

Univerzita Hradec Králové

Přírodovědecká fakulta

Katedra fyziky

Optimalizace umístění senzorů u domácí
meteorologické stanice

Diplomová práce

Autor: Bc. Irena Pařízková

Studijní program: N1701

Studijní obor: Fyzikální měření a modelování (NFM)

Vedoucí práce: RNDr. Daniel Jezbera

Hradec Králové

Květen 2018

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala pod vedením vedoucího diplomové práce RNDr. Daniela Jezbery samostatně a uvedla jsem všechny použité prameny a literaturu.

V Hradci Králové dne 7. května 2018

Irena Pařízková

Poděkování:

Touto cestou bych chtěla poděkovat vedoucímu práce RNDr. Danielu Jezberovi za podnětné a cenné rady, které mi při zpracování diplomové práce poskytl. Dále bych ráda poděkovala svému synovi Tomáši Pařízkovi za technickou podporu při sestavení meteostanice.

Anotace

PAŘÍZKOVÁ, Irena. *Optimalizace umístění senzorů u domácí meteorologické stanice*. Hradec Králové: Přírodovědecká fakulta Univerzity Hradec Králové, 2018. Diplomová práce

Předmětem této diplomové práce je optimalizace umístění senzorů domácí meteorologické stanice. Tato práce rozvíjí předcházející bakalářskou práci na téma „Domácí meteorologická stanice“. Cílem bude vylepšit umístění externích senzorů domácí meteorologické stanice tak, aby se naměřené hodnoty přiblížily hodnotám získávaným ze standardních meteorologických stanic. Nasbíraná data budou porovnána s hodnotami naměřenými původními senzory umístěnými na terase i daty získanými od Českého hydrometeorologického ústavu. Doba sběru dat bude alespoň několik měsíců. K porovnání výsledků se využije metod matematické statistiky.

Klíčová slova:

Meteorologická stanice, teplota vzduchu, atmosférický tlak, měření teploty, měření barometrického tlaku, Arduino, BMP180

Annotation

PAŘÍZKOVÁ, Irena. *Optimization of home weather station sensor placement*. Hradec Králové: Faculty of Science, University of Hradec Králové, 2018. Diploma Thesis.

The subject of this diploma thesis is the optimization of the location of sensors of the home meteorological station. This thesis develops the previous bachelor work on "Home Meteorological Station". The aim will be to improve the location of external weather station sensors so that the measured values are closer to the values obtained from standard meteorological stations. The collected data will be compared with the measured values of the original sensors placed on the terrace and data obtained from the Czech Hydrometeorological Institute. The data collection time will be at least several months. Mathematical statistics are used to compare the results.

Keywords

Weather station, air temperature, barometric pressure, measuring of temperature and barometric pressure, Arduino, BMP180

Obsah

| | |
|--|----|
| Úvod | 9 |
| 1 Vzduch..... | 10 |
| 1.1 Pojem vzduchu v historii..... | 10 |
| 1.2 Vzduchové hmoty..... | 10 |
| 1.2.1 Teplé vzduchové hmoty | 12 |
| 1.2.2 Studené vzduchové hmoty..... | 13 |
| 1.2.3 Místní vzduchové hmoty | 15 |
| 1.2.4 Geografické rozdělení vzdušných hmot | 16 |
| 1.3 Meteorologický prvek | 17 |
| 1.3.1 Meteorologie | 17 |
| 1.3.2 Synoptické mapy | 18 |
| 1.3.3 Synoptická meteorologie..... | 27 |
| 1.3.4 Povětrnostní situace..... | 29 |
| 1.3.5 Povětrností singularity..... | 33 |
| 1.3.6 Severoatlantická oscilace | 35 |
| 1.3.7 Příčiny proudění vzduchu..... | 35 |
| 1.4 Tlak..... | 39 |
| 1.4.1 Tlak v kapalinách | 39 |
| 1.4.2 Tíhová síla a zrychlení | 44 |
| 1.4.3 Barometrická rovnice | 44 |
| 1.4.4 Měření tlaku | 46 |
| 1.4.5 Tlakoměry | 48 |
| 1.4.6 Jednotky..... | 51 |
| 1.5 Teplota..... | 54 |
| 1.5.1 Měření teploty – historie | 54 |
| 1.5.2 Teploměry | 55 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 1.5.3 | Stupnice a jednotky | 59 |
| 1.5.4 | Měření v meteorologické praxi | 62 |
| 2 | Metodika měření ČHMÚ..... | 63 |
| 2.1 | Synchronnost časů měření..... | 63 |
| 2.2 | Umístění stanice | 63 |
| 2.3 | Senzory | 64 |
| 2.4 | Meteorologická budka | 64 |
| 2.5 | Kalibrace | 65 |
| 3 | Domácí meteorologická stanice | 66 |
| 3.1 | Arduino..... | 67 |
| 3.2 | Senzor pro měření barometrického tlaku a teploty BMP180 | 70 |
| 3.3 | Sestavení meteorologické stanice..... | 74 |
| 3.4 | Meteorologická budka | 77 |
| 3.5 | Script | 79 |
| 3.6 | Databáze MySQL | 80 |
| 3.7 | Server Synology DS213j | 81 |
| 4 | Kalibrace senzorů | 82 |
| 5 | Zpracování měření..... | 90 |
| 5.1 | Korekce dat..... | 92 |
| 5.1.1 | Čas | 92 |
| 5.1.2 | Teplota..... | 92 |
| 5.1.3 | Tlak..... | 93 |
| 5.2 | Teplota vzduchu | 94 |
| 5.3 | Barometrický tlak | 102 |
| 5.4 | Výrazné změny tlaku a výpadky senzorů..... | 111 |
| 5.4.1 | Derecho 11.8.2017 | 111 |
| 5.4.2 | Orkán Herwart..... | 114 |

| | |
|--------------------------------|-----|
| Závěr | 119 |
| Seznam použité literatury..... | 121 |
| Seznam ilustrací | 126 |
| Seznam tabulek | 128 |
| Seznam grafů | 129 |
| Seznam příloh | 131 |
| Příloha č. 1 | 132 |
| Příloha č. 2 | 134 |
| Příloha č. 3 | 136 |
| Příloha č. 4 | 138 |

Úvod

Počasí je každý den jiné, při dlouhodobějším sledování si můžeme všimnout určitých pravidelností. Právě dlouhodobé pravidelnosti v systému počasí spoluvytvářejí podnebí v daných oblastech. Je prastarou lidskou touhou předvídat změny. Trpělivé dlouhodobé pozorování zákonitostí přírody nás naučilo, jak změny v počasí předpovídat. Pozorování a měření lokálního počasí rozšiřuje naše znalosti o nejbližším okolí.

Současná meteorologická měření pomocí precizních kalibrovaných měřidel přináší přesné výsledky. Tématem mé práce jsou otázky, je-li člověk schopen pomocí jednoduchého zařízení s nekalibrovanými senzory dosáhnout alespoň srovnatelných výsledků měření a do jaké míry je přesnost měření ovlivněna umístěním senzorů.

1 Vzduch

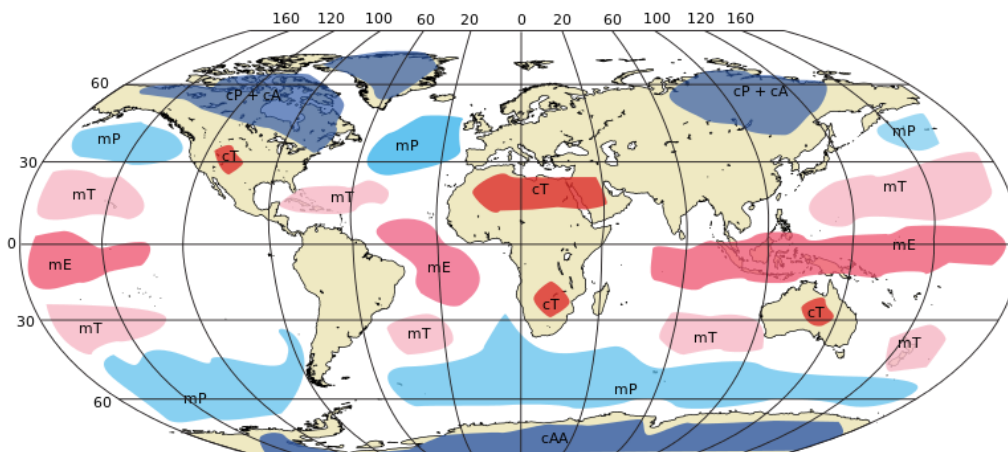
1.1 Pojem vzduchu v historii

Vzduch byl ve starověku chápán jako jeden ze čtyř živlů – země, voda, vzduch a oheň. Vše ostatní se odvozovalo z vlastností těchto živlů. V první knize o počasí „Meteorologii“ Aristoteles popsal vzduch jako dým vydechovaný Zemí. Velmi studený vzduch podle něho vydechují severské krajiny. Po nahromadění pak vane jako severní vítr. Naopak horký vzduch pochází z dechu jižních zemí.[2]

1.2 Vzduchové hmoty

Již v první polovině 19. století si německý fyzik a meteorolog Heinrich Wilhelm Dove (1803–1879) vytvořil představu o vzduchových hmotách. Za zakladatele meteorologie vzduchových hmot je však považován anglický meteorolog a námořní důstojník Robert FitzRoy (1805–1865), který studoval vlastnosti polárního a tropického vzduchu. Teorii polární fronty oddělující obě vzduchové masy následně rozpracoval norský fyzik a meteorolog Vilhelm Bjerknes (1862–1951). Bjerknes v roce 1917 založil v Bergenu Geofyzikální institut a také zřídil v Norsku systém meteorologických stanic. Pomocí dat získaných z dlouhodobého měření objevil se svým týmem existenci vzduchových hmot oddělených frontami, následně zveřejnil Teorii vzniku a zániku front.[2]

Původně byl jako „polární“ označován všechn vzduch na severní straně rozhraní. Až v roce 1928 švédský meteorolog Tor Bergeron (1891–1977) zavedl pojem arktické vzduchové hmoty. Pojmenování polárního vzduchu se zúžilo na mírné zeměpisné šířky.[2]



Obrázek 1: Rozložení oblastí formování vzduchových hmot
(A-arktická, AA-antarktická, P-polární, T-tropická, E-ekvatoriální,
c-kontinentální, m-maritimní)

Zdroj:[19]

Zemská atmosféra je tvořena směsí plynů. Je neviditelnou, přesto dobře pociťovanou složkou životního prostředí. Člověk i bez měřicích přístrojů pociťuje rozdíly teplot nebo větr.

V meteorologii se pod pojmem vzduch obvykle rozumí *vzduchové hmoty*. Jedná se o rozsáhlé objemy vzduchu v troposféře, která v oblasti rovníku dosahuje do výše 18 km, v mírných šířkách 11 km a u pólů 9 km. Vzdušné hmoty se vyznačují specifickými vlastnostmi jako je teplota, vlhkost nebo tlak. Tyto poměrně homogenní masy jsou navzájem odděleny *atmosférickými frontami*. Při přechodu fronty se hodnoty meteorologických prvků skokově mění v důsledku rozdílu fyzikálních vlastností vzduchových hmot.[8]

Typicky velké homogenní vzduchové hmoty vznikají nad rozsáhlými stejnorodými zemskými povrchy, jako jsou povrchy oceánů nebo rozlehlé části souše, kde vzduch setrvává dostatečně dlouho pod vlivem určitého režimu slunečního záření.[7]

Vzduchové hmoty představují velké objemy vzduchu s horizontálně nevýraznými gradienty meteorologických prvků. Rozměr vzduchové hmoty může v horizontálním směru dosahovat délky 2000–3000 km a ve vertikálním směru může dosahovat od povrchu Země až po tropopauzu. Vzduchové hmoty jsou

od sebe odděleny přechodnými oblastmi. Tyto předěly se nazývají atmosférické fronty. Vzduchové hmoty své charakteristické vlastnosti získávají stagnací nebo pomalým posunem vzduchu.[29]

Při přesunu v rámci všeobecné cirkulace atmosféry vzduchová masa mění své původní vlastnosti podle nového prostředí. Mezi nejpomaleji měnící se vlastnosti vzduchové hmoty patří teplota, měrná vlhkost vzduchu a viditelnost. Tyto charakteristiky ukazující na místo původu se nazývají konzervativní vlastnosti vzduchové hmoty.[7]

Vzduchové hmoty dělíme podle termodynamického nebo geografického hlediska. Z pohledu termodynamického se jedná o teplé, studené a místní nebo také stabilní a instabilní vzduchové masy.

Rozdělení na stabilní a instabilní vzduchové hmoty úzce souvisí s vrstvením v nižší troposféře.[8]

1.2.1 Teplé vzduchové hmoty

Teplé vzduchové hmoty proudí nad chladnější povrch, než je oblast jejich původu. Teplá vzduchová hmota se při postupu nad danou oblastí postupně ochlazuje, neboť její teplota neodpovídá podmínkám radiační a tepelné rovnováhy dané lokality. Takováto vzduchová hmota při přesunu přináší oteplení, stabilní zvrstvení či inverzi, pro charakter počasí jsou typické slohy a slohové kupy, mrholení a advekční mlhy.[29]

- Advekční mlhy vznikají v případě, kdy se vlhký teplý vzduch přemísťuje nad studeným povrchem Země. Při svém pohybu jsou od podloží ochlazovány přiléhající vzduchové vrstvy, a to až do stavu nasycení vodními parami. Mlha se udrží při zemi pouze při nižších rychlostech proudění vzduchu, při vyšší rychlosti se mlha zdvihne do výšky a vytvoří se oblak typu Stratus. Advekční mlhy se mohou rozprostírat na poměrně velkém prostoru. U nás obvykle vznikají na podzim a v zimě, kdy se nad území dostávají teplé a vodou nasycenější vzduchové hmoty od oceánu, který je v zimním období teplejší než pevnina.

- Slohy (*Stratus*) jsou oblaka, která se v podstatě neliší od mlhy. Vyskytují se v nejnižších výškách od 0 do 2 km nad zemským povrchem. Vznikají nejčastěji z mlhy. Při vyšší rychlosti proudění se mlha při zemi neudrží a spodní hranice se zvedá od zemského povrchu do výšky.
- Slohové kupy (*Sratiocumulus*) jsou nejrozšířenějšími oblaky v atmosféře Země. Jsou jasnými ukazateli vlhkosti ve spodních vrstvách atmosféry a konvekce uvnitř oblaku. Kupovitý tvar těchto oblaků postrádá ostře ohraničený okraj a je důsledkem slabé instability v oblaku. Slohové kupy se nachází ve výšce 0,6–2 km nad terénem.
- Mrholení je typ deště s kapkami velmi malých rozměrů. Hranicí mezi deštěm a mrholením je obvykle uváděn průměr kapek 0,5 mm. Kapky mrholení často dosahují velikosti pouze desítek mikrometrů.[8]

Pro teplé vzduchové hmoty je typický nevýrazný denní chod meteorologických prvků.

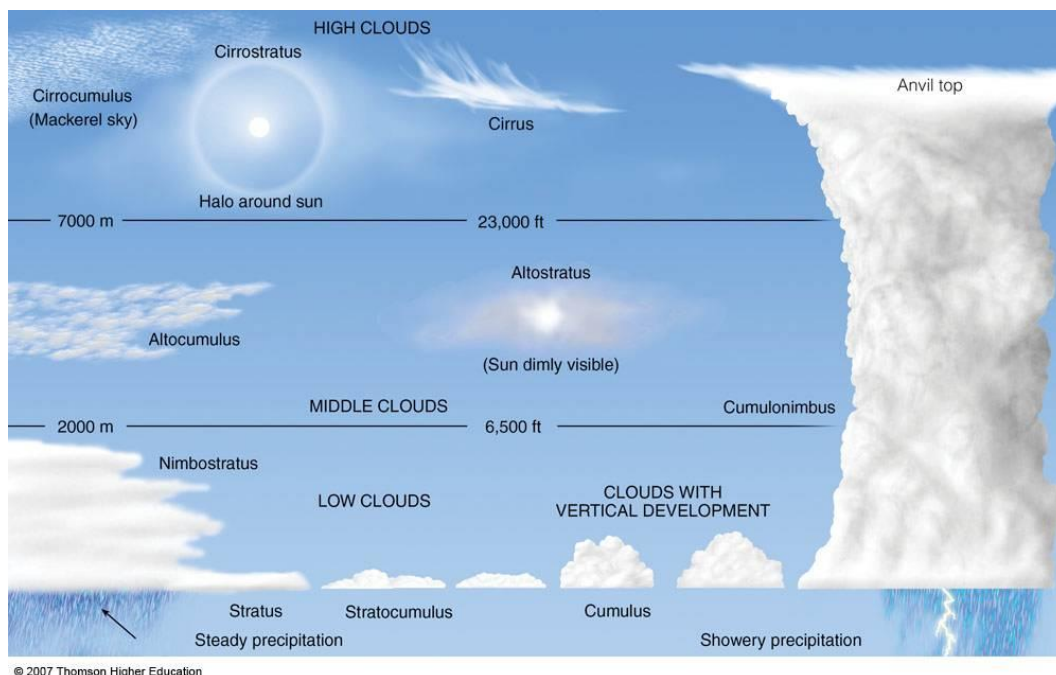
1.2.2 Studené vzduchové hmoty

Studené vzduchové hmoty proudí nad teplejší povrch, než je oblast jejich původu. Studená vzduchová hmota se při postupu nad danou oblastí postupně zahřívá, neboť její teplota neodpovídá podmínkám radiační a tepelné rovnováhy dané lokality. Takováto vzduchová hmota při přesunu přináší ochlazení.[1]

Studené vzduchové hmoty přinášejí ochlazení, labilní zvrstvení, pro charakter počasí jsou typické kupy, bouřková oblaka, v noci radiační mlhy a výrazně vyjádřený denní chod meteorologických prvků.

- Zvrstvení atmosféry úzce souvisí se změnou teploty vzduchu, jež klesá s přibývajícím výškou. Pokles je možné popsat vertikálním teplotním gradientem ($^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$). Průměrný vertikální teplotní gradient $0,65\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$. Vzduch se ohřívá od aktivního povrchu, tedy čím je od povrchu dále, tím je chladnější, avšak od určité úrovně průměrná teplota roste, a to umožňuje rozlišit dvě části spodní atmosféry – troposféru a stratosféru.

- Kupy (*Cumulus*) vznikají v důsledku vzestupných proudů v atmosféře, k těmto proudům typicky dochází při termické konvekci. Jednou z podmínek vzniku konvekce je labilní teplotní zvrstvení, konvekci následně podpoří ohřev povrchu země Sluncem a další ohřev vzduchu od povrchu země. Při vzestupu se hmota vzduchu dostává do větší výšky, kde je tlak okolní atmosféry nižší. V důsledku rozdílnosti tlaku dochází k rozpínání a tím i k ochlazení stoupající masy vzduchu. V určité výšce klesne teplota stoupající hmoty vzduchu pod rosný bod a následně dojde ke kondenzaci vody ve stoupajícím vzduchu a vzniku Cumulu. Výška, kde ke kondenzaci dojde se nazývá konvektivní kondenzační hladina.
- Bouřková oblaka (*Cumulonimbus*) nejsou zařazena do žádné výškové kategorie, mohou se rozprostírat současně ve všech výškách. Nejvyšší výška, ve které se ještě oblaky běžně nacházejí, je 20 km, této výšky však dosáhnou pouze v rovníkových oblastech, pro mírná pásma není běžná. Minimální výška není nijak vymezena, oblak může ležet i při zemi, pak je nazýván mlha.
- Radiační mlhy vznikají následkem nočního ochlazení vzduchu v blízkosti povrchu země. Ochlazení podloží je důsledkem dlouhovělného vyzařování. Radiační mlhy vznikají za bezvětří nebo při velmi mírném proudění. Nejvyšší rychlost proudění jsou 3 m/s. Při silnějším proudění se promíchává vyšší vrstva vzduchu a nedochází k jejímu dostatečnému ochlazení, pak se vzduch nenasytí vodnými parami a mlha nevznikne. Radiační mlha se tvoří obvykle v druhé polovině noci. V létě tvoří jen velmi nízkou vrstvu nad podložím a rozpadává se krátce po východu Slunce. Na podzim je vrstva mlhy silná až 200 cm a rozpadává se až během dopoledne. V zimních měsících může radiační mlha trvat v závislosti na vnějších meteorologických podmínkách i celý den.[8]



Obrázek 2: Typy mraků

Zdroj: [38]

Pro studené vzduchové hmoty je typický výrazný denní chod meteorologických prvků.

1.2.3 Místní vzduchové hmoty

Místní vzduchovou hmotou nazýváme vzduchovou hmotu, která se nachází v dané oblasti po delší čas a má charakteristické vlastnosti odpovídající dané lokalitě a příslušnému ročnímu období. Změny fyzikálních vlastností místní vzduchové hmoty jsou velmi pomalé, protože její stav je poměrně velmi blízký rovnovážným podmínkám systému.[1]

Místní vzduchové hmoty bývají stabilní i instabilní, a to v závislosti na dané roční době i geografickém charakteru lokality. V teplé části roku nad pevninami jsou častější vzduchové hmoty instabilní, naopak v chladné části roku spíše stabilní. U místních vzduchových hmot nacházejících se nad oceány je tomu opačně, v teplé části roku je charakter hmot obvykle stabilní a v chladnější části roku instabilní.[1]

Stabilní vzduchovou hmotou nazýváme hmotu, jejíž teplotní gradient je menší než nasyceně adiabatický gradient. V takovém systému nevznikají výrazné vertikální konvekční pohyby ani v nejpříznivějších denních hodinách, proto se zde nevyvíjejí konvekční oblaky. Nejvyšší stabilitu mají vzduchové hmoty, u kterých pozorujeme v celé jejich spodní části inverzní rozdělení teploty s výškou.[1]

U instabilní vzduchové hmoty klesá teplota s výškou rychleji, než odpovídá nasyceně adiabatickému gradientu, proto zde častěji vzniká výrazná konvekce a s ní spojené turbulence uvnitř vzduchové hmoty.[1]

Vzduchové hmoty jsou nositeli charakteru počasí a určují celkový ráz podnebí v dané oblasti.

1.2.4 Geografické rozdělení vzdušných hmot

Podle místa vzniku vzduchové hmoty rozlišujeme následující typy vzduchových hmot:

- Arktický vzduch
- Vzduch mírných šířek (starší název polární)
- Tropický vzduch
- Ekvatoriální vzduch

První tři typy dělíme dále na oceánský a pevninský podtyp. Pro ekvatoriální vzduchovou hmotu toto dělení ztrácí smysl, protože v blízkosti rovníku jsou podmínky teploty a vlhkosti vzduchu nad oceánem i pevninou velmi podobné.

Vzduchové hmoty vzniklé nad oceány s sebou přináší vyšší srážkové úhrny, v letních měsících ochlazení a v zimním období oteplení přízemní atmosféry v porovnání s pevninou. Vzduchové hmoty vzniklé nad pevninou mají nižší nasycenost vodními parami, v létě přináší vzduch horký a v zimě naopak studený. S ohledem na přemístování vzduchových hmot dochází v důsledku jejich

interakce se zemským povrchem k jejich transformaci, a to až dokud mezi meteorologickými prvky vzduchové hmoty a dané oblasti nenastane rovnováha.

1.3 Meteorologický prvek

Meteorologický prvek je fyzikální veličina charakterizující stav atmosféry.[10]

Mezi nejdůležitější meteorologické prvky patří tlak vzduchu, teplota vzduchu, vlhkost vzduchu, sluneční záření – svit, směr a rychlost větru, oblačnost, atmosférické srážky, ale patří sem i výpar, radioaktivita atmosféry apod. Souhrn hodnot všech meteorologických prvků udává charakter počasí. K měření jednotlivých prvků slouží meteorologické přístroje.[10]

1.3.1 Meteorologie

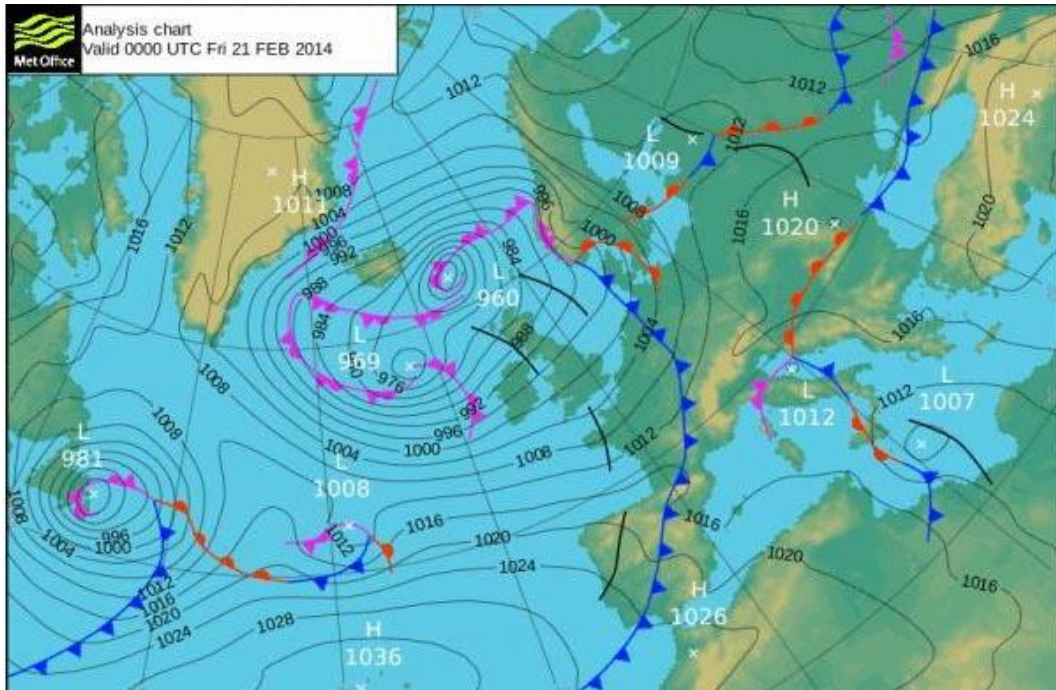
Předpovídání počasí vychází ze dvou základních metod. Klasické norské školy zabývající se přesuny front a novější metody numerického modelování.

Frontologická norská metoda, kterou založil meteorolog Vilhelm Bjerknes, je synoptickou metodou předpovědi počasí a zakládá se na teoretickém zpracování hydrodynamiky a termodynamiky vzduchových hmot, barických útvarů, atmosférických front a všeobecné cirkulace vzduchu. Tato metoda byla rozvíjena hlavně v první polovině 20. století.

Metoda numerického modelování zpracovává teoretické základy hydrodynamiky a termodynamiky s využitím matematických vztahů. Výsledkem těchto rovnic jsou modely předpovědi počasí jako např. Medard nebo známější Aladin.[29]

1.3.2 Synoptické mapy

Synoptické mapy zobrazují tlakové útvary (tlakové výše, níže, hřebeny a brázd), atmosférické fronty (okluzní, teplé nebo studené) a rychlost větru.[6]



Obrázek 3: Příklad synoptické mapy

Zdroj: [21]

Rozdělení tlaku vzduchu je na synoptických mapách znázorněno pomocí *izobar*, čar spojujících místa se stejným atmosférickým tlakem. Dále se na mapách zakreslují pro předpovědní účely *izalobary* – čáry se stejnou tlakovou tendencí, tedy změnou tlaku vzduchu za poslední 3 hodiny.

Tlaková pole – izobary jsou zobrazeny černými čarami. Hodnoty izobar jsou uváděny v hektopascalech. Písmenem „N“ je označován nízký tlak, písmenem „V“ vysoký tlak. Modré čáry zobrazují studené fronty, červené teplé fronty. Fialově jsou znázorněny okluzní fronty, tedy rozhraní mezi studenou a teplou vzduchovou hmotou.[1]

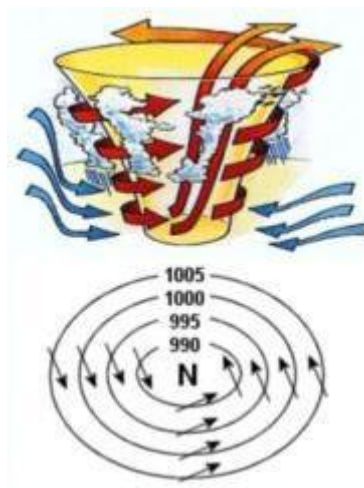
1. Směr větru

Zjednodušeně je vítr proudící vzduch. Proudění větru je závislé na prostorovém rozmístění polí atmosférického tlaku. Vzduchové hmoty s rozdílnými hodnotami tlaku mají tendenci tyto rozdíly vyrovnávat. Vzduch tedy proudí z oblasti s vyšším tlakem do oblasti s nižším tlakem. U větru rozlišujeme jeho směr a rychlost. Směr větru je na synoptických mapách znázorňován žlutými šipkami. Délka šipky je úměrná síle větru. Okamžitý stav proudění větru můžeme na základě orientace vektorového pole znázornit pomocí čar proudnic.[8]

Mezi hlavní příčiny proudění vzduchu patří síla horizontálního tlakového gradientu, Coriolisova síla, síla tření a odstředivá síla.[1]

2. Tlaková níže

Tlaková níže je jedním z tlakových útvarů v atmosféře Země. Na synoptické mapě je znázorněna alespoň jednou uzavřenou izobarou jako oblast s nižším tlakem vzduchu. Směrem do jejího středu se atmosférický tlak snižuje a obvykle se zvyšují *horizontální tlakové gradienty*. [1]



Obrázek 4: Tlaková níže

Zdroj: [22]

Horizontální tlakový gradient je určen změnou tlaku připadající na určitou vzdálenost. V meteorologii má velký význam právě horizontální složka tlakového gradientu, protože dává vznik proudění vzduchu. Na synoptických mapách je nejvyšší gradient v místě zahuštění izobar.[1]

Místo s nejnižším tlakem, tedy střed tlakové níže, se na synoptických mapách označuje v češtině písmenem „N“ – níže, v angličtině „L“ – low a v němčině „T“ – tief.

Rychlost přesunu i velikost tlakové níže je proměnlivá. Průměr útvaru se proto pohybuje od několika set do několika tisíc kilometrů. Střed tlakové níže se obvykle přesouvá rychlostí 40–50 km/h, tedy zhruba 1 000 km/den. Rekordně nejnižší tlak 870,0 hPa byl naměřen během supertajfunu Tip 480 km západně od ostrova Guam v Tichém oceánu 12. 10. 1979. V Čechách je rekordní hodnotou 970,1 hPa naměřených 2. 12. 1976 v Hradci Králové.[13]

Protože ve středu tlakové níže je nejnižší atmosférický tlak, směřuje proudění vzduchu z místa vyššího tlaku na okraji do místa nižšího tlaku ve středu útvaru. Proudění vzduchu není přímočaré, působením zemské rotace se spirálovitě stáčí na severní polokouli proti směru hodinových ručiček a na jižní polokouli naopak (viz kapitola 1.3.7 2. Coriolisova síla).

Vzduch sbíhající se do středu tlakové níže nakonec v centru útvaru vystoupá nahoru. Tento přesun vzdušných mas postupně vede ke kondenzaci vodních par. S tlakovou níží proto obvykle převažuje oblačné počasí se srážkami a silnějším větrem. Charakter počasí v takových nížích je závislý na vývojovém stadiu útvaru, místu původu a ročním období. V letním období tlaková níže přináší ochlazení, v zimě naopak oteplení.

Pokud v ohnisku útvaru klesá tlak, jedná se o stadium *prohlubování tlakové níže*, naopak stoupá-li ve středu níže tlak, mluvíme o *vyplňování tlakové níže* končícím jejím zánikem. Protějškem tlakové níže je *tlaková výše*.

S tlakovou níží je spojeno převážně „nepěkné“ počasí, které je nebezpečné zvláště pro lodní a leteckou dopravu, proto je i dnes v centru zvýšeného zájmu. Prvním, kdo podal úplný ucelený popis dějů v místě tlakové níže, byl roku 1828

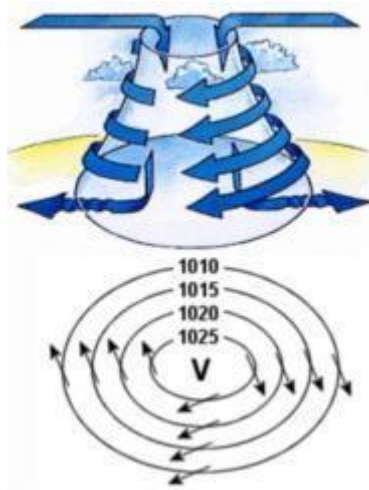
německý fyzik a meteorolog Heinrich Wilhelm Dove (1803–1879). Termín *cyklóna* byl poprvé použit anglickým vědcem a námořním kapitánem Henrym Piddingtonem (1797–1858) ve 40. letech 19. století jako označení pro všechny atmosférické poruchy, v nichž vzduch cirkuluje. K dalšímu výzkumu tlakových níží významně přispěl i první profesor klimatologie a meteorologie na Karlo Ferdinandově univerzitě v Praze, meteorolog, astronom a geograf František Augustin (1846–1908), který založil rozsáhlou síť meteorologických stanic v Čechách, srážkoměrnou síť v Praze a observatoř na Petříně.[4]

3. Výšková tlaková níže

Jedná se o tlakovou níže ve vyšší vrstvě atmosféry, zaznamenanou pouze na výškových povětrnostních mapách, na přízemní mapě v dané lokalitě zcela chybí. V některých případech je dokonce tlak vzduchu naměřený při zemi značně nadnormální. Právě výškové tlakové níže jsou příčinou, proč i při naměřeném poměrně vysokém tlaku nemusí být vždy pěkné počasí.[8]

4. Tlaková výše

Tlaková výše je jedním z tlakových útvarů v atmosféře, který bývá vyznačen v synoptických mapách uzavřenou izobarou. V povětrnostních mapách je v češtině označen písmenem „V“ – výše, v angličtině a němčině písmenem „H“ – high nebo hoch. Tlaková výše je nazývána *anticyklóna*.



Obrázek 5: Tlaková výše

Zdroj: [22]

Tlakové výše pokrývají větší část Země než tlakové níže. Pohyb tlakové výše je mnohem pomalejší, než je tomu u níže. Po vytvoření zůstávají často stacionární i několik dní.

Rekordně nejvyšší tlak 1083,8 hPa byl naměřen v Rusku na Sibíři 23.12.1968 při teplotě $-46\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ve střední Evropě je rekordní hodnotou 1055,4 hPa naměřených 24.1.1907 v Hurbanovu nedaleko Komárna. Normální tlak na hladině moře při normálním tíhovém zrychlení na 45° severní šířky je 1013,25 hPa.[13]

Typický pro anticyklónu je sestupný pohyb vzduchu ve volné troposféře, při kterém se vzduch otepluje a vysušuje. Děj probíhá adiabaticky, tedy bez výměny tepla s okolím. V blízkosti země má proudění vzduchu v anticyklóně směr od centra s vysokým tlakem k okrajům s nižším tlakem. Proudění vzduchu není přímočaré, působením zemské rotace se spirálovitě stáčí na severní polokouli po směru hodinových ručiček a na jižní polokouli naopak. Do prostoru odtékajícího vzduchu sestupuje nový vzduch z výšky.

Pro tlakovou výši typické jasné, minimálně oblačné a jen málo větrné počasí je způsobeno právě sestupným prouděním vzduchu. Charakteristické pro tlakovou výši jsou velké rozdíly teploty vzduchu ve dne a v noci. Počasí v tlakové výši je závislé na jejím vývojovém stadiu, na lokalitě a na ročním období.

V letním období přináší anticyklóna obvykle slunečné počasí a oteplení, protože během dne dochází k intenzivnímu ohřevu zemského povrchu. Za jasných nocí však dochází k rychlému ochlazení zemského povrchu, to vede k výraznému poklesu ranních teplot, tvorbě rosy nebo slabých ranních mlh.

V zimních měsících přináší tlaková výše chladné mrazivé počasí a celkové ochlazení. V přízemních vrstvách dochází díky silnějšímu vyzařování zemského povrchu k *inverzím* teplot, kdy teplota vzduchu v dolní vrstvě atmosféry s výškou neklesá, ale stoupá. Potom se vytváří nízká vrstevnatá oblačnost nebo celodenní mlha, která zapříčiní v nižších polohách sychravý ráz počasí. Rozdíl denních a nočních teplot je v tomto případě minimální.

Pokud ve středu tlakové výše atmosférický tlak stoupá, pak mluvíme o *mohutnění tlakové výše*, tedy o fázi rozvoje. V okamžiku, kdy atmosférický tlak v centru výše začne klesat, jedná se o *slábnutí tlakové výše* končící jejím zánikem.

Anticyklónám byla zpočátku věnována menší pozornost, protože nejsou spjaty se špatným počasím pro námořní dopravu. Označení „anticyclone“ bylo použito až zhruba 20 let po pojmenování cyklóny. Termín poprvé použil roku 1871 anglický vědec činný v mnoha oborech Francis Galton (1822–1911). Pojmenování poukazuje na charakter počasí opačný tlakovým nížím. V Čechách se výzkumem tlakových výší zabýval počátkem 20. století meteorolog a ředitel univerzitního meteorologického ústavu Stanislav Hanzlík (1878–1956). V roce 1907 publikoval svou první práci „O studených a teplých anticyklonách“ a v roce 1912 publikoval druhou práci, tentokrát o cyklónách „Prostorové rozdělení meteorologických prvků v cyklónách“.[4]

5. Fronty

Setkají-li se dvě vzduchové hmoty, nesplynou spolu, protože mají odlišnou teplotu a hustotu. Namísto smíchání obou mas podklouzne hustší vzduch pod řidší a nadzvedne jej od zemského povrchu. Rozhraní mezi dvěma vzduchovými masami je nazýváno *frontou*. Fronty mají své pojmenování podle vzduchu, který jde za frontou. Při studené frontě je teplý vzduch nahrazen studeným, při teplé frontě je tomu naopak.[3]

Atmosférická fronta bývá poměrně úzká přechodová vrstva mezi jednotlivými vzduchovými hmotami s různými vlastnostmi. V průměru bývá dlouhá i několik set kilometrů, šířka obvykle dosahuje jen desítek metrů. Frontální rozhraní můžeme pokládat za plochu, průsečnice této plochy s povrchem Země je nazývána frontální čarou. Fronty oddělující základní geografické typy vzduchových hmot jsou nazývány hlavní atmosférické fronty.[29]

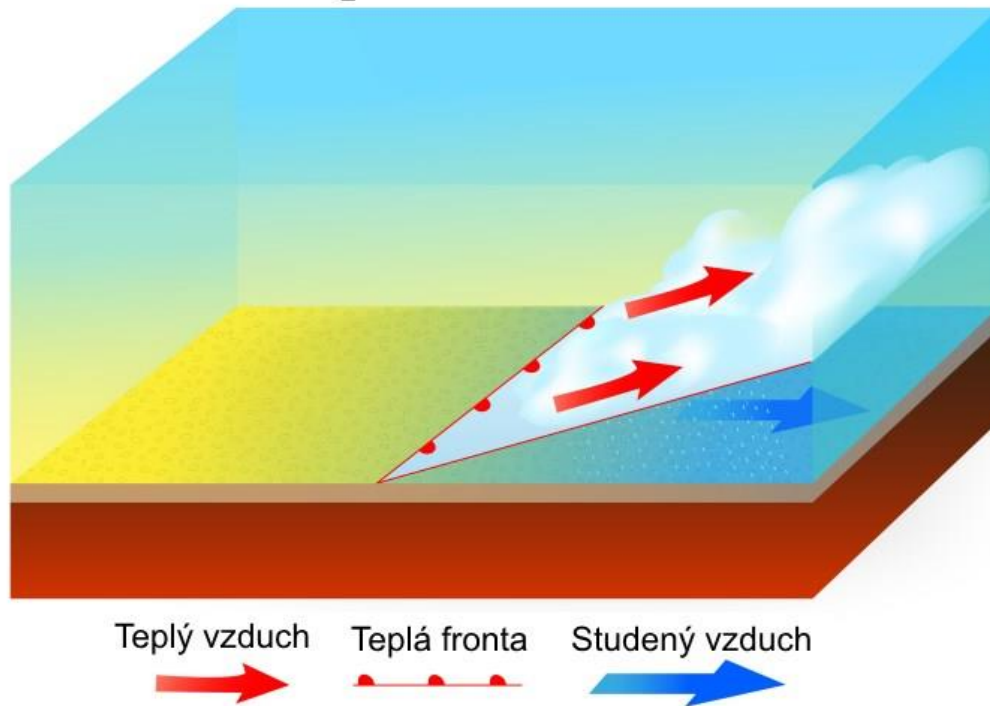
Tropická fronta odděluje tropický a ekvatoriální vzduch, polární fronta je rozhraním mezi polárním a tropickým vzduchem a antarktická/arktická fronta rozděluje antarktický/arktický a polární vzduch. Menší fronty vznikají uvnitř jednotlivých vzduchových hmot mezi oblastmi s rozdílnou teplotou vzduchu. Vznik frontálního rozhraní je označován jako frontogeneze. Příčinou frontogeneze jsou přibližující se proudnice a následně se zvětšující horizontální gradienty nejen teploty vzduchu, ale i dalších meteorologických prvků. Čím vyšší je horizontální gradient, tím je i rozhraní výraznější. K rozpadu fronty nazývané frontolýza, dochází s oddalujícími se proudnicemi.[29]

Statická rovnováha mezi teplým a studeným vzduchem by mohla nastat, pokud by Země nerotovala, pak by byl studenější vzduch podsunut pod teplejší a jednotlivé vrstvy by byly rozděleny horizontálními plochami.

Frontu nazýváme stacionární, pokud proudí vzduch podél frontální čáry. Až když je vytvořena síla horizontálního tlakového gradientu, nastane následné přesunování fronty směrem ke studenému nebo teplému vzduchu. Nestacionární fronty dělíme podle termodynamického hlediska na studené, teplé a okluzní. U stacionárních front jsou jednotlivé izobary rovnoběžné s čarami front, u nestacionárních front protínají frontální čáru pod příslušejícím úhlem.[1]

Teplá fronta je rozhraním mezi teplým vzduchem, jež se přesunuje na místo vzduchové hmoty s nižší teplotou. Teplejší lehčí vzduch při svém přesunu vystupuje nad klín vzduchu chladnějšího, v průběhu tohoto procesu kondenzuje vodní pára, proto se v teplé frontě začne vytvářet mohutný mnohdy až 1000 km široký systém oblačnosti.[1]

Teplá fronta



Obrázek 6: Teplá fronta

Zdroj: [39]

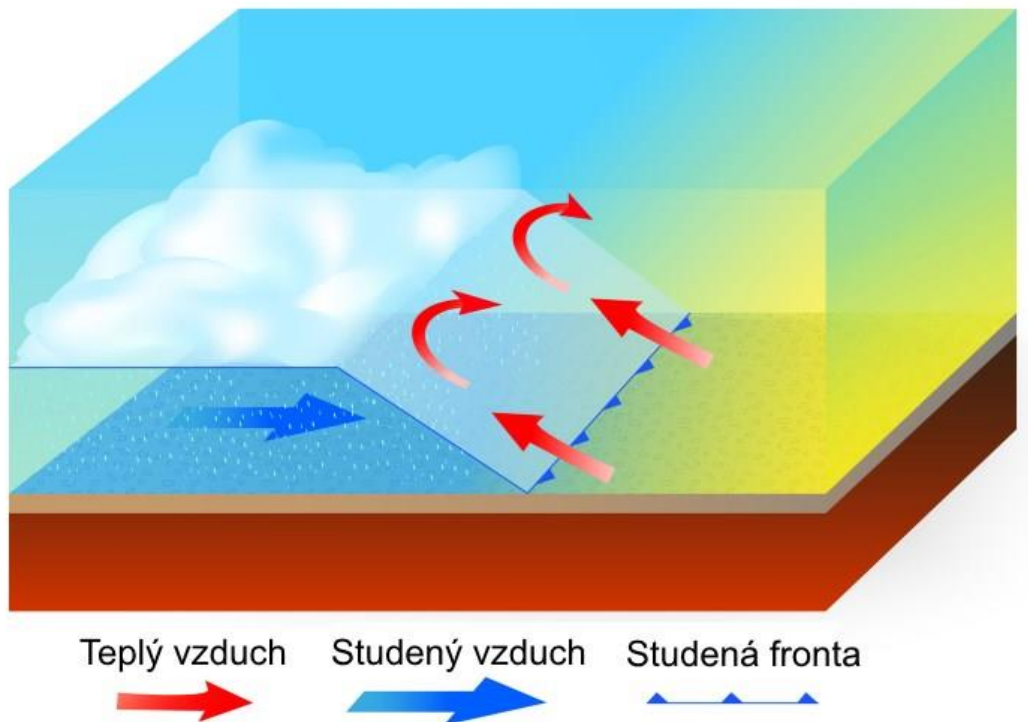
Studenou frontou nazýváme místo styku mezi studenou a teplou vzduchovou hmotou, kde studený vzduch odsunuje vzduch teplejší. Přesun vzduchu je u povrchu Země zpomalen pomocí tření, to se odráží na klínovitém tvaru profilu studené fronty. Podle rychlosti postupu systému rozlišujeme dva typy studené fronty.[1]

Pro studenou frontu prvního typu je charakteristické výstupné proudění v rámci celého výškového profilu, srážky v čele fronty bývají typu přeháněk a bouřek, za frontou mají vytrvalejší charakter. Pásmo srážek je zpravidla užší než u teplé fronty. Při příchodu fronty nejdříve teplota mírně stoupá a barometrický tlak klesá, po přechodu fronty naopak teplota ovzduší klesá a barometrický tlak se zvyšuje.[1]

V České republice se častěji vyskytuje studená fronta druhého typu. Tato fronta má až do výšky 2–3 km charakter výstupného proudění, ve vyšších polohách sestupného proudění. Vzhledem k tomu, že teplý vzduch nad frontální plochou postupuje o něco rychleji než samotná fronta, předbíhá ji a následně

sestupuje dolů. Oblačnost studené fronty druhého typu má podobu kumulonimbů s přeháňkami a bouřkami. Na frontálních rozhraních se tvoří další podružné studené fronty.[1]

Studená fronta



Obrázek 7: Studená fronta

Zdroj: [39]

Okluzní fronta se řadí mezi podružné fronty a je rozhraním, kde se studený vzduch přesune za teplým, a v důsledku vyšší rychlosti vytlačí následně teplý vzduch do výšky. Situaci splývání vzduchových front označujeme jako okludování.[1]

S přihlédnutím na teplotní poměry studené vzduchové hmoty můžeme rozlišit teplou a studenou okluzní frontu. Při teplé okluzní frontě je studený vzduch postupující za studenou frontou teplejší než vzduch, který před teplou frontou ustupuje. U studené okluzní fronty je tomu opačně.[1]



Obrázek 8: Okluzní fronta

Zdroj: [40]

1.3.3 Synoptická meteorologie

Synoptická meteorologie se zabývá zaznamenáváním a následnou analýzou atmosférických jevů a procesů. Je pozorován vznik, vývoj i přemísťování tlakových výší a níží. Ze sledování přesunů vzduchových hmot je vytvářena předpověď počasí.[29]

Synoptické mapy mohou zobrazovat situaci v různých izobarických hladinách. Tyto mapy dělíme na přízemní a výškové synoptické mapy. Přízemní synoptické mapy vycházejí z údajů z přízemních meteorologických pozorování a měření probíhajících v hlavních časech (00.00, 06.00, 12.00 a 18.00 hodin světového času) a vedlejších časech (03.00, 09.00, 15.00 a 21.00 hodin světového času). Zaznamenávají se informace o přízemní teplotě, barometrickém tlaku a proudění vzduchu. Na výškových synoptických mapách jsou zaznamenány stejné meteorologické prvky jako na přízemních mapách. Jednotlivé meteorologické prvky jsou zjištěny na základě aerologických pozorování probíhajících v časech 00.00 a 12.00 hodin světového času.[29]

Synoptická analýza vychází z porovnání informací zjištěných ze synoptických map Synoptická meteorologie může v případě chybějících dat

využít interpolaci a extrapolaci hodnot. Interpolací jsou dopočítány chybějící údaje uvnitř útvaru, u něhož alespoň část hodnot známe. Extrapolací jsou dopočítány předpokládané hodnoty meteorologických prvků za hranicemi známých hodnot.[29]

Synoptická analýza probíhá v následujících krocích:

1. rozlišení stabilních a nestabilních vzduchových hmot
2. identifikace a lokalizace jednotlivých frontálních poruch
3. zakreslení izobar charakterizujících tendence změn barometrického tlaku
4. stanovení polohy atmosférické fronty
5. rozlišení typu izobar, které jsou po přechodu teplé fronty přímočaré nebo zakřivené směrem dovnitř tlakového útvaru, po přechodu studené fronty jsou zakřiveny směrem vně tlakového útvaru
6. rozlišení typu fronty a směru posunu izobar s přihlédnutím ke gradientovému větru
7. porovnání s výškovými mapami absolutní a relativní barické topografie[29]

Předpověď vývoje počasí je založena na fyzikálních zákonech a matematických vztazích. Cílem je vytvořit co nejpravděpodobnější verzi nadcházejícího vývoje meteorologických prvků. Pro úspěšnou předpověď jsou důležitá co nejpřesnější data o aktuálním stavu vzdušných hmot. Informace jsou získávány z:

- Pozemní síť stanic, které vysílají informace o základních meteorologických prvcích: dohlednost, oblačnost, relativní vlhkost, sněhová pokrývka, srážky, teplota rosného bodu, teplota vzduchu, barometrický tlak, směr a síla větru.
- Aerologické stanice, které každý den ve stejný čas po celém světě po šesti hodinách vypustí aerosondy. Meteorologické balóny vynesou sondy do výšky 32 km, kde prasknou a následně aerosonda padá k zemi. Během letu sonda v intervalu pěti sekund měří vlhkost a teplotu vzduchu, teplotu rosného bodu, tlak vzduchu, směr a rychlost větru. Aerosondy několikrát ročně měří ozon a radioaktivitu v atmosféře. V ČR jsou aerosondy vypouštěny v Praze Libuši a v Prostějově.

- Dálková detekce pomocí meteorologických družic, sítě meteorologických radarů a systémů detekce blesků.
- Charakteristiky podnebí v dané lokalitě.[29]

1.3.4 Povětrnostní situace

Počasí nad střední Evropou je ovlivněno různými vzduchovými hmotami. Výsledkem je poměrně široká paleta různých projevů počasí. Pro lepší předpovídání počasí je vytvořena typizace různých povětrnostních situací, která respektuje přirozené cirkulační cykly. Mezi časté povětrnostní situace ve střední Evropě patří: západní cyklonální situace, anticyklóna anebo brázda nízkého tlaku nad střední Evropou.

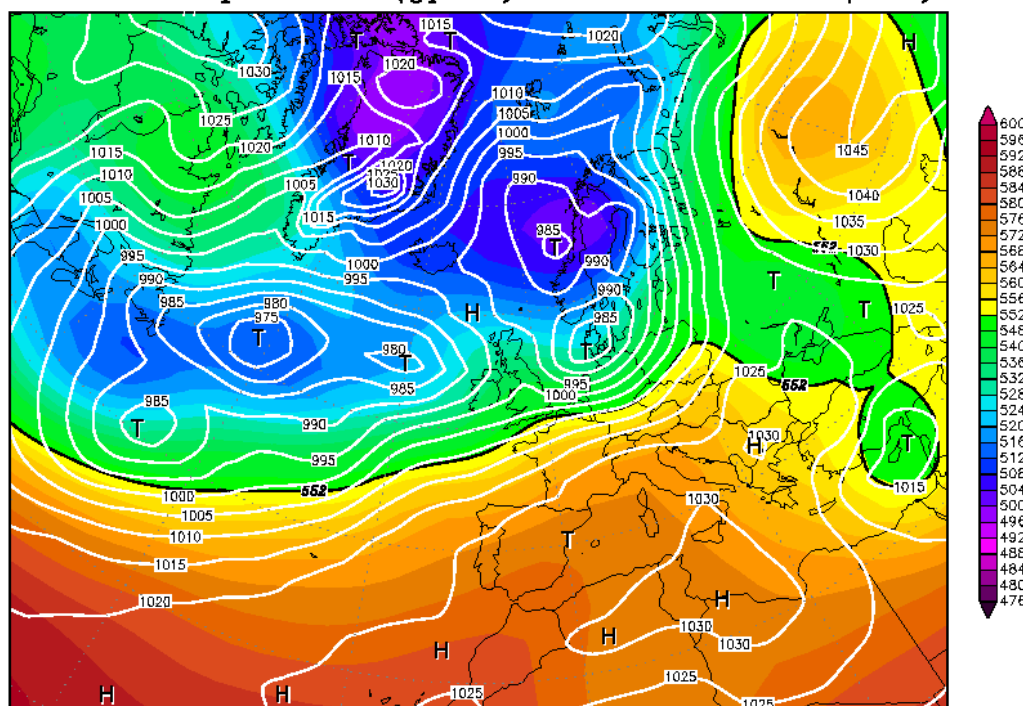
1. *Západní cyklonální situace (Wc)*

Západní cyklonální situace je charakteristická značným vlivem Atlantského oceánu, kdy se u Azorských ostrovů nachází tlaková výše. Přesun frontálních systémů je řízen tlakovou níží pohybující se z oblasti Islandu směrem k jižní Skandinávii. Při vysokém horizontálním tlakovém gradientu dosahuje rychlost větru značných hodnot. Tyto rychle se přesunující fronty jsou doprovázeny značnou oblačností zasahující od Skandinávie přes celou střední Evropu až do Středomoří. Postupující fronta se pohybuje poměrně rychle. Teplá fronta rychlostí okolo 40 km/h a studená fronta až 80 km/h.[30]

Pokud tato situace nastane během konce jara nebo začátkem léta, bude převládat západní oceánské proudění, tento jev je nazýván Medardovská cirkulace. Během letních měsíců je počasí charakteristické nižšími denními teplotami a v průběhu zimy nepřináší velké mrazy. V nižších polohách jsou dešťové srážky střídány sněhovými, ve vyšších polohách jsou častější sněhové srážky.[30]

01FEB2004 00Z

500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



Daten: Reanalysis des NCEP
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

Obrázek 9: Příklad západní cyklonální situace dne 1.2.2004

Zdroj: [41]

2. Anticyklóna nad střední Evropou (A)

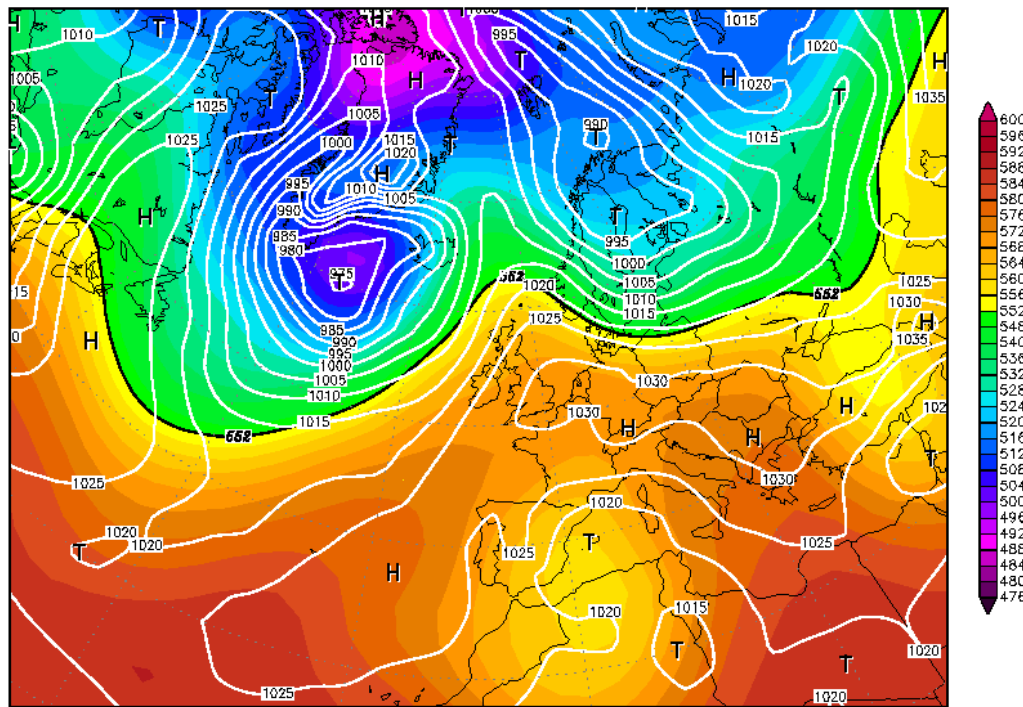
Anticyklóna nad střední Evropou je jednou z nejčastějších povětrnostních situací v naší oblasti. Tento typ většinou vzniká z výběžku azorské anticyklóny, který pronikne mnohdy i daleko na sever, a právě tam se od něho oddělí jádro vysokého tlaku. Vzniklá situace brání proniknutí frontálních poruch do oblasti střední Evropy. V oblasti tlakové výše jsou sestupné vzduchové proudy a ty jsou nevhodné pro vznik oblačnosti, proto bude následovat teplé a slunné počasí.[30]

Výskyt anticyklóny nad střední Evropou je velmi častý v letních a podzimních měsících. Od začátku srpna do konce října je tímto typem počasí ovlivněno 20% dnů, přičemž se v celé oblasti projevuje silný vliv místních orografických poměrů.[30]

V letních měsících se srážky vyskytují pouze ojediněle, a to ve formě bouřek. V zimním období se vyskytují nízké srážkové úhrny v podobě mrholení, po celém území převládá nízká oblačnost.

08DEC2004 00Z

500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



Daten: Reanalysis des NCEP
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

Obrázek 10: Příklad anticyklóny nad střední Evropou dne 8.12.2004

Zdroj: [41]

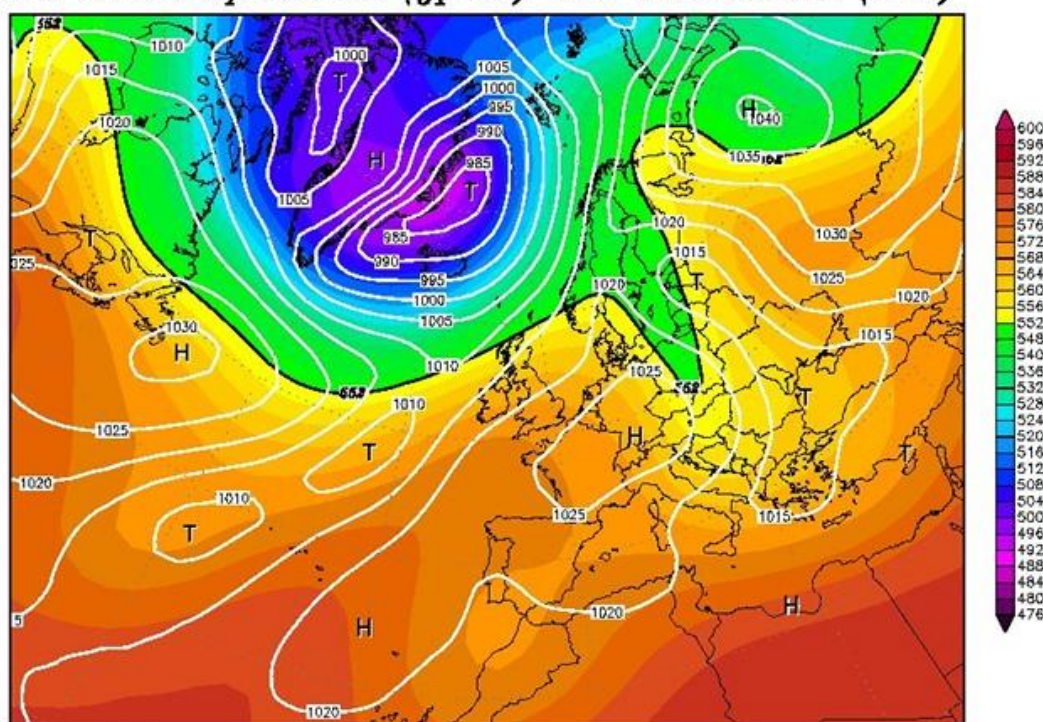
3. *Brázda nízkého tlaku nad střední Evropou (Bc)*

Pro tento povětrnostní typ je typická předpověď: Zataženo s občasným deštěm nebo zataženo s občasným sněžením. Po celé Evropě se při této situaci nenachází oblast vyššího tlaku vzduchu, rozdílné jsou pouze hodnoty teploty ovzduší. Nižší teplotu naměříme převážně v západní Evropě, kam po zadní straně brázdy nízkého tlaku vzduchu proudí chladnější oceánský vzduch od severozápadu, vyšší hodnoty teploty budou ve východní Evropě, a to v důsledku jihozápadního proudění po přední straně brázdy. Ve střední Evropě může docházet k výrazným teplotním kontrastům, které mohou zapříčinit nebezpečné jevy, jako jsou během léta záplavy nebo v zimě sněhové kalamiy.[30]

Celkové roční úhrny srážek jsou velmi ovlivněny četností brázd nízkého tlaku vzduchu. Brázdy nízkého tlaku během zimních měsíců přinášejí časté sněžení. V jarních, letních a podzimních měsících přináší brázda nízkého tlaku vysoké srážkové úhrny.[30]

28OCT1918 00Z

500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



Daten: 20th Century Reanalysis der NOAA
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

Obrázek 11: Příklad brázdy nízkého tlaku 28.10.1918

Zdroj: [42]

4. **Přehled povětrnostních situací**

Wc - západní cyklonální situace

Wcs - západní cyklonální situace s jižní dráhou

Wa - západní anticyklonální situace

Wal - západní anticyklonální situace letního typu

NWc - severozápadní cyklonální situace

NWa - severozápadní anticyklonální situace

Nc - severní cyklonální situace

NEc - severovýchodní cyklonální situace

NEa - severovýchodní anticyklonální situace

Ec - východní cyklonální situace

Ea - východní anticyklonální situace

SEc - jihovýchodní cyklonální situace
SEa - jihovýchodní anticyklonální situace
Sa - jižní anticyklonální situace
SWc1 - jihozápadní cyklonální situace
SWc2 - jihozápadní cyklonální situace
SWc3 - jihozápadní cyklonální situace
SWa - jihozápadní anticyklonální situace
B - brázda nízkého tlaku nad střední Evropou
Bp - brázda postupující přes střední Evropu
Vfz - vchod frontální zóny
C - cyklóna nad střední Evropou
Cv - cyklóna výšková
A - anticyklóna nad střední Evropou
Ap - putující anticyklóna

1.3.5 Povětrností singularity

Povětrnostními singularitami jsou nazývány poměrně výrazné pravidelné odchylky denních hodnot jednotlivých meteorologických prvků od jejich shlazeného průměrného chodu během roku. Odchylky jsou podmíněny zvýšeným výskytem konkrétních povětrnostních situací v dané oblasti a jsou vázány na určité období v roce. K nejvýznamnějším povětrnostním singularitám ve střední Evropě patří poměrně deštivé a chladné „medardovské“ počasí v červnu, babí léto, jež je vyvolávané zvýšenou četností tlakových výší v září a říjnu, anebo vánoční obleva, která souvisí se zesíleným jihozápadním prouděním vzduchu na konci roku. Vzhledem k nepravidelnosti nástupu v jednotlivých letech k povětrnostním singularitám nemůžeme počítat tzv. ledové muže.[30]

1. Medardovské počasí

Medardovské počasí přichází ve střední Evropě v období června až začátku července a má chladnější charakter s velkou oblačností a srážkami. Hodnoty jednotlivých meteorologických prvků poměrně značně kontrastují

s hodnotami předchozích dnů. Tato situace je vyvolávána dlouhotrvajícím přesunem mořského polárního vzduchu z oblasti Atlantiku do vnitrozemí Evropy. Chladnější mořský vzduch se nepřesouvá nad prohřátý kontinent plynule, ale spíše ve vlnách oddělených přestávkami se slunným počasím.[30]

2. Babí léto

Tato singularita je charakteristická suchým, slunným a teplým, málo větrným počasím v období září a října. Začátek se projevuje velkým rozdílem teploty ovzduší mezi chladnější nocí a teplým dnem a také sníženou viditelností tlumící nejen dopadající, ale i vyzařované záření. To má za následek méně výrazné teplotní kolísání, než je např. na jaře při sušším a čistém polárním vzduchu. Příčinou babího léta je poměrně stálá tlaková výše nad jižní a střední Evropou.[30]

3. Vánoční obleva

Vánoční obleva je typická poměrně teplým a vlhkým počasím při proudění mořského vzduchu od jihozápadu až západu, vyskytující se mezi Vánocemi a Novým rokem. Tomuto období obvykle předchází období tužších mrazů v první polovině prosince. V nižších a středních polohách se obvykle projevuje deštěm a táním sněhové pokrývky, naopak ve vyšších polohách, kde teplota vzduchu příliš nevystoupí nad nulu, může i vydatně sněžit.[30]

4. Ledoví muži

Ledoví muži se díky nepravidelnosti nástupu v jednotlivých letech výrazněji neprojevují na křivkách průměrného ročního chodu teploty, proto nejsou zařazeni mezi povětrnostní singularity. Ochlazení je vyvoláno nástupem studeného vzduchu od severu nebo severozápadu.[30]

1.3.6 Severoatlantická oscilace

Severoatlantickou oscilaci popsal roku 1920 Gilbert Walker, ale její projevy cyklického střídání teplot mezi Grónskem a Evropou byly známy již mnohem dříve. Při teplé zimě v Evropě zažívalo Grónsko zimu krutou a naopak.

Index severoatlantické oscilace (NAO) je vypočítáván ze změn tlaku vzduchu v severní oblasti Atlantského oceánu. Tento index je zejména ovlivněn hodnotami permanentních tlakových center, jimiž jsou Azorská tlaková výše a Islandská tlaková níže. NAO je vypočten z hodnot barometrického tlaku ve středu tlakových útvarů.[31]

Severoatlantická oscilace se projevuje dvěma způsoby. Při kladných hodnotách NAO indexu mluvíme o kladné fázi, v opačném případě o záporné fázi. Jsou-li oba útvary výrazně vyvinuté, nad Islandem zaznamenáme nízké hodnoty barometrického tlaku a nad Azorskými ostrovy měříme vysoký barometrický tlak, pak nastává kladná fáze. Tato situace podporuje zonální proudění větru západojižního směru přinášejícího do Evropy v zimním období teplejší počasí bohaté na srážky. Tlakové útvary a frontální systémy pak postupují přes Evropu. Záporná fáze je charakteristická chladnějším počasím. Oba řídicí tlakové útvary jsou vyvinuty jen slabě, nedochází k západnímu proudění teplejšího vzduchu a vítr vane meridionálním severojižním směrem. Pak se do Evropy přesouvá chladný vzduch ze severu i z oblastí Arktidy.[31]

1.3.7 Příčiny proudění vzduchu

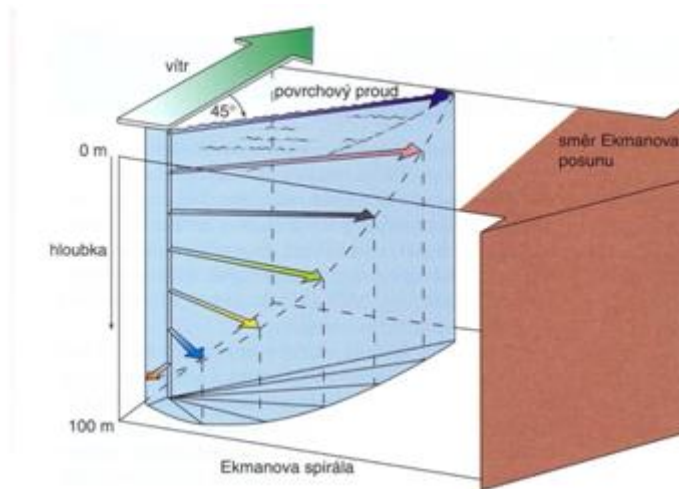
Proudění vzduchu je zapříčiněno několika silami, mezi něž patří síla horizontálního tlakového gradientu, Coriolisova síla, síla tření a odstředivá síla. Velikost horizontálního tlakového gradientu dává vzduchu zrychlení. Když se vzduch dostane do pohybu, začne na něj působit odstředivá síla rotace Země a následně i Coriolisova síla.[29]

1. Gradientové a geostrofické proudění

Vzduchové hmoty jsou velké objemy vzduchu s horizontálně nevýraznými gradienty meteorologických prvků. Pokud vznikne v horizontální rovině rozdíl hodnot atmosférického tlaku, začne se následně vzduch nejdříve posunovat ve směru horizontálního tlakového gradientu, tedy ve směru kolmo na izobary. Na vzdušné hmoty také působí Coriolisova síla, která také změni směr pohybu vzduchových mas. Se vzrůstající rychlostí posunu vzdušných hmot vzrůstá i Coriolisova síla, následně dochází k ustálenému proudění větru, kdy síla barického gradientu je v rovnováze se silou Coriolisovou. Vzdušné hmoty pak proudí ve směru přímkových izobar tak, že nižší tlak se nachází po levé straně a vyšší tlak na pravé straně izobary. Tento vítr se nazývá geostrofický.[29]

Ve skutečnosti se vzduch pohybuje podél zakřivených izobar. V každém okamžiku a místě musí být v rovnováze síla Coriolisova, síla barického gradientu a odstředivá síla. V anticyklónách působí odstředivá síla ve směru horizontálního barického gradientu, v cyklónách naopak proti směru této síly. Při dosažení rovnováhy těchto sil mluvíme o gradientovém větru. Vektorem gradientového větru je tečna k izobaře.[29]

Geostrofický a gradientový vítr jsou pouze idealizované modely větru. Ve skutečnosti je proudění větru až do výšky 1–1,5 km nad zemským povrchem ovlivňováno třením o povrch Země. Toto tření posun vzdušných hmot zpomaluje a mění také jeho směr. Změnu směru a rychlosti větru je možné vyjádřit pomocí Ekmanovy spirály. Proudnice se se vzrůstající výškou stácejí na jižní polokouli více doleva a na severní polokouli více doprava.[29]

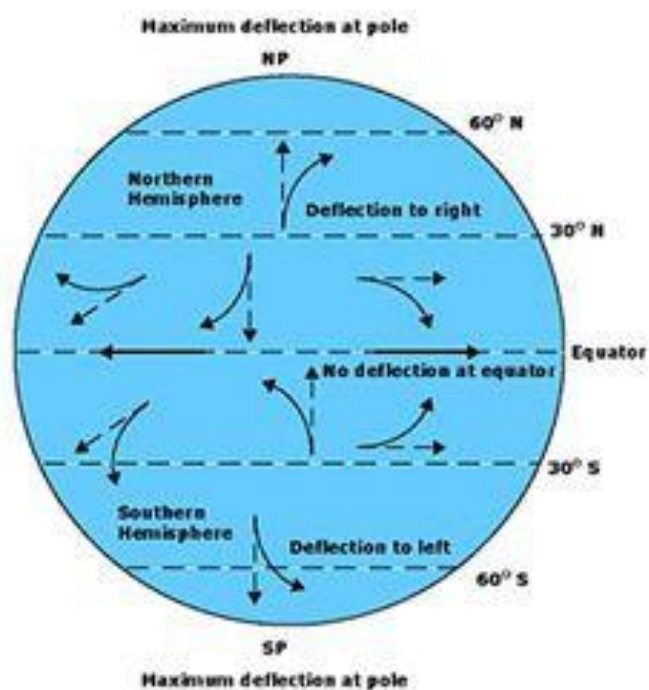


Obrázek 12: Ekmanova spirála

Zdroj: [43]

2. Coriolisova síla

Jedná se o uchylující sílu zemské rotace, která ovlivňuje vodorovné proudění vzduchu na zeměkouli. Tato síla se uplatňuje ve vztažné soustavě pevně spjaté s rotující Zemí. Příčinu tohoto jevu objevil francouzský matematik a strojní inženýr Gustave-Gaspard de Coriolis (1792–1843) v roce 1835.[9]



Obrázek 13: Coriolisova síla

Zdroj: [53]

Na obrázku č. 13 je původní rotací neovlivněný směr pohybu vzduchu znázorněn přerušovanou čarou, skutečný směr pohybu, který je ovlivněný Coriolisovou silou, je zobrazen čarou plnou.

Coriolisova síla je přímo úměrná zeměpisné šířce a rychlosti pohybu vzdušných hmot. Coriolisova síla má horizontální a vertikální složku. Vertikální složka síly je ve srovnání se silou zemské tíže o čtyři řády nižší a v meteorologii nemá velký vliv, tato složka síly je nejvyšší na rovníku. Horizontální složka síly je na rovníku nulová, na pólech je její velikost nejvyšší. Působí vždy kolmo ke směru relativního pohybu uvažovaného tělesa vůči Zemi. Dráhu pohybu vzdušných hmot uchyluje na jižní polokouli doleva a na severní polokouli doprava.[1]

Coriolisův parametr f určující velikost odklonu vzdušných hmot je dán vztahem:

$$f = 2 \cdot \Omega \cdot v \cdot \sin\varphi \quad (1)$$

kde

f je Coriolisův parametr

Ω je velikost úhlové rychlosti zemské rotace ($\Omega = 7,29 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$)

v je rychlost relativního pohybu objektu vůči rotující Zemi

φ je zeměpisná šířka

Právě Coriolisova síla způsobuje zpomalení vyrovnávání vodorovných tlakových rozdílů v ovzduší. Posun vzdušných mas má spirálovitý charakter vždy ve směru tlakového gradientu (spádu), to umožňuje existenci tlakových útvarů, jako jsou tlakové výše a tlakové níže.

Důsledek Coriolisovy síly je popsán Buys-Ballotovým zákonem. Pokud stojíme na severní polokouli tváří proti větru, pak se tlaková níže nachází

po naší pravé straně, pokud se nacházíme na jižní polokouli, pak je tomu opačně. Pravidlo vychází z proudění větru po izobarických čarách kolem tlakových výší a níží.

Zákon je pojmenován po nizozemském geologovi, meteorologovi a admirálovi Christophu Buys-Ballotovi (1814–1890), který jej jako první empiricky ověřil. Buys-Ballot byl jedním z prvních, kdo viděl potřebu mezinárodní spolupráce v meteorologii, v roce 1873 se stal prvním předsedou Mezinárodní meteorologické organizace, která je předchůdkyní dnešní Světové meteorologické organizace (WMO).

1.4 Tlak

V roce 1613 italský astronom a fyzik Galileo Galilei (1564–1642) jako první odhadl hmotnost vzduchu. Prohlásil, že voda je 460krát těžší než vzduch. Ve skutečnosti je voda těžší 816krát.[5]

Atmosférický tlak je síla vyvolaná tíhou vzduchového sloupce sahajícího až k horní hranici atmosféry.

Tlak vzduchu je jedním ze základních meteorologických prvků. Nejvíce je ovlivňován teplotou vzduchu, obsahem vodních par a nadmořskou výškou. V případě těžšího chladnějšího vzduchu ubývá tlak směrem vzhůru rychleji, naopak v případě lehčího teplejšího vzduchu ubývá tlak směrem vzhůru pomaleji. Nesmíme zanedbat ani zeměpisnou šířku související se změnou tíhového zrychlení.

1.4.1 Tlak v kapalinách

Tlak p patří mezi nejdůležitější veličiny v hydromechanice. Obecně tlak vyjadřuje plošný účinek síly F a je určen silou působící kolmo na jednotku plochy S . V běžné technické praxi definujeme tlak jako poměr elementární síly dF

působící ve směru normály na element plochy dS . Tento vztah vyhovuje pro definici tlaku u plynů i kapalin.

$$p = \frac{dF}{dS} \quad (2)$$

kde

F je síla působící na rovinnou plochu

S je plocha

Pro zjištění tlaku v nějakém místě, když plocha není rovinná, je tlak definován pomocí následujícího vztahu.

$$p = \frac{|\Delta F_n|}{\Delta S} \quad (3)$$

kde

ΔF_n je normálová složka působící síly ΔF , tzn. složka kolmá na plochu

Tlak bývá udáván jako:

- absolutní – tlak vztažený k absolutní tlakové nule
- relativní – přetlak nebo podtlak

Dále můžeme rozlišit: přetlak, podtlak, rozdílový tlak, atmosférický tlak, vakuum, za které bývá v technické praxi zpravidla označován tlak výrazně nižší, než je tlak barometrický, nejen podtlaky blízké absolutní nule.

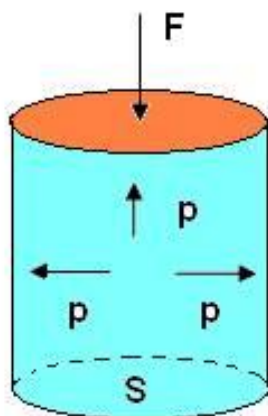
Tlak v kapalině může být vyvolán vnější silou, působící na povrchu kapaliny z vnějšku nebo vlastní tíhou kapaliny.

1. Tlak v kapalině vyvolaný vnější silou

Tlak v kapalině vyvolaný vnější silou se na povrchu kapaliny přenáší jako účinek vnějších sil, jež na kapalinu působí zvnějšku. Tento tlak může být způsoben:

- vnější silou působící např. na píst v uzavřeném prostoru,
- tlakem kapaliny, např. stlačeným plynem působícím na povrch kapaliny v uzavřené nádobě,
- tlakem vzdušného sloupce atmosféry působícím na hladinu v otevřeném prostoru.

Pokud neuvažujeme působení tíhového pole Země, platí pro tlak Pascalův zákon: „Tlak vyvolaný vnější silou, která působí na kapalně těleso v uzavřené nádobě, je ve všech místech kapaliny stejný.“



Obrázek 14: Pascalův zákon

Zdroj: [44]

Pascalův zákon vypovídá o přenosu tlaku do libovolného místa v objemu kapaliny, přičemž se tlak nikde neztrácí. Přenos tlaku je zprostředkován pohybem částic kapaliny a rozkladem vzájemných sil mezi těmito částicemi do všech směrů. Tlačení na kapalinu vzroste tlak ve všech místech stejně, ale rozdíly z hydrostatického tlaku zůstanou.

Pascalův zákon je možné vyjádřit rovnicí:

$$p_2 - p_1 = -\rho g(h_2 - h_1)$$

(4)

kde

h_1, h_2 jsou dvě rozdílné výšky kapaliny

ρ je hustota kapaliny

g je tíhové zrychlení.

Pascalův zákon můžeme považovat za statický limit Bernoulliho rovnice. Tento zákon platí zcela přesně pro ideální kapalinu. Reálné kapaliny nejsou dokonale nestlačitelné a změny tlaku se v nich šíří pouze konečnou rychlostí. Pascalův zákon platí i pro plyny, tj. stlačitelné tekutiny.

2. Tlak v kapalině způsobený vlastní tíhou kapaliny

Nachází-li se kapalně těleso v tíhovém poli, projeví se tíhová síla vznikem tlaku v kapalině, takto vzniklý tlak se nazývá hydrostatický. Hydrostatický tlak působí v kapalině, jež je v dané souřadné soustavě v klidu a na niž působí nenulový součet gravitační a setrvačné síly, nejběžněji se jedná o nenulové tíhové pole. Obdobou hydrostatického tlaku je tlak aerostatický, který působí v plynech.

Tíhová síla má podobný vliv jako jiná vnější síla působící na kapalinu. Volný povrch kapaliny se snaží zaujmout polohu kolmou vůči tíhové síle. V menších objemech je volná hladina kapaliny vždy vodorovná, hladiny velkých vodních ploch, jako jsou oceány, jsou zakřiveny podle povrchu Země.

Hydrostatickým tlakem působí kapalina na tělesa, jež jsou do ní ponořena, na stěny nádoby nebo na své vlastní části. Výše položené části působí svou tíhou na části kapaliny níže položené.

Hydrostatický tlak působí všemi směry, vzhledem k rozkladu sil mezi částicemi kapaliny do různých směrů. Hydrostatický tlak je přímo úměrně závislý na hloubce h , hustotě kapaliny a na tíhovém zrychlení.

Základní vzorec pro tlak je vyjádřen vztahem:

$$p = \frac{F}{S} \tag{5}$$

kde sílu F je možné napsat jako tíhovou sílu kapaliny F_G

$$p = \frac{F_G}{S} \tag{6}$$

protože tíhová síla je součinem tíhového zrychlení a hmotnosti tělesa, můžeme napsat:

$$p = \frac{m \cdot g}{S} \tag{7}$$

hmotnost tělesa je součinem jeho hustoty a objemu, proto platí:

$$p = \frac{\rho \cdot V \cdot g}{S} \tag{8}$$

protože počítáme s elementem kvádrového tvaru, můžeme vzorec napsat ve tvaru:

$$p = \frac{\rho \cdot S \cdot h \cdot g}{S} \tag{9}$$

kde

h je výška hladiny od měřeného místa

S je obsah podstavy kvádrů

po následné úpravě získáme vztah:

$$p = \rho \cdot g \cdot h$$

(10)

1.4.2 Tíhová síla a zrychlení

Výsledná tíhová síla obecně nesměruje do středu Země. Úhel mezi gravitační a odstředivou silou je spojen se zeměpisnou šířkou. Zeměpisnou šířkou je také podmíněna tíhová síla, a to co do velikosti i směru.

Tíhová síla tělesům uděluje tíhové zrychlení. V naší zeměpisné šířce je hodnota tíhového zrychlení $g = 9,81 \text{ ms}^{-2}$.

1.4.3 Barometrická rovnice

Se vzrůstající nadmořskou výškou atmosférický tlak vzduchu klesá. Konkrétně do výšky 700 m n. m. je měřitelný pokles o 1 hPa každých 8 m. Vzhledem ke značné stlačitelnosti plynů nemůže být barometrický tlak lineární funkcí výšky, jako tomu je u hydrostatického tlaku. Pokud se hustota mění s tlakem podle Boyleova-Mariottova zákona, je možné v atmosféře vymezit vrstvu vzduchu s hustotou ρ , nacházející se ve výšce h . Základní rovnice statiky ovzduší vychází ze vztahu platného pro hydrostatický tlak.

Základní rovnice statiky ovzduší je dána vztahem:

$$dp = -\rho \cdot g \cdot dh \quad (11)$$

kde

- ρ je hustota ovzduší
- g je gravitační zrychlení ($9,81 \text{ ms}^{-2}$)
- dh je změna výšky od zemského povrchu
- dp výsledná změna tlaku

Dle Boyleova-Mariottova zákona platí při stálé teplotě vztah:

$$\rho = \frac{\rho_0}{p_0} \cdot p \quad (12)$$

kde

- ρ_0 je známá základní hustota
- p_0 je známý základní tlak
- p je tlak

Po dosazení dostaneme vztah:

$$\frac{dp}{p} = -\frac{\rho_0}{p_0} \cdot g \cdot dh \quad (13)$$

po vyřešení této diferenciální rovnice a následné úpravě získáme vztah:

$$p = p_0 \cdot e^{-\frac{\rho_0 \cdot g \cdot \Delta h}{p_0}} \quad (14)$$

kde

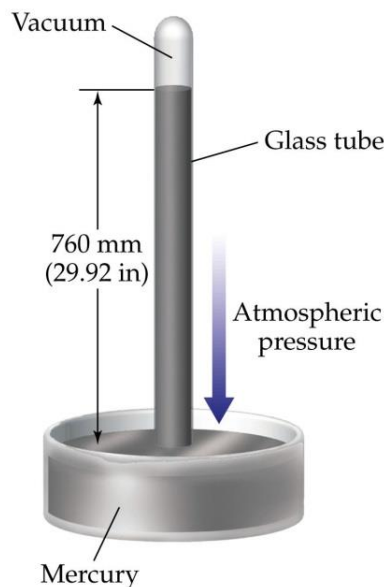
Δh je změna nadmořské výšky od výšky o tlaku p_0

Tento vztah bývá označován jako barometrická rovnice.

Pro možnost srovnání údajů tlaku vzduchu naměřených ve stanicích s různou nadmořskou výškou je nutné, pomocí barometrické rovnice, hodnoty tlaku přepočítat na tlak na hladině moře. Tato korekce je závislá na venkovní teplotě vzduchu.

1.4.4 Měření tlaku

Představu o tlaku vzduchu měl již Aristoteles. Působení této síly na uzavřený rtuťový sloupec objevil roku 1643 italský matematik a fyzik Evangelista Torricelli (1608–1647). Torricelli provedl první zdařilý experiment, kterým bylo prokázáno působení tlaku vzduchu. Torricelli si také povšiml, že tlak vzduchu se během času mění – hladina rtuti ve válci klesala a znovu stoupala. Díky experimentu si uvědomil, že tímto způsobem je možné tlak vzduchu měřit. Sestrojení prvního tlakoměru je připisováno italskému fyzikovi a Torricelliho příteli Vincenzu Vivianimu. Tímto způsobem vznikl první tlakoměr se skutečným vzduchoprázdnem, tzv. Torricelliho prázdnotou. [11]



Obrázek 15: Torricelliho pokus

Zdroj: [23]

Správnost Torricelliho názoru o ubývání tlaku vzduchu s nadmořskou výškou prokázal roku 1648 francouzský matematik, teolog a fyzik Blaise Pascal (1623–1662) se svým švagrem Périerem. Experiment založený na přesných srovnávacích měřeních s Torricelliho trubicí byl proveden na hoře Puy de Dome (1 465 m n. m.) a v Clermontu (470 m n. m.). Pascal jako první spočítal celkovou hmotnost atmosféry Země, která podle něho činila $8,23 \cdot 10^{18}$ liber $\approx 4 \cdot 10^{18}$ kg. Dnes je pro hmotnost atmosféry uváděna hodnota $5,1 \cdot 10^{18}$ kg. Pascalův výpočet se od dnešních odhadů řádově neliší.

Pascal prováděl také další pokusy se rtuťovým sloupcem, při kterých zjistil, že výška rtuťového sloupce v trubici se snižuje se stoupající nadmořskou výškou, tím byl položen základ pro měření nadmořských výšek pomocí barometru. Pascal také formuloval zákon o přenášení tlaku v kapalinách, který dnes známe jako Pascalův zákon.

Německý fyzik, vědec a vynálezce Otto von Guericke (1602–1686) roku 1660 předpověděl na základě výrazně silného poklesu tlaku blížící se vichřici.[2]

Anglický astronom Edmund Halley (1656–1742) roku 1685 vyslovil myšlenku, že přibývá-li výška řadou aritmetickou, ubývá tlak a hustota vzduchu řadou geometrickou. Tato věta se stala základem barometrického vzorce.[2]

Měřením barometrického tlaku se také zabývala celá řada dalších fyziků. Daniel Gabriel Fahrenheit (1686 – 1736) vyráběl vlastní výškoměry a barometry. Zajímavé jsou i Goethovy barometry původně pocházející z 19. století. Tyto barometry se prodávají s určitými úpravami dodnes.

Pravidelná meteorologická měření byla v Čechách zahájena v roce 1752 v Praze na Klementinské hvězdárně. Toto měření pokračuje dodnes. Prvních 33 let měření teploty a tlaku vzduchu je neúplných a mnohdy byla prováděna odhadem, proto se za počátek považuje až rok 1775.[4]

1.4.5 Tlakoměry

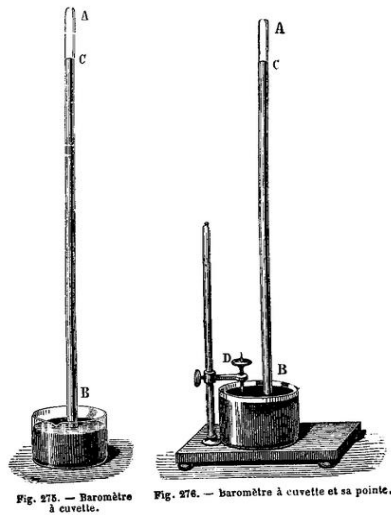
Pro přesné měření je velmi důležitá volba správného měřicího přístroje s ohledem na velikost měřeného tlaku. Běžně se měří tlaky od 10^{-12} až do 10^{12} Pa. Žádný z měřicích přístrojů není schopen měřit celý tento rozsah, ale pouze určitou část rozsahu.

Tlakoměry můžeme rozdělit do dvou základních hledisek:

- dle použití
 - manometry – přístroje pro měření přetlaků
 - barometry – přístroje pro měření barometrického tlaku
 - vakuometry – přístroje pro měření podtlaků
 - mano-vakuometry – přístroje pro měření podtlaků i přetlaků
- dle principu měření
 - pístové
 - kapalinové
 - deformační
 - elektrické

1. *Rtuťový barometr*

Tlakoměr je zařízení používané pro měření tlaku vzduchu. Základní rtuťové barometry jsou založeny na principu Torricelliho pokusu (viz Obrázek 15: Torricelliho pokus). Tlak vzduchu je v rovnováze s tíhou rtuťového sloupce. Stupnice je obvykle členěna po 0,1 mm dílcích. U takto získaných hodnot tlaku je nutná korekce na teplotu rtuti 0°C a normální tíhové zrychlení. K zaznamenání změn tlaku vzduchu v čase se využívají barografy.

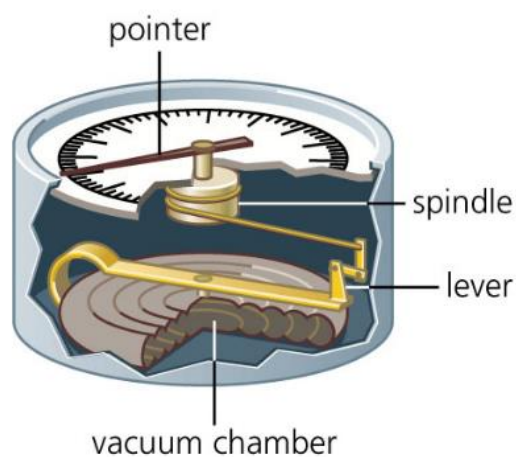


Obrázek 16: Torricelliho rtuťový barometr

Zdroj: [25]

2. *Aneroid*

První aneroid – pérový tlakoměr sestavil francouzský vynálezce a mechanik Lucien Vidie (1805–1866). Principem je tenkostěnná uvnitř vzduchoprázdná kovová krabička, tzv. Vidieho dóza, která se působením atmosférického tlaku deformuje. Míra deformace se přenáší na ručičku ukazující velikost atmosférického tlaku na stupnici. Práce s aneroidem byla oproti práci se rtuťovým tlakoměrem podstatně jednodušší. Přístroj je menší, uzavřený a odolnější. Nehrozí únik toxické rtuti.[11]



Obrázek 17: Aneroid

Zdroj: [26]

3. **Piezelektrické senzory**

Pro snímání hodnoty tlaku je využit piezelektrický jev. U některých druhů krystalů dochází při mechanické deformaci ke vzniku elektrického náboje. Piezelektrický jev můžeme pozorovat i v opačném pořadí, kdy je krystal mechanicky rozkmitán pomocí střídavého elektrického pole.

Tyto charakteristické vlastnosti vykazují krystaly křemene, titaničitanu barnatého nebo olovnatého.

4. **Piezorezistivní senzory**

Piezorezistivní senzory k měření využívají změnu hodnoty odporu vodiče během mechanického namáhání.

Čistý křemík je nutné modifikovat příměsí stopových prvků, jeho měrný odpor je pak výrazně závislý na mechanickém namáhání. Podle volby konkrétního akceptoru vzniká vodivost typu P nebo N. Tyto dvě vodivosti se mimo jiné odlišují znaménkem součinitele závislosti odporu na mechanickém napětí.[36]

Změnu odporu piezorezistoru vyvolanou tlakem můžeme popsat vztahem:

$$\frac{\Delta R}{R} = \alpha \cdot p = K \cdot \frac{\Delta l}{l} \tag{15}$$

kde

α je tlakový součinitel

p je tlak

K je součinitel závislosti odporu na mechanickém napětí [37]

Pro měření tlaku je u piezorezistivních snímačů využita mechanicky namáhaná destička z křemíku s vysokým odporem. Na výbrus jsou vytvořeny difuzí akceptorů vodivé cestičky, často uspořádané do Wheatsonova můstku.

Destička je obvykle připájena na nosnou skleněnou destičku a následně nalepena na kovovou podložku se stejnou teplotní roztažností.[36]

Piezorezistivní senzory poskytují vysoký využitelný signál, jsou dlouhodobě stabilní, mají nízkou hysterezi a vysokou reprodukovatelnost měření. Mezi nevýhody patří vyšší citlivost křemíkové destičky a drobných přívodních vodičů na agresivní látky nebo okolní vlhkost. Z tohoto důvodu se používání nejjednodušších čidel omezuje pouze na měření méně agresivních plynů.[36]

1.4.6 Jednotky

Vyjádření tlaku v jednotkách je rozmanité. Volba jednotek závisí na velikosti měřeného tlaku a na tom, je-li způsoben tíží nebo vnější silou, vždy se však jedná o jednotku vyjádřenou jednotkovou silou působící kolmo na jednotkovou plochu.[11]

Barometry vyráběné v současnosti mívají často dvě stupnice, jednu v dříve používaných torrech a druhou v milibarech nebo hektopascalech.

1. *Bar*

Bar je vedlejší jednotkou tlaku v soustavě SI. Tato jednotka byla určena především k měření barometrického tlaku. Pojmenování jednotky bar navrhli v roce 1902 Helland-Hausen a Sandström na návrh Th. W. Richardse, a to převodem:

$$1 \text{ bar} = 10^6 \text{ dyn} \cdot \text{cm}^{-2} \quad (16)$$

Jednotkou tlaku v absolutní soustavě je síla 1 dynu ($\text{dyn} = \text{g} \cdot \text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$), jež působí kolmo na plochu 1 cm^2 . Tlak jednoho baru je číselně roven jednomu megadynu působícímu kolmo na plochu 1 cm^2 . Absolutní jednotkou síly je taková síla, která hmotě 1 g udělí zrychlení 1 cm s^{-2} . Této jednotce říkáme dyn. V metrické soustavě je jednotkou síly taková síla, která hmotě 1 kg udělí zrychlení 1 m s^{-2} . [11]

Stálý mezinárodní meteorologický výbor přijal roku 1913 usnesení, podle kterého se měly údaje o stavu ovzduší uvádět v milibarech anebo v milimetrech sloupce kapalinové náplně barometru s náležitou redukcí.

Jeden bar odpovídá přibližně starší jednotce tlaku jedné atmosféry. Jedna atmosféra odpovídá přibližně normálnímu atmosférickému tlaku na hladině moře.

Jedna tisícina baru se označuje jako milibar, ten je číselně roven jednomu hektopascalu.

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa} \Rightarrow 1 \text{ mbar} = 1 \text{ hPa} = 100 \text{ Pa} \quad (17)$$

2. *Torr*

Torr je starší jednotkou hydrostatického tlaku nazvanou podle italského přírodovědce J. E. Torricelliho (1608–1647). Tlak 1 torr je číselně roven hydrostatickému tlaku vyvolanému 1mm sloupcem rtuti. Jednotka torr byla roku 1980 zrušena a nahrazena jednotkou soustavy SI – pascal (Pa).[11]

$$1 \text{ torr} = 1 \text{ mm Hg} \approx 133,322 \text{ Pa} \quad (18)$$

Přesnější převod jednotek v torrech na jednotky v pascalech je dán definicí fyzikální atmosféry, jež byla původně definována jako 760 mm Hg a nyní je definována jako 101 325 Pa.

$$1 \text{ torr} = \frac{101325}{760} \text{ Pa} \approx 133,322368 \dots \text{ Pa} \quad (19)$$

3. *Pascal*

Pascal je jednotkou tlaku v soustavě SI, udává velikost síly působící na jednotkovou plochu 1 m². Jednotka nese jméno po francouzském fyzikovi a matematikovi Blaise Pascalovi (1623–1662). Vzhledem k tomu, že pascal je malá jednotka, používají se častěji její násobky. V meteorologii se obvykle atmosférický tlak měří v hektopascalech (hPa).[11]

V minulosti se také používala jednotka pièze, které odpovídá 1 kPa.

Převod mezi hPa a mb je

$$1 \text{ hPa} = 100 \text{ Pa} = 1 \text{ mb} \quad (20)$$

Pascal je odvozená jednotka ze soustavy SI a jeho rozměr je

$$1 \text{ Pa} = \frac{N}{m^2} = \frac{kg}{m \cdot s^2} \quad (21)$$

1.5 Teplota

Teplota je mírou, jak rychle se molekuly pohybují. Teplo je souhrnná energie všech pohybujících se molekul. Částice se neustále srážejí s různou silou a v náhodném směru, z čehož plyne i náhodnost okamžité polohy molekul. U studeného vzduchu je průměrná střední molekulová vzdálenost i rychlost kmitání molekul nižší. Molekuly jsou více nahuštěny, jejich kinetická energie je malá, proto je studený vzduch hustší než vzduch teplý, proto teplý vzduch stoupá nahoru.[11]

Teplota vzduchu je meteorologickým prvkem vypovídajícím o tepelném stavu ovzduší. V meteorologii se teplotou vzduchu rozumí hodnota měřená v meteorologické budce přibližně ve výšce 2 m nad zemským povrchem s přesností na desetiny stupně. Místo měření je nutné zvolit s ohledem na minimalizaci vlivů okolí. Okolní předměty mohou velmi výrazně ovlivnit naměřené hodnoty. Pro předpověď počasí je obvykle udávána teplota vzduchu pro místa položená 400 m n. m.

Obor zabývající se měřením teploty se nazývá *termometrie*. Změnou teploty se mění i fyzikální vlastnosti hmoty. Tohoto jevu využíváme při měření teploty. Teploměr musí být v tepelné rovnováze s okolním vzduchem.

1.5.1 Měření teploty – historie

Myšlenkou měření teploty se zabýval již v druhém století před naším letopočtem matematik a konstruktér válečných strojů Filón Byzantský. První přístroj ke zjištění tepelných stavů – vzduchový termoskop – sestrojil v prvním století před naším letopočtem Herón Alexandrijský. Herónovy spisy studoval i italský přírodovědec Galileo Galilei (1564–1642), podle nich také přístroj sestrojil. Zdokonalení přístroje přinesl německý jezuita a vědec Gaspar Schott (1608–1666), který použil uzavřený systém s dvěma baňkami spojenými na koncích pomocí trubice tvaru U naplněné kapalinou. Jednalo se o rozdílový teploměr se vzduchem jako teploměrnou látkou. V roce 1631 francouzský lékař Jean Rey použil jako indikační látku vodu v otevřené baňce. První teploměr

tvarem podobný dnešním sestavil v roce 1641 Galileův žák, toskánský vévoda Ferdinand II. Tento teploměr byl naplněn líhem, sice se podobal dnešním teploměrům, ale stupnice byly libovolné, údaje se navzájem velmi lišily. Od roku 1720 se teploměry plnily rtutí.[2]



Obrázek 18: Termoskop

Zdroj:[27]

1.5.2 Teploměry

Zařízením měřícím teplotu je teploměr. Jedná se o významově matoucí výraz, z čistě jazykového hlediska by člověk čekal, že teploměrem se měří teplo, to se však měří pomocí kalorimetru. Teploměry jsou i součástí mnoha dalších měřicích zařízení sloužících k měření jiných meteorologických prvků, jako je tomu i v případě psychrometru určeného ke stanovení vlhkosti vzduchu.

Většina teploměrů pracuje na principu tepelné roztažnosti jednotlivých látek. K měření využíváme dilatační, odporové a termoelektrické teploměry.

1. Dilatační teploměry

Dilatační teploměry využívají změny objemu látek se stoupající teplotou. Naměřené hodnoty zobrazují přímo či nepřímo. Dilatační teploměry jsou děleny podle použité teploměrné látky na kapalinové, plynové nebo teploměry využívající roztažnosti pevných látek.

Dilatační teploměry pracují na principu délkové nebo objemové roztažnosti příslušné látky s měnící se teplotou, to je popsáno následujícími vztahy:

$$l = l_0(1 + \alpha\Delta\vartheta) \quad (22)$$

$$v = v_0(1 + \beta\Delta\vartheta) \quad (23)$$

$$p = p_0(1 + \beta\Delta\vartheta) \quad (24)$$

kde

l, v, p je výsledná hodnota délky, objemu, tlaku

l_0, v_0, p_0 je původní hodnota délky, objemu, tlaku

α je součinitel délkové teplotní roztažnosti

β je součinitel objemové teplotní roztažnosti

$\Delta\vartheta$ je teplotní rozdíl

Kapalinový teploměr

V těchto teploměrech se k měření teploty využívá teplotní objemové roztažnosti teploměrné kapaliny. Teploměr se skládá z rezervoáru s kapilárou a stupnice. S vyšší teplotou teploměrné médium (rtuť, líh) mění svůj objem a stoupá v kapiláře. Použitá kapalina by měla být neprůhledná pro usnadnění odečítání měřených hodnot. Citlivost kapilárových teploměrů roste s objemem rezervoáru a menším poloměrem kapiláry. Toto měření má přesnost na desetiny stupně.[11]

Jako teploměrné médium se v minulosti nejčastěji používala rtuť. Při rozbití teploměru však hrozilo nebezpečí vdechnutí toxických par uvolněných z rozlité rtuti a následné poškození dýchacích cest nebo otrava, z těchto důvodů od roku 2009 nesmí být rtuťové teploměry uváděny na trh. Dnes se nejčastěji kapilára teploměru plní galiem nebo obarveným lihem.

Plynové teploměry

Plynové teploměry využívají teplotní roztažnosti plynu, například dusíku, vodíku či helia, jímž je naplněno měřicí tělísko tvořící citlivou část stonku. Tlak plynu je převeden na výchylku ručky prostřednictvím mechanismu podobného jako u manometru s Bourdonovým perem. Plynový teploměr má vysokou přesnost a je odolný vůči mechanickým rázům i otřesům.[11]

Teploměry využívající roztažnosti pevných látek

Teplotní délková roztažnost je fyzikální jev, při kterém se délka tělesa zahřátého o určitou teplotu zvětší v daném směru o určitou délku.

Bimetalový teploměr tento princip využívá. Teploměr obsahuje pásek složený ze dvou kovů s různými teplotními součiniteli délkové roztažnosti. Změnou teploty se pásek ohýbá a pohyb se následně přenáší na ručku přístroje.[11]

2. Teploměry využívající elektrické jevy

Odporové teploměry

Měření využívá závislost elektrického odporu vodiče na teplotě. Zásadní součástí u tohoto typu teploměru je *termistor*.

Termistor je elektrotechnická součástka, jejíž elektrický odpor je závislý na teplotě. Termistory mají velký vnitřní odpor, odpor přívodních vodičů je proto zanedbatelný. Tyto součástky se vyrábějí z oxidů různých

kovů, např. Mn, Co, Ni, Cu, Ti, U aj. Oxid je rozemlet na velmi jemný prášek a s příměsí a pojidly za vysokého tlaku a teploty (přes 1000 °C) slisován na žádaný tvar. Termistory pracují pouze s malými proudy. Jedná se o velmi citlivý měřicí senzor.[11]

Termoelektrické teploměry

Termoelektrické teploměry k měření teploty využívají termoelektrický jev, při kterém je pohyb elektronů jako nositelů elektrického proudu významným způsobem ovlivněn teplotou. Termoelektrický jev popisuje proces přímé přeměny rozdílu teplot na rozhraní dvou kovů na elektrické napětí.[11]

Polovodičové teploměry

U polovodičových odporových teploměrů stejně jako u kovových odporových teploměrů dochází s měnící se teplotou ke změně elektrického odporu. Jedná se o závislost charakteristik polovodičového prvku (napětí přechodu P-N, zesilovací činitel) na teplotě. Polovodičové teploměry dělíme na monokrystalické a termistory, ty pak dále dělíme na pozistory a negastory.[11]

Monokrystalické teploměry se využívají zejména při měření extrémně nízkých teplot, kde je využito jejich velké citlivosti. Nejčastěji se k výrobě čidla používá germanium, křemík a indium.

Termistory se podle vlastností rozdělují na pozistory, u kterých se vzrůstající teplotou roste hodnota odporu, a na negastory, u nichž hodnota odporu se vzrůstající teplotou klesá. Na rozdíl od kovových odporových teploměrů mají podstatně vyšší teplotní koeficient, a to až 50x.

3. Kalibrace teploměrů

Digitální teploměry patří mezi Elektronická pracovní měřidla a jejich kalibrace a ověřování přesnosti je prováděno dle zákona č. 505/1990 Sb., o metrologii.

1.5.3 Stupnice a jednotky

Pro získání jednotných výsledků měření bylo nutné stanovit společné měřítko všech výsledků, jednotnou teplotní stupnici nezávislou na použitém měřidle.

Jeden z prvních pokusů o stanovení stupnice provedla v 16. století Akademie ve Florencii. Vědci použili spirálovitě stočenou trubičku rozdělenou na 300–400 totožných dílků.

Lineárním vkládáním hodnot mezi dvě pevně dané teploty bylo zavedeno mnoho stupnic, např. teplota rtuťová, lihová, platinová, které se od sebe lišily s přibývajícím vzdáleností měřené teploty od zvolených referenčních teplotních bodů.

1. Kelvinova stupnice

Kelvinova teplotní stupnice byla navržena v polovině 19. století. Britský fyzik William Thomson, známý také jako Lord Kelvin, vytvořil stupnici, ke které se váží dva referenční body, prvním je 0 K teplota rovná absolutní nule a druhým je 273,16 K teplota trojného bodu vody. Kelvinova teplotní stupnice je používána pro určování termodynamické teploty.[11]

2. Réaumurova stupnice

Réaumurova teplotní stupnice byla navržena okolo roku 1730 francouzským vědcem René de Réaumurem (1683–1757). Stupnice vznikla 12 let před vytvořením stupnice Celsiovy, ve své době byla velmi rozšířená a používala se až do 20. století.

Teplotu mrznutí vody Réaumur označil číslem 0, přírůstek teploty o 1 °R odpovídal zvýšení objemu 80% lihu v lihovém teploměru o 1/1000. Teplota 80 °R je bodem varu vody při normálním atmosférickém tlaku 1013,25 hPa.

$$R = \frac{4}{5} \cdot C \quad (25)$$

$$R = \frac{4(F-32)}{9} \quad (26)$$

$$R = \frac{4(K-273,15)}{5} \quad (27)$$

kde

- K je teplota v Kelvinech
- F je teplota ve stupních Fahrenheita
- C je teplota ve stupních Celsia
- R je teplota ve stupních Réaumura

3. *Fahrenheitova stupnice*

Stupnici určil německý fyzik Gabriel Fahrenheit (1686–1736), který vycházel ze dvou základních referenčních bodů. Nejnižší teploty, jež se mu podařilo dosáhnout smícháním chloridu amonného (NH_4Cl), vody a ledu. Druhým referenčním bodem určil normální teplotu lidského těla 98 °F. V dnešní době za referenční body považujeme 32 °F pro bod mrznutí vody a 212 °F bod varu vody. Rozdíl těchto dvou bodů je 180 stupňů, proto jeden stupeň Fahrenheita je roven 5/9 kelvinu nebo Celsiova stupně.

V dnešní době se Fahrenheitova stupnice nejvíce uplatňuje v USA.

Přepoččet na jiné jednotky:

$$F = \frac{9K}{5} - 459,67 \quad (28)$$

$$F = \frac{9C}{5} + 32 \quad (29)$$

$$F = \frac{9R}{4} + 32 \quad (30)$$

kde

- K je teplota v Kelvinech
 F je teplota ve stupních Fahrenheita
 C je teplota ve stupních Celsia
 R je teplota ve stupních Réaumura

4. *Celsiova stupnice*

V současné době je nejpoužívanější stupnicí Celsiova stupnice, která byla vytvořena roku 1742 švédským geodetem a matematikem Andresem Celsiem (1701–1744). Nejdříve byla škála oproti dnešní opačná: 100 °C – teplota tání ledu a 0 °C – teplota bodu varu vody (obojí při normálním tlaku vzduchu 1013,25 hPa). Tuto stupnici později převrátil švédský přírodovědec a lékař Carl Linné (1707–1778), proto je dnes 0 °C bodem tání ledu a 100 °C bodem varu. V minulosti byl Celsiův stupeň určen jako jedna setina rozdílu teplot mezi bodem tání ledu a bodem varu vody. Dnes je Celsiův stupeň odvozen pomocí trojného bodu vody, jemuž je přiřazena teplota 0,01 °C. Absolutní velikost jednoho dílku Celsiovy teplotní stupnice je rovna 1 K.

Přepoččet na jiné jednotky

$$C = (F - 32) \cdot \frac{5}{9} \quad (31)$$

$$C = K + 273,15^\circ \quad (32)$$

$$C = \frac{5}{4} \cdot R \quad (33)$$

kde

- K je teplota v Kelvinech
 F je teplota ve stupních Fahrenheita
 C je teplota ve stupních Celsia
 R je teplota ve stupních Réaumura

5. *Dohoda o způsobu měření teplot*

Mezinárodní výbor pro míry a váhy (BIPM) vydal v roce 1887 dohodu o způsobu měření teplot. Tato dohoda vycházela ze stodílkové stupnice vodíkového teploměru se dvěma pevnými teplotami. Byly to teplota tání ledu (0 °C) a teplota varu destilované vody (100 °C) při normálním atmosférickém tlaku 1013,25 hPa.

1.5.4 Měření v meteorologické praxi

Na meteorologických stanicích se zjišťuje aktuální denní teplota. Z naměřených dat se určuje denní maximální a minimální teplota. Dále je měřeno i přízemní minimum. Průměrná denní teplota je stanovena ze 3 měření během dne, a to v 7, 14 a 21 hodin v tzv. „mannheimských hodinách“. Teplota naměřená ve 21 hodin má nejvyšší váhu.

Vzorec pro výpočet průměrné denní teploty:

$$t_d = \frac{t_7 + t_{14} + 2 \cdot t_{21}}{4} \quad (34)$$

Asi nejstarším zaznamenaným souvislým měřením teploty vzduchu jsou záznamy z let 1654–1670 v Pise a ve Florencii v Itálii.

Pravidelná meteorologická měření teploty byla v Čechách zahájena v roce 1752 v Praze na Klementinské hvězdárně. Toto měření pokračuje dodnes. Prvních 33 let měření teploty vzduchu je neúplných, proto se za počátek považuje až rok 1775.[4]

Ve 30. letech 20. století začali meteorologové a klimatologové věnovat zvýšenou pozornost kolísání klimatu, proto vzrostl zájem o dlouhodobá historická měření jako např. klementinská.

2 Metodika měření ČHMÚ

Návod pro pozorovatele automatizovaných meteorologických stanic vydaný Českým hydrometeorologickým ústavem v roce 2014 slouží k synchronizaci podmínek měření a k lepší srovnatelnosti dat z různých meteorologických stanic rozmístěných po celé ČR.[14]

2.1 Synchronnost časů měření

Měření a záznam meteorologických prvků musí být kontinuální, operativní poskytování dat je v hodinových intervalech s doplněním o desetiminutová měření. Pravidelná měření se provádějí v klimatologických termínech 7, 14 a 21 místního středního slunečního času a v 8, 15 a 22 v době platnosti středoevropského letního času.[14]

V současnosti je používán pro synchronizaci měření světový čas Universal Time Coordinated – *koordinovaný světový čas*, nahrazující od roku 1986 dříve užívaný Greenwich Mean Time – Greenwichský čas. Ve většině evropských států je používán *Středoevropský čas*, který je stanoven jako Koordinovaný světový čas + 1 hodina. V letním období je zaváděn středoevropský letní čas, který je stanoven jako Koordinovaný světový čas + 2 hodiny. V České republice je používán středoevropský čas, tedy střední sluneční čas 15. poledníku východní délky. Místní střední sluneční čas na našem území je stanoven korekcí tohoto středoevropského času. Úprava činí 4 minuty na 1 ° zeměpisné délky, pro stanice nacházející se na východ od 15. poledníku je nutný odečet od středoevropského času, pro stanice nacházející se na západ se příslušný počet minut přičítá.[14]

2.2 Umístění stanice

Meteorologickou stanicí je zařízení sloužící pro měření meteorologických prvků. Meteorologických stanic je více druhů, na typické stanici jsou prováděna měření teploty vzduchu, vlhkosti vzduchu, atmosférického tlaku, rychlosti

a směru větru, množství vodních srážek, množství napadaného sněhu. Kromě kalibrovaných meteorologických stanic používaných meteorology je meteorologickou stanicí nazýváno i menší zařízení měřící různé meteorologické jevy.

Kvalitu měřených dat velmi ovlivňuje umístění meteorologické stanice. Vybrané místo by nemělo být v bezprostřední blízkosti staveb nebo vysokých stromů. Doporučené rozměry pozemku pro umístění meteorologické stanice jsou min. 20 x 20 m. Pokud je stanice umístěna v zástavbě, musí být v dostatečné vzdálenosti od všech překážek. Terén pozemku by měl být rovný a pokrytý nízkým trávníkem. Trávník musí být udržován ve výšce cca 5 cm, posečenou travu je nutné z pozemku odstranit. Asfaltové či dlážděné povrchy by do naměřených dat vnesly chybu.[14]

2.3 Senzory

Tlakoměry: V síti Českého hydrometeorologického ústavu se obvykle používají digitální barometry PTB řady 220 nebo 330. Měřicí jednotka je senzor Vaisala Barocap (kapacitní čidlo absolutního tlaku vzduchu na bázi křemíku).[14]

Teploměry: Pro snímání teploty a vlhkosti vzduchu se používá senzor umístěný na rameni stožáru, krytý před přímými povětrnostními vlivy ve výšce 2 m nad povrchem země. V síti Českého hydrometeorologického ústavu se obvykle používají senzory řady HMP (Vaisala), starší řada HMP35D nebo HMP45D, nebo novější HMP155. Sonda má pevnou konstrukci, senzor je chráněn filtrem poskytujícím maximální ochranu proti vodě, prachu a nečistotám.[14]

2.4 Meteorologická budka

Meteorologická budka je bílá dřevěná či plastová skříňka s dvojitými žaluziovými stěnami, dvojitou střechou a perforovaným dnem zajišťujícím přirozenou ventilaci přístrojů. Je nutné dvířka meteorologické budky orientovat

na sever. Výšky pro osazení přístrojů musí být dodrženy např. teploměrné senzory by měly být ve výšce 2 m nad povrchem. Dřevěná budka by měla být celá z venkovní i vnitřní strany natřena bílým lesklým lakem. Při horší viditelnosti je povoleno osvětlovat vnitřek budky při odečítání naměřených hodnot pouze kapesní svítilnou.[14]

2.5 Kalibrace

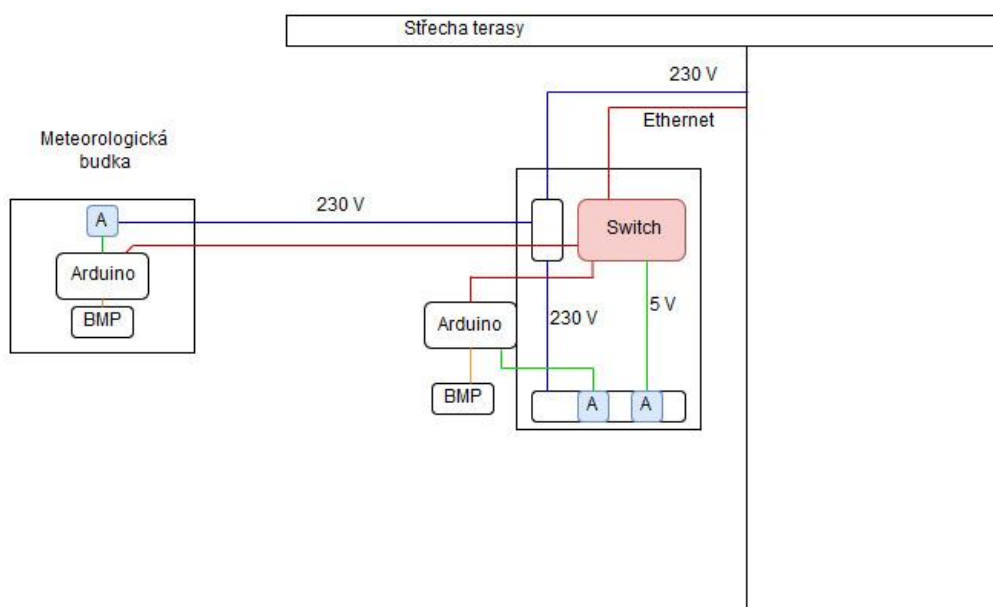
Přípustná chyba pro měřidla teploty vzduchu používaná Českým hydrometeorologickým ústavem je $\pm 0,02$ °C a pro měřidla atmosférického tlaku je přípustná chyba $\pm 0,01$ %. Pro oba typy měřidel v celém rozsahu.[14]

Meteorologické přístroje i senzory musí mít platnou kalibraci, která zaručuje srovnatelné měření na všech stanicích v síti Českého hydrometeorologického ústavu.[14]

3 Domácí meteorologická stanice

Pro vlastní měření byly sestaveny dvě domácí meteorologické stanice. Jedna stanice byla umístěna na terase podobně jako v přecházející bakalářské práci. Druhá stanice byla umístěna do meteorologické budky v prostoru zahrady. V následujícím zpracování naměřených hodnot byly porovnány výsledky z těchto dvou stanic.

Domácí meteorologická stanice má tedy dvě části, a to stanici A a stanici B. Každá obsahuje jeden jednočipový počítač Arduino a jeden senzor BMP180. Současná meteorologická stanice navazuje na měření prováděná v předešlých letech, u nichž byl použit malý počítač Raspberry Pi B+ a senzor BMP180. Arduino bylo vybráno pro svou nízkou cenu a vysokou variabilitu využitelnosti. Data jsou uložena v MySQL databázi na NASu (Network Attached Storage) Synology DS213j. Databáze MySQL byla vybrána, protože je jako jediná podporována použitým serverem.

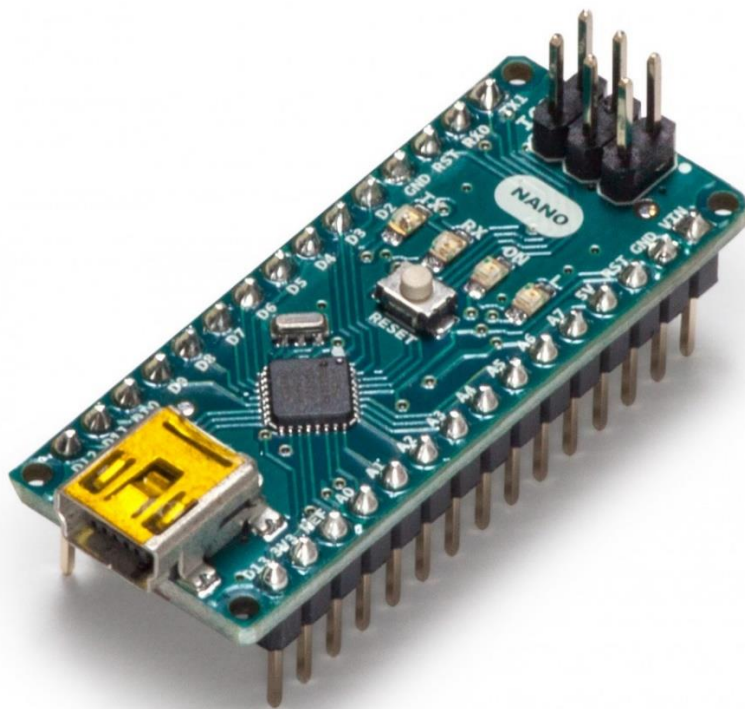


Obrázek 19: Zapojení domácí meteorologické stanice

Zdroj: autor

3.1 Arduino

Arduino je malý jednodeskový počítač založený na mikrokontrolerech ATmega od firmy Atmel. Arduino je otevřenou platformou s grafickým vývojovým prostředím vycházejícím z prostředí Wiring a Processing. Mikropočítač Arduino podobně jako Raspberry Pi byl vyvinut pro podporu výuky informatiky ve školách s cílem seznámit studenty s tím, jak jsou pomocí počítačů řízena různá zařízení. K Arduino lze snadno připojit nejen jednotlivé senzory, ale i LED diody, displeje z tekutých krystalů nebo servomotory, ale komunikovat také i s jinými počítači.



Obrázek 20: Arduino

Zdroj: [46]

Arduino Nano je deska s mikrokontrolerem ATmega 328, jenž je velmi oblíbená pro svoji kompaktní velikost, jednoduchost použití a snadného připojení k nepájivému poli. Model Arduino Nano je velmi podobný většímu modelu Arduino Duemilanove, který se liší pouze velikostí a napájecím konektorem. [33]

| | |
|----------------------------|--|
| Mikrokontroler | ATmega328 |
| Architektura | AVR |
| Napětí | 5 V |
| Flash paměť | 32 KB, ze kterých 2 KB zabírá bootloader |
| SRAM | 2 KB |
| Frekvence procesoru | 16 MHz |
| Počet analogových I/O pinů | 8 |
| Počet digitálních I/O pinů | 22 |
| EEPROM | 1 KB |
| Vstupní napětí | 7-12 V |
| Spotřeba energie | 19 mA |
| Velikost | 18 x 45 mm |
| Váha | 7 g |
| Označení produktu | A000005 |

Tabulka 1: Arduino – technické specifikace

Zdroj: [33]

Napájení

Deska Arduino Nano se napájí pomocí konektoru Mini-B USB a externího napájecího zdroje 6-20V (pin 30) nebo 5V (pin 27). Zdroj energie je automaticky vybrán podle napětí zdroje (nejvyšší).[33]

Paměť

ATmega328 má flash paměť o velikosti 32 KB, ze které ale 2 KB zabírá bootloader. ATmega328 také má 2 KB SRAM a 1 KB EEPROM.[33]

Vstupní a výstupní piny – digitální

Každý ze 14 digitálních pinů na Nano může být použit jako vstup nebo výstup pomocí funkcí pinMode(), digitalWrite() a digitalRead(). Piny pracují s napětím 5V. Každý pin může poskytovat nebo přijímat maximálně 40 mA

a má vnitřní odpínač (odpojený ve výchozím nastavení) 20-50 kHz. Některé piny mají navíc speciální funkce:

- Sériové: 0 (RX) a 1 (TX). Používá se k přijímání (RX) a odesílání (TX) sériových dat TTL. Tyto piny jsou připojeny k odpovídajícím pinům sériového čipu FTDI USB-to-TTL.
- Externí přerušení: 2 a 3. Tyto piny mohou být nakonfigurovány tak, aby při LOW vyvolaly interrupt procesoru. Podrobnosti viz funkce `attachInterrupt()`.
- PWM: 3, 5, 6, 9, 10 a 11. Umožňují 8bitový výstup PWM pomocí funkce `analogWrite()`.
- SPI: 10 (SS), 11 (MOSI), 12 (MISO), 13 (SCK). Tyto piny podporují komunikaci SPI, která, ačkoli je poskytována základním hardwarem, není v současné době zahrnuta do jazyka Arduino.
- LED: 13. Vestavěná LED dioda je připojena k digitálnímu kolíku 13. Je-li pin HIGH, LED svítí, když je kolík LOW, je vypnutý.[33]

Vstupní a výstupní piny – analogové

Nano má 8 analogových vstupů, z nichž každý poskytuje rozlišení 10 bitů (tj. 1024 různých hodnot). Ve výchozím nastavení měří od země k 5 V. Horní hranici lze upravit pomocí funkce `analogReference()`. Analogové kolíky 6 a 7 nemohou být použity jako digitální kolíky, ostatní ano. Některé piny mají navíc speciální funkce:

- I2C: 4 (SDA) a 5 (SCL): Podporujte komunikaci I2C (TWI) pomocí knihovny `Wire` (dokumentace na webové stránce `Wiring`).[33]

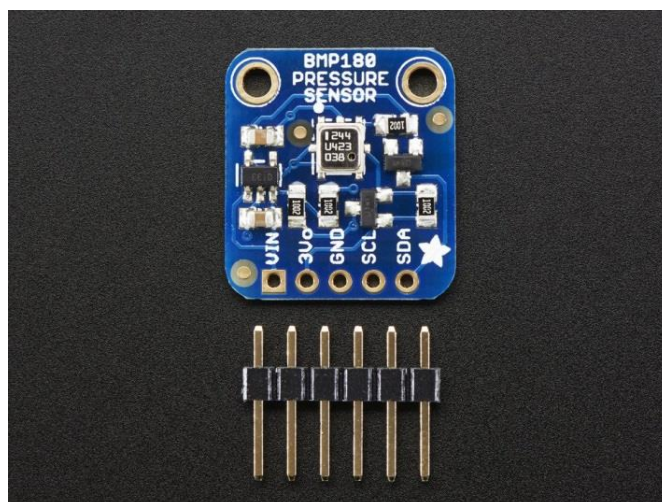
Vstupní a výstupní piny - ostatní

- AREF: Referenční napětí pro analogové vstupy. Používá se s funkcí `analogReference()`.
- Reset: Přepnutí tohoto pinu na LOW vyvolá restart mikrokontroleru.[33]

3.2 Senzor pro měření barometrického tlaku a teploty BMP180

Senzor BMP180 byl vyvinut firmou Bosch. Jedná se o jeden z mála senzorů s nižší pořizovací cenou a poměrně vysokou přesností naměřených dat. Nicméně i tak je jeho cena poměrně vysoká, a proto byl použit výrazně levnější čínský ekvivalent. K použitému senzoru nejsou k dispozici specifikace, předpokládám, že jeho vlastnosti odpovídají originálu od firmy Bosh.

Senzor je schopen měřit teplotu, barometrický tlak a změny tlaku, ze kterých je možné určit změnu nadmořské výšky. Atmosférický tlak může být použit jako jednoduchý prediktor počasí, sledujeme-li tlakové systémy.[17]



Obrázek 21: Senzor BMP180

Zdroj: [17]

| | |
|-------------------|---|
| Tlakový rozsah: | 300 ... 1100 hPa (+9000 m... -500 m přepočítaný na hladinu moře) |
| Vstupní napětí: | 1.8 ... 3.6V (V _{DD}) 1.62V ... 3.6V (V _{DDIO}) |
| Spotřeba energie: | 5 μ A pro 1 vzorek za sekundu |
| Přesnost: | 0.06hPa (0.5m) v ultra low power modu 0.02hPa (0.17m) v advanced resolution modu |

Elektronika BMP180 s nízkou spotřebou je optimalizována pro použití v mobilních telefonech, PDA, GPS navigačních zařízeních a venkovních zařízeních. Rozhraní I²C umožňuje snadné ovládání a integraci s mikrokontrolérem např. Arduinem. BMP180 je založen na piezorezistivní technologii, dosahuje EMC kompatibility, vysoké úrovně přesnosti a dlouhodobé stability měření.[35]

BMP180 se skládá z piezoelektrického snímače, analogového a digitálního převodníku a řídicí jednotky s rozhraním E²PROM a sériového rozhraní I²C. BMP180 přináší nekompenzovanou hodnotu tlaku a teploty. Na E²PROM je uloženo 176 bitů jednotlivých kalibračních dat. Používá se k vyrovnání rozdílu teplotní závislosti a dalších parametrů snímače.

- UP = údaje o tlaku (16 až 19 bitů)
- UT = údaje o teplotě (16 bitů)

Měření tlaku a teploty

Mikroprocesor pošle počáteční sekvenci pro zahájení měření tlaku nebo teploty. Po uplynutí doby konverze je možno výsledek (UP nebo UT) číst přes rozhraní I²C. Pro výpočet teploty ve °C a tlaku v hPa se mohou použít kalibrační data. Tyto konstanty lze číst z rozhraní BMP180 E²PROM prostřednictvím rozhraní I²C při inicializaci softwaru.

Vzorkovací frekvencí je možné zvýšit až na 128 vzorků za sekundu (standardní režim) pro dynamické měření. V tomto případě stačí měřit teplotu pouze jednou za sekundu a použít tuto hodnotu pro všechna měření tlaku během stejného období.[35]

Režimy přesnosti vzorkování tlaku hardwaru

Pomocí různých režimů lze zvolit optimální kompromis mezi spotřebou energie, rychlostí a rozlišením, viz níže uvedená tabulka č. 2.

| Mód | Parametr proměnné <i>oversampling_setting</i> | Počet interních vzorků | Maximální doba měření tlaku [ms] | Průměrná spotřeba pro 1 vzorek [μ A] | Běžný RMS šum [hPa] |
|-----------------------|---|------------------------|----------------------------------|---|---------------------|
| ultra low power | 0 | 1 | 4.5 | 3 | 0.06 |
| standard | 1 | 2 | 7.5 | 5 | 0.05 |
| high resolution | 2 | 4 | 13.5 | 7 | 0.04 |
| ultra high resolution | 3 | 8 | 25.5 | 12 | 0.03 |

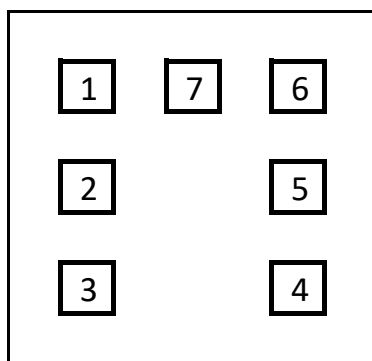
Tabulka 2: Přehled HW módů nastavení přesnosti pro BMP180

Zdroj: [35]

Všechny režimy mohou být prováděny při vyšších rychlostech, např. až 128krát za sekundu pro standardní režim, přičemž se spotřeba zvyšuje úměrně vzorkovací frekvenci.

Uspořádání pinů BMP180

Obrázek zobrazuje zařízení v pohledu shora. Funkce jednotlivých pinů jsou uvedeny v tabulce č. 3.



Obrázek 22: Konfigurace pinů

Zdroj: [35]

| Číslo | Jméno | Funkce |
|-------|-------|---|
| 1 | CSB | Chip select |
| 2 | VDD | Power supply |
| 3 | VDDIO | Digital power supply |
| 4 | SDO | SPI output |
| 5 | SCL | I ² C serial bus clock input |
| 6 | SDA | I ² C serial bus data (or SPI input) |
| 7 | GND | Ground |

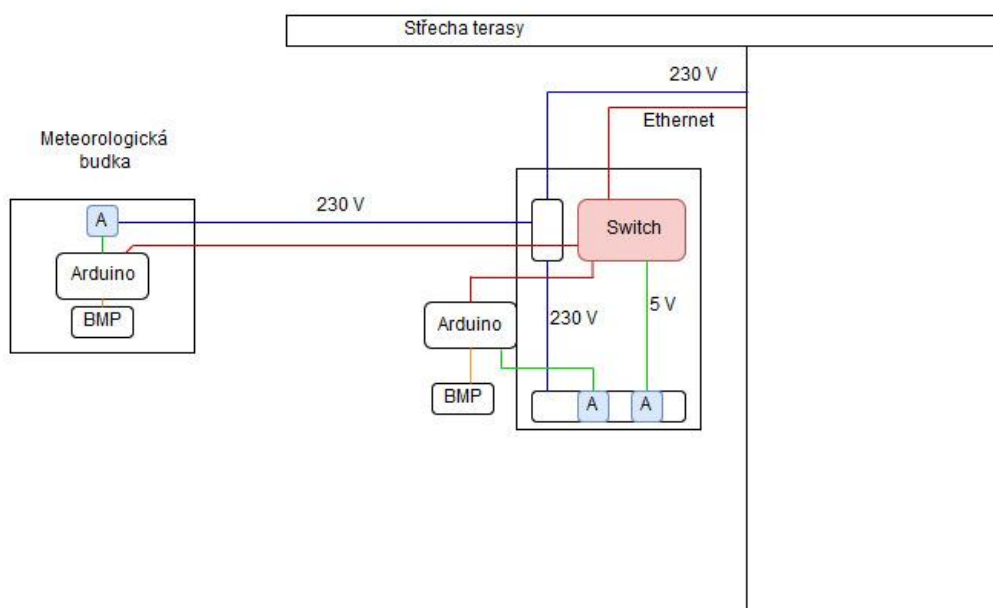
Tabulka 3: Funkce pinů

Zdroj: [35]

Pro úspěšné propojení senzoru BMP180 s Arduino deskou je nutné propojit 4 vodiče. Propojíme SDA na pin A4, SCL na pin A5 (tyto piny platí pro I²C rozhraní Uno desky), GND na zem Arduina a VIN na pin +3V3. Oproti BMP085 je tedy nutné využít pouze napájení 3V3, jinak dojde ke zničení modulu.[35]

3.3 Sestavení meteorologické stanice

Každá z dvou meteorologických stanic se skládá z Arduino nano, ethernet shield a senzoru BMP180. Obě stanice jsou napájené pomocí USB portu s napětím 5V. Datovou komunikaci jim umožňuje ethernetové připojení k switch Tenda S105. Jedná se o 5ti portový switch, na portu 1 a 2 jsou připojeny stanice. Switch je připojen k hlavnímu switchi pomocí portu 3. Switch je spolu s prodlužovacím kabelem a transformátorem (230 V na 5 V pomocí USB) uzavřený v elektroinstalační krabici s krytím IP 65 (viz Obrázek 27). Stanice A je připevněna na stranu této krabice (viz Obrázek 26). Druhá stanice (B) se svým transformátorem se nachází v bílé meteorologické budce (viz Obrázek 25). Obě stanice jsou uloženy v modré plastové krabičce vytisknuté na 3D tiskárně. Celý tento systém je zaznamenán pomocí schématu obrázku 23 (Obrázek 23 odpovídá Obrázku 19).



Obrázek 23: Zapojení domácí meteorologické stanice

Zdroj: autor



Obrázek 24: Stanice B (zahrada)

Zdroj: autor



Obrázek 25: Stanice B (zahrada)

Zdroj: autor



Obrázek 26: Stanice A (terasa)

Zdroj: autor



Obrázek 27: Stanice A (terasa)

Zdroj: autor

3.4 Meteorologická budka

Pro měření byla vyrobena vlastní meteorologická budka, která se svými vlastnostmi maximálně blíží požadavkům kladeným na tyto budky (viz kapitola 2).

Meteorologická budka je místo, kde jsou uloženy základní meteorologické přístroje. Žaluziové stěny umožňují volné proudění vzduchu a chrání vybavení před deštěm a přímým slunečním svitem. Měla by být vybavena dvouúrovňovou větranou podlahou a dvojitou větranou střechou z borovicového dřeva. Budka musí být chráněna před povětrnostními vlivy bílým lesklým nátěrem.

Meteorologická budka by měla být umístěna 2 metry nad pravidelně sečeným travnatým povrchem, v dostatečné vzdálenosti od okolních budov. Otevírací část budky by měla být umístěna směrem k severu, aby při otevření nesvítilo slunce přímo na senzory.[8]

Mnou použitá meteorologická budka byla poněkud zjednodušená. Její vnější rozměry jsou: 40 x 37 x 40 cm (š, h, v). Dno ani střecha nemají dvouúrovňovou konstrukci. Žaluziové obvodové stěny jsou také vyrobeny s jednodušší konstrukcí, jednotlivé lamely nejsou připevněny se sklonem. Tato zjednodušení mohou vnést do měření určitou míru chybovosti. Dalším problémem je nedostatečná vzdálenost od okolních budov.



Obrázek 28: Stanice B

Zdroj: autor



Obrázek 29: Stanice B

Zdroj: autor

3.5 Script

Pro Arduina byl napsán script ve vývojovém prostředí Arduino IDE pomocí jazyků C/C++. Script neustále kontroluje, zda stanice neobdržela dotaz na aktuální hodnoty. Pokud ano, tak sestaví odpověď pomocí dat ze senzoru BMP180.

Periodický zápis dat do MySQL databáze neprovádí samotné stanice, ale C# konzolová aplikace, která je spuštěna na RaspberryPI. Tato aplikace odešle každých 5 minut dotaz na aktuální stav obou stanic. Odpovědi spolu s aktuálním časem zapíše do databáze.

Popis scriptu je v příloze č.3.

3.6 Databáze MySQL

MySQL je multiplatformní databázi, s níž komunikace probíhá prostřednictvím jazyka SQL. MySQL je snadno implementovatelná na MS Windows, Linux i jiné operační systémy. Jedná se o volně šiřitelný software s vysokým výkonem.

Databáze MySQL je optimalizovaná na vysokou rychlost s jednodušším způsobem zálohování. V posledních letech je MySQL databáze doplňována o další rozšíření možností.

| # | Název | Typ | Porovnávání | Vlastnosti | Nulový | Výchozí | Komentáře | Další |
|---|---|------------|-------------|------------|--------|-------------------|-----------|----------------|
| 1 | id  | bigint(20) | | | Ne | Žádná | | AUTO_INCREMENT |
| 2 | date | timestamp | | | Ne | CURRENT_TIMESTAMP | | |
| 3 | a3Temperature | double | | | Ano | NULL | | |
| 4 | a3Pressure | double | | | Ano | NULL | | |
| 5 | a4Temperature | double | | | Ano | NULL | | |
| 6 | a4Pressure | double | | | Ano | NULL | | |

Tabulka 4: Struktura tabulky dat v databázi

Na server byla nainstalována služba MySQL, ve které byla vytvořena databáze obsahující jednu tabulku s výše uvedenou strukturou. V databázi jsou uložena data ze senzorů BMP180 s příslušnými časy a ID.

3.7 Server Synology DS213j

Hardwarový server Synology DS213j je two-bay NAS (Network Attached Storage) nabízející ukládání, sdílení a zabezpečení souborů, ale také umožňuje instalaci služeb pomocí pluginů např. MySQL nebo Apache server.

| parametry modelu | Synology DS213j |
|----------------------------|---------------------------------------|
| - procesor | 1,2 GHz, Marvell Armada 370 |
| - paměť RAM | 512 MB |
| - paměť flash | neuvádí |
| - porty vpředu vzadu | -- 2 × USB 2.0 |
| - počet disků pole RAID | 2 single, JBOD, RAID 0, RAID 1, SHR |
| - maximální velikost disků | 8 TiB (2 × 4 TiB) |
| - souborový systém | EXT4, EXT3, FAT, NTFS, HFS+ |
| - síťové rozhraní | 1 × Gigabit (RJ45) |
| - síťové protokoly | AFP, NFS, FTP, iSCSI, SMB |
| - firmware | DSM 4.3-3810 |
| - čeština | ano |
| - rozměry (v × š × h) | 165 × 100 × 225,5 mm |

Tabulka 5: Parametry serveru Synology DS213j

Zdroj: [18]



Obrázek 30: Server Synology DS213j

Zdroj: [54]

4 Kalibrace senzorů

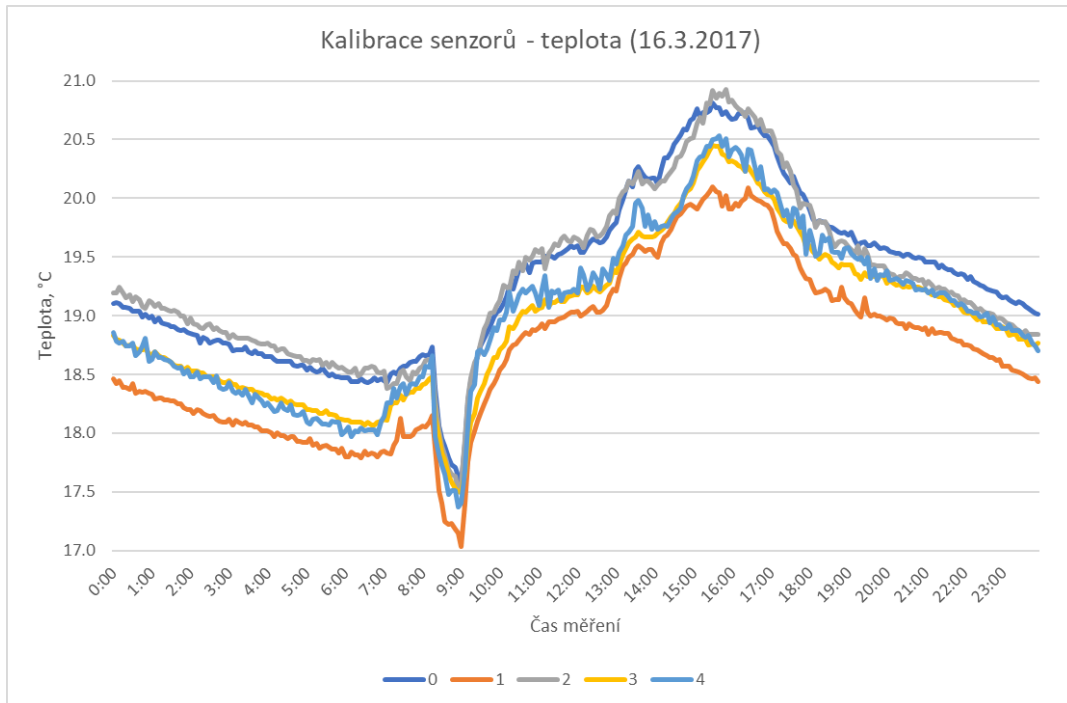
Pro sestavení domácí meteorologické stanice bylo zakoupeno 5 nekalibrovaných levných senzorů vyrobených v Číně, které by měly být kopii senzoru BMP180. Jednotlivým čidlům bylo přiděleno označení 0 až 4. Pro následnou kalibraci byla sbírána data ze všech 5 senzorů a zaznamenávána teplota naměřená na lihovém teploměru. Všech 5 senzorů spolu s lihovým teploměrem leželo vedle sebe na stole v místnosti s pomalu se měnící teplotou.

| Čas měření | Naměřené hodnoty [°C] | | | | | |
|------------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|----------|
| | Čidlo | | | | | Teploměr |
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | T |
| 8:00 | 17.89 | 17.25 | 17.81 | 17.77 | 17.65 | 18.0 |
| 8:30 | 17.71 | 17.18 | 17.63 | 17.53 | 17.51 | 17.5 |
| 9:00 | 17.56 | 17.03 | 17.56 | 17.49 | 17.4 | 17.3 |
| 9:30 | 18.65 | 18.1 | 18.65 | 18.3 | 18.69 | 18.5 |
| 10:00 | 18.91 | 18.37 | 19.02 | 18.55 | 18.79 | 18.6 |
| 10:30 | 19.16 | 18.63 | 19.24 | 18.78 | 19.03 | 19.0 |
| 11:00 | 19.42 | 18.83 | 19.38 | 19.04 | 19.23 | 18.9 |
| 11:30 | 19.46 | 18.9 | 19.54 | 19.06 | 19.09 | 19.2 |
| 12:00 | 19.49 | 18.95 | 19.61 | 19.11 | 19.19 | 19.2 |
| 12:30 | 19.58 | 19.03 | 19.67 | 19.18 | 19.23 | 19.2 |
| 13:00 | 19.63 | 19.06 | 19.74 | 19.21 | 19.27 | 19.5 |
| 13:30 | 19.73 | 19.17 | 19.85 | 19.28 | 19.3 | 19.6 |
| 14:00 | 20.15 | 19.5 | 20.15 | 19.62 | 19.71 | 19.5 |
| 14:30 | 20.18 | 19.55 | 20.15 | 19.67 | 19.76 | 19.9 |
| 15:00 | 20.34 | 19.67 | 20.15 | 19.75 | 19.77 | 20.0 |
| 15:30 | 20.59 | 19.9 | 20.41 | 20.01 | 20.02 | 20.2 |
| 16:00 | 20.73 | 19.99 | 20.64 | 20.31 | 20.36 | 20.4 |
| 16:30 | 20.77 | 20.05 | 20.89 | 20.44 | 20.53 | 20.5 |
| 17:00 | 20.72 | 19.97 | 20.75 | 20.27 | 20.37 | 20.3 |
| 17:30 | 20.62 | 19.98 | 20.62 | 20.13 | 20.16 | 20.3 |
| 18:00 | 20.21 | 19.61 | 20.26 | 19.82 | 19.85 | 19.9 |
| 18:30 | 20.03 | 19.36 | 19.96 | 19.67 | 19.85 | 19.7 |
| 19:00 | 19.81 | 19.2 | 19.81 | 19.48 | 19.53 | 19.5 |
| 19:30 | 19.71 | 19.14 | 19.63 | 19.41 | 19.54 | 19.3 |
| 20:00 | 19.6 | 19.01 | 19.6 | 19.35 | 19.48 | 19.3 |

Tabulka 6: Kalibrace – rozdíly naměřených hodnot

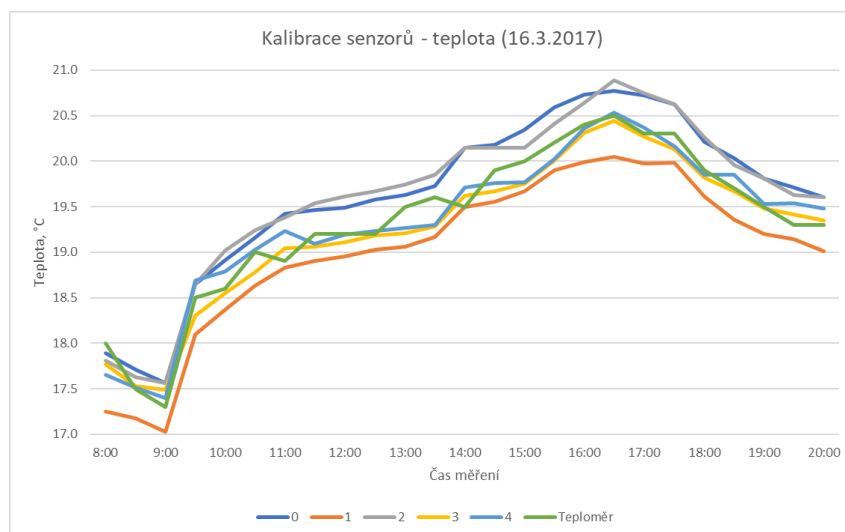
V tabulce č. 6 jsou uvedeny hodnoty naměřené dne 16.3.2017 během jednodenního měření od 8.00 do 20.00 po 30 minutách. V pěti sloupcích jsou

hodnoty naměřené jednotlivými čidly. Ve sloupci označeném Teploměr jsou hodnoty naměřené pomocí lihového teploměru.



Graf 1: Kalibrace senzorů – jednodenní měření 16.3.2017

V grafu č. 1 jsou zobrazeny naměřené hodnoty teplot na čidlech.



Graf 2: Kalibrace senzorů – jednodenní měření 16.3.2017

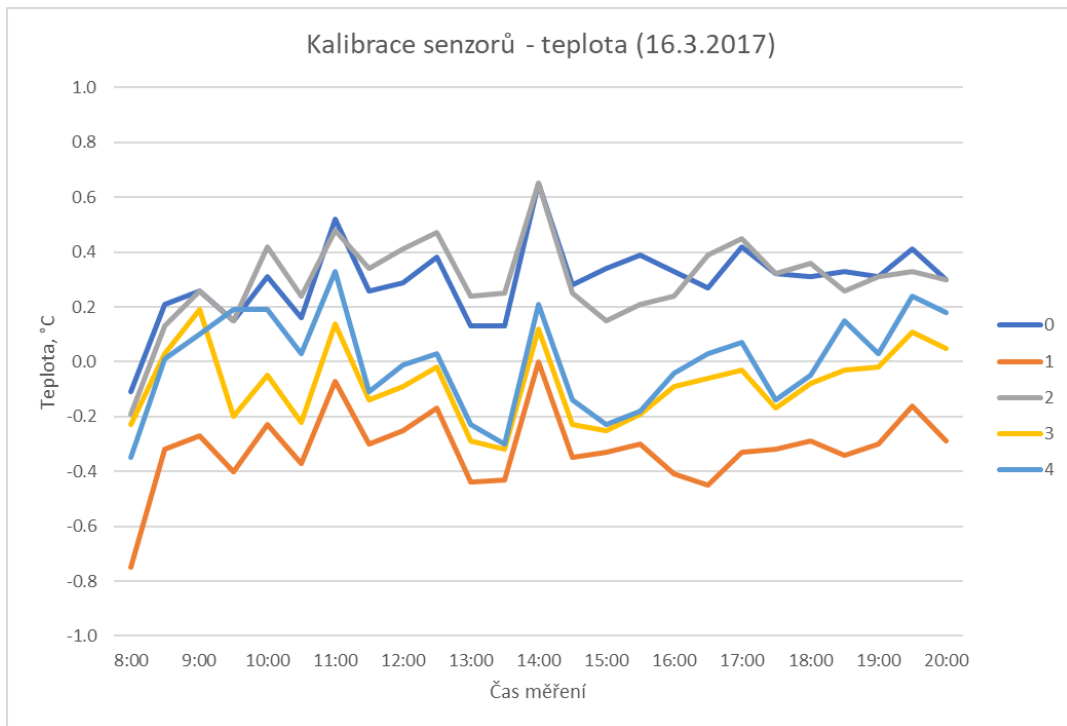
V grafu č.2 jsou teploty naměřené pomocí čidel doplněny o hodnoty naměřené na lihovém teploměru. Hodnoty naměřené lihovým teploměrem byly zaznamenány pouze jednou za půl hodiny, a to v čase od 8.00 do 20.00. Do grafu jsou vybrány pouze hodnoty naměřené na čidlech pro odpovídající časy měření na teploměru.

Dalším krokem kalibrace bylo porovnání hodnot naměřených na lihovém teploměru s hodnotami jednotlivých senzorů.

| Čas měření | Rozdíly teplot (čidlo - teploměr) [°C] | | | | |
|--------------------|--|-------|-------|-------|-------|
| | Čidlo | | | | |
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 8:00 | -0.11 | -0.75 | -0.19 | -0.23 | -0.35 |
| 8:30 | 0.21 | -0.32 | 0.13 | 0.03 | 0.01 |
| 9:00 | 0.26 | -0.27 | 0.26 | 0.19 | 0.10 |
| 9:30 | 0.15 | -0.40 | 0.15 | -0.20 | 0.19 |
| 10:00 | 0.31 | -0.23 | 0.42 | -0.05 | 0.19 |
| 10:30 | 0.16 | -0.37 | 0.24 | -0.22 | 0.03 |
| 11:00 | 0.52 | -0.07 | 0.48 | 0.14 | 0.33 |
| 11:30 | 0.26 | -0.30 | 0.34 | -0.14 | -0.11 |
| 12:00 | 0.29 | -0.25 | 0.41 | -0.09 | -0.01 |
| 12:30 | 0.38 | -0.17 | 0.47 | -0.02 | 0.03 |
| 13:00 | 0.13 | -0.44 | 0.24 | -0.29 | -0.23 |
| 13:30 | 0.13 | -0.43 | 0.25 | -0.32 | -0.30 |
| 14:00 | 0.65 | 0.00 | 0.65 | 0.12 | 0.21 |
| 14:30 | 0.28 | -0.35 | 0.25 | -0.23 | -0.14 |
| 15:00 | 0.34 | -0.33 | 0.15 | -0.25 | -0.23 |
| 15:30 | 0.39 | -0.30 | 0.21 | -0.19 | -0.18 |
| 16:00 | 0.33 | -0.41 | 0.24 | -0.09 | -0.04 |
| 16:30 | 0.27 | -0.45 | 0.39 | -0.06 | 0.03 |
| 17:00 | 0.42 | -0.33 | 0.45 | -0.03 | 0.07 |
| 17:30 | 0.32 | -0.32 | 0.32 | -0.17 | -0.14 |
| 18:00 | 0.31 | -0.29 | 0.36 | -0.08 | -0.05 |
| 18:30 | 0.33 | -0.34 | 0.26 | -0.03 | 0.15 |
| 19:00 | 0.31 | -0.30 | 0.31 | -0.02 | 0.03 |
| 19:30 | 0.41 | -0.16 | 0.33 | 0.11 | 0.24 |
| 20:00 | 0.30 | -0.29 | 0.30 | 0.05 | 0.18 |
| Průměrná odchylka | 0.29 | -0.31 | 0.30 | -0.08 | 0.00 |
| Maximální odchylka | 0.65 | 0.75 | 0.65 | 0.32 | 0.35 |
| Minimální odchylka | 0.11 | 0.00 | 0.13 | 0.02 | 0.01 |

Tabulka 7: Kalibrace – rozdíly naměřených hodnot

V tabulce č. 7 jsou uvedeny dopočítané rozdíly teplot z tabulky č. 6, a to mezi čidly a teploměrem. Ve spodní části tabulky jsou uvedeny průměrné hodnoty rozdílu a maximální a minimální odchylky jednotlivých čidel oproti teploměru.



Graf 3: Přehled rozdílů jednotlivých senzorů (senzor – teploměr)

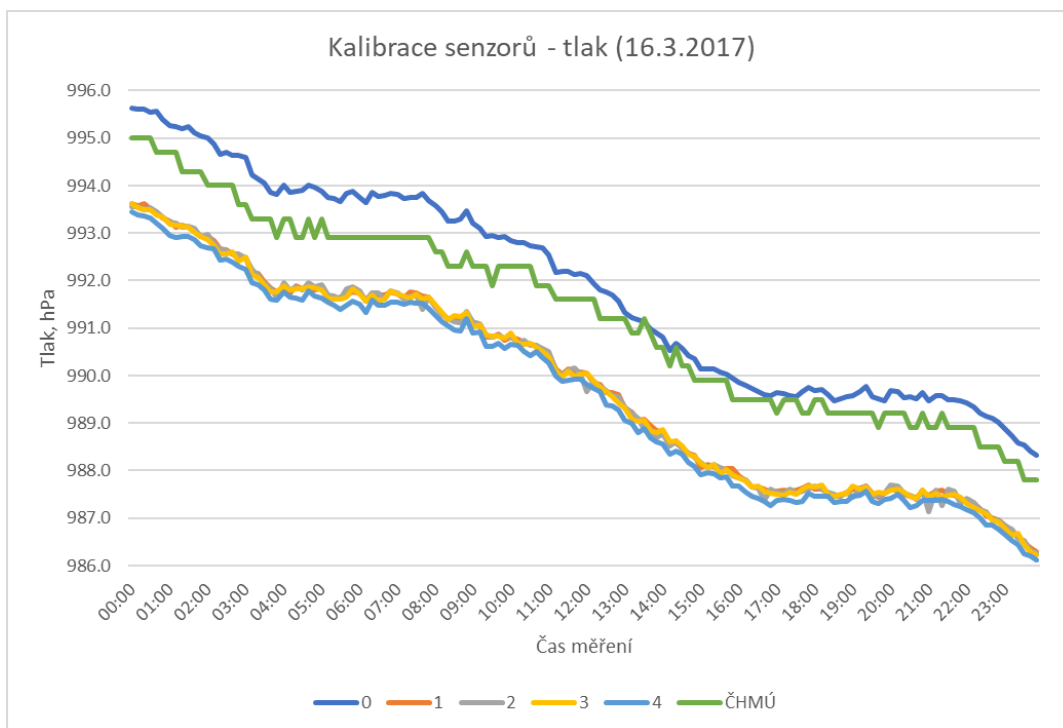
Pro názornost jsou rozdíly z tabulky č. 7 znázorněny v grafu č. 3. Je zřejmé, že během měření se rozdíly mezi čidly a teploměrem příliš neměnily.

Porovnáme-li jednotlivé senzory s daty naměřenými na lihovém teploměru, pak nejvyšší odchylky byly zjištěny u senzoru č. 1, průměrně rozdíl činil 0,31°C. Nejnižší odchylky u senzorů č. 3 a 4 byly důvodem pro následné použití těchto čidel pro další měření.

Během kalibrace byly shromážděny i hodnoty atmosférického tlaku.

| Čas měření | Naměřené hodnoty [hPa] | | | | | ČHMÚ | |
|------------|------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| | Čidlo | | | | | | |
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | | |
| 00:00 | 995.64 | 993.62 | 993.55 | 993.62 | 993.44 | 995.0 | |
| 00:10 | 995.6 | 993.57 | 993.55 | 993.53 | 993.39 | 995.0 | |
| 00:20 | 995.61 | 993.63 | 993.49 | 993.5 | 993.37 | 995.0 | |
| 00:30 | 995.55 | 993.51 | 993.53 | 993.5 | 993.31 | 995.0 | |
| 00:40 | 995.56 | 993.45 | 993.44 | 993.39 | 993.2 | 994.7 | |
| 00:50 | 995.4 | 993.32 | 993.35 | 993.33 | 993.1 | 994.7 | |
| 01:00 | 995.26 | 993.25 | 993.23 | 993.19 | 992.95 | 994.7 | |
| 01:10 | 995.24 | 993.13 | 993.22 | 993.16 | 992.91 | 994.7 | |
| 01:20 | 995.19 | 993.16 | 993.12 | 993.14 | 992.92 | 994.3 | |
| 01:30 | 995.24 | 993.13 | 993.15 | 993.12 | 992.93 | 994.3 | |
| 01:40 | 995.11 | 993.05 | 993.11 | 993.01 | 992.86 | 994.3 | |
| 01:50 | 995.04 | 992.92 | 992.92 | 992.92 | 992.74 | 994.3 | |
| 02:00 | 995 | 992.92 | 992.98 | 992.87 | 992.69 | 994.0 | |
| 02:10 | 994.88 | 992.85 | 992.77 | 992.74 | 992.66 | 994.0 | |
| 02:20 | 994.65 | 992.66 | 992.66 | 992.57 | 992.44 | 994.0 | |
| 02:30 | 994.7 | 992.64 | 992.63 | 992.56 | 992.45 | 994.0 | |
| 02:40 | 994.64 | 992.57 | 992.56 | 992.6 | 992.39 | 994.0 | |
| 02:50 | 994.63 | 992.47 | 992.57 | 992.42 | 992.3 | 993.6 | |
| 03:00 | 994.6 | 992.48 | 992.48 | 992.5 | 992.24 | 993.6 | |
| 03:10 | 994.22 | 992.16 | 992.23 | 992.13 | 991.95 | 993.3 | |
| 03:20 | 994.14 | 992.15 | 992.1 | 992.06 | 991.92 | 993.3 | |
| 03:30 | 994.05 | 991.97 | 991.94 | 991.91 | 991.8 | 993.3 | |
| 03:40 | 993.85 | 991.85 | 991.85 | 991.76 | 991.62 | 993.3 | |
| 03:50 | 993.81 | 991.77 | 991.65 | 991.76 | 991.58 | 992.9 | |
| 04:00 | 994 | 991.88 | 991.95 | 991.89 | 991.77 | 993.3 | |
| 04:10 | 993.86 | 991.75 | 991.8 | 991.8 | 991.66 | 993.3 | |
| 04:20 | 993.89 | 991.89 | 991.86 | 991.82 | 991.63 | 992.9 | |
| 04:30 | 993.9 | 991.83 | 991.8 | 991.83 | 991.58 | 992.9 | |
| 04:40 | 994 | 991.9 | 991.96 | 991.88 | 991.78 | 993.3 | |
| 04:50 | 993.97 | 991.8 | 991.87 | 991.84 | 991.68 | 992.9 | |
| 05:00 | 993.88 | 991.84 | 991.92 | 991.8 | 991.64 | 993.3 | |
| 05:10 | 993.76 | 991.68 | 991.69 | 991.64 | 991.54 | 992.9 | |
| 05:20 | 993.72 | 991.61 | 991.67 | 991.6 | 991.47 | 992.9 | |
| 05:30 | 993.67 | 991.65 | 991.62 | 991.61 | 991.39 | 992.9 | |
| 05:40 | 993.84 | 991.69 | 991.82 | 991.65 | 991.48 | 992.9 | |
| 05:50 | 993.89 | 991.77 | 991.87 | 991.82 | 991.57 | 992.9 | |
| 06:00 | 993.75 | 991.74 | 991.78 | 991.71 | 991.51 | 992.9 | |
| 06:10 | 993.64 | 991.58 | 991.57 | 991.56 | 991.32 | 992.9 | |
| 06:20 | 993.86 | 991.75 | 991.75 | 991.69 | 991.59 | 992.9 | |
| 06:30 | 993.77 | 991.69 | 991.73 | 991.57 | 991.49 | 992.9 | |
| 06:40 | 993.8 | 991.7 | 991.62 | 991.61 | 991.49 | 992.9 | |
| 06:50 | 993.83 | 991.76 | 991.79 | 991.79 | 991.55 | 992.9 | |
| 07:00 | 993.81 | 991.71 | 991.74 | 991.72 | 991.54 | 992.9 | |
| 07:10 | 993.74 | 991.63 | 991.62 | 991.68 | 991.5 | 992.9 | |
| 07:20 | 993.75 | 991.77 | 991.68 | 991.64 | 991.55 | 992.9 | |
| 07:30 | 993.75 | 991.73 | 991.69 | 991.72 | 991.53 | 992.9 | |
| 07:40 | 993.84 | 991.68 | 991.39 | 991.62 | 991.52 | 992.9 | |
| 07:50 | 993.68 | 991.65 | 991.66 | 991.65 | 991.42 | 992.9 | |
| 08:00 | 993.58 | 991.44 | 991.44 | 991.48 | 991.26 | 992.6 | |
| 08:10 | 993.44 | 991.3 | 991.28 | 991.33 | 991.14 | 992.6 | |
| 08:20 | 993.26 | 991.18 | 991.19 | 991.18 | 991.04 | 992.3 | |
| 08:30 | 993.25 | 991.18 | 991.14 | 991.27 | 990.96 | 992.3 | |
| 08:40 | 993.29 | 991.18 | 991.12 | 991.25 | 990.95 | 992.3 | |
| 08:50 | 993.47 | 991.29 | 991.36 | 991.34 | 991.19 | 992.6 | |
| 09:00 | 993.2 | 991.11 | 991.14 | 991.03 | 990.9 | 992.3 | |
| 09:10 | 993.1 | 991.04 | 991.1 | 991.07 | 990.91 | 992.3 | |
| 09:20 | 992.93 | 990.82 | 990.85 | 990.85 | 990.61 | 992.3 | |
| 09:30 | 992.95 | 990.81 | 990.8 | 990.83 | 990.61 | 991.9 | |
| 09:40 | 992.9 | 990.87 | 990.86 | 990.83 | 990.68 | 992.3 | |
| 09:50 | 992.94 | 990.75 | 990.79 | 990.79 | 990.57 | 992.3 | |
| 10:00 | 992.85 | 990.81 | 990.84 | 990.89 | 990.66 | 992.3 | |
| 10:10 | 992.8 | 990.76 | 990.68 | 990.68 | 990.63 | 992.3 | |
| 10:20 | 992.8 | 990.71 | 990.74 | 990.66 | 990.5 | 992.3 | |
| 10:30 | 992.74 | 990.65 | 990.64 | 990.68 | 990.42 | 992.3 | |
| 10:40 | 992.72 | 990.64 | 990.64 | 990.59 | 990.5 | 991.9 | |
| 10:50 | 992.69 | 990.53 | 990.58 | 990.5 | 990.38 | 991.9 | |
| 11:00 | 992.53 | 990.47 | 990.5 | 990.41 | 990.28 | 991.9 | |
| 11:10 | 992.17 | 990.15 | 990.09 | 990.1 | 989.98 | 991.6 | |
| 11:20 | 992.2 | 990.04 | 990.02 | 989.97 | 989.87 | 991.6 | |
| 11:30 | 992.19 | 990.15 | 990.12 | 990.1 | 989.9 | 991.6 | |
| 11:40 | 992.14 | 990.1 | 990.17 | 989.99 | 989.93 | 991.6 | |
| 11:50 | 992.15 | 990.08 | 990.03 | 990.04 | 989.93 | 991.6 | |
| 12:00 | 992.1 | 990.06 | 989.66 | 989.66 | 990.05 | 989.81 | 991.6 |
| 12:10 | 991.94 | 989.83 | 989.88 | 989.88 | 989.72 | 991.6 | |
| 12:20 | 991.81 | 989.81 | 989.78 | 989.78 | 989.76 | 989.67 | 991.2 |
| 12:30 | 991.76 | 989.64 | 989.68 | 989.68 | 989.66 | 989.38 | 991.2 |
| 12:40 | 991.69 | 989.65 | 989.58 | 989.58 | 989.55 | 989.37 | 991.2 |
| 12:50 | 991.57 | 989.6 | 989.56 | 989.56 | 989.43 | 989.28 | 991.2 |
| 13:00 | 991.34 | 989.32 | 989.34 | 989.34 | 989.31 | 989.05 | 991.2 |
| 13:10 | 991.23 | 989.24 | 989.21 | 989.21 | 989.08 | 989 | 990.9 |
| 13:20 | 991.17 | 989.06 | 989.1 | 989.1 | 989.04 | 988.81 | 990.9 |
| 13:30 | 991.14 | 989.09 | 988.86 | 988.86 | 989.06 | 988.88 | 991.2 |
| 13:40 | 990.98 | 988.95 | 988.87 | 988.87 | 988.85 | 988.69 | 990.9 |
| 13:50 | 990.9 | 988.85 | 988.69 | 988.69 | 988.8 | 988.61 | 990.6 |
| 14:00 | 990.8 | 988.83 | 988.77 | 988.77 | 988.87 | 988.56 | 990.6 |
| 14:10 | 990.54 | 988.57 | 988.52 | 988.52 | 988.6 | 988.35 | 990.2 |
| 14:20 | 990.67 | 988.59 | 988.63 | 988.63 | 988.62 | 988.42 | 990.6 |
| 14:30 | 990.57 | 988.47 | 988.46 | 988.46 | 988.52 | 988.35 | 990.2 |
| 14:40 | 990.42 | 988.36 | 988.36 | 988.36 | 988.34 | 988.17 | 990.2 |
| 14:50 | 990.36 | 988.33 | 988.29 | 988.29 | 988.3 | 988.08 | 989.9 |
| 15:00 | 990.14 | 988.07 | 988.17 | 988.17 | 988.15 | 987.91 | 989.9 |
| 15:10 | 990.15 | 988.13 | 988.06 | 988.06 | 988.06 | 987.96 | 989.9 |
| 15:20 | 990.14 | 988.08 | 988.13 | 988.13 | 988.12 | 987.93 | 989.9 |
| 15:30 | 990.08 | 988.01 | 988.06 | 988.06 | 987.94 | 987.85 | 989.9 |
| 15:40 | 990.03 | 988.05 | 988.02 | 988.02 | 988.03 | 987.86 | 989.9 |
| 15:50 | 989.95 | 988.04 | 987.89 | 987.89 | 987.91 | 987.67 | 989.5 |
| 16:00 | 989.86 | 987.89 | 987.84 | 987.84 | 987.85 | 987.67 | 989.5 |
| 16:10 | 989.8 | 987.78 | 987.81 | 987.81 | 987.78 | 987.55 | 989.5 |
| 16:20 | 989.72 | 987.66 | 987.65 | 987.65 | 987.66 | 987.45 | 989.5 |
| 16:30 | 989.67 | 987.65 | 987.63 | 987.63 | 987.68 | 987.41 | 989.5 |
| 16:40 | 989.59 | 987.6 | 987.37 | 987.37 | 987.57 | 987.36 | 989.5 |
| 16:50 | 989.57 | 987.54 | 987.6 | 987.6 | 987.53 | 987.27 | 989.5 |
| 17:00 | 989.64 | 987.57 | 987.55 | 987.55 | 987.51 | 987.38 | 989.2 |
| 17:10 | 989.62 | 987.59 | 987.53 | 987.53 | 987.48 | 987.4 | 989.5 |
| 17:20 | 989.58 | 987.56 | 987.6 | 987.6 | 987.54 | 987.37 | 989.5 |
| 17:30 | 989.56 | 987.58 | 987.53 | 987.53 | 987.5 | 987.33 | 989.5 |
| 17:40 | 989.66 | 987.63 | 987.57 | 987.57 | 987.6 | 987.34 | 989.2 |
| 17:50 | 989.75 | 987.7 | 987.62 | 987.62 | 987.68 | 987.53 | 989.2 |
| 18:00 | 989.69 | 987.61 | 987.68 | 987.68 | 987.65 | 987.46 | 989.5 |
| 18:10 | 989.71 | 987.6 | 987.61 | 987.61 | 987.69 | 987.46 | 989.5 |
| 18:20 | 989.59 | 987.53 | 987.55 | 987.55 | 987.51 | 987.45 | 989.2 |
| 18:30 | 989.48 | 987.45 | 987.51 | 987.51 | 987.46 | 987.32 | 989.2 |
| 18:40 | 989.51 | 987.47 | 987.45 | 987.45 | 987.51 | 987.34 | 989.2 |
| 18:50 | 989.55 | 987.52 | 987.55 | 987.55 | 987.53 | 987.36 | 989.2 |
| 19:00 | 989.58 | 987.61 | 987.44 | 987.44 | 987.68 | 987.45 | 989.2 |
| 19:10 | 989.67 | 987.64 | 987.6 | 987.6 | 987.62 | 987.49 | 989.2 |
| 19:20 | 989.78 | 987.68 | 987.67 | 987.67 | 987.66 | 987.57 | 989.2 |
| 19:30 | 989.56 | 987.52 | 987.44 | 987.44 | 987.5 | 987.34 | 989.2 |
| 19:40 | 989.52 | 987.43 | 987.48 | 987.48 | 987.55 | 987.31 | 988.9 |
| 19:50 | 989.48 | 987.53 | 987.52 | 987.52 | 987.52 | 987.39 | 989.2 |
| 20:00 | 989.68 | 987.63 | 987.69 | 987.69 | 987.58 | 987.41 | 989.2 |
| 20:10 | 989.66 | 987.57 | 987.68 | 987.68 | 987.62 | 987.5 | 989.2 |
| 20:20 | 989.54 | 987.5 | 987.52 | 987.52 | 987.55 | 987.37 | 989.2 |
| 20:30 | 989.56 | 987.46 | 987.48 | 987.48 | 987.45 | 987.22 | 988.9 |
| 20:40 | 989.52 | 987.44 | 987.4 | 987.4 | 987.41 | 987.27 | 988.9 |
| 20:50 | 989.65 | 987.54 | 987.59 | 987.59 | 987.59 | 987.37 | 989.2 |
| 21:00 | 989.46 | 987.49 | 987.14 | 987.14 | 987.45 | 987.37 | 988.9 |
| 21:10 | 989.57 | 987.56 | 987.58 | 987.58 | 987.53 | 987.38 | 988.9 |
| 21:20 | 989.58 | 987.58 | 987.26 | 987.26 | 987.43 | 987.39 | 989.2 |
| 21:30 | 989.5 | 987.5 | 987.61 | 987.61 | 987.48 | 987.35 | 988.9 |
| 21:40 | 989.5 | 987.47 | 987.57 | 987.57 | 987.51 | 987.29 | 988.9 |
| 21:50 | 989.46 | 987.41 | 987.3 | 987.3 | 987.43 | 987.25 | 988.9 |
| 22:00 | 989.42 | 987.34 | 987.41 | 987.41 | 987.3 | 987.17 | 988.9 |
| 22:10 | 989.33 | 987.31 | 987.33 | 987.33 | 987.22 | 987.12 | 988.9 |
| 22:20 | 989.21 | 987.19 | 987.18 | 987.18 | 987.16 | 987 | 988.5 |
| 22:30 | 989.15 | 987.05 | 987.14 | 987.14 | 987.1 | 986.86 | 988.5 |
| 22:40 | 989.1 | 987 | 986.97 | 986.97 | 986.97 | 986.85 | 988.5 |
| 22:50 | 989.01 | 986.97 | 986.96 | 986.96 | 986.92 | 986.77 | 988.5 |
| 23:00 | 988.89 | 986.85 | 986.83 | 986.83 | 986.78 | 986.66 | 988.2 |
| 23:10 | 988.74 | 986.75 | 986.76 | 986.76 | 986.63 | 986.53 | 988.2 |
| 23:20 | 988.59 | 986.6 | 986.57 | 986.57 | 986.67 | 986.44 | 988.2 |
| 23:30 | 988.55 | 986.49 | 986.52 | 986.52 | 986.44 | 986.24 | 987.8 |
| 23:40 | 988.41 | 986.38 | 986.31 | 986.31 | 986.29 | 986.2 | 987.8 |
| 23:50 | 988.32 | 986.29 | 986.28 | 9 | | | |

V tabulce č. 8 jsou uvedeny hodnoty tlaku naměřené dne 16.3.2017 během jednodenního měření od 0.00 do 23.50 po 10 minutách. V pěti sloupcích jsou hodnoty naměřené jednotlivými čidly. Ve sloupci označeném ČHMÚ jsou hodnoty naměřené Českým hydrometeorologickým ústavem na stanovišti Nový Hradec Králové.



Graf 4: Kalibrace senzorů – jednodenní měření 16.3.2017

V grafu č. 4 jsou uvedeny hodnoty barometrického tlaku naměřené jednotlivými čidly a hodnoty naměřené ČHMÚ.

Dalším krokem kalibrace bylo porovnání rozdílů naměřených hodnot.

| Čas měření | Rozdíly tlaku (čidlo - ČHMÚ) [hPa] | | | | | Čas měření | Rozdíly tlaku (čidlo - ČHMÚ) [hPa] | | | | |
|------------|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|------------|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| | Čidlo | | | | | | Čidlo | | | | |
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | | 0.00 | 1.00 | 2.00 | 3.00 | 4.00 |
| 00:00 | 0.64 | -1.38 | -1.45 | -1.38 | -1.56 | 12:00 | 0.50 | -1.54 | -1.94 | -1.55 | -1.79 |
| 00:10 | 0.60 | -1.43 | -1.45 | -1.47 | -1.61 | 12:10 | 0.34 | -1.77 | -1.72 | -1.72 | -1.88 |
| 00:20 | 0.61 | -1.37 | -1.51 | -1.50 | -1.63 | 12:20 | 0.61 | -1.39 | -1.42 | -1.44 | -1.53 |
| 00:30 | 0.55 | -1.49 | -1.47 | -1.50 | -1.69 | 12:30 | 0.56 | -1.56 | -1.52 | -1.54 | -1.82 |
| 00:40 | 0.86 | -1.25 | -1.26 | -1.31 | -1.50 | 12:40 | 0.49 | -1.55 | -1.62 | -1.65 | -1.83 |
| 00:50 | 0.70 | -1.38 | -1.35 | -1.37 | -1.60 | 12:50 | 0.37 | -1.60 | -1.64 | -1.77 | -1.92 |
| 01:00 | 0.56 | -1.45 | -1.47 | -1.51 | -1.75 | 13:00 | 0.14 | -1.88 | -1.86 | -1.89 | -2.15 |
| 01:10 | 0.54 | -1.57 | -1.48 | -1.54 | -1.79 | 13:10 | 0.33 | -1.66 | -1.69 | -1.82 | -1.90 |
| 01:20 | 0.89 | -1.14 | -1.18 | -1.16 | -1.38 | 13:20 | 0.27 | -1.84 | -1.80 | -1.86 | -2.09 |
| 01:30 | 0.94 | -1.17 | -1.15 | -1.18 | -1.37 | 13:30 | -0.06 | -2.11 | -2.34 | -2.14 | -2.32 |
| 01:40 | 0.81 | -1.25 | -1.19 | -1.29 | -1.44 | 13:40 | 0.08 | -1.95 | -2.03 | -2.05 | -2.21 |
| 01:50 | 0.74 | -1.38 | -1.38 | -1.38 | -1.56 | 13:50 | 0.30 | -1.75 | -1.91 | -1.80 | -1.99 |
| 02:00 | 1.00 | -1.08 | -1.02 | -1.13 | -1.31 | 14:00 | 0.20 | -1.77 | -1.83 | -1.73 | -2.04 |
| 02:10 | 0.88 | -1.15 | -1.23 | -1.26 | -1.34 | 14:10 | 0.34 | -1.63 | -1.68 | -1.60 | -1.85 |
| 02:20 | 0.65 | -1.34 | -1.34 | -1.43 | -1.56 | 14:20 | 0.07 | -2.01 | -1.97 | -1.98 | -2.18 |
| 02:30 | 0.70 | -1.36 | -1.37 | -1.44 | -1.55 | 14:30 | 0.37 | -1.73 | -1.74 | -1.68 | -1.85 |
| 02:40 | 0.64 | -1.43 | -1.44 | -1.40 | -1.61 | 14:40 | 0.22 | -1.84 | -1.84 | -1.86 | -2.03 |
| 02:50 | 1.03 | -1.13 | -1.03 | -1.18 | -1.30 | 14:50 | 0.46 | -1.57 | -1.61 | -1.60 | -1.82 |
| 03:00 | 1.00 | -1.12 | -1.12 | -1.10 | -1.36 | 15:00 | 0.24 | -1.83 | -1.73 | -1.75 | -1.99 |
| 03:10 | 0.92 | -1.14 | -1.07 | -1.17 | -1.35 | 15:10 | 0.25 | -1.77 | -1.84 | -1.84 | -1.94 |
| 03:20 | 0.84 | -1.15 | -1.20 | -1.24 | -1.38 | 15:20 | 0.24 | -1.82 | -1.77 | -1.78 | -1.97 |
| 03:30 | 0.75 | -1.33 | -1.36 | -1.39 | -1.50 | 15:30 | 0.18 | -1.89 | -1.84 | -1.96 | -2.05 |
| 03:40 | 0.55 | -1.45 | -1.45 | -1.54 | -1.68 | 15:40 | 0.13 | -1.85 | -1.88 | -1.87 | -2.04 |
| 03:50 | 0.91 | -1.13 | -1.25 | -1.14 | -1.32 | 15:50 | 0.45 | -1.46 | -1.61 | -1.59 | -1.83 |
| 04:00 | 0.70 | -1.42 | -1.35 | -1.41 | -1.53 | 16:00 | 0.36 | -1.61 | -1.66 | -1.65 | -1.83 |
| 04:10 | 0.56 | -1.55 | -1.50 | -1.50 | -1.64 | 16:10 | 0.30 | -1.72 | -1.69 | -1.72 | -1.95 |
| 04:20 | 0.99 | -1.01 | -1.04 | -1.08 | -1.27 | 16:20 | 0.22 | -1.84 | -1.85 | -1.84 | -2.05 |
| 04:30 | 1.00 | -1.07 | -1.10 | -1.07 | -1.32 | 16:30 | 0.17 | -1.85 | -1.87 | -1.82 | -2.09 |
| 04:40 | 0.70 | -1.40 | -1.34 | -1.42 | -1.52 | 16:40 | 0.09 | -1.90 | -2.13 | -1.93 | -2.14 |
| 04:50 | 1.07 | -1.10 | -1.03 | -1.06 | -1.22 | 16:50 | 0.07 | -1.96 | -1.90 | -1.97 | -2.23 |
| 05:00 | 0.58 | -1.46 | -1.38 | -1.50 | -1.66 | 17:00 | 0.44 | -1.63 | -1.65 | -1.69 | -1.82 |
| 05:10 | 0.86 | -1.22 | -1.21 | -1.26 | -1.36 | 17:10 | 0.12 | -1.91 | -1.97 | -2.02 | -2.10 |
| 05:20 | 0.82 | -1.29 | -1.23 | -1.30 | -1.43 | 17:20 | 0.08 | -1.94 | -1.90 | -1.96 | -2.13 |
| 05:30 | 0.77 | -1.25 | -1.28 | -1.29 | -1.51 | 17:30 | 0.06 | -1.92 | -1.97 | -2.00 | -2.17 |
| 05:40 | 0.94 | -1.21 | -1.08 | -1.25 | -1.42 | 17:40 | 0.46 | -1.57 | -1.63 | -1.60 | -1.86 |
| 05:50 | 0.99 | -1.13 | -1.03 | -1.08 | -1.33 | 17:50 | 0.55 | -1.50 | -1.58 | -1.52 | -1.67 |
| 06:00 | 0.85 | -1.16 | -1.12 | -1.19 | -1.39 | 18:00 | 0.19 | -1.89 | -1.82 | -1.85 | -2.04 |
| 06:10 | 0.74 | -1.32 | -1.33 | -1.34 | -1.58 | 18:10 | 0.21 | -1.90 | -1.89 | -1.81 | -2.04 |
| 06:20 | 0.96 | -1.15 | -1.15 | -1.21 | -1.31 | 18:20 | 0.39 | -1.67 | -1.65 | -1.69 | -1.75 |
| 06:30 | 0.87 | -1.21 | -1.17 | -1.33 | -1.41 | 18:30 | 0.28 | -1.75 | -1.69 | -1.74 | -1.88 |
| 06:40 | 0.90 | -1.20 | -1.28 | -1.29 | -1.41 | 18:40 | 0.31 | -1.73 | -1.75 | -1.69 | -1.86 |
| 06:50 | 0.93 | -1.14 | -1.11 | -1.11 | -1.35 | 18:50 | 0.35 | -1.68 | -1.65 | -1.67 | -1.84 |
| 07:00 | 0.91 | -1.19 | -1.16 | -1.18 | -1.36 | 19:00 | 0.38 | -1.59 | -1.76 | -1.52 | -1.75 |
| 07:10 | 0.84 | -1.27 | -1.28 | -1.22 | -1.40 | 19:10 | 0.47 | -1.56 | -1.60 | -1.58 | -1.71 |
| 07:20 | 0.85 | -1.13 | -1.22 | -1.26 | -1.35 | 19:20 | 0.58 | -1.52 | -1.53 | -1.54 | -1.63 |
| 07:30 | 0.85 | -1.17 | -1.21 | -1.18 | -1.37 | 19:30 | 0.36 | -1.68 | -1.76 | -1.70 | -1.86 |
| 07:40 | 0.94 | -1.22 | -1.51 | -1.28 | -1.38 | 19:40 | 0.62 | -1.47 | -1.42 | -1.35 | -1.59 |
| 07:50 | 0.78 | -1.25 | -1.24 | -1.25 | -1.48 | 19:50 | 0.28 | -1.67 | -1.68 | -1.68 | -1.81 |
| 08:00 | 0.98 | -1.16 | -1.16 | -1.12 | -1.34 | 20:00 | 0.48 | -1.57 | -1.51 | -1.62 | -1.79 |
| 08:10 | 0.84 | -1.30 | -1.32 | -1.27 | -1.46 | 20:10 | 0.46 | -1.63 | -1.52 | -1.58 | -1.70 |
| 08:20 | 0.96 | -1.12 | -1.11 | -1.12 | -1.26 | 20:20 | 0.34 | -1.70 | -1.68 | -1.65 | -1.83 |
| 08:30 | 0.95 | -1.12 | -1.16 | -1.03 | -1.34 | 20:30 | 0.66 | -1.44 | -1.42 | -1.45 | -1.68 |
| 08:40 | 0.99 | -1.12 | -1.18 | -1.05 | -1.35 | 20:40 | 0.62 | -1.46 | -1.50 | -1.49 | -1.63 |
| 08:50 | 0.87 | -1.31 | -1.24 | -1.26 | -1.41 | 20:50 | 0.45 | -1.66 | -1.61 | -1.61 | -1.83 |
| 09:00 | 0.90 | -1.19 | -1.16 | -1.27 | -1.40 | 21:00 | 0.56 | -1.41 | -1.76 | -1.45 | -1.53 |
| 09:10 | 0.80 | -1.26 | -1.20 | -1.23 | -1.39 | 21:10 | 0.67 | -1.34 | -1.32 | -1.37 | -1.52 |
| 09:20 | 0.63 | -1.48 | -1.45 | -1.45 | -1.69 | 21:20 | 0.38 | -1.62 | -1.94 | -1.77 | -1.81 |
| 09:30 | 1.05 | -1.09 | -1.10 | -1.07 | -1.29 | 21:30 | 0.60 | -1.40 | -1.29 | -1.42 | -1.55 |
| 09:40 | 0.60 | -1.43 | -1.44 | -1.47 | -1.62 | 21:40 | 0.60 | -1.43 | -1.33 | -1.39 | -1.61 |
| 09:50 | 0.64 | -1.55 | -1.51 | -1.51 | -1.73 | 21:50 | 0.56 | -1.49 | -1.60 | -1.47 | -1.65 |
| 10:00 | 0.55 | -1.49 | -1.46 | -1.41 | -1.64 | 22:00 | 0.52 | -1.56 | -1.49 | -1.60 | -1.73 |
| 10:10 | 0.50 | -1.54 | -1.62 | -1.62 | -1.67 | 22:10 | 0.43 | -1.59 | -1.57 | -1.68 | -1.78 |
| 10:20 | 0.50 | -1.59 | -1.56 | -1.64 | -1.80 | 22:20 | 0.71 | -1.31 | -1.32 | -1.34 | -1.50 |
| 10:30 | 0.44 | -1.65 | -1.66 | -1.62 | -1.88 | 22:30 | 0.65 | -1.45 | -1.36 | -1.40 | -1.64 |
| 10:40 | 0.82 | -1.26 | -1.26 | -1.31 | -1.40 | 22:40 | 0.60 | -1.50 | -1.53 | -1.53 | -1.65 |
| 10:50 | 0.79 | -1.37 | -1.32 | -1.40 | -1.52 | 22:50 | 0.51 | -1.53 | -1.54 | -1.58 | -1.73 |
| 11:00 | 0.63 | -1.43 | -1.40 | -1.49 | -1.62 | 23:00 | 0.69 | -1.35 | -1.37 | -1.42 | -1.54 |
| 11:10 | 0.57 | -1.45 | -1.51 | -1.50 | -1.62 | 23:10 | 0.54 | -1.45 | -1.44 | -1.57 | -1.67 |
| 11:20 | 0.60 | -1.56 | -1.58 | -1.63 | -1.73 | 23:20 | 0.39 | -1.60 | -1.63 | -1.53 | -1.76 |
| 11:30 | 0.59 | -1.45 | -1.48 | -1.50 | -1.70 | 23:30 | 0.75 | -1.31 | -1.28 | -1.36 | -1.56 |
| 11:40 | 0.54 | -1.50 | -1.43 | -1.61 | -1.67 | 23:40 | 0.61 | -1.42 | -1.49 | -1.51 | -1.60 |
| 11:50 | 0.55 | -1.52 | -1.57 | -1.56 | -1.67 | 23:50 | 0.52 | -1.51 | -1.52 | -1.57 | -1.68 |

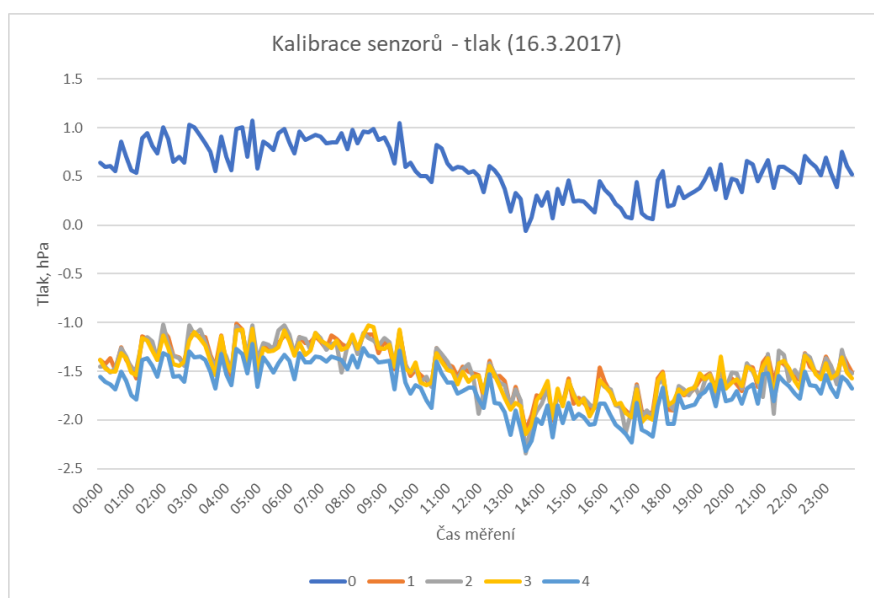
Tabulka 9: Rozdíly naměřených hodnot tlaku

V tabulce č. 9 jsou uvedeny dopočítané rozdíly barometrického tlaku z tabulky č. 8 a to mezi daty senzorů a daty získanými ČHMÚ. V následující tabulce č. 10 jsou uvedeny průměrné hodnoty rozdílu a maximální a minimální odchylky jednotlivých čidel.

| Přehled odchylek (čidlo - ČHMÚ) [hPa] | | | | | |
|---------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | Čidlo | | | | |
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Průměrná odchylka | 0.58 | -1.48 | -1.49 | -1.50 | -1.67 |
| Maximální odchylka | 1.07 | 2.11 | 2.34 | 2.14 | 2.32 |
| Minimální odchylka | 0.06 | 1.01 | 1.02 | 1.03 | 1.22 |

Tabulka 10: Přehled odchylek naměřených hodnot tlaku

Porovnáme-li data naměřená jednotlivými senzory s daty získanými od ČHMÚ, pak nejvyšší odchylky byly zjištěny u senzoru č. 4, průměrně rozdíl činil 1,67 hPa. Nejnižší odchylky byly zaznamenány u senzoru č. 0, průměrně rozdíl činil 0,58 hPa.



Graf 5: Přehled rozdílů jednotlivých senzorů (senzor – ČHMÚ)

Pro názornost jsou rozdíly z tabulky č. 9 znázorněny v grafu č. 5. Je zřejmé, že během měření se rozdíly příliš neměnily.

5 Zpracování měření

Meteorologická stanice má dvě části skládající se ze stejného zapojení Arduina a senzoru BMP180. Nejedná se o originální senzor BMP180, ale o levnější verzi tohoto senzoru vyrobenou v Číně. Stanice A (dále T.A. číslo použitého senzoru) byla umístěna na zastřešené terase na Novém Hradci Králové (50.1755739N, 15.8493328E) ve výšce 1,5 m nad dlážděným povrchem a 1,5 m pod střechou. Měření navazuje na předchozí stanici sestavenou z Raspberry Pi B+ a senzoru BMP180. Stanice B (dále Z.B. číslo použitého senzoru) je umístěna ve dřevěné meteorologické budce. Stanice byla v tomto sestavení uvedena do provozu na konci března 2017.

Na základě výsledků provedené kalibrace teploty byla pro měření vybrána čidla číslo 3 a 4, která měla nejnižší odchylky naměřených hodnot oproti lihovému teploměru. Senzor č. 3 byl umístěn do stanice T.A a senzor č. 4 do stanice Z.B. Tyto dva senzory měly vůči sobě minimální odchylky při měření tlaku, viz Graf č. 4. Bohužel dodatečně získaná data od ČHMÚ ukázala, že oba senzory ukazují asi o 1,5 hPa menší hodnotu než data dodaná. Tento problém je řešen následným odečtením průměrných odchylek pro daný senzor.

Senzor BMP170 č. 4 přestal měřit hodnoty barometrické tlaku a teploty ovzduší během velmi rychlé změny tlaku dne 11.8.2017. Ze zbývajících senzorů byl vybrán senzor č. 2, který při kalibraci vykázal ze zbylých senzorů nejnižší odchylky.



Obrázek 31: Zkorodovaný senzor č. 4

Měření probíhalo s drobnými výpadky od března do listopadu 2017. Z finančních důvodů byly od ČHMÚ zakoupeny pouze dva měsíce. Měsíce červenec a říjen byly pro měření vybrány záměrně pro velké teplotní rozdíly a proměnlivost tlaku. Diskutovány v následujícím textu jsou pouze tyto dva měsíce. Pro úplnost jsou všechna naměřená data za měsíce duben až prosinec 2017 uložena na CD (příloha č. 4).

Český hydrometeorologický ústav provádí své měření na Novém Hradci Králové (50.1774942N, 15.8390436E). Místa měření jsou od sebe vzdálena cca 800 m a jsou ve srovnatelné nadmořské výšce.

Pokud se vrátím k výsledkům mé bakalářské práce, pak kvalita měřených dat byla jistě silně ovlivněna umístěním domácí meteorologické stanice. Její poloha a uspořádání neodpovídalo požadavkům uvedeným v Návodu pro pozorovatele automatizovaných meteorologických stanic. Použitý senzor nebyl zakrytovaný a byl umístěn na terase v těsné blízkosti domu. Získaná data byla pak ovlivněna vnějšími vlivy, jako je vítr, osvětlení od slunce, vyzařování tepla z domu a další vlivy, blíže rozebírané v textu práce. Nicméně i přes tyto nedostatky se naměřené hodnoty blížily k hodnotám naměřeným na nedaleké meteorologické stanici ČHMÚ. Cílem následujícího zpracování dat je otázka, je-li možné kalibrací senzorů a lepším umístěním senzoru v meteorologické budce výsledky ještě zpřesnit.

Naměřená data, spolu s daty poskytnutými z ČHMÚ, jsou uložena na CD, které je přílohou diplomové práce. V následujících kapitolách jsou uvedeny pouze zpracované hodnoty.

5.1 Korekce dat

Pro správné spárování dat obou měření byl posunut středoevropský čas hodnot získaných od ČHMÚ na čas letní, ve kterém bylo prováděno měření. Další úprava naměřených hodnot spočívala v odečtení odchylek senzorů zjištěných při kalibraci, a to jak u teploty, tak i u barometrického tlaku.

5.1.1 Čas

ČHMÚ provádí zaznamenání měřených hodnot barometrického tlaku a teploty vzduchu v desetiminutových intervalech. Mnou sestavená domácí meteorologická stanice ukládá data naměřená v pětiminutových intervalech, do následného zpracování dat byly vybrány pouze záznamy se sudým ID.

Data ČHMÚ jsou svázána se SEČ. Data naměřená na domácí meteorologické stanici jsou o jednu hodinu posunuta. Posun byl při párování dat zohledněn. Vzhledem ke komplikacím s posunem času pro obrovské množství dat získaných měřením, bylo jednodušší posunout čas u dat získaných od ČHMÚ.

Měření na domácí meteorologické stanici neprobíhá v přesných pěti minutových intervalech, ke každému měření je vždy připočten čas čtení hodnot ze senzoru a čas zápisu dat do databáze. Proto v rámci jednoho měsíce vždy chybí pět záznamů. Při párování hodnot jsem situaci vyřešila přidáním řádků, které jsou v popisu označeny „Vložená data“. Chybí tedy ID záznamu a čas. Hodnoty tlaku i teploty jsou aritmetickým průměrem předchozího a následujícího řádku. Vložení záznamů v červenci dne 1.,7.,16.,20.,28.7., v říjnu dne 1.,7.,17., 19.10.

5.1.2 Teplota

Jednotlivé senzory vykazují soustavnou chybu, jak je zřejmé z grafu č. 3 (Přehled rozdílů jednotlivých senzorů). Průměrné odchylky jsou uvedeny v tabulce č. 11. Tato průměrná odchylka byla použita k úpravě naměřených dat. Následné rozdíly upravených dat a dat získaných od ČHMÚ jsou tedy ovlivněny pouze umístěním senzorů, nikoliv jejich nepřesností.

| | Rozdíly teplot (čidlo - teploměr) [°C] | | | | |
|--------------------|--|-------|------|-------|------|
| | Čidlo | | | | |
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Průměrná odchylka | 0.29 | -0.31 | 0.30 | -0.08 | 0.00 |
| Maximální odchylka | 0.65 | 0.75 | 0.65 | 0.32 | 0.35 |
| Minimální odchylka | 0.11 | 0.00 | 0.13 | 0.02 | 0.01 |

Tabulka 11: Přehled odchylek naměřených hodnot teploty vzduchu

5.1.3 Tlak

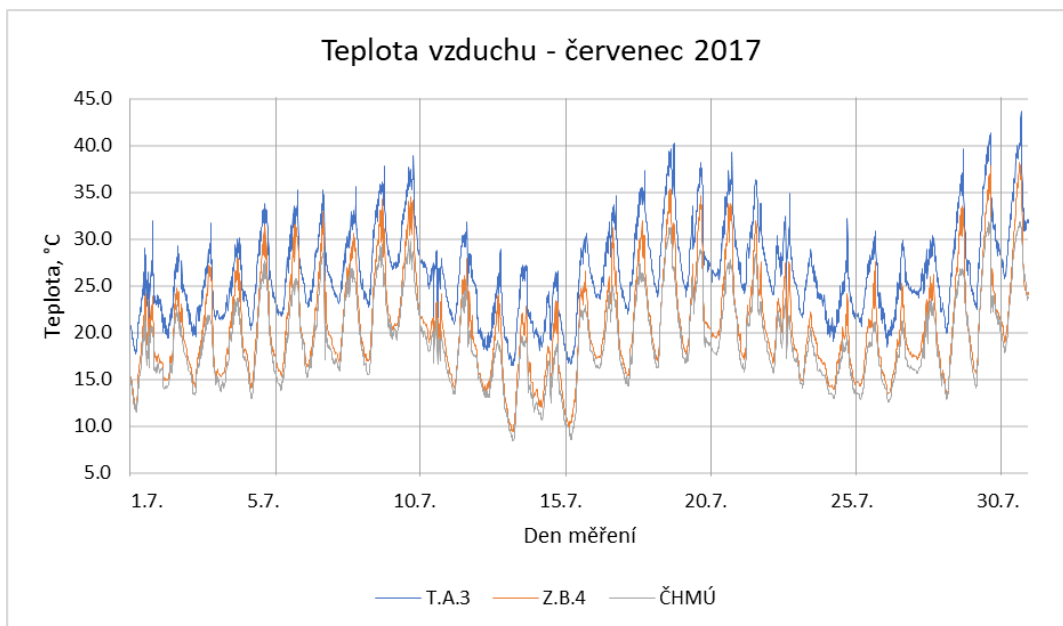
Jednotlivé senzory vykazují soustavnou chybu, jak je zřejmé z grafu č. 5 (Přehled rozdílů jednotlivých sensorů). Průměrné odchylky jsou uvedeny v tabulce č. 12. Tato průměrná odchylka byla použita k úpravě naměřených dat. Následné rozdíly v upravených datech jsou tedy ovlivněny umístěním sensorů, nikoliv jejich výrobní nepřesností.

| | Rozdíly tlaku (čidlo - ČHMÚ) [hPa] | | | | |
|--------------------|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| | Čidlo | | | | |
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Průměrná odchylka | 0.58 | -1.48 | -1.49 | -1.50 | -1.67 |
| Maximální odchylka | 1.07 | 2.11 | 2.34 | 2.14 | 2.32 |
| Minimální odchylka | 0.06 | 1.01 | 1.02 | 1.03 | 1.22 |

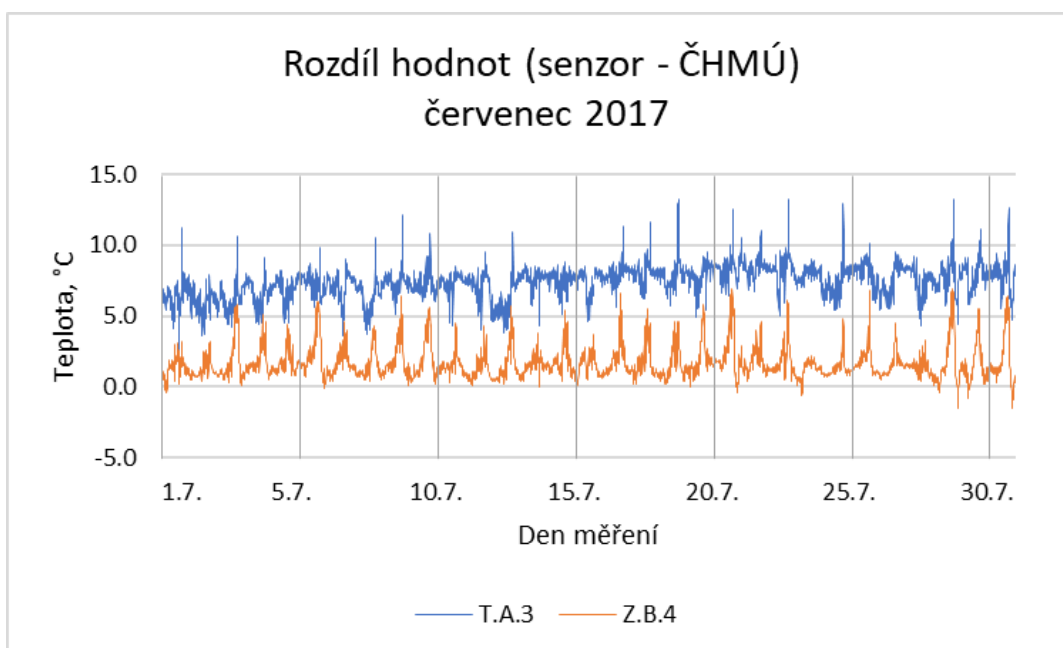
Tabulka 12: Přehled odchylek naměřených hodnot tlaku

5.2 Teplota vzduchu

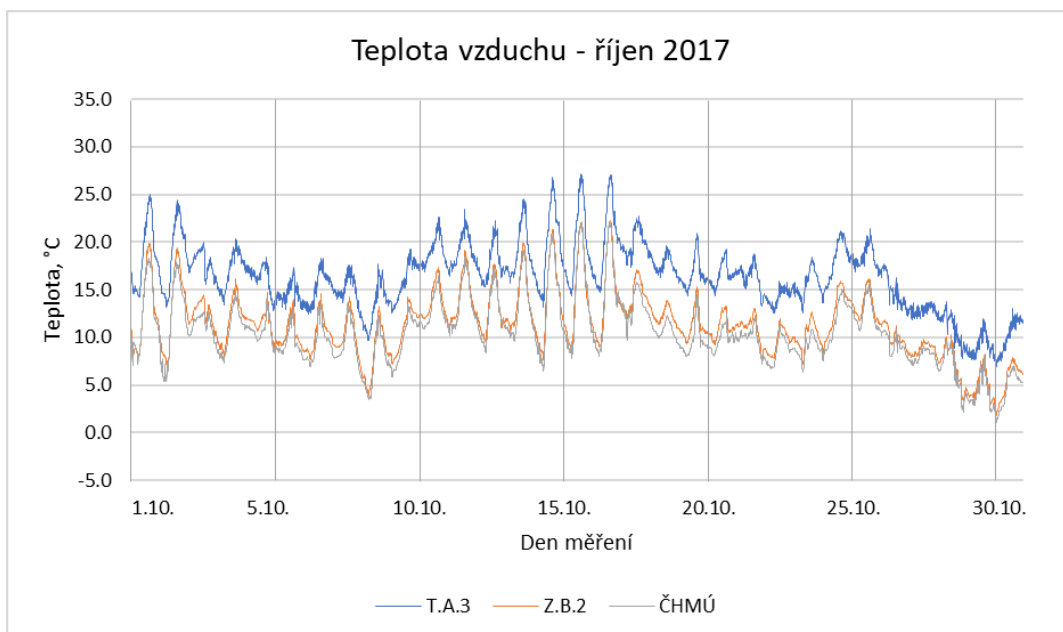
V grafech č. 6 a č. 8 jsou zobrazena měření teploty za dříve vybrané měsíce červenec a říjen 2017 a porovnána s daty poskytnutými od ČHMÚ. Svislé čáry mřížky označují půlnoc SEČ mezi dnem uvedeným v popisku uvedené osy a dnem následujícím. V grafech č. 7 a č. 9 jsou zobrazeny odchylky mezi daty naměřenými na domácí meteorologické stanici a daty získanými.



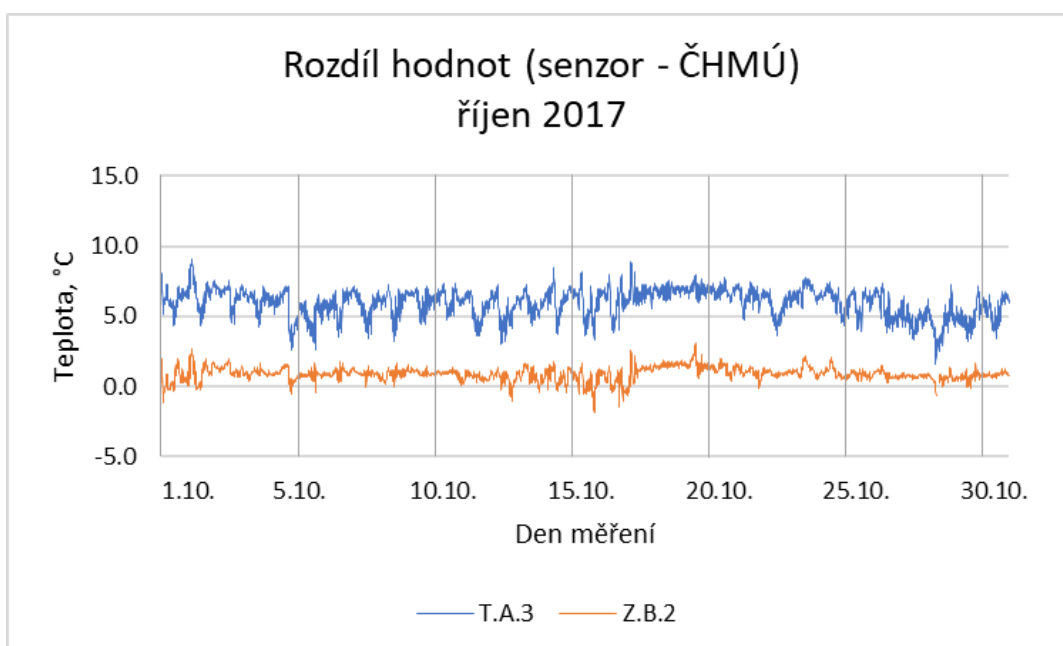
Graf 6: Teplota vzduchu – červenec 2017



Graf 7: Rozdíly hodnot (senzor – ČHMÚ) – červenec 2017



Graf 8: Teplota vzduchu – říjen 2017



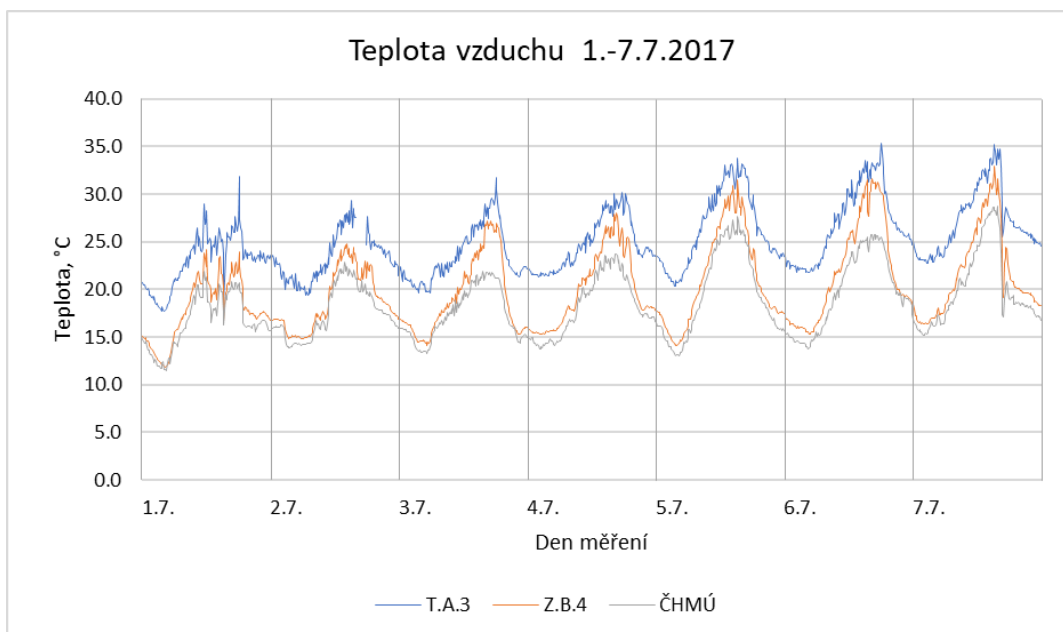
Graf 9: Rozdíly hodnot (senzor – ČHMÚ) – říjen 2017

Na první pohled je vidět, že naměřené hodnoty velmi dobře odpovídají hodnotám poskytnutým, ale jsou zde i drobné odchylky. Především je zřejmé, že k hodnotám získaným od ČHMÚ se výrazně lépe blíží senzory Z.B.4 (červenec) a Z.B.2 (říjen) umístěné v meteorologické budce. Zatímco senzor

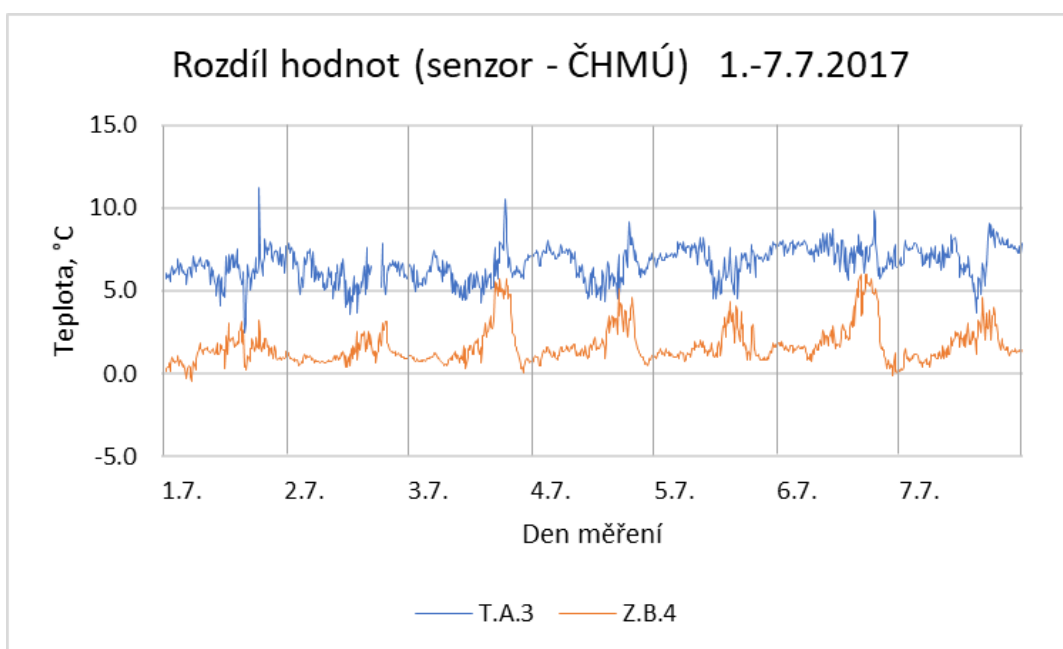
T.A.3 umístěný na terase u domu ukazuje teplotu minimálně o 5 °C vyšší, a to přestože byly senzory před meteorologickým měřením kalibrovány a naměřené hodnoty teploty byly v rámci zpracování dat patřičně posunuty. Nemůže se tedy jednat o rozdíly mezi senzory. Evidentně na terase byl teplejší vzduch než v okolí.

Odchytky mezi naměřenými hodnotami a hodnotami ČHMÚ jsou obzvláště dobře viditelné na grafech č. 7 a č. 9. Zde jednak vidíme, že skutečně senzor T.A.3 měl odchytky minimálně 5 °C a někdy i více, zvláště v červenci. Zatímco u senzorů umístěných v meteorologické budce (Z.B.4 a Z.B.2) jsou po většinu dne odchytky velmi malé, a to do 1 °C. Problém nastává v červenci, kdy pravidelně každý den odpoledne vyskočí odchylka asi na 5 °C. To lze vysvětlit nevhodným umístěním budky u zdi (viz obrázek č. 24). Sluneční svit odpoledne zahřívá zeď a vytváří zde lokálně zvýšenou teplotu vzduchu.

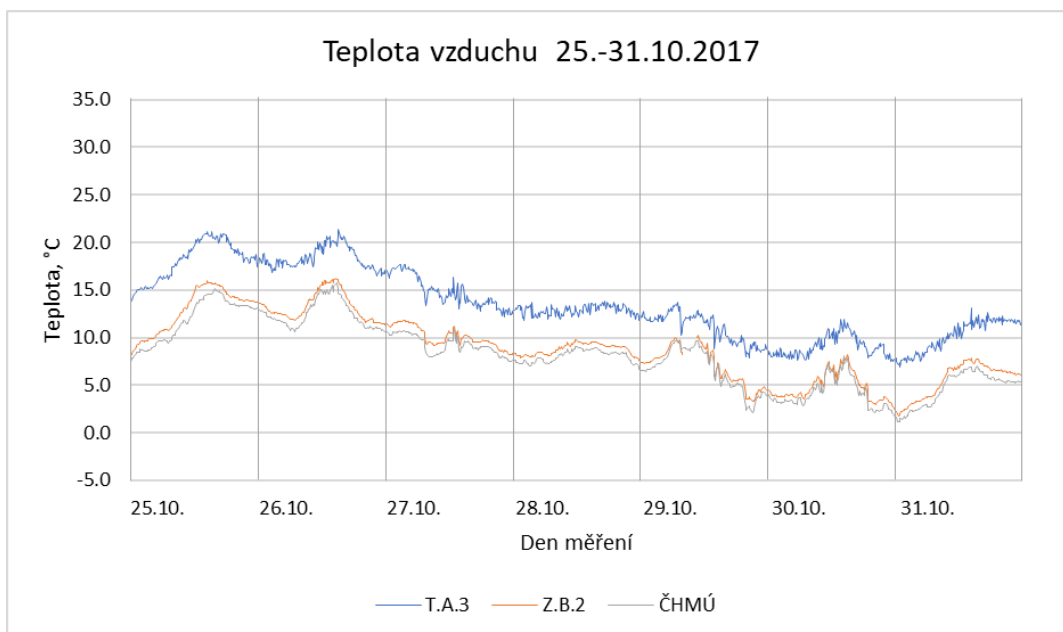
Grafy č. 10 a č. 12 jsou zde uvedeny pro detailnější zobrazení výsledků. Jedná se o srovnání naměřených dat teploty vzduchu v rozmezí 7 dnů. Tato dvě týdenní období byla vybrána pro zajímavý průběh odchylek mezi hodnotami naměřenými a získanými od ČHMÚ. Pro zvýraznění těchto odchylek jsou zde dále grafy č. 11 a č. 13 s rozdíly. Měřené hodnoty jsou v grafu zaneseny v SEČ. Svislé čáry odpovídají vždy počátku dne uvedeného v popisku vodorovné osy.



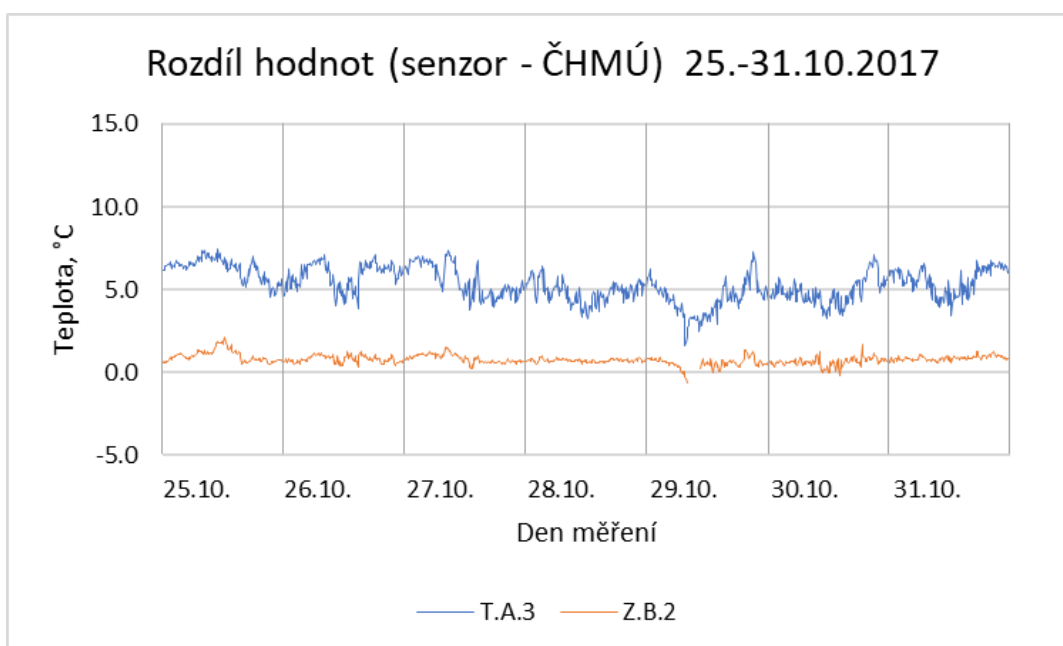
Graf 10: Teplota vzduchu 1.-7.7.2017



Graf 11: Rozdíly hodnot (senzor – ČHMÚ) 1.-7.7.2017



Graf 12: Teplota vzduchu 25.-31.10.2017

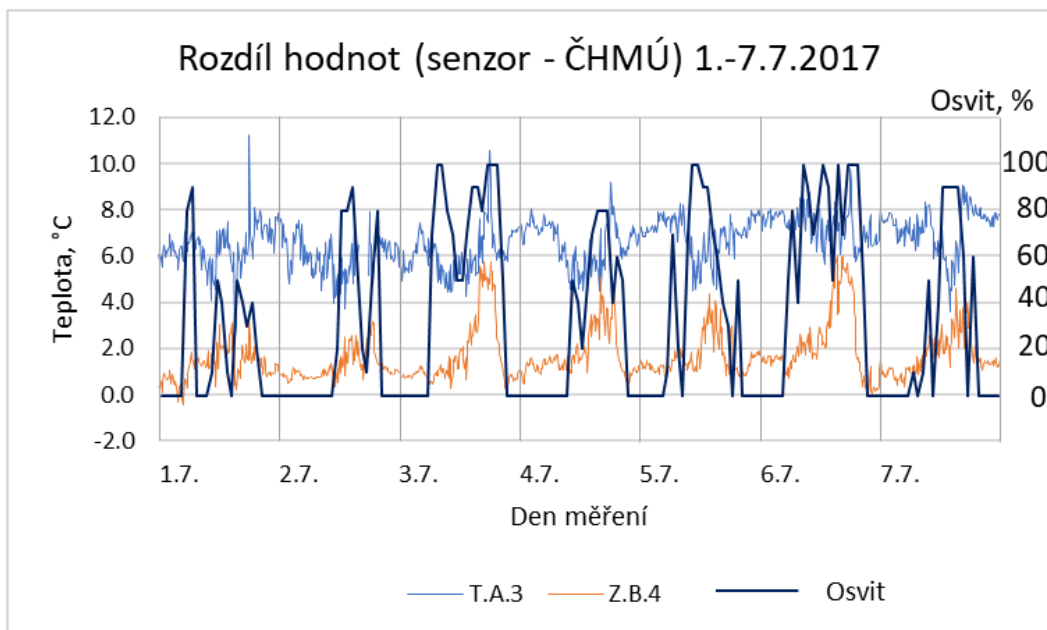


Graf 13: Rozdíly hodnot (senzor – ČHMÚ) 25.-31.10.2017

Tyto týdenní průběhy potvrzují závěry uvedené již v měsíčním srovnání dat, které je vidět v přecházejících grafech. Navíc je zde možné pozorovat detailně zvýšené odchylky v odpoledních hodinách (cca mezi 12. a 17. hodinou) během měsíce července. V týdnu od 1. do 7. července (viz graf č. 11) je vidět,

že odpolední nárůsty byly v různé dny odlišné. Tyto rozdíly by mohly být způsobeny různým slunečním osvitem. To znamená, že v některých dnech mohlo být zamračeno. Proto byl ještě vytvořen graf č. 14, kde pro tento týden byl k rozdílům teplot přidán záznam intenzity slunečního záření. Je zřejmé, že ve dnech se zvýšeným osvitem byly nárůsty teploty v budce vyšší. Dokonce z grafu vyplývá, že nárůsty rozdílů teplot začínají ve stejné době, kdy začíná slunce svítit v naší zeměpisné šířce.

V grafech č. 12 a č. 13 jsou uvedeny hodnoty, eventuálně rozdíly hodnot, pro říjnový týden 25.-30.10.2017. Jednak je zde opět vidět odchylka pro senzor T.A.3 asi 5 °C. Zatímco senzory v meteorologické budce mají po celou dobu jen minimální odchylky asi 1 °C. To potvrzuje, že slunce, které bylo v říjnu nízko nad obzorem, nemohlo zahřát zeď za meteorologickou budkou. Navíc je z těchto grafů zřejmé, že ačkoliv teplota mezi 25.10. a 30.10. výrazně poklesla (viz graf č. 12), rozdíly mezi hodnotami naměřenými a získanými jsou pro senzor Z.B.2 (meteorologická budka) malé a takřka konstantní. To svědčí o tom, že chyba měření teploty nezávisí na vlastní teplotě vzduchu.



Graf 14: Rozdíly hodnot (senzor – ČHMÚ) 1.-7.7.2017

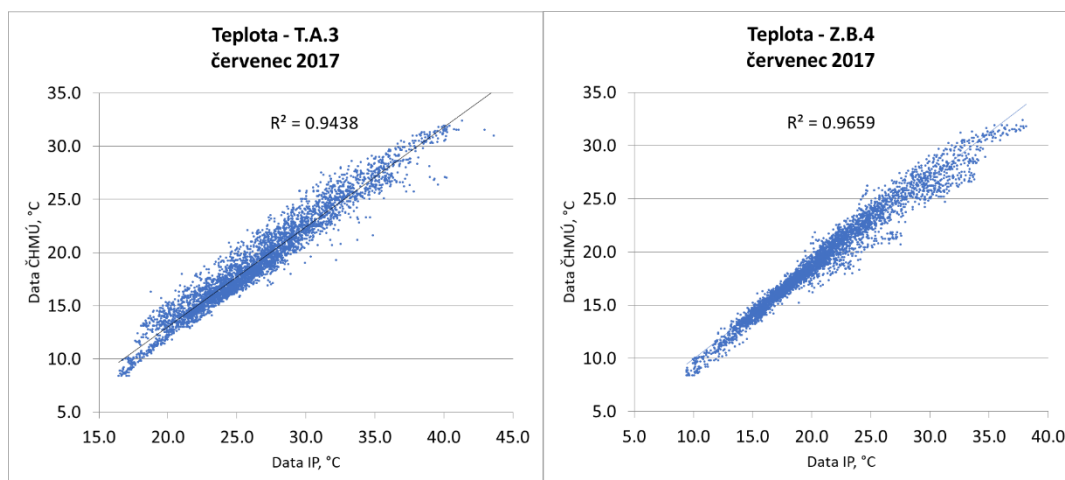
Z grafů uvedených v kapitole 5.1 je jasně viditelné, že rozdíly jsou dány soustavnou chybou vyplývající z umístění jednotlivých částí stanice. Průměrné měsíční rozdíly za červenec a říjen 2017 jsou uvedeny v tabulce č. 13.

| Průměrný rozdíl (senzor - ČHMÚ) | | | | | | |
|---------------------------------|---------------|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|
| Měsíc | T.A.3 | | Z.B.4 | | Z.B.2 | |
| | Teplota °C | Tlak hPa | Teplota °C | Tlak hPa | Teplota °C | Tlak hPa |
| červenec | 7.39 | -0.50 | 1.66 | -0.43 | | |
| říjen | 5.95 | -0.31 | | | 0.89 | 0.05 |

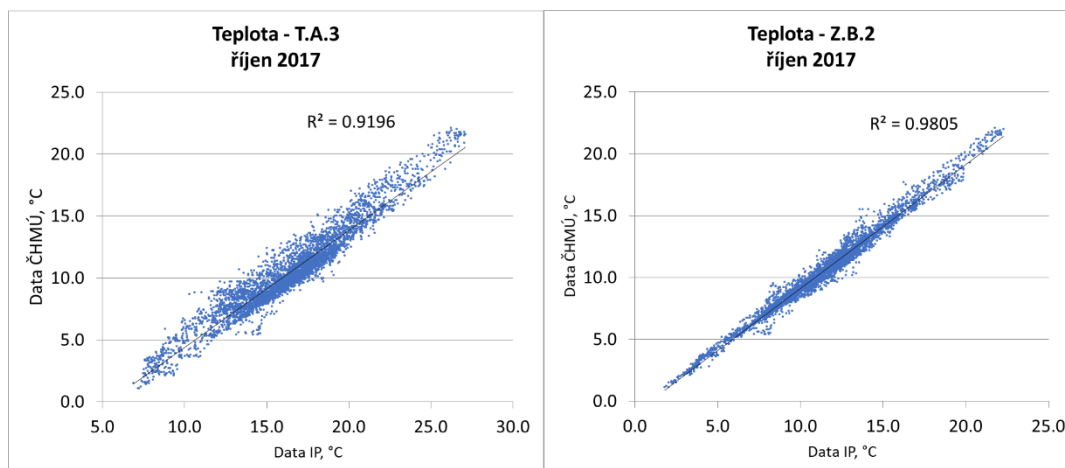
Tabulka 13: Přehled odchylek naměřených hodnot teploty

V grafech č. 15 a č. 16 jsou zobrazeny korelace mezi daty naměřenými na senzorech domácí meteorologické stanice a daty získanými od ČHMÚ. Data jsou proložena regresní přímkou a jsou zde vypočteny koeficienty determinace pro obě části stanice.

Pro všechny grafy je zde zřejmá souvislost mezi daty naměřenými a získanými, lépe vychází měření senzorem umístěným v meteorologické budce, zvláště pro říjnová data. V grafu pro senzor Z.B.4 (červenec) je vidět mírné přiohnutí u vyšších teplot. Zde se znovu určitě jedná o zvýšené odchylky v době slunečního osvit.



Graf 15: Regresní křivka – červenec 2017



Graf 16: Regresní křivka – říjen 2017

Pro oba naměřené měsíce byly vypočteny koeficienty determinace R^2 a koeficienty korelace R . [52]

Koeficienty jsou uvedeny v tabulkách č. 14 a č. 15. Koeficienty korelace pro všechny senzory jsou vyšší než 0,97 což svědčí o vysoké korelaci mezi hodnotami naměřenými a získanými. Nejlepší hodnota koeficientu R je 0,99 pro říjnové měření v meteorologické budce, to odpovídá zjištěním z předchozích grafů.

| Teplota | | | |
|----------|------------------------------|-------|-------|
| Měsíc | Koeficient determinace R^2 | | |
| | T.A.3 | Z.B.4 | Z.B.2 |
| červenec | 0.944 | 0.966 | |
| říjen | 0.920 | | 0.981 |

Tabulka 14: Koeficient determinace

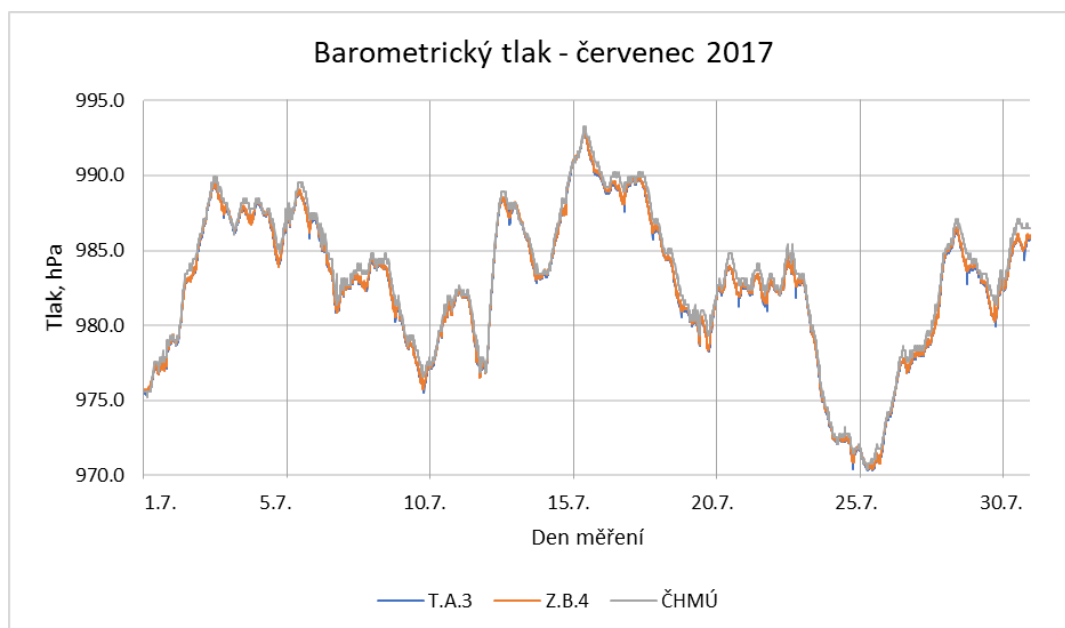
| Teplota | | | |
|----------|-------------------------|-------|-------|
| Měsíc | Koeficient korelace R | | |
| | T.A.3 | Z.B.4 | Z.B.2 |
| červenec | 0.971 | 0.983 | |
| říjen | 0.959 | | 0.990 |

Tabulka 15: Koeficient korelace

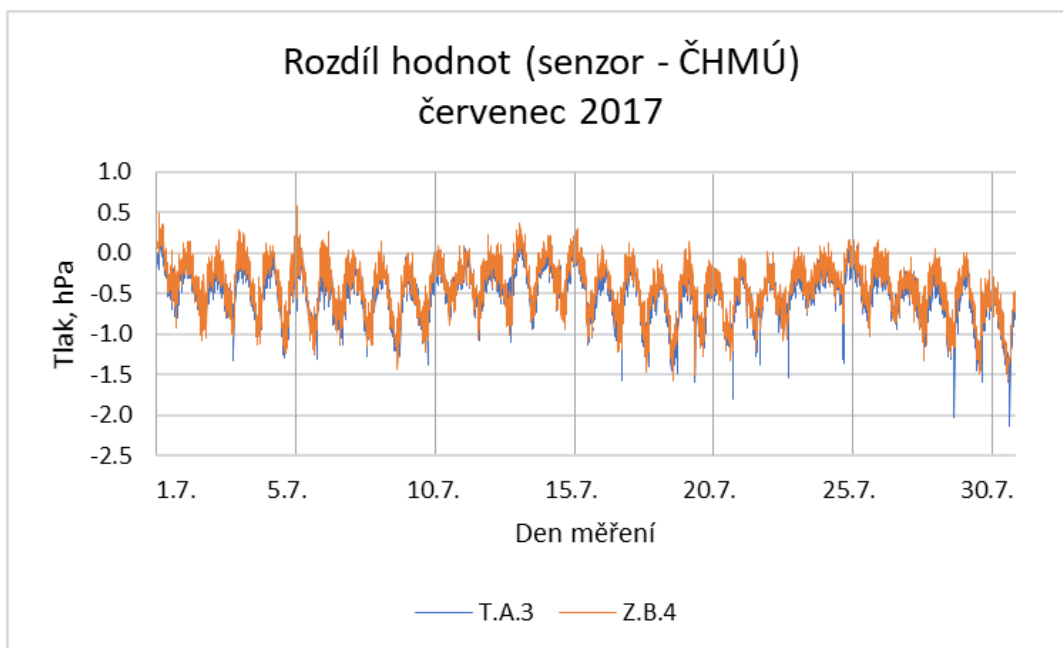
5.3 Barometrický tlak

V grafech č. 17 a č. 19 jsou zobrazena měření barometrického tlaku za měsíce červenec a říjen 2017 a porovnána s daty poskytnutými ČHMÚ. Svislé čáry mřížky označují půlnoc SEČ mezi dnem uvedeným v popisku uvedené osy a dnem následujícím. Na první pohled je zřejmé, že naměřené hodnoty velmi dobře odpovídají hodnotám poskytnutým, ale je zde řada drobných odchylek.

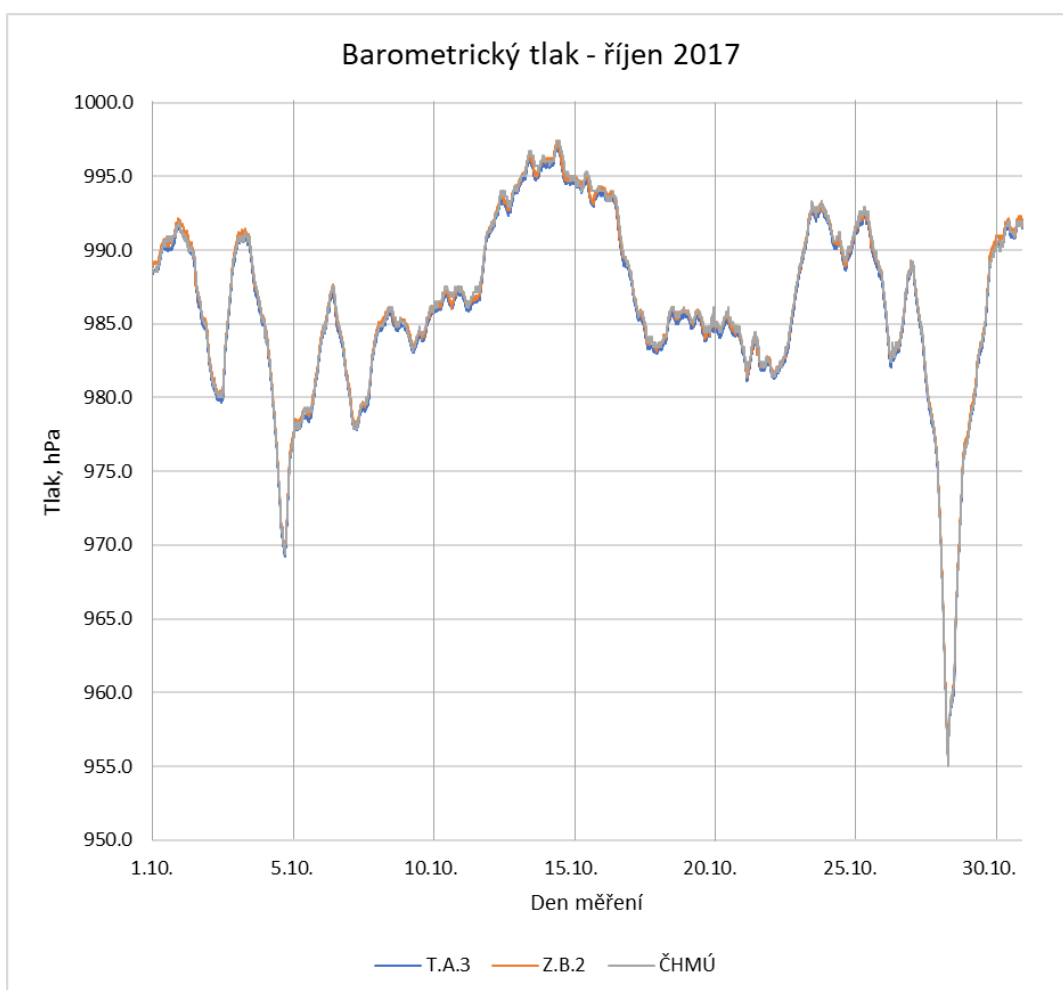
Pro zvýraznění odchylek mezi daty naměřenými na domácí meteorologické stanici a daty získanými od ČHMÚ jsou v grafech č. 18 a č. 20 zobrazeny rozdíly mezi těmito hodnotami. Jsou zde viditelné jednoduché periodické nárůsty a poklesy rozdílů. Toto zjištění bude diskutováno v dalším textu.



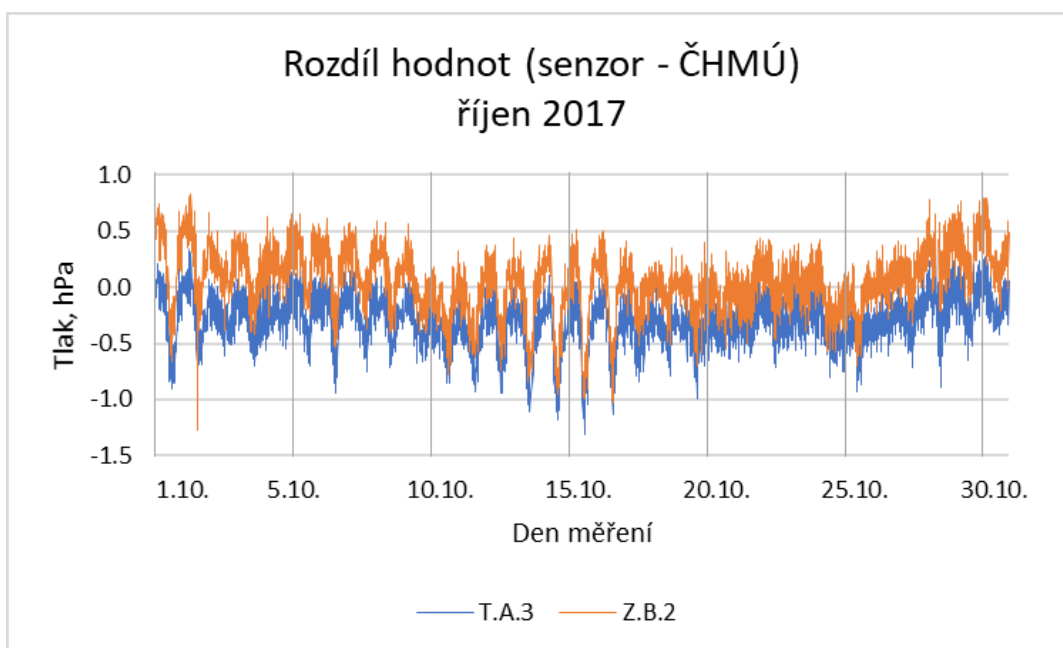
Graf 17: Barometrický tlak – červenec 2017



Graf 18: Rozdíl hodnot (senzor – ČHMÚ) - červenec 2017



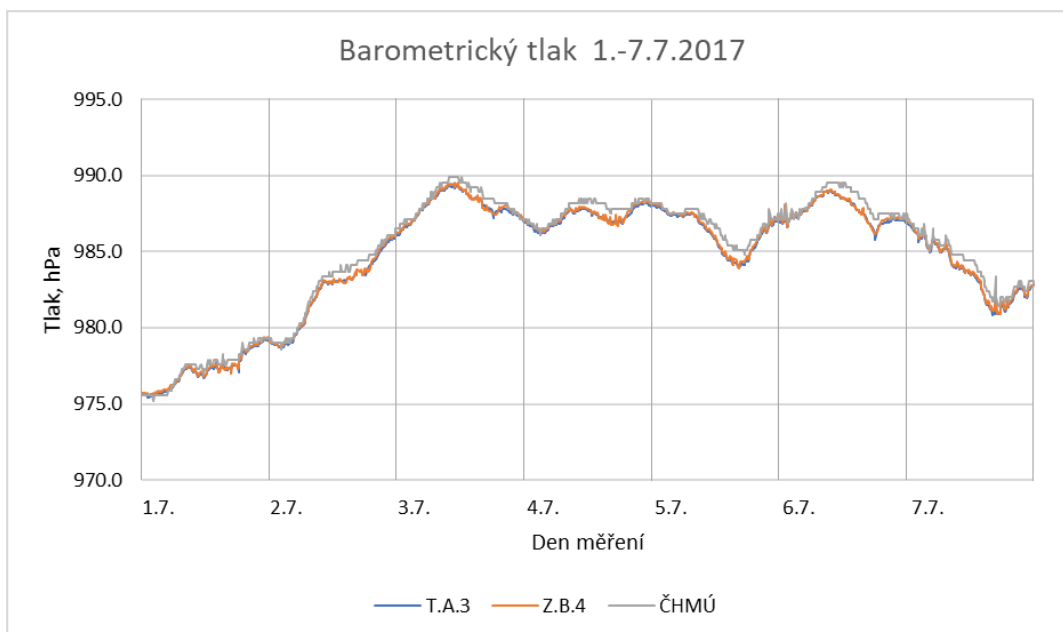
Graf 19: Barometrický tlak – říjen 2017



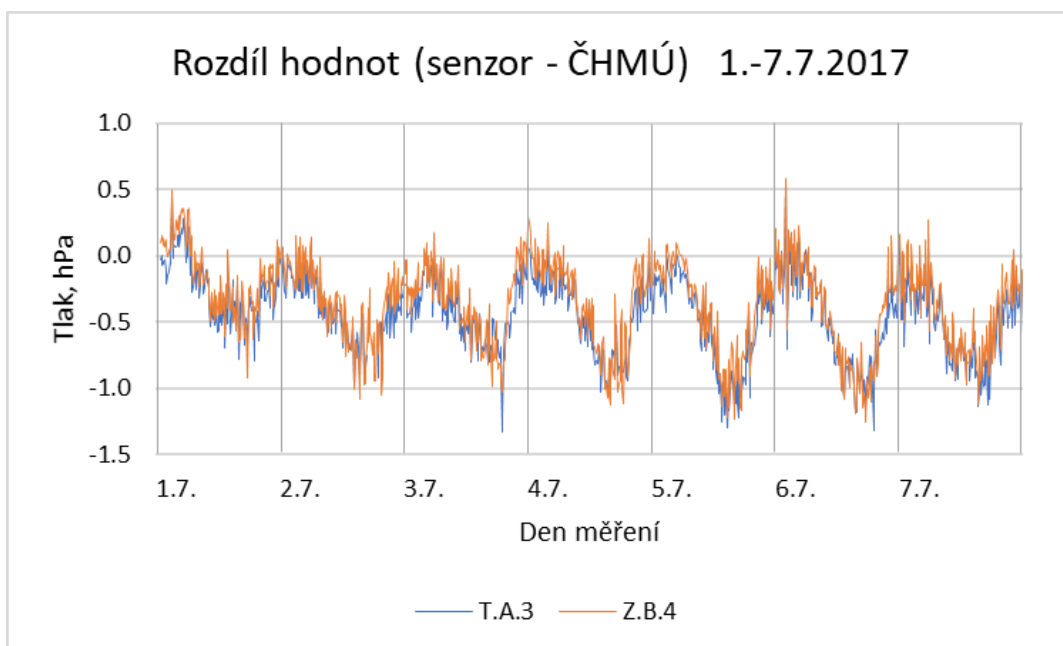
Graf 20: Rozdíl hodnot (senzor – ČHMÚ) – říjen 2017

Grafy č. 21 a č. 23 jsou zde uvedeny pro detailnější zobrazení výsledků. Jedná se o srovnání naměřených dat barometrického tlaku v rozmezí 7 dnů. Tato dvě týdenní období byla vybrána, protože vykazují výraznější odchylky. V případě července se jedná o stejný týden jako u porovnávání teplot, v případě října jsou to odlišné týdny. Svislé čáry oddělující jednotlivé dny odpovídají vždy začátku dne uvedeného v popisku osy.

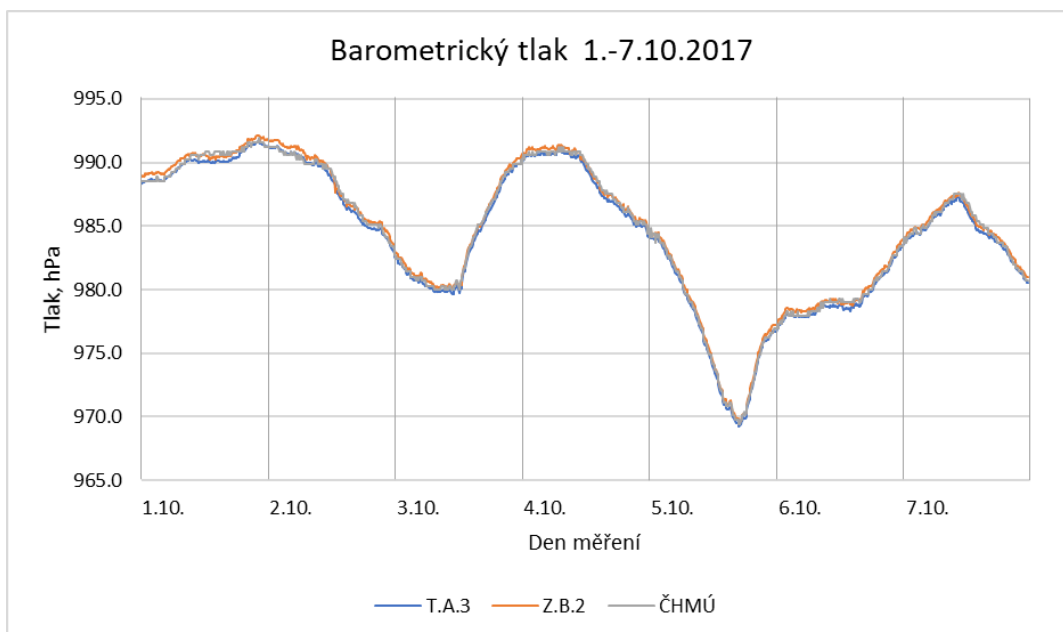
Z grafů je patrné, že průběhy si dobře odpovídají, ale jsou zde vidět odchylky do asi 1 hPa. Pro detailnější rozbor těchto odchylek jsou níže uvedeny grafy č. 22 a č. 24. Tyto grafy výborně ukazují periodické odchylky během každého dne, podobně jako u měsíčních průběhů. Toto naznačuje závislost senzorů tlaku na denním průběhu teploty. Celý problém bude hlouběji diskutován v závěru kapitoly.



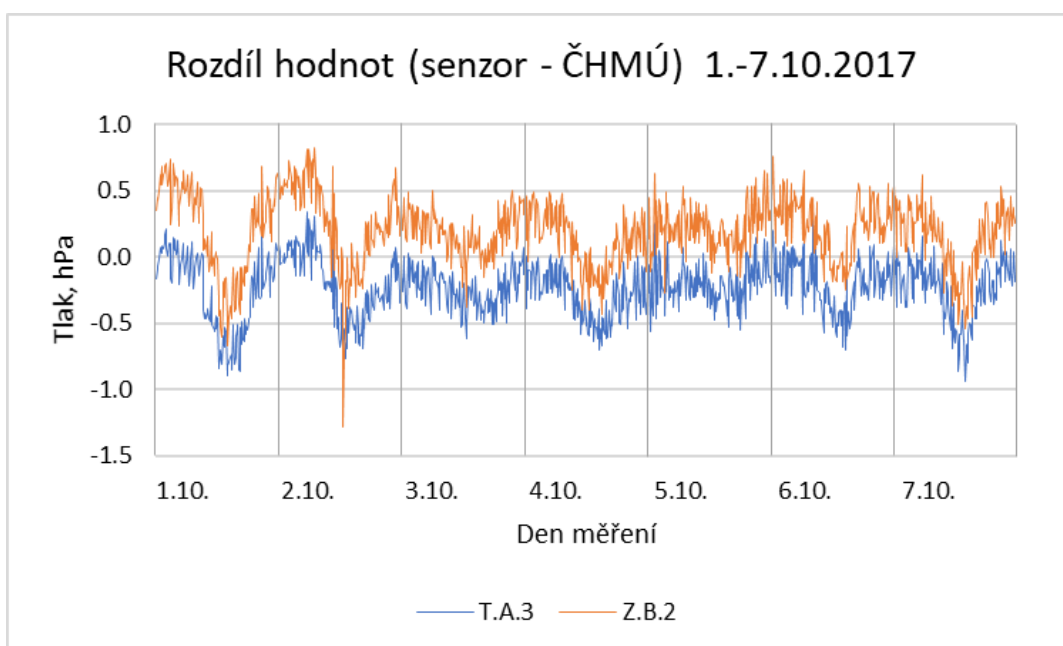
Graf 21: Barometrický tlak 1.-7.7.2017



Graf 22: Rozdíly hodnot (senzor – ČHMÚ) 1.-7.7.2017



Graf 23: Barometrický tlak 1.-7.10.2017



Graf 24: Rozdíly hodnot (senzor – ČHMÚ) 1.-7.10.2017

Pro přehlednost jsou průměrné měsíční rozdíly za červenec a říjen 2017 jsou uvedeny v tabulce č. 16.

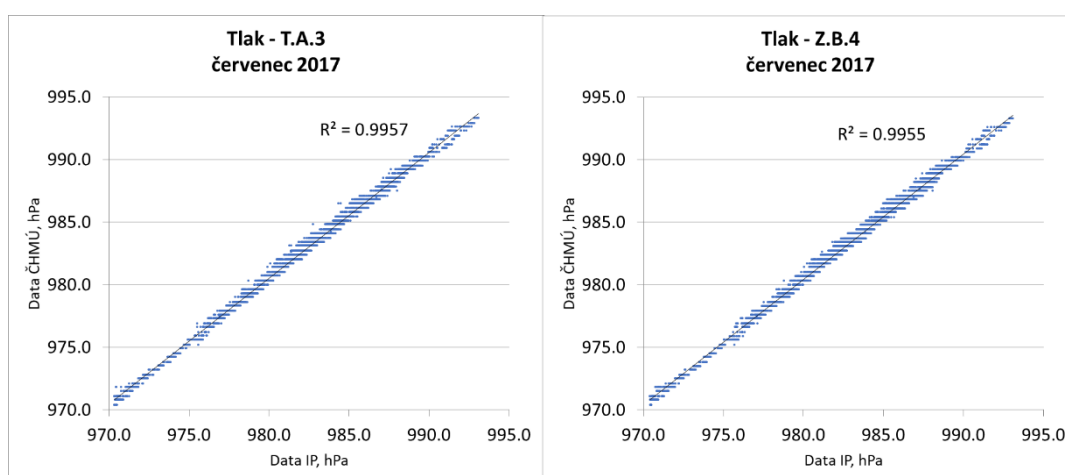
| Průměrný rozdíl (senzor - ČHMÚ) | | | | | | |
|---------------------------------|---------------|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|
| Měsíc | T.A.3 | | Z.B.4 | | Z.B.2 | |
| | Teplota °C | Tlak hPa | Teplota °C | Tlak hPa | Teplota °C | Tlak hPa |
| červenec | 7.39 | -0.50 | 1.66 | -0.43 | | |
| říjen | 5.95 | -0.31 | | | 0.89 | 0.05 |

Tabulka 16: Přehled odchylek naměřených hodnot tlaku

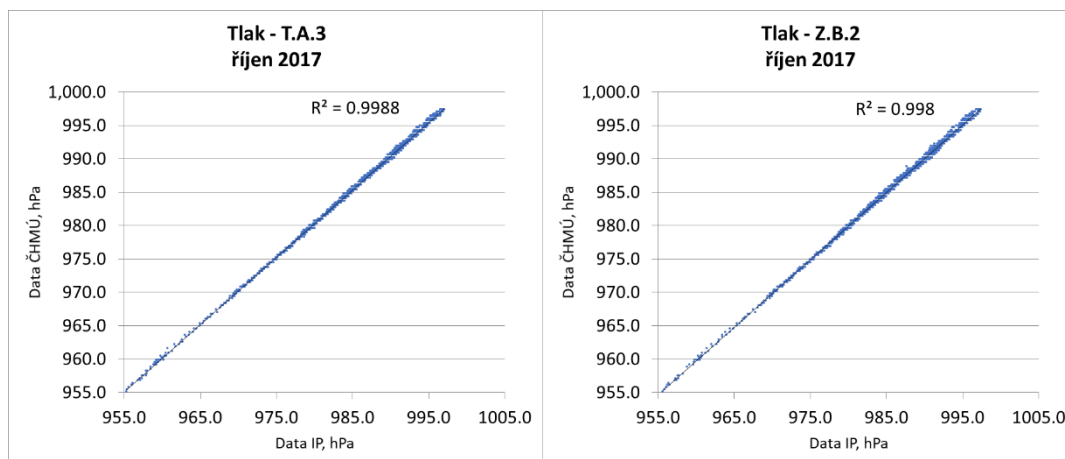
Z grafu rozdílu naměřeného tlaku během července 2017 vyplývá, že nejvyšší odchylky, a to směrem dolů, jsou v odpoledních hodinách, tedy v čase s vyšší teplotou. Tento jev bude diskutován později.

V grafech č. 25 a č. 26 jsou zobrazeny korelace mezi daty naměřenými na senzorech domácí meteorologické stanice a daty získanými od ČHMÚ. Data jsou proložena regresní přímkou a jsou zde vypočteny koeficienty determinace pro obě části stanice.

Pro všechny grafy je zde zřejmá souvislost mezi daty naměřenými a získanými.



Graf 25: Regresní křivka – červenec 2017



Graf 26: Regresní křivka – říjen 2017

Pro oba naměřené měsíce byly vypočteny koeficienty determinace R^2 a koeficienty korelace R uvedené v tabulkách č. 17 a č. 18.

| Tlak | | | |
|----------|------------------------------|-------|-------|
| Měsíc | Koeficient determinace R^2 | | |
| | T.A.3 | Z.B.4 | Z.B.2 |
| červenec | 0.996 | 0.996 | |
| říjen | 0.999 | | 0.998 |

Tabulka 17: Koeficient determinace

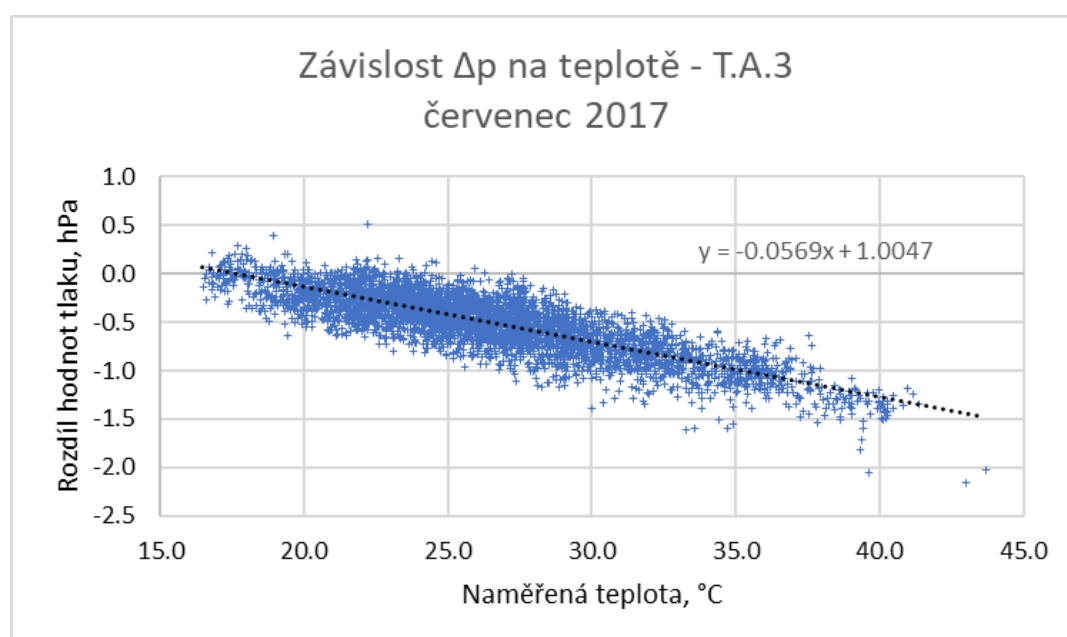
| Tlak | | | |
|----------|-------------------------|-------|-------|
| Měsíc | Koeficient korelace R | | |
| | T.A.3 | Z.B.4 | Z.B.2 |
| červenec | 0.998 | 0.998 | |
| říjen | 0.999 | | 0.999 |

Tabulka 18: Koeficient korelace

Koeficient korelace vypočítaný z červencových hodnot je 0,998, a to pro obě části meteorologické stanice, koeficient vycházející z říjnových hodnot činí 0,999, také pro obě části. Hodnoty korelačních koeficientů pro měření tlaku se velmi blíží jedné a tím ukazují vysokou závislost mezi daty naměřenými a poskytnutými ČHMÚ.

V předcházejícím textu v grafech rozdílů hodnot (graf č. 18, 20, 22, 24) byla pozorována periodická denní závislost měření tlaku. Lze vyslovit hypotézu, že výsledek měření čidla tlaku není závislý jen na tlaku, ale částečně i na teplotě.

Pro zvážení této teplotní závislosti odchylky naměřeného tlaku a teploty vzduchu během měření byla použita regresní analýza (viz graf č. 27). Z výše uvedených grafů je vidět, že čidla na obou částech stanice se chovají podobně, proto jsou další grafy pouze pro senzor T.A.3 a měsíc červenec. Předpokládám, že závislost je lineární.

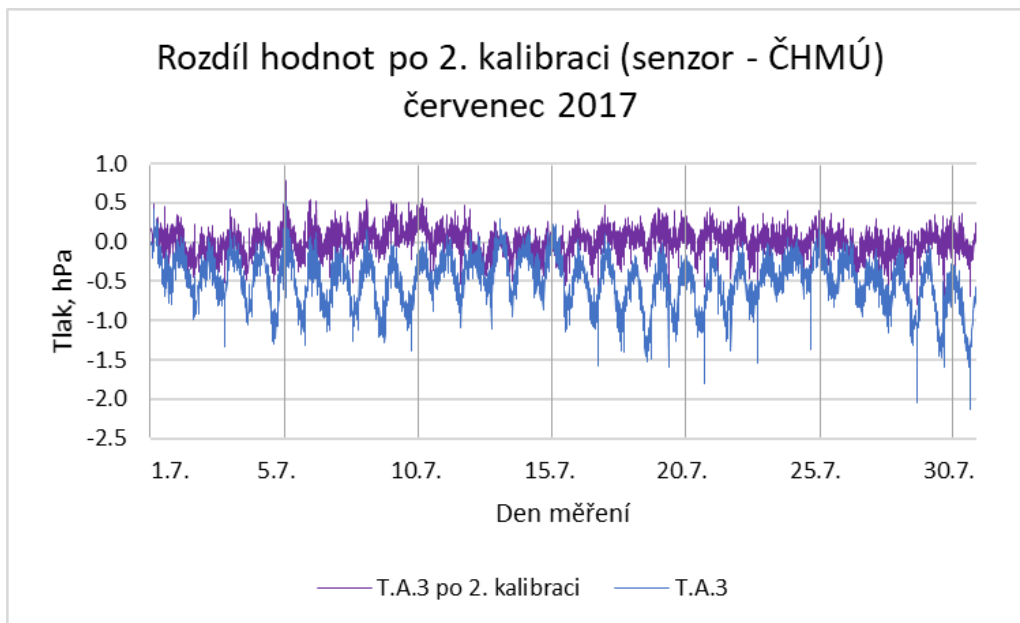


Graf 27: Rozdíly naměřených hodnot (senzor – ČHMÚ)

V grafu č. 27 jsou rozdíly tlaků Δp naměřených senzorem T.A.3 a hodnot získaných od ČHMÚ za měsíc červenec v závislosti na teplotě t naměřené senzorem T.A.3. Je to vlastně závislost hodnot rozdílu z grafu č. 18 a teploty z grafu č. 6. Je zde vidět určitá lineární závislost. Při proložení regresní přímkou je možné napsat vztah:

$$\Delta p = -0,0569 \cdot t + 1,0047 \quad (35)$$

Vypočtené rozdíly tlaků Δp lze odečíst od naměřených hodnot a tím získat přesnější data. Takto by tedy bylo možné provést druhou kalibraci.



Graf 28: Rozdíly naměřených hodnot po 2. kalibraci (senzor – ČHMÚ)

V grafu č. 28 je porovnání měsíčních rozdílů tlaků naměřených čidlem T.A.3 proti ČHMÚ a stejných dat upravených pomocí regresních koeficientů ze vztahu č. 35 (2. kalibrace). Vidíme výrazné zlepšení přesnosti. Z tohoto grafu je také zřejmé, že rozdíly hodnot barometrického tlaku jsou dány i chybou vyplývající ze závislosti čidla na teplotě. Je otázkou, jestli podobnou závislost vykazuje i originální čidlo BMP180.

5.4 Výrazné změny tlaku a výpadky senzorů

Jak bylo popsáno ve třetí kapitole má meteorologická stanice dvě části skládající se ze stejného zapojení Arduina a senzoru BMP180. Část A má zapojen senzor č. 3 a část B umístěná v meteobudce měla zapojen od března do srpna 2017 senzor č. 4. V srpnu během větrné bouře dne 11.8.2017 přestal senzor sbírat data. Znovuzapojení do sítě situaci nevyřešilo, proto byl vyměněn za senzor č. 2.

U obou stanic docházelo občas k výpadkům, především v období výrazných změn tlaku. Tento fakt mě zaujal, proto v následujícím textu popisují dvě výrazné meteorologické události proběhlé během měření.

5.4.1 Derecho 11.8.2017

Derecho je slovo původem ze španělštiny, kterým označujeme větrný jev, někdy doprovázející rozsáhlé silné bouřkové systémy. Není tedy žádným dalším druhem bouřkového systému. V podstatě se jedná o větrnou bouři, způsobenou rychle postupujícím bouřkovým systémem, který existuje po delší dobu a je schopen zasáhnout území i několika států. Nárazy větru hlavní osy pásma dosahují rychlosti přes 90 km/h. Jedná se o jeden konvektivní systém nikoliv o více samostatných bouří. Tento systém způsobí škody na území delším než 400 km.[49], [50]

Derecha je možné rozdělit podle rychlosti větru a způsobených škod:

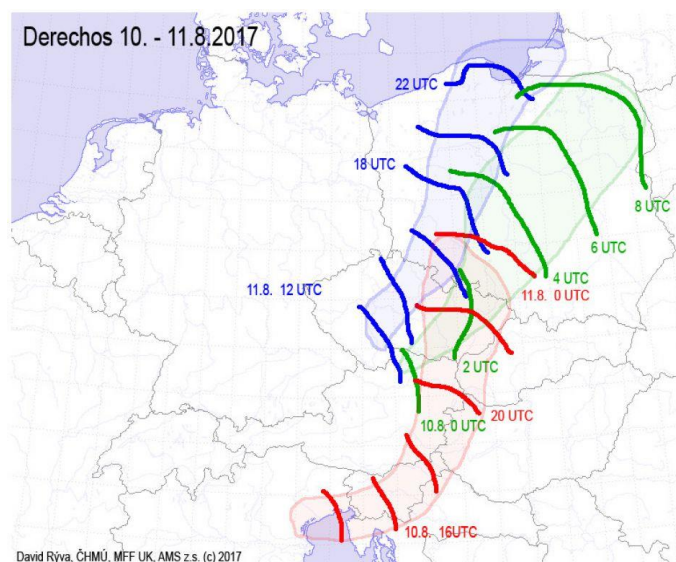
- Střední
 - na nejméně 3 stanicích vzdálených od sebe alespoň 64 km naměřeny nárazy větru přesahující rychlost 119 km/h
 - způsobené škody jsou stejného charakteru jako po tornádu síly F1 Fujitovy stupnice
- Silné
 - na nejméně 3 stanicích vzdálených od sebe alespoň 64 km naměřeny nárazy větru přesahující rychlost 137 km/h
 - způsobené škody odpovídají rychlosti větru

- Slabé
 - zasažená oblast je široká
 - nárazy větru nedosahují rychlosti 119 km/h
 - škody jsou způsobené jedním postupujícím systémem bouří [50]

Dne 10.8.2017 zasáhla Evropu silná bouře postupující od severu Rakouska, přes velkou část Moravy a následně napříč Polskem až na severovýchod země. Tato bouře za sebou nechala četné škody a jednu oběť. Ještě tentýž večer prošla druhá z trojice bouří, pásem od severu Itálie až po jih Polska.

Dne 11.8.2017 se přesouval systém od severu východních Čech až po Baltské pobřeží na severu Polska. Podle odhadů popadlo v lesích přes 8 milionů m³ dřeva, bouře připravila o život 6 lidí a desítky zranila.

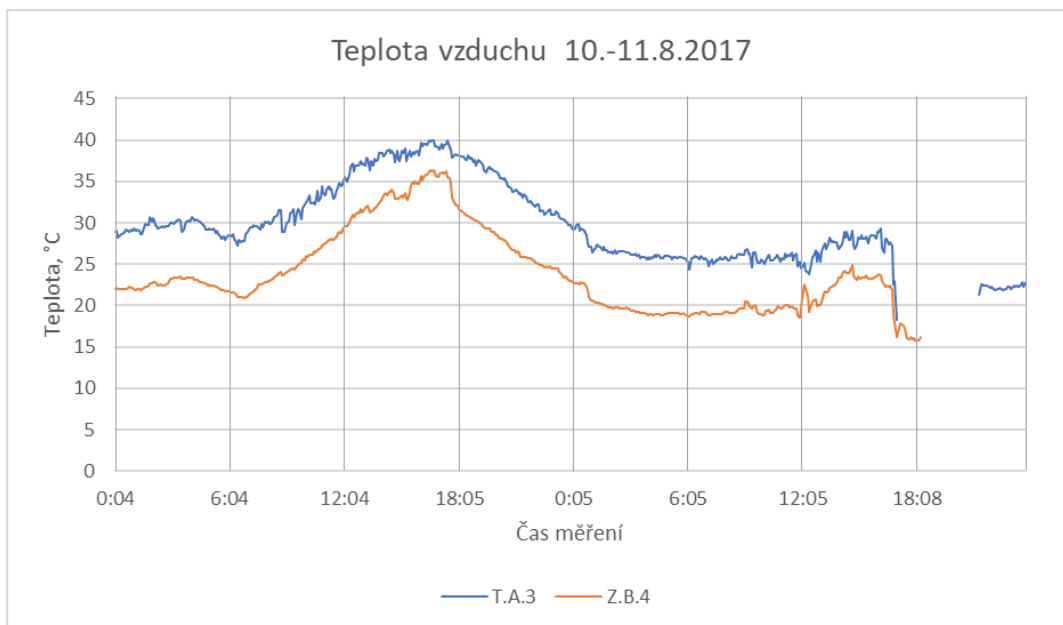
Zmíněné bouřkové systémy byly doprovázeny silnou větrnou bouří na rozsáhlém území. Všechny tři větrné bouře, způsobené těmito bouřkovými systémy, splnily kritéria pro označení derecho. [50]



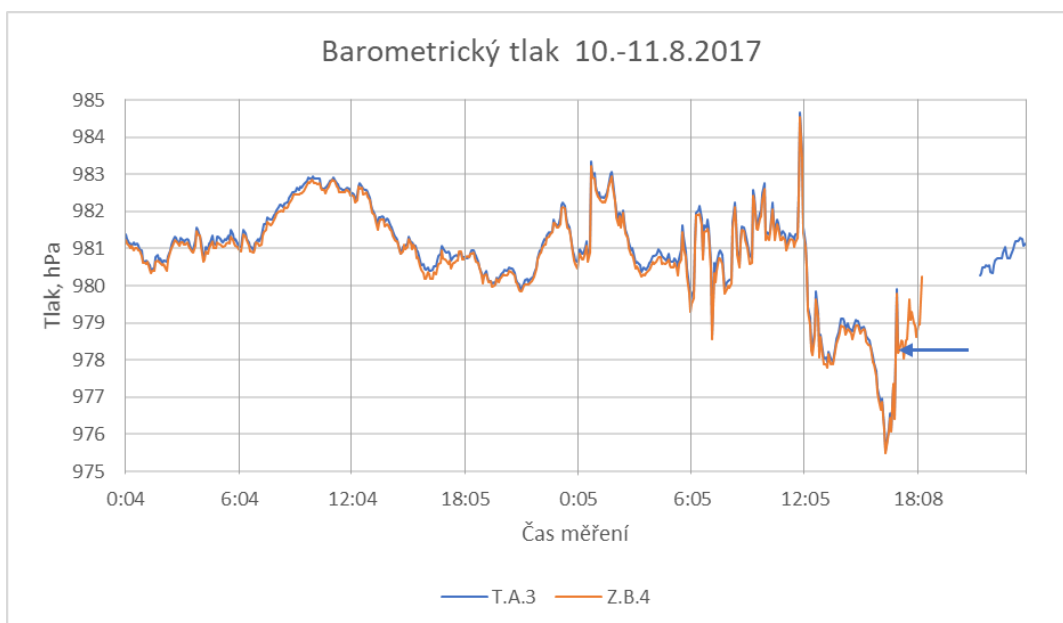
Obrázek 32: Derecha 10.-11.8.2017
barevné čáry ukazují polohy derecha v čase

Zdroj: [50]

V následujících grafech č. 29 a č. 30 jsou naměřené průběhy teplot a tlaků ve dnech 10. a 11. srpna, kdy probíhala derecha.



Graf 29: Teplota vzduchu 10.-11.8.2017



Graf 30: Barometrický tlak 10.-11.8.2017

Z grafů naměřených teplot je vidět velký rozdíl mezi senzory na terase a v meteobudce, který se téměř vyrovnal okolo 17. hodiny 11.8. To svědčí o velmi

horkém období, kdy na terase byla výrazně vyšší teplota vzduchu, to bylo ukončeno příchodem prudkého deště. Přitom jednak teploty výrazně klesly a zároveň se v obou místech téměř vyrovnaly. Toto je vidět v grafu č. 29, bohužel ve stejné době došlo k výpadkům senzorů. Senzor T.A.3 (modrá čára) byl uveden do provozu po cca 4 hodinách restartem stanice. Senzor Z.B.4 se již nepodařilo restartovat.

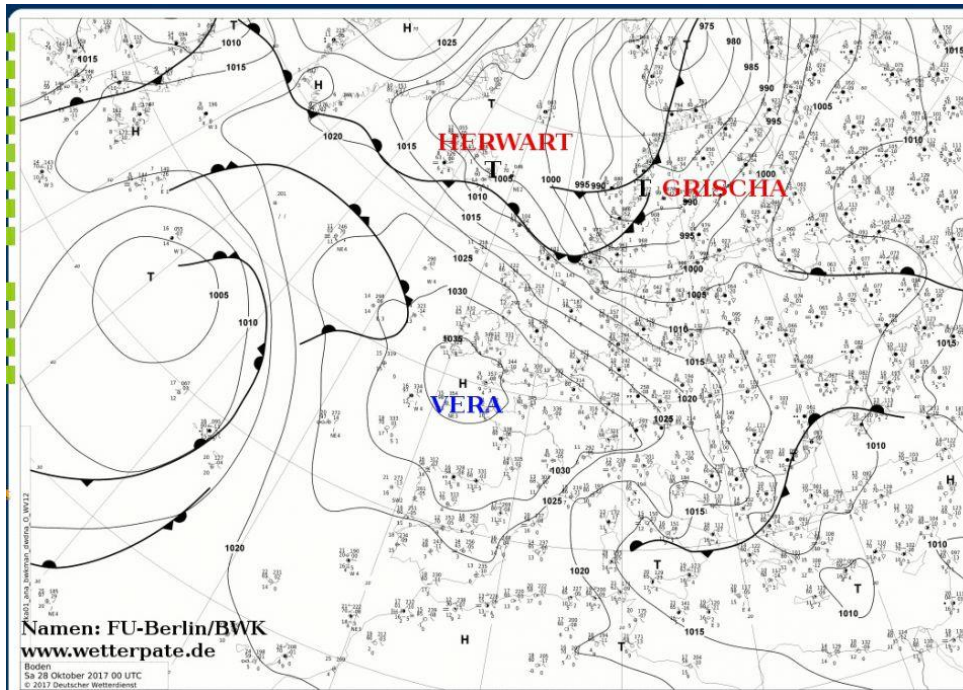
V grafu č. 30 je průběh změn tlaku ve dnech 10. a 11.8.2017. Jsou zde vidět mnohá kolísání tlaku během 11.8.2017. Výrazný nárůst a okamžitý pokles byl kolem 12. hodiny a další pokles byl kolem hodiny 17. hodiny ve stejné době, kdy přišel prudký déšť. Protože se u tohoto grafu překrývají průběhy tlaku z obou stanic, modrá šipka ukazuje místo, kdy došlo k výpadku Z.B.4. Z výše uvedených grafů, ale i jiných měření je zřejmé, že výpadky souvisí s výraznými meteorologickými ději, ale není jasné, zda souvisí s prudkou změnou tlaku či teploty.

5.4.2 Orkán Herwart

Dne 28.10.2017 byla německou povětrnostní službou (konkrétně institutem meteorologie při univerzitě v Berlíně) pojmenována tlaková níže Herwart. Tato tlaková níže vznikla v nočních hodinách na frontální vlně u Islandu (viz obrázek č. 33). Bylo předpokládáno, že tlaková níže Herwart bude postupovat v následujících hodinách po dráze přes jižní Skandinávii, Baltské moře, Polsko, Bělorusko a Litvu dále k severovýchodu (viz obrázek č. 34). Výrazný tlakový gradient mezi touto níží a tlakovou výší Vera se středem jižně od Britských ostrovů byl následně příčinou silného severoseverozápadního proudění vzduchu, a tedy velmi silného větru v oblasti střední Evropy.[16]

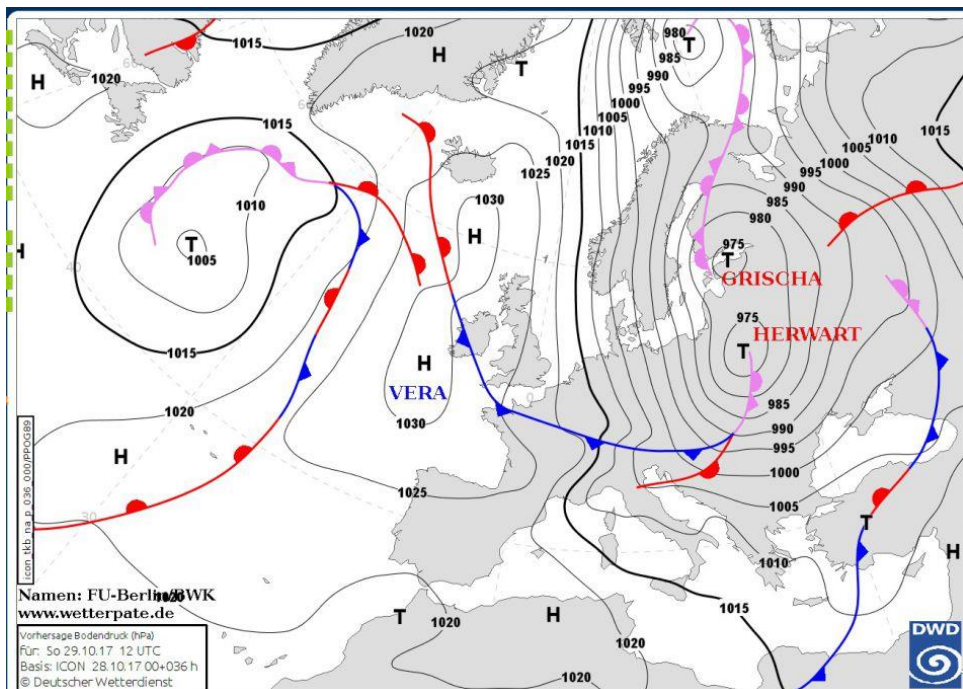
Předpokládaná nejvyšší rychlost větru měla nastat v průběhu nedělního dne, kdy měl foukat silný západní až jihozápadní, postupně severozápadní vítr 11 až 16 m/s nárazy 25 až 30 m/s, ojediněle až 35 m/s (125 km/h), na horách vichřice s nárazy 35 až 45 m/s (160 km/h), na hřebenech ojediněle i více. Nejvyšší nárazy větru, převyšující kritéria červeného tedy extrémního stupně výstrahy (110 km/hod v nížinách a 145 km/hod na horách) byly očekávány při přechodu

studené fronty a následné podružné studené fronty v týlu tlakové níže od ranních do brzkých odpoledních hodin (cca 7 SEČ až 14 SEČ). [16]



Obrázek 33: Tlaková níže 28.10.2017

Zdroj: [16]



Obrázek 34: Tlaková níže 29.10.2017

Zdroj: [16]

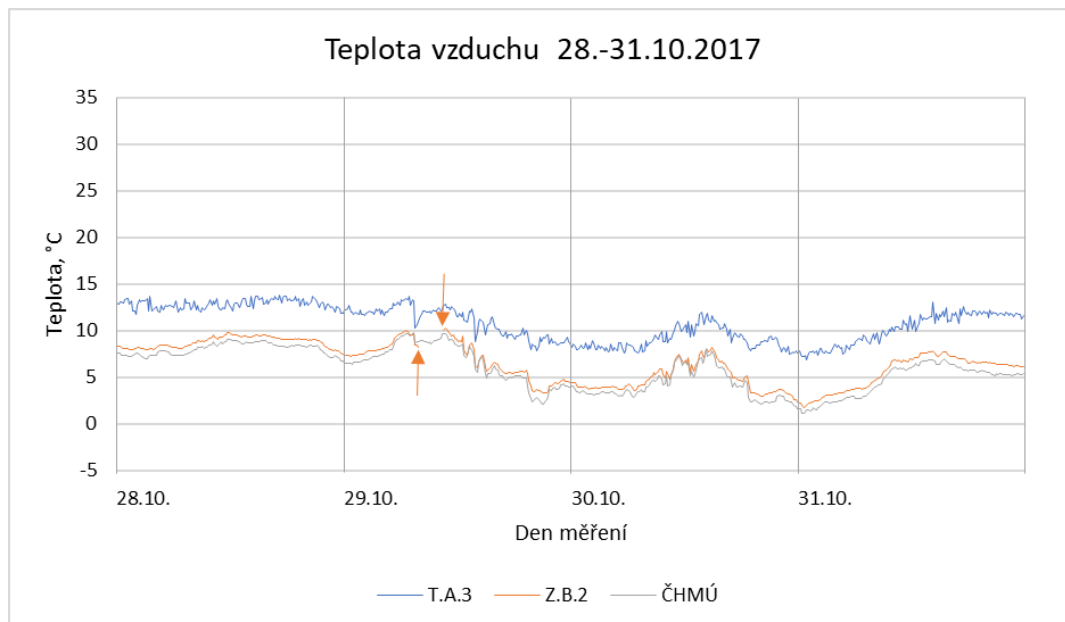
V průběhu rána a dopoledne foukal silný západní, postupně severozápadní vítr o průměrných rychlostech 12 až 17 m/s, v nárazech 20 až 30 m/s (až 120 km/h), na horách foukal vítr o síle vichřice v nárazech 25 až 40 m/s (144 km/h). Na hřebenech hor foukal vítr o síle orkánu. Nejsilnější nárazy větru, přesahující extrémní stupeň nebezpečí, se vyskytly při přechodu studené fronty od severozápadu v období mezi 7 až 11 hod. Extrémně silný vítr tak postihl postupně většinu krajů republiky.[47]

| Maximální náraz větru v m/s | Maximální náraz větru v km/h | Stanice | Nadmořská výška |
|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|-----------------|
| 50,5 | 182 | Luční bouda | 1413 |
| ? 50 | ? 180 | Sněžka (polská stanice) | |
| ? 49,3 | ? 177 | Sněžka, Poštovna | 1602 |
| 49 | 176 | Fichtelberg (německá stan.) | |
| 41,9 | 151 | Milešovka | 831 |
| 36,5 | 131 | Ústí nad Labem, Kočkov | 375 |
| 36 | 130 | Javorový vrch | 930 |
| 35,3 | 127 | Nová Ves v Horách | 725 |
| 34,8 | 125 | Přibyslav, Hřiště | 533 |
| 34,1 | 123 | Výrovka, Pec pod Sněžkou | 1362 |
| 33,8 | 122 | Skuteč | 457 |
| 32,9 | 118 | Praha, Karlov | 261 |
| 32,7 | 118 | Luká | 510 |
| 32,3 | 116 | Lysá hora | 1322 |
| 32,2 | 116 | Doksany | 158 |
| 31,8 | 114 | Kocelovice | 519 |
| 31,6 | 114 | Klínovec | 1236 |
| 31,5 | 113 | Protivanov | 675 |
| 31,4 | 113 | Brno, Tuřany | 241 |
| 31,1 | 112 | Tušimice | 322 |
| 31,1 | 112 | Kuchařovice | 334 |
| 30,9 | 111 | Chotusice, letiště | 238 |
| 30,3 | 109 | Vlašim | 415 |
| 30 | 108 | Sněžník | 569 |

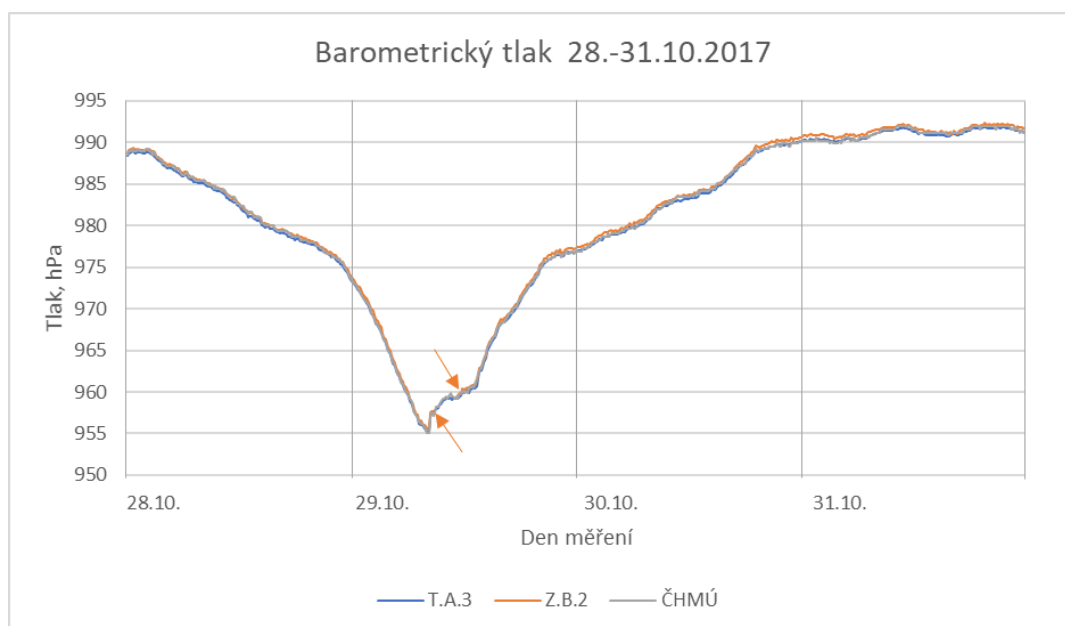
Tabulka 19: Rychlost větru 29.10.2017

Zdroj: [48]

V grafech č. 31 až č. 33 jsou průběhy teplot a tlaků ve dnech 28.-31.10., tedy období, kdy probíhal orkán Herwart. V grafu č. 31 je průběh teplot, kde je vidět, že denní kolísání teploty je malé. Nicméně rozdíl mezi senzorem na terase a senzorem v meteobudce je stále asi 5 °C. Předpokládanou příčinou je teplejší vzduch na terase u domu, ve kterém se v této době již topilo.

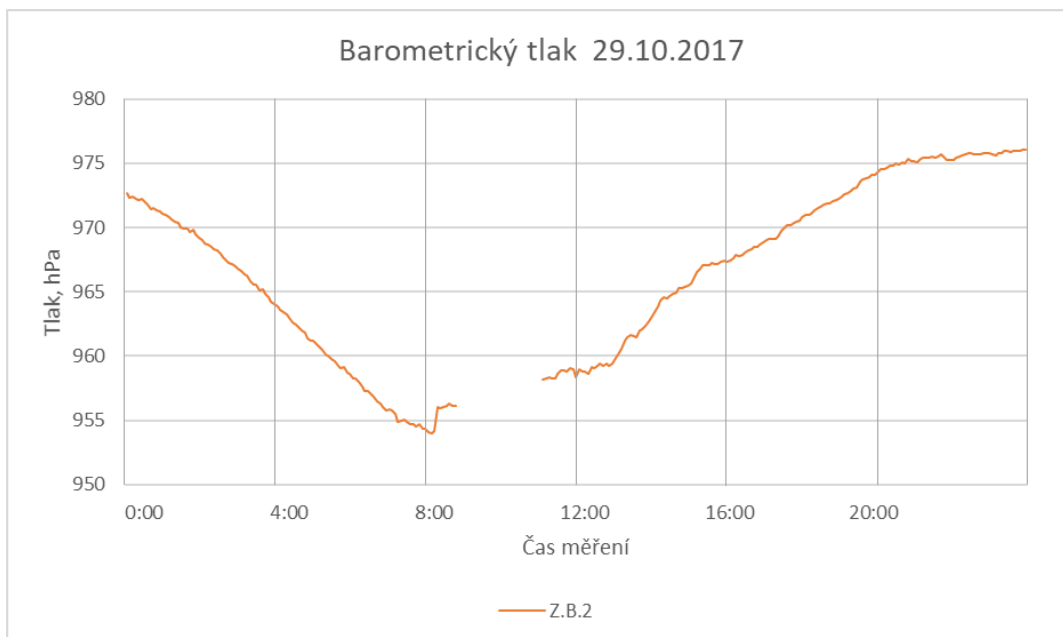


Graf 31: Teplota vzduchu během orkánu Herwart



Graf 32: Barometrický tlak během orkánu Herwart

Výpadek měření stanice Z.B.2 je na grafech č. 31 a č. 32 označen oranžovými šipkami.



Graf 33: Barometrický tlak během orkánu Herwart

Zatímco změny teploty byly velmi malé, tak z 28. na 29.10. došlo k výraznému poklesu tlaku o téměř 45 hPa (viz graf č. 32). Podobnou rychlostí se tlak znovu zvýšil na hodnotu podobnou té před poklesem. Při této události došlo opět k výpadku senzoru v meteobudce. V grafu č. 33 je detail tohoto výpadku, je zde vidět, že k výpadku došlo krátce po poklesu tlaku, asi za hodinu byl senzor opět zprovozněn restartováním.

Závěr

Hlavním cílem práce byla optimalizace umístění senzorů. Navazovala na bakalářskou práci, ve které jsem si ověřila, že je možné naměřit hodnoty velmi podobné hodnotám, které měří ČHMÚ.

Na rozdíl od bakalářské práce zde bylo provedeno měření na dvou stanicích. První stanice byla umístěna na terase jako v případě bakalářské práce, druhá stanice byla umístěna do zjednodušené meteorologické budky na zahradě. V další části práce se porovnávaly hodnoty naměřené senzory z obou stanic.

Pro vyloučení soustavných chyb (rozdíly mezi senzory) měřených dat byla provedena kalibrace, jež byla blíže popsána v kapitole č. 4. Pomocí výsledků této kalibrace byla naměřená data upravena (viz kapitola 5.1). Dopočítané odchylky tedy nevyplývají z rozdílné přesnosti senzorů, ale pouze z rozdílného umístění. Podařilo se zjistit, že meteorologická budka je výrazně lepší než terasa.

I přes korekci se ukázaly odchylky měření teploty na obou částech stanice, a to oproti hodnotám z ČHMÚ. Zatímco data ze senzorů v meteorologické budce na zahradě jsou velmi blízká hodnotám z ČHMÚ, pak data naměřená ze stanice umístěné na terase prokazují soustavnou chybu (cca 5°C), která bude pravděpodobně způsobena prohřátím budovy. Přestože data ze stanice v meteorologické budce jsou hodnotám z ČHMÚ bližší, stejně vykazují během měření v červenci v odpoledních hodinách výraznější odchylky, které se projevují během odpoledních hodin dnů se slunečným počasím. Tento problém je zcela určitě způsoben nedodržením standardů pro výrobu meteorologické budky. Po zvážení výsledků měření lze potvrdit, že umístění meteorologické stanice má na přesnost měření zásadní vliv a mnohem přesnější data získáme při použití meteorologické budky.

Umístění stanice naopak nemá příliš velký vliv na přesnost měření barometrického tlaku. Naměřená data se velmi dobře blíží hodnotám získaným od ČHMÚ. Při měření byla zjištěna závislost přesnosti měření tlaku na aktuální teplotě. Při vyšší teplotě senzory ukazují nižší hodnotu tlaku. To potvrzuje nutnost použití kalibračních koeficientů pro senzor BMP180.

Během měření se ukázaly problémy se spolehlivostí senzorů. Jednak docházelo k výpadkům v měření, a navíc pájené spoje na senzorech korodovaly. Není zcela zřejmé, zda výpadky přímo souvisí s korozí, nicméně výpadky nastávaly po prudkém snížení teploty. Korozi spojů považuji za vážný problém. Senzor musí být nutně v přímém kontaktu se vzduchem, aby mohl přesně měřit, a tak ho není možné chránit před vlhkostí vysráženou z okolního vzduchu.

Nicméně i přes tyto nedostatky se naměřené hodnoty velmi blíží k hodnotám naměřeným na nedaleké meteorologické stanici ČHMÚ. Ze srovnání obou částí domácí meteorologické stanice jasně vyplývá, že umístění senzorů v meteorologické budce velmi zpřesnilo měření.

Seznam použité literatury

- [1] KOPÁČEK, Jaroslav a Jan BEDNÁŘ. *Jak vzniká počasí*. Vyd. 1. Praha: Karolinum, 2005. ISBN 978-80-246-1002-3.
- [2] ACOT, Pascal. *Historie a změny klimatu: od velkého třesku ke klimatickým katastrofám*. Vyd. 1. Překlad Věra Hrubanová. Praha: Karolinum, 2005. ISBN 80-246-0869-3.
- [3] DIETRICH, Volkmar. *Člověk a příroda*. 1. vyd. Plzeň: Fraus, 2005. Učebnice pro integrovanou výuku. ISBN 80-7238-338-8.
- [4] KRŠKA, Karel a Ferdinand ŠAMAJ. *Dějiny meteorologie v českých zemích a na Slovensku*. Vyd. 1. V Praze: Karolinum, 2001. ISBN 80-7184-951-0.
- [5] DVOŘÁK, Petr. *Pozorování a předpovědi počasí*. Vyd. 1. Cheb: Svět křídel, 2012. ISBN 978-80-87567-20-3.
- [6] CRUMMENERL, Rainer. *Počasí*. 1. vyd. Ilustrace Wolfgang Freitag, Frank Kliemt, Bohdan Štěrba. Plzeň: Fraus, c2007. Co-jak-proč. ISBN 978-80-7238-624-6.
- [7] BUCKLEY, Bruce, Edward J HOPKINS a Richard WHITAKER. *Počasí: velký obrazový průvodce*. 1. vyd. Čestlice: Rebo, 2006. ISBN 80-7234-552-4.
- [8] MUNZAR, Jan. *Malý průvodce meteorologií*. Praha: Mladá fronta, 1989. Malé encyklopedie (Mladá fronta).
- [9] *Země*. Redaktor James F Luhr. V Praze: Knižní klub, 2004. ISBN 80-242-1225-0.
- [10] PEJML, Karel. *Předpovídáme počasí*. Praha: Státní zemědělské nakladatelství, 1971. Lesnictví a myslivost.
- [11] HORÁK, Zdeněk, František KRUPKA a Václav ŠINDELÁŘ. *Základy technické fyziky: přehled technické fyziky v celém rozsahu*. Vyd. 2. Praha: Práce, 1955. Knižnice techniků a zlepšovatelů.

- [12] *Coriolisova síla* [online]. [cit. 2017-09-28]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/43-coriolisova-sila>
- [13] *Rekordy počasí* [online]. [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: <http://www.tom-pocasi.wz.cz/odkazy/rekordypocasi.html>
- [14] ČHMÚ: Návod pro pozorovatele automatizovaných meteorologických stanic [online]. [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: <http://portal.chmi.cz/>
- [15] *MySQL: Databáze MySQL* [online]. [cit. 2017-09-29]. Dostupné z: <https://www.mysql.com/>
- [16] *Orkán Herwart* [online]. [cit. 2017-11-22]. Dostupné z: <http://www.infomet.cz/index.php?id=read&idd=1509193166>
- [17] *Adafruit* [online]. [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: <https://www.adafruit.com/products/1603>
- [18] *NAS Synology ds213j* [online]. [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: <http://pctuning.tyden.cz/hardware/disky-cd-dvd-br/29312-s-bohatou-vybavou-duel-nas-synology-ds213j-a-ds214se?start=4>
- [19] *Rozložení oblastí* [online]. [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Air_masses.svg
- [20] *Atmosférické vzduchové hmoty* [online]. [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: <http://www.in-pocasi.cz/clanky/teorie/atmosfericke-vzduchove-hmoty/>
- [21] *Synoptická mapa* [online]. [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: <https://www.wunderground.com/blog/weatherhistorian/flooding-worst-in-modern-records-for-southern-england>
- [22] *Tlaková níže* [online]. [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: <http://geologie.vsb.cz/jelinek/tc-atmosfera.htm>
- [23] *Učebnice zeměpisu* [online]. [cit. 2017-09-28]. Dostupné z: <http://skompasem.cz/clanky/ucebnice-zemepisu/planetarni-geografie-ii.-zeme-a-jeji-pohyby-petr-daubner.html>
- [24] *Torricelliho pokus* [online]. [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: <http://www.eprojekt.gjs.cz/ImageView.aspx?id=1578&guid=f9e17f569eae4f8e955cb031bba03648>

- [25] *Torricelliho rtuťový barometr* [online]. [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: <http://vesmir.cz/2015/01/24/nejosemetnejsi-cisel/>
- [26] *Aneroid* [online]. [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: <http://www.atmos.washington.edu/2007Q3/101/LINKS-html/AneroidBarometer.html>
- [27] *Termoskop* [online]. [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: <http://galileo.rice.edu/sci/instruments/thermometer.html>
- [28] *Schéma Raspberry Pi B+* [online]. [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: <https://www.raspberrypi.org/forums/viewtopic.php?t=81716>
- [29] *Všeobecná cirkulace atmosféry: Vzduchové hmoty* [online]. [cit. 2017-07-17]. Dostupné z: https://is.muni.cz/do/rect/el/estud/pdf/ps14/fyz_geogr/web/pages/04-cirkulace.html
- [30] *Klimatické poměry České republiky* [online]. [cit. 2017-07-27]. Dostupné z: http://www.herber.kvalitne.cz/FG_CR/klima.html
- [31] *NAO: Severoatlantická oscilace* [online]. [cit. 2017-07-30]. Dostupné z: <http://www.in-pocasi.cz/clanky/teorie/severoatlanticka-oscilace-nao/>
- [32] *Měření tlaku BMP180: Návod k produktům* [online]. [cit. 2017-08-27]. Dostupné z: <http://navody.arduino-shop.cz/navody-k-produktum/mereni-tlaku-bmp180.html>
- [33] *Arduino: Documentation* [online]. [cit. 2017-08-27]. Dostupné z: <https://store.arduino.cc/usa/arduino-nano>
- [34] *Piezelektrické snímače tlaku: Elektrické tlakoměry* [online]. [cit. 2017-08-27]. Dostupné z: http://www.e-automatizace.cz/ebooks/mmv/tlak/tlak_tlakomery_elektricke.htm#piezo
- [35] *BMP180 Digital pressure sensor: Data sheet* [online]. [cit. 2017-08-27]. Dostupné z: <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/BST-BMP180-DS000-09.pdf>
- [36] *Snímače tlaku: Snímače a měřicí technika* [online]. [cit. 2017-08-28]. Dostupné z: http://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/42719.pdf

- [37] *Mikrosenzory a mikroelektromechanické systémy* [online]. [cit. 2017-08-28]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/33524871-Mikrosenzory-a-mikroelektromechanicke-systemy.html>
- [38] *Geografie* [online]. [cit. 2017-09-28]. Dostupné z: <http://wboy.cz/poznamky/zem5.php>
- [39] *Meteocentrum: Atmosférické fronty* [online]. [cit. 2017-09-28]. Dostupné z: <http://www.meteocentrum.cz/zajimavosti/encyklopedie/atmosfericke-fronty>
- [40] *Atmosférické fronty: Okluzní fronta* [online]. [cit. 2018-02-28]. Dostupné z: http://sas.srs-vodnany.cz/srs/vos3_10/silerova/atmosfericke_fronty.html
- [41] *Počasi: Severoatlantická oscilace a její vliv na počasí v Evropě* [online]. [cit. 2017-09-28]. Dostupné z: <http://www.pocasicz.cz/aktuality-o-pocasi/aktuality-471/severoatlanticka-oscilace-a-jeji-vliv-na-pocasi-v-evrope-2-1409>
- [42] *Počasi: Počasí 28. října 1918* [online]. [cit. 2017-09-28]. Dostupné z: http://zpravy.idnes.cz/meteorologove-k-28-rijnu-2018-dca-/domaci.aspx?c=A161028_084939_domaci_cen
- [43] *Masarykova univerzita: Fyzikální vlastnosti mořské vody* [online]. [cit. 2017-09-28]. Dostupné z: https://is.muni.cz/do/rect/el/estud/pdf/ps14/fyz_geogr/web/pages/12-2-fyzikalni-vlastnosti.html
- [44] *Pascalův zákon* [online]. [cit. 2017-09-28]. Dostupné z: <http://www.oskole.sk/userfiles/image/fyzika/pascalov%20zakon/pasza1.jpg>
- [45] *Elektrické tlakoměry: Piezoelektrické snímače tlaku* [online]. [cit. 2017-09-28]. Dostupné z: http://www.e-automatizace.cz/ebooks/mmv/tlak/tlak_tlakomery_elektricke.htm#piezo
- [46] *Arduino Nano* [online]. [cit. 2017-09-28]. Dostupné z: <https://store.arduino.cc/arduino-nano>
- [47] *Orkán Herwart* [online]. [cit. 2017-11-22]. Dostupné z: <http://www.infomet.cz/index.php?id=read&idd=1509277980>

- [48] *Orkán Herwart* [online]. [cit. 2017-11-22]. Dostupné z: <http://www.infomet.cz/index.php?id=read&idd=1509351876>
- [49] *InfoMet: Derecho, nový jev v ČR* [online]. [cit. 2017-12-01]. Dostupné z: <http://www.infomet.cz/index.php?id=read&idd=1499088469>
- [50] *InfoMet: Trojice derech* [online]. [cit. 2017-12-01]. Dostupné z: <http://www.infomet.cz/index.php?id=read&idd=1502981690>
- [51] *Archiv počasí* [online]. [cit. 2017-12-08]. Dostupné z: <http://www.e-pocasi.cz/archiv-pocasi/2017/3-cervence/>
- [52] VYBÍRAL, Bohumil. *Zpracování dat fyzikálních měření: Studijní text pro soutěžící FO*. ISBN ISBN 80-86148-54-8.
- [53] *Planetární geografie II. - Země a její pohyby: Pohyby Země* [online]. [cit. 2018-02-28]. Dostupné z: <http://skompasem.cz/clanky/ucebnice-zemepisu/planetarni-geografie-ii.-zeme-a-jeji-pohyby-petr-daubner.html>
- [54] *Synology: Products* [online]. [cit. 2018-03-03]. Dostupné z: <https://www.synology.com/en-us/products/DS216j>

Seznam ilustrací

| | |
|---|----|
| Obrázek 1: Rozložení oblastí formování vzduchových hmot..... | 11 |
| Obrázek 2: Typy mraků | 15 |
| Obrázek 3: Příklad synoptické mapy | 18 |
| Obrázek 4: Tlaková níže | 19 |
| Obrázek 5: Tlaková výše..... | 22 |
| Obrázek 6: Teplá fronta | 25 |
| Obrázek 7: Studená fronta..... | 26 |
| Obrázek 8: Okluzní fronta..... | 27 |
| Obrázek 9: Příklad západní cyklonální situace dne 1.2.2004 | 30 |
| Obrázek 10: Příklad anticyklóny nad střední Evropou dne 8.12.2004 | 31 |
| Obrázek 11: Příklad brázdy nízkého tlaku 28.10.1918..... | 32 |
| Obrázek 12: Ekmanova spirála | 37 |
| Obrázek 13: Coriolisova síla..... | 37 |
| Obrázek 14: Pascalův zákon | 41 |
| Obrázek 15: Torricelliho pokus | 46 |
| Obrázek 16: Torricelliho rtuťový barometr | 49 |
| Obrázek 17: Aneroid..... | 49 |
| Obrázek 18: Termoskop..... | 55 |
| Obrázek 19: Zapojení domácí meteorologické stanice | 66 |
| Obrázek 20: Arduino..... | 67 |
| Obrázek 21: Senzor BMP180 | 70 |
| Obrázek 22: Konfigurace pinů..... | 72 |
| Obrázek 23: Zapojení domácí meteorologické stanice | 74 |
| Obrázek 24: Stanice B (zahrada) | 75 |
| Obrázek 25: Stanice B (zahrada) | 75 |

| | |
|---|-----|
| Obrázek 26: Stanice A (terasa) | 76 |
| Obrázek 27: Stanice A (terasa) | 76 |
| Obrázek 28: Stanice B..... | 78 |
| Obrázek 29: Stanice B..... | 78 |
| Obrázek 30: Server Synology DS213j | 81 |
| Obrázek 31: Zkorodovaný senzor č. 4 | 90 |
| Obrázek 32: Derecha 10.-11.8.2017 | 112 |
| Obrázek 33: Tlaková níže 28.10.2017 | 115 |
| Obrázek 34: Tlaková níže 29.10.2017 | 115 |

Seznam tabulek

| | |
|--|-----|
| Tabulka 1: Arduino – technické specifikace | 68 |
| Tabulka 2: Přehled HW módů nastavení přesnosti pro BMP180 | 72 |
| Tabulka 3: Funkce pinů..... | 73 |
| Tabulka 4: Struktura tabulky dat v databázi | 80 |
| Tabulka 5: Parametry serveru Synology DS213j..... | 81 |
| Tabulka 6: Kalibrace – rozdíly naměřených hodnot..... | 82 |
| Tabulka 7: Kalibrace – rozdíly naměřených hodnot..... | 84 |
| Tabulka 8: Hodnoty atmosférického tlaku 16.3.2017 | 86 |
| Tabulka 9: Rozdíly naměřených hodnot tlaku | 88 |
| Tabulka 10: Přehled odchylek naměřených hodnot tlaku..... | 89 |
| Tabulka 11: Přehled odchylek naměřených hodnot teploty vzduchu | 93 |
| Tabulka 12: Přehled odchylek naměřených hodnot tlaku..... | 93 |
| Tabulka 13: Přehled odchylek naměřených hodnot teploty..... | 100 |
| Tabulka 14: Koeficient determinace | 101 |
| Tabulka 15: Koeficient korelace | 101 |
| Tabulka 16: Přehled odchylek naměřených hodnot tlaku..... | 107 |
| Tabulka 17: Koeficient determinace | 108 |
| Tabulka 18: Koeficient korelace | 108 |
| Tabulka 19: Rychlost větru 29.10.2017 | 116 |

Seznam grafů

| | |
|---|-----|
| Graf 1: Kalibrace senzorů – jednodenní měření 16.3.2017 | 83 |
| Graf 2: Kalibrace senzorů – jednodenní měření 16.3.2017 | 83 |
| Graf 3: Přehled rozdílů jednotlivých senzorů (senzor – teploměr)..... | 85 |
| Graf 4: Kalibrace senzorů – jednodenní měření 16.3.2017 | 87 |
| Graf 5: Přehled rozdílů jednotlivých senzorů (senzor – ČHMÚ)..... | 89 |
| Graf 6: Teplota vzduchu – červenec 2017 | 94 |
| Graf 7: Rozdíly hodnot (senzor – ČHMÚ) – červenec 2017 | 94 |
| Graf 8: Teplota vzduchu – říjen 2017 | 95 |
| Graf 9: Rozdíly hodnot (senzor – ČHMÚ) – říjen 2017..... | 95 |
| Graf 10: Teplota vzduchu 1.-7.7.2017 | 97 |
| Graf 11: Rozdíly hodnot (senzor – ČHMÚ) 1.-7.7.2017 | 97 |
| Graf 12: Teplota vzduchu 25.-31.10.2017 | 98 |
| Graf 13: Rozdíly hodnot (senzor – ČHMÚ) 25.-31.10.2017 | 98 |
| Graf 14: Rozdíly hodnot (senzor – ČHMÚ) 1.-7.7.2017 | 99 |
| Graf 15: Regresní křivka – červenec 2017..... | 100 |
| Graf 16: Regresní křivka – říjen 2017 | 101 |
| Graf 17: Barometrický tlak – červenec 2017 | 102 |
| Graf 18: Rozdíl hodnot (senzor – ČHMÚ) - červenec 2017..... | 103 |
| Graf 19: Barometrický tlak – říjen 2017..... | 103 |
| Graf 20: Rozdíl hodnot (senzor – ČHMÚ) – říjen 2017..... | 104 |
| Graf 21: Barometrický tlak 1.-7.7.2017 | 105 |
| Graf 22: Rozdíly hodnot (senzor – ČHMÚ) 1.-7.7.2017 | 105 |
| Graf 23: Barometrický tlak 1.-7.10.2017..... | 106 |
| Graf 24: Rozdíly hodnot (senzor – ČHMÚ) 1.-7.10.2017 | 106 |
| Graf 25: Regresní křivka – červenec 2017..... | 107 |

| | |
|--|-----|
| Graf 26: Regresní křivka – říjen 2017 | 108 |
| Graf 27: Rozdíly naměřených hodnot (senzor – ČHMÚ)..... | 109 |
| Graf 28: Rozdíly naměřených hodnot po 2. kalibraci (senzor – ČHMÚ) | 110 |
| Graf 29: Teplota vzduchu 10.-11.8.2017 | 113 |
| Graf 30: Barometrický tlak 10.-11.8.2017 | 113 |
| Graf 31: Teplota vzduchu během orkánu Herwart..... | 117 |
| Graf 32: Barometrický tlak během orkánu Herwart | 117 |
| Graf 33: Barometrický tlak během orkánu Herwart | 118 |

Seznam příloh

Příloha 1: Fyzikální vztahy

Příloha 2: Parametry BMP180

Příloha 3: Popis scriptu

Příloha 4: CD

Příloha č. 1

Fyzikální vztahy

1. Coriolisův parametr $f = 2 \cdot \Omega \cdot v \cdot \sin\varphi$
2. definice tlaku u plynů i kapalin $p = \frac{dF}{dS}$
3. definice tlaku pro nerovinnou plochu $p = \frac{|\Delta F_n|}{\Delta S}$
4. Pascalův zákon je možné vyjádřit rovnicí: $p_2 - p_1 = -\rho g(h_2 - h_1)$
5. základní vzorec pro tlak $p = \frac{F}{S}$
6. vyjádření síly F tíhovou silou kapaliny F_G $p = \frac{F_G}{S}$
7. dosazení tíhové síly $p = \frac{m \cdot g}{S}$
8. dosazení hmotnosti $p = \frac{\rho \cdot V \cdot g}{S}$
9. hydrostatický tlak $p = \frac{\rho \cdot S \cdot h \cdot g}{S}$
10. hydrostatický tlak $p = \rho \cdot g \cdot h$
11. rovnice statiky ovzduší $dp = -\rho \cdot g \cdot dh$
12. dle Boyleova-Mariottova zákona platí při stálé teplotě vztah $\rho = \frac{\rho_0}{p_0} \cdot p$
13. po dosazení získáme vztah $\frac{dp}{p} = -\frac{\rho_0}{p_0} \cdot g \cdot dh$
14. po vyřešení této diferenciální rovnice a následné úpravě získáme vztah
 $p = p_0 \cdot e^{-\frac{\rho_0 \cdot g \cdot \Delta h}{p_0}}$
15. změnu odporu piezorezistoru můžeme popsat vztahem: $\frac{\Delta R}{R} = \alpha \cdot p = K \cdot \frac{\Delta l}{l}$
16. jednotka bar $1 \text{ bar} = 10^6 \text{ dyn} \cdot \text{cm}^{-2}$
17. převod jednotek $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa} \Rightarrow 1 \text{ mbar} = 1 \text{ hPa} = 100 \text{ Pa}$
18. jednotka torr $1 \text{ torr} = 1 \text{ mm Hg} \approx 133,322 \text{ Pa}$
19. jednotka torr $1 \text{ torr} = \frac{101325}{760} \text{ Pa} \approx 133,322368 \dots \text{ Pa}$
20. převod mezi hPa a mb $1 \text{ hPa} = 100 \text{ Pa} = 1 \text{ mb}$
21. jednotka Pascal $1 \text{ Pa} = \frac{N}{\text{m}^2} = \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2}$
22. dilatační teploměr – vztah délkové roztažnosti $l = l_0(1 + \alpha \Delta\vartheta)$

23. dilatační teploměr – vztah objemové roztažnosti $v = v_0(1 + \beta\Delta\vartheta)$

24. dilatační teploměr – vztah pro výsledný tlak $p = p_0(1 + \beta\Delta\vartheta)$

25. jednotka Réaumur $R = \frac{4}{5} \cdot C$

26. jednotka Réaumur $R = \frac{4(F-32)}{9}$

27. jednotka Réaumur $R = \frac{4(K-273,15)}{5}$

28. jednotka Fahrenheit $F = \frac{9K}{5} - 459,67$

29. jednotka Fahrenheit $F = \frac{9C}{5} + 32$

30. jednotka Fahrenheit $F = \frac{9R}{4} + 32$

31. jednotka Celsius $C = (F - 32) \cdot \frac{5}{9}$

32. jednotka Celsius $C = K + 273,15^\circ$

33. jednotka Celsius $C = \frac{5}{4} \cdot R$

34. výpočet průměrné denní teploty $t_d = \frac{t_7+t_{14}+2 \cdot t_{21}}{4}$

35. regresní závislost hodnot rozdílu tlaku a teploty $\Delta p = -0,0569 \cdot t + 1,0047$

Příloha č. 2

Parametry BMP 180

| Absolute maximum ratings | | | | |
|--------------------------|----------------------------|------|--------|-------|
| Parameter | Condition | Min | Max | Units |
| Storage temperature | | -40 | 85 | °C |
| supply voltage | all pins | -0,3 | 4,25 | V |
| ESD rating | BM, R = 1,5 kΩ, C = 100 pF | | ±2 | kV |
| Overpressure | | | 10 000 | hPa |

Zdroj: [35]

| Operating conditions, output signal and mechanical characteristics | | | | | | |
|--|------------------|--------------------------------|------|-------|------|-------|
| Parameter | Symbol | Condition | Min | Typ | Max | Units |
| Operating temperature | T_A | operational | -40 | | 85 | °C |
| | | full accuracy | 0 | | 65 | °C |
| Supply voltage | V_{DD} | ripple max. 50mVpp | 1,8 | 2,5 | 3,6 | V |
| | | | 1,62 | 2,5 | 3,6 | V |
| Supply current 1 sample / sec. 25 °C @ | I_{DDLOW} | ultra low power mode | | 3 | | µA |
| | I_{DDSTD} | standard mode | | 5 | | µA |
| | I_{DDHR} | high resolution mode | | 7 | | µA |
| | I_{DDUHR} | ultra high res. mode | | 12 | | µA |
| | I_{DDAR} | advanced res. mode | | 32 | | µA |
| Peak current | I_{peak} | during conversion | | 650 | 1000 | µA |
| Standby current | I_{DDSBM} | @ 25°C | | 0,1 | 4 | µA |
| Relative accuracy pressure $V_{DD} = 3,3V$ | | 950...1050 hPa | | ±0,12 | | hPa |
| | | @ 25°C | | ±1 | | m |
| | | 700...900 hPa | | ±0,12 | | hPa |
| | | 25...40 °C | | ±1 | | m |
| Absolute accuracy pressure $V_{DD} = 3,3V$ | | 300...1100 hPa | -4,0 | -1,0 | 2,0 | hPa |
| | | 0...65 °C | | | | |
| | | 300...1100 hPa | -6,0 | -1,0 | 4,5 | hPa |
| | | -20...0 °C | | | | |
| Resolution of output data | | pressure | | 0,01 | | hPa |
| | | temperature | | 0,1 | | °C |
| Absolute accuracy temperature $V_{DD} = 3,3V$ | | @ 25 °C | -1,5 | ±0,5 | 1,5 | °C |
| | | 0...65°C | -2,0 | ±1,0 | 2,0 | °C |
| Conversion time pressure | $t_{c_p_low}$ | ultra low power mode | | 3 | 4,5 | ms |
| | $t_{c_p_std}$ | standard mode | | 5 | 7,5 | ms |
| | $t_{c_p_hr}$ | high resolution mode | | 9 | 13,5 | ms |
| | $t_{c_p_luhr}$ | ultra high res. mode | | 17 | 25,5 | ms |
| | $t_{c_p_ar}$ | advanced res. mode | | 51 | 76,5 | ms |
| Conversion time temperature | t_{c_temp} | standard mode | | 3 | 4,5 | ms |
| serial data clock | f_{SCL} | | | | 3,4 | MHz |
| solder drifts | | minimum solder height 50 µm | -0,5 | | 2 | hPa |
| long term stability | | 12 months | | ±1,0 | | hPa |

Zdroj: [35]

Příloha č. 3

Popis scriptu

| Řádek | Činnost |
|---------|---|
| 1 - 3 | Import knihoven |
| 6 - 13 | Definování proměnných a konstant |
| 15 | Funkce setup, provede inicializace stanice |
| 17 - 18 | Zahájení sériové komunikace |
| 19 - 26 | Připojení k BMP180 senzoru |
| 28 - 31 | Připojení k ethernet shieldu |
| 34 | Funkce homePage, získává data ze senzoru a tvoří odpověď na requesty |
| 36 - 37 | Proměnný funkce homePage |
| 39 - 48 | Získání aktuální teploty |
| 49 - 68 | Získání aktuálního tlaku |
| 70 - 76 | Výpis chyby při čtení dat ze senzoru |
| 78 - 90 | Tvorba odpovědi na request |
| 93 | Funkce loop (https://www.arduino.cc/en/Reference/Loop) |
| 94 - 98 | Ověření zda stanice obdržela request |


```

1 #include <EtherCard.h>
2 #include <SFE_BMP180.h>
3 #include <Wire.h>
4
5
6 static byte mymac[] = { 0x74,0x69,0x69,0x2D,0x30,0x27 };
7 static byte myip[] = { 10,0,0,224 };
8
9 SFE_BMP180 pressure;
10 #define ALTITUDE 250.0
11
12 byte Ethernet::buffer[500];
13 BufferFiller bfill;
14
15 void setup () {
16
17   Serial.begin(9600);
18   Serial.println("REBOOT");
19   //BMP180 sensor
20   if (pressure.begin())
21     Serial.println("BMP180 init success");
22   else
23   {
24     Serial.println("BMP180 init fail\n\n");
25     while(1);
26   }
27
28   //ethernet shield
29   if (ether.begin(sizeof Ethernet::buffer, mymac) == 0)
30     Serial.println(F("Failed to access Ethernet controller"));
31   ether.staticSetup(myip);
32 }
33
34 static word homePage() {
35
36   char status;
37   double T,P,p0,a;
38
39   status = pressure.startTemperature();
40   if (status != 0)
41   {
42     delay(status);
43     status = pressure.getTemperature(T);
44     if (status != 0)
45     {
46       Serial.print("temperature: ");
47       Serial.print(T,2);
48       Serial.print(" deg C, ");
49       status = pressure.startPressure(3);
50       if (status != 0)
51       {
52         delay(status);
53         status = pressure.getPressure(P,T);
54         if (status != 0)
55         {
56           Serial.print("absolute pressure: ");
57           Serial.print(P,2);
58           Serial.print(" mb, ");
59
60           p0 = pressure.seaLevel(P,ALTITUDE); // we're at 1655 meters (Boulder, CO)
61           Serial.print("relative (sea-level) pressure: ");
62           Serial.print(p0,2);
63           Serial.print(" mb, ");
64
65           a = pressure.altitude(P,p0);
66           Serial.print("computed altitude: ");
67           Serial.print(a,0);
68           Serial.print(" meters, ");
69         }
70         else Serial.println("error retrieving pressure measurement\n");
71       }
72       else Serial.println("error starting pressure measurement\n");
73     }
74     else Serial.println("error retrieving temperature measurement\n");
75   }
76   else Serial.println("error starting temperature measurement\n");
77
78   long lt = T*100;
79   long lp = P;
80   long lp2 = (P-lp)*100;
81
82   bfill = ether.tcpOffset();
83   bfill.emit_p(PSTR(
84     "HTTP/1.0 200 OK\r\n"
85     "Content-Type: text/html\r\n"
86     "Pragma: no-cache\r\n"
87     "\r\n"
88     "$D;$D;$D;$D",
89     lt,lp,lp2);
90   return bfill.position();
91 }
92
93 void loop () {
94   word len = ether.packetReceive();
95   word pos = ether.packetLoop(len);
96
97   if (pos) // check if valid tcp data is received
98     ether.httpServerReply(homePage()); // send web page data
99 }

```

Příloha č. 4

CD

Naměřená data, spolu s daty poskytnutými z ČHMÚ, jsou uložena na CD.