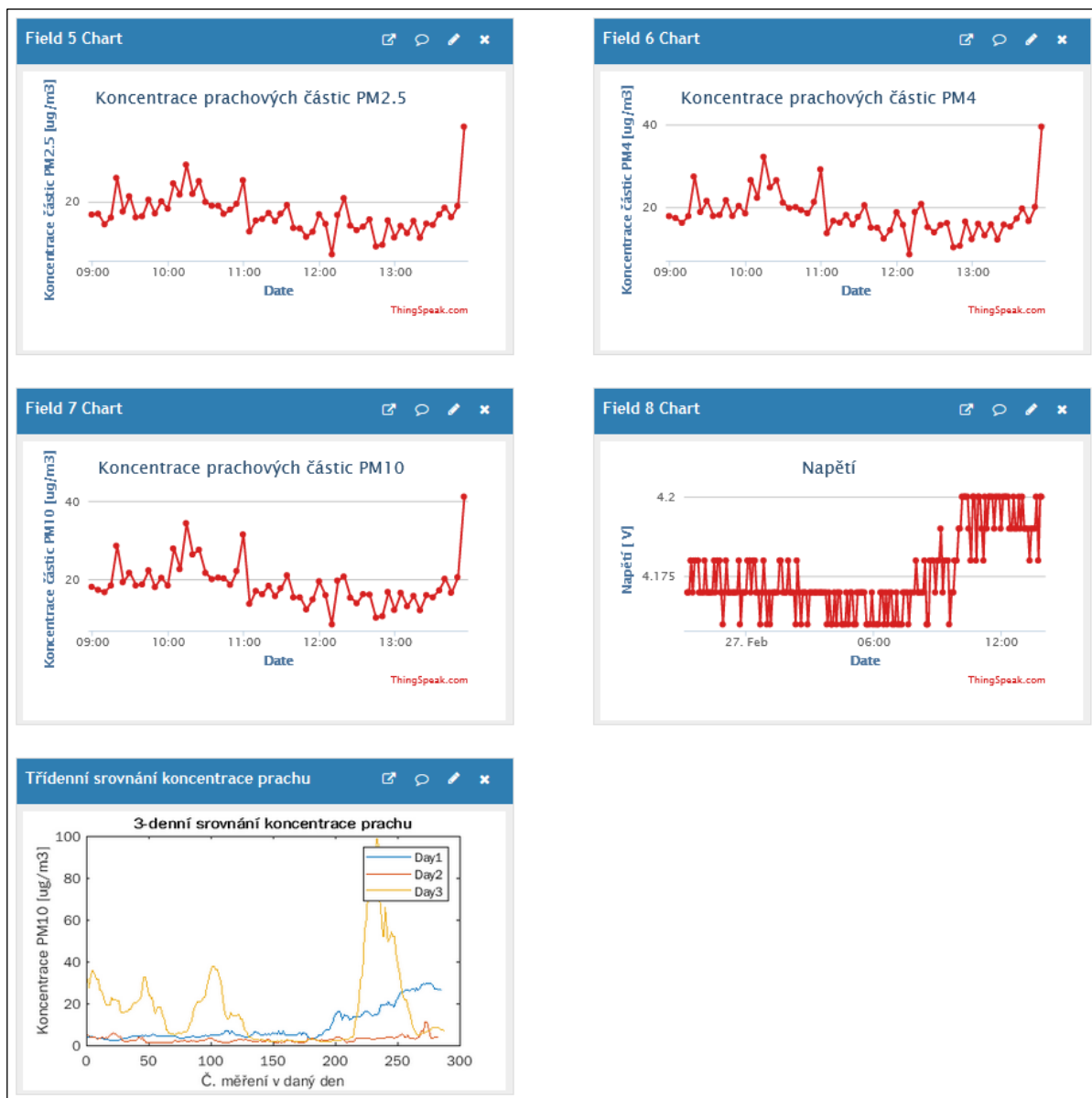
7.4 Náhled živých dat na ThingSpeak

Pro živý náhled měřených veličin jsem založil účet na ThingSpeak.com. Do vytvořeného kanálu se odesílají naměřená data: teplota, tlak, relativní vlhkost a hmotnostní koncentrace suspendovaných částic frakcí PM₁, PM_{2,5}, PM₄ a PM₁₀ a napětí akumulátoru.

Ukázka živého náhledu dat je zachycena na následujících obrázcích společně s vlastními vizualizacemi pomocí nadstavby MATLAB.



Obrázek 63: Ukázka živých dat na platformě ThingSpeak č.1



Obrázek 64: Ukázka živých dat na platformě ThingSpeak č.2

7.5 Předpokládané náklady na provoz meteostanice

Vzhledem k tomu, že roční objem odeslaných zpráv z meteostanice je malý, nemůže překročit limit bezplatného účtu na ThingSpeak, a tedy není tato služba zpoplatněna. Zpoplatněno je však odesílání dat skrze internet pomocí operátora Oskarta.

V případě intervalu měření a odesílání dat každých 5 minut je odesláno za rok přibližně 105120 zpráv s daty na službu ThingSpeak. Během testování bylo odesláno přibližně 16000 zpráv s daty a kredit na SIM kartě se snížil o 17,8 Kč. Z toho vyplývá, že roční náklady na provoz meteostanice (při pěti minutovém intervalu měření) budou činit přibližně 117 Kč.

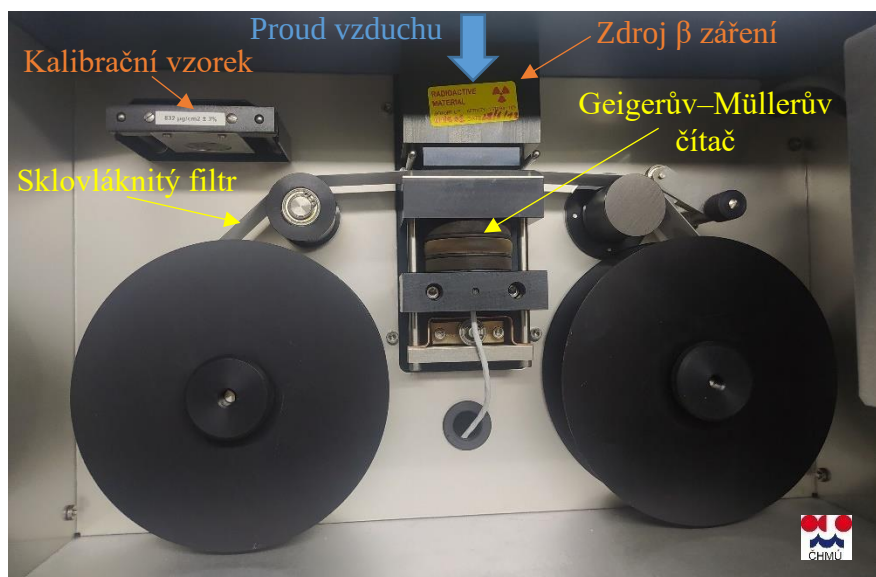
8 Ověření správnosti měření

Nezbytnou činností bylo ověření správnosti naměřených dat. Pro ověření byl zvolen jednoduchý způsob, kdy probíhalo souběžné měření pomocí přenosné meteostanice v blízkosti profesionální meteostanice sledující kvalitu ovzduší v Českých Budějovicích pod správou Českého hydrometeorologického ústavu. Následně lze změřená data porovnat a zjistit, zda se liší a zda je rozdíl stále v toleranci přesnosti měření udávané výrobcí jednotlivých čidel. Stanice ČHMÚ v Českých Budějovicích, která byla použita pro srovnávací měření, má označení CCBDA a slouží především ke sledování kvality ovzduší. Doplnkově jsou zde měřeny i meteorologické veličiny.



Obrázek 65: Stanice měření kvality ovzduší v Českých Budějovicích (Nerudova ulice)

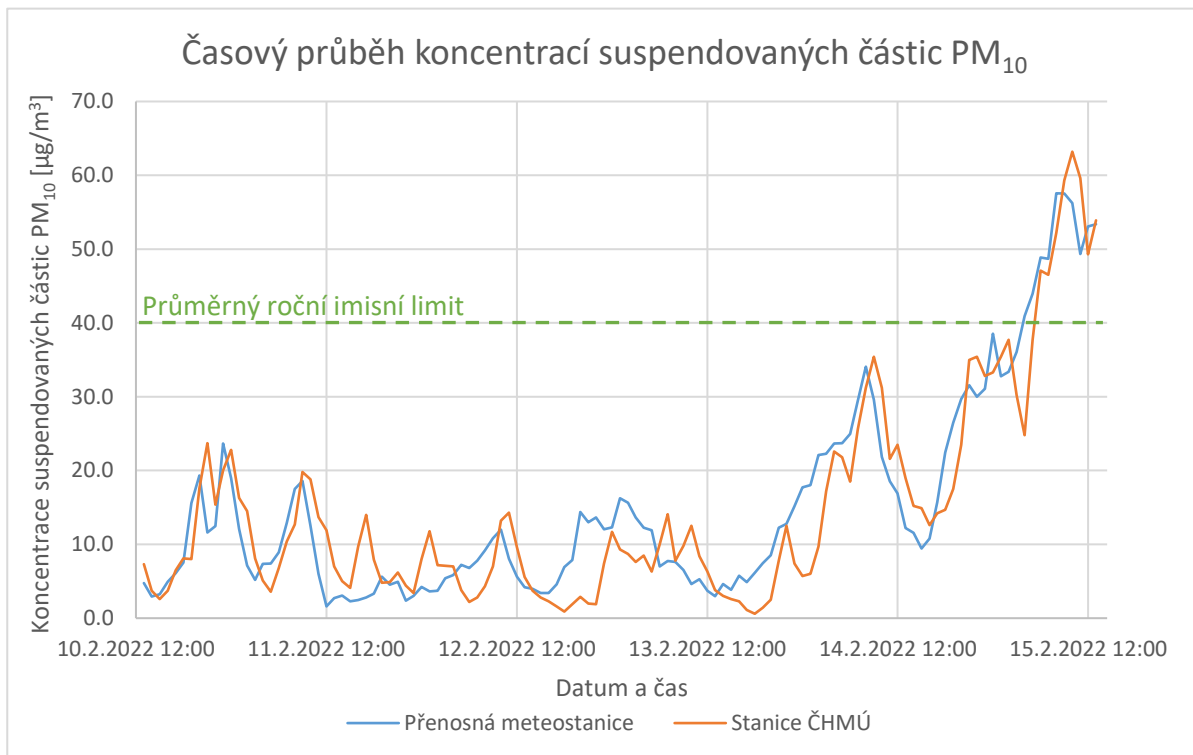
Automatizovaná stanice měří koncentrace suspendovaných částic $PM_{2,5}$ a PM_{10} pomocí radiometrické metody, kdy je po dobu jedné hodiny nasáván vzduch přes filtr, který zachycuje prachové částice dané frakce. Následně je každou hodinu zjištěn úbytek β záření na daném vzorku oproti stavu před začátkem měření. Rozdíl úbytků β záření odpovídá koncentraci prachových částic. Stanice tedy poskytuje hodinové průměry těchto koncentrací. K měření se zde využívají zařízení Envea MP101M, kde se jako zdroj β záření využívá radioaktivní izotop uhlíku ^{14}C .



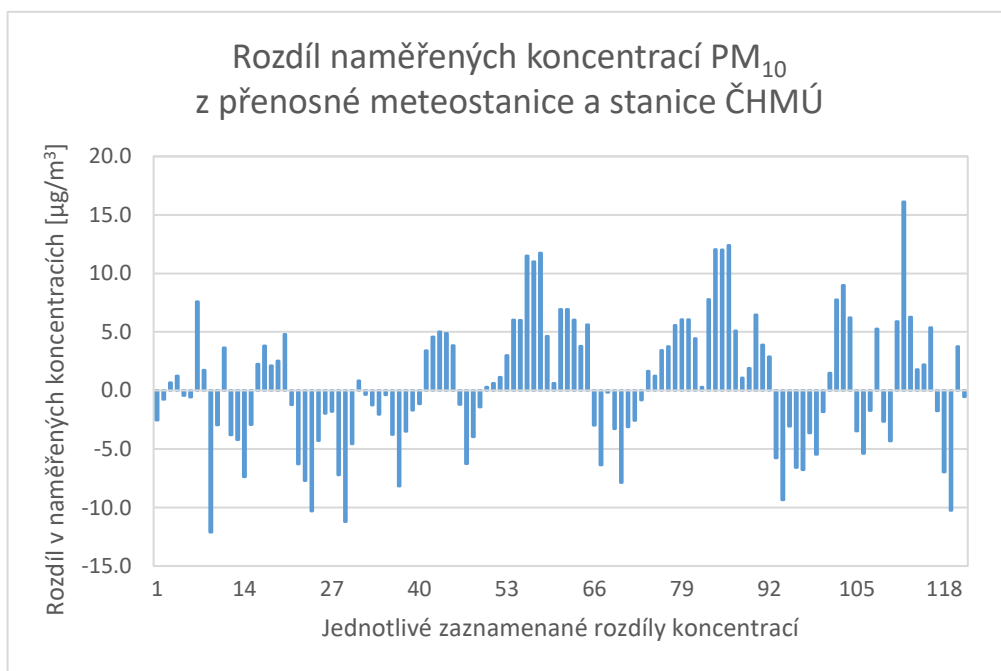
Obrázek 66: Vnitřní uspořádání měřicího zařízení Envea MP101M (fotografie pořízena ve spolupráci s ČHMÚ)

Vlastní měření probíhalo v období 10.2.2022 – 15.2.2022. Níže jsou v grafech znázorněna naměřená data. Vlastní přenosná meteostanice prováděla měření každých 5 minut. Z nich poté byly vypočteny hodinové průměry, aby se následně daly porovnat s daty poskytnutými od ČHMÚ.

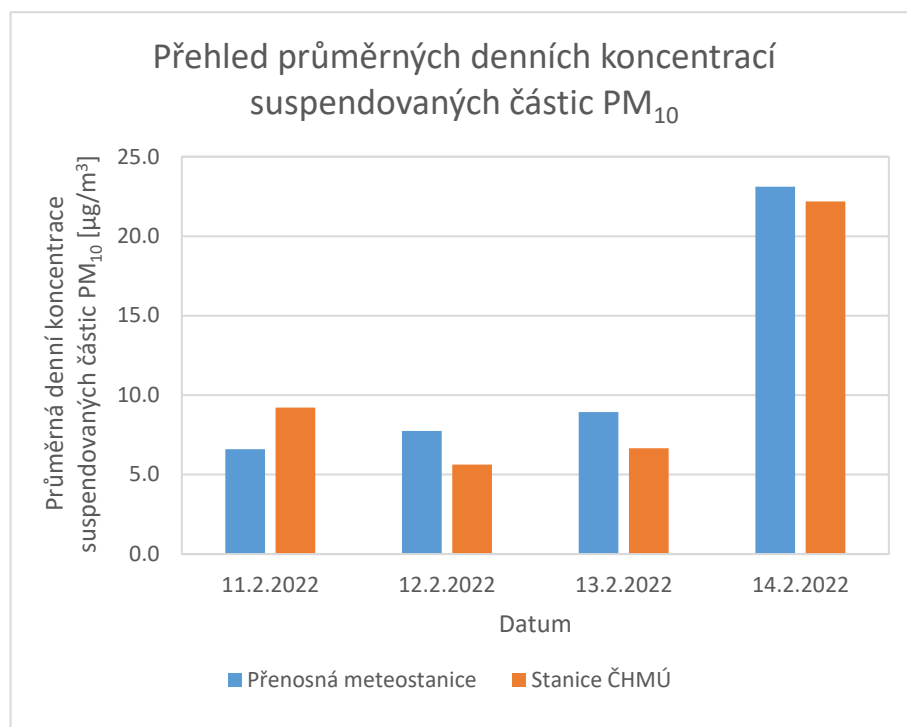
Koncentrace suspendovaných částic PM₁₀



Graf 3: Časový průběh průměrné hodinové koncentrace suspendovaných částic PM₁₀ z přenosné meteostanice a stanice ČHMÚ v Českých Budějovicích



Graf 4: Zjištěné rozdíly naměřených koncentrací suspendovaných částic PM₁₀ z přenosné meteostanice a stanice ČHMÚ v Českých Budějovicích



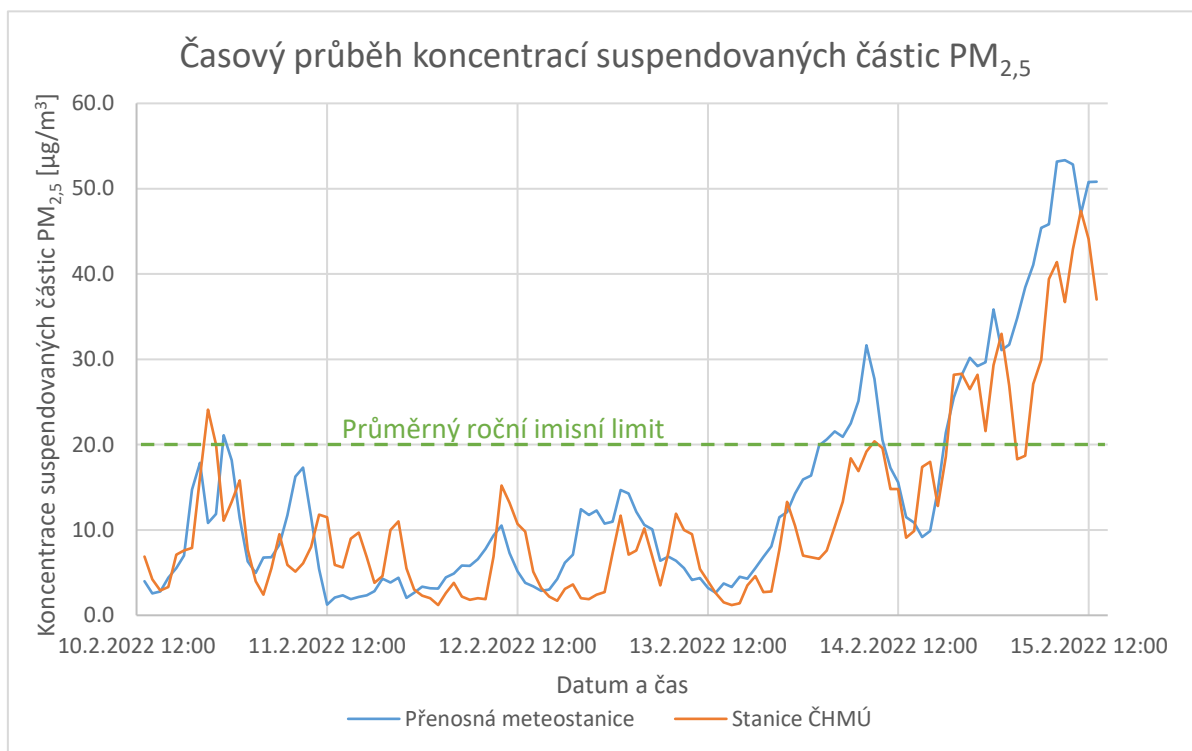
Graf 5: Přehled zjištěných průměrných denních koncentrací suspendovaných částic PM₁₀ z přenosné meteostanice a stanice ČHMÚ v Českých Budějovicích

Z výsledků měření koncentrace prachových částic PM₁₀ lze usoudit, že senzor měří relativně přesně. Ač je přesnost udaná výrobcem $\pm 25 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ pro hodnoty koncentrace do $100 \text{ } \mu\text{g/m}^3$, vždy byla změřená hodnota v tomto rozmezí, což lze vidět na grafu č. 4. Většina hodinových průměrů dokonce byla změřena s odchylkou do $\pm 7 \text{ } \mu\text{g/m}^3$. Co se týče denních průměrů vyobrazených na grafu č. 5, které se sledují kvůli imisním limitům, byl zaznamenán největší rozdíl $2,6 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ od hodnoty ze stanice ČHMÚ.

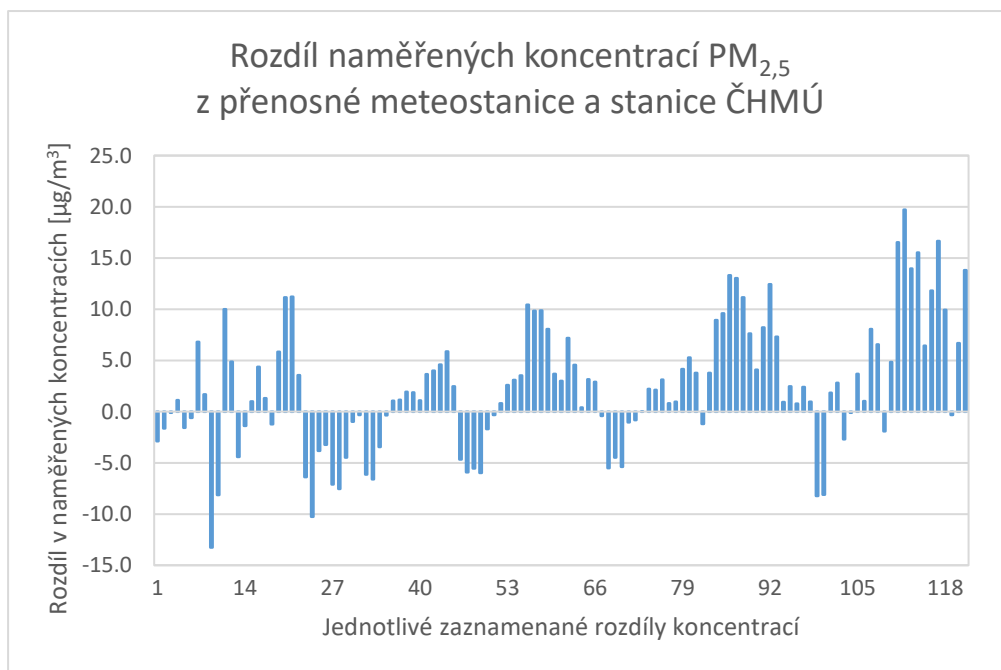
K výsledkům je nutné podotknout, že zatímco měření koncentrace suspendovaných částic na stanici ČHMÚ probíhá kontinuálně celou hodinu, přenosná meteostanice měřila pouze hodnoty v pětiminutových intervalech. Tudíž je možné, že některé krátkodobé výkyvy koncentrace částic nemusely být zachyceny. Nebo naopak zachyceny byly a tím došlo do značné míry k ovlivnění hodinových průměrů. Taktéž mohl vzniknout rozdíl v koncentracích vlivem rozličné polohy snímačů, mezi nimiž byla vzdálenost přibližně 2 až 3 metry. V neposlední řadě je také nutné zmínit, že dle ČHMÚ činí rozšířená nejistota měření 17 % z naměřené hodnoty (pro měření koncentrace částic PM₁₀).

Pro měření denních průměrů koncentrace prachových částic PM₁₀ lze jistě použitý optický senzor Sensirion SPS30 považovat za způsobilý, alespoň tedy pro rozsah koncentrace, který panoval během tohoto testu.

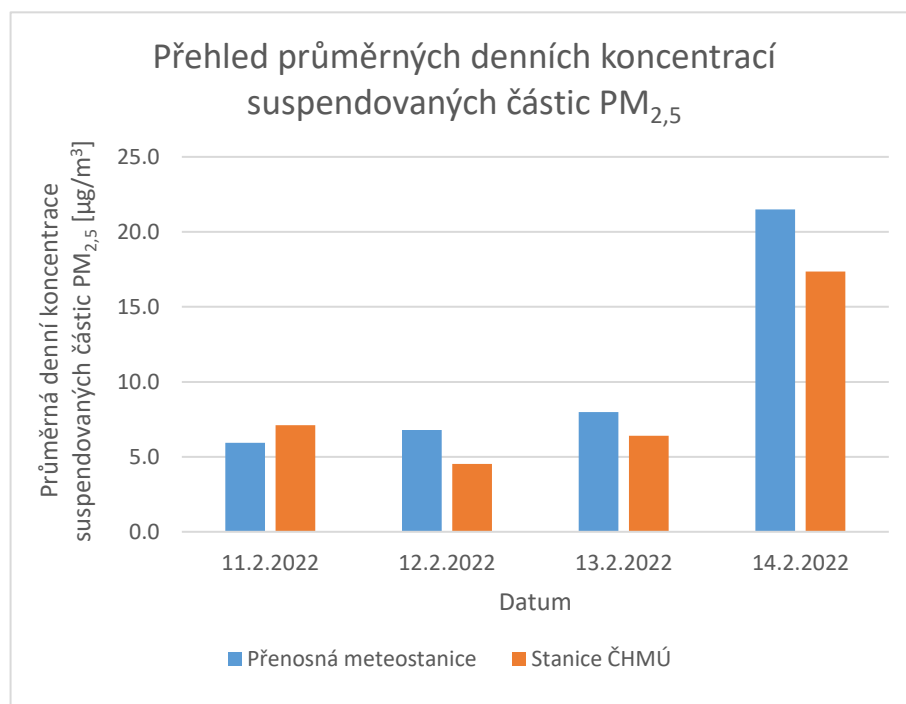
Koncentrace suspendovaných částic PM_{2,5}



Graf 6: Časový průběh průměrné hodinové koncentrace suspendovaných částic PM_{2,5} z přenosné meteostanice a stanice ČHMÚ v Českých Budějovicích



Graf 7: Zjištěné rozdíly naměřených koncentrací suspendovaných částic PM_{2,5} z přenosné meteostanice a stanice ČHMÚ v Českých Budějovicích



Graf 8: Přehled zjištěných průměrných denních koncentrací suspendovaných částic $PM_{2,5}$ z přenosné meteostanice a stanice ČHMÚ v Českých Budějovicích

Při měření koncentrací menších částic $PM_{2,5}$ byly zjištěny větší rozdíly než u měření koncentrací částic PM_{10} . Realizovaná meteostanice měla tendenci měřit vyšší koncentrace než stanice ČHMÚ. Přesnost udaná výrobcem pro měření koncentrace částic frakce $PM_{2,5}$ činí $\pm 10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (pro hodnoty koncentrace do $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Až na posledních 35 hodin měření by se dala tato přesnost považovat za ověřenou, jelikož až na výjimky se naměřené hodnoty nacházely v tomto rozsahu přesnosti senzoru a většinou se hodnoty pohybovaly v rozsahu $\pm 7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ od hodnoty ze stanice ČHMÚ.

Posledních 35 hodin však senzor měřil i výrazně vyšší hodnoty, které již neležely rozsahu přesnosti udávané výrobcem. Minimálně posledních 24 hodin bylo deštivých, a právě malé částčky vody obsažené ve vzduchu mohly způsobit tyto výraznější odchylky v měření. Zařízení na stanici ČHMÚ je totiž vybaveno odlučovačem vodních částic ze vzduchu, a proto tedy oproti přenosné meteostanici měřila stanice ČHMÚ nižší koncentrace suspendovaných částic.

Co se týče denních průměrů, které se sledují kvůli imisním limitům, byl zaznamenán největší rozdíl $4,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ od hodnoty ze stanice ČHMÚ.

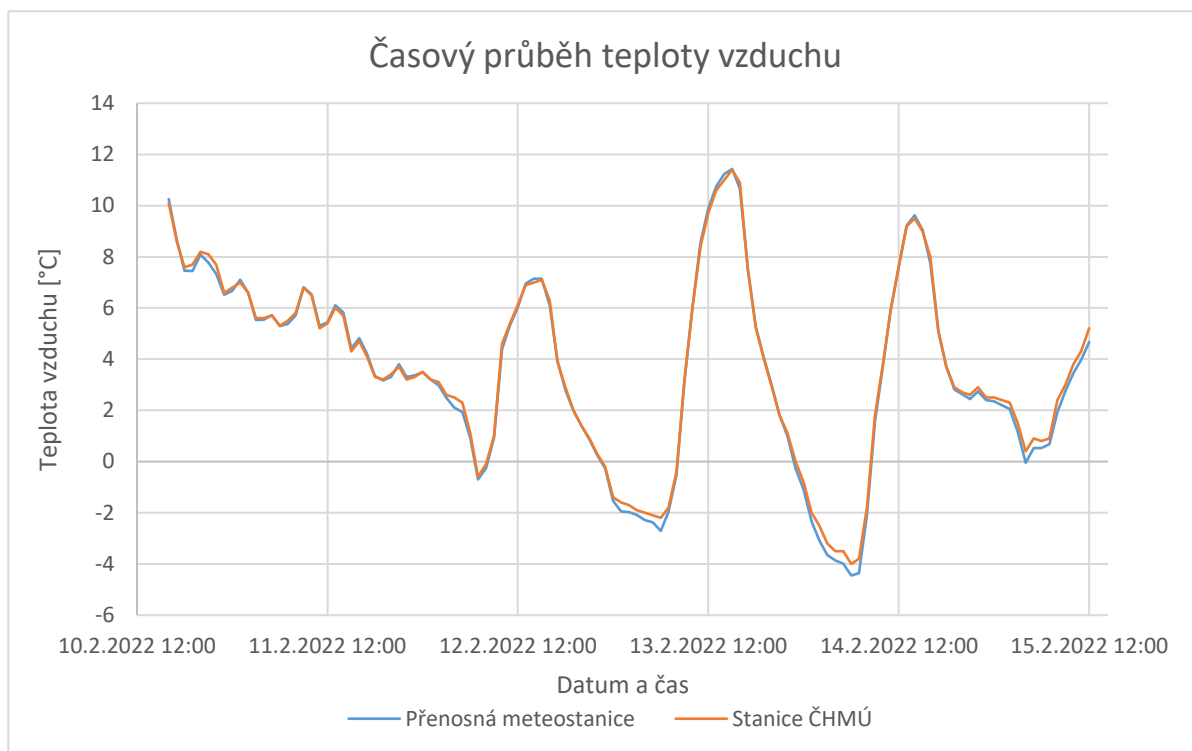
Na rozdíly během měření mohla mít vliv rozličná poloha snímačů, mezi nimiž byla vzdálenost přibližně 2 až 3 metry, a také rozdílný způsob měření (kontinuální na stanici ČHMÚ oproti měření v pětiminutových intervalech na přenosné meteostanici).

Taktéž je potřeba zmínit, že na stanici ČHMÚ jsou pro měření koncentrací prachových částic $PM_{2,5}$ a PM_{10} dvě samostatná zařízení. Bylo zjištěno, že si také velmi často změřené hodnoty na této stanici výrazně odporovaly, a to tak, že byla ve stejnou hodinu naměřena vyšší koncentrace částic $PM_{2,5}$ než koncentrace částic PM_{10} , přičemž frakce PM_{10} obsahuje i částice $PM_{2,5}$. Koncentrace částic PM_{10} by tedy měla být vždy větší. Samozřejmě to může být způsobeno také odlišnou polohou odebrání vzduchu pro jednotlivé frakce, kde se můžou jednotlivé koncentrace částic lehce lišit, a vliv hraje také vlastní rozšířená nejistota měření, která dle ČHMÚ činí 20 % pro měření koncentrace částic $PM_{2,5}$. Když už byla naměřena hodnota koncentrace částic $PM_{2,5}$ větší než u PM_{10} , tak většinou s rozdílem do $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Avšak byla zjištěna i hodnota koncentrace o téměř $11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ vyšší.

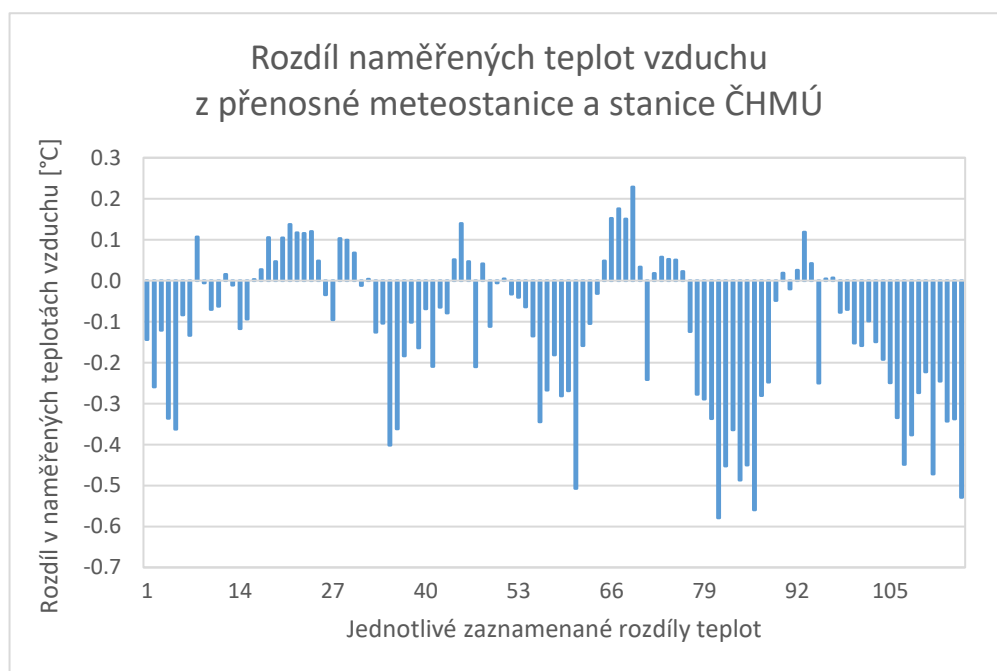
V praxi se koncentrace suspendovaných částic měří hlavně pro frakce $PM_{2,5}$ a PM_{10} , a proto nešlo provést porovnání koncentrací frakcí PM_1 a PM_4 , které navíc měří realizovaná přenosná meteostanice. Ta také poskytuje údaj o počtu částic, nicméně ten se také běžně neměří a nebylo tedy možné tato data taktéž porovnat.

Z výsledků tohoto testu lze usoudit, že použitý senzor koncentrace suspendovaných částic Sensirion SPS30 měří v rámci přesnosti dané výrobcem. Za jeho největší slabinu považují měření koncentrací $PM_{2,5}$ za deštivého počasí, kde má senzor tendenci měřit vyšší hodnoty koncentrací, a to i mimo rozsah přesnosti senzoru. To však nemusí být chyba samotného měření snímače, nýbrž spíše konstrukční problém, kdy částčky vody rozptýlené ve vzduchu se mohou dostat do senzoru a mohou být nechtěně změřeny. Nicméně senzor lze bez potíží použít pro získání alespoň orientačních hodnot koncentrací prachových částic, a to především denních průměrů, které se nikterak významně nelišily od hodnot ze stanice ČHMÚ. Dle výsledků porovnání lze považovat za přesnější měření koncentrací částic PM_{10} , které navíc nebylo zatíženo nepřesnostmi během deštivého počasí.

Teplota vzduchu



Graf 9: Časový průběh průměrné hodinové teploty vzduchu z přenosné meteostanice a stanice ČHMÚ v Českých Budějovicích

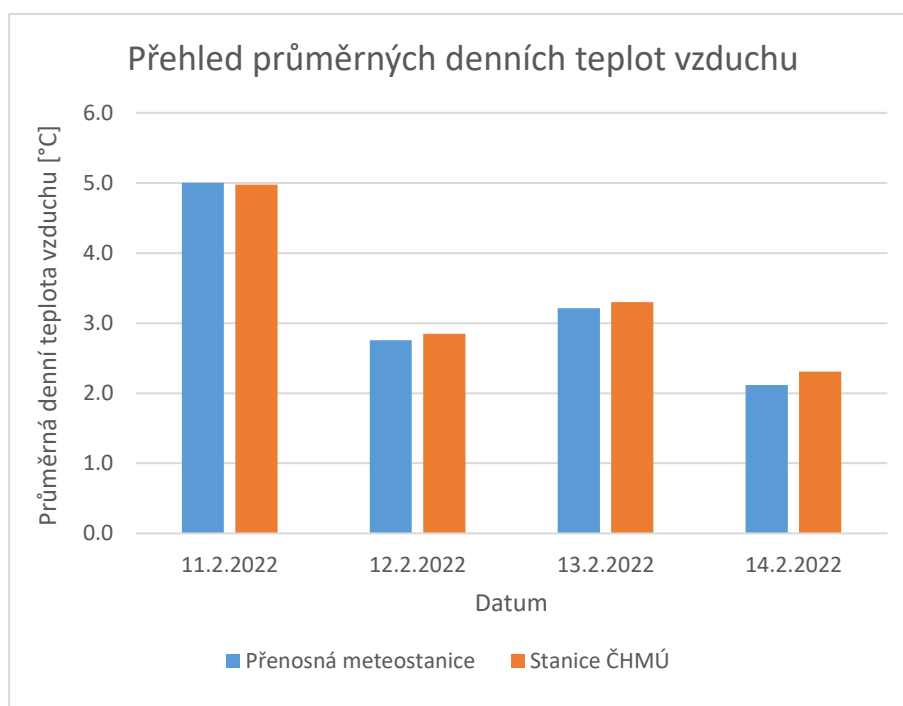


Graf 10: Zjištěné rozdíly naměřených teplot vzduchu z přenosné meteostanice a stanice ČHMÚ v Českých Budějovicích

Měření teploty vzduchu je přesné s minimální odchylkami od hodnot stanice ČHMÚ (viz graf č. 9). Největší nepřesnosti byly vždy zaznamenány při zastavování poklesu teplot a následném růstu. Při této změně trendu měla přenosná meteostanice tendenci k setrvačnosti a měřila nižší teploty vzduchu řádově o 0,3 – 0,5 °C. Přesnost měření senzoru Sensirion SHT35

je vyobrazena na obrázku č. 29, přičemž maximální nejistota měření uváděná výrobcem je pro běžné teploty vzduchu $\pm 0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$.

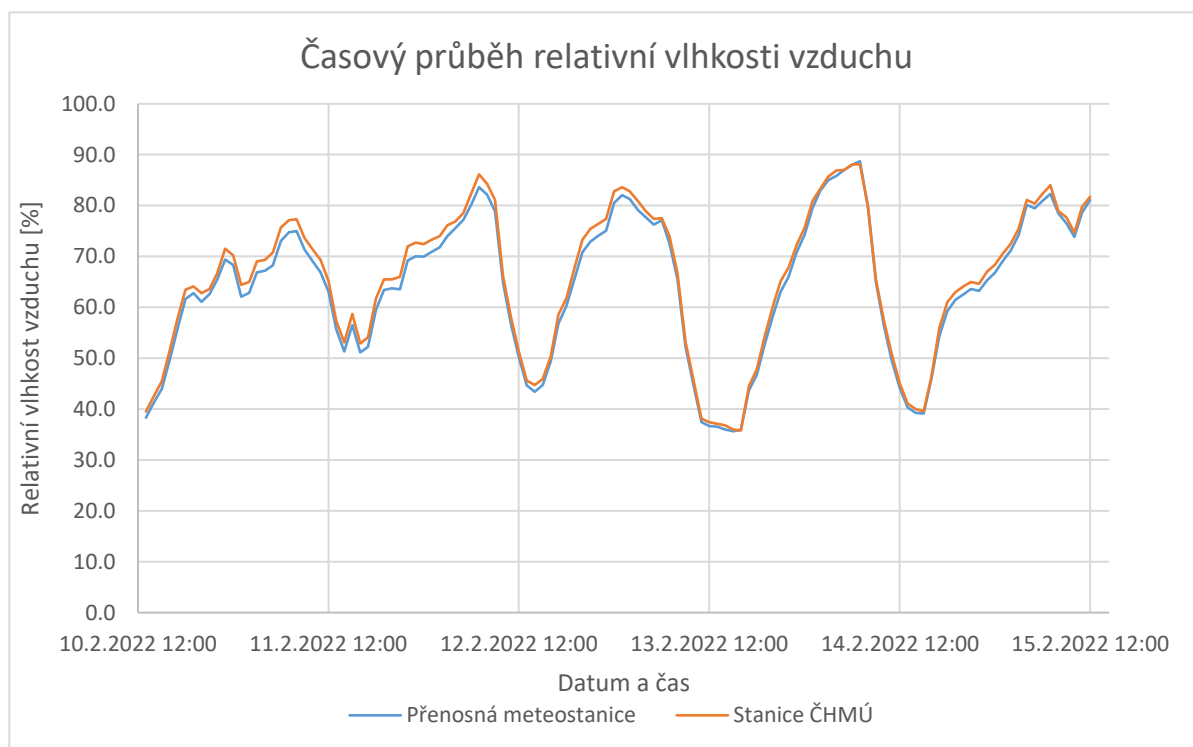
Možný problém, který ovlivňuje měřenou teplotu vzduchu, spočívá v konstrukci přenosné meteostanice. Ta díky svému objemu a hmotnosti použitého materiálu má značnou tepelnou kapacitu a při změnách teploty má tak tendenci ochlazovat/ohřívat vzduch uvnitř radiačního štítu. Senzor pak měří nižší, nebo vyšší teploty vzduchu a nedokáže tak rychle reagovat na změnu. Tento jev lze rozklíčovat z grafu č. 10, kde sloupcový graf rozdílů teplot mezi stanicemi tvoří lehce sinusový průběh. Zjištěné denní průměry se liší maximálně o $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$.



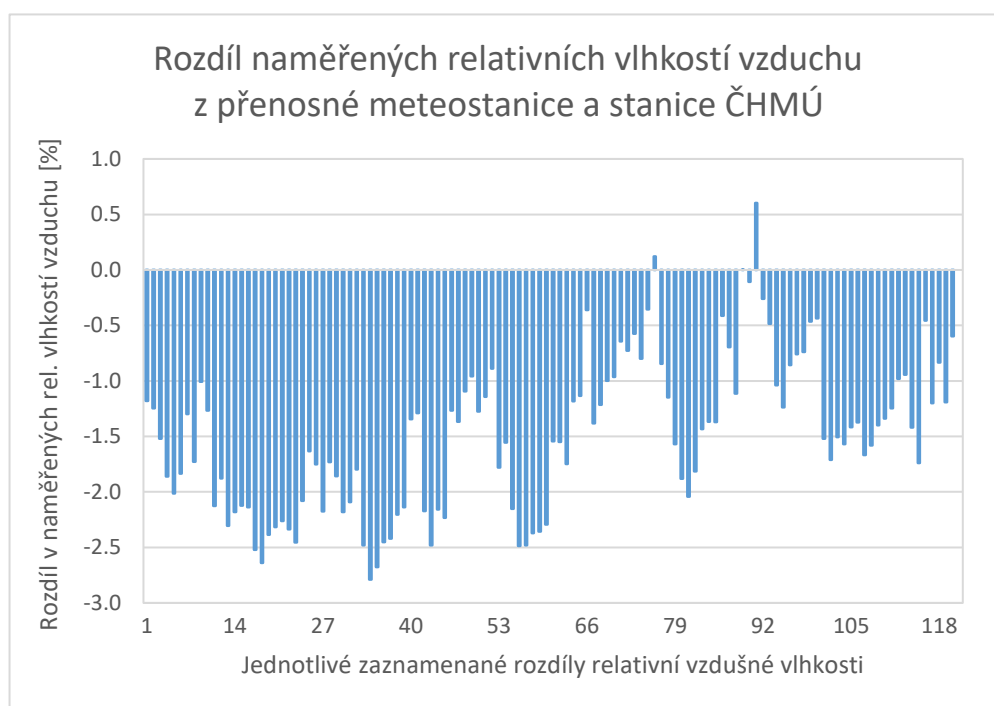
Graf 11: Přehled zjištěných průměrných denních teplot vzduchu z přenosné meteostanice a stanice ČHMÚ v Českých Budějovicích

Během tohoto měření byl také ověřen předpoklad, že případný ohřev fotovoltaického panelu nemá vliv na měřenou teplotu vzduchu. První tři dny testování panovalo jasné počasí a panel byl orientován směrem na jižní stranu. V tomto ohledu je konstrukce přenosné meteostanice za použití tepelně izolačních materiálů vyřešena dobře a FV panel měřenou teplotu vzduchu patrně téměř neovlivňuje.

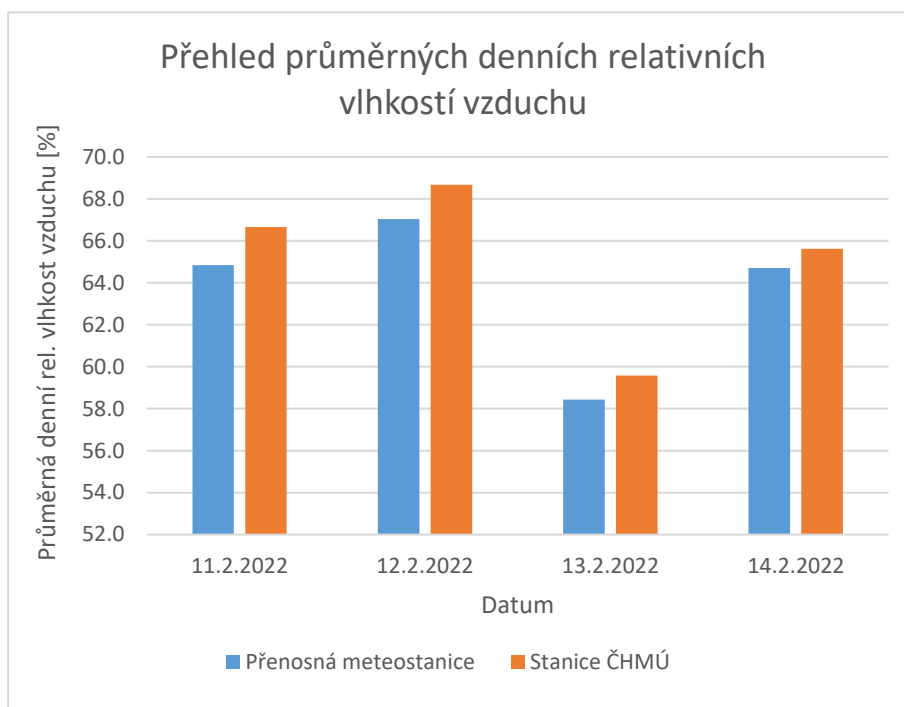
Relativní vlhkost vzduchu



Graf 12: Časový průběh průměrné hodinové relativní vlhkosti vzduchu z přenosné meteostanice a stanice ČHMÚ v Českých Budějovicích



Graf 13: Zjištěné rozdíly naměřených relativních vlhkostí vzduchu z přenosné meteostanice a stanice ČHMÚ v Českých Budějovicích



Graf 14: Přehled zjištěných průměrných denních relativních vlhkostí vzduchu z přenosné meteostanice a stanice ČHMÚ v Českých Budějovicích

Čidlo relativní vlhkosti vzduchu Sensirion SHT35 vykazovalo lehké nepřesnosti oproti hodnotám ze stanice ČHMÚ, což lze pozorovat na grafu č. 12. Při zvyšování vlhkosti vzduchu senzor měřil se zpožděním, naopak na pokles reagoval senzor mnohem rychleji a přesněji. Výrobce senzoru udává maximální odchylku měření $\pm 2 \%$ do relativní vlhkosti 80% , pro vyšší vlhkosti roste pak odchylka až k $\pm 3 \%$. Grafické znázornění přesnosti měření je vyobrazeno na obrázku č. 31.

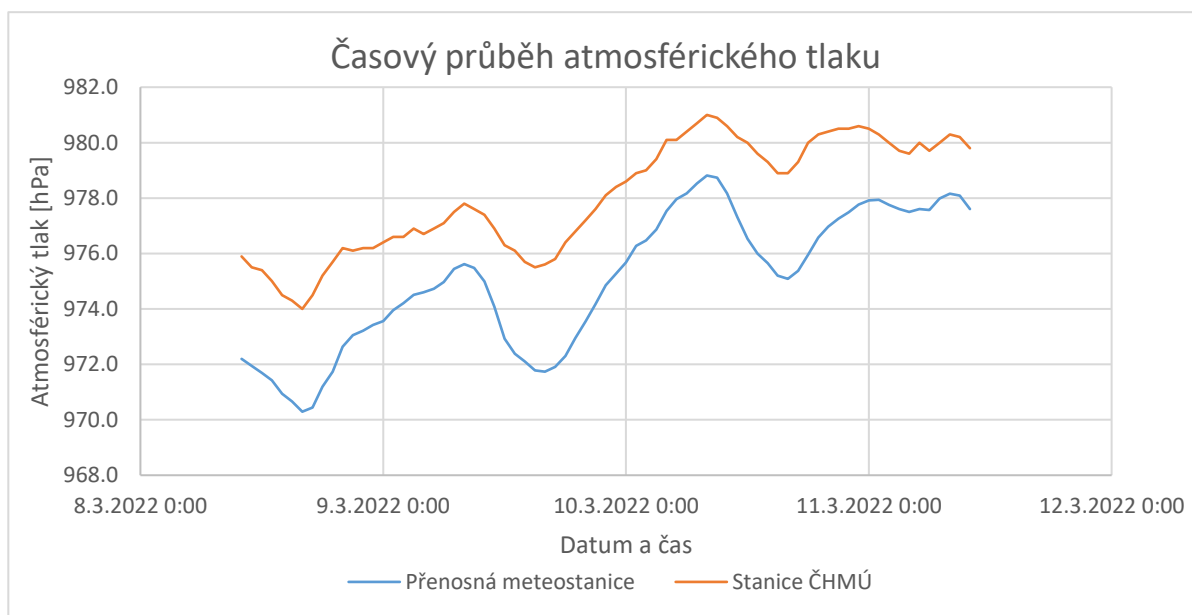
Některé naměřené rozdíly činily více než zmiňované 2% . Jelikož senzor změřil vždy nižší maximální hodnoty relativní vzdušné vlhkosti, byl v programu meteostanice prodloužen interval ohřátí senzoru, který se používá pro přesnější měření při vyšší relativní vlhkosti.

Denní průměrné hodnoty relativní vlhkosti vzduchu byly vždy nižší než zjištěné průměry ze stanice ČHMÚ. Největší zjištěný rozdíl činil $1,9 \%$.

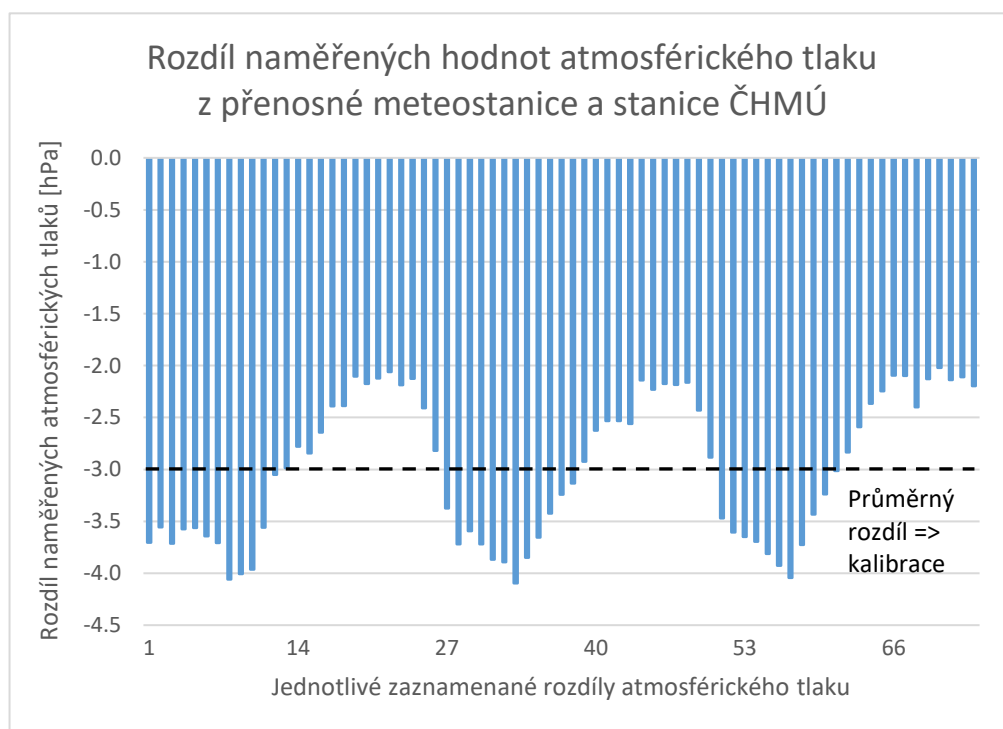
Důvodem, proč se měřené hodnoty teploty a relativní vlhkosti vzduchu mírně liší a mají tendenci pomaleji reagovat na změny, může být také jiné rozdílné umístění senzorů přenosné meteostanice a stanice ČHMÚ (především rozdílné výškové umístění). Je také nutné podotknout, že teplota vzduchu a relativní vzdušná vlhkost jsou na stanici kvality ovzduší ČHMÚ měřeny doplňkově a data z těchto senzorů jsou tedy také zatížena chybou měření.

Atmosférický tlak

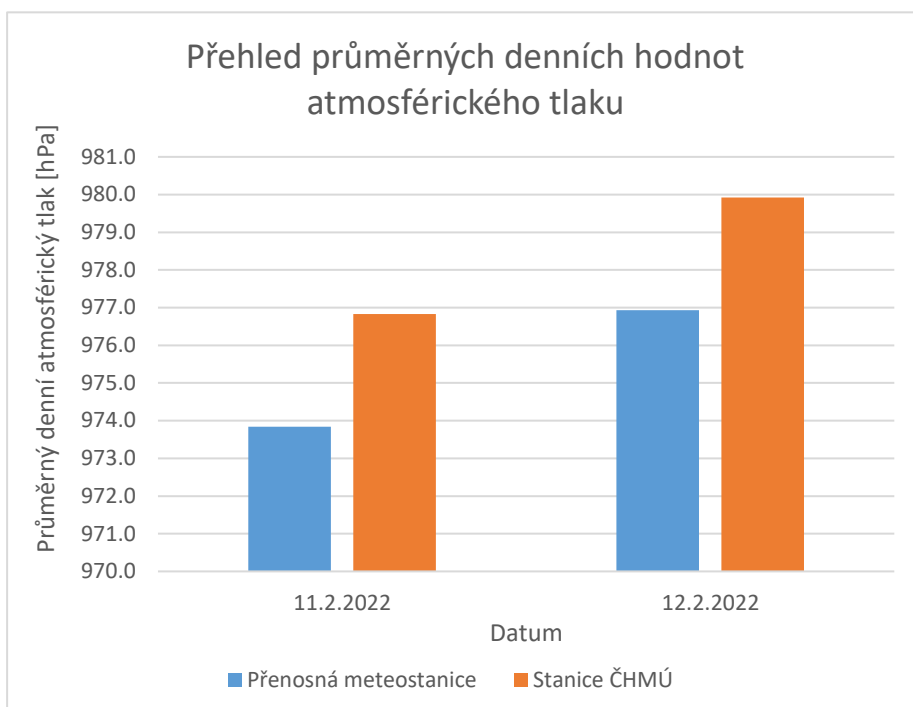
Porovnání měření atmosférického tlaku proběhlo za pomoci meteorologické stanice ČHMÚ v Č. Budějovicích (ul. Antala Staška). Pro porovnání byla umístěna přenosná meteostanice v blízkosti stanice ČHMÚ (vzdálenost přibližně 50 m) a ve stejné nadmořské výšce ± 2 m. Měření probíhalo mezi 8.3.2022 a 11.3.2022. Pro následné porovnání byly použity průběžně zveřejňované hodinové průměry na internetových stránkách ČHMÚ.



Graf 15: Časový průběh hodinových průměrů atmosférického tlaku z přenosné meteostanice a stanice ČHMÚ v Českých Budějovicích



Graf 16: Zjištěné rozdíly naměřených hodnot atmosférického tlaku z přenosné meteostanice a stanice ČHMÚ v Českých Budějovicích



Graf 17: Přehled zjištěných průměrných denních hodnot atmosférického tlaku z přenosné meteostanice a stanice ČHMÚ v Českých Budějovicích

Z předchozích grafů je patrné, že senzor tlaku měří v průměru o 3 hPa nižší atmosférický tlak než profesionální meteostanice ČHMÚ. Výrobce senzoru Hoperf HP206C uvádí přesnost měření $\pm 1,5$ hPa. Je tedy zřejmé, že zjištěné rozdíly jsou mimo tento rozsah. Na druhé straně však tento senzor velmi přesně kopíruje tvar křivky časového průběhu (viz graf č. 15) ze stanice ČHMÚ.

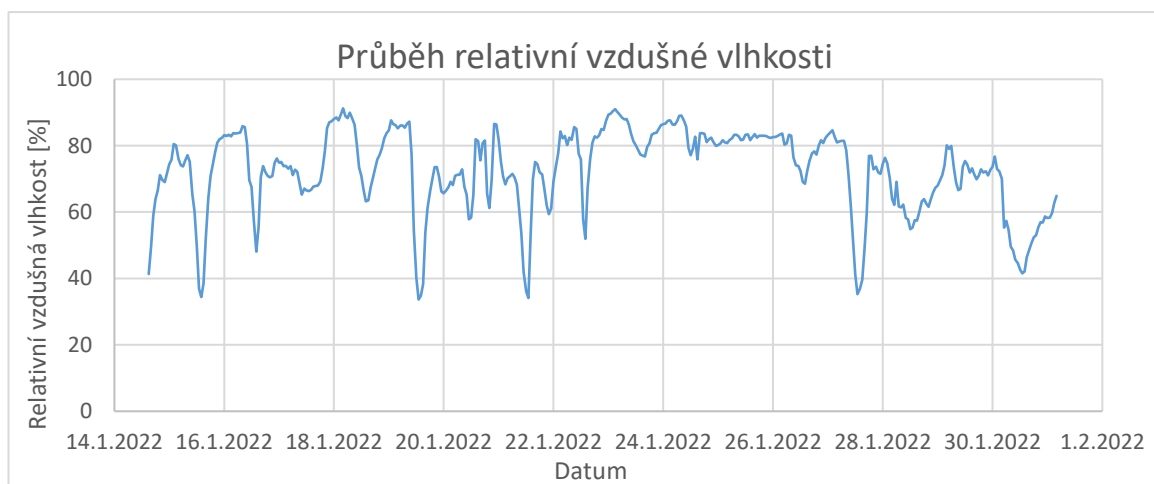
Z těchto důvodů byla provedena dodatečná kalibrace, kdy byl zjištěn průměrný rozdíl naměřených hodnot z obou stanic, který byl následně zanesen do programu přenosné meteostanice. Při takto kalibrovaném senzoru by zjištěné rozdíly mezi naměřenými hodnotami atmosférického tlaku z přenosné meteostanice a stanice ČHMÚ ležely v rozsahu $\pm 1,1$ hPa.

Shrnutí

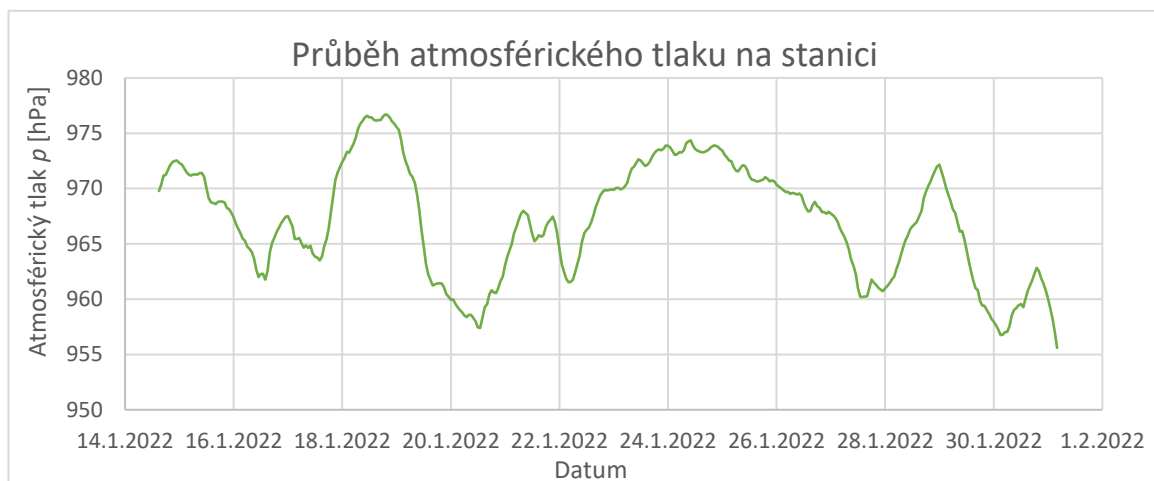
Během testovacího měření byla srovnána měřená data z přenosné meteostanice a stanic pod správou ČHMÚ. Z výsledků jsou patrné mírné rozdíly, které jsou většinou stále v rozsahu přesnosti udávaných čidel. Objevil se výraznější rozdíl při měření koncentrace suspendovaných částic $PM_{2,5}$ při deštivém počasí, kdy senzor Sensirion SPS30 měl tendenci měřit vyšší koncentrace prachových částic. Jinak však tento senzor měří v rámci odchylky dané výrobcem. Také senzor tlaku vykazoval v průměru o 3 hPa nižší hodnoty, než byly měřeny na stanici ČHMÚ. Proto byla provedena dodatečná kalibrace.

Při měření teploty vzduchu a relativní vzdušné vlhkosti se objevila nejasnost se setrvačností měřených hodnot při změně trendu. Vliv by na to mohla mít samotná konstrukce meteostanice, která by mohla omezovat výměnu vzduchu uvnitř radiačního krytu, a v případě teploty také tepelná kapacita samotné konstrukce, která díky tomu může se setrvačností ovlivňovat teplotu vzduchu uvnitř radiačního krytu. Také mohlo být měření ovlivněno rozdílnou polohou senzorů přenosné meteostanice a stanice ČHMÚ. V neposlední řadě jsou i naměřené hodnoty ze stanice ČHMÚ zatíženy nejistotou měření, a tím mohlo také dojít ke zvětšení případných zjištěných rozdílů mezi stanicemi.

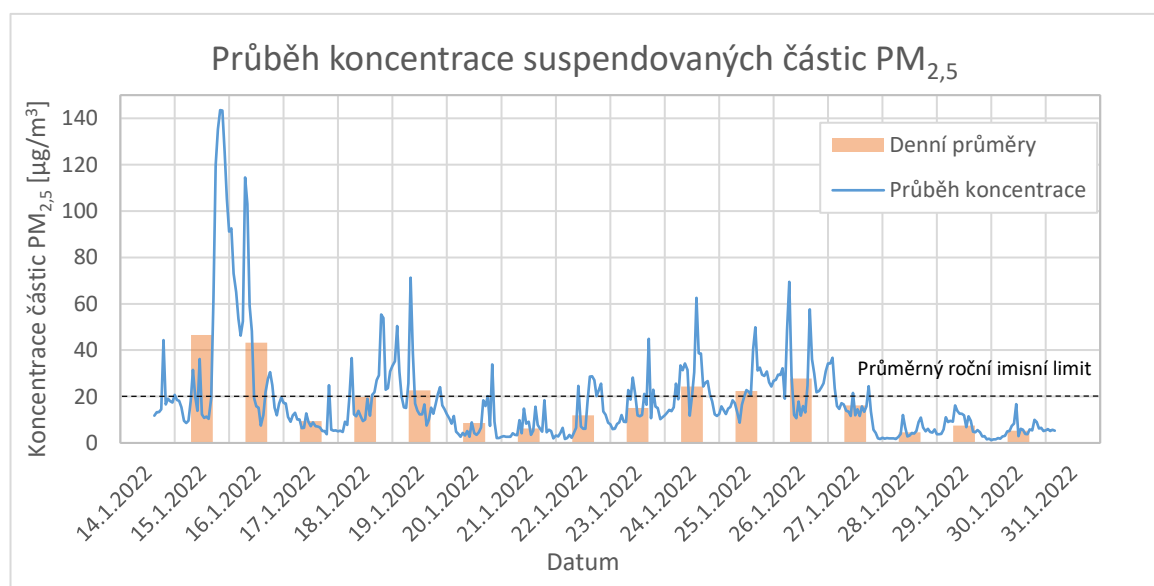
Celkově došlo k určitým nepřesnostem měření, ale žádné z nich nebyly výrazně nad odchylkami udávanými výrobcí senzorů (až na měření koncentrace prachových částic $PM_{2,5}$ při deštivém počasí). U měření relativní vzdušné vlhkosti byl také po provedeném porovnání upraven program meteostanice, který by měl zpřesnit měření při vyšší vlhkosti díky integrovanému ohřevu senzoru. Senzor tlaku byl dodatečně zkalibrován. Jinak je však citlivý a reaguje velmi rychle na změny tlaku, jež se projevují i při změně nadmořské výšky o desítky centimetrů.



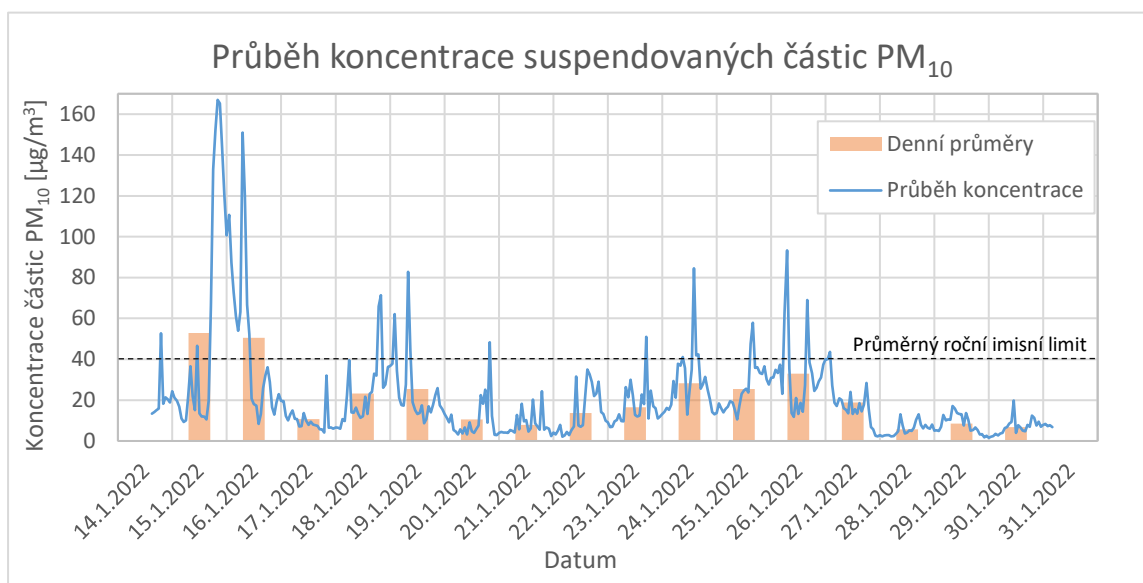
Graf 19: Časový průběh relativní vzdušné vlhkosti v Trhových Svinech od 14.1.2022 do 31.1.2022



Graf 20: Časový průběh atmosférického tlaku v Trhových Svinech od 14.1.2022 do 31.1.2022



Graf 21: Časový průběh koncentrace suspendovaných částic $PM_{2,5}$ včetně denních průměrů v Trhových Svinech od 14.1.2022 do 31.1.2022

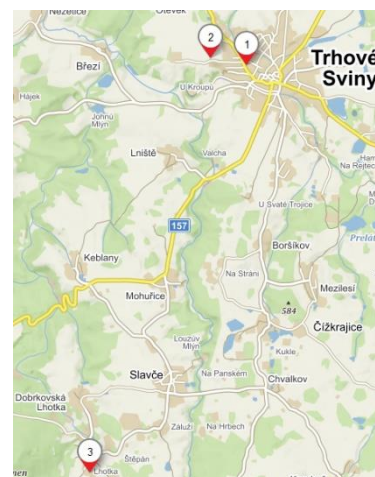


Graf 22: Časový průběh koncentrace suspendovaných částic PM₁₀ včetně denních průměrů v Trhových Svinech od 14.1.2022 do 31.1.2022

Během tohoto měření byla zaznamenána dvě překročení průměrného ročního imisního limitu pro suspendované částice PM₁₀ a šest překročení pro částice PM_{2,5}. Je nutné podotknout, že až na dvě překročení limitu u PM_{2,5} byla všechna ostatní překročení limitů v rozsahu nejistoty měření. Zvýšené hodnoty 15.1.2022 a 16.1.2022 byly patrně zapříčiněny kouřem z komínů, jelikož noc z 15.1. na 16.1. byla zaznamenána během tohoto měření jako nejchladnější. Některý z domů v okolí meteorostanice tedy mohl například přitápět kotlem na tuhá paliva, přičemž za vyšších teplot využívá jiné alternativy vytápění. Také stojí za povšimnutí nárůsty prachových částic během dne, kdy je vyšší dopravní provoz. To lze pozorovat na grafu č. 22, přičemž svislé čáry mřížky představují vždy půlnoc. Silniční doprava má tedy také vliv na koncentrace prachových částic v ovzduší.

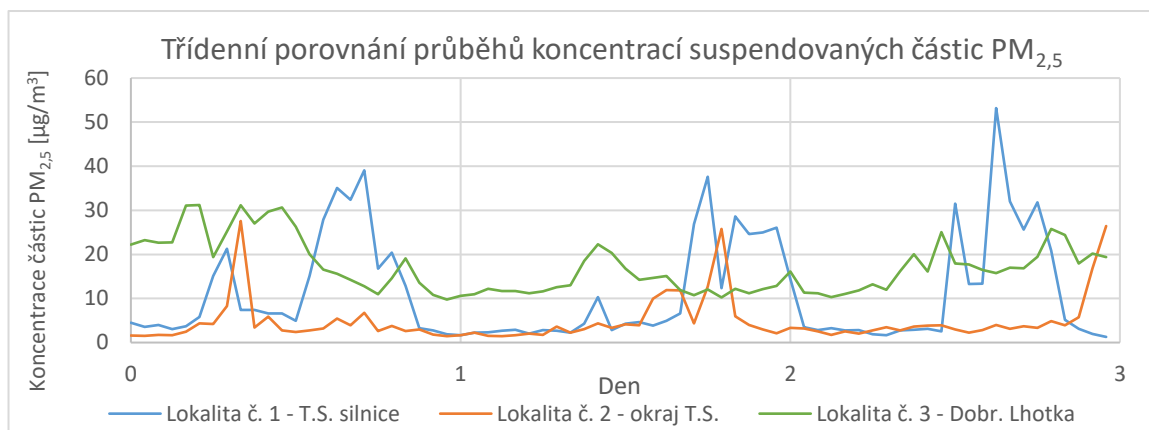
9.2 Porovnání: Město, okraj města, venkov

V tomto porovnání byl sledován rozdíl mezi naměřenými koncentracemi suspendovaných částic v lokalitě Trhové Sviny (u silnice II/156), Trhové Sviny (okraj města) a Dobrkovská Lhotka (vesnice v podhůří Slepčích hor). Místa jsou označena na mapě v tomto pořadí jako 1, 2 a 3. Vzdálenost mezi lokalitami č. 1 a 2 byla přibližně 400 m vzdušnou čarou. Měření v daných lokalitách byla prováděna vždy po dobu tří dnů. Z naměřených hodnot byly vypočteny denní průměry.

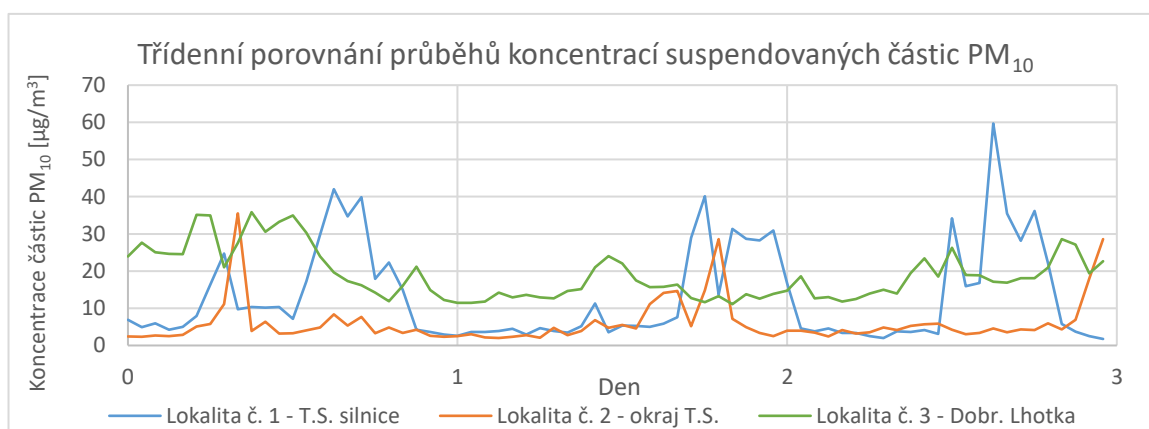


Obrázek 68: Mapa lokalit prvního porovnání [45]

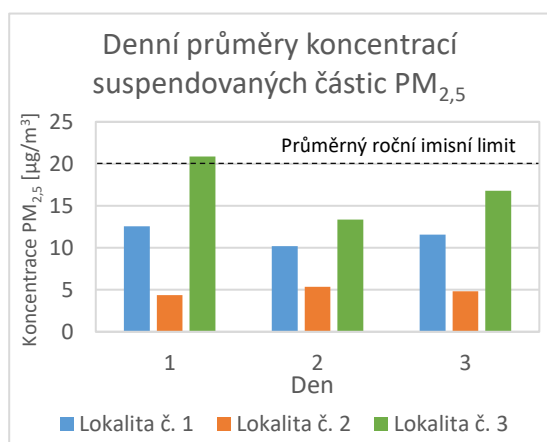
Během měření v lokalitě č. 1 a 2 panovaly podobné podmínky, kdy bylo jasné počasí, ale poměrně větrno. Během měření v lokalitě č. 3 bylo naopak oblačno, téměř bezvětří a řádově o 10 °C nižší teploty. Všechna tři měření proběhla během 14 dnů během přelomu února a března 2022.



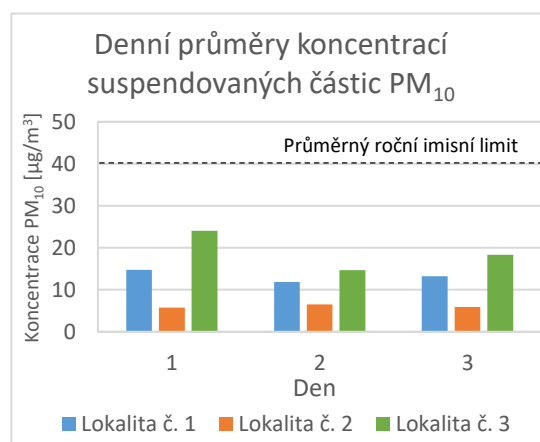
Graf 23: Porovnání časových průběhů koncentrací suspendovaných částic PM_{2,5} z jednotlivých lokalit



Graf 24: Porovnání časových průběhů koncentrací suspendovaných částic PM₁₀ z jednotlivých lokalit



Graf 25: Porovnání denních průměrů koncentrací prachových částic PM_{2,5} z jednotlivých lokalit



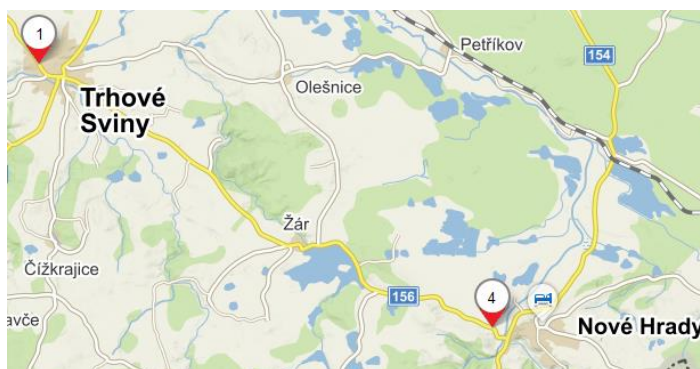
Graf 26: Porovnání denních průměrů koncentrací prachových částic PM₁₀ z jednotlivých lokalit

Výsledky měření dopadly přesně naopak, než bylo logicky předpokládáno. Na vesnici v podhůří Slepíčních hor byly naměřeny nejvyšší koncentrace suspendovaných částic. V Trhových Svinech u hlavní silnice byly naměřeny vyšší koncentrace částic než na okraji města, přičemž některé části časových průběhů měly podobné trendy růstu či poklesu koncentrací. Také je z průběhu v lokalitě č. 1 viditelné, že koncentrace suspendovaných částic začíná opravdu růst v ranních hodinách a následně klesá ve večerních. S tím bude zřejmě spojeno dopravní zatížení, případně vytápění domů kotly na tuhá paliva, která nejsou automatická. Lidé tedy začínají topit především po příjezdu ze zaměstnání v odpoledních hodinách. Na okraji Trhových Svinů byly naměřeny nejnižší koncentrace suspendovaných částic, a tedy má patrně vzdálenost od hlavní komunikace procházející městem značný vliv na míru znečištění ovzduší. Naměřené denní průměry koncentrací zde byly přibližně poloviční.

Vysoké koncentrace suspendovaných částic v lokalitě č. 3 lze patrně vysvětlit změnou počasí, kdy bylo bezvětrí a výrazně se ochladilo. Také mohl přispět větší podíl domů vytápěných kotly na tuhá paliva. Vesnice se navíc nachází mezi kopci a v kombinaci s bezvětrím mohla nastat v této lokalitě smogová situace. Aby se tedy naměřená data dala považovat za vypovídající, bylo by nutné sledovat koncentrace prachových částic po delší časový úsek, případně použít více přenosných meteostanic ve vícero lokalitách zároveň.

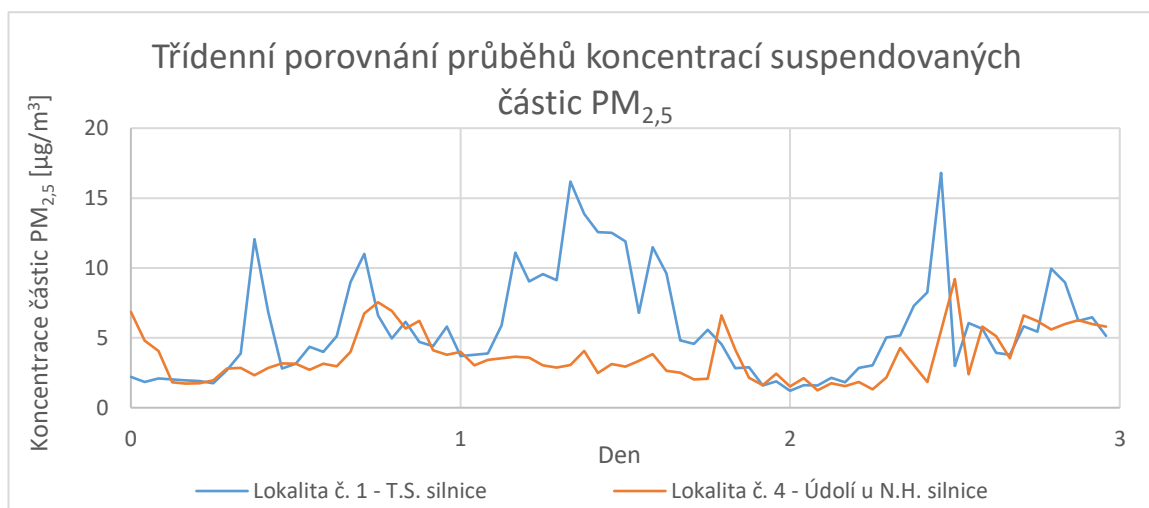
9.3 Porovnání lokalit v blízkosti silnice č. II/156: Město, okraj vesnice

Poslední porovnání dvou lokalit proběhlo u silnice č. II/156 v Trhových Svinech a v Údolí u Nových Hradů. Lokality jsou v tomto pořadí označeny v mapě jako č. 1 a 4. Měření v daných lokalitách byla prováděna vždy po dobu tří dnů. Z naměřených

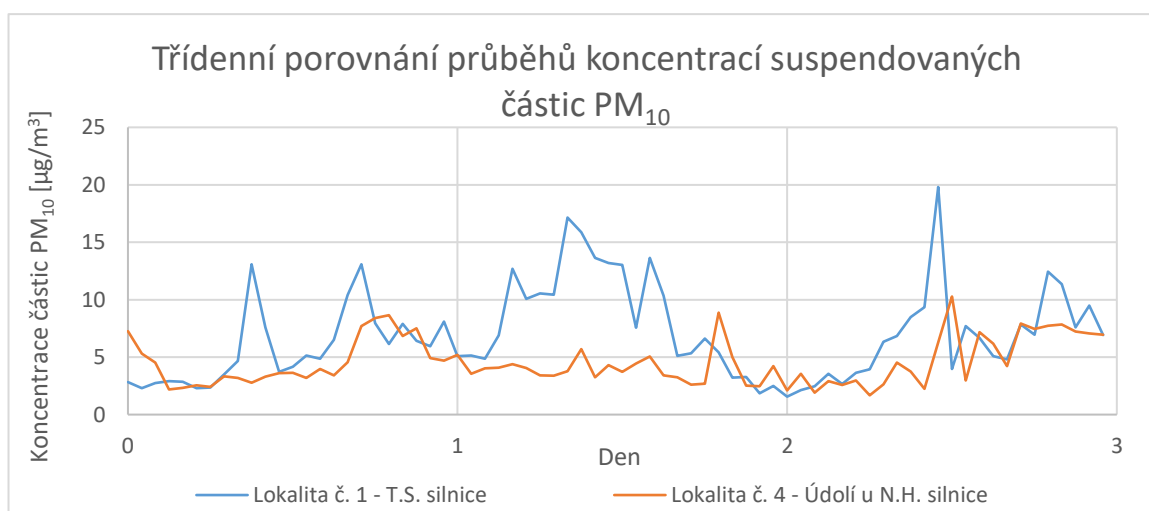


Obrázek 69: Mapa lokalit druhého srovnání [45]

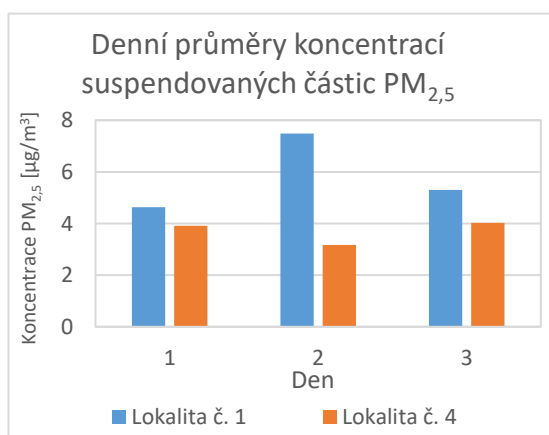
hodnot byly vypočteny denní průměry. Celé měření proběhlo během sedmi dnů na začátku února 2022, během kterých panovaly podobné klimatické podmínky – poměrně větrno s teplotami pohybujícími se lehce nad bodem mrazu.



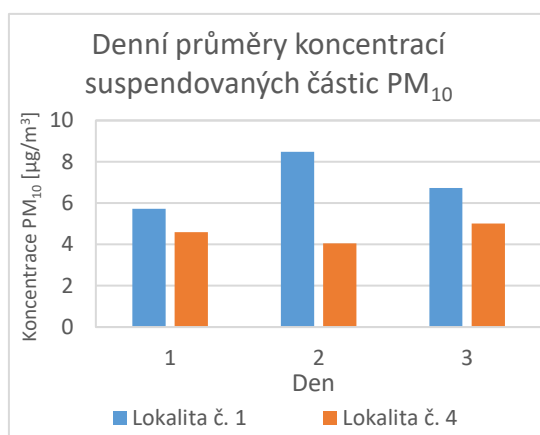
Graf 27: Porovnání časových průběhů koncentrací suspendovaných částic PM_{2,5} z lokalit blízko silnice č. II/156



Graf 28: Porovnání časových průběhů koncentrací suspendovaných částic PM₁₀ z lokalit blízko silnice č. II/156



Graf 29: Porovnání denních průměrů koncentrací prachových částic PM_{2,5} z lokalit blízko silnice č. II/156



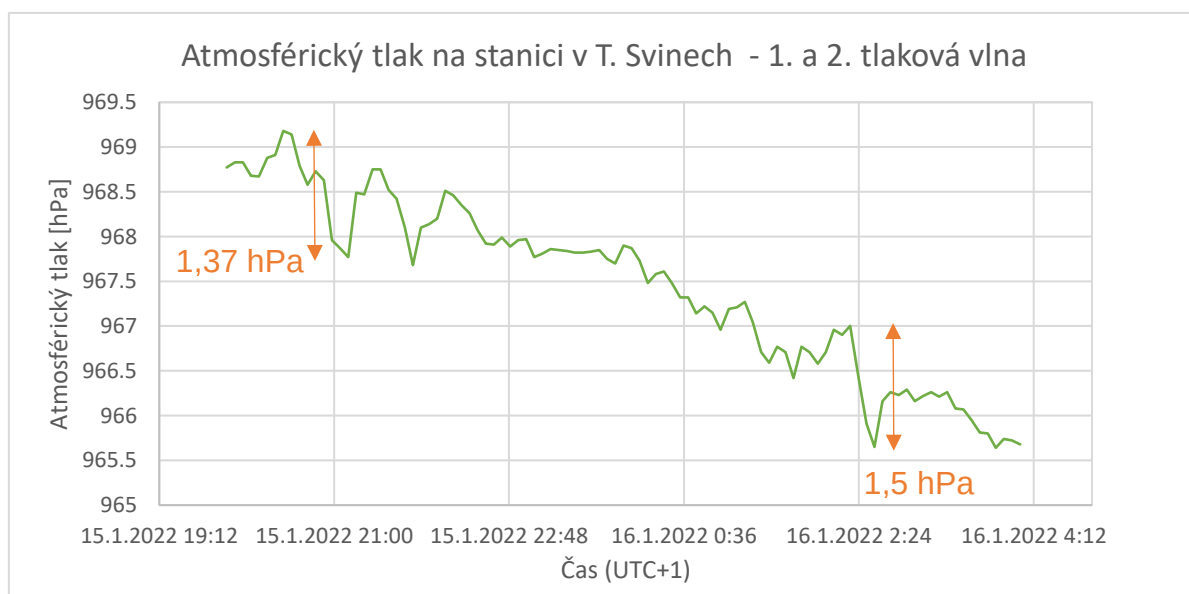
Graf 30: Porovnání denních průměrů koncentrací prachových částic PM₁₀ z lokalit blízko silnice č. II/156

Z naměřených hodnot je patrné, že v lokalitě č. 4 (vesnice Údolí u Nových Hradů) byly naměřeny nižší koncentrace suspendovaných částic než v lokalitě č. 1. Z průběhů v obou lokacích je taktéž patrné zvýšení koncentrací během dne, přičemž v noci se koncentrace snižují. V lokalitě č. 4 je nižší dopravní zatížení a nižší hustota zástavby než v lokalitě č. 1. Tím se případné částice mohou za pomoci větru lépe a rychleji rozptýlit do okolí. Vítr má patrně na rozptýlování prachových částic v ovzduší zásadní vliv, jelikož druhý den měření se v lokalitě č. 1 subjektivně snížila rychlost větru a v tento den bylo zaznamenáno největší znečištění ovzduší.

Ač bylo toto měření provedeno ve dnech, kdy panovalo podobné počasí, pro více vypovídající výsledky by však bylo zapotřebí provést déletrvající měření nebo využít dvou přenosných meteostanic, jelikož byly naměřeny poměrně nízké koncentrace suspendovaných částic, což bylo patrné dáno zvýšenou rychlostí větru.

9.4 Tlaková vlna po výbuchu sopky v Tichomoří

Během dlouhodobého měření v Trhových Svinech došlo k výbuchu vulkánu Hunga Tonga-Hunga Ha'apai u Nového Zélandu, která je od ČR vzdálená asi 17000 km. Tlaková vlna obíhající Zemí byla několikrát zaznamenána i na území ČR. První tři tlakové vlny byly také jednoznačně zachyceny i přenosnou meteostanicí. Další vlny však již nebyly prokazatelně rozeznatelné. Níže jsou uvedeny zachycené nárůsty a poklesy atmosférického tlaku zaznamenané pomocí přenosné meteostanice a jejich porovnání se záznamem tlakové vlny ze stanice ČHMÚ v Praze (Libuši).



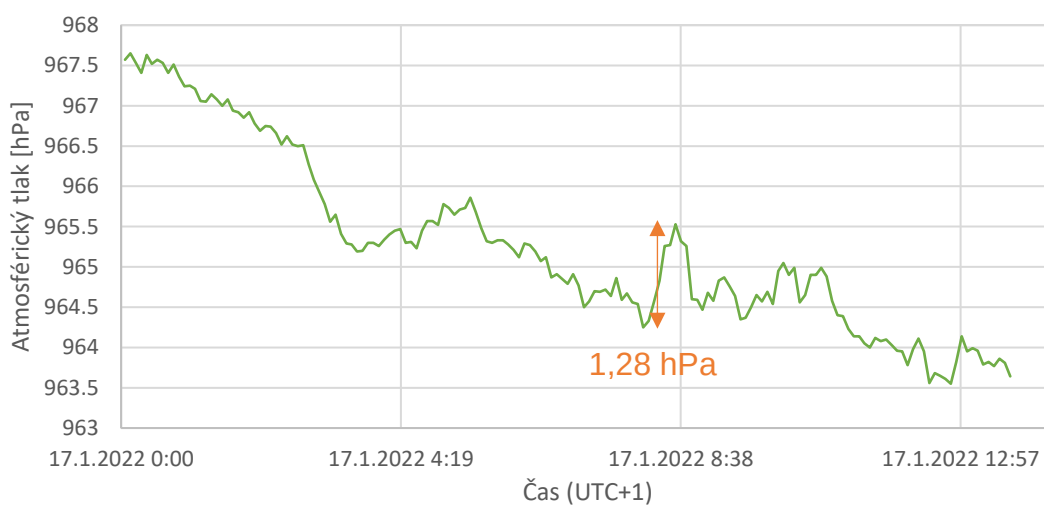
Graf 31: Časový průběh atmosférického tlaku v Trhových Svinech a zachycení 1. a 2. tlakové vlny po výbuchu sopky

Tlak změřený v Praze (Libuši) přepočtený na hladinu moře 15. – 16. 1. 2022



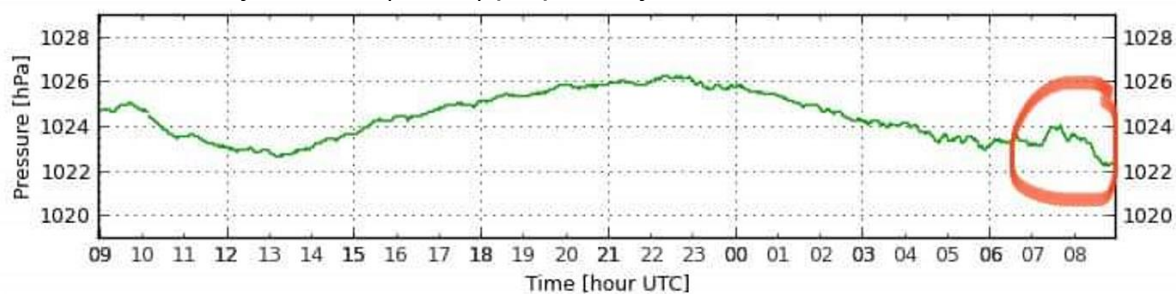
Graf 32: Časový průběh atmosférického tlaku ze stanice ČHMÚ v Praze a zachycení 1. a 2. tlakové vlny [46]

Atmosférický tlak na stanici v T. Svinech - 3. tlaková vlna



Graf 33: Časový průběh atmosférického tlaku v Trhových Svinech a zachycení 3. tlakové vlny po výbuchu sopky

Tlak změřený v Praze (Libuši) přepočtený na hladinu moře 16. – 17. 1. 2022



Graf 34: Časový průběh atmosférického tlaku ze stanice ČHMÚ v Praze a zachycení 3. tlakové vlny [47]

Je potřeba upozornit, že zveřejněné grafy ČHMÚ jsou o hodinu posunuté, jelikož používají Greenwichský čas. Tato zjištěná zajímavost, která se vyskytla během dlouhodobého měření v T. Svinech, vypovídá o citlivosti senzoru tlaku.

10 Diskuze výsledků měření

Při srovnávání měřených meteorologických veličin a koncentrace prachových částic v ovzduší si dle mého názoru realizovaná meteostanice nevedla špatně. Největší odchylky byly naměřeny při měření atmosférického tlaku, což se podařilo potlačit dodatečnou kalibrací. Taktéž senzor relativní vzdušné vlhkosti měl tendenci k pomalé reakci na zvyšování vlhkosti vzduchu. U tohoto senzoru byl tedy prodloužen proces ohřevu senzoru, který má zvýšit přesnost měření. Jinak však byly zjištěné odchylky měření meteorologických veličin až na výjimky v rámci tolerance udávaných výrobcí. Je nutné podotknout, že teplota vzduchu a relativní vzdušná vlhkost byla měřena na stanici kvality ovzduší ČHMÚ, která tyto veličiny měří doplňkově a jsou tedy také značně zatíženy nejistotou měření.

Samotný optický snímač koncentrace suspendovaných částic Sensirion SPS30 se poměrně osvědčil. Vzhledem ke své velikosti a relativně nízké ceně oproti například radiometrické metodě, kterou využívá ČHMÚ, zaznamenal srovnatelné výsledky. Přesněji detekoval koncentrace částic PM_{10} , kde většina odchylek byla v rozsahu $\pm 7 \mu\text{g}/\text{m}^3$, přičemž přesnost udávaná výrobcem činí $\pm 25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (to platí pro částice PM_{10} do koncentrace $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Největší zaznamenaný rozdíl v denních průměrech, který se sleduje z důvodu stanovených imisních limitů, činil $2,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Senzor při měření koncentrace menších částic $PM_{2,5}$ měl tendence měřit především vyšší koncentrace, které však až na výjimky ležely v rozsahu $\pm 7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ od hodnot ze stanice ČHMÚ. Zlom však nastal v posledních 35 hodinách, které byly převážně deštivé. Zde senzor zaznamenával při porovnání největší odchylky, které již ležely mimo rozsah přesnosti udávaný výrobcem, který činí $\pm 10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (to platí pro částice $PM_{2,5}$ do koncentrace $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Jelikož byly měřené hodnoty koncentrací vyšší, senzor tedy patrně detekoval malé částičky vody ve vzduchu. Stanice ČHMÚ k tomuto účelu využívá odlučovač kapiček vody ze vzduchu. I přesto však největší zjištěný rozdíl denního průměru koncentrace suspendovaných částic činil $4,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Navíc je třeba zmínit, že i měření koncentrace suspendovaných částic na stanici kvality ovzduší je zatíženo chybou měření. Rozšířená nejistota měření je dle ČHMÚ 17 % z naměřené hodnoty pro částice PM_{10} a 20 % pro částice $PM_{2,5}$.

Pro sledování denních průměrů koncentrací suspendovaných částic lze označit vybraný senzor jako dostačující. Má však jisté slabiny, které je nutné mít na paměti. Jedná se především o možnost detekce velmi malých kapiček vody (například při mlze či deštivém počasí), které negativně ovlivňují měření. Senzor jako takový je spíše vhodný pro vnitřní použití, protože v něm může například zkondenzovat vzdušná vlhkost, pokud klesne teplota okolí pod teplotu

rovného bodu. Na stanici ČHMÚ provádí předehřev vzduchu, aby tomuto jevu předcházeli. Využití by tedy mohl nalézt například ve ventilačním systému, kde by se na základě detekované koncentrace provádělo větrání objektu. Na druhou stranu mě však senzor během porovnání příjemně překvapil a na základní zjištění znečištění ovzduší v dané lokalitě plně dostačuje. Což je i smyslem realizované přenosné meteostanice.

Vlastní prováděná měření se orientovala na případný rozdíl koncentrací prachových částic v různých lokalitách. Došlo k porovnání čtyř lokací: Trhové Sviny v blízkosti silnice II/156, okraj města Trhové Sviny, vesnice Dobrkovská Lhotka v podhůří Slepíčních hor a vesnice Údolí u Nových Hradů v blízkosti silnice II/156.

Byl očekáván výrazný rozdíl v koncentracích mezi městem a venkovem. Nicméně k tomuto závěru nebylo dospěno. Na vesnici byly naměřeny vyšší koncentrace suspendovaných částic. Během měření na vesnici totiž panovalo chladnější a oblačné počasí doprovázené bezvětrím. Tato kombinace mohla způsobit mírně smogovou situaci v této lokalitě, jelikož na vesnicích je stále patrně využíváno vytápění kotli na tuhá paliva. Spaliny se tedy patrně kumulovaly ve vzduchu, a proto bylo zjištěno vyšší znečištění ovzduší. Právě rychlost větru (dle získaných zkušeností) hraje asi největší roli v množství prachových částic ve vzduchu. Čím větší rychlost vzduchu, tím se výrazně snižují koncentrace prachových částic v ovzduší. Na okraji města Trhové Sviny a v Údolí u N. Hradů v blízkosti komunikace II/156 byly naměřeny nižší koncentrace než v Trhových Svinech u komunikace II/156, která je ze všech lokalit nejvíce dopravně vytižená. Z průběhů koncentrací částic během dne byl vysledován trend nárůstu a poklesu koncentrace v závislosti na dopravní špičce a návratem lidí domů ze zaměstnání. Tyto krátkodobé nárůsty koncentrací se projeví především v lokalitě T. Sviny u silnice II/156, kde se zvyšovaly koncentrace až trojnásobně.

Tímto měřením byl tedy zjištěn značný vliv dopravy na kvalitu ovzduší, avšak pro více vypovídající závěry by bylo nutné provést déletrvající měření nebo nejlépe využít více přenosných meteostanic, které by zajistily stejné podmínky pro následné porovnání. Což byl problém při měření na vesnici, kde pravděpodobně vlivem výrazné změny počasí došlo ke zvýšení počtu částic v ovzduší.

Během měření byl také ověřen případný vliv FV panelu na měřenou teplotu vzduchu. Dle výsledků k ovlivňování teploty uvnitř radiačního krytu nedochází.

11 Závěr

Cílem této práce byl návrh a realizace mobilní meteostanice, která je zaměřena na měření koncentrace prachových částic v ovzduší. Kromě kvality ovzduší navíc meteostanice měří teplotu vzduchu, relativní vzdušnou vlhkost a atmosférický tlak. Meteostanice je napájena za pomoci Li-Ion akumulátoru s kapacitou 26400 mAh, který dle měření postačuje k provozu stanice po dobu 48 dnů (při pětiminutovém intervalu měření). Pro rozšíření doby provozu byl na střechu meteostanice umístěn fotovoltaický panel o jmenovitém výkonu 2 W, který dokáže za vhodných podmínek meteostanici dobíjet, takže meteostanice dokáže být v provozu prakticky nepřetržitě. Naměřená data se ukládají jednak na paměťovou kartu, ale zároveň jsou odesílána na internet (na platformu ThingSpeak), aby měla obsluha meteostanice přístup k aktuálním hodnotám odkudkoliv. Systém meteostanice byl navíc rozšířen o praktické funkce usnadňující obsluhu, jako například možnost konfigurace intervalu měření a vypínání případného odesílání dat na internet pomocí konfiguračního souboru uloženého na paměťové kartě. Na tu jsou ukládány také případné kódy chyb, které mohou nastat během provozu meteostanice, a slouží jako zpětná vazba pro obsluhu.

Značné úsilí bylo vynaloženo na návrh a výrobu samotné konstrukce meteostanice, která byla vyrobena za pomoci 3D tisku. Dále pak podstatnou část práce tvořilo období zabývající se výběrem jednotlivých komponent a následně samotný proces programování řídicí desky. Jako řídicí jednotka meteostanice byl použit mikrokontrolér ESP32. Následovala testovací fáze, kdy byla zkoušena odolnost meteostanice proti vniknutí vody, doba provozu na akumulátor a systém dobíjení za pomoci FV panelu. Poté bylo s meteostanicí provedeno srovnávací měření se stanicemi ČHMÚ. Na závěr práce pak byla provedena tři vlastní měření s porovnáním koncentrací suspendovaných částic v různých lokalitách.

Během realizace samotné meteostanice činil největší problémy komunikační GSM/GPRS modul, jehož odebírané špičkové proudy mohou činit až 2 A, a který je celkově náchylný na pokles napětí, který způsobuje restart tohoto modulu. Tento problém se vyskytoval během testování, kde byl použit relativně měkký zdroj napětí. Avšak použitý zdroj napětí s 12 paralelně spojenými Li-Ion články tento problém vyřešil.

Možnou oblastí, kde by bylo možné přenosnou meteostanici vylepšit, je určování zeměpisných souřadnic, na kterých se stanice nachází. Tím by se zpřehlednila ukládaná data například během přesouvání meteostanice. GSM/GPRS modul umožňuje získání polohy pomocí metody triangulace, ale v praxi se tato metoda ukázala jako značně nepřesná a bylo

od ní upuštěno. Meteostanice by se však dala rozšířit o systém GPS, který by kvůli úspoře energie mohl zjišťovat přesnou polohu například v hodinových intervalech.

Výsledkem této práce je funkční přenosná meteostanice, která splňuje zadané cíle práce. Uplatnění, díky své kompaktnosti, může nalézt kdekoliv, kde je vhodné orientačně monitorovat stav kvality ovzduší a vyhledávat tak případné lokace, kde by se mělo provádět soustavné měření kvality ovzduší z důvodu dodržování imisních limitů. Je však zapotřebí nezapomínat na omezené možnosti spojené s umístěním meteostanice. Pokud by například byla meteostanice umístěna na střeše bytového domu, bude ovlivněno měření teploty, které se správně provádí 2 metry nad povrchem. Vždy je tedy při vyhodnocování výsledků měření zapotřebí brát v potaz umístění meteostanice v prostoru a případné vlivy okolí.

Seznam obrázků

Obrázek 1: Meteorologická budka [43]	5
Obrázek 2: Radiační kryt	5
Obrázek 3: Porovnání velikostí suspendovaných částic s lidským vlasem [37]	7
Obrázek 4: Porovnání průniku suspendovaných částic o různých velikostech do dýchacích cest [6]	8
Obrázek 5: Chemické složení prachových částic ve městské zástavbě [7]	9
Obrázek 6: Blokové schéma konceptuálního modelu	11
Obrázek 7: Vývojová deska Arduino Nano	18
Obrázek 8: Vývojová deska NodeMCU ESP32 (vlevo), Wemos D1 mini s ESP8266 (vpravo)	18
Obrázek 9: Vývojová deska RaspberryPi Pico	19
Obrázek 10: Pokrytí ČR sítí Sigfox [18]	20
Obrázek 11: Pokrytí ČR sítí LoRaWAN od CRA (2019) [17]	21
Obrázek 12: Pokrytí ČR sítí NB-IoT od Vodafone [17]	21
Obrázek 13: Prostředí programu Solidworks	24
Obrázek 14: Prostředí programu PrusaSlicer	25
Obrázek 15: Prostředí programu Arduino IDE	26
Obrázek 16: Koncept konstrukce č. 1	27
Obrázek 17: Koncept konstrukce č. 2	27
Obrázek 18: Koncept konstrukce č. 3	28
Obrázek 19: 3D pohled navržené konstrukce meteostanice	29
Obrázek 20: Přední pohled konstruované meteostanice	29
Obrázek 21: Boční pohled konstruované meteostanice	29
Obrázek 22: Řez navrhovanou konstrukcí přenosné meteostanice	30
Obrázek 23: Simulace proudění vzduchu radiačním krytem ve směru osy x rychlostí 1 m/s (přítok vzduchu zprava)	31
Obrázek 24: Simulace proudění vzduchu radiačním krytem ve směru osy y rychlostí 1 m/s (přítok vzduchu zleva)	32
Obrázek 25: Přehled všech vytištěných částí konstrukce meteostanice	34
Obrázek 26: Hlavní části složené konstrukce meteostanice	35
Obrázek 27: Modul měření teploty a vlhkosti pomocí senzoru Sensirion SHT35	36
Obrázek 28: Schéma měření pomocí technologie band-gap [30]	36

Obrázek 29: Závislost přesnosti měření teploty pomocí SHT35 v celém měřeném rozsahu [29]	37
Obrázek 30: Princip kapacitního měření vlhkosti [38]	37
Obrázek 31: Závislost přesnosti měření relativní vzdušné vlhkosti pomocí SHT35 v celém měřeném rozsahu [29]	37
Obrázek 32: Modul měření atmosférického tlaku senzorem Hoperf HP206C	38
Obrázek 33: Senzor koncentrace prachových částic Sensirion SPS30	38
Obrázek 34: Princip detekce prachových částic senzorem Sensirion SPS30 [34]	39
Obrázek 35: Analýza signálu z fotodiody a jeho význam pro určení koncentrace suspendovaných částic, upraveno z [35]	39
Obrázek 36: Rozložený senzor prachových částic Sensirion SPS30 [39]	41
Obrázek 37: LilyGO TTGO T-Call – spodní strana	42
Obrázek 38: Řídicí deska LilyGO TTGO T-Call s čipem ESP32 a komunikačním modulem SIM800L	42
Obrázek 39: Modul microSD karty	42
Obrázek 40: Li-Ion články	43
Obrázek 41: Solární regulátor DFRobot - Solar Power Manager 5V V1.1 (DFR0559)	44
Obrázek 42: Napěťový dělič	45
Obrázek 43: Návrh zapojení elektronických komponent	46
Obrázek 44: První testovací prototyp meteostanice	46
Obrázek 45: Elektrické schéma zapojení meteostanice	47
Obrázek 46: Grafická předloha (schéma) plošného spoje	48
Obrázek 47: Funkční diagram programu meteostanice	49
Obrázek 48: Ukázka zdrojového kódu funkce pro zjištění času přes GSM síť (zkráceno) ...	51
Obrázek 49: Ukázka zdrojového kódu měření teploty a relativní vlhkosti	52
Obrázek 50: Ukázka zdrojového kódu měření koncentrací suspendovaných částic (zkráceno)	53
Obrázek 51: Ukázka zdrojového kódu měření tlaku	54
Obrázek 52: Výroba plošného spoje	54
Obrázek 53: Instalace FV panelu a tepelná izolace střechy meteostanice	55
Obrázek 54: Instalace senzorů na držák	55
Obrázek 55: Instalace elektroniky do spodního boxu meteostanice (vlevo) a detail plošného spoje s řídicí deskou (vpravo)	55
Obrázek 56: Sestavení přenosné meteostanice	56

Obrázek 57: Kompletní zhotovená mobilní meteostanice.....	56
Obrázek 58: Koncepce platformy ThingSpeak [38].....	58
Obrázek 59: Zkušební zařízení pro krytí IPX3 pomocí trubičky dle IEC 60529 (rozměry v milimetrech), převzato z [39]	60
Obrázek 60: Zkušební zařízení pro krytí IPX3 pomocí trysky dle IEC 60529 (rozměry v milimetrech), převzato z [39]	61
Obrázek 61: Fotografie z vlastního testování voděodolnosti meteostanice	61
Obrázek 62: Výsledek provedeného testu voděodolnosti, držák pro snímače (vlevo) a box pro elektroniku (vpravo)	62
Obrázek 63: Ukázka živých dat na platformě ThingSpeak č.1	66
Obrázek 64: Ukázka živých dat na platformě ThingSpeak č.2	67
Obrázek 65: Stanice měření kvality ovzduší v Českých Budějovicích (Nerudova ulice).....	68
Obrázek 66: Vnitřní uspořádání měřicího zařízení Envea MP101M (fotografie pořízena ve spolupráci s ČHMÚ).....	68
Obrázek 67: Lokalita prvního měření – Trhové Sviny [45]	81
Obrázek 68: Mapa lokalit prvního porovnání [45]	83
Obrázek 69: Mapa lokalit druhého srovnání [45].....	85

Seznam tabulek

Tabulka 1: Seznam používaných zkratk	3
Tabulka 2: Přehled parametrů vybraných vývojových desek [15] [16]	19
Tabulka 3: Porovnání konceptů konstrukce meteostanice	28
Tabulka 4: Porovnání vybraných materiálů pro výrobu konstrukce meteostanice [28].....	34
Tabulka 5: Přesnosti měření senzoru prachových částic Sensirion SPS30 udávané výrobcem [33]	40
Tabulka 6: Přehled a význam stupně krytí IP - ochrana před vniknutím cizích těles a ochrana	59
Tabulka 7: Přehled a význam stupně krytí IP - ochrana před vniknutím [39]	59
Tabulka 8: Přehled odebíraných proudů v různých režimech meteostanice	63

Seznam grafů

Graf 1: Průběh napětí akumulátoru bez dobíjení po dobu 17 dní	64
Graf 2: Průběh napětí akumulátoru s dobíjením pomocí instalovaného FV panelu	65
Graf 3: Časový průběh průměrné hodinové koncentrace suspendovaných částic PM_{10} z přenosné meteostanice a stanice ČHMÚ v Českých Budějovicích	69
Graf 4: Zjištěné rozdíly naměřených koncentrací suspendovaných částic PM_{10} z přenosné meteostanice a stanice ČHMÚ v Českých Budějovicích	69
Graf 5: Přehled zjištěných průměrných denních koncentrací suspendovaných částic PM_{10} z přenosné meteostanice a stanice ČHMÚ v Českých Budějovicích	70
Graf 6: Časový průběh průměrné hodinové koncentrace suspendovaných částic $PM_{2,5}$ z přenosné meteostanice a stanice ČHMÚ v Českých Budějovicích	71
Graf 7: Zjištěné rozdíly naměřených koncentrací suspendovaných částic $PM_{2,5}$ z přenosné meteostanice a stanice ČHMÚ v Českých Budějovicích	71
Graf 8: Přehled zjištěných průměrných denních koncentrací suspendovaných částic $PM_{2,5}$ z přenosné meteostanice a stanice ČHMÚ v Českých Budějovicích	72
Graf 9: Časový průběh průměrné hodinové teploty vzduchu z přenosné meteostanice a stanice ČHMÚ v Českých Budějovicích	74
Graf 10: Zjištěné rozdíly naměřených teplot vzduchu z přenosné meteostanice a stanice ČHMÚ v Českých Budějovicích	74
Graf 11: Přehled zjištěných průměrných denních teplot vzduchu z přenosné meteostanice a stanice ČHMÚ v Českých Budějovicích	75
Graf 12: Časový průběh průměrné hodinové relativní vlhkosti vzduchu z přenosné meteostanice a stanice ČHMÚ v Českých Budějovicích	76
Graf 13: Zjištěné rozdíly naměřených relativních vlhkostí vzduchu z přenosné meteostanice a stanice ČHMÚ v Českých Budějovicích	76
Graf 14: Přehled zjištěných průměrných denních relativních vlhkostí vzduchu z přenosné meteostanice a stanice ČHMÚ v Českých Budějovicích	77
Graf 15: Časový průběh hodinových průměrů atmosférického tlaku z přenosné meteostanice a stanice ČHMÚ v Českých Budějovicích	78
Graf 16: Zjištěné rozdíly naměřených hodnot atmosférického tlaku z přenosné meteostanice a stanice ČHMÚ v Českých Budějovicích	78
Graf 17: Přehled zjištěných průměrných denních hodnot atmosférického tlaku z přenosné meteostanice a stanice ČHMÚ v Českých Budějovicích	79
Graf 18: Časový průběh teploty vzduchu v Trhových Svinech od 14.1.2022 do 31.1.2022 .	81

Graf 19: Časový průběh relativní vzdušné vlhkosti v Trhových Svinech od 14.1.2022 do 31.1.2022	82
Graf 20: Časový průběh atmosférického tlaku v Trhových Svinech od 14.1.2022 do 31.1.2022	82
Graf 21: Časový průběh koncentrace suspendovaných částic $PM_{2,5}$ včetně denních průměrů v Trhových Svinech od 14.1.2022 do 31.1.2022	82
Graf 22: Časový průběh koncentrace suspendovaných částic PM_{10} včetně denních průměrů v Trhových Svinech od 14.1.2022 do 31.1.2022	83
Graf 23: Porovnání časových průběhů koncentrací suspendovaných částic $PM_{2,5}$ z jednotlivých lokalit	84
Graf 24: Porovnání časových průběhů koncentrací suspendovaných částic PM_{10} z jednotlivých lokalit	84
Graf 25: Porovnání denních průměrů koncentrací prachových částic $PM_{2,5}$ z jednotlivých lokalit	84
Graf 26: Porovnání denních průměrů koncentrací prachových částic PM_{10} z jednotlivých lokalit	84
Graf 27: Porovnání časových průběhů koncentrací suspendovaných částic $PM_{2,5}$ z lokalit blízko silnice č. II/156	86
Graf 28: Porovnání časových průběhů koncentrací suspendovaných částic PM_{10} z lokalit blízko silnice č. II/156	86
Graf 29: Porovnání denních průměrů koncentrací prachových částic $PM_{2,5}$ z lokalit blízko silnice č. II/156	86
Graf 30: Porovnání denních průměrů koncentrací prachových částic PM_{10} z lokalit blízko silnice č. II/156	86
Graf 31: Časový průběh atmosférického tlaku v Trhových Svinech a zachycení 1. a 2. tlakové vlny po výbuchu sopky	87
Graf 32: Časový průběh atmosférického tlaku ze stanice ČHMÚ v Praze a zachycení 1. a 2. tlakové vlny [46]	88
Graf 33: Časový průběh atmosférického tlaku v Trhových Svinech a zachycení 3. tlakové vlny po výbuchu sopky	88
Graf 34: Časový průběh atmosférického tlaku ze stanice ČHMÚ v Praze a zachycení 3. tlakové vlny [47]	88

Bibliografie

- [1] RUDA, Aleš Ruda. *Klimatologie a hydrogeografie pro učitele* [online]. 2014. Brno: Pedagogická fakulta Masarykovy univerzity, 2014 [cit. 2022-02-03]. ISSN 1802-128X. Dostupné z: https://is.muni.cz/do/rect/el/estud/pedf/ps14/fyz_geogr/web/skripta/klimatologie_hydrogeografie.pdf
- [2] AUGUSTIN, Stanislav. *Pokročilá meteostanice s přenosem obrazu* [online]. Brno, 2015 [cit. 2022-02-03]. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/38806/final-thesis.pdf?sequence=11&isAllowed=y>. Diplomová práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Aleš Povalač.
- [3] BOLTON, David. The Computation of Equivalent Potential Temperature. *Monthly Weather Review*. 1980, 1046–1053. Dostupné z: doi:[https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1980\)108<1046:TCOEPT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1980)108<1046:TCOEPT>2.0.CO;2)
- [4] VYSOUDIL, Miroslav. *Základy fyzické geografie 1: Meteorologie a klimatologie*. 1. vydání. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2013. ISBN 978-80-244-3892-4.
- [5] BRZEZINA, Jáchym. Suspendované částice (PM) – otázky a odpovědi. *Blog o meteorologii, hydrologii a kvalitě ovzduší* [online]. Brno, 2017 [cit. 2022-02-04]. Dostupné z: <https://chmibrno.org/blog/2018/12/01/suspendovane-castice-pm-otazky-a-odpovedi/>
- [6] *SLEDOVÁNÍ KVALITY VNITŘNÍHO PROSTŘEDÍ V BYTECH* [online]. Praha, 2020 [cit. 2022-02-04]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/89800/F2-DP-2020-Petr-Matyas-Sledovani%20kvality%20vnitrniho%20prostredi%20v%20bytech.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní. Vedoucí práce Pavel Vybíral.
- [7] Suspendované částice. In: *Český hydrometeorologický ústav* [online]. [cit. 2022-02-04]. Dostupné z:

https://www.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/om/weather_links/Pocasi/Navody/Znecis-teni/susp_castice.pdf

- [8] Snímače teploty. *Jan Klepárník - WEB podpora výuky* [online]. Brno [cit. 2022-02-06]. Dostupné z: http://user.mendelu.cz/xklepar0/fls/sn_teploty.htm
- [9] Vlhkoměry. *Vyvoj.hw.cz* [online]. 2004 [cit. 2022-02-07]. Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz/teorie-a-praxe/dokumentace/vlhkomery.html-0>
- [10] SMETANA, Vojtěch. *Čidla vlhkosti a detektory sněhu* [online]. Plzeň, 2012 [cit. 2022-02-07]. Dostupné z: https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/4040/1/BP_Smetana_Vojtech.pdf. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Zuzana Petránková.
- [11] BEDNÁŘ, Jan. *Meteorologie: [úvod do studia dějů v zemské atmosféře]*. Vyd. 1. Praha: Portál, 2003. ISBN 80-717-8653-5.
- [12] KMÍNEK, Miloš. Měření tlaku. *MĚŘICÍ A ŘÍDICÍ TECHNIKA* [online]. Praha, 2005 [cit. 2022-02-07]. Dostupné z: <http://uprt.vscht.cz/kminekm/mrt/F4/F4-ram.htm>
- [13] SERBOUSEK, Antonín. *Přístrojová technika pro měření čistoty ovzduší*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 1992. ISBN 80-707-8136-X.
- [14] KELEMEN, Michal. Meranie koncentrácie prachu v prostredí. *Automa: Časopis pro automatizační techniku* [online]. Košice [cit. 2022-02-08]. Dostupné z: https://automa.cz/cz/casopis-clanky/meranie-koncentracie-prachu-v-prostredi-2004_12_32669_1508/
- [15] Arduino vs ESP8266 vs ESP32 Comparison. *DiyIoT* [online]. 2021 [cit. 2022-02-09]. Dostupné z: <https://diyi0t.com/technical-datasheet-microcontroller-comparison/>
- [16] MOHSIN, Sayed. Raspberry pi pico compare with arduino uno, esp32, esp8266. *Mr.ElectroUino* [online]. 2021 [cit. 2022-02-09]. Dostupné z: <https://www.mrelectrouino.com/2021/01/Raspberry%20pi%20pico%20compare%20with%20arduino%20uno%20esp32%20esp8266.html>
- [17] LoRaWAN, Sigfox nebo NB-IoT? Srovnání 3 významných typů IoT sítí. *IoTPORT* [online]. 2020 [cit. 2022-02-09]. Dostupné z: <https://www.iotport.cz/iot->

novinky/lorawan/lorawan-sigfox-nebo-nb-iot-srovnani-3-vyznamnych-typu-iot-siti?gclid=EAIaIQobChMIn9XC3Yzz9QIVywyLCh35egZ9EAAYASAAEgJ_xPD_BwE

- [18] *Sigfox* [online]. 2022 [cit. 2022-02-09]. Dostupné z: <https://sigfox.cz/cs>
- [19] CENÍK TELEKOMUNIKAČNÍCH SLUŽEB pro IoT síť pro Internet věcí na technologii LoRa. In: *Starnet* [online]. 2018 [cit. 2022-02-09]. Dostupné z: <https://www.starnet.cz/download/cenik-iot.pdf>
- [20] MACHÁČEK, Jakub. *Predikce možných vývojových trendů mobilních komunikačních služeb* [online]. Praha, 2015 [cit. 2022-02-09]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/61197/F3-DP-2015-Machacek-Jakub-Predikce_moznych_vyvojovych_trendu_mobilnich_komunikacnich_sluzeb.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Zdeněk Brabec.
- [21] TOLL, Micah. *DIY Lithium Batteries: How to Build Your Own Battery Packs*. 1st ed. Toll Publishing, 2017. ISBN 9780989906708.
- [22] POLÁČEK, Matěj. *Multikoptéra s využitím platformy Arduino Nano s komunikačním protokolem ZigBee* [online]. České Budějovice, 2015, 60 s. [cit. 2022-02-09]. Dostupné z: https://theses.cz/id/fme7vy/Bakal_sk_prce_Mat_j_Pol_ek.pdf. Bakalářská práce. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Přírodovědecká fakulta. Vedoucí práce Milan Novák.
- [23] MURTINGER, Karel, Jiří BERANOVSKÝ a Milan TOMEŠ. *Fotovoltaika, elektrina ze slunce*. Brno: ERA, 2007. 21. století. ISBN 978-80-7366-100-7.
- [24] ZETEK, Lukáš. *Metodika výuky tvorby dílů a sestav v 3D modeláři SolidWorks se zaměřením na konstrukci strojů* [online]. České Budějovice, 2013 [cit. 2022-02-09]. Dostupné z: https://theses.cz/id/oopevf/Metodika_vuky_tvorby_dl_a_sestav_v_3D_modeli_SolidWorks.pdf. Bakalářská práce. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Přírodovědecká fakulta. Vedoucí práce Bedřich Veselý.

- [25] PRŮŠA, Josef. Vydáváme PrusaSlicer 2.0 s hromadou novinek!. *Josef Průša* [online]. Praha, 2019 [cit. 2022-02-10]. Dostupné z: <https://josefprusa.cz/vydavame-prusaslicer-2-0-s-hromadou-novinek/>
- [26] VODA, Zbyšek. *Průvodce světem Arduina*. Vydání druhé. Bučovice: Martin Stříž, 2017. ISBN 978-80-87106-93-8.
- [27] Vliv sklonu a orientace: CENTRUM PRO OBNOVITELNÉ ZDROJE A ÚSPORY ENERGIE. *EkoWATT* [online]. 2008 [cit. 2022-02-15]. Dostupné z: <https://fotovoltaika.ekowatt.cz/vliv-sklonu-orientace.php>
- [28] Prusa Tabulka Materiálů. *Prusa Knowledge Base* [online]. Praha, 2022 [cit. 2022-02-16]. Dostupné z: <https://help.prusa3d.com/cs/materials>
- [29] Datasheet SHT3x-DIS. *Sensirion* [online]. 2019 [cit. 2022-02-17]. Dostupné z: https://sensirion.com/media/documents/213E6A3B/61641DC3/Sensirion_Humidity_Sensors_SHT3x_Datasheet_digital.pdf
- [30] NOVOTNÝ, David. *Senzor teploty a vlhkosti SHT75* [online]. Praha, 2017 [cit. 2022-02-17]. Dostupné z: https://embedded.fel.cvut.cz/sites/default/files/kurzy/lpe/therm_hum_sht75/SHT75.pdf
f. Dokumentace. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická.
- [31] KADLČEK, Václav. *Návrh nového iontmetru s bezdrátovou komunikací a meteostanicí* [online]. Brno, 2018 [cit. 2022-02-17]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=171316.
Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [32] Datasheet HP206C. *Hoperf* [online]. 2013 [cit. 2022-02-17]. Dostupné z: https://www.hoperf.com/data/upload/portal/20190307/HP206C_DataSheet_EN_V2.0.pdf
- [33] Datasheet Sensirion SPS30. *Sensirion* [online]. 2020 [cit. 2022-02-17]. Dostupné z: https://sensirion.com/media/documents/8600FF88/616542B5/Sensirion_PM_Sensors_Datasheet_SPS30.pdf

- [34] Sensor Specification Statement: Sensirion SPS30. *Sensirion* [online]. 2020 [cit. 2022-02-17]. Dostupné z: https://sensirion.com/media/documents/B7AAA101/61653FB8/Sensirion_Part particulate_Matter_AppNotes_Specification_Statement.pdf
- [35] First fine dust sensor with MCERTS certification. *Glyn.com* [online]. 2020 [cit. 2022-02-17]. Dostupné z: <https://www.glyn.com/News-Events/Newsletter/Newsletter-2021/SENSIRION-sensors-cracks-the-billion-mark-Fine-dust-sensor-with-MCERTS-certification-ARM-successfully-follows-in-the-f/Delivers-precise-measurement-results-First-fine-dust-sensor-with-MCERTS-certification>
- [36] PRODUCT CONFORMITY CERTIFICATE: SPS30 Particulate Matter Sensor with SEK Eval Kit. *Sensirion* [online]. 2020 [cit. 2022-02-17]. Dostupné z: https://sensirion.com/media/documents/3A3BF572/616540E1/Sensirion_PM_Sensors_Datasheet_SPS30_MCERTS-Certificate_2020.pdf
- [37] KAŠPÁREK, Martin. *Regulátor pro nabíjení NiMH akumulátorů z fotovoltaického panelu* [online]. Brno, 2011 [cit. 2022-02-18]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=38616. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Petr Fiedler.
- [38] *ThingSpeak for IoT Projects: Data collection in the cloud with advanced data analysis using MATLAB* [online]. The MathWorks, 2022 [cit. 2022-02-22]. Dostupné z: <https://thingspeak.com/>
- [39] *IEC 60529: Degrees of protection provided by enclosures (IP Code)*. Edition 2.1. 2001.
- [40] Li-ion Battery and Gauge Introduction. In: *Richtek* [online]. 2021 [cit. 2022-03-07]. Dostupné z: <https://www.richtek.com/~media/Richtek/Design%20Support/Technical%20Documentation/AN024/EN/Version1/image001.gif?file=preview.png>
- [41] Znečištění ovzduší v detailech. In: *FN NANO* [online]. Praha, 2017 [cit. 2022-02-04]. Dostupné z: <https://fn-nano.com/zivotni-prostredi/>

- [42] Technology to the respective measuring principles. In: *Sensirion* [online]. [cit. 2022-02-17]. Dostupné z: <https://sensirion.com/products/technology/>
- [43] MAY, Angela. Teardown: Sensirion. In: *MistyWest* [online]. Vancouver [cit. 2022-02-17]. Dostupné z: <https://www.mistywest.com/posts/teardown-sensirion-particle-matter-sensor/>
- [44] Meteorologie aneb jak měříme počasí. In: *Brána do vesmíru* [online]. [cit. 2022-02-28]. Dostupné z: <https://www.branadovesmiru.eu/odborne-clanky/meteorologie.html>
- [45] *Mapy.cz* [online]. Seznam.cz, 2022 [cit. 2022-03-11]. Dostupné z: <https://mapy.cz/>

Přílohy

Celý zdrojový kód přenosné meteostanice je veřejně k dispozici. Je uložen v systému STAG jako příloha k této práci ve formě projektů spustitelných v softwaru Arduino IDE.