

Univerzita Palackého v Olomouci

**Přírodovědecká fakulta**

**Katedra geoinformatiky**



Univerzita Palackého  
v Olomouci

Studijní program: **P1301 Geografie**

Obor: **1302V011 Geoinformatika a kartografie**

**EXPERIMENTÁLNÍ BEZDRÁTOVÁ SENZOROVÁ SÍŤ PRO  
MONITORING ZNEČIŠTĚNÍ OVZDUŠÍ VE STŘEDU MĚSTA  
OLOMOUCE (E - BOSS)**

**Doktorská disertační práce**

Mgr. Vendula HEJLOVÁ

**Školitel: doc. RNDr. Vilém Pechanec, Ph.D.**

**Olomouc 2017**

### Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem disertační práci doktorského studia oboru Geoinformatika a kartografii vypracovala samostatně pod vedením prof. Ing. Lenky Carr Motyčkové, CSc a doc. RNDr. Viléma Pechance, Ph.D. Všechny použité materiály a zdroje jsou citovány s ohledem na vědeckou etiku, autorská práva a zákony na ochranu duševního vlastnictví. Všechna poskytnutá i vytvořená data nebudu bez souhlasu školy poskytovat.

V Olomouci dne 24. 4. 2017

Děkuji své první vedoucí práce doc. Ing. Lence Carr Motyčkové, CSc. za prvotní směrování disertační práce i jejímu následovníkovi doc. Vilému Pechancovi. Za podněty a připomínky při vypracování práce děkuji Mgr. Davidu Drymlovi z Katedry informatiky. Poděkování patří i panu Petru Braunovi a Mgr. Janu Suchánkovi za pomoc s kalibrací senzorů. Dále bych chtěla poděkovat svým kolegům z Katedry geoinformatiky, především Mgr. Stanislavovi Popelkovi a Mgr. Tomáši Pohankovi, za velmi cenné podněty v průběhu psaní práce. V neposlední řadě patří poděkování rodině a přátelům za trpělivost, kterou projevíli v průběhu vypracování práce.

Za poskytnutá meteorologická data a konzultace děkuji Českému hydrometeorologickému úřadu, pobočce Ostrava. Za data z REZZO 1 a 2 patří poděkování oddělení emisí a zdrojů.

# OBSAH

<b>OBSAH</b> .....	<b>4</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>6</b>
<b>1. CÍLE PRÁCE</b> .....	<b>7</b>
<b>2. METODY A POSTUP ZPRACOVÁNÍ</b> .....	<b>9</b>
2.1 Metody řešení cílů práce .....	9
2.2 Použité technické a programové vybavení .....	11
2.3 Postup zpracování.....	12
<b>3. SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY</b> .....	<b>13</b>
<b>3.1 Klima města</b> .....	<b>13</b>
3.1.1 Urbánní klimatická mapa .....	14
3.1.2 Studium klimatu v České republice .....	15
<b>3.2 Bezdrátová senzorová síť a její funkcionality</b> .....	<b>16</b>
3.2.1 Počátky senzorových sítí.....	16
3.2.2 Komponenty bezdrátové senzorové sítě.....	17
3.2.3 Architektura a topologie bezdrátové senzorové sítě.....	19
3.2.4 Přenos dat v bezdrátové senzorové síti .....	21
3.2.5 Standardizace v bezdrátových senzorových sítích .....	27
3.2.6 Využití bezdrátové senzorové sítě .....	30
<b>3.3 Bezdrátové senzorové sítě pro sledování znečištění ovzduší</b> .....	<b>32</b>
3.3.1 České nasazení bezdrátových senzorových sítí.....	42
<b>3.4 Výběr technických komponent bezdrátové senzorové sítě</b> .....	<b>45</b>
<b>3.5 Rozmístění uzlů ve 2D a 3D prostředí</b> .....	<b>46</b>
3.5.1 Propojení uzlů ve venkovním prostředí .....	49
3.5.2 Výběr mapového podkladu pro zobrazení uzlů.....	51
<b>3.6 Technické parametry uzlů a senzorů</b> .....	<b>51</b>
3.6.1 Výdrž baterie uzlu .....	51
3.6.2 Síla signálu.....	52
3.6.3 Úspěšnost přenosu dat.....	52
3.6.4 Kalibrace senzorů.....	52
3.6.5 Interval záznamu dat .....	54
<b>3.7 Monitoring v Olomouci</b> .....	<b>55</b>
3.7.1 Měření meteorologických prvků .....	55
3.7.2 Měření NO <sub>2</sub> a VOC .....	56
3.7.3 Zdroje znečištění NO <sub>2</sub> a VOC v Olomouci .....	56
<b>4. DC1 - VÝBĚR KOMPONENT BEZDRÁTOVÉ SENZOROVÉ SÍTĚ</b> .....	<b>59</b>
4.1 Kritéria pro výběr uzlů bezdrátové senzorové sítě.....	59
4.2 Kritéria pro výběr senzorových desek/senzorů.....	62
4.3 Kritéria pro výběr brány .....	63
4.4 Požadavky na bezdrátovou senzorovou síť v Olomouci (E - BOSS).....	64
4.5 Komerčně nabízené komponenty bezdrátových senzorových sítí .....	66
4.6 Analýza nabízených komponent.....	67
4.6.1 Modely uzlů Waspote Plug&Sense.....	72
4.6.2 Brána Meshlium.....	75

<b>5.DC2 – ROZMÍSTĚNÍ UZLŮ BEZDRÁTOVÉ SENZOROVÉ SÍTĚ .....</b>	<b>77</b>
<b>5.1 Faktory ovlivňující rozmístění uzlů ve venkovním prostředí .....</b>	<b>77</b>
5.1.1 Předdistribuční kroky .....	77
5.1.2 Technické faktory .....	77
5.1.3 Terénní faktory .....	78
<b>5.2 Vlastní algoritmy pro rozmístění uzlů .....</b>	<b>79</b>
5.2.1 Rovnoměrné rozmístění uzlů v terénu .....	80
5.2.2 Rozmístění uzlů na podkladě Jednotkového grafu .....	81
5.2.3 Rozmístění uzlů na podkladě Yao grafu .....	83
<b>5.3 Testování navrženého algoritmu rozmístěním konkrétních bezdrátových uzlů v terénu .....</b>	<b>84</b>
<b>5.4 Mapový podklad vhodný pro vizualizaci uzlů .....</b>	<b>87</b>
5.4.1 Návrh eye-tracking experimentu .....	87
5.4.2 Výsledky eye-tracking experimentu .....	88
<b>6. DC3 - KONFIGURACE BEZDRÁTOVÉ SENZOROVÉ SÍTĚ V OLOMOUCI.....</b>	<b>95</b>
<b>6.1 DC3a - Testování bezdrátové sensorové sítě v Olomouci.....</b>	<b>95</b>
6.1.1 Upevnění uzlů Waspote Plug&Sense v terénu.....	95
6.1.2 Komunikační protokoly .....	97
6.1.3 Vlastní topologie .....	99
6.1.4 Vlastní kalibrace senzorů .....	99
6.1.5 Interval záznamu dat .....	101
6.1.6 Testování technických parametrů uzlů Waspote Plug&Sense při reálném nasazení .....	101
6.1.7 Neočekávané situace znemožňující záznam dat.....	115
<b>6.2. DC3b - Uložení a předzpracování dat.....</b>	<b>117</b>
6.2.1 Databáze integrované do bran .....	117
6.2.2 Externí databáze .....	119
<b>7. DC4 – ZPRACOVÁNÍ TEMATICKÝCH DAT A JEJICH VIZUALIZACE.....</b>	<b>124</b>
<b>7.1 Základní meteorologické prvky.....</b>	<b>124</b>
7.1.1 Porovnání naměřených hodnot s referenčními hodnotami .....	124
7.1.2 Vztah mezi naměřenými hodnotami základních meteorologických prvků v klastrech .....	130
<b>7.2 Znečišťovatelé ovzduší .....</b>	<b>137</b>
7.2.1 Chemická data z olomoucké sítě.....	137
7.2.2 Práce s nenakalibrovanými chemickými senzory .....	138
<b>8. VÝSLEDKY.....</b>	<b>151</b>
<b>9. DISKUZE.....</b>	<b>153</b>
<b>10. ZÁVĚR.....</b>	<b>156</b>
<b>POUŽITÁ LITERATURA A INFORMAČNÍ ZDROJE .....</b>	<b>159</b>
<b>SUMMARY .....</b>	<b>170</b>
<b>PŘÍLOHY .....</b>	<b>173</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>174</b>

## ÚVOD

Motivací k realizaci disertační práce byly poznatky nabyté v průběhu řešení autorčiny diplomové práce, „Monitoring a modelování povrchového odtoku s využitím GIS“. V rámci řešení diplomové práce byla sbírána meteorologická a hydrologická data v obci Vysoké Pole, nacházející se téměř 100 kilometrů od Olomouce. Meteorologická data byla měřena senzory a ukládána na dataloggery, které nebyly napojeny na žádné komunikační rozhraní, a tak data musela být postupně ze všech dataloggerů stahována v *offline* režimu. Hydrologická data byla sbírána v pravidelných měsíčních intervalech přímo v terénu pouze manuálně. Hodnoty byly zapisovány do listu v programu Microsoft Excel 2003. Takový sběr dat byl velmi časově náročný, data byla nespojitá a neexistovala možnost zobrazení situace v reálném čase. Tyto zkušenosti se sběrem dat vedly k myšlence, že monitoring musí být více automatizován, a tak se nabízelo ověření a nasazení technologie bezdrátových sensorových sítí k vlastnímu monitoringu. Z tohoto vyplynula otázka týkající se vlastní aplikace bezdrátové sensorové sítě. Ponechat bezdrátovou sensorovou síť ve venkovském prostředí nebo přenést monitoring do města? Jelikož se v posledních letech do popředí dostávají diskuze na téma klimatu města, bylo rozhodnuto, že této technologie bude využito městě a zaměří se na sledování meteorologických a chemických prvků.

Klima města tvoří důležitou komponentu městského prostředí. Jeho stav má vysoký podíl na zdraví a spokojenost obyvatel, faunu, flóru, nehmotné objekty i městské prostředí. Výzkum klimatu města se zaměřuje především na dva jevy, a to tepelné ostrovy města (Urban Heat Island, UHI) a *Urban CO<sub>2</sub> Dome*, městský dóm oxidu uhličitého (Hejlová a Voženílek, 2015).

Bezdrátové sensorové sítě jsou rychle se rozvíjející technologií, která se vyvíjí od dob studené války a stále častěji je využívána k monitoringu v městském prostředí (Murthy a Manoj, 2004). Rozmístění uzlů s napojenými senzory v městském prostředí je velmi problematické, protože umístění uzlů bezdrátové sensorové sítě se senzory je ovlivňováno mnoha faktory. Stále častěji je o bezdrátových sensorových sítích uvažováno v souvislosti s „chytrými městy“, ve kterých by docházelo jednak k úspoře městské energie a jednak k vyššímu přizpůsobení se města potřebám jeho obyvatel (Townsend, 2013).

V České republice nebyly typické bezdrátové sensorové sítě s možností komunikace mezi samotnými uzly operující ve venkovním prostředí v době realizace disertační práce dlouhodobě využity, a tak se nabízelo ověření této možnosti. Nejprve byly vybrány komponenty bezdrátové sensorové sítě, následoval návrh algoritmů na rozmístění uzlů ve venkovním prostředí a samotné rozložení uzlů ve městě Olomouc. Pozornost byla zaměřena na technické parametry bezdrátové sensorové sítě, díky kterým byly navrženy hodnoty pro její optimální funkci. Závěrem byly zpracována i naměřená tematická data.

# 1. CÍLE PRÁCE

Cílem disertační práce je navrhnout a vybudovat experimentální bezdrátovou senzorovou síť pro monitoring vybraných základních meteorologických prvků a znečišťovatelů ovzduší (E BOSS) a ověřit ji nasazením ve městě Olomouc. Disertační práce si klade za cíl ověřit tuto technologii v městském prostředí, kde se nachází velké množství rušivých elementů a zároveň chce poukázat na to, že je nutné věnovat pozornost počáteční inicializaci uzlů i senzorů. Přesun uzlů se senzory a brány z jednoho místa zájmu na jiné ve stejné konfiguraci je poté poměrně snadnou záležitostí. Vstupním předpokladem je, že data budou sbírána v reálném čase, bude k nim zřízen dálkový přístup a budou sbírána s vyšší hustotou, než se děje s využitím stacionárních stanic. Hlavní důraz je kladen na popsání komplexního postupu začínajícího výběrem zaměření bezdrátové senzorové sítě, na který navazuje selekce bezdrátových komponent, jejich instalace do terénu, ověření základních technických parametrů až po zpracování naměřených dat. Kvůli tomuto komplexnímu postupu nemohlo být v rámci práce získáno a vyhodnoceno velké množství tematických dat.

Pro řešení práce byly stanoveny čtyři dílčí cíle (DC), které zároveň tvoří tematické celky této práce, a jsou rozebrány v následujícím textu.

## **DC1 – Výběr komponent bezdrátové senzorové sítě**

Prvním dílčím cílem je vybrat komponenty bezdrátové senzorové sítě. Nejprve je nutné navrhnout zaměření bezdrátové senzorové sítě v Olomouci. Dalším krokem je provedení průzkumu trhu s vyhodnocením dostupných komponent bezdrátových senzorových sítí. Po tomto kroku následuje stanovení kritérií ovlivňujících jejich výběr a definice parametrů vhodných pro olomouckou bezdrátovou senzorovou síť. Dále je provedena analýza stanovující pořadí vhodnosti dostupných komponent. Výběr komponent hraje důležitou roli v celém procesu budování bezdrátové senzorové sítě, protože se jedná o zásadní rozhodnutí, na jehož základě budou shromážděna data o vybraných prvcích v olomouckém prostředí.

## **DC2 – Rozmístění uzlů bezdrátové senzorové sítě**

Druhým dílčím cílem je rozmístit uzly bezdrátové senzorové sítě v Olomouci. Nejprve je proveden výběr lokalit, ve kterých budou komponenty bezdrátové senzorové sítě rozmístěny. Je stanoveno, že uzly budou pokryty dvě oblasti (klastry). Na základě všech faktorů ovlivňujících rozmístění uzlů v terénu jsou navrženy algoritmy určující polohu komponent bezdrátové senzorové sítě v terénu s ohledem na technické možnosti používaných uzlů i na terénní charakteristiky. Návrh rozmístění uzlů v terénu je třeba vizualizovat na vhodném mapovém podkladě, jehož výběr je jedním z úkolů tohoto dílčího cíle. Mapový podklad neslouží pouze k vizualizaci uzlů, ale může posloužit také k identifikaci překážek, které se mohou v navržených datových tocích mezi uzly objevit.

Při hledání překážek v komunikaci mezi uzly je mapový podklad pouze prvním nástrojem, který poukáže na možné nesrovnalosti, které musí být vždy ověřeny v terénu.

### **DC3 – Konfigurace bezdrátové sensorové sítě v Olomouci**

Třetí dílčí cíl je rozdělen na dva podcíle, z nichž se první soustředí na testování bezdrátové sensorové sítě v Olomouci (DC 3a), a druhý řeší uložení a předzpracování získaných dat (DC 3b). Nejprve je navrženo, jak budou uzly v terénu upevněny. Poté jsou navrženy komunikační protokoly pro přenos dat v rozdílných konfiguracích. Uzly jsou nasazeny do terénu. Technická data týkající se přenosu dat jsou zhodnocena. Sledované technické parametry uzlů zahrnují výběr vhodného kanálu pro přenos dat, výdrž baterie, zhodnocení síly signálu a výpočet spolehlivosti přenosu dat z jednotlivých uzlů v městském prostředí. Zhodnocení technických dat vede k návrhu parametrů, které optimalizují funkčnost bezdrátové sensorové sítě v Olomouci. Druhá část třetího dílčího cíle je zaměřena na tvorbu záložní databáze synchronizované s databázemi ve sběrných bodech a očišťující data od chyb v měřeních.

### **DC4 – Zpracování tematických dat a jejich vizualizace**

Dílčí cíl číslo čtyři je zaměřen na zpracování a vizualizaci dat. Tento dílčí cíl se soustředí na tematická data získaná bezdrátovou sensorovou sítí. Nejprve je řešena přesnost měření jednotlivých senzorů v porovnání s referenčními daty získanými od Českého hydrometeorologického ústavu. Následuje porovnání meteorologických dat získaných v obou klastrech se zaměřením se na teplotní hodnoty. Druhá část této kapitoly je zaměřena na práci s chemickými daty v obou klastrech.



## 2. METODY A POSTUP ZPRACOVÁNÍ

### 2.1 Metody řešení cílů práce

Literární rešerše a konzultace s odborníky na bezdrátové sensorové sítě ukázaly, že téma disertační práce je velmi rozsáhlé. Toto téma pojme celou řadu oborů, a tak nebyla doposud<sup>1</sup> řešena natolik komplexní práce, která ukazuje postupné kroky od výběru komponent k monitorování až po vyhodnocení technických a tematických dat. Odborníci se vždy zabývají pouze jednou vybranou oblastí, která je sledována do hloubky. Proto bylo osloveno velké množství odborníků specializujících se na jednotlivé kroky řešení v rámci disertační práce. Nutno podotknout, že záměrem disertační práce není sledovat všechny kroky do hloubky, ale ukázat posloupnost jednotlivých kroků, které vedou k nasazení a správě vlastní bezdrátové sensorové sítě ve městě.

Metody řešení budou rozebrány po jednotlivých dílčích cílech, které vedou k vybudování experimentální bezdrátové sensorové sítě pro meteorologický monitoring v Olomouci.

#### DC1 – Výběr komponent bezdrátové sensorové sítě

První dílčí cíl se věnuje návrhu bezdrátové sensorové sítě v Olomouci. Tento návrh vychází ze studia odborných článků a konzultací s odborníky jak na bezdrátové sensorové sítě, tak na meteorologické využití v městském prostředí. V odborných článcích uvedených v rešerši (kapitola 3.3 Bezdrátové sensorové sítě pro sledování znečištění ovzduší) nebylo nikde specifikováno, jak byla bezdrátová sensorová síť vybrána. Výběr jedné z mnoha možností je v odborných studiích nejčastěji uskutečňován pomocí multikriteriální analýzy (Talašová, 2003), která své uplatnění našla i v environmentálních studiích (Kangas a Kangas (2005), Ananda a Herath (2009), Fowler a kol. (2015) a další).

Po návrhu využití bezdrátové sensorové sítě v Olomouci byl proveden průzkum trhu a následně byla stanovena kritéria ovlivňující výběr jednotlivých komponent. Každému kritériu byla přidělena jeho důležitost při výběru. Zároveň byly navrženy jeho ideální parametry pro olomouckou bezdrátovou sensorovou síť. Váhy kritérií byly stanoveny na podkladě následujících čtyř metod:

- metody párového porovnání,
- kompenzační metody,
- metody založené na pořadí,
- metody Fullerova trojúhelníku.

---

<sup>1</sup> Údaj se vztahuje k roku 2013

Po stanovení vah byla využita multikriteriální analýza s agregovanou funkcí užítku k určení pořadí dostupných technických komponent. Komponenty s nejvyšší hodnotou užítku byly vybrány pro instalaci v Olomouci.

## **DC2 – Rozmístění uzlů bezdrátové sensorové sítě**

V rámci druhého dílčího cíle byly odvozeny faktory, které návrh rozmístění uzlů bezdrátové sensorové sítě v terénu nejvíce ovlivňují, a které vycházely z definice dle Akyildiz a Vuran, (2010). Tyto faktory byly ověřeny v terénu s pomocí uzlů vybraných na podkladě prvotní analýzy. Na základě testů byl navržen algoritmus, který stanovil polohy jednotlivých uzlů v terénu a k jejich rozmístění v zájmové lokalitě využíval navržených faktorů. Jako podklad ke konstrukci algoritmu sloužily vybrané grafy (Jednotkový (UDG) a Yao). Grafy jsou velmi hojně využívané v bezdrátových sensorových sítích, protože pomocí nich lze velmi jednoduše a efektivně popsat pomocí průběh komunikačních toků mezi uzly (Stojmenović, 2005). Bylo rozhodnuto o nasazení uzlů bezdrátové sensorové sítě do dvou klastrů.

Možností, která vedla k subjektivnímu vyhodnocení překážek v komunikaci mezi uzly v městském prostředí, byl experiment navržený pro technologii eye-tracking. Bylo využito statických a interaktivních otázek nad čtyřmi mapovými podklady (ZABAGED, OpenStreetMap, ZMČR10, ortofoto). Výsledky byly získány z výpočtu základních eye-tracking metrik, vyhodnocením fixací v oblastech zájmu, kvalitativním sledováním pohybu očí a závěrečným dotazníkovým šetřením.

## **DC3 – Konfigurace bezdrátové sensorové sítě v Olomouci**

### **DC3a – Testování bezdrátové sensorové sítě v Olomouci**

V rámci první části třetího dílčího cíle bylo nutné upevnit uzly bezdrátové sensorové sítě v terénu. Aby mohly uzly zaznamenávat a posílat data, musely být vytvořeny komunikační protokoly. Ty byly napsány v programovém rozhraní navrženém pro psaní protokolů pro tyto uzly.

Na podkladě rozložení a umístění uzlů do terénu byly testovány základní technické parametry vybrané komunikační technologie. Mezi tyto parametry se řadí identifikace zátěže v komunikačním pásmu 2,4 GHz, výdrž baterie při rozdílných scénářích sběru dat, testování síly signálu a vyhodnocení úspěšnosti přenosu dat z jednotlivých pozic, ve kterých jsou uzly situovány. Tyto parametry byly počítány při běhu bezdrátové sensorové sítě, pomocí vzorců určených k jejich výpočtu. Nejvýznamnější výsledky byly zobrazeny v grafu.

Kromě technických parametrů bezdrátové sensorové sítě byla šetřena i přesnost tematických dat, která byla následně zvyšována pomocí kalibrace sensorů a upřesňována s ohledem na interval záznamu dat.

Na podkladě tohoto testování byly shrnuty i situace, které se během nasazení bezdrátové sensorové sítě objevily a znemožnily záznam, přenos či uložení dat.

### **DC3b – Uložení a předzpracování dat**

V rámci druhé části třetího dílčího cíle byla popsána databáze integrovaná do sběrných bodů, kde jsou data primárně uložena. Protože ne všechna data uložená v této databázi byla použitelná, byla vytvořena záložní databáze, do které vstupovala data zproštěna hrubých chyb, které se v původní databázi vyskytly. Nejprve bylo nutné navrhnout strukturu této záložní databáze, stejně tak i strukturu jednotlivých tabulek v ní. Pomocí jazyka SQL (Structured Query Language) byly vytvořeny kódy umožňující potřebné operace jako vytvoření tabulky, jejich synchronizaci s kopírování nasbíraných dat, či přidělení triggerů na filtraci chyb. Ošetřeny byly chyby, které byly skutečně v databázi zaznamenány.

### **DC4 – Zpracování tematických dat a jejich vizualizace**

Třetí dílčí cíl pracoval nejprve se základními meteorologickými prvky. Na tento krok navazovala práce s chemickými hodnotami. Při manipulaci s meteorologickými daty bylo využito základní statistiky k výpočtu průměrů, směrodatných odchylek a výběru extrémních hodnot. Postupně byla data porovnávána vzájemně a poté s referenčními daty. Toto porovnání nabývalo největšího významu.

Při manipulaci s chemickými daty byla nastudována práce s relativními hodnotami, které byly získány jednotlivými senzory. Následně byla hodnocena dlouhodobá a krátkodobá měření v obou klastrech na podkladě výpočtu odporu senzoru. Na závěr byly chemické hodnoty spojeny s daty meteorologickými pomocí příkazů v programu R Projects s využitím balíčku openair.

## **2.2 Použité technické a programové vybavení**

Pro disertační práci bylo stěžejní použití uzlů Waspote Plug and Sense ve třech modelech od společnosti Libelium. V době pořízení<sup>2</sup> bezdrátové sensorové sítě se jednalo o jednoho ze tří producentů vyrábějících uzly přímo k venkovnímu použití. Z technických zařízení bylo dále využito eye trackeru SMI RED 250 od společnosti SensoMotoric Instruments (SMI).

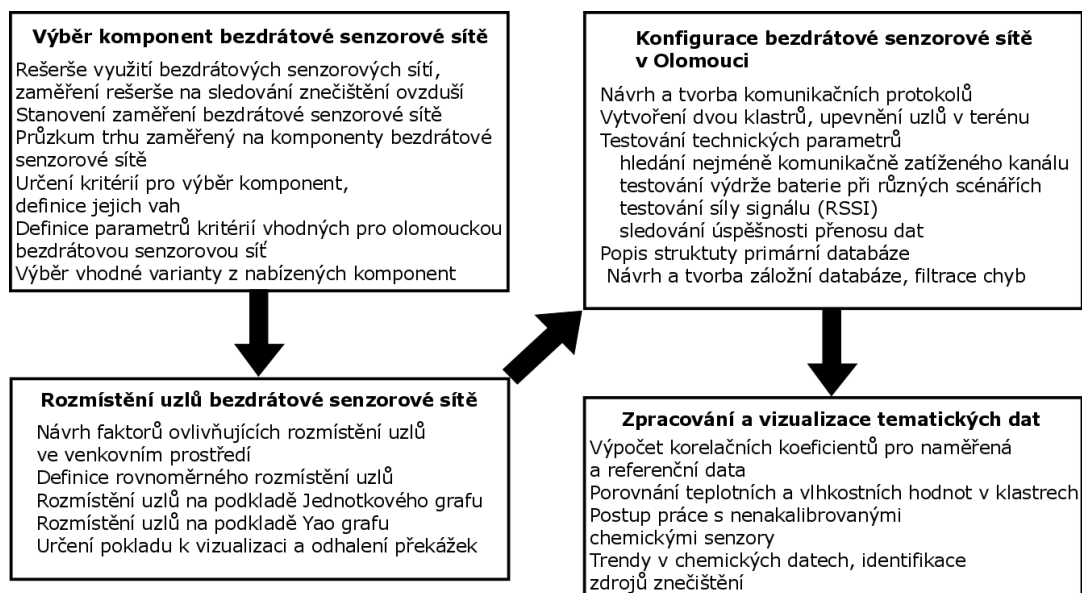
K multikriteriální analýze bylo využito software Microsoft Office Excel 2003 a program R project 3.3.1. K vytvoření a ověření algoritmů pro rozmístění uzlů bezdrátové sensorové sítě byly použity programy Grafy Pavero SW 1.1, NS-2 a Inkscape 0.48. Při chystání eye-tracking experimentu byl využit program Experiment Center od společnosti SMI. Pro interaktivní úkoly bylo zvoleno prostředí Google Drawings. K vyhodnocení dat byly používány programy OGAMA, V-Analytics. Mapy, které byly podkladem tento eye-tracking experiment, byly vytvořeny v programu ArcGIS 10.3. Stěžejní byla tvorba komunikačních protokolů, které byly napsány v programu IDE (Integrated Development Environment) pro Waspote. Tento program umožňuje psaní,

---

<sup>2</sup> Výběr komponent započal v prosinci 2012

kompilaci, nahrání kódu včetně následného zobrazení získaných hodnot. K práci s daty o stavu baterie bylo použito prostředí PuTTY suit v0.65 a PSPad editor. Pro tuto práci byla použita verze Wasmote PRO IDE 04, Wasmote PRO API 023. Dálkové připojení k bráně pomocí ssh protokolu bylo prováděno v programu FileZilla. Pro práci s MySQL 5.0.51a-24+lenny3 databází byl využíván phpAdmin 2.11.8.1.deb5+lenny6. K tvorbě záložní databáze bylo zvoleno prostředí XAMPP pro Windows, verze 5.6.28. Jedná se o open source vývojářské prostředí pro vývoj a provoz webových aplikací. XAMPP má integrovaná rozhraní pro Apache, Maria DB, php a Perl. Technická a tematická data z bezdrátové sensorové sítě byla zpracována v programech Microsoft Office Excel 2003 a program R project 3.3.1. Do tohoto programu je možné naistalovat balíček openair, který byl vyvinut Dr. Davidem Carslawem z londýnské King's College. Balíček se specializuje přímo na práci s daty chemického znečištění ve spojení s daty o směru a rychlosti větru.

## 2.3 Postup zpracování



Obr. 1. Postup zpracování disertační práce rozdělený dle dílčích cílů

### 3. SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Bezdrátové senzorové sítě přináší velký potenciál při monitorování environmentálních charakteristik okolního prostředí. Ve spojení s potřebou sledování klimatu města se tato technologie jeví jako přelomová pro získávání poměrně přesných dat v reálném čase, a tak na ni a její parametry při sledování klimatu města je zaměřena tato kapitola.

#### 3.1 Klima města

Klima města je jednou z nejdůležitějších komponent městského prostředí. Má vliv na vývoj města, spokojenost a zdraví obyvatel i na územní plánování ve městě. Městské klima je sledováno pomocí dálkového i pozemního monitoringu. Metody dálkového monitoringu slouží k získání uceleného přehledu o situaci v terénu a na podkladě parametrů snímání z nich lze vyvodit další informace. Nejčastěji jsou při sledování městského prostředí využívány letecké nebo družicové snímky pořízené v termální části spektra. Pozemní měření jsou využívána jako prostředek ke kalibraci a verifikaci dat získaných dálkovým monitoringem (Mestre a kol., 2010).

Vzájemný poměr členů rovnice energetické bilance je dle Burroughs (2007) ve srovnání zastavěných a nezastavěných oblastí odlišný. Toto se nejvíce projevuje v teplotě vzduchu, která je ve městě výrazně vyšší než ve volné krajině. Teplota vzduchu má ve městě také svůj specifický denní i roční chod. Oblasti, kde je teplota znatelně vyšší, se nazývají tepelné ostrovy města (Urban Heat Island, UHI) (Litschman a Rožnovský, 2005). Proto více přesnějších informací o rozložení teploty přináší její sledování s vyšší hustotou osazení území senzory. Hlavní příčiny vzniku tepelných ostrovů města spatřuje Voogt (2002) ve větší ploše aktivního povrchu, vertikální převaze staveb vedoucí ke zvýšení množství pohlceného záření a četným odrazům způsobených jejich geometrií. Opatření, která mají tvorbě tepelných ostrovů města předejít, spočívají v plánování zelených ploch, účinného provětrávání, výstavby vodních ploch, volby vhodných tvarů a materiálů využitých na budovy (Kleerekoper a kol., 2012).

Kromě tepelného ostrova města začalo být v hustě zastavěných částech měst sledováno i vyšší množství polutantů, především emisí CO<sub>2</sub> a prašných částic (PM<sub>x</sub>). Vysoké koncentrace oxidu uhličitého ve městech jsou situovány do center kolem hlavních dopravních tahů. Tyto oblasti jsou označovány pojmem *Urban CO<sub>2</sub> Dome* (Idso a kol., 2001), městský dóm oxidu uhličitého.

Monitoring těchto prvků je klíčový v souvislosti s klimatickou změnou. Muller a kol. (2013) dělí veškeré senzorové sítě dle velikosti území, v němž jsou sledovány meteorologické prvky na globální, makroměřítkové, regionální a sítě určené pro městský monitoring. Pro tento monitoring se využívají sítě městské (10<sup>4</sup> – 10<sup>5</sup> m), lokální (10<sup>2</sup> – 10<sup>4</sup> m) a mikroměřítkové (< 10<sup>2</sup> m). Městské sítě sledují klimatickou změnu, teplotní ostrovy a znečištění ovzduší z pohledu celého města. Lokální sítě jsou zaměřeny na sledování vlivu jednotlivých využití země na hodnoty meteorologických prvků. Sledován

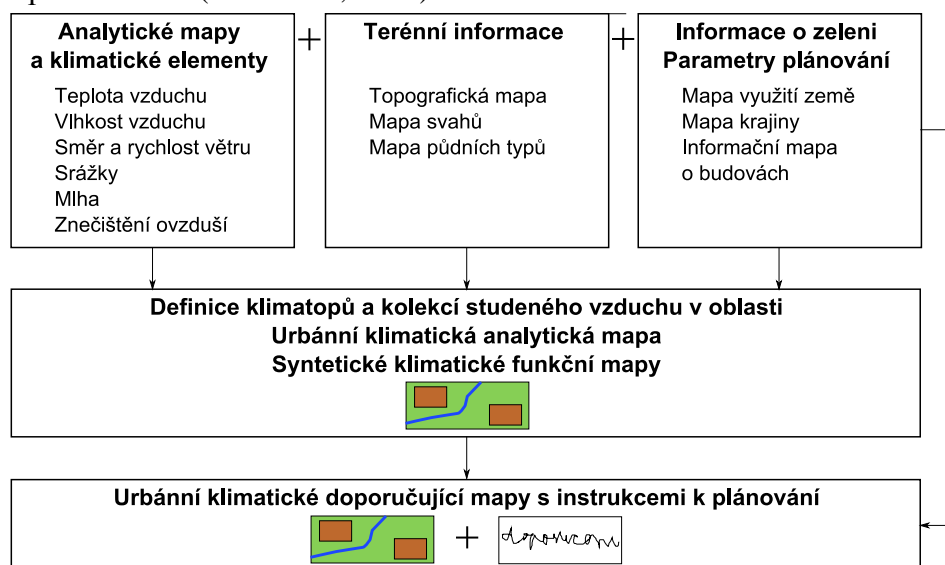
je tepelný ostrov města a rozptýlení vzdušných polutantů v malém měřítku. Mikroměřítkové sítě se zaměřují na vliv využití území a mikroforem reliéfu na hodnoty meteorologických prvků (Muller a kol., 2013).

### 3.1.1 Urbánní klimatická mapa

Pro prostorové vyjádření klimatu města jsou vytvářeny urbánní klimatické mapy. Urbánní klimatická mapa vyjadřuje syntézu mezi klimatickou, topografickou a urbánně morfologickou informací (Ng, 2012). Urbánní klimatická mapa je informačním a evaluačním nástrojem k integraci urbánních klimatických faktorů a územního plánování. Každá taková mapa se skládá z několika vrstev (obr. 2). Dle Ren a kol. (2011) existují dva druhy urbánních klimatických map – urbánní klimatická analytická mapa a urbánní klimatická mapa doporučující.

Urbánní klimatická analytická mapa kombinuje informace o základních klimatických parametrech území a datech o využití země. Urbánní klimatické faktory jsou v této mapě kombinovány s prostorovou informací nesoucí i atributy odpovídající urbánní struktuře. Využití země s atributem klimatických podmínek určuje klimatomy. Podklady pro urbánní klimatickou analytickou mapu jsou získávány z meteorologických stanic, infračervených leteckých snímků a výsledků simulací výpočetních modelů pracujících v makro a mezo měřítku (Ng a Ren, 2015; Ren a kol., 2011).

Urbánní klimatická mapa doporučující se vytváří v měřítku města nebo okresu na základě analýz provedených v rámci urbánních klimatických analytických map. Podobné klimatomy jsou shrnuty do zón, které preprezentují náchylnost zemských oblastí ke změnám. Plánovací strategie by měly brát v potaz čtyři aspekty - albedo, vegetaci, stínování a provětrávání (Ren a kol., 2011).



Obr. 2. Struktura urbánní klimatické mapy, zdroj: Ren a kol. (2011), upraveno

Česká republika patří mezi patnáct zemí, které mají vyvinutou strukturu urbánního klimatického mapování (Ren a kol., 2013). Nejpodrobněji je popsána struktura a výsledky urbánního klimatického plánování v Hong Kongu a Singapuru. Klíčová

metodologie urbánního klimatického mapování byla aplikována na plánování i ve městě Kaohsiung (Ren a kol., 2013). Burghard a kol. (2010) ve své studii vytváří urbánní klimatickou mapu nizozemského města Arnhem.

### 3.1.2 Studium klimatu v České republice

Sledováním klimatu České republiky se zabývá Český hydrometeorologický ústav, který provozuje síť meteorologických (38 z toho 6 pod správou Armády ČR) a klimatologických stanic (179)<sup>3</sup>. Kromě sledování základních meteorologických prvků jsou pozorovány i vzdušné polutanty v síti imisních stanic (“Meteorologické stanice ČHMÚ,” 2016). Vzdušné polutanty jsou sledovány i sítí stanic provozovaných zdravotními ústavy ve vybraných městech (Státní zdravotní ústav, 2014). Za bezdrátovou sensorovou síť lze považovat i případ, kdy měřicí stanice posílají data prostřednictvím mobilní sítě do vzdáleného úložiště a komunikují s ním ve hvězdicové topologii. Za tento typ komunikace lze považovat měření pomocí automatických měřících stanic, které naměřená data zasílají na server. Data jsou zasílána buď v reálném čase, nebo uschována v úložišti měřicí stanice a jsou poslána hromadně na server ve vybraném časovém intervalu. Typická bezdrátová sensorová síť, kde uzly vybavené senzory komunikují i mezi sebou a směrují data v reálném čase k základní stanici, nebyla v České republice v průběhu řešení disertační práce pro sledování klimatických charakteristik využita.

Výzkumem klimatu v České republice se vedle ČHMÚ zabývá zejména CzechGlobe, Centrum výzkumu globální změny, které je jedním ze dvou vědeckých ústavů Centra výzkumu globální změny AV ČR, v.v.i. Výzkum je realizován na třech větvích globální změny – atmosféra, ekosystémy, socioekonomické systémy (CzechGlobe, 2016).

V České republice je také sledován jev tepelného městského ostrova, ale monitoring *Urban CO<sub>2</sub> Dome* nebyl doposud nikde zveřejněn<sup>4</sup>. Fenomén tepelného ostrova města je sledován v rámci evropského projektu UHI (UHI, 2016), do kterého je zapojen ČHMÚ, Útvar rozvoje hlavního města Prahy a Univerzita Karlova v Praze (Skalák a kol., 2015). Další studium UHI v Praze bylo provedeno ve studiích Lorencová a kol. (2014). Kromě hlavního města bylo UHI sledováno i v dalších českých městech, např. Brně (Dobrovolný, 2012) nebo Vsetíně (Navrátil, 2016). Městské klima bylo řešeno i v letech 2010 - 2012 v Olomouci (Městské klima, 2012). V nejméně znečištěné oblasti republiky byly sledovány a vizualizovány vybrané polutanty v rámci projektu Air Silesia, jehož výstupem je Atlas ostravského ovzduší (Jančík, 2013).

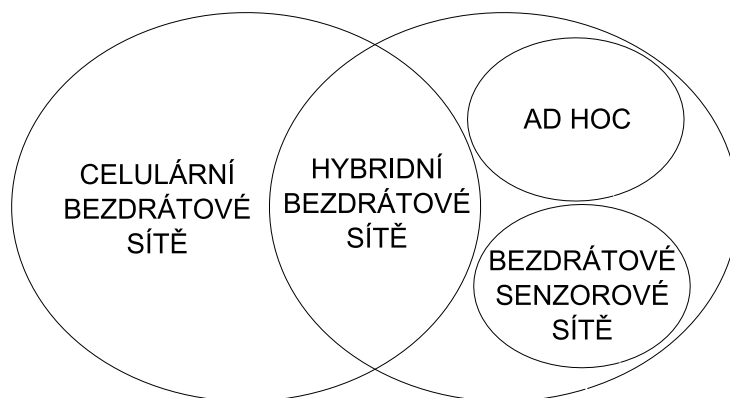
---

<sup>3</sup> Údaj z června 2015

<sup>4</sup> Údaj z dubna 2015

### 3.2 Bezdrátová sensorová síť a její funkcionalita

Úvodem je vymezeno, jak jsou bezdrátové sensorové sítě děleny dle Jangr a kol. (2010) i Murthy a Manoj (2004). Autoři se shodují na tom, že bezdrátové sensorové sítě tvoří pouze zlomek sensorových sítí spadajících do bezinfrastrukturní kategorie (obr. 3).



Obr. 3. Vymezení bezdrátových sensorových sítí, zdroj: Murthy a Manoj (2004), upraveno

#### 3.2.1 Počátky sensorových sítí

Prvně vyvinuté sítě označované jako sensorové sítě nevyužívaly bezdrátové komunikace (Kohno a kol., 1999). Potřeba „zneviditelnění“ komunikace vyvstala v konfliktních zónách, a tak byla bezdrátová technologie primárně vyvinuta pro vojenské účely. První pokus o sestavení systému akustických senzorů umístěných na dně oceánu provedla americká armáda v době studené války. Díky této soustavě senzorů mohla být detekována poloha a pohyb sovětských ponorek (Chong a Kumar, 2003). Za předchůdce technologie bezdrátových sensorových sítí lze považovat distribuované sensorové systémy (Distributed Sensor Networks, DSN), které se objevily na počátku 80. let. Jednalo se o malé nízkonákladové sensorové uzly, které spolu vzájemně spolupracovaly. Nasbírané informace byly přeměrovány na uzel, který uměl informace zpracovat. Tento projekt byl poměrně ambiciózní, protože v této době teprve docházelo k rozvoji počítačových technologií. Od roku 1998 se s postupným vývojem technologií soustředila větší a větší pozornost na využití bezdrátových sensorových sítí v širokém spektru aplikací od environmentálního monitoringu až po aplikace v socioekonomické sféře (Kreibich a Neužil, 2011). Uzly bezdrátových sensorových sítí měly menší velikost, a proto byly vynakládány nižší náklady na jejich pořízení, a tím pádem se celá technologie stala mnohem dostupnější. Agentura pro výzkum pokročilých obranných projektů (Defence Advanced Research Projects Agency, DARPA) se stala průkopníkem v oblasti průzkumu možností bezdrátových sensorových sítí. V programu SenseIT byly popsány nové možnosti např. využití ad hoc síťování nebo dynamického dotazování. Zpočátku se jednalo o bezdrátové sensorové sítě využívající přenosu dat pomocí mobilních služeb, později přibyly bezdrátové sensorové sítě umožňující komunikaci i mezi uzly. Institut elektronického a elektrického inženýrství (Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE) se začal zabývat vývojem komunikačních protokolů pro bezdrátovou sensorovou síť. Prvním protokolem určeným k využití v maloplošné



nízkonákladové bezdrátové sensorové síti byl protokol IEEE 802.15.4. Na jeho podkladu vznikaly další, z nichž dnes mezi nejrozšířenější patří ZigBee (Baronti a kol., 2007).

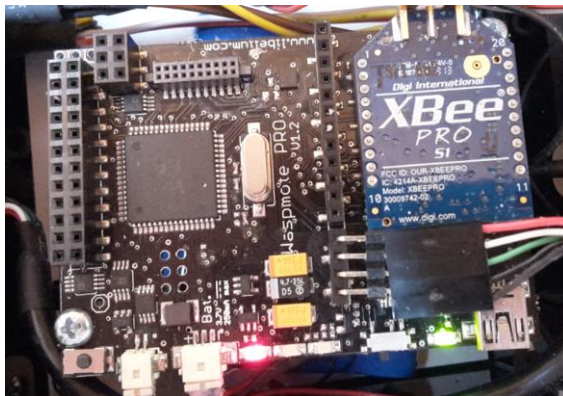
Prvním velkým projektem využívajícím bezdrátové sensorové sítě byl projekt *Duck Island*, který se zabýval sledováním útočišť živočichů na malém ostrově nedaleko amerického státu Maine. Navržená architektura a topologie bezdrátové sensorové sítě se stala obecnou metodikou, která je následována při aplikacích zaměřených tímto směrem (Polastre a kol., 2004). Postupně vznikaly další a další projekty, až se počátkem 21. století na bezdrátové sensorové sítě začíná pohlížet jako na progresivní obor využívající nejmodernějších technologických množností (Wang a Balasingham, 2010).

### 3.2.2 Komponenty bezdrátové sensorové sítě

Bezdrátová sensorová síť má dvě komponenty - technickou a programovou. Technickou komponentu tvoří uzly vybavené senzory, brána a server (Murthy a Manoj, 2004). Programová komponenta představuje veškeré softwarové vybavení uzlů a brány (Podhorský, 2012). Obě komponenty jsou postupně rozebrány v následujícím textu.

#### 3.2.2.1 Technická komponenta

První část technické komponenty bezdrátové sensorové sítě je představována uzly. Uzly bezdrátové sensorové sítě jsou tvořeny základní deskou, která je vybavena integrovaným mikroprocesorem, baterií, komunikační jednotkou, pamětí, zabudovanými senzory a rozhraními pro připojení externích sensorů (Kalantari, Taghipour, 2014) (obr. 4).



Obr. 4. Základní deska uzlu Wasp mote Plug&Sense, zdroj: vlastní fotografie základní desky uzlu Wasp mote Plug and Sense, modelu Smart Environment

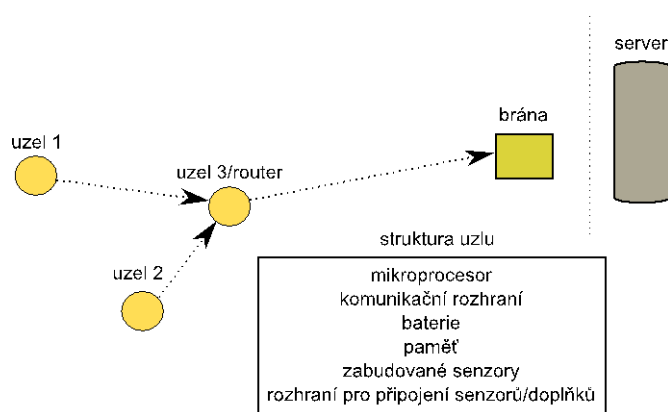
Uzly umožňují napojení jiných sensorů, než jsou zabudovány, a tak mohou být využity k monitoringu variabilních prvků v okolním prostředí. Uzly mohou být rozmístěny ve vnitřním i venkovním prostředí. Schéma jejich rozmístění a toku dat mezi nimi směrem k bráně je definováno topologií bezdrátové sensorové sítě. Ty uzly, které jsou prostředníky pro posílání dat směrem k cíli – bráně, se nazývají směrovače (routery, sběrné uzly). Komunikace mezi technickými komponentami bezdrátové sensorové sítě probíhá na podkladě zvoleného pásma rádiového vlnění a vybraného komunikačního

protokolu. Z technického hlediska je s výběrem komunikačního protokolu, typu antény a komunikačního pásma spjata vzdálenost, do níž jsou uzly schopny posílat naměřená data. Hlavním zdrojem energie bezdrátových uzlů bývají nejčastěji různé typy baterií, které mohou být napojeny na solární panely (Yick a kol., 2008). Uzly mohou být ve vybraném prostředí situovány po jednotlivých kusech až po tisících. Vše záleží na účelu aplikace bezdrátové sensorové sítě, velikosti sledovaného území a požadavku na potřebnou hustotu sběru dat. S vyšším počtem uzlů v terénu se zvyšuje i přesnost následných analýz (Murthy a Manoj, 2004). Uzly v síti se dělí dle mobility na dynamické a statické. V jedné bezdrátové sensorové síti mohou být využity oba typy uzlů dle mobility (Karl a Willig, 2007). Není možné, aby bezdrátová sensorová síť fungovala nekonečně dlouho, a tak každá bezdrátová sensorová síť má specifikovaný bod, od kterého je považována za nefunkční. Tyto ukazatele slouží k porovnání životností jednotlivých sítí a jejich funkčnosti. Za tento bod může být považována událost, kdy první uzel v síti vypadne, kdy vypadne větší procento uzlů, objeví se ztráta pokrytí nebo síť je nějakým způsobem odstavena (Di Marco, 2008).

Druhou součástí technického vybavení bezdrátové sensorové sítě je brána, která slouží jako shromaždiště dat z uzlů, jejich úložiště a prostředek k jejich posílání do serverové části. Kromě vyjmenovaných funkcí je přes bránu prováděna údržba a kontrola funkčnosti celého bezdrátového systému (Murthy a Manoj, 2004).

Třetí část, server s databázovým rozhraním, slouží jako dlouhodobé úložiště dat. Přes server mohou být data pomocí aplikačního rozhraní klienty zobrazována (Akyildiz, Vuran, 2010).

Schéma komunikace v bezdrátové sensorové síti s využitím všech technických komponent je znázorněno na obrázku 5.



Obr. 5. Komunikace v bezdrátové sensorové síti v jednoúrovňové stromové topologii s popsanou strukturou uzlu, zdroj: Murthy a Manoj (2004), upraveno

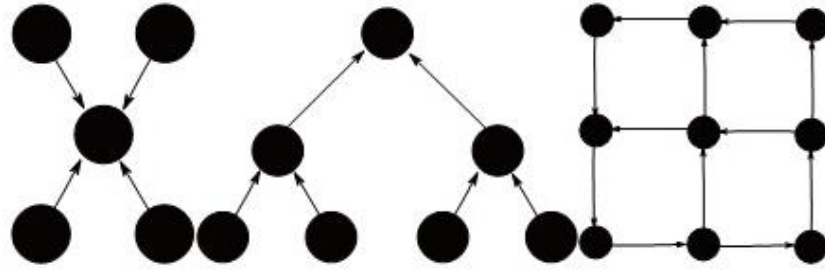
### 3.2.2.2 Programová komponenta

Programová komponenta kontroluje technické komponenty, spravuje systémové prostředky a umožňuje chod aplikací. Programové vybavení nezbytné pro chod celé sensorové sítě je dodáváno výrobcem. Dodavatel komponent buď vyvíjí vlastní programové rozhraní, nebo využívá možností, které nabízí open source software.

Programové vybavení musí nabízet uživateli možnosti přizpůsobení se potřebám vlastní aplikace (Akyildiz, Vuran, 2010).

### 3.2.3 Architektura a topologie bezdrátové sensorové sítě

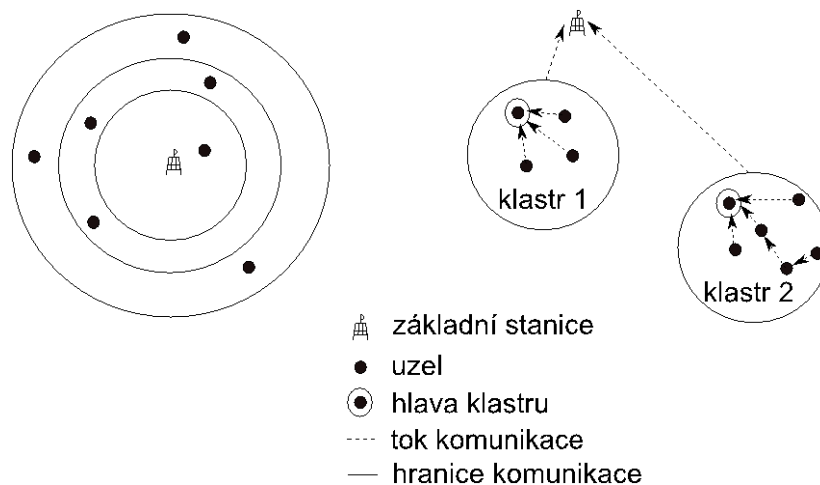
Návrh komunikace v bezdrátové sensorové síti je ovlivněn mnoha faktory, mezi které se dle Murthy a Manoj (2004) řadí škálovatelnost, spotřeba baterie a náchylnost k chybám. Akyildiz a Vuran (2010) přidávají další faktory, a tak počítají s tím, že rozmístění uzlů bezdrátové sensorové sítě je omezeno technickou platformou, chybovou tolerancí, škálovatelností, náklady, topologií, přenosovým médiem a spotřebou baterie. Faktory ovlivňující umístění uzlů ve venkovním prostředí jsou rozebrány v kapitole 5.1 Faktory ovlivňující rozmístění uzlů ve venkovním prostředí. využitím faktorů ovlivňujících rozmístění uzlů byly navrženy dva základní druhy architektury bezdrátových sensorových sítí – vrstevnatá a klastrová (Murthy a Manoj, 2004). S architekturou bezdrátové sensorové sítě je úzce spjata její topologie, která popisuje rozmístění přístrojů a tok dat ze zařízení do brány. Existují dva typy topologií – fyzická a logická. Fyzická topologie popisuje fyzickou konstrukci sítě. Logická pak zobrazuje tok dat v síti. Dále jsou definovány druhy topologie, z nichž mezi ty základní v bezdrátové sensorové síti nejvyužívanější patří: hvězdicová, stromová a mesh (Sosinsky, 2009) (obr. 6). Hvězdicová topologie je tou nejjednodušší. Uzly v ní komunikují přímo s bránou, a tak všechny mohou být označeny jako koncové. K tvorbě této topologie není třeba využívat všech výhod, které bezdrátové síťování nabízí, protože linie komunikace je přímá a stačí mít pouze jeden přijímací přístroj. Jedná se o jedno skokový přenos dat. Soparia a Bhatt (2014) shrnují výhody této topologie v tom, že výpadek jednoho uzlu neovlivní běh celé bezdrátové sensorové sítě, ale naopak výpadek koordinátora zapříčiní, že nebudou posbírána žádná data. Stromová topologie využívá dvou druhů uzlů, a to koncových a směrovačů. Data jsou shromažďována v bráně, která tvoří vrchol celé stromové struktury. Jedná se o rozšířenou hvězdicovou topologii, ve které jsou spojeny uzly, které by v hvězdicové topologii pracovaly jako brána. Musí být využito alespoň tři úrovně, aby se struktura přenosu dat dala nazývat stromovou. Winkelman (2007) vidí výhody stromové struktury ve snadné rozšiřitelnosti, brzké detekci chyb a údržbě. Největší nevýhoda spočívá v tom, že pokud dojde k nefunkčnosti některého z uzlů na vyšší úrovni, dojde k nepřenesení dat z této oblasti do brány. Mesh topologie je rozdělena na plně a částečně propojenou. V plně propojené mesh síti dochází k propojení všech uzlů mezi sebou. V částečně propojené topologii je každý uzel spojen s jedním a více uzly, což přináší výhodu v tom, že při výpadku některého z uzlů je k přenosu dat využita náhradní komunikační trasa. Toto propojení může přinášet i nevýhodu spočívající ve vysoké spotřebě baterií více komunikujících uzlů (Murthy a Manoj, 2004; Sosinsky, 2009).



Obr. 6. Topologie bezdrátové senzorové sítě – zleva hvězdicová, stromová, mesh, zdroj: Murthy a Manoj (2004), upraveno

Vrstevnatá architektura obsahuje jednu základní stanici a uzly umístěné kolem ní ve vrstvách. Každá vrstva představuje komunikační dosah senzoru (obr. 7, vlevo). Základní stanice je shromaždištěm dat a základním přístupovým bodem do sítě z vnějšího pohledu. Nejvíce je využívána v militárních aplikacích. Výhody této architektury spočívají v tom, že každý uzel je do sítě zahrnut jenom pro komunikaci na krátkou vzdálenost a nízkenergetickým přenosem dat (Murthy a Manoj, 2004). V rámci této architektury mohou být uzly uspořádány do různé topologie, záleží především na spolehlivé komunikační vzdálenosti uzlu, ke které se mohou přidat další výše zmíněné faktory.

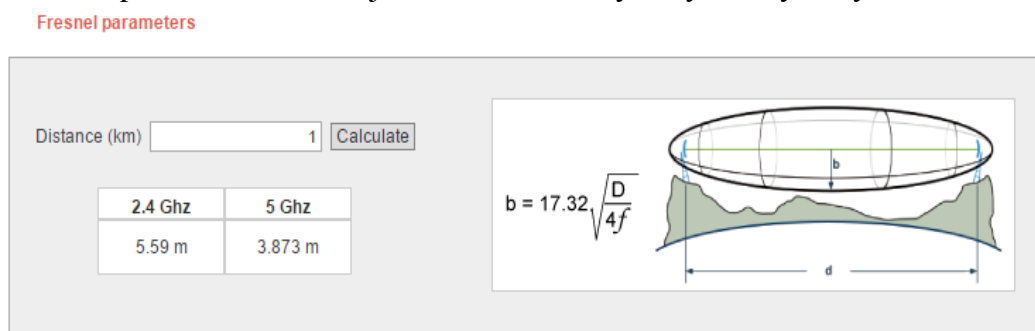
Klastrová architektura také obsahuje jednu základní stanici. Uzly se senzory jsou umístěny ve vybraných regionech zájmu (klastrech). Každý klastr se skládá z libovolného počtu uzlů, ale pouze jeden uzel komunikuje se základní stanicí. Tento uzel se nazývá hlava klastru (Murthy a Manoj, 2004) (obr. 7, vpravo). Hlavou klastru nemusí být po celou jeho existenci pouze jeden uzel, ale uzly se mohou měnit. K tomuto slouží klastrovací algoritmy. Mezi ty nejvyužívanější algoritmy využívané pro klastrové uspořádání patří – směrovací a topologicky řízené protokoly. Dle Manisekaran a kol. (2014) shlukování uzlů do klastrů přináší úsporu energie v uzlech, protože data nejsou přenášena na velkou vzdálenost a síť je kompaktnější. V rámci klastru mohou být uzly uspořádány do rozličné topologie.



Obr. 7. Komunikace ve vrstevnaté architektuře (vlevo) a v klastrové (vpravo), v prvním klastru dochází ke komunikaci v hvězdicové topologii a v druhém klastru probíhá komunikace ve stromové topologii, zdroj: Murthy a Manoj (2004), upraveno

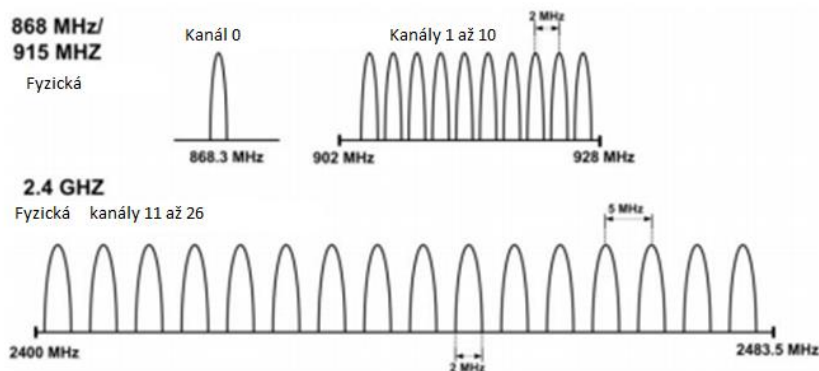
### 3.2.4 Přenos dat v bezdrátové sensorové síti

Komunikace v bezdrátové sensorové síti je základním předpokladem úspěšného fungování celé sítě. Komunikace probíhá na podkladě elektromagnetických vln. Pomocí Maxvellových rovnic je možné popsat měnící se elektromagnetické pole na elektrické a současně změny elektrického pole na magnetické. Elektromagnetické vlny jsou schopné se šířit samy všemi směry v kruhu. Se zvětšující se vzdáleností je signál méně přesný a k jeho zachycení je potřebné vynaložení většího množství energie. Signál není zeslabován pouze vzdáleností, ale i překážkami, které jej pohlcují nebo odrážejí (Mizera, 2011; Murthy a Manoj, 2004). Pro kvalitní přenos dat musí být volná Fresnelova zóna, která je definována spojnicí dvou bodů tvaru elipsoidu. První Fresnelova zóna je definována tětivou, která má jednu polovinu vlnové délky přímé cesty mezi body, které mají být spojeny. Alespoň 60 % této zóny musí být volných, aby nedocházelo k degradaci signálu (Ni a kol., 2013). Obrázek 8 ukazuje výpočet Fresnelovy zóny pro body vzdálené jeden kilometr při využití dvou nefrekventovanějších pásem, vzorec společně s elipsoidem demonstrují nákres Fresnelovy zóny nad vybraným terénem.



Obr. 8. Fresnelova zóna po vzdálenost jeden kilometr nad reálným povrchem, zdroj: webového rozhraní brány Meshlium

V bezdrátových sensorových sítích jsou využívány vrstvy, které adaptují OSI model (Open System Interconnection Model), který je referenčním modelem využívaným k propojování systémů (Murthy a Manoj, 2004). Každý přístroj v síti má specifikované identifikační číslo (ID) a svou adresu (MAC), na které naslouchá komunikaci. Přenos dat je uskutečňován na zvolených rádiových frekvencích. Celosvětově jsou pro bezdrátovou komunikaci určena nelicencovaná pásma pracující ve frekvencích 13,56 MHz, 40 MHz, 433 MHz, 2,4 GHz a 5,8 GHz. Pásmo 2,4 GHz je velmi využívané pro bezdrátovou komunikaci. Toto pásmo je děleno na největší počet kanálů (16) (obr. 9), v nichž může přístroj vysílat, přijímat signály a má vyšší rychlost přenosu dat. Přijímače a vysílače pracující v tomto pásmu jsou proto nejhojněji vyráběny. Problémem komunikace v tomto pásmu je hojné využití kanálů vedoucí ke kolizím při přenosu dat (Hynčica a Pavlata, 2011).



Obr. 9. Rozdělení komunikačních pásem 868 MHz, 915 MHz a 2,4 GHz, zdroj: Severino (2008), upraveno

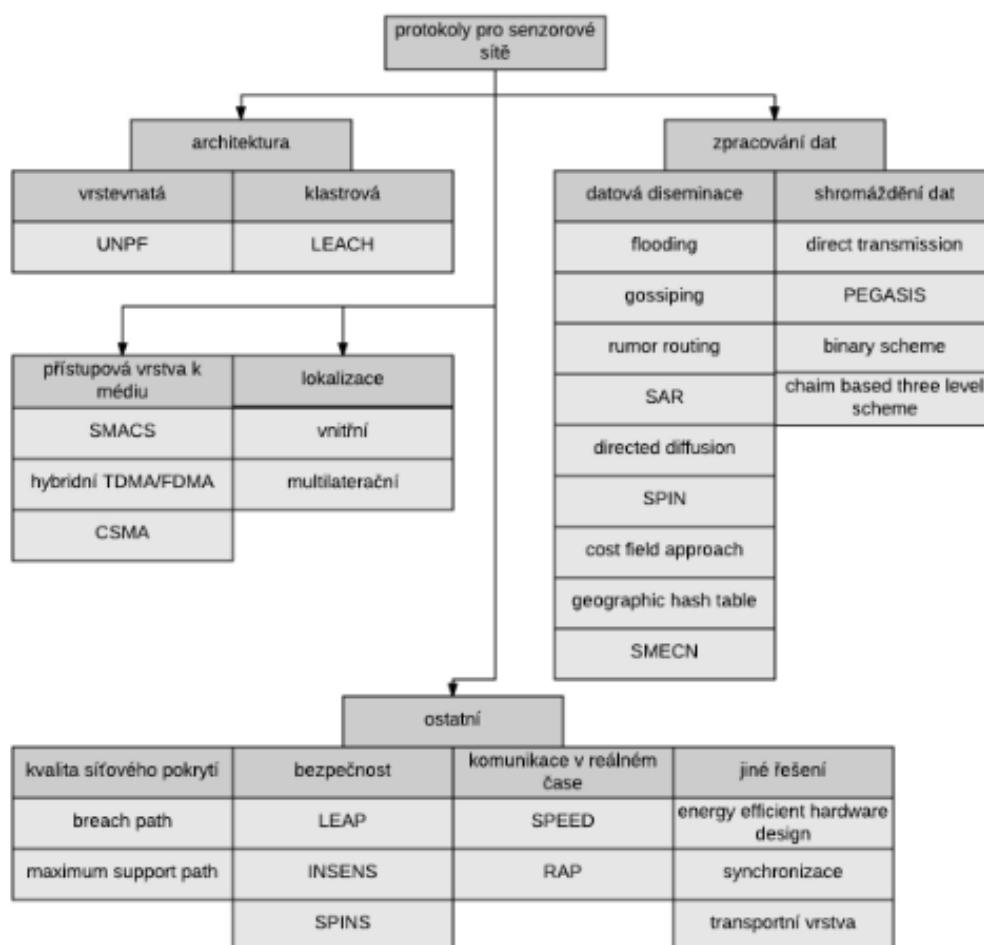
Toto pásmo je doplněno dalšími využívanými pásmy, 868 MHz a 915 MHz, které jsou využívány v USA, Kanadě, Austrálii a na Novém Zélandu. Část pásma, které může být využito také bez licence je určeno pro industriální, medicínské a vědecké práce (Industrial, Scientific and Medical, ISM). Příkladem tohoto pásma mohou být v USA jeho části na frekvencích 902 MHz - 928 MHz a 5,7 GHz – 5,8 GHz (Guvenc a kol., 2011). Akyildiz a kol. (2014) uvádí, že v budoucnu by bylo vhodné pro komunikaci mezi bezdrátovými přístroji využívat terahertzové pásmo a navrhuje, jak by architektura takového systému měla vypadat.

Standardy pro bezdrátovou komunikaci jsou podle Kabara a kol. (2012) rozděleny dle účelu aplikace na celulární telefonické, využívající satelitní komunikaci, rádiové a lokální. Tři ze standardů byly adaptovány pro primární použití v bezdrátových sensorových sítích. Mezi tyto standardy patří – IEEE 802.15.4, WirelessHART, ISA100 (Kabara a kol., 2012). Z prvně jmenovaného standardu se v roce 2005 vyvinul standard ZigBee, který se dále vyvíjí, a který se stává tím nejpoužívanějším pro komunikaci v bezdrátových sensorových sítích (Poole, n.d.).

Kromě výše zmíněných standardů je velmi často k přenosu dat v bezdrátových sensorových sítích využíváno mobilních služeb (GPRS/GSM), díky nimž jsou data nejčastěji přenášena přímo na bránu. K využívaným službám k přenosu dat se řadí i Wi-Fi nebo bluetooth pro propojení přístrojů na velmi krátkou vzdálenost (Muller a kol., 2013). Od roku 2016 se v České republice buduje mobilní síť Sigfox. Její přijímače jsou vybaveny rozhraním pro komunikaci s přístroji, které signál vysílají. Data jsou přenášena několikrát denně do úložiště (Peterka, 2015). Další novou možností pro přenos dat na velkou vzdálenost je využití nové technologie LoRa (LoRa, 2016).

Pro bezdrátové sensorové sítě je typická schopnost komunikace uzlů mezi sebou. V bezdrátových sensorových sítích jsou využívány pouze fyzická, linková, síťová a aplikační vrstva modelu. Do jaké míry jsou tyto vrstvy využity je specifikováno v samotném komunikačním protokolu (Mendes a Rodrigues, 2011). Komunikace v bezdrátových sensorových sítích probíhá v *unicast*, *multicast* nebo *broadcast* módu. V *unicast* módu komunikuje jeden přístroj s dalším, v *multicast* módu je jeden vysílací uzel a více přijmačů, v *broadcast* módu vysílá data jeden přístroj ke všem dalším zapojeným do stejné sítě (Akyildiz a Vuran, 2010). Kromě komunikačních protokolů se

v senzorových sítích dle Murthy a Manoj (2004) využívají další protokoly, které jsou shrnuty ve schématu (obr. 10). V prvním dělení se tyto protokoly třídí dle typu architektury, způsobu práce s daty, přístupu k médiu, způsobu lokalizace a poslední skupinou jsou jednoznačně nezařaditelné (ostatní) protokoly.



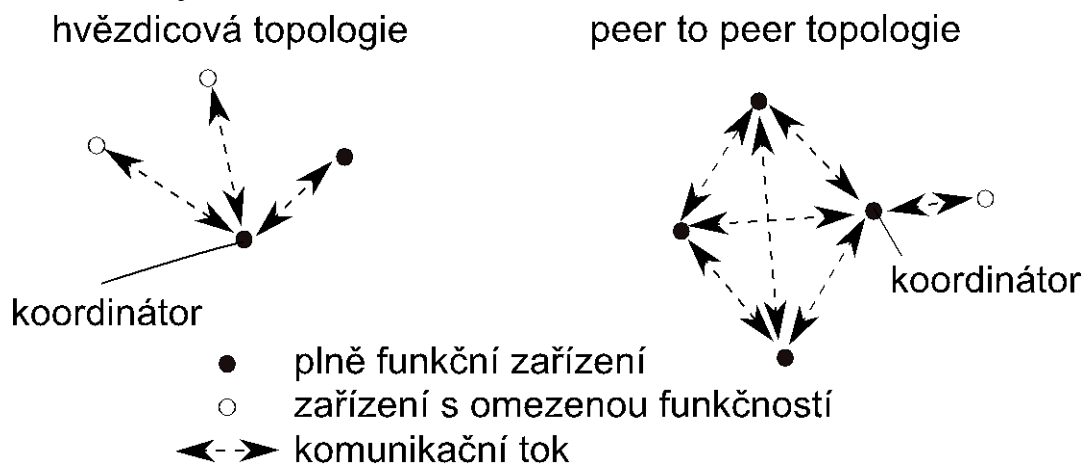
Obr. 10. Protokoly využívané v bezdrátových senzorových sítích, zdroj: Murthy a Manoj (2004), upraveno

### 3.2.4.1 Protokol IEEE 802.15.4

Protokol IEEE 802.15.4 je prvním, který byl vyvinut přímo k použití pro komunikaci v bezdrátových senzorových sítích a definuje rádiovou komunikaci krátkého dosahu. Jedná se o nízkonákladový komunikační protokol, který vykazuje spolehlivý přenos dat, jednoduchou implementaci a nízkou spotřebu energie v koncových zařízeních. Výraznou zápornou stránkou je nízká rychlost přenosu dat. Protokol pracuje v bezlicenčních pásmech 868 MHz, 915 MHz a 2,4 GHz (Baronti a kol., 2007; Murthy a Manoj, 2004).

V protokolu jsou definovány dva typy zařízení – plně funkční zařízení a zařízení s omezenou funkčností (obr. 11). Plně funkční zařízení se může chovat jako koordinátor, směrovač nebo brána a může tak komunikovat s jakýmkoli jiným zařízením v síti. Zařízení s omezenou funkčností je limitováno na komunikaci pouze s plně funkčním zařízením (Kabara a kol., 2012). Protokol povoluje dva typy topologií - hvězdicovou

a *peer to peer*. V hvězdicové topologii se nachází koordinátor celé komunikace a koncová zařízení. V této topologii nemusí být zahrnuta žádná plně funkční zařízení. Naproti tomu *peer to peer* (rovný s rovným) topologie se skládá převážně z plně funkčních zařízení, kdy každý přístroj může komunikovat s vybranými přístroji v dosahu, ve kterém směřují data ke koordinátorovi (Severino, 2008).



Obr. 11. Komunikace prostřednictvím protokolu IEEE 802.15.4, zdroj: Severino (2008), upraveno

Protokol se skládá pouze ze dvou nejnižších vrstev OSI modelu, a to fyzické a linkové vrstvy. Každá vrstva je zodpovědná za plnění svých úkolů a za nabízení svých služeb vyšším vrstvám. Vrstvy, které aplikuje OSI model, jsou znázorněny na obrázku 12. Absence vyšších vrstev odkazuje na použití jiných protokolů nebo na aplikační software, který řeší síťovou a aplikační část (Hynčica a Pavlata, 2011). K dosažení vyšší pravděpodobnosti úspěšného doručení paketu byly vyvinuty metody jako přístup s mechanismem vyvarujícím se kolizím (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance, CSMA/CA), posílání potvrzovacího rámce nebo datová verifikace (Murthy a Manoj, 2004).

Přenos dat	Vrstva
Data	Aplikační
	Prezentační
	Relační
Segment	Transportní
Paket/datagram	Síťová
Bit/rámec	Spojová (MAC a LLC)
Bit	Fyzická

Obr. 12. Vrstvy OSI modelu, zdroj: Murthy a Manoj (2004), upraveno

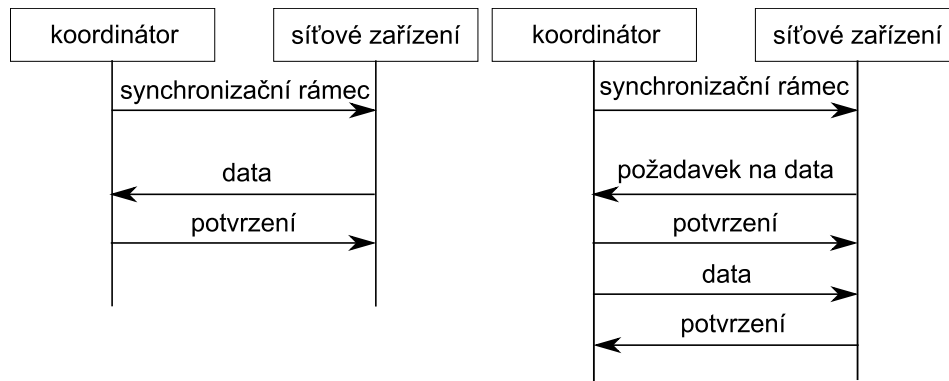
Fyzická vrstva poskytuje spojení mezi fyzickým médiem a vyššími vrstvami, zajišťuje převod bitů na signál i opačný převod ze signálu na bitový proud. V protokolu 802.15.4 jsou poskytovány dvě služby dle jeho specifikace (IEEE, 2006) - datová a řídicí.



Datová služba umožňuje přenos a příjem datových jednotek ve vybraných rádiových frekvencích. Rádiové vysílače a přijímače využívají techniku rozprostřeného spektra (DSSS, PSSH) a tři druhy modulace (QPSK, BPSK a ASK).

Nad fyzickou vrstvou je linková vrstva, která je tvořena dvěma podvrstvami – logickou kontrolou propojení (Logical Link Control, LLC) a kontrolovaným přístupem k médiu (Medium Access Control, MAC). LLC podvrstva je horní podvrstvou linkové vrstvy a funguje jako rozhraní mezi síťovou vrstvou a MAC podvrstvou. MAC se vyznačuje synchronizačním řízením, přístupem ke kanálu, garantovanými časovými sloty (Guaranteed Time Slots, GTS) řízením, validací rámců, potvrzením o příjmu rámců, asociací a diasociací. MAC se angažuje v bezpečnostních opatřeních (IEEE, 2006). Je využíván náhodný přístup k médiu na podkladě metody CSMA/CA. Dle této metody zařízení ověřuje volnost komunikačního kanálu a vysílá paket. Obsazení kanálu se zjišťuje měřením úrovně energie na komunikačním kanálu nebo detekcí nosné frekvence (Hynčica a Pavlata, 2011; Murthy a Manoj, 2004).

Dle specifikace IEEE (2006) je každý rámeček definován koordinátorem a je rozdělen na 16 shodně velkých dílů (slotů). Každý rámeček může mít aktivní a neaktivní části. Prvně vyslaná synchronizační část je přenesena vždy do prvního slotu a umí synchronizovat přenos dat do rámečků, aby byla identifikována personální síť a aby byla popsána rámcová struktura. Každý přístroj, který komunikuje přes přístupovou periodu, vyvolá soutěžení dvou rámečků v jiných přístrojích a rozdělování do slotů pomocí CSMA/CA mechanismu. Přenosy jsou dokončeny časem vyslání následných síťových rámečků. Mohou se objevit tři typy transakcí v síti formované na podkladě protokolu IEEE 802.15.4. V prvním typu jsou data přenášena do koordinátora, ve druhém z koordinátora do přidružených zařízení a ve třetím jsou data přenášena mezi si rovnými přístroji (*peer to peer*). Mechanismus každého typu přenosu záleží na tom, jestli síť podporuje přenos synchronizačních rámečků nebo ne. Přenos dat do koordinátora je vyvolán inicializátorem a následným přenosem dat s využitím CSMA/CA slotovaného mechanismu z koncového přístroje směrem ke koordinátorovi, který může poslat potvrzení o přijetí dat. Je možné uskutečnit přenos dat i bez synchronizace a poslat data přímo koordinátorovi, ale tento přenos je neslotovaný (obr. 13, vlevo).



Obr. 13. Přenos dat mezi koordinátorem a přístrojem zapojeným do sítě v případě nevyužití synchronizačního rámce (vlevo) a v případě využití synchronizačního rámce (vpravo), zdroj: IEEE (2006), upraveno

Přenos dat z koordinátora do koncového zařízení je v případě povolení synchronizačních rámců iniciován tím, kterému koncové zařízení periodicky naslouchá. Pokud je očekávána zpráva, tak přenos je vyžádán s využitím slotovaného CSMA/CA. Dojde k uvědomění o přijetí požadavku, poslání dat a koordinátor uvědomí zařízení o úspěšném přenosu dat. Pokud jsou data přenášena v síti, kde nejsou povoleny inicializační rámce, tak koordinátor naslouchá a čeká na neslotovaný CSMA/CA požadavek od koncového přístroje. Koordinátor uvědomí zařízení o přijetí požadavku. Pokud jsou data očekávána, tak koordinátor přeneše do přístroje neslotovaný CSMA/CA rámec. Pokud rámec není očekávaný, tak koordinátor indikuje tento fakt a dokládá úspěšné přenesení, buď použitím uvědomovacího rámce následovaným požadavkem, nebo prázdným datovým rámcem. V případě požadavku na uvědomění o úspěšném přenosu datového rámce, je rámec přenesen (obr. 13, vpravo) (IEEE, 2006).

Při *peer to peer* komunikaci si jsou všechna zařízení rovna, a tak každý může vysílat data do jakéhokoli dalšího zařízení, které má v dosahu. Aby vše probíhalo efektivně, tak přístroje, které do komunikace chtějí být zapojeny, musí buď obdržovat požadavky konstantně, nebo se synchronizovat. V prvním případě zařízení může jednoduše přenášet data s využitím neslotovaného CSMA/CA mechanismu. Ve druhém případě musí být provedena měření, aby bylo dosaženo synchronizace, což tento standard nevynezuje (IEEE, 2006).

Ve standardu IEEE 802.15.4 jsou vymezeny čtyři struktury rámce:

- synchronizační rámec,
- datový rámec,
- uvědomovací rámec,
- MAC kontrolní rámec.

#### 3.2.4.2 Protokol Zigbee

Tento protokol navazuje na protokol IEEE 802.15.4 a vyvíjí se od roku 2004. Oproti předchozímu standardu tento implementuje kromě fyzické a linkové vrstvy i vrstvu síťovou a aplikační. Síťová vrstva definuje topologii sítě a její zabezpečení. Využívané

topologie jsou hvězdicová, stromová a mesh. Aplikační vrstva je zodpovědná za párování zařízení (Pavlis, 2011). V Zigbee síti se objevují tři typy zařízení – koordinátor, směrovač a koncová zařízení (Omookun, 2015). Koordinátor je nejdůležitější součástí bezdrátové sensorové sítě, protože se stará o její správu. Směrovač je nepovinnou součástí bezdrátové sensorové sítě, plní funkci prostředníka přenosu dat mezi koncovými zařízeními a koordinátorem. Koncová zařízení se nacházejí v extrémních částech bezdrátové sensorové sítě a jsou propojeny pomocí směrovačů nebo přímo komunikují s koordinátorem ( Severino, 2008; Omookun, 2015).

### **3.2.5 Standardizace v bezdrátových sensorových sítích**

V oblasti standardizace jsou na poli bezdrátových sensorových sítí nejvíce činné tři organizace. První z nich je Institut pro elektronické inženýrství (IEEE), který je mezinárodní profesní organizací usilující o vzestup nových technologií. Dále se standardizací zabývá Mezinárodní normalizační institut (International Organization for Standardization, ISO) jako seskupení mezinárodních standardizačních orgánů technického směru. Open Geospatial Consortium (OGC) je nezisková organizace, která vydává standardy v oblasti geoprostorových dat a služeb ( Řezník, 2012; Joint Technical Committee, 2013; Stephens, 2016).

#### *3.2.5.1 IEEE*

Na poli aplikace bezdrátové sensorové je činná pracovní skupina IEEE 802.11<sup>TM</sup> pro lokální bezdrátové sítě (Wireless Local Area Networks). Standardy přímo pro bezdrátovou komunikaci jsou vydávány s označením IEEE 802. Po půl roce od data jejich zveřejnění jsou dostupné zdarma. Přehled skupin standardů, které jsou pod tímto označením vydávány, je specifikován níže:

- IEEE 802®: Overview & Architecture,
- IEEE 802.1<sup>TM</sup>: Bridging & Management,
- IEEE 802.2<sup>TM</sup>: Logical Link Control,
- IEEE 802.3<sup>TM</sup>: Ethernet,
- IEEE 802.11<sup>TM</sup>: Wireless LANs,
- IEEE 802.15<sup>TM</sup>: Wireless PANs,
- IEEE 802.16<sup>TM</sup>: Broadband Wireless MANs,
- IEEE 802.17<sup>TM</sup>: Resilient Packet Rings,
- IEEE 802.19<sup>TM</sup>: TV White Space Coexistence Methods,
- IEEE 802.20<sup>TM</sup>: Mobile Broadband Wireless Access,
- IEEE 802.21<sup>TM</sup>: Media Independent Handover Services,
- IEEE 802.22<sup>TM</sup>: Wireless Regional Area Networks (IEEE, 2016.; Stephens, 2016).

Problematiky bezdrátových sensorových sítí se přímo týká poslední skupina, která obsahuje šest standardů seřazených dle data publikace od roku 2010 do roku 2015. Standardy se zabývají výměnou dat mezi regionálními bezdrátovými systémy, výměnou dat v rámci metropolitních bezdrátových systémů, dále je pozornost soustředěna na specifikaci fyzické a MAC vrstvy (IEEE, 2016).

### 3.2.5.2 *International Organization for Standardization (ISO)*

Jedním z objektů zájmu ISO je tvorba norem v oblasti geografických informací a sensorových sítí. V oblasti (bezdrátových) sensorových sítí byl vyvinut standard ISO/IEC 20005:2013. V této oblasti pracuje společná technologická komise pro oblast informačních technologií. Cílem standardu je specifikovat služby a rozhraní, které podporují spolupráci a zpracování informací v inteligentních (bezdrátových) sensorových systémech (Joint Technical Committee, 2013).

### 3.2.5.3 *Open Geospatial Consortium (OGC)*

Přímo v oblasti geografických a prostorových informací se standardizací zabývá OGC. Jedná se o mezinárodní sdružení společností, vládních organizací a univerzit, které se podílí na vývoji veřejně dostupných standardů. Kromě jiných oblastí se OGC zabývá vývojem standardů pro přenos a řízení dat v oblasti bezdrátových komponent. Kromě standardů jsou vydávány i „white“ papers, diskuzní fóra, návody, inženýrské zprávy, aplikační schémata a dokumentace (Řezník, 2012). V oblasti bezdrátových sensorových sítí pracuje technická komise pro uvolnění sensorového webu (Sensor Web Enablement Working Group, SWE). Hlavní okruhy působnosti této komise spočívají v otevřeném rozhraní pro sensorové webové aplikace, nadstavby pro IEEE 1451 („chytré“ převodníky), TML (TransducerML), CAP (Common Alerting Protocol), WS-N (Web Service Notification) a ASAP (Asynchronous Service Alert Protocol), podporu pro přístrojová rozhraní, možnost spolupráce na vývoji standardů, lokace sensorů a prostorové standardy, fúze sensorových dat s jinými prostorovými daty a vazby na IEEE a jiné standardizační organizace. SWE se soustředí na další vývoj servisně orientované architektury (Service Oriented Architecture, SOA) a prostorové datové struktury (Spatial Data Infrastructure, SDI) v oblasti bezdrátových sensorových sítí. Botts a kol. (2006) odkazuje na webově přístupné sensorové sítě a archivovaná sensorová data, ke kterým může být přístupováno. Kontrola probíhá pomocí otevřených protokolů a rozhraní (Application Programming Interface, API). Ve skupině standardů Sensor Web Enablement (SWE), které se zabývají standardizací v oblasti bezdrátové technologie, je dle "Sensor Web Enablement (SWE) | OGC" (2016) zahrnuto celkem sedm standardů, které jsou uvedeny níže:

- Observation and Measurements (O&M) (orientace na konstrukci obecných modelů a XML kódování pro jednotlivé observace a měření prováděné v reálném čase i archivované (Řezník, 2012)),
- PUCK Protocol Standard (práce se sensorovým modelovacím jazykem, poskytování kódu senzoru a dalších informací ze samotného zařízení, automatická

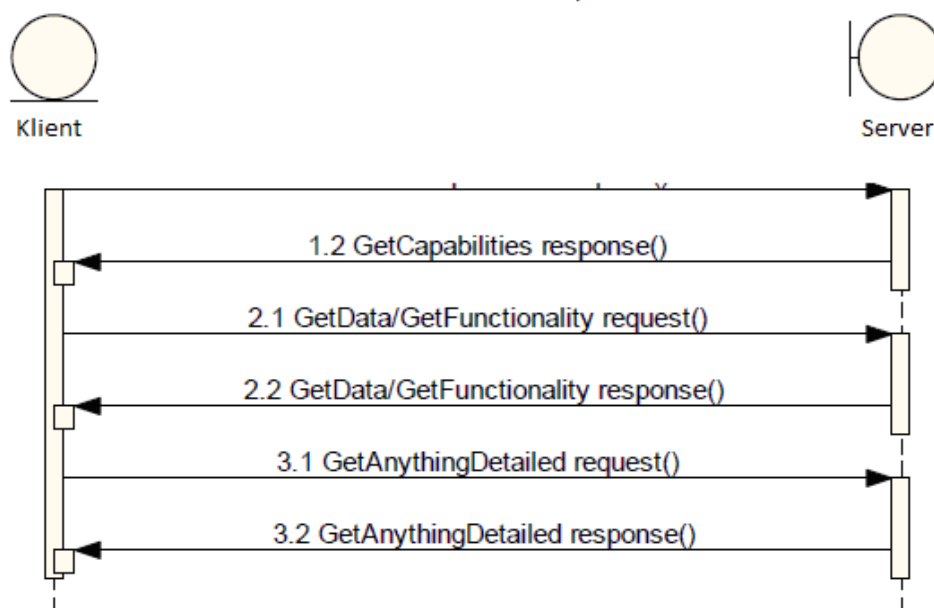
instalace, konfigurace a přístup k operacím (“OGC® PUCK Protocol Standard | OGC,” 2016)),

- Sensor Model Language (SensorML) (modely a XML schémata pro popis sensorových systémů a procesů, dále jsou poskytovány informace potřebných pro senzory, informace o lokalizaci jednotlivých observací, zpracování nízkoúrovňových observací a popis vlastností (Botts a kol. (2006)),
- Sensor Observation Service (definice rozhraní pro webové služby, dotazování na operace, metadata a reprezentace sledovaných jevů. (Řezník, 2012)),
- Sensor Planning Service (popis standardního rozhraní a dotazování na data z různých zdrojů (satelitní data, data ze senzorů atd.) (Simons and Echterhoff, 2011)),
- SWE Common Data Model (využití k výměně měřených hodnot typu boolean, text, čas, kategorie, počet nebo kvantitativní, mezi senzory (OGC, 2016)),
- SWE Service Model Model (definice datových typů využívaných v rámci SWE, strukturu požadavků a odpovědí na ně (Řezník, 2012)).

#### *Schéma komunikace OGC ve webových službách*

Obecné schéma komunikace prostřednictvím webových služeb je specifikováno v každém standardu, který popisuje komunikaci mezi klientem a serverem (obr. 14). Prvně je klientem vyslán požadavek *GetCapabilities*. Parametr je v tomto případě požadavek, který má hodnotu *GetCapabilities*. Parametr vždy specifikuje, který druh dotazu je požadován. Druhým typem parametru je služba, která odkazuje na to, jakým způsobem budou data přenesena. Na typu služby závisí parametry, které jsou k ní přisuzovány. Ty výše zmíněné jsou vždy vyžadovány. Účelem operace *GetCapabilities* je obdržet metadata služby, popis serverových informací a přístupu k hodnotám parametrů. Tyto hodnoty jsou získány v odpovědi na operaci (Na a Priest, 2007). *GetData/GetFunctionality* je operace, která se liší službu od služby. Základním principem je použití jednotné adresy serveru k operaci, která přidává parametry, jež byly obdrženy v rámci operace *GetCapabilities*. Dle Řezník (2012) v geoinformatice tato operace neexistuje a je nahrazena operacemi *GetMap*, *GetRecords* a *GetFeatureInfo*. *GetAnythingDetailed* pracuje na konceptuální úrovni a uvádí popisné informace o metadatových možnostech obsažených v *GetDomain* operaci.

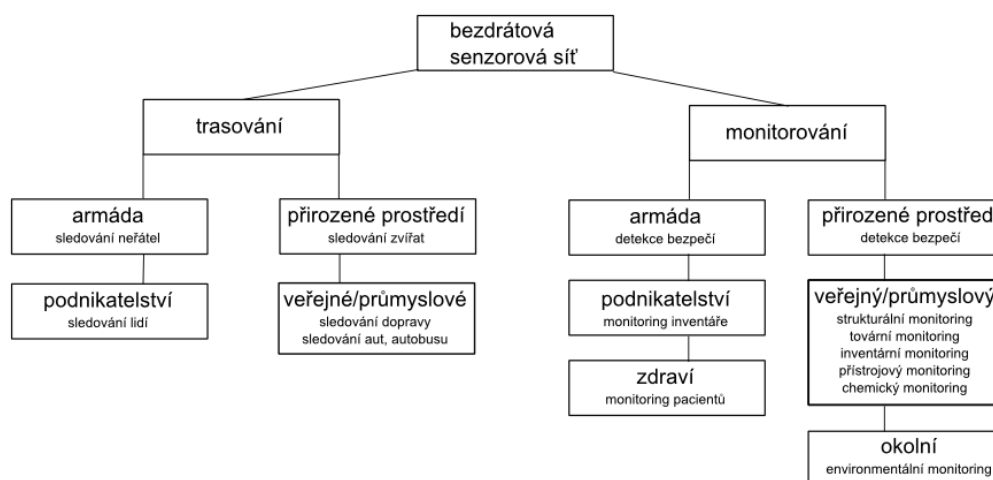
### Obecné schéma OGC webových služeb



Obr. 14. Schéma využití OGC webových služeb, zdroj: Řezník (2012), upraveno

### 3.2.6 Využití bezdrátové senzorové sítě

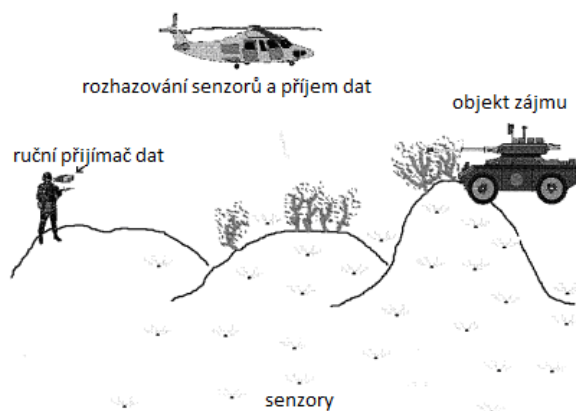
Každá bezdrátová senzorová síť musí mít před vlastní instalací specifikované své zaměření, aby bylo jasné, pro jaké účely je komponována a jaká data jí budou sbírána. Kromě určení aplikace bezdrátové senzorové sítě je důležitá i technická a funkční stránka, která vychází z vlastního účelu instalace bezdrátové senzorové sítě i s ohledem na rozmístění uzlů v prostoru. Využití bezdrátové senzorové sítě je hojné v environmentální i socioekonomické sféře (El-Bendary a kol., 2013). Aplikace bezdrátové senzorové sítě mohou být rozděleny do dvou kategorií. První je trasování a druhou monitorování (obr. 15) (Yick a kol., 2008).



Obr. 15. Rozdělení bezdrátových senzorových sítí, zdroj: Yick a kol. (2008), upraveno

Bezdrátové senzorové sítě nejsou limitovány pouze těmito aplikacemi a mohou být obecně implementovány na sledování jakýchkoli parametrů, díky kterým mohou být získávány preventivní informace o stavu vybraného systému (Lambrechts a Sinha, 2016). Velký potenciál má využití bezdrátových senzorových sítí v krizovém řízení, kterým se zabývali Kaur a kol. (2012), Řezník (2012), Benkhelifa a kol. (2014). Návrhem varovného povodňového systému s využitím bezdrátových senzorových sítí vybavených senzorem pro sledování vodního stavu a ZigBee rádiem se zabýval Marin-Perez a kol. (2012). Protokol IEEE 802.15.4 a senzory monitorující vodní stav pro svá měření používal Neal a kol. (2012). Po překročení povolené hranice vodního stavu byly vyslány varovné SMS zprávy. Velmi často jsou varovná hlášení zasílána po překročení limitů v uzlech se senzory spjata i s požárem, takovým návrhem se zabýval například Yu a kol. (2005) nebo Bayo a kol. (2010).

V současné době jsou velmi intenzivně využívány termíny *Smart Cities* a *Smart Houses*. Slovo *Smart* poukazuje na co nejvyšší automatizaci základních procesů probíhajících ve městech a domovech vedoucí k ušetření energie, zdrojů, úspor, zlepšení životních podmínek atd. K tomuto „chytrému“ rozhraní dopomáhají instalace senzorů do míst, kde má být vybráný prvek sledován. Townsend (2013) se v celé knize zabývala úskalími a přínosy „chytrých“ měst pro společnost. První použití slova *Smart* v souvislosti s bezdrátovou senzorovou sítí pojednává o „chytrém prachu“. Jedná se o stovky až tisíce malých uzlů se senzory umístěných v oblasti zájmu. Tyto uzly posílají data na přijímač, jež s nimi dále pracuje. Typické je jejich využití na bitevních polích (Pister, n.d.) (obr. 16). Podhorský (2012) se zmiňuje, že roku 1997 byl projekt *Smart Dust* odstartován. Jeho cílem bylo vyvinout modul o objemu  $1 \text{ mm}^3$ , který by uměl data snímat i posílat. Vývoj těchto malých přístrojů je iniciován univerzitou v Berkeley (Murthy a Manoj, 2004). V roce 2016 byl vydán i článek o *Smart Ports*, který pojednává o automatizaci úkonů a sledování meteorologických a hydrologických parametrů v přístavním městě Las Palmas (Fernández a kol., 2016). Autoři Cho a Yoo (2014) použili slovo *Smart* v souvislosti s důmyslně vybaveným kolem upozorňujícím na znečištění ovzduší v místě jeho pohybu.



Obr. 16 Využití a princip *Smart Dust*, zdroj: Pister, (n.d.), upraveno

### 3.3 Bezdrátové senzorové sítě pro sledování znečištění ovzduší

Využitím bezdrátové senzorové sítě pro sledování kvality ovzduší se zabývají týmy odborníků na celém světě, nejvíce projektů a článků na toto téma pochází z asijských států – Indie a Číny. Potřeba návrhu bezdrátového senzorového systému pro monitoring znečištění ovzduší v této oblasti je vyjádřena ve studii od Roseline a kol. (2013). Tyto asijské státy jsou následovány Evropou a Severní Amerikou, kde dochází především k vývoji této technologie. Studie mohou být členěny dle mnoha parametrů, mezi které se řadí datum publikace, komunikační technologie, použité technické komponenty, rozsah pokrytého území. Wei Ying (2015) rozděluje sítě dle jejich nosiče na stacionární, komunitní (nosičem jsou lidé) a vehikulární (nosičem jsou jedoucí dopravní prostředky).

Do rešerše byly přednostně zahrnuty studie, ve kterých jsou využívány technické komponenty dodávané firmou Libelium, Crossbow (Memsic). Pro porovnání byly zahrnuty i studie, ve kterých týmy odborníků vyvíjely vlastní řešení, protože komerčně nabízené technické komponenty nebyly k jejich záměrům dostačující.

Ze studií je patrné, že velké množství jejich autorů preferuje přenos dat přímo do brány prostřednictvím mobilní sítě, což je (na úkor pro bezdrátové senzorové sítě typické) komunikace mezi uzly navzájem. Přenos dat v hvězdicové topologii přináší množství výhod. Jeho konfigurace je snadnější, a tak se dá předpokládat, že bude stále velmi hojně využíván ve všech typech aplikací, ve kterých vyvstane nevýhoda hvězdicové topologie, která spočívá v krátkém přenosovém dosahu uzlů.

#### *Návrhy bezdrátových senzorových sítí nebo jejich komponent zaměřených na sledování znečištění ovzduší*

První záznam ve vědecké databázi Web of Science na téma bezdrátového sledování hodnot polutantů je datován do roku 2000 (Kinkade a kol., 2000). Autoři se v tomto příspěvku zamýšlí nad možností využití nízkonákladových komunikačních jednotek společně s vývojem senzorových jednotek měřících koncentrace oxidu uhelnatého. Celý systém má sloužit k jeho monitoringu ve vnitřním i venkovním prostředí.

Bezprostředně na tento příspěvek navazuje studie od Cai a kol. (2000), která se zabývá návrhem magnetoelastického senzoru pro sledování oxidu uhličitého. Autoři uvádí, že výhody tohoto senzorového systému spočívají v tom, že je nenákladný, ideální pro provoz ve vnitřní teplotě, má malou velikost, zahrnuje bezdrátovou monitorovací platformu, senzory jsou pasivní a konfigurace tohoto systému je snadná.

Na možnosti monitoringu oxidů uhlíku navazuje studie od autorů Upal, Mahfuz a Ahmed (2005). Autoři ve svém článku uvádí výzvy a perspektivy technologie bezdrátových senzorových sítí pro environmentální monitoring z pohledu komunikačních standardů a technologie doplňujících se kov-oxid polovodičů (Complementary Metal Oxid Semiconductor, CMOS) využívanou v integrovaných obvodech. Na rozdíl od první studie je zde kladen důraz na využití těchto vyvinutých senzorů v environmentálních aplikacích.



V dalších letech byl popsán vývoj nového senzoru pro sledování velmi těkavých organických látek (Volatile Organic Compounds, VOC) s vysokou citlivostí a selektivitou. Vývoj této nové monitorovací jednotky byl uskutečněn dle Tsow a kol. (2009). Experimenty ukázaly, že přístroj je schopný za vysokých koncentrací detekovat velmi těkavé organické látky a odlišit je od jiných velmi podobných látek. Každý uzel obsahoval nejen tento nově vytvořený senzor, ale i senzory pro měření teploty a vlhkosti vzduchu. Uzel měl vestavěné bluetooth komunikační rozhraní, a tak mohl na velmi krátkou vzdálenost komunikovat s chytrým telefonem, ve kterém byla nainstalována aplikace pro okamžité zobrazení naměřených dat.

Celý systém pro sledování kvality ovzduší (P-Sense) navrhl Méndez a kol. (2011). Každý uzel byl vybaven senzory sledujícími teplotu a vlhkost vzduchu, CO<sub>2</sub>, CO VOC a H<sub>2</sub>. Data z uzlů byla přenášena do chytrého telefonu PRO200 Sanyo přes bluetooth komunikační rozhraní. Mobilní komunikační rozhraní bylo využito k přenosu dat z chytrého telefonu na server. Zobrazení dat je možné pomocí webového rozhraní nebo v mobilním telefonu. Stejný princip přenosu dat využíval Jiang (2011), který navrhnul nové technologie pro vylepšení přesnosti a energetické náročnosti tohoto monitorovacího systému.

Na sledování prašných částic (PM<sub>x</sub>) se zaměřil Devarakonda a kol. (2013) Navržen byl mobilní sledovací box skládající se ze senzorů monitorujících prašné částice a již dříve zmíněný oxid uhelnatý. Systém obsahoval i GPS a GPRS modul. Sensorové komponenty pro sestavení mobilního systému byly dodávány společností Arduino. Tento systém byl namontován na auto jezdící po městě, data byla v reálném čase posílána na server. K jejich vizualizaci byla vyvinuta webová a mapová aplikace, ke které bylo umožněno přistupovat autorizovaným uživatelům.

Uzly Arduino byly k monitoringu polutantů (CO, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>S) a vybraných základních meteorologických prvků využity ve studii od Kadri a kol. (2013). Uzly byly stacionární a přenos dat probíhal pomocí GPRS komunikačního rozhraní. Uzly byly vybaveny solárními panely a pokrývaly území o rozloze 1 km<sup>2</sup> po dobu čtyř měsíců. Data z uzlů byla posílána na server, ze kterého mohla být v reálném čase zobrazována pomocí webového nebo mobilního rozhraní.

Nízkonákladový systém pro monitoring ovzduší s přenosem dat pomocí Zigbee protokolu byl navržen ve studii od Re a kol. (2014). Celý systém byl dynamický, autoři se opět zaměřili na instalaci bezdrátových uzlů na automobily. Každý uzel byl vybaven GPS přijímačem a senzory, které snímaly teplotu, relativní vlhkost vzduchu, NO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO a O<sub>3</sub>. Komunikace mezi automobily probíhala pomocí Zigbee rozhraní, data z uzlů na automobilech byla přenášena na centrální počítač přes statické přístupové body v bezdrátové sensorové síti. Kolektiv autorů opět neuvádí místo nasazení.

Měření prachových částic (PM<sub>x</sub>) pomocí bezdrátové sensorové sítě je diskutováno ve studii od Rajasegarar a kol. (2014). Cílem této studie bylo prezentovat to, že prachové částice mohou být velmi přesně měřeny i pomocí nízkonákladových jednotek, které tak

mohou velmi vhodně doplnit klasický staniční monitoring, jenž je přesnější formou monitoringu a přispět k tomu, že měření budou prováděna s co nejvyšším prostorovým rozlišením.

Abdul a kol. (2014) použil pro simulaci bezdrátové sensorové sítě ke sledování obou dosud nejvíce diskutovaných znečišťovatelů ovzduší - oxidu uhelnatého (CO) a prachových částic (PM<sub>x</sub>). Systém měl webové rozhraní navržené v software MATLAB. Použité uzly se senzory (MQ2) produkované společností Hanwei Electronics se budou dále vyvíjet.

Bezdrátová sensorová síť sledující kvalitu ovzduší pro industriální a urbánní oblasti byla navržena ve studii od Mansour a kol. (2014). Kromě nejvíce diskutovaného polutantu - CO, byl sledován i ozon a oxid dusičitý. Byla provedena simulace umístění uzlů v oblasti 500 x 500 metrů podél dopravních tepen. Technologie byla založena na zkušenostech odborníků z firmy Libelium. Pro komunikaci byla použita specifikace ZigBee, data byla ukládána na server a byla zpřístupněna přes email, SMS a webovou aplikaci, která je univerzálně použitelná. Byl navržen klastrovací protokol, jehož cílem bylo snížit spotřebu energie v jednotlivých uzlech a tím zvýšit životnost celé bezdrátové sensorové sítě.

Studie od Cho a Yoo (2014) se ohlíží na zdraví obyvatel, kteří si půjčí *Smart Bike* tím, že jim ukazuje nejméně znečištěné trasy v okolí. Chemické senzory zaznamenávající hodnoty prašných částic, CO, CO<sub>2</sub> a NO<sub>2</sub> jsou zabudovány do jízdního kola. Informace jsou pak posílány i přijímány z centrálního serveru, který tento typ dat shromažďuje.

Návrh systému WAPMS pro sledování znečištění ovzduší byl navržen v Sagar a Goel (2015). Tento systém je založen na sběru dat pomocí bezdrátové sensorové sítě, která se skládá z vysokého počtu uzlů. V síti se počítá, že budou zapojeny koncové uzly, které budou v oblasti zájmu situovány náhodně, fixně budou umístěny sběrné uzly a fixně bude lokalizována i brána. Uzly byly nastaveny tak, že pokud nebudou identifikovány vyšší hodnoty znečištění ovzduší, tak budou data sbírána v intervalu čtyři hodiny. Pokud budou naměřeny vyšší hodnoty, tak interval záznamu se sníží na jednu minutu, v případě nejvyššího ohrožení je interval stanoven na šest sekund. Index kvality ovzduší (AQI) je využíván k vizualizaci znečištění v reálném čase, ke kterému je přístupováno na kontrolních střediscích. Přestože v rámci této studie nebyla popsána konkrétní použitá technologie sběru dat, byla pozornost zaměřena na nízkou spotřebu baterie v uzlech a na názornou vizualizaci upozornění na nebezpečí vyšší koncentrace polutantů. Tyto matematické operace byly provedeny v matematickém software MATLAB.

Si a kol. (2015) navrhl architekturu bezdrátové sensorové sítě využívající informačně centrický a víceskokový přenos dat v monitorovacím systému znečišťovatelů ovzduší. Jedním z cílů navržené architektury bylo snížit přenos dat, rozlišovat prioritu paketů, jejich zpoždění a velikost. Navrženo bylo také optimální rádiové schéma, aby byla minimalizována spotřeba v jednotlivých uzlech. Navržená architektura byla ověřena pomocí simulátoru v území 1 km x 1 km a bylo využito 20 uzlů, jednoho sběrného uzlu a jedné základní stanice.

Konceptu *Smart Cities* společně s napojením na internet věcí (Internet of Things) využívá studie od Jamil a kol. (2015). Autoři navrhují architekturu bezdrátové sensorové sítě pro sledování znečištění ovzduší ve městě založenou na mesh topologii a komunikačním protokolu Zigbee. Sběr dat je založen na technologii dlouhodobého vývoje (Long Term Evolution Machinery, LTE-M), jejímiž výhodami jsou nízká spotřeba baterie, dosah komunikace na dlouhé vzdálenosti a možnost napojení dalších komponent umožňující dynamickou architekturu. Technologie bude namontována na jezdící autobusy, když autobus zastaví a bude k dispozici Zigbee síť, potom LTE-M moduly budou sbírat data z modulů vybavených Zigbee a posílat vše do vzdáleného úložiště (cloudu), odkud budou data dálkově přístupná.

Hu a kol. (2016) vidí v současných systémech monitorujících znečištění ovzduší nedostatky v jejich statické povaze, nízkém prostorovém rozlišení a nepřímém vystavení se zplodinám. Proto byl v rámci práce popsán nízkonákladový princip HazeWatch, který využívá přednosti mobilních sensorových jednotek, chytrých telefonů a jejich aplikací k měření, modelování a analýzám. V neposlední řadě je využíváno výpočtů ve vzdáleném úložišti (cloud computingu). Data jsou sbírána s vysokou hustotou v reálném čase, a tak jsou vyvíjeny nástroje pro vizualizaci na počítači i chytrém telefonu. Příslibem tohoto systému je lepší přístup k informacím vedoucí k varování obyvatelstva, ochraně jeho zdraví, ochraně majetku a životního prostředí.

Systém pro monitorování a předpovídání urbánního znečišťování ovzduší je uveden v Shaban a kol. (2016). Navržený systém obsahuje nízkonákladové uzly, které jsou vybavené senzory pro meteorologické sledování i pro monitoring vzdušných polutantů ( $O_3$ ,  $NO_2$ ,  $SO_2$ ). Uzly komunikují bezdrátově se základní platformou. Předpovědi jsou založeny na historických událostech a jejich prezentace je publikována přes webové i mobilní rozhraní. K vybudování předpovědních modulů je využíváno tří strojově se učících algoritmů. Tyto algoritmy podporují vektorové programování, M5P modelové stromy a neurální sítě. Zhodnocení měření je provedeno na základě trendu přesnosti a střední kvadratické chyby. Multivariální modeling s využitím M5P algoritmu ukazuje nejvhodnější výsledky pro předpovědní modelování.

#### *Reálně nasazené bezdrátové sensorové sítě sledující znečištění ovzduší*

Reálně nasazení bezdrátových sensorových sítí pro dlouhodobější venkovní monitoring vzdušných polutantů ve venkovním prostředí se datuje do roku 2008.

První bezdrátová sensorová síť velkého měřítka byla navržena v Londýně. Hlavním zdrojem znečištění ovzduší v Londýně jsou emise pocházející z automobilové dopravy. Klíčovým rysem projektu MoDisNet (Mobile Discovery Net) je využití flotily vozidel včetně autobusů, taxislužby, služebních a užitkových vozidel pro instalaci senzorů. Ve spolupráci se statickými senzory umístěnými u silnic je možné monitorovat znečištění ovzduší v reálném čase. MoDisNet je konstruován jako síť s vrstevnatou architekturou, která se skládá z mobilních sensorových uzlů umístěných na vozidlech, a statických

senzorových uzlů umístěných na reprezentativních místech v terénu. Uzly v síti komunikují buď na podkladě Zigbee protokolu, nebo Wi-Fi standardu. Senzory sítě MoDisNET byly v rámci projektu navrženy a nazývají se GUSTO. Senzory byly navrženy tak, aby kvantifikovaly množství látek znečišťujících ovzduší v reálném čase. Senzory GUSTO monitorují pomocí ultrafialového záření následující prvky SO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, NH<sub>3</sub> a benzen. Síť využívá operační systém TinyOS (Ma a kol., 2008).

Následující dvě studie z tohoto roku pochází ze Severní Ameriky. Senzory CitySense byly nasazeny na pouličním osvětlení a budovy v americkém městě Cambridge. Cílem studie bylo vytvořit urbánní testovací prostředí, které podporuje široké spektrum aplikací zahrnující sledování vzdušných polutantů. Každý uzel z celkového počtu 200 se skládal z linuxové jednotky, 802.11 a/b/g komunikačního rádia a senzorů sledujících hodnoty CO<sub>2</sub>, NO a O<sub>3</sub>. Komunikace probíhala v mesh topologii. Nasbíraná data byla přenášena přes Wi-Fi na server, zobrazována byla pomocí vytvořené webové aplikace (Murty a kol., 2008).

Jedna z prvních reálně nasazených čistě mobilních sítí monitorujících vzdušné polutanty byla prezentována v práci od Völgyesi (2008). Senzory sledující koncentrace O<sub>3</sub>, CO a NO<sub>2</sub> byly připevněny na auta projíždějící městem Nashville. Každý uzel byl vybaven GPS přijímačem, aby byla v každém okamžiku záznamu známa jeho poloha. Data byla ukládána v externí paměti připojené k uzlu. Okamžitá vizualizace byla prováděna na displeji (Liquid Crystal Display, LCD), který byl vestaven do uzlu. Funkčnost systému je kontrolována mikrokontrolérem 8051. Kromě přímého zobrazení dat na uzlu byla data po přenesení na server zobrazena přes aplikaci SensorMap Web App.

Podobným směrem jako londýnská síť se ubírá i bezdrátová senzorová síť z Jižní Koreje. Tato síť byla složena z uzlů APOLLO (Air POLLutants mOnitoring system). Cílem této studie bylo navrhnout monitorovací systém složený z mikrosenzorů monitorujících vzdušné polutanty klasifikované dle EPA (Environmental Protection Agency). Díky těmto dílčím krokům bylo umožněno porozumění charakteristikám a limitům chemických senzorů. Uzly mají nainstalované rozhraní pro komunikaci na podkladě protokolu IEEE 802.15. Ke komunikaci byla zvolena stromová topologie a byly zde nasazeny senzory pro sledování hodnot následujících prvků: CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, prašných částic, velmi těkavých organických látek a teploty vzduchu. Technologie dodávaly firmy Micro-Chemical Systems, SHINYEI, Sensirion. Pro řízení sítě byl vyvinut aplikační software, který je založen na operačním systému pro bezdrátové senzorové sítě (Resilient, Expandable, and Threaded Operating System for Wireless Sensor Networks, RETOS) (Choi a kol., 2009).

Asijské studie na toto téma byly realizovány na technologické univerzitě ve městě Nanyang. Tato univerzita byla pokryta uzly Renesas H8S. Senzory na ně napojené sledovaly CO, PM<sub>x</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, a VOC. GPS modul byl napojen na mobilní uzly. Pro komunikaci byly využity standardy GPRS a Wi-Fi. Data byla přístupná veřejnosti přes webové rozhraní (Wong a kol., 2009).

V této době byla zaměřena pozornost i na studium tohoto tématu na africkém kontinentu, protože mnoho částí Afriky, především její subsaharské oblasti, má problémy se silně znečištěným ovzduším. Toto znečištění má mnoho zdrojů jako je průmyslová výroba, automobilová doprava, domácí spalování odpadů a používání nekvalitních paliv. Jedním z hlavních důvodů tohoto znečištění je fakt, že velké množství průmyslových podniků zakládá svá výrobní centra v městských oblastech, a proto vznikla síť Wireless Mesh Network of Sensors (WMNS). Architektura sítě byla vyvinuta speciálně v kontextu afrických měst, především těch v subsaharských zemích, kde je nedostatek telekomunikační infrastruktury a přístupu k internetu. Ke komunikaci byl použit protokol IEEE 802.11s, který pracuje s mesh síťováním. Byly použity jak statické, tak i dynamické uzly byly vybavené senzory monitorujícími hodnoty CO, NO, O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub> a prašných částic (PM<sub>10</sub> a PM<sub>2,5</sub>). Očekává se, že výsledky získané z naměřených dat by mohly být využity při zavádění předpisů týkajících se kvality ovzduší v Africe (Fotue a Tanonkou, 2009).

Další africká studie navazuje na předchozí a byla navržena nedaleko kontinentální Afriky, na ostrově Mauricius. Jednalo se o projekt bezdrátového systému pro sledování znečišťovatelů (Wireless Sensor Network Air Pollution Monitoring System, WAPMS) sloužící ke sledování znečištění ovzduší pomocí bezdrátových uzlů rozmístěných v hojném počtu kolem ostrova. Prototyp bezdrátové sensorové sítě prozatím monitoruje znečištění ovzduší ve městě Port Louis, kde je síť rozdělena do šesti menších sektorů. Do budoucna se ovšem počítá s rozšířením této sítě po celém ostrově. Navrhovaný systém využívá k hodnocení kvality ovzduší index kvality ovzduší (AQI). Síť využívá topologii mesh a její senzory monitorují částice O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, CO a SO<sub>2</sub>. Protokol dynamického směrování (Dynamic Routing Protocol, DRS) byl použit k přenosu dat mezi jednotlivými uzly. Jedná se o jednoduchý reaktivní směrovací protokol navržený speciálně pro víceskokové bezdrátové sensorové sítě. Za účelem zlepšení WAPMS byl navržen a implementován algoritmus pro agregaci dat (Recursive Converging Quartiles, RCQ). Algoritmus slouží ke sloučení naměřených hodnot a odstranění duplicit. Tím se výrazně snižuje množství přenášených dat, což šetří energii (Khedo a kol., 2010).

Mobilních sítí, konkrétně GPRS pro přenos dat, bylo využito ve studii od Al-Ali a kol. (2010), systém se skládal z uzlů (HCS12/9S12) vyráběných společností Freescale Semiconductor, mobilní jednotky připevněné k vozům veřejné hromadné dopravy a serveru. Každý uzel byl vybaven senzory, které snímaly hodnoty CO, NO<sub>2</sub> a SO<sub>2</sub>, GPS přijímače a GPRS komunikačního modulu. Data získaná mobilní jednotkou byla zazipována a pomocí mobilní sítě přenášena na server, který zahrnoval i databázovou jednotku, kde byly informace dlouhodobě uloženy. Google Maps byly využívány k zobrazení reálné situace koncentrace polutantů ve vybraných lokalitách. Celý systém byl testován ve městě Sharjah, Spojené Arabské Emiráty.

Projekt, který pracoval s již existujícími komponentami bezdrátové sensorové sítě a který byl úspěšně nasazen v terénu, proběhl v USA, kde se na využití bezdrátových sensorových sítí pro sledování polutantů, především CO, soustředí Univerzita

v Cincinnati, která testovala uzly MICAz od firmy Crossbow s napojenými senzory od společnosti KWJ Engineering. Během dvou týdnů na podzim roku 2010, následně pak léta 2011 a 2012, byly tyto uzly umístěny kolem rušné silnice nedaleko univerzitního kampusu. Manuálně byla zaznamenávána i data o dopravě, pro lepší přehled o situaci byla kritická místa osazena i videokamerami. Uzly mezi sebou komunikovaly v pásmu 433 MHz. Ve studii není však uvedena přesnější specifikace použitého komunikačního protokolu (Chaiwatpongsakorn a kol., 2014).

Hsinchu, město na Tajvanu, bylo také podrobeno monitoringu znečištění ovzduší (Hu a kol., 2011). Byly použity uzly od společnosti Jennic se senzory snímajícími hodnoty CO<sub>2</sub> (H-550EV), GPS přijímačem a GSM komunikačním rozhraním. Tyto uzly se senzory byly namontovány na jedoucí automobily. Uzly mohly díky svému nainstalovanému rozhraní Zigbee komunikovat bezdrátově se senzorem a GPS modulem, a tak tyto komponenty nemusely být připevněny k uzlu. Auta se pohybovala uvnitř zájmové oblasti a uzly periodicky posílaly data pomocí GSM služby do databázového úložiště. Tato data byla uložena v centrální databázi a mohla být zobrazena přes Google Maps.

Komerčně dostupné uzly a senzory od firmy Libelium sloužící ke sledování vzdušných polutantů byly použity ve městě Hajdarábád. Uzly byly umístěny ve dvou lokalitách, a to v univerzitním kampusu a nedaleko rušné silnice. Senzory na ně připojené monitorovaly vzdušné polutanty jako CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO a NO<sub>2</sub>. Spolu s chemickými znečišťovateli byla sledována i teplota, vlhkost a tlak vzduchu. Data byla přenášena v mesh topologii, pomocí XBee komunikačního modulu. Naměřené hodnoty byly vykreslovány v podobě grafů v reálném čase (Prasad a kol., 2011).

Na využití bezdrátových sensorových sítí v oblasti sledování kvality ovzduší je kladen velký důraz na Tajvanu. Na předchozí studie navazuje další, která vyvíjí vlastní uzly OCTOPUS II, do jejichž vývoje se zapojila univerzita i vláda. Na tyto uzly byly při experimentálním měření v Taipei napojeny senzory firmy e2v snímající hodnoty CO. Dále byla snímána teplota, relativní vlhkost vzduchu a intenzita světla. Uzly měly připojené komunikační rozhraní pro protokoly IEEE 802.15.4 i Zigbee a posílaly data na bránu, která byla vybavena i komunikačním modulem GSM, díky němuž posílala data do centrálního úložiště, kde byl instalován program LabVIEW. Experimentální měření proběhlo od 22. dubna do 3. května 2011, data byla ukládána v MySQL databázi. Byla vytvořena i aplikace na chytré telefony, která zobrazovala monitorování v reálném čase (Liu a kol., 2012).

Další bezdrátová sensorová síť pro městský monitoring na asijském kontinentě byla navržena v Indii, kde senzory monitorují CO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub> a teplotu vzduchu. Přenos dat je uskutečňován v hvězdicové, stromové a mesh topologii. Komunikace probíhá na podkladě ZigBee protokolu. Síť se skládá ze statických i mobilních uzlů. Bezdrátová technologie je v tomto případě dodávána společností Atmel (Khemnar a kol., 2013).

Komponenty od firmy Libelium byly využity pro monitoring i ve španělské Salamance. Jednalo se o koncept bezdrátové sensorové sítě z řady *Smart Cities* vyvíjený

v Evropě. V rámci tohoto projektu byla od základů navržena bezdrátová sensorová síť, jejíž funkcionalita byla založena na využití komponent od španělské firmy Libelium. Každý uzel měl napojenou sensorovou desku, která sledovala sedm prvků: teplotu, relativní vlhkost vzduchu, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, CO, prašné částice a míru hluku. Celá bezdrátová sensorová síť byla rozdělena do dvou shluků, každý shluk měl definovanou hlavu, kterou byla samotná brána. Ke komunikaci z uzlů na bránu bylo využito protokolu Zigbee. Z brány byla data posílána pomocí mobilních služeb GPRS do externího úložiště, kde byla dlouhodobě skladována. Uzly uměly zareagovat i na překročení povolených limitů měřených prvků. Pokud byl limit překročen, docházelo k zaslání varovného signálu na bránu a bylo vydáno varování (Asín, A. a Malahorra, M., 2010; Bielsa, Alberto, 2011; Gomez a Hidalgo, 2014).

Velký zájem o bezdrátové sensorové sítě je na Univerzitě v Cambridge, kde byla vyvinuta laboratoř pro kalibraci chemických sensorů a kde vzniklo rozsáhlé pracoviště zabývající se tímto tématem. Nejprve byly ve městě Cambridge nasazeny dva druhy uzlů - statické a dynamické. Oba druhy uzlů snímaly teplotu vzduchu, CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>. Statické uzly byly schopné snímat i hodnoty relativní vlhkosti vzduchu. Dynamický monitoring, který umožňoval zaznamenat i polohu, byl prováděn pomocí chodců nebo cyklistů a byl uskutečňován pouze krátkodobě. Data takto získaná byla buď uložena v uzlu, nebo byla přenášena pomocí mobilní sítě. Statický monitoring byl prováděn delší časový úsek a tvořil jádrovou část celého bezdrátového systému. Později bylo využito pouze statické sítě, která čítala 46 kusů uzlů umístěných od 12. března 2010 do 26. května 2010 kolem dopravních tepen ve městě Cambridge a v jeho okolí. Data z uzlů byla buď ukládána v uzlu, nebo pomocí mobilních služeb (GSM/GPRS) posílána přímo na server, kde byla ukládána a v reálném čase vizualizována (Mead a kol., 2013).

Na předchozí aplikaci navazuje projekt zabývající se sledováním vzdušných polutantů na nejrušnějším evropském letišti Heathrow. Na londýnském letišti Heathrow a v jeho okolí byla nainstalována bezdrátová sensorová síť čítající 50 uzlů vybavených senzory monitorující základní meteorologické prvky (teplotu vzduchu, vlhkost vzduchu, tlak, srážky, směr a rychlost větru) a chemické znečišťovatele, mezi které patří: NO, NO<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, VOC a PM<sub>x</sub>. Data byla posílána pomocí GPRS mobilní služby přímo na server, kde mohla být zobrazována v reálném čase. Každé měření bylo doplněno GPS souřadnicemi uzlu, ze kterého bylo vysláno. Síť začala operovat počátkem roku 2012, a jelikož byla sestavena ve spolupráci s Univerzitou v Cambridge, tak čerpala ze zkušeností z předchozí instalace ve městě Cambridge (Popoola a kol., 2013).

Yaswanth a Syed Umar (2013) používají bezdrátovou sensorovou síť k automatickému monitoringu kvality ovzduší na Taiwanu. Uzly byly zkonstruovány na míru a byl využit komunikační modul OCTOPUS II, zkonstruovaný na Taiwanské univerzitě, mikroprocesor, paměť, baterie, obal a senzory sledující hodnoty CO ve Voltech, teplotu, vlhkost vzduchu, tlak, směr a rychlost větru. Data jsou zaznamenávána v desetiminutovém intervalu. Ke komunikaci mezi uzly sloužil Zigbee protokol. Kontrola

celého systému probíhala přes program LabVIEW, data byla uložena v MySQL databázi. Další práce by měla spočívat v navržení rozhraní, které by data ukazovalo zpracovaná data v reálném čase na chytrém telefonu nebo tabletu.

Wang a kol. (2013) navrhl architekturu bezdrátové sensorové sítě s využitím Zigbee protokolu pro přenos dat mezi jednotlivými uzly a bránou, brána komunikovala pomocí GPRS sítě s centrálním úložištěm. V rámci projektu byla vytvořena databáze a webové rozhraní pro zobrazení dat. Účelem této bezdrátové sensorové sítě byl sběr dat CO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, NO a prachových částicích v centrální Číně.

Yaacoub a kol. (2013) zprovoznil bezdrátovou sensorovou síť v katarském Dauhá. Bezdrátové uzly komunikovaly se serverem v reálném čase. Data uložená na serveru byla zpracována a analyzována, index kvality ovzduší byl mimo jiné počítán. Data byla zpracována v software R s využitím balíčku openair.

Sledování míry polutantů a hluku bylo prováděno také ve francouzském městě Cagnes sur Mer. Projekt se zabýval monitorováním prašných částic a nasazením hlukových senzorů pro mapování míry hluku v různých částech přímořského města. Ke snímání environmentálních charakteristik bylo využito multisenzorového systému GreenBee, který kromě míry hluku a prašných částic umožňoval sledovat i hodnoty teploty, vlhkosti vzduchu, rychlosti a směru větru, koncentrace ozónu a solární radiace. Naměřená data byla posílána na firemní server. Komunikace mezi sensorovými uzly mohla být prováděna pomocí protokolů GPRS, Zigbee, Home-Rider a CORONIS. Na základě těchto dat byly například vyhodnoceny oblasti ve městě vhodné k trvalému obývání (Barakeh a kol., 2014).

Ustad a kol. (2014) v rámci disertační práce testoval uzly se senzory zaznamenávajícími hodnoty CO, NO<sub>2</sub> a SO<sub>2</sub> a polohu uzlu v indickém městě Warananagar. Navržený systém se skládal z mobilní jednotky (uzlu) a fixního serveru. Server byl představován osobním počítačem s aplikačním serverem a připojením k internetu. Přenášení paketů mezi uzlem a serverem bylo řešeno pomocí Zigbee přenosového formátu. Prostorové zobrazení bylo řešeno pomocí Google Maps. V budoucnu je plánováno využití databázového serveru. Data uložená v databázi budou veřejně přístupná.

V australském Melbourne a okolí bylo k predikci znečištění ovduší prašnými částicemi využito osmi senzorů provozovaných ochrannou agenturou (Environment Protection Authority Victoria, EPAV). Tato studie byla zaměřena především na zpracování dat o prašných částicích. S využitím simulačních dat bylo analyzováno, do jaké míry je odhad přesnosti hodnot PM<sub>10</sub> ovlivněn prostorovým rozlišením senzorů a přesností senzorů v daných lokalitách. Je sledována přesnost nízkonákladových senzorů. K odhadu predikcí prostorovočasových korelací dat byla použita metoda maximální entropie. Jejím cílem bylo zlepšit odhad přesnosti PM<sub>10</sub>. V budoucnu je plánováno využít vlastní bezdrátové sensorové sítě v tomto regionu a navrhnout ideální hustotu měřících míst (Rajasegarar a kol., 2014).



Moltchanov a kol. (2015) nasadil uzly CanarIT™ se senzory měřící hodnoty O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, TVOC, hluku, teploty a relativní vlhkosti vzduchu ve vysokém vzorkovacím intervalu v izraelské Haifě. Data jsou z uzlů posílána pomocí GPRS do *cloudového* úložiště. Šest uzlů bylo umístěno ve vzdálenosti 100 až 150 metrů od sebe, termín měření byl stanoven na červen, červenec a srpen 2013. Uzly byly umístěny poměrně vysoko nad zemským povrchem na balkónech nebo střeších budov. K vyhodnocení dat byla získána i měření směru a rychlosti větru. V rámci experimentu byla vyvinuta i kalibrační metoda, která umožňovala kalibrovat senzory v místě jejich lokalizace. Cílem studie bylo poukázat na to, že realizována měření jsou prováděna sice s vysokou přesností, ale postrádají dostatečnou hustotu naměřených hodnot.

Velký projekt zaměřený na sledování znečištění ovzduší byl spuštěn ve švýcarském Curychu a nese název OpenSense. OpenSense se zaměřuje na sledování znečištění ovzduší pomocí bezdrátové sensorové sítě. Projekt probíhá ve dvou fázích označených jako OpenSense (2010 – 2013) a OpenSense II (2014 - 2017). Zdejší síť se skládá z deseti mobilních měřících stanic, které jsou umístěny na curyšských tramvajích a jedné statické stanice umístěné na stanici národní monitorovací sítě znečištění ovzduší (NABEL) v Dübendorfu. Každá z měřících stanic je vybavena přijímačem GPS a senzory pro měření teploty vzduchu, O<sub>3</sub>, CO, NO<sub>2</sub> a pevných částic. Přenos dat je zajištěn pomocí GPRS/UMTS. Veškerá naměřená data jsou online dostupná ve webové aplikaci ("OpenSense," 2015). Výstupy z tohoto projektu jsou prezentovány v Hasenfratz a kol. (2015), který řeší urbánní mapu znečištění ovzduší s využitím bezdrátové sensorové sítě, dále jsou řešeny kalibrační chyby ve velkých mobilních sensorových sítích s využitím příkladu bezdrátové sensorové sítě v Zurichu sítě (Saukh a kol., 2015) a koncentrace prachových částic s vysokým časovo-prostorovým rozlišením Mueller a kol. (2016).

Trend využívající chytrých telefonů jako uzlů s integrovanými či připojenými senzory se vyvíjí od roku 2014. Dle Daponte (2014) je právě chytrý telefon možností k umístění všech komponent bezdrátové sensorové sítě do jednoho přístroje a má tudíž velký potenciál k rozvoji. Výhodou je i intuitivní práce s ovládacím rozhraním. Tato teorie má však i značné množství odpůrců, protože senzory připojitelné k telefonu nejsou zatím tak přesné, aby tato měření byla prováděna s maximální povolenou chybou. V reálu bylo tohoto konceptu využito ke sledování kvality ovzduší v kalifornském San Diegu. Přístroje s integrovanými senzory pro měření ozónu, NO<sub>2</sub> a CO byly pojmenovány CitiSense. Deset statických sensorů bylo rozmístěno po městě. K testování technologie měření a přenosu dat na chytrý telefon bylo využito 30 lidí, kteří po čtyři týdny nosili přístroje v každodenním životě. Aby si uživatelé mohli koncentrace jimi naměřených polutantů zobrazit v reálném čase, byla vyvinuta aplikace přímo na operační systém Android, která toto umožňovala. Data byla ze sensorů do chytrého telefonu přenášena pomocí bluetooth služby (Zappi, 2012).

Využití bezdrátových sensorových sítí pro sledování vzdušných polutantů se bude bezpochyby dále rozvíjet, protože přináší vysoký potenciál pro sledování

meteorologických i jiných prvků v reálném čase a s vysokou hustotou a jeví se tak jako vhodný doplněk staničních měření. Jak vyplývá z uvedených studií, tak bezdrátová senzorová síť nebyla nikdy situována v terénu po delší časové období, vždy byla pouze testována a není zřejmé, jak byly její komponenty využity po tomto krátkém časovém období.

V elektronické verzi příloh na DVD (senzorove\_site) je shrnuto místo a účel nasazení bezdrátové senzorové sítě, výrobce komponent, způsob přenosu a zpracování dat, topologie, statická nebo dynamická komponent a počet uzlů v terénu.

### **3.3.1 České nasazení bezdrátových senzorových sítí**

V českém prostředí dochází v monitoringu klimatu, jak bylo zmíněno v kapitole 3.1 Klima města, především pomocí staničních měření. V této podkapitole budou zmíněny konkrétní projekty, které využívají bezdrátového přenosu dat.

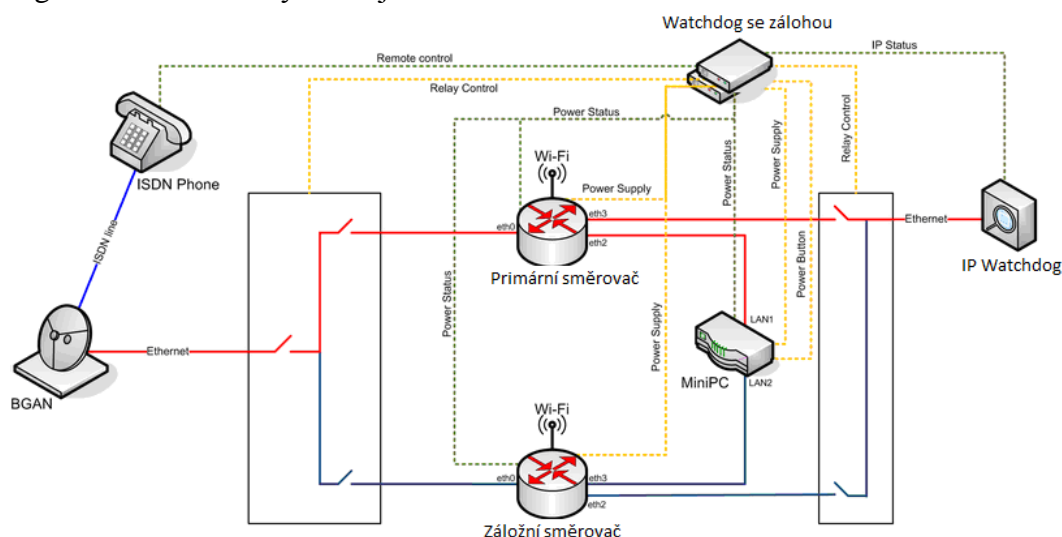
V letech 2009-2012 byl řešen projekt Víceúrovňová analýza městského a příměstského klimatu na příkladu středně velkých měst, který byl veden docentem Dobrovolným z Geografického ústavu Masarykovy Univerzity v Brně. Příkladem středně velkých měst v projektu byla města Brno a Olomouc. V rámci tohoto projektu byla sbírána meteorologická data v těchto městech pomocí senzorů nasazených v terénu a družicových snímků. V Olomouci a okolí bylo dle oficiálních metadat od roku března roku 2007 zprovozněno 16 stanic vybavených teplotními čidly. Již během projektu byl však běh osmi stanic ukončen (Městské klima, 2012). Kulczycki (2011) ve své práci zaměřené na zpracování srážkových dat specifikuje použitou měřicí technologii. K měření byly využity člunkové srážkoměry (SR02 a SR03) od společnosti Fiedler-Mágr, kromě srážek byly zaznamenávány teploty a relativní vlhkosti vzduchu, intenzita globálního záření, teplota půdy, směr a rychlost větru. Sensory byly napojeny na řídicí stanici M4016, která obsahuje datalogger, telemetrickou stanici a programovatelný řídicí automat. Další použitou řídicí jednotkou byla stanice Weather Lab Station, vyrobená firmou Fourier Systems, srážky snímal senzor Rain Collector AC013. V Brně bylo v rámci studia městského klimatu provozováno osm stanic, všechny odkazují na přenos dat na server přes systém ALA (Kozel, 2016).

Stanic M4016, tentokrát pro hydrologický monitoring, využívá Karlova Univerzita v Praze. Od roku 2006 je v oblasti řeky Vydry situováno 11 stanic monitorujících vodní stav a hydrochemické procesy probíhající ve vodním toku. Monitoring vodního stavu je prováděn v desetiminutovém intervalu a je založen na systému automatických měřicích zařízení od firmy Fiedler-Mágr. Sestava je složena z řídicí a registrační jednotky M4016 a ultrazvukového nebo tlakového snímače s připojením příslušného měřicího kanálu. Jednotka je doplněna o GSM modul pro telemetrický přenos dat sítí GPRS na webový server. Automatický přenos dat na server umožňuje operativní prohlížení, editaci a konfiguraci měřených hodnot i parametrů včetně operativního řešení nastalé extrémní hydrologické situace a kontroly funkčnosti celých měřicích sestav. Dále jsou v oblasti tři klimatické stanice, piezometry a automatický vzorkovač (Čurda a kol., 2011).

Stejný princip přenosu meteorologických dat byl využíván i Katedrou geoinformatiky v oblasti Vysokého Pole po celou dobu trvání výzkumné lokality v tomto místě. Výsledky a další měření prováděná ve Vysokém Poli jsou shrnuty v Hejlová (2012) nebo Jirásek (2013).

Využití tohoto typu stanic a telemetrického přenosu dat je poměrně běžné. Největším uživatelem těchto služeb je Český hydrometeorologický ústav. Automatizované meteorologické, klimatologické a srážkoměrné stanice jím provozované jsou založeny na stejném principu, kdy nasbíraná data mohou být pomocí telemetrie ve stanovených intervalech odesílána telekomunikačními cestami do centrálních databází, interních aplikací nebo mezinárodní výměny. Základní datová zpráva SYNOP, používaná pro přenos i mezinárodní výměnu informací v hodinových intervalech je doplněna přenosem základní datové sady v intervalu 15 minut. Operativní informace jsou ČHMÚ k dispozici ve standardních (SDNES, CLIDATA) i souborových databázích každých 15 minut (Lipina a Židek, 2003; Stříž, n.d.; Tolasz, 2009).

Bezdrátová sensorová síť byla zprovozněna českými vědci v Antarktidě, na poloostrově Jamese Rosse. Jedná se o síť, která operuje v extrémních podmínkách, ve kterých musí odolávat velmi nízkým teplotám a vysoké prašnosti. Celý systém je rozdělen do čtyř bloků. Prvním z nich je sekce BGAN, která se stará o připojení k internetu. Druhou sekcí je router, který je zodpovědný za komunikaci zařízení v rámci vybudované interní sítě polární stanice a za řízení přístupu do Internetu přes satelitní síť. Do této sítě jsou připojeny senzory a laptopy vědců pracujících na základně. Třetím blokem je MiniPC, které zajišťuje stahování naměřených dat ze sensorů a jejich následné odesílání do ČR. O správnou funkci bloků se stará WatchDog (Šafránek a kol., 2009). Komunikace v rámci interní sítě v sekci router probíhá na podkladě protokolu IEEE 802.11g. Schéma celého systému je na obrázku 17.



Obr. 17. Schéma bezdrátového systému na polární stanici v Antarktidě, zdroj: Šafránek a kol. (2009), upraveno

Vývojem na poli bezdrátových sensorových sítí se zabývají Vysoké učení technické v Brně a České vysoké učení technické v Praze. Vysoké učení technické v Brně, konkrétně Ústav telekomunikací, je nejvíce činnou institucí v oblasti bezdrátových sensorových sítí specializujících se na vybrané aplikace. Vědecko-výzkumná činnost ústavu zahrnuje diagnostiku telekomunikačních sítí, datové komunikace a číslicové zpracování signálů včetně studiové techniky. Výzkum je také prováděn v oblastech přenosu a zpracování signálů v telekomunikačních koncových zařízeních. Práce na tomto ústavu je prezentována v kvalifikačních pracích od Pekárek (2009), Mizera (2011), Záděra (2011), Beneš (2012), Leixner (2012), Podhorský (2012), Výborný (2012), Červenka (2014).

České vysoké učení technické v Praze, Katedra telekomunikační techniky, je zaměřena na vývoj v oblasti mobilních aplikací, ve kterém spolupracuje s předními partnery v oblasti informačních technologií jako je CISCO, IBM Research či Microsoft Research (Ripka, 2014). Z prací vedených na této univerzitě v posledních dvou letech lze jmenovat magisterskou práci soustředící se na vývoj bezdrátového sensorového systému od Štoud (2015).

Na precizní zemědělství je orientován projekt Foodie. Tento projekt si klade za cíl vybudovat otevřenou a interoperabilní internetovou platformu pro zemědělství. Jednou ze složek systému pro sběr dat je soustava senzorů zabudovaných v zemědělském stroji, které obsahují GPS přijímač nebo senzor snímající spotřebu paliva. Data jsou přenášena pomocí mobilní sítě do operačního střediska. Zároveň s tímto sledováním hodnoty je prováděn doplňující sensorový monitoring meteorologických prvků (Řezník a kol., 2015).

Jedno z prvních využití protokolu IEEE 802.15.4 určeného pro bezdrátovou sensorovou síť je popsáno v Hejlová (2014) a Hejlová (2015). Přestože uzly ke komunikaci využívají protokol pro bezdrátové sensorové sítě, tak nebylo využito plně funkčních zařízení, ale pouze hvězdicové topologie v obou studiích.

Město Písek je prvním českým městem, které bude vybaveno senzory. Přípravou projektu se zabývá Technologické centrum Písek. Cílem je vytvořit prostor, který bude podněcovat vznik a realizaci projektů zaměřených na rozvoj *Smart City*, poskytovat analýzy a data, projektově řídit realizaci projektů a kontrolovat soulad s vytyčenou strategií tak, aby došlo k naplnění stanovaných cílů a k požadovanému rozvoji města (Polanský, 2016). Již v červnu 2016 byla realizována úsporná energetická opatření v objektech města. V blízké budoucnosti má město v plánu vybudovat inteligentní parkovací místa, umístit dobíjecí stanice pro elektromobily a elektromotocykly, instalovat dynamické, ekonomické a flexibilní systémy veřejného osvětlení včetně snímačů, které pomohou s hledáním volných parkovacích míst. Dále bude následovat aktivace software spojujícího informace z vodovodů, topení, dopravních sítí a sledování kvality životního prostředí (iRegiony, 2016). Všechny tyto změny jsou podporovány veřejným, soukromým sektorem, akademickou sférou i občany města.

Ve městě Kolín byly společností O2 IT Technologies instalovány čipy do kontejnerů. Tyto kontejnery byly opratřeny nálepkou s QR kódem a jsou obcházeny pracovníky s cílem naskenování kódu a získání procenta zaplněnosti nádoby, podzemní koše jsou vybaveny senzory, které procento zaplněnosti přímo posílají do úložiště bez lidského zásahu (Černý, 2016). Správa odpadu je řešena také ve městě Valašské Meziříčí, kde byly nainstalovány senzory do zabudovaných popelnic, napojeny na úložiště, ke kterému je možné se připojit pomocí aplikace v mobilním telefonu, kde je ukázána zaplněnost vybraného objektu (Česká televize, 2016). Projekt *Smart* představila i další česká města - Praha, Brno, Pardubice nebo region Jižní Čechy (Polanský, n.d.).

Vzniklo sdružení *Czech Smart City Cluster*, které upevňuje rozvoj inteligentních měst v České republice. Skupina je složena ze zástupců z bussinesu, akademické sféry i odborné veřejnosti. Prvním dílčím cílem této skupiny je vybudovat infrastrukturu pro *Smart Lighting*. Prezidentem klastru je děkan ČVUT, profesor Miroslav Svítek (Polanský, 2016).

### **3.4 Kritéria výběru technických komponent bezdrátové sensorové sítě**

Výběr komponent hraje důležitou roli v celé fázi budování bezdrátové sensorové sítě, protože se jedná o zásadní rozhodnutí, na jehož základě budou sbírána meteorologická a chemická data v olomouckém prostředí. Před vlastním výběrem technických komponent je nezbytné provést následující úkoly:

- stanovit účel budování bezdrátové sensorové sítě,
- stanovit počet uzlů,
- vybrat oblast umístění uzlů,
- provést průzkum trhu s nabídkou základních komponent bezdrátových sensorových sítí,
- vyhodnotit komerčně nabízené základní komponenty, výrobce a porovnat jejich funkcionalitu,
- definovat ideální variantu pro vlastní nasazení.

Vhodně zvolená kritéria, na jejichž podkladě jsou hodnoceny možné varianty řešení problému, slouží jako podklad pro určení vhodné varianty s využitím metody vícekritériálního rozhodování, která je založena na vyhledání možných variant řešení problému ze zadané množiny možných řešení s ohledem na definovaná kritéria (Talašová, 2003).

Kritériem se při procesu rozhodování rozumí měřítko sloužící k porovnávání více variant představujících řešení problému. Ke každé variantě jsou doplňovány údaje odpovídající vybraným kritériím. Kritéria jsou volena tak, aby v co největší míře pokryla nejdůležitější parametry, které musí být při řešení úlohy zohledněny. Každé kritérium musí být ohodnoceno vahou dle důležitosti, kterou má v procesu rozhodování a je zapsáno pomocí reálného nezáporného čísla. Musí být formulováno, jestli se jedná

o kvalitativní, kvantitativní nebo rozhodovací požadavek (ano/ne). U kvantitativního kritéria musí být uvedeno, jestli se jedná o kritérium s rostoucí nebo klesající preferencí. K porovnání stávajících variant s ideální možností je třeba nadefinovat optimální parametry jednotlivých kritérií tak, aby mohly být ty reálné srovnávány s ideálními (Talašová, 2003).

Při výběru hardwarových komponent bezdrátových sensorových sítí hrají důležitou roli faktory jako velikost uzlu, náklady na jejich pořízení nebo spotřeba energie. Podle Karl a Willig (2007) by „v některých extrémních případech mohl být celý uzel menší než  $1 \text{ cm}^3$ , s váhou nižší než 100 g, levnější než 1 USD a spotřebou nižší než  $100 \mu\text{W}$ “. Sensorové desky/senzory musí splňovat požadavky na aplikaci bezdrátové sensorové sítě a měřit prvky a jevy, které vyhovují stanovené úloze. Na bránu jsou kladeny především požadavky týkající se její flexibility, velikosti paměti, schopnosti komunikace na velkou vzdálenost a využití ethernetu umožňující dálkový přístup.

### 3.5 Rozmístění uzlů ve 2D a 3D prostředí

Rozmístění uzlů bezdrátové sensorové sítě v terénu je podmíněno řadou faktorů, které návrh rozmístění uzlů ovlivňují (Emary a Ramakrishnan, 2013). Tyto faktory jsou shrnuty v kapitole 5.1 Faktory ovlivňující rozmístění uzlů ve venkovním prostředí. Terénní faktory bývají do zvažování polohy uzlů zahrnovány zřídka, protože o umístění uzlů ve venkovním prostředí doposud nebylo příliš často uvažováno a pokud bylo, tak uzly byly v prostoru rozmístěny nahodile (Lazos a Poovendran, 2006; Liu a kol., 2005).

První studie uvažovaly pouze dvoudimenzionální prostor, v němž jsou uzly umístěny (Hoffmann a kol., 1991; Shermer, 1992). Určení polohy uzlů v terénu může být provedeno několika způsoby, z nichž ty základní jsou shrnuty v Samanta a kol. (2013).

Nejčastěji je uvažováno rozmístění uzlů ve dvoudimenzionálním prostředí, a tak není zahrnuta výšková složka (třetí dimenze), která však neodmyslitelně patří k reliéfu. Bezdrátové uzly jsou ve studiích rozmisťovány buď náhodně, anebo studie nezmiňují klíč k jejich rozmístění (viz kapitola 3.3 Bezdrátové sensorové sítě pro sledování znečištění ovzduší). Protože je rozmístění uzlů bezdrátové sensorové sítě ovlivněno mnoha faktory, je často účinnější jejich náhodné rozmístění, jehož předpokladem je, že bude pokryta velká oblast v nepříliš dobře přístupném terénu, ale zároveň může docházet k výpadkům v komunikaci v praktických aplikacích, kdy je zadána oblast rozmístění uzlů i jejich počet (Wang, 2013). Přístup k rozmístění uzlů je podmíněn jejich mobilitou, protože uzly mohou být statické i dynamické (Zhang a Liu, 2012). Statické uzly jsou vázány delší dobu na svoji polohu a dynamické uzly se po určité době pohybují v terénu, což velmi ovlivňuje výslednou architekturu a topologii bezdrátové sensorové sítě. Guoqiang (2009) odděluje centralizovaný a distribuovaný přístup k lokalizaci uzlů. V centralizovaných algoritmech jsou ze všech uzlů data poslána na centrální uzel, kde jsou lokace nestěžejních uzlů dopočítány. V distribuovaném systému každý uzel získává svou polohu s využitím mezisensorových měření. Wang a kol. (2013) ke svému experimentu využívá

samoorganizační i deterministické uspořádání uzlů v terénu. Samoorganizační rozmístění se využívá při lokalizaci uzlů ve velkých těžko přístupných oblastech. Uzly si samy na základě síly signálu určí efektivní komunikační cestu. Naproti tomu deterministické uspořádání uzlů vychází z toho, že jsou uzly umístěny ve dvoudimenzionálním čtvercovém prostředí. V tomto prostředí se pro demonstraci umístění uzlů bezdrátové sensorové sítě nejčastěji uvažuje binární kruhový graf, který se soustředí na komunikační možnosti uzlu v jemu zkonstruovaném kruhu zpravidla představujícím komunikační vzdálenost. Nejsou uvažovány žádné překážky v komunikaci ani možnosti poklesu síly signálu, avšak Karimipour a kol. (2013) zvažuje fakt, že komunikační vzdálenost nemusí být pouze kruhová. Vysílací schopnost uzlu není binární, ale se zvětšující se vzdáleností od přijímače se zeslabuje. Tohoto konceptu využívají probabilistické modely (Zou a Chakrabarty, 2003). Sílu signálu vysílače uzlu na přijímači je možné identifikovat. Velmi často se využívají komunikační modely, jejichž cílem je snížit spotřebu energie v uzlech, protože samotná komunikace je velmi energeticky náročná. Využití těchto modelů může být problematické především ve venkovním prostředí, ve kterém mohou být komunikační cesty velmi snadno narušeny. Problematika rozmístění uzlů je velmi často řešena pomocí genetických algoritmů (Zhao a kol., 2004; Karimipour a kol., 2013). Deterministické rozmístění uzlů velké bezdrátové sensorové sítě bylo uvedeno v Poe a Schmitt (2009), kde se autoři zabývali i návrhem energeticky úsporného modelu.

Jak bylo již dříve zmíněno, vysoký potenciál pro distribuci uzlů v terénu přináší geografické informační systémy, které umožňují nejen vytvoření digitálního modelu terénu, ale také provádění následných analýz. Voronoi diagramy a Delaunay triangulace jsou metody nejčastěji používané k určení a optimalizaci v bezdrátových sensorových sítích Karimipour a kol. (2013). S úvahou zahrnutí terénních charakteristik do algoritmu se zabývá Bahramgiri a kol. (2002), jejichž algoritmus se zaměřuje na topologii bezdrátové sensorové sítě s důrazem na nízkou spotřebu baterie. Dhillon a Chakrabarty (2003) se soustředili na vývoj deterministických algoritmů pracujících s optimálním počtem uzlů v oblasti. Algoritmy jsou zaměřeny na průměrné pokrytí oblasti s tím, že v oblastech s komplikovaným terénem se počítá s vyšší hustotou uzlů. Všechny výpočty jsou uskutečňovány v gridu a nejsou vhodné k použití v komplikovanějších terénech. Na nezbytnost zaměřit vývoj směrem k třetí dimenzi upozornil Ortiz a kol. (2007), který se ve své studii soustředí na chování bezdrátových sensorových sítí ve venkovním prostředí, možnosti propojení uzlů a spotřebu energie v jednotlivých uzlech. Vše bylo otestováno pomocí simulací v navržených scénářích respektujících výše zmíněné faktory ovlivňující funkčnost a efektivitu bezdrátové sensorové sítě. Guo a kol. (2011) v rámci návrhu deterministické rozmísťovací metody uvažuje o tom, že ideální počet uzlů v terénu může být identifikován při návrhu jejich rovnoměrného rozmístění v oblasti zájmu. Deterministické metody jsou jedny z nejpoužívanějších a zaměřují se na minimální pokrytí oblasti uzly tak, aby mohlo dojít k dostatečné konektivě v ní. Tyto metody se spoléhají na základní environmentální a snímací modely (Nguyen a kol., 2015). Babae

a kol. (2011) prezentuje model, který pracuje s reálným prostředím zaměřujícím se na reálné překážky a přenos signálu jimi ovlivněný. Navržený model byl otestován pomocí simulací (simulátor GLOMOSIM) s padesáti uzly na simulovaném reálném terénu o velikosti čtverce s hranou o délce jeden kilometr, komunikační vzdálenosti 250 metrů. Komunikace probíhala pomocí Wi-Fi standardu a je uvažováno o tom, že uzly budou statické i dynamické. K hodnocení modelu byly použity parametry jako hustota uzlů, poměr přijatých paketů a průměrné zpoždění doručení paketu z prvního na poslední uzel (*end to end delay*). Výsledky simulací ukázaly, že hodnotící metriky jsou velmi ovlivněny překážkami v cestě, a tak je návrh topologie ve 3D prostředí velmi obtížný. Argany a kol. (2011) pracuje s Voronoi diagramy, Delaunay triangulací a digitálními modely reliéfu. K hodnocení navrženého přístupu byly využívány analýzy viditelnosti. Celý algoritmus byl vyzkoušen na simulaci rozmístění deseti uzlů v městském i mimoměstském prostředí. Roy a Mukherjee (2012) využívají při návrhu rámce pro dynamický návrh topologie Voronoi diagramy. Při návrhu optimálního propojení uzlů v bezdrátové sensorové síti je nadefinován účel aplikace a oblast umístění uzlů. Jin a kol. (2012) studovali, jak ideálně by mělo být pokryto území uzly bezdrátové sensorové sítě v reálném prostředí s ohledem na aplikaci. Byla navržena funkce k měření nespolehlivosti přenosu dat v bezdrátové sensorové síti zahrnující schopnost uzlů určit vzdálenost od ostatních uzlů v síti. K jejímu definování bylo využito digitálních modelů terénu i Voronoi diagramů. Algoritmus využívá konformní mapování a vážený faktor pro převod z 3D reality do roviny, kde pomocí Voronoi diagramů navrhne ideální rozmístění uzlů v terénu a poté vše opět převede do reality. Cílem dalších studií je, aby byly do výpočtu zahrnuty velké propady v terénu. Ammari (2013) ve své knize navrhuje matematický model distribuce uzlů ve 3D prostředí a soustředí na shrnutí pozitivních i negativních dopadů distribuce uzlů ve venkovním prostředí. Mu-Sheng Lin a kol. (2013) hodnotil přenos dat pomocí protokolu IEEE 802.15.4 v místech s pěti vybranými typy umělých povrchů. K ověření průchodnosti komunikace bylo využíváno analýzy dohlednosti, pomocí které je možné určit, jestli uzel umístěný v dané pozici je z pohledu viditelnosti schopen komunikovat s určeným uzlem. Klastrově založená architektura pro lokalizaci uzlů bez definované vzdálenosti komunikace byla navržena v Manisekaran a kol. (2014). Hlavy klastru jsou navrženy na podkladě parametrů jako kvalita komunikačního spojení, reziduální energie a pokrytí oblasti zájmu. Událostně založená lokalizace uzlů je aplikována na každý klustr, který zahrnuje přímou linii hledání dalších klastrů. Proces hledání napomáhá v odhadu pozice cílových uzlů s ohledem na pozici těch výchozích. V případě, že v klastru není situován žádný uzel, je pomocí lokalizačního algoritmu přehodnocena jeho pozice. Navržený algoritmus byl otestován pomocí simulátoru a výsledky ukazují, že snižuje latentnost, přehušťení a zvyšuje přesnost lokalizace uzlů. Li a kol. (2014) se zabýval topologií v bezdrátové sensorové síti i s ohledem na překážky v komunikační cestě. Bylo uvažováno s tím, že překážky mohou být umístěny staticky i dynamicky. Feng a kol. (2014) navrhl model pro rozmístění uzlů ve 3D prostředí. Princip rozmístění spočíval v transformaci 3D povrchu do roviny, k přesnější simulaci byly využity i hranice povodí a poté byla hledána optimální



komunikační cesta mezi senzory, k čemuž byl využit algoritmus nejkratší cesty. Chaurasiya a kol. (2014) navrhuje algoritmus pro odvození vzdáleností všech uzlů v síti od sebe navzájem. Autoři vidí hlavní přínos v definici matice rozdílnosti, jež tyto vzdálenosti určuje. Vícedimenzionální škálovací algoritmus (Multidimensional Scaling, MSD) je použit k určení souřadnic uzlů v lokálním souřadnicovém systému a Helmerova transformace napomáhá k transformaci do globálního systému. Stojkoska (2014) navrhla algoritmus pro lokalizaci uzlů, který využívá indikátoru síly signálu k odhadu vzdálenosti mezi uzly. K výpočtu nejkratší vzdálenosti mezi uzly byl použit Dijkstraův a heuristický algoritmus. Jejich simulace byla provedena se 100 uzly, a tak mohlo být konstatováno, že druhý zmíněný přístup je přesnější. Dále byly v MATLABu simulovány další dva algoritmy vylepšený vícedimenzionální škálovací algoritmus (Improved Multidimensional Scaling, IMDS) a MDS-MAP u náhodně rozmístěných uzlů ve 3D terénu při vybraných scénářích. IMDS vykazuje nejlepší výsledky při scénářích orientovaných na rozmístění uzlů v terénu. Miao a kol. (2015) se soustředí na rozmístění dynamických uzlů ve 3D prostředí a navrhuje 3DSD algoritmus, který vychází z předpokladů, že uzly jsou mobilní, znají sílu signálu okolních uzlů, směr vysílání, umí zjistit překážky ve vysílání a pohyb uzlu není blokován jiným. Jako první je určena hustota uzlů, následuje určení cílové lokalizace a výběr klastrovací metody. Nguyen a kol. (2015) navrhl 3D model pro umístění uzlů ve 3D prostředí. Tento model při analýzách dosáhl lepších výsledků, než modely prezentované v ostatních studiích. Model bere v potaz vzdálenost mezi uzly, úhly, ve kterých se uzly nacházejí, omezení terénu, počet uzlů v oblasti pokrytí a v neposlední řadě generuje linii dohledu (Line of Sight, LoS) mezi uzly. Právě linie dohledu je metoda, která byla v rámci této studie vylepšena, protože automaticky generuje počet překážek nacházejících se v komunikační linii. Dále byl navržen algoritmus, ve kterém uzly aktualizují svou rychlost s využitím informací od sousedních uzlů.

Výše zmíněné algoritmy nezahrnují jasně popsany rozhodovací proces, do kterého by uživatel mohl zasáhnout a který by jej naváděl ve fázi rozhodování umístění uzlu. Toto vše respektují algoritmy navržené v rámci této práce viz kapitola 5.2. Vlastní algoritmy pro rozmístění uzlů. Algoritmy jsou založeny na definici faktorů, které ovlivňují umístění uzlů v terénu a vycházejí nejen z odborné literatury ale i ze zkušeností, které byly při umísťování uzlů v terénu získány. Podkladem pro rozhodovací proces jsou pravidla, která využívají dvou typů grafů, jež byly vyvinuty pro bezdrátové sensorové sítě.

### **3.5.1 Propojení uzlů ve venkovním prostředí**

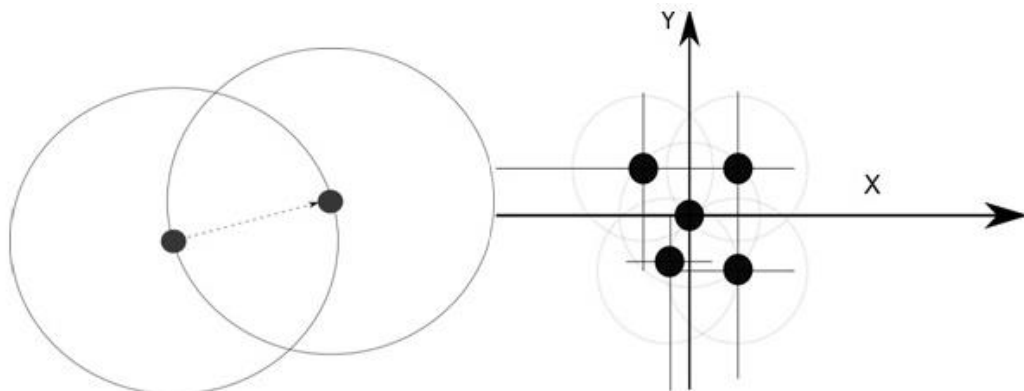
Propojení uzlů je efektivně řešeno pomocí teorie grafů. Graf je matematická struktura představující vztahy mezi objekty. Uzly grafu reprezentují bezdrátové uzly a hrany grafu jsou komunikační cesty mezi uzly (Sausen a kol., 2008). V bezdrátových sensorových sítích jsou nejčastěji používány tyto grafy:

- Jednotkový graf (Unit Disk Graph, UDG),
- Minimum Spanning Tree (MST), Localized Spanning Tree (LST),
- Gabrielův graf (GG),
- Yao graf (YG),
- Graf relativního sousedství (Relative Neighborhood Graph, RNG),
- Delaunay triangulace a Voronoiovy polygony (Stojmenović, 2005).

Jednotkový graf a Yao graf jsou grafy, které mohou být efektivně použity v distribučním procesu. Každý z těchto grafů je konstruován na podkladě odlišných podmínek, které budou dále rozebrány (obr. 18).

Konstrukce Jednotkového grafu je založena definicí výchozího bodu, kolem kterého je vytvořen buffer, který určuje maximální komunikační vzdálenost tohoto výchozího uzlu. Tato vzdálenost může představovat i průměrný počet sousedů definovaných pro komunikaci s jedním uzlem. Pokud je od počátečního uzlu hledána pozice pro nový uzel, se kterým ten počáteční bude komunikovat, tak hodnota poloměru bufferu odpovídá maximální spolehlivé komunikační vzdálenosti v regionu zájmu. V tomto bufferu se musí nalézat alespoň jeden další uzel, který bude komunikačním sousedem pro ten počáteční. Další buffer s poloměrem maximální spolehlivé komunikační vzdálenosti je vytvořen kolem druhého uzlu a v tomto bufferu se opět musí nacházet pozice jeho komunikačního souseda. Celý proces distribuce uzlů je opakován, dokud uzly nejsou vyčerpány. Konstrukce tohoto grafu je determinována známou pozicí počátečního uzlu a známou maximální spolehlivou komunikační vzdáleností (Stojmenović, 2005).

Yao graf je orientovaný, a tak je náročnější na konstrukci. Vždy je prvně deklarován počáteční bod, od kterého začíná komunikace a kolem něj je definován buffer, který určuje maximální komunikační vzdálenost. V Yao grafu je oproti Jednotkovému grafu definováno i směrové dělení, které určuje počet segmentů kolem hlavního uzlu. V každém tomto uzlu v dosahu maximální spolehlivé komunikační vzdálenosti musí být umístěn alespoň jeden komunikační soused počátečního uzlu. Rozrůstání sítě probíhá v jednotlivých směrech analogickým způsobem (Scheideler, 2007).



Obr. 18. Konstrukce UDG (vlevo) a Yao grafu (vpravo), zdroj: Stojmenović (2005), upraveno

### **3.5.2 Výběr mapového podkladu pro zobrazení uzlů**

Vizualizace uzlů v terénu je doposud nepříliš probádanou problematikou, není jednoznačně definováno, jak uzly v terénu zobrazit. Jednou z možností, jak získat názory více lidí společně s přidanou hodnotou postupu řešení tohoto problému je využití technologie eye-tracking.

#### *3.5.2.1 Eye-tracking*

Eye-tracking je technologie založená na sledování pohybu lidského oka, zatímco si prohlíží obrazový vjem. Ooms a kol. (2014) popisuje eye-tracking jako direktivní metodu ke studiu uživatelského kognitivního procesu. Měřicí přístroj, který je využíván ke sledování pohybu očí, se označuje jako eye-tracker. Většina moderních přístrojů měří pozici oka a směr pohledu s využitím dálkových metod. Dálkové metody spočívají v měření zornicového a rohovkového odrazu blízko a přímo situovaných zdrojů vyzařovaných infračervenými zdroji. Odražené světlo je zaznamenáno vysokorychlostní video kamerou. Informace je analyzována, dále jsou extrahovány rotace oka od změn v odrazu.

Hodnocení využitelnosti vizuálních reprezentací upoutalo pozornost současných kartografů i analytických vědců (Coltekin, 2009; Fabrikant a kol., 2008). Hodnocení využití dovoluje získání kvantitativních dat pojednávajících o zobrazení systému (geovizualizaci), která může být využita pro identifikaci aspektů, které jsou pro uživatele problematické. Tyto metody mohou být také využity pro srovnání účelu, porovnání dvou alternativních návrhů, k výběru vhodnější varianty k použití, definování výhod a nevýhod (Fuhrmann a kol., 2005).

S poklesem ceny je tato technologie stále častěji využívána v kartografických studiích (Coltekin a kol., 2014; Popelka a kol., 2013; Štěrba a kol., 2014). Výhodou je, že k dotazníku, který by mohl být podán jakoukoli formou, je přidána informace o strategii, kterou respondent úkol řešil.

### **3.6 Technické parametry uzlů a senzorů**

Tato kapitola se zaměřuje na definice technických parametrů uzlů, mezi které je zahrnuta výdrž baterie uzlu, síla signálu a úspěšnost doručení paketů. Kapitola je doplněna o kalibraci senzorů a interval záznamu dat.

#### **3.6.1 Výdrž baterie uzlu**

Výdrž baterie uzlu je ovlivněna mnoha faktory, které musí být brány v potaz, aby životnost bezdrátové sensorové sítě byla co nejvyšší. O výdrži baterie pojednávají následující kapitoly 5.1.2 Technické faktory, 6.1.5.2 Výdrž baterie uzlu při reálném nasazení.

### 3.6.2 Síla signálu

Síla signálu je veličina, která odkazuje na hodnotu síly signálu paketu vysílacího uzlu. Paket je obdržen uzlem, který jej přijímá, a ten zaznamená sílu signálu při přijetí paketu (Heurtefeux a Valois, 2012). Hodnoty síly signálu bývají měřeny v miliwattech (mW), decibelech (dBm, db), síle obdrženého signálu (RSSI) nebo procentech (%). Pokud jsou hodnoty síly signálu obdrženy v dBm, tak se pohybují v záporných číslech od 0 dBm do -120 dBm. Čím blíže jsou tyto hodnoty nule, tím je vyšší kvalita signálu přijímaného paketu. Se snižující se zápornou hodnotou se snižuje i úspěšnost přenesených dat. Tato měření síly signálu jsou v logaritmickém měřítku (Bardwell, 2002, "Range of RSSI Value," 2009). Ideální hodnota RSSI pro spolehlivý přenos paketů je pro uzly Waspnote Plug&Sense -37 dBm (Libelium Networking, 2016). Hodnota síly signálu je závislá na komunikační technologii, vzdálenosti přístrojů, překážkách v komunikační cestě, jejich struktuře a četnosti rušení signálu okolními vlivy (Wu a kol., 2016). Hodnoty síly signálu jsou mimo jiné využívány k určení polohy komunikačních přístrojů (Deak a kol., 2012). Hodnoty síly signálu pro olomouckou síť jsou zjišťovány v kapitole 6.1.5.3 Testování hodnot síly signálu při reálném nasazení.

### 3.6.3 Úspěšnost přenosu dat

Úspěšnost přenosu dat udává poměr přenesených paketů a paketů, které mají být v definovaném časovém intervalu přeneseny. Úspěšnost přenosu dat je klíčová pro funkčnost bezdrátové sensorové sítě (Emary and Ramakrishnan, 2013) a musí být ověřena na počátku její instalace. O úspěšnosti přenosu dat v olomoucké síti pojednává kapitola 6.1.5.4 Úspěšnost přenosu dat při reálném nasazení.

### 3.6.4 Kalibrace senzorů

Kalibrace senzorů je klíčová, ať již z hlediska ověření přesnosti získaných dat, nebo z pohledu zvýšení jejich přesnosti. Intervaly kalibrace závisí na použitém senzoru, veličině, která je měřena, převáděcím mechanismu, provozních podmínkách atd. Vliv na chyby v měření má měřicí systém jako celek a ne pouze senzor (Záboj, 2009). Cable (2005) se zmiňuje o tom, že interval kalibrace závisí na doporučeních výrobce, standardech doporučených pro měření, zkušenostech provozovatele a ohlasech získaných od lidí pracujících se stejnými produkty. Obecně je definováno, že analogové měřiče vyžadují kalibraci jednou ročně a elektromagnetické přístroje ji vyžadují dvakrát do roka. Pokud je třeba mít velmi přesná měření, kontrola měření se musí provádět každý den. Příkladem tohoto velmi častého ověřování naměřených hodnot je monitoring vzdušných polutantů ve městě Cambrige, kde monitoring provádí Katedra chemie. Na Univerzitě v Cambridge byl zvolen denní interval kalibrace chemických senzorů. Ve specializované laboratoři je v průběhu noci testováno, jestli chemické senzory umístěné na střeše budovy katedry zaznamenávají korektní hodnoty oxidu dusičitého a oxidu uhličitého (Esposito a kol., 2016). Uzly s napojenými senzory a kalibrační přístroj jsou ukázány na obrázku 19.



Obr. 19. Uzel se základní deskou (uvnitř obalu) a senzory (vyčnívající na levé straně z krytu) (vlevo), kalibrační stanice (vpravo), zdroj: vlastní fotografie

Pokud nejsou chemické senzory delší dobu nakalibrované, je vhodné sledovat hodnoty napětí ve Voltech. Tyto hodnoty se mění se změnou koncentrace chemického prvku. Čím vyšší hodnota napětí je zaznamenána, tím nižší koncentrace polutantu se nachází v ovzduší (Libelium, 2015). V příspěvku “How to get voltage to ppm?” (2016) je popsáno, jak pracovat s hodnotami napětí senzoru CO<sub>2</sub>, aby mohly být publikovány. Dokument apelující na kalibrační proces uvádí, že s ohledem na konstrukce senzorů je možné vypočítat odpor senzoru (“Gases sensor calibration process consideration?” 2016). Odpor senzoru ( $R_s$ ) se vypočítá dle následujícího vzorce uvedeného v “Gases sensor calibration process consideration?” (2016):

$$R_s = (V_c * R_1) / V_{out} - R_1$$

kde:

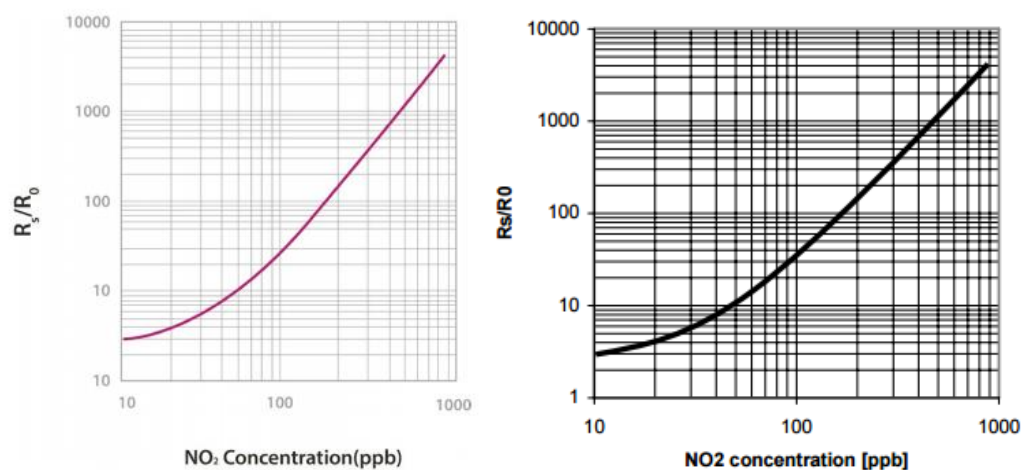
$V_c$  je napětí senzoru [V] (1,8 V pro NO<sub>2</sub> senzor, 2,5 V pro VOC senzor a 5 V pro CO<sub>2</sub> senzor),

$V_{out}$  je napětí naměřené senzorem [V],

$R_1$  je zatěžující odpor [k $\Omega$ ].

Odpor senzoru ( $R_s$ ) je vyjádřen pomocí napětí senzoru, které se u jednotlivých senzorů může lišit v závislosti na tom, na jakém portu je senzor připojen. Dále se započítává napětí, které senzor zaznamenal a zatěžující odpor, jehož maximální a minimální hodnota je výrobcem doporučena. Odpor senzoru se mění v závislosti na koncentraci vybraného polutantu. Pokud bude odpor senzoru vypočítán pro senzor snímající hodnoty oxidu dusičitého (Senzor NO<sub>2</sub> (MiCS-2714)), tak bude nutné vyhledat zatěžující odpor senzoru, který se v případě NO<sub>2</sub> pohybuje od 20 k $\Omega$  do 100 k $\Omega$ . Pomocí poměru odporu senzoru a odporu při známé koncentraci plynu v čistém vzduchu je

možné dohledat koncentraci vybraného polutantu. Tato závislost je vyjádřena logaritmicky a pro použitý senzor oxidu dusičitého je ilustrována na obrázku obrázku 20 (Libelium, 2016a). Z obrázku je patrné, že hodnoty zobrazené ose y se opakují a je uvedena i chybná jednotka měření NO<sub>2</sub> (nejedná se o ppb ale o ppm), a tak vyvstává otázka, do jaké míry je tato závislost použitelná pro určení koncentrace polutantu. Pro porovnání je na obrázku 20 ukázána stejná závislost převzatá z oficiálního datového listu použitého senzoru (e2v, 2006).



Obr. 20. Závislost podílu odporů na koncentraci NO<sub>2</sub> u senzoru – převzatá ze stránek společnosti Libelium (Libelium, 2016a) (vlevo) a převzatá z oficiálních stránek výrobce (vpravo) (e2v, 2006)

Dle údajů k uzlům značky Libelium (Gascón, 2016) je uvedeno, že normální koncentrace NO<sub>2</sub> je 10 ppm, této koncentraci odpovídá hodnota odporu senzoru 45,25 kΩ. Této závislosti je možné využít pro hodnoty získané vlastním měřením v Olomouci, důležitá je znalost, která poukazuje na fakt, že pokud je hodnota  $R_s$  nižší než 45,5 kΩ, tak koncentrace NO<sub>2</sub> rostou. Pokud je hodnota  $R_s$  vyšší než 45,5 kΩ, tak jsou hodnoty koncentrace polutantu velmi nízké.

### 3.6.5 Interval záznamu dat

Komponenty bezdrátové senzorové sítě jsou schopny zaznamenávat data v reálném čase a okamžitě je předávat pozorovateli. Záznam dat v reálném čase v takových zařízeních je náročný na energii měřicí jednotky a na paměť úložiště, přesto je této možnosti bezdrátových senzorových sítí hojně využíváno. Příkladem tohoto využití je krizové řízení, kdy by měl být zvolen co nejpodrobnější interval záznamu dat, případně by mělo být umožněno zvýšit interval záznamu v případě zaznamenání neobvyklé hodnoty (Emary a Ramakrishnan, 2013).

Interval záznamu dat se v jednotlivých studiích zabývajících se získáváním meteorologických dat liší v závislosti na sledovaném prvku a účelu pořizování dat. Rozmezí pořizování dat se nejčastěji pohybuje od 30 sekund do půl hodiny. Příkladem záznamu dat v různém intervalu jsou následující studie z českého prostředí. Český hydrometeorologický ústav stanovil interval vyhodnocení a zpracování automatických

meteorologických dat na deset minut (Český hydrometeorologický ústav, 2014). Data jsou zaznamenávána častěji, aby mohly být vyloučeny a nahrazeny případné chyby v měření. V Olomouci byly letech 2009-2012 ke studiu topoklimatu v rámci projektu využívány vlastní meteorologické stanice, které zaznamenávaly data právě z tohoto důvodu v půlminutovém intervalu (Vysoudil, 2007). V olomouckém prostředí provozuje od roku 2015 meteorologickou stanici i pan Robert Šišma, který zaznamenává data v intervalu jedné minuty, ale zpracovává je pro rozmezí půl hodiny (Šišma, 2016). Nejvyšší půlhodinový interval záznamu dat byl zvolen na stanici Rudolfovo, kde pozorování začala v roce 2013 (Matějka, 2014).

### **3.7 Monitoring v Olomouci**

K ověření dat získaných bezdrátovou senzorovou sítí bylo sumarizováno, kde jsou tato data v Olomouci již získávána. Pro sledování znečištění ovzduší je klíčové doplnit místa a typy sledování, lokalitami, kde se největší znečišťovatelé nachází.

#### **3.7.1 Měření meteorologických prvků**

V Olomouci se nachází jedna automatická klimatologická stanice 1. typu a jedna manuální srážkoměrná stanice spadající pod ČHMÚ (“Meteorologické stanice ČHMÚ,” 2016). Prvně jmenovaná se nachází v části Holice a zaměřuje se na sledování teploty vzduchu, relativní vlhkosti vzduchu, přízemní teploty, slunečního svitu, srážek, směru a rychlosti větru. Data z této stanice jsou posílána pomocí mobilní sítě v desetiminutovém intervalu do centrálního úložiště (“Grafy automatických stanic,” 2017; Řepka a kol., 2010). Srážkoměrná stanice se nachází v oblasti Klášterního Hradiska a o manuální pozorování se od roku 1973 stará pan Milan Hanousek (Řepka a kol., 2010).

Pozorovatelem základních meteorologických prvků v Olomouci je i pan Robert Šišma, který provozuje poloprofesionální meteorologickou stanici Davis Vantage PRO 2. Data jsou dostupná na stránce infopocasi-olomouc.cz (Šišma, 2016). Pozorování jsou zaměřena na sledování teploty vzduchu, relativní vlhkosti vzduchu, rosného bodu, tlaku, srážek, směru a rychlosti větru.

Data naměřená stanicí provozovanou Katedrou geoinformatiky mohou být také za staniční. Stanice je situována ve druhém klastru a jsou na ni umístěny čtyři senzory. První dva senzory jsou určeny pro měření půdní vlhkosti, další pro měření srážek a poslední je kombinovaný senzor měřící teplotu a relativní vlhkost vzduchu. Tyto senzory jsou připojeny k dataloggeru EasyLogGSM.

Monitoring základních meteorologických prvků byl v Olomouci ve velké míře prováděn v rámci projektu „Víceúrovňová analýza městského a příměstského klimatu na příkladu středně velkých měst“ v letech 2009 až 2012 (Kozel, 2016).

### 3.7.2 Měření NO<sub>2</sub> a VOC

Ve městě Olomouc se nachází dvě stanice zjišťující koncentrace polutantů v ovzduší dle ČHMÚ (ČHMÚ, 2017a) ke dni 28. 2. 2017. Dle webové stránky města Olomouc a imisního monitoringu je činná ještě třetí stanice na ulici Velkomoravská.

První ze stanic (MOLJA) se nachází v části Hejčín a je ve vlastnictví ČHMÚ. Jedná se o pozadřovou stanici v městské obytné zóně umístěnou v mírně zvlněném terénu hřiště Gymnázia. Z měřících programů tato stanice pokryje automatizovaný měřící program, měření pasivními dosimetry a aktivními samplery, měření PAHs a měření těžkých kovů. Z funkčních měření ke dni 28. 2. 2017 lze uvést NO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub> a PM<sub>2,5</sub> (ČHMÚ, 2017b).

Druhá stanice (MOLSA) se nachází v areálu vysokoškolských kolejí v centru města na ulici Šmeralova a je provozovaná Zdravotním ústavem v Ostravě. Jedná se o pozadřovou městskou stanici v obytné zóně. Z měřících programů je zde dostupný automatický měřící program, měření PAHs a měření těžkých kovů. Na této stanici se ke dni 28. 2. 2017 ze znečišťovatelů měří PM<sub>10</sub> a PM<sub>2,5</sub> (ČHMÚ, 2017c).

Třetí stanice je umístěna na ulici Velkomoravská, tuto stanici provozuje Statutární město Olomouc, odbor ŽP Magistrátu města Olomouc. Provozovatelem stanice je ENVITech Bohemia. Mezi měřené veličiny na této stanici patří CO, NO<sub>2</sub> a PM<sub>10</sub>. (“Imisní monitoring,” 2010).

Jediná veličina, která je měřena v rámci stanic i bezdrátovou senzorovou sítí, je oxid dusičitý. Tabulka 1 uvádí hodnoty indexu kvality ovzduší uváděné ČHMÚ (ČHMÚ, 2017a).

Tab. 1. Index kvality ovzduší s ohledem na jeho koncentrace uváděný ČHMÚ, zdroj: ČHMÚ, 2017a

Index	Kvalita ovzduší	SO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>	CO	O <sub>3</sub>	PM <sub>10</sub>
		1h µg/m <sup>3</sup>	1h µg/m <sup>3</sup>	8h µg/m <sup>3</sup>	1h µg/m <sup>3</sup>	1h µg/m <sup>3</sup>
1	velmi dobrá	0 - 25	0 - 25	0 - 1000	0 - 33	0 - 20
2	dobrá	> 25 - 50	> 25 - 50	> 1000 - 2000	> 33 - 65	> 20 - 40
3	uspokojivá	> 50 - 120	> 50 - 100	> 2000 - 4000	> 65 - 120	> 40 - 70
4	vyhovující	> 120 - 350	> 100 - 200	> 4000 - 10000	> 120 - 180	> 70 - 90
5	špatná	> 350 - 500	> 200 - 400	> 10000 - 30000	> 180 - 240	> 90 - 180

Pro město Olomouc vznikla mapa kvality ovzduší dostupná na adrese<sup>5</sup>. Modelováno je rozložení polutantů měřených na výše uvedených stanicích, a tak jediným zájmových polutantem zůstávají oxidy dusíku (oxid dusičitý). Pokud jsou zobrazena data za vybraných šest let, tak v posledních dvou letech nedošlo k výrazným změnám v rozložení oxidů dusíku ve městě. Oxidy dusíku se koncentrují kolem frekventovaných cest a průmyslových zdrojů.

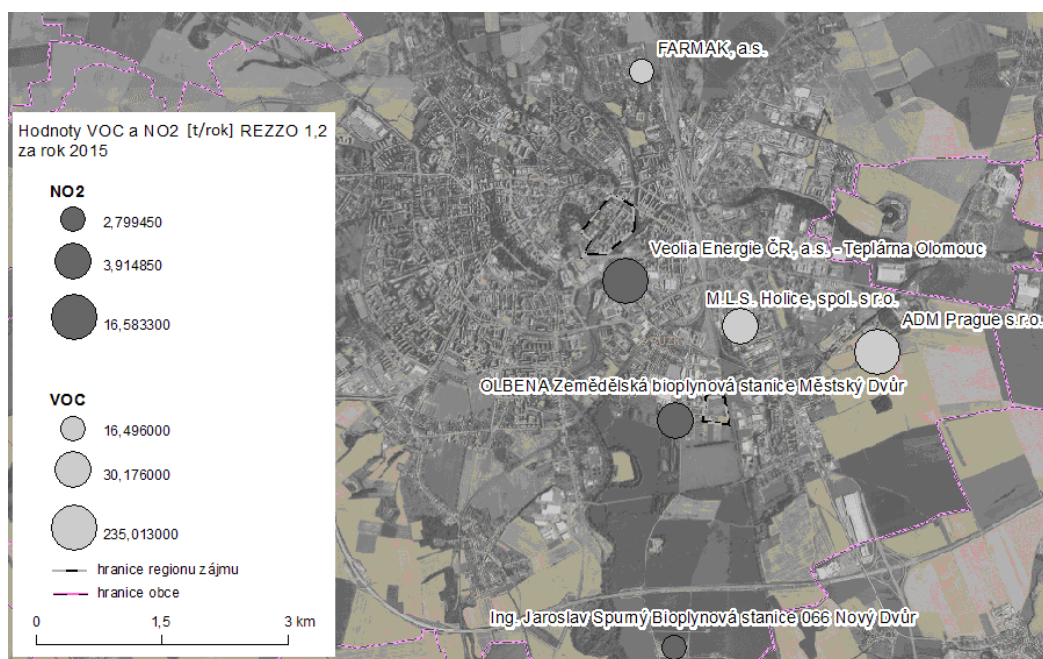
### 3.7.3 Zdroje znečištění NO<sub>2</sub> a VOC v Olomouci

Zdroje znečištění byly poskytnuty z REZZO 1 a 2 pro obce Olomouc, Kožušany-Tážaly, Velká Bystřice, Grygov, Velký Týnec a Bystrovany. Hodnoty polutantů byly

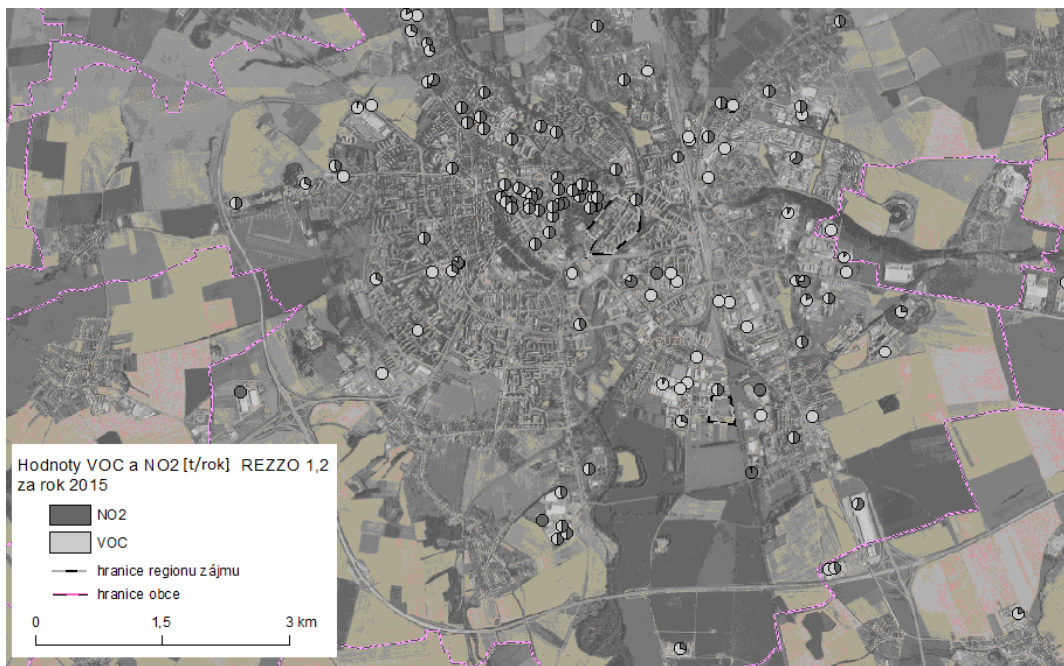
<sup>5</sup> <http://www.olomouc.eu/obcan/bezpecnost/monitoring-ovzdusi/mapa-kvality-ovzdusi>



získány pro rok 2015 a jsou uvedeny v tunách za rok. U stacionárních zdrojů znečištění nacházejících v těchto obcích byly sledovány polutanty  $\text{NO}_2$  a VOC. Největším znečišťovatelem vypouštějícím do ovzduší oxid dusičitý je Teplárna v Olomouci (16,58 t/rok), druhým nejvýznamnějším znečišťovatelem je OLBENA Bioplynová stanice Nový Dvůr (3,91 t/rok), za kterou následuje Ing. Jaroslav Spurný Bioplynová stanice Nový Dvůr (2,79 t/rok). Všechny tyto podniky se nachází na území města Olomouc. Dalších 106 podniků vypouští oxid dusičitý v podstatně nižších hodnotách pohybujících se od 0,00015 do 0,827 t/rok. Nejvíce velmi těžkých organických látek je vypouštěno společností ADM Prague (235,013 t/rok), následuje M.L.S Holice (30,176 t/rok) a FARMAK a.s. (16,496 t/rok). I tyto podniky se nacházejí na území města Olomouc. Dalších 125 podniků vypouští velmi těžké organické látky. Rozložení těchto největších znečišťovatelů je ilustrováno na obrázku 21. Obrázek 22 ukazuje rozložení všech stacionárních zdrojů z Olomouce a okolí, které jsou vedeny v REZZO 1 nebo 2 za rok 2015. Tyto zdroje byly vyobrazeny, aby byla získána představa o rozložení stacionárních zdrojů znečištění v Olomouci chemickými látkami, které byly v rámci práce měřeny.



Obr. 21. Rozložení tří největších produktovatelů  $\text{NO}_2$  a VOC v Olomouci a okolí, zdroj: vlastní zpracování data od ČHMÚ, Úsek ochrany čistoty ovzduší a podklad ČÚZK



Obr. 22. Rozložení produktoatelů NO<sub>2</sub> a VOC v Olomouci a okolí, zdroj: vlastní zpracování data od ČHMÚ, Úsek ochrany čistoty ovzduší a podklad ČÚZK

## 4. DC1 - VÝBĚR KOMPONENT BEZDRÁTOVÉ SENZOROVÉ SÍTĚ

V rámci kapitoly budou nejprve stanovena kritéria pro výběr uzlů, následována kritérii pro sensorové desky/senzory a bránu. Dále byly stanoveny požadavky na olomouckou bezdrátovou sensorovou síť, prohledání producenti a provedena analýza. Na konci kapitoly jsou popsány vybrané komponenty.

### 4.1 Kritéria pro výběr uzlů bezdrátové sensorové sítě

Nejvíce požadavků je kladeno na uzly bezdrátové sensorové sítě tvořící její základní stavební jednotky (Murthy a Manoj, 2004). Bylo vytvořeno osm skupin kritérií, které byly tematicky rozděleny. Důležitost kritérií byla stanovena na základě definování ideální varianty a následných konzultací, během kterých došlo ke shodě v jejich konečném pořadí. Všechna kritéria jsou strukturovaně uvedena v tabulce 2, která obsahuje modrá pole, aby byly odlišeny údaje pro uzly. Tabulka pro sensorové desky/senzory obsahuje oranžová pole a tabulka zaměřující se na brány obsahuje zelená pole.

Tab. 2. Skupiny kritérií výběru uzlů seřazené dle jejich důležitosti

Číslo skupiny kritérií	Skupiny kritérií pro výběr uzlů	Kritéria výběru uzlů	Důležitost celkem	Rostoucí/ klesající / booleovská/ typová preference
<b>1</b>	Nabízené sensorové desky/senzory			
		sensorové desky pro měření polutantů přímo od výrobce	2	ano
		možnost napojení senzorů sledujících polutanty	3	-
		počet napojených sensorových desek/senzorů	9	max
		frekvence záznamu dat	9	min
		zabudované senzory	10	ano
<b>2</b>	Komunikační modely			
		vzájemná komunikace mezi uzly	1	ano
		možnosti komunikace	3	max
		dosah komunikace [m]	4	max
		topologie	4	typ
<b>3</b>	Zdroje energie			
		možnosti napájení	5	max
		výdrž baterie [rok]	5	max
		spotřeba energie	6	min
<b>4</b>	Odolnost vůči vnějším vlivům			

Tab. 2. Skupiny kritérií výběru uzlů seřazené dle jejich důležitosti

		provozní teplota [°C]	6	max
		ochranné prvky	6	ano
<b>5</b>	<b>Technické aspekty</b>			
		úroveň znalostí programování	7	min
		software	8	typ
		kapacita paměti [KB]	7	max
		vstup/výstup	9	max
<b>6</b>	<b>Možnosti rozšíření</b>			
		flexibilita	11	ano
		výměna sensorových desek/senzorů	11	ano
		GPS	11	ano
<b>7</b>	<b>Fyzické parametry</b>			
		rozměry [mm]	12	min
		váha [g]	13	min
<b>8</b>	<b>Cena</b>			
		cenové náklady [€]	10	min

První skupina kritérií se zabývá nabízenými sensorovými deskami/senzory. První kritérium řeší možnosti napojení sensorových desek nebo senzorů, které musí měřit prvky splňující účel aplikace. Nejprve je hodnoceno, jestli jsou sensorové desky/senzory měřící polutanty nabízeny přímo poskytovatelem základních desek, nebo musí být zakoupeny od jiného výrobce. Při výběru senzorů případně napojených sensorových desek/senzorů je brán ohled na počet senzorů, které je možno připojit na základní desku z hlediska počtu zabudovaných konektorů. Počet napojených senzorů se odvíjí od možností nabízených sensorových desek a požadavků na danou aplikaci. Frekvence zaznamenání dat se liší v závislosti na monitorovaných prvcích. Každý prvek má odlišné doporučené hodnoty snímání z důvodu rychlosti změny jeho stavu. Frekvence zaznamenání dat je závislá i na účelu aplikace bezdrátové sensorové sítě. Je možné, že v sensorové desce jsou již zabudované senzory, které jsou nabízeny defaultně se základní deskou. V případě měření ve venkovním prostředí není vhodné tyto senzory využívat, protože jsou ukryté pod ochrannou vrstvou uzlu, ale mohou být využity k měření hodnot uvnitř uzlu a jeho kontrole (jestli necochází k přehřívání, naklonění uzlu atd.).

Druhá skupina kritérií se zabývá komunikačními modely. Prvním a nejdůležitějším kritériem z této skupiny je, aby uzly komunikovaly nejen s bránou (případně se serverem), ale i samy mezi sebou. Uzly zasílající data přímo na bránu nebo server nemusí využívat protokolů upřednostňovaných pro použití v bezdrátové sensorové síti. Komunikace mezi uzly vzájemně může probíhat na malou i velkou vzdálenost v závislosti na vybraném komunikačním protokolu a dalších faktorech uvedených v kapitole 5.1 Faktory ovlivňující rozmístění uzlů ve venkovním prostředí. V síti se mohou objevovat sběrné uzly, které shromažďují data z více k nim napojených uzlů, a posílají je na bránu. Volba vhodného komunikačního protokolu závisí na terénních podmínkách, požadavcích na sběr dat, vzdálenosti komponent a zaměření celé bezdrátové

senzorové síť. Komunikace mezi sběrnými uzly a bránou zpravidla probíhá na stejném protokolu jako vzájemná komunikace mezi uzly. V bráně jsou shromažďována veškerá naměřená data a ta jsou posílána na server. Tato komunikace může být uskutečňována na různě velkou vzdálenost v závislosti na využitém protokolu. Do skupiny týkající se možností komunikace spadá i topologie bezdrátové senzorové sítě, protože rozmístění komponent bezdrátové senzorové sítě závisí především na komunikačním rozhraní a jeho dosahu komunikace, velikosti, charakteru vybrané oblasti a počtu uzlů.

Energetické zdroje tvoří třetí skupinu kritérií. Nejdůležitější kritérium se zabývá možnostmi napájení uzlů bezdrátové senzorové sítě, které mohou být řešeny pomocí USB rozhraní, elektrické sítě, různými typy vyměnitelných i nevyměnitelných baterií. Ve venkovních podmínkách jsou možnosti napájení bezdrátových senzorových uzlů omezené, a tak se využívá baterií, na které jsou kladeny požadavky co nejdelší výdrže, aby nemusely být neustále vyměňovány a nedocházelo k výpadkům v měření. Výdrž baterie uzlu je závislá na spotřebě energie, která se odvíjí od módu, ve kterém se uzel nachází a od jeho vytíženosti. Při výběru možnosti napájení ve venkovních podmínkách je brán ohled na to, jestli je možné baterii dobít pomocí solárního panelu, který zajistí její kontinuální dobíjení. Podmínkou umístění uzlu se solárním panelem je, že uzly musí být lokalizovány v nezastíněných oblastech, což může činit potíže v zalesněných a zastíněných oblastech.

Čtvrtá skupina kritérií se orientuje na schopnost uzlů čelit vlivům okolního prostředí. Mezi tyto požadavky spadá provozní teplota a ochranný obal uzlu. Je nutné, aby data byla získávána během celého roku v podmínkách, které panují v místě instalace bezdrátové senzorové sítě, a tak je vhodné mít provozní teplotní rozmezí, které pokryje i teplotní extrémy, aby nedocházelo k výpadkům v měření a poškození technické vybavenosti uzlů. Ochranu před vlivy okolního prostředí poskytuje obal. Ten nesmí mít vliv na naměřené hodnoty prvků, ale zároveň musí dostatečně chránit technické vybavení uzlu před srážkovou činností, prašností, vlhkostí, extrémní teplotou vzduchu a rychlostí větru.

Pátá skupina kritérií je založena na technických aspektech bezdrátové senzorové sítě. Prvním kritériem spadajícím do této skupiny je úroveň znalostí programování, jejíž výše se odvíjí od stupně naprogramování uzlů přímo od výrobce a souvisí s nainstalovaným programovým vybavením, které řídí chod celého systému. Je velmi důležité, aby bylo možné do naprogramovaného systému uživatelsky zasahovat a přizpůsobit si jeho chod vlastním požadavkům a aplikaci. Kritérium kapacity paměti uzlu je důležité, pokud se v uzlu budou data delší dobu skladovat a nebudou ihned po zaznamenání odesílána na bránu, která plní funkci sběratele naměřených dat. V ideálním případě jsou data posílána na bránu a pamětní kapacity je využíváno pouze ve sběrných uzlech. K většině komerčně dodávaným uzlům je možné dodat SD kartu, která zvýší pamětní kapacitu. Vstup a výstup souvisí s možnostmi přístupu k uzlu a zasahování do jeho základního naprogramování.

Šestá skupina požadavků je tvořena možnostmi rozšíření bezdrátové sensorové sítě. V této skupině kritérií se objevují požadavky na flexibilitu, možnost výměny senzorů a napojení GPS přijímače. Bezdrátová sensorová síť může být rozšířena ve smyslu počtu komponent, obohacení komponent o nové senzory, výměnou stávajících senzorů nebo využitím GPS přijímače, který se stává nepostradatelnou součástí bezdrátové sensorové sítě, u níž je počítáno s její mobilitou. Kromě rozšíření bezdrátové sensorové sítě o další technické komponenty a součásti je vhodné, aby bezdrátová sensorová síť byla rozšířena i ve smyslu zvětšení území pokrytého uzly.

Fyzické parametry uzlů jsou řazeny do sedmé skupiny kritérií. Objevují se zde kritéria řešící rozměry a hmotnost uzlů. Velikost těchto komponent hraje roli v případě, že je třeba uzly ukrýt, aby nezbuzovaly pozornost a nebyly ničeny vandaly (Mizera, 2011).

Osmá skupina kritérií je tvořena celkovými náklady na uzly bezdrátové sensorové sítě. Jedná se o velmi subjektivní kritérium, které je ovlivněno rozpočtem celého projektu. Musí se přihlídnout k primárně nabízeným možnostem tak, aby co nejvíce vyhovovaly záměru vystavění bezdrátové sensorové sítě. Cena komponent bezdrátové sensorové sítě je závislá na mnoha požadavcích včetně oblasti aplikace, protože od té se odvíjí počet instalovaných uzlů a výběr senzorů, které měří hodnoty vybraných prvků. Cena komponent bezdrátové sensorové sítě závisí i na zvoleném protokolu, který bude využíván k přenosu dat. Uzly vybavené protokoly, které přenáší data na krátkou vzdálenost, jsou levnější než uzly vybavené protokoly umožňujícími komunikaci větší vzdálenosti. Cena sensorové sítě vzrůstá i s využíváním nadstandardních prvků jako je GPS přijímač, solární panel nebo ochranné prvky. Mezi ty patří obal uzlu, který jej chrání před vnějšími vlivy, a prvky chránící jednotlivé senzory tak, aby naměřené hodnoty nebyly zkreslené. Cena jednoho uzlu bezdrátové sensorové sítě se pohybuje v rozmezí od 99 do 600 € a je závislá na příslušenství uzlu<sup>6</sup>. Ceny základních desek jsou mnohonásobně nižší, avšak uživatel si musí dokoupit nezbytnosti jako komunikační rozhraní, paměťové karty, sensorovou desku, baterie atd.

## 4.2 Kritéria pro výběr sensorových desek/senzorů

Požadavky na sensorové desky jsou zaměřeny na parametry měření vybraných prvků (Příloha 1), z části se prolínají s kritérii výběru uzlů. Kritéria hodnocení sensorových desek/senzorů byla tematicky seřazena do pěti skupin.

První a nejdůležitější skupina kritérií se zaměřuje na měřené prvky, které musí splňovat účel aplikace. Tato skupina se prolíná s nejvýznamnější skupinou kritérií, která je hodnocena i u uzlů. První kritérium v této skupině se zaměřuje na prvky, které lze měřit dostupnými senzory. Druhé se zabývá možnostmi kalibrace senzorů. Kalibrace senzorů musí být prováděna v laboratorních podmínkách podle nadefinovaných kalibračních křivek V závislosti na měřeném prvku se kalibrace musí opakovat.

---

<sup>6</sup> Údaj se vztahuje k ceníku z roku 2012

Druhá skupina požadavků se zabývá odolností sensorových desek a sensorů vůči vnějším vlivům. Do této skupiny je počítána provozní teplota sensorové desky/senzoru, která je důležitá s ohledem na rozsah zaznamenaných dat. Druhé kritérium je tvořeno ochrannými prvky senzoru, které zabraňují zkreslení naměřených dat.

Do třetí skupiny kritérií jsou zahrnuty možnosti rozšíření sensorových desek, které berou ohled na sensorové napětí, jenž se může stát nežádoucí v případě, že je překročeno a senzory spolu nebudou komunikovat, protože bude docházet k přetížení. Aby nedocházelo k přepětí, tak je vhodné kombinovat senzory pouze od jednoho výrobce. Při manipulaci se sensorovými deskami a jejich napojováním na uzly je nutné brát ohled na kompatibilitu těchto dvou součástí, protože ne všechny sensorové desky je možné napojit na vybrané typy základních desek. Důvodem může být neodpovídající konektor nebo zaměření těchto součástí na odlišné typy aplikací.

Čtvrtá skupina kritérií je tvořena fyzickými parametry sensorové desky. Tyto parametry vypovídají o jejich rozměrech a váze a jsou důležité z pohledu možností jejich napojení na uzly.

Cena sensorových desek a sensorů se odvíjí od způsobu a mechanismu měření vybraných prvků, dále pak od počtu měřících jednotek. Ceny sensorových desek případně sensorů se pohybují v intervalu od 10 do 800 €<sup>7</sup>.

#### **4.3 Kritéria pro výběr brány**

Požadavky kladené na bránu (Příloha 2) se velmi přibližují požadavkům na výběr uzlů bezdrátové sensorové sítě. Ve srovnání s kritérii kladenými na uzly, odpadají požadavky, které se týkají možností napojení sensorových desek a sensorů. Kritéria pojednávající o výběru brány jsou rozděleny do sedmi skupin.

První skupina kritérií se zaměřuje na komunikační modely a jsou do ní zahrnuty možnosti komunikace brány s uzly a brány se serverem. Dále je brán ohled na to, jaké se nabízí možnosti topologického uspořádání.

Energetické zdroje jsou zahrnuty do druhé skupiny kritérií. První kritérium se zabývá možnostmi napájení. U brány je možné uvažovat o možnosti napájení z elektrické sítě, protože bránu lze umístit i do uzavřených prostor. Pokud je brána napájena baterií, je nutné uvažovat o její výdrž, která musí být co největší a zároveň musí mít co nejmenší spotřebu energie.

Třetí skupina kritérií se zabývá odolností brány vůči vnějším vlivům a jsou do ní řazena kritéria týkající se provozní teploty a ochranných prvků. Provozní teplota musí odpovídat podmínkám, ve kterých bude brána umístěna. Pouze malé množství bran je vhodné do venkovních podmínek. Ochranné prvky jsou nepostradatelné v případě, že je brána umístěna ve venkovním prostředí.

---

<sup>7</sup> Údaj se vztahuje k ceníku z roku 2012

Technické aspekty tvoří čtvrtou skupinu kritérií. První kritérium se zabývá úrovní znalostí programování. Základní rozhraní brány musí být naprogramováno, ale zároveň musí být umožněno do jeho programového kódu dále zasahovat. V případě brány je uvažována kapacita paměti, protože data v ní mohou být uložena delší dobu, dokud nedojde k jejich přeposílání na server. Z důvodu zabezpečení a ochrany dat je nutné zvážit i možnosti bezpečnosti, které lze při manipulaci využít.

Pátá skupina kritérií se orientuje na možnosti rozšíření, které poukazují na flexibilitu brány a její rozšíření o další součásti, mezi které se řadí i GPS přijímač.

Fyzické parametry jsou zahrnuty do šesté skupiny kritérií a jsou tvořeny kritérii týkajícími se rozměrů a váhy této komponenty. Naplnění těchto požadavků je nezbytné v případě, že je brána umístěna ve venkovním prostředí a nesmí být ihned spatřena nebo má být uložena do vyšších poloh.

Poslední skupina kritérií pojednává o ceně brány a je závislá na možnostech komunikace, které jí umožní spojení s uzly a zároveň povolí zaslání dat na server.

#### **4.4 Požadavky na bezdrátovou senzorovou síť v Olomouci (E - BOSS)**

Bezdrátová senzorová síť, která bude aplikována na monitorování v Olomouci, musí vyhovovat především kritériím, která jsou ohodnocena nejvyšší vahou. Ke každému kritériu jsou pro každou komponentu navrženy parametry, které jsou z pohledu olomouckého monitoringu optimální. Bezdrátová senzorová síť bude mít uzly umístěné ve dvou klastrech, z nichž jeden bude ve středu města a druhý v jeho okrajové části. Celkem se bude v těchto klastrech střídát 13 uzlů.

Nejvýznamnější požadavky jsou ze všech komponent kladeny na uzly E - BOSS a jsou obsaženy v prvních třech skupinách kritérií, které se postupně zabývají nabízenými senzorovými deskami/senzory, komunikačními moduly a energetickými zdroji. Mezi nabízenými senzory se musí objevit ty, které monitorují vybrané základní meteorologické prvky a především prvky znečišťující ovzduší, aby byl splněn původní záměr celé aplikace. V ideálním případě by bylo vhodné získávat data o následujících prvcích: CO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, CO, CH<sub>4</sub>, teplotě vzduchu, relativní vlhkosti vzduchu, sluneční radiaci, směru a rychlosti větru (tab. 3, tab. 4). Výčet ideálně sledovaných prvků byl sestaven ve spolupráci s ČHMÚ, pobočkou Ostrava v prosinci roku 2013. Sledováno bude rozložení vybraných polutantů a základních meteorologických prvků, jejich rozptyl v různorodém prostředí v Olomouci. Další významný požadavek spadá do skupiny kritérií nazvané komunikační moduly. Kritérium zabývající se komunikací v bezlicenčním pásmu 2,4 GHz nebo 5 GHz s využitím protokolu IEEE 802.15.4 nebo Zigbee musí být splněno. Ze skupiny kritérií, která se zabývají zdroji energie, musí být naplněno, že uzly budou napájeny baterií. Parametry kritérií pro senzory a bránu jsou uvedeny v přílohách 3 a 4.



Tab. 3. Ideálně prvky sledované v rámci E - BOSS, zdroj: Jančík (2013), Tolasz a kol. (2007), upraveno

Sledované prvky	Popis, důvod sledování
CO <sub>2</sub> (oxid uhličitý)	plyn vznikající procesem nedokonalého spalování, podílí se na skleníkovém efektu, zaznamenání spalovacích procesů v zimě, „Urban CO <sub>2</sub> Dome“
NO <sub>2</sub> (oxid dusičitý)	plyn tvořící součást výfukových zplodin, možnost určení dopravních špiček
O <sub>3</sub> (ozon)	troposférický ozon vyskytující se nad zemským povrchem se vyskytuje v letních měsících, jeho koncentrace je vázána na dopravu, zjištění intenzity dopravy
CO (oxid uhelnatý)	plyn vznikající při nedokonalém spalování, je koncentrován kolem cest případně při nedokonalých spalovacích procesech, možnost sledování dopravních špiček
CH <sub>4</sub> (methan)	uhlovodík, podílí se na oteplování a zvětšování ozonové díry, zdrojem jsou biologické a tlející procesy
teplota vzduchu	udává tepelný stav ovzduší, podílí se na výši koncentrace polutantů a době jejich setrvání, teplotní zvrstvení, teplotní mapy malého území, tepelné ostrovy města
relativní vlhkost vzduchu	nasycení vzduchu vodními parami, vliv na koncentraci polutantů
solární radiace	představována sluneční energií dopadající na zemský povrch, má vliv na teplotu vzduchu
směr a rychlost větru	pohyb vzduchu v atmosféře, slouží k předpovídání dalšího rozšíření polutantů

Tab. 4. Parametry kritérií pro výběr uzlů doplněné o hodnoty vhodné pro E - BOSS

Číslo skupiny	Skupiny kritérií pro výběr uzlů	Kritéria výběru uzlů	Požadavky na E - BOSS
<b>1</b>	Nabízené senzorové desky/senzory	senzorové desky pro měření polutantů přímo od výrobce	ano
		možnost napojení senzorů sledujících polutanty	nutné pokud není od výrobce
		počet napojených senzorových desek/senzorů	minimálně 6
		frekvence záznamu dat [min]	15
		zabudované senzory	teploměr, akcelerometr
		<b>2</b>	Komunikační modely
možnosti komunikace	protokol Zigbee (IEEE 802.15.4), komunikace v pásmu 3,4 GHz nebo 5 MHz		
dosah komunikace [m]	300		
topologie	stromová, <i>peer to peer</i> , hvězdicová		

Tab. 4. Parametry kritérií pro výběr uzlů doplněné o hodnoty vhodné pro E - BOSS

<b>3</b>	<b>Zdroje energie</b>		
		možnosti napájení	baterie
		výdrž baterie [rok]	rok v provozu bez dobíjení, možnost napojení solárního panelu
		spotřeba energie	-
<b>4</b>	<b>Odolnost vůči vnějším vlivům</b>		
		provozní teplota [°C]	-30 až +40
		ochranné prvky	ano
<b>5</b>	<b>Technické aspekty</b>		
		úroveň znalostí programování	nízká
		software	open source
		kapacita paměti [KB]	600
		vstup/výstup	musí zahrnovat USB
<b>6</b>	<b>Možnosti rozšíření</b>		
		flexibilita	ano
		výměna sensorových desek/senzorů	ano
		GPS	ne, ale musí jít dokoupit
<b>7</b>	<b>Fyzické parametry</b>		
		rozměry [mm]	100 x 100 x 100
		váha [g]	100
<b>8</b>	<b>Cena</b>		
		cenové náklady na jeden uzel [€]	300

Pro výběr komponent E - BOSS budou uvažovány pouze alternativy nabízené v rámci jedné společnosti, protože kombinace komponent a dalších součástí produkovaných více společnostmi by mohla přinést problémy s instalací a následným zprovozněním z důvodu nekompatibility uzlů a sensorových desek.

#### 4.5 Komerčně nabízené komponenty bezdrátových sensorových sítí

Vývojem bezdrátových sensorových sítí se zabývá široké spektrum firem a institucí. Pro výběr komponent E - BOSS byly hodnoceny všechny výrobky nabízené jedenácti producenty uvedenými v tabulce 5<sup>8</sup>.

<sup>8</sup> Údaje se vztahují k první polovině roku 2013

Tab. 5. Výrobci komponent bezdrátových sensorových sítí, jejichž komponenty byly zvažovány pro olomouckou bezdrátovou sensorovou síť

<b>SiliconLabs</b>	<b>Libelium</b>	<b>Memsic</b>	<b>Arduino</b>	<b>TinyNode</b>	<b>AdvanticSys</b>
USA	Španělsko	USA	Itálie	Španělsko	Švýcarsko
<b>Crossbow</b>	<b>Dust Inc.</b>	<b>CSIRO</b>	<b>Sun Microsystems</b>	<b>Shimmer</b>	
USA	USA	Austrálie	USA	Irsko	

Nejvhodnější varianty byly vybírány z 30 uzlů, 39 sensorových desek/senzorů a 10 bran. Všechny tyto komponenty byly hodnoceny na podkladě výše zvolených kritérií. Největší pozornost byla soustředěna na výběr uzlů bezdrátové sensorové sítě, které tvoří nejdůležitější složku celého systému. Vybraný uzel je vhodné doplnit o sensorovou desku/senzory a bránu od stejného výrobce.

Ne u všech produktů byla vyplněna všechna kritéria, protože výrobcem nebyly poskytnuty potřebné informace k jejich doplnění, a tak byly vybrány uzly, u kterých bylo vyplněno alespoň 80 % ze zvolených kritérií. Tomuto požadavku vyhovovalo 15 uzlů, které tvoří polovinu původního souboru, a jsou produkovány pěti dodavateli (zeleně v tab. 5).

Kromě jednotlivých komponent bezdrátové sensorové sítě byli hodnoceni podrobení i samotní výrobci, protože je nutné znát jejich postoj k uživateli. V tabulce 6 jsou uvedena hodnocení těchto výrobců. Hodnoceno bylo, jestli distributor komunikuje s uživatelem a pokud ano, jak dlouho mu trvá zaslání odpovědi. K hodnocení byla zvolena stupnice od 1 do 5, která poukazuje na počet dnů během, kterých došla požadovaná odpověď. Pokud nebyla přijata odpověď do pěti dnů, tak byla k výrobcu automaticky přiřazena hodnota pět. Druhé kritérium se zaměřuje na strukturu textu odpovědi. Ta může být buď strohá a pouze odpovídat na požadované otázky, nebo může obsahovat další otázky směrem k uživateli a podrobnější informace. K hodnocení byla využívána stupnice od 1 do 5.

Tab. 6. Kritéria výběru producenta komponent bezdrátové sensorové sítě

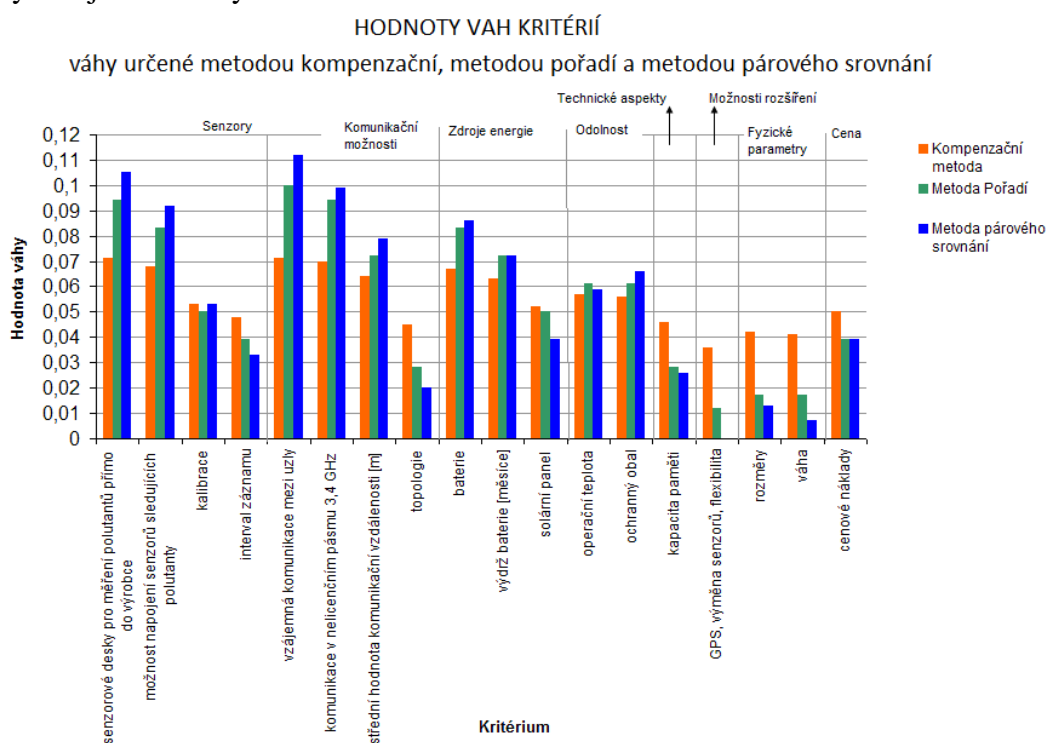
Důležitost	Hodnocení	Libelium	Memsic	Crossbow	AdvanticSys	TinyNode
1	komunikuje výrobce s uživatelem	1	1	5	4	5
2	struktura odpovědi	1	1	5	2	5

## 4.6 Analýza nabízených komponent

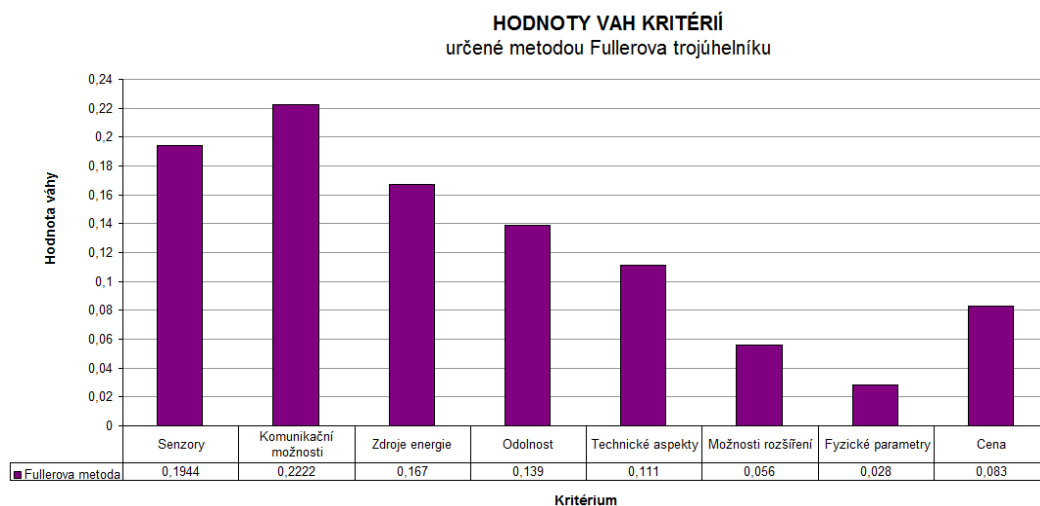
K výběru ideální varianty z množiny variant dle nadefinovaných kritérií byly hodnoty požadavků zjednodušeny do srozumitelnější podoby, aby mohly být parametry u všech variant jednoznačně porovnatelné. Výpočet užítka jednotlivých variant byl prováděn pro uzly, ke kterým byly přiděleny i požadavky na sensorové desky/senzory. Uzly spolu se senzory tvoří nejvýznamnější technickou komponentu, vybraná varianta uzlu bude doplněna bránou vyráběnou stejnou společností. Pokud bude výsledek analýzy nejednoznačný, bude přihlédnuto i k požadavkům kladeným na výrobce.

Nejprve byly počítány váhy jednotlivých kritérií, které vycházejí z dříve stanovených hodnot jejich důležitosti. K určení vah jednotlivých kritérií byly využívány čtyři metody: metoda pořadí, kompenzační metoda, metoda párového srovnání a metoda Fullerova trojúhelníku.

Váhy určené pomocí metody pořadí a kompenzační metody mohou být dále srovnány, protože byly určeny pro všechna zvolená kritéria. Vypočítané hodnoty vah jsou zatíženy subjektivním postojem expertů, kteří se podíleli na určování důležitosti jednotlivých kritérií. V tomto případě bylo určení hodnoty váhy řešeno autorkou práce společně s pracovníky Katedry informatiky. Hodnocení proběhlo na základě předchozích zkušeností a studia literatury. Nejvyšší váhovou hodnotu dostala kritéria, která požadují možnost napojení sensorových desek/senzorů měřících polutanty a vzájemnou komunikaci mezi uzly. Při počítání vah pomocí metody párového srovnání byl rozptýl mezi nejvyšší a nejnižší hodnotou váhy výrazně vyšší než v případě metody kompenzační. Rozdíly mezi vahami, které mají nižší hodnotu kritérií, jsou způsobeny větším rozpětím množiny hodnot, ze které byly váhy kompenzační metodou získávány (obr. 23). Hodnoty vah určené pomocí metody Fullerova trojúhelníku byly stanoveny pouze pro skupiny kritérií, protože tato metoda srovnává vzájemně kritéria a vykazuje dobré výsledky pouze v případě, že počet kritérií nepřesahuje číslo devět (obr. 24). Váhově nejlépe ohodnocenou skupinou kritérií podle této metody se stala skupina, která se týká nabízených sensorových desek a senzorů, které lze napojit na uzel. Všechny hodnoty vah jsou shrnuty v tabulce 7.



Obr. 23. Hodnoty vah kritérií určeny třemi metodami, zdroj: vlastní měření



Obr. 24. Hodnoty vah skupin kritérií určeny pomocí metody Fullerova trojúhelníku, zdroj: vlastní měření

Tab. 7. Uzlová kritéria a jejich váhy vypočítané odlišnými metodami

	Skupiny kritérií	Kritéria	Váha metoda párového srovnání	Váha metoda pořadí	Váha metoda kompenzační	Váha metoda Fullerova trojúhelníku
<b>1</b>	Nabízené sensorové desky/senzory					0,222
		sensorové desky pro měření polutantů přímo do výrobce	0,105	0,09	0,070	
		možnost napojení senzorů sledujících polutanty	0,092	0,076	0,066	
		kalibrace	0,053	0,047	0,055	
		zabudované senzory	0,033	0,023	0,039	
<b>2</b>	Komunikační modely					0,194
		vzájemná komunikace mezi uzly	0,112	0,090	0,070	
		komunikační protokol Zigbee	0,099	0,076	0,064	
		komunikace v nelicenčním pásmu 3,4 GHz nebo 5 GHz	0,079	0,083	0,069	
		střední hodnota komunikační vzdálenosti [m]	0,02	0,073	0,063	

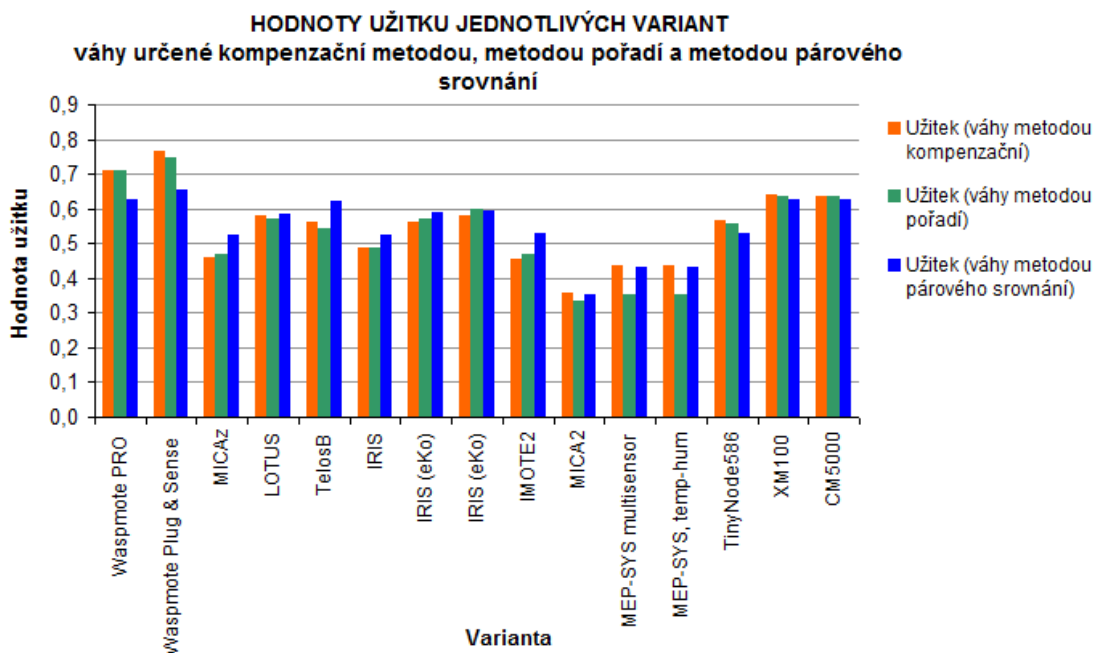
Tab. 7. Uzlová kritéria a jejich váhy vypočítané odlišnými metodami

<b>2</b>	<b>Zdroje energie</b>					<b>0,167</b>
		lze napájet baterií	0,086	0,063	0,059	
		výdrž baterie [měsíce]	0,072	0,060	0,057	
		lze napojit solární panel	0,039	0,063	0,058	
<b>4</b>	<b>Odolnost vůči vnějším vlivům</b>					<b>0,139</b>
		zahrnuje provozní teplota interval -30 až 40 °C	0,059	0,050	0,056	
		ochranný obal	0,066	0,050	0,055	
<b>5</b>	<b>Technické aspekty</b>					<b>0,111</b>
		úroveň znalostí programování	-	0,040	0,048	
		kapacita paměti	0,026	0,030	0,049	
<b>6</b>	<b>Možnosti rozšíření</b>					<b>0,056</b>
		GPS, výměna senzorů, flexibilita	0	0,030	0,042	
<b>7</b>	<b>Fyzické parametry</b>					<b>0,028</b>
		rozměry	0,013	0,020	0,020	
		váha	0,007	0,013	0,021	
<b>8</b>	<b>Cena</b>					<b>0,083</b>
		cenové náklady	0,039	0,023	0,038	

Výpočet užítku jednotlivých variant pomocí metody váženého součtu poukazuje na to, že nejvhodnější variantou uzlů, jsou uzly Waspnote Plug & Sense, které jsou nabízeny španělskou firmou Libelium (tab. 8, obr. 25). Uzly, které dosáhly druhého nejvyššího užítku, jsou také vyráběny touto společností, ale jejich hodnocení bylo sníženo o kritérium, které poukazuje na ochranný obal uzlu. Třetího nejvyššího hodnocení dosáhly uzly nabízené společností AdvanticSys. Důvodem vyšších hodnot užítku uzlů nabízených těmito společnostmi je, že obě společnosti nabízejí přímo sensorové desky/senzory, které měří polutanty. Toto kritérium bylo opatřeno nejvyšší vahou, až za ním bylo kritérium, které se zabývalo možnostmi napojení sensorových desek/senzorů měřících prvky znečišťující ovzduší produkovaných jinou společností. Z uzlů, na které nejsou přímo od výrobce poskytovány sensorové desky/senzory, jsou vyzdvihnuty uzly eKo od společnosti Memsic. Tyto uzly je možné aplikovat přímo pro měření ve venkovních podmínkách, a tak v celkovém hodnocení bylo vyzdvihnuto toto kritérium. Nejmenší užitek má uzel MICA2, který komunikuje v pásmu, které nevyhovuje podmínce, a protože kritérium na komunikaci v povoleném pásmu má vysokou váhu, je výsledný užitek nízký.

Tab. 8. Užitek jednotlivých variant

Varianta	Užitek (váhy metodou kompenzační)	Užitek (váhy metodou pořadí)	Užitek (váhy metodou párového srovnání)
Wasmote PRO	0,7119	0,7104	0,6283
Wasmote Plug & Sense	0,7634	0,7488	0,6560
MICAz	0,4603	0,4684	0,5248
LOTUS	0,5778	0,5719	0,5856
TelosB	0,5618	0,5442	0,6210
IRIS	0,4880	0,4860	0,5259
IRIS (eKo)	0,5595	0,5723	0,5906
IRIS (eKo)	0,5799	0,5991	0,5918
IMOTE2	0,4534	0,4663	0,5269
MICA2	0,3575	0,3360	0,3520
MEP-SYS multisensor	0,4359	0,3536	0,4321
MEP-SYS, temperature	0,4373	0,3546	0,4327
TinyNode586	0,5681	0,5575	0,5280
XM100	0,6383	0,6375	0,6252
CM5000	0,6373	0,6369	0,6257



Obr. 25. Hodnoty užitku jednotlivých variant, zdroj: vlastní měření

Rozdíl mezi nejlepší a nejhorší variantou je nejvyšší s využitím vah určených pomocí metody pořadí, 0,37, je v případě hodnocení uzlů vhodných pro E - BOSS. Tento rozdíl je poměrně značný a poukazuje na to, že nejhorší varianta nesplňuje mnohé nároky kladené na tuto bezdrátovou senzorovou síť. Nejnižší rozdíl mezi variantou s nejvyšším a nejnižším užitekem je v případě využití metody párového srovnání pro stanovení vah,

0,30. Nejlepší varianta vyhovuje v 76 % pomocí vah určených metodou kompenzační, v 75 % s využitím vah určených metodou pořadí. Nejnižší hodnota užítka nejlepší varianty je vypočítána s využitím metody párového srovnání, její hodnota je 65 %.

Využití uzlů Wasmote Plug & Sense se jeví jako nejlepší řešení pro tuto aplikaci. Uzly Wasmote Plug&Sense mají splněna nejvíce váhově ohodnocená kritéria týkající se napojení senzorů měřících polutanty, které jsou přímo od výrobce, a komunikace, která probíhá na podkladě protokolu IEEE 802.15.4 nebo Zigbee. Tyto uzly jsou přímo použitelné pro měření ve venkovním prostředí. Rovněž se jedná o jedny ze dvou typů uzlů, které mohou být použity ve venkovních podmínkách bez jakýchkoliv úprav, tak se jedná o nejlepší ze všech nabízených variant, která byla zakoupena pro tuto disertační práci.

#### 4.6.1 Modely uzlů Wasmote Plug&Sense

Uzly Wasmote Plug&Sense jsou vyráběny v několika modelech, které zahrnují model Smart Water (monitorování kvality vody), Smart Water Ions (kontrola koncentrace iontů ve vodě), Smart Cities (měření hlukového znečištění, managementu odpadu), Smart Security (domácí bezpečnostní systémy), Radiation Control (měření radiace), Smart Parking PRO (detekce parkovacích míst), Ambient Control (kontrola základních meteorologických prvků, měření vibrací, míry osvětlení) a Smart 4-20 mA Current Loop (“Plug & Sense! Sensor Networks made easy - Models | Libelium,” 2016)<sup>9</sup>. Modely použité v této práci jsou:

- Smart Environment,
- Smart Agriculture,
- Smart Agriculture PRO.

Pro kompletnost výčtu vyráběných modelů je třeba zmínit, že model Model Smart Environment je nyní vyráběn pouze ve variantě PRO, která však v době výběru uzlů a senzorů v akademickém roce 2012/2013 nebyla na trhu ještě dostupná. A model Smart Agriculture je vyráběn pouze ve variantě Smart Agriculture, nikoli PRO.

Všechny uzly Wasmote Plug&Sense mají základní i senzorovou desku uloženou ve voděodolném obalu (IP65) (obr. 26). K základní desce musí být připojena anténa. V tomto případě bylo stanoveno, že bude využíváno komunikační rozhraní IEEE 802.15.4. K doplnění byl nainstalován i slot pro připojení SIM karty umožňující komunikaci skrz mobilní síť.

Výrobce na základní desku uzlů připojuje lithiové baterie s kapacitou 6600 mAh a napětím 3,3 V až 4,2 V. Baterie jsou voděodolné a jsou schopné pracovat při teplotách - 10 °C až 50 °C, jejich výdrž je garantována až na jeden rok provozu. Není však uvedeno, za jaké konfigurace, je tato výdrž udávána. Dobíjení baterií je garantováno na dobu 66 hodin. Všechny tyto údaje se vztahují na nové baterie (Libelium, 2016c).

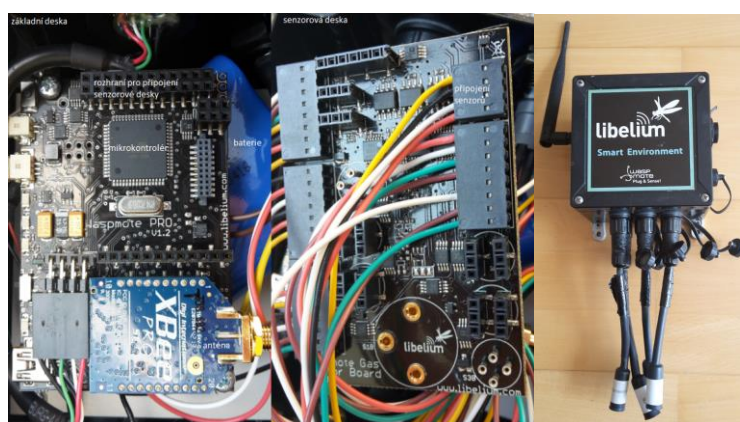
K propojení uzlů s počítačem je využíváno standardizovaného USB konektoru. Pro vyšší výdrž baterie jsou k uzlu připojitelné solární panely. Jednotlivé modely uzlů jsou

---

<sup>9</sup> Údaj k prosinci 2016



vyčleňovány, protože každá senzorová deska napojená na základní desku má jiné možnosti připojení senzorů, a tak každý model je schopen snímat pouze vybrané prvky, což je jediný rozdíl v zakoupených modelech uzlů (Libelium, 2016a). K uzlům Wasmote Plug&Sense modelu Smart Environment jsou připojeny senzory monitorující teplotu vzduchu, vlhkost vzduchu, CO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, VOC a kombinovaný senzor pro měření vzdušných polutantů (C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>CH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>S, CH<sub>3</sub>CH<sub>2</sub>OH, NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>). K uzlům Smart Agriculture je připojen kombinovaný senzor pro měření teploty a vlhkosti vzduchu a malá meteorologická stanice, která umožňuje sledovat srážky, směr a rychlost větru. Uzly Smart Agriculture PRO mají také připojen kombinovaný senzor pro měření teploty a vlhkosti vzduchu, dále je zakoupen senzor pro měření solární radiace. Obrázek 26 ukazuje základní a senzorovou desku modelů Smart Environment. Tyto desky jsou umístěny uvnitř obalu, ven z obalu jsou vedeny samotné senzory.



Obr. 26. Základní deska uzlu Wasmote Plug&Sense model Smart Environment (v levé části obrázku vlevo), senzorová deska tentýž uzlu (v levé části obrázku vpravo), uzal Wasmote Plug&Sense model Smart Environment s připojenou anténou a senzory (vpravo), zdroj: vlastní fotografie

#### 4.6.1.1 Senzory uzlů Wasmote Plug&Sense

Všechny technické údaje o uzlech Wasmote Plug&Sense modelu Smart Environment jsou převzaty z dokumentace společnosti Libelium týkající se senzorové desky (Libelium, 2015). Podrobnější základní informace o senzorech jsou tabelárně shrnuty v příloze 5.

Uzly Wasmote Plug&Sense z řady Smart Environment mají napojeny analogové teplotní senzory (MCP9700A) vyráběné společností Microchip. V tomto senzoru je převáděna hodnota teploty na poměrné analogové napětí. Výstupní rozsah se pohybuje mezi 100 mV (-40 °C) a 1,75 V (125 °C). Rozdíl v napětí při změně o jeden teplotní stupeň odpovídá 10mV. V rámci psaní programového kódu je možné naměřené napětí převést přímo na teplotní hodnoty ve stupních Celsia, které se potom v databázi zobrazují. Přesnost měření nenakalibrovaného senzoru se při měření v podmínkách od minus 40 °C do 125 °C pohybuje okolo 2 °C.

Analogové senzory uzlů Wasmote Plug&Sense z řady Smart Environment jsou i ty měřící vlhkost vzduchu (808H5V5), vyráběné společností Sencera. Analogový senzor

poskytuje napěťový výstup úměrný relativní vlhkosti v atmosféře. Protože je rozsah signálu mimo vstupní hodnoty uzlů, tak je instalován dělič napětí, který převádí napěťové hodnoty do rozmezí 0,48 až 2,34 V.

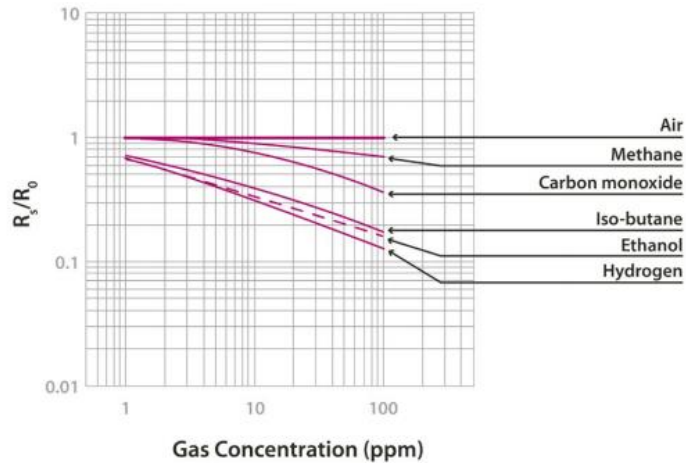
Přesnější měření vykazuje kombinovaný digitální senzor snímající teplotu i vlhkost vzduchu (SHT75), který je namontován na modelech Smart Agriculture a Smart Agriculture PRO (Libelium Agriculture, 2015). Výstup z tohoto senzoru je čten připojením k dvou pinům na sensorové desce. Protokol I2C (Intergrated Circuit Bus) je integrován do knihovny sensorové desky, a tak je možné číst hodnoty přes funkci k tomu navrženou. Funkce *read.Value()* se specifikací teplotního senzoru vrací hodnoty ve stupních Celsia a hodnoty relativní vlhkosti v procentech. Kombinovaný senzor má vysokou spotřebu, a tak je doporučováno jej v době, kdy neměří, vypínat.

Chemický senzor sledující hodnoty oxidu uhličitého (TGS4161) vyrábí společnost Figaro. Jedná se o analogový senzor, který poskytuje proporciální výstup ve Voltech, které jsou převeditelné na jeho koncentraci v atmosféře. Hodnoty, které jsou jako výstupní ukazovány, se pohybují od 220 mV do 490 mV pro koncentraci 350 ppm. Se zvyšující se koncentrací CO<sub>2</sub> ve vzduchu hodnoty napětí klesají. U jednotlivých senzorů se mohou objevit rozdíly v jejich citlivosti, a proto je doporučováno je před použitím nakalibrovat. Přesnost měření je ovlivněna i stupněm nabití baterie v uzlu. Třicet sekund je čas, ve kterém jsou tyto senzory schopné zaznamenat změnu koncentrace měřeného prvku, avšak přesnější změny koncentrace prvku jsou zaznamenány až po deseti minutách.

Senzor pro měření oxidu dusičitého (MiCS-2710) od firmy e2v je taktéž připojen k základní desce u zakoupených uzlů modelu Smart Environment. Tento senzor zaznamenává hodnoty odporu, které se pohybují od 2 kΩ do MΩ. Senzor je napájen 1,8 napěťovým regulátorem, jehož spotřeba je průměrně 26 mA. Odpor senzoru ve vzduchu stejně jako jeho senzitivita se může lišit senzor od senzoru, a tak je doporučeno senzor nakalibrovat předtím než bude použit pro vlastní aplikaci. Senzor musí být připojen do slotu 3B na plynové sensorové desce a hodnoty jsou čteny přes sensorovou knihovnu (*SensorGasv20.library*).

Senzor zaznamenávající hodnoty velmi těkavých (VOC) MiCS-5521 vyráběný firmou e2v je na uzlech Smart Environment upevněn na pátém slotu. Pomocí tohoto senzoru je možné získat data o oxidu uhelnatém, hydrokarbonátech a těkavých organických látkách. Senzor je poháněn přes 2,5 voltový regulátor. Odpor vzduchu senzoru se liší, stejně tak jako jeho citlivost, která se může na jednotlivých uzlech lišit, a tak je doporučováno senzor nakalibrovat před jeho využitím v terénu. Senzor je připojen na jednotku 2B v plynové sensorové desce. Výstup může je získáván přes funkci v knihovně (*SensorGasv20 library*).

Posledním senzorem připojeným k uzlům Smart Environment je senzor Air Pollutants 2 (TGS2600). Prvky sledované tímto senzorem jsou C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>, CH<sub>3</sub>CH<sub>2</sub>OH, H<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>. Odpor senzoru se ve vzduchu mění mezi v rozmezí 10 a 90 kΩ s citlivostí pohybující se od 0,3 do 0,6 pro koncentraci H<sub>2</sub> o hodnotě 10 ppm (obr. 27).



Obr. 27. Senzitivita senzoru Air Pollutants II, zdroj: Libelium (2016a)

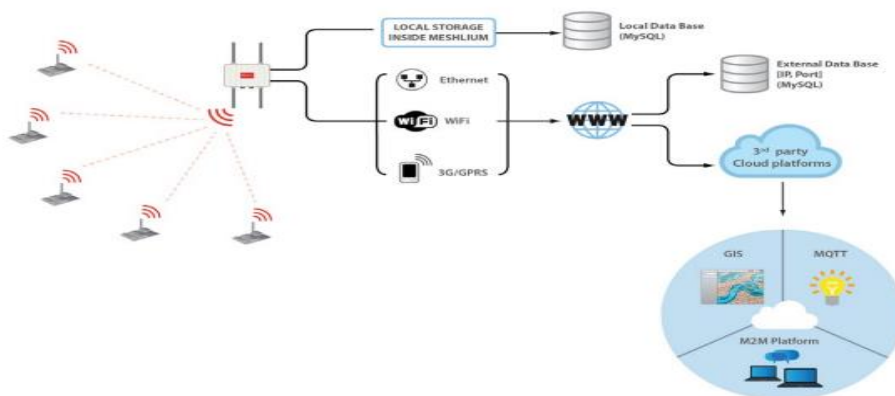
K uzlům Smart Agriculture je možné připojit malou meteorologickou stanici, která obsahuje anemometr, větrnou korouhev a srážkoměr. Citlivost anemometru (RJ11) je 2,4 km/h, kdy dojde k jeho otočení. Rozsah měřitelných rychlostí větru je 0 až 240 km/h. Výstupem je digitální signál, jehož frekvence je proporciální k rychlosti větru v km/h. Větrná korouhev má maximální přesnost měření stanovenou na 22,5°, odpor čidla se pohybuje mezi 688Ω ~ 120 kΩ. Korouhev se skládá z volně se otáčejícího základu na platformě s osmi odpory připojenými k osmi přepínačům, které jsou otevřené nebo zavřené. Integrovaný magnet umožní rozeznat 16 různých pozic. Ekvivalentní odpor korouhve společně s 10 kΩ odporem formuje napěťový rozdělovač napájený při dosažení 3,3 V, výstup je možné měřit na analytickém vstupu mikrokontroléru. Výstup je čten pomocí digitální knihovny, funkce *read.Value()* a proměnné *vane\_direction*. Mezi odporem, napětím a směrem větru existuje převodní tabulka. Srážkoměr je poslední čidlo napojené na malou meteorologickou stanici. Toto čidlo se skládá z malého člunku, který je naplněn po spadnutí 28 mm srážek v tomto okamžiku se zavírá přepínač a člunek se vyprazdňuje. Výsledkem je digitální signál, jehož frekvence je proporciální k intenzitě deště v milimetrech za minutu.

K uzlům Smart Agriculture PRO byly zakoupeny senzory SQ-110 měřící solární radiaci. Výstup je uváděn ve Voltech a je proporcionalní k intenzitě světla ve viditelném rozsahu spektra, klíčovým parametrem je proces fotosyntézy, který reprezentuje výstup 400 mV pod maximálními radiačními podmínkami a citlivostí 5.00μmol·m-2s-1/mV. Pro vylepšení přesnosti čtení je připojen 16 bitový analogovodigitální konvertor, který komunikuje s mikroprocesorem skrz protokol I2C.

#### 4.6.2 Brána Meshlium

Všechny technické údaje o bráně jsou uvedeny v dokumentaci k bráně Meshlium (Libelium, 2016c).

Meshlium pracuje jako linuxový směrovač, který shromažďuje data z uzlů nakonfigurovaných do bezdrátové sítě. Router může obsahovat šest různých rádiových rozhraní. Zakoupený router může vysílat signál přes Wi-Fi, IEEE 802.15.4 a mobilní síť. Všechny součásti brány jsou odolné vůči povětrnostním podmínkám a ukryté v aluminiovém obalu (IP65). Síťování může být kontrolováno dvěma přístupy, a to webovým rozhraním (Web Manager) nebo pomocí SSH připojení přímo k bráně. Meshlium je možné programovat pomocí několika jazyků (Java, PHP, C, C++, Perl, Python), kromě toho brána pracuje s dvěma databázovými systémy (MySQL a PostgreSQL). Do Meshliu je integrována paměť disku o kapacitě 8 GB, avšak celý operační systém zabírá 2,5 GB z celkové paměti. Obrázek 28 ukazuje možnost komunikace uzlů pomocí sensorového protokolu a následné uložení dat v lokální databázi brány, či jejich další přenesení pomocí vybraného komunikačního rozhraní do externí databáze a cloudového úložiště.



Obr. 28. Brána v bílém aluminiovém obalu (nahore), možnosti komunikace a uložení dat v bezdrátové sensorové síti (dole), zdroj: vlastní fotografie a Libelium (2016b)

## 5. DC2 – ROZMÍSTĚNÍ UZLŮ BEZDRÁTOVÉ SENZOROVÉ SÍTĚ

V této kapitole byly navrženy faktory ovlivňující rozmístění uzlů v terénu, na jejichž podkladě byly navrženy algoritmy pro rozmístění uzlů bezdrátové sensorové sítě v terénu, které byly následně ověřeny rozmístěním uzlů ve druhém klastru.

### 5.1 Faktory ovlivňující rozmístění uzlů ve venkovním prostředí

Je zvažováno, že faktory ovlivňující rozmístění uzlů ve venkovním prostředí mohou být děleny do skupin pojmenovaných jako předdistribuční, technické a terénní. Předdistribuční faktory se zabývají určením velikosti zájmové oblasti, definují počet uzlů se senzory, které se v této oblasti nachází a v neposlední řadě řeší výšku senzorů nad zemským povrchem. Technické faktory se odkazují na technické parametry uzlů i senzorů a komunikaci v bezdrátové sensorové síti (Hejlová, 2014). Terénní faktory bývají do zvažování polohy uzlů zahrnovány zřídka, protože o umístění uzlů ve venkovním prostředí doposud nebylo příliš často uvažováno a pokud bylo, tak uzly byly v prostoru rozmístěny nahodile (Lazos a Poovendran, 2006; Liu a kol., 2005).

#### 5.1.1 Předdistribuční kroky

Při návrhu rozmístění uzlů bezdrátové sensorové sítě musí být nejprve nadefinovány základní parametry, které jsou podobné těm, na jejichž základu byly uzly vybírány. Předdistribuční kroky zahrnují:

- určení účelu aplikace bezdrátové sensorové sítě (Co chci monitorovat?),
- definici místa, kde budou uzly lokalizovány (Kde chci zahájit monitoring?),
- vyjádření počtu uzlů v regionu zájmu (Kolik uzlů chci mít v oblasti zájmu?),
- určení výšky senzorů nad zemským povrchem (Jaké jsou požadavky na sledování vybraných prvků?).

Po určení aplikace bezdrátové sensorové sítě je nutné stanovit region zájmu, jehož umístění a velikost jsou klíčové. Na základě velikosti území a počtu uzlů v regionu zájmu je definována hustota uzlů v této oblasti. Určení výšky senzorů je nezbytné z aplikačního pohledu, protože každý prvek má určeno, v jaké výšce nad zemským povrchem má být monitorován a nejen to. Určeno bývá, v jaké vzdálenosti od zástavby a přírodních překážek má být prvek sledován, aby docházelo k jeho korektnímu záznamu a údaje nebyly zkreslovány okolním prostředím.

#### 5.1.2 Technické faktory

Mezi technické faktory ovlivňující rozmístění uzlů bezdrátové sensorové sítě v terénu jsou počítány ty, které souvisí s technickou vybaveností a možnostmi uzlů. Mezi technické faktory se řadí:

- výdrž baterie uzlu,
- komunikační vzdálenost,

- vyvážené množství sousedů,
- záložní cesty komunikace.

Nejvýznamnějším technickým parametrem uzlu je výdrž jeho baterie. Baterie není ve všech uzlech vyčerpávána rovnoměrně, protože některé uzly jsou více zatěžovány, a tak je jejich baterie rychleji vyčerpávána. Je nutné zajistit, aby baterie některých uzlů nebyly přenosem dat extrémně zatíženy a nedocházelo k jejich brzkému vybití a případným ztrátám dat, které proudí přes tyto uzly k bráně. Každý uzel by měl mít vyvážené množství svých sousedů tak, aby jeden uzel nebyl komunikací příliš zatížen a přes další uzly proudilo pouze omezené množství dat. Vyváženost komunikace souvisí s energetickou výdrží jednotlivých uzlů zapojených do sítě. Baterie v uzlu se dle Murthy a Manoj (2004) vybíjí druhou mocninou vzdálenosti komunikace, a tak čím kratší je komunikační vzdálenost, tím baterie vydrží déle, což je jeden z faktů, na který musí být brán zřetel.

Komunikační vzdáleností je myšlena maximální vzdálenost, na kterou jsou uzly schopné spolu spolehlivě komunikovat. Spolehlivá komunikační vzdálenost je taková, ve které nebude docházet k vysokým ztrátám dat zapříčiněným nedostatečnou silou signálu. Vzdálenost komunikace závisí na použitém protokolu, pomocí kterého jsou získaná data přenášena, na terénních charakteristikách, míře rušení signálu atd. Komunikační vzdálenost je možné odhadnout z indikátoru míry signálu (RSSI), který lze získat při přenosu dat mezi uzly (Stojkoska, 2014).

Záložní cesty toku dat jsou nezbytné v případě výpadku měření náhodného uzlu, protože při neexistenci záložních cest nemohou být nasměrována přenášená data až do brány, ve které jsou ukládána, a tak může dojít ke ztrátám dat.

### 5.1.3 Terénní faktory

Terénní faktory ovlivňující rozmístění uzlů bezdrátové sensorové sítě jsou tvořeny krajinným pokrytím, charakteristikou měřených prvků a vlastnickými poměry v území, kde jsou uzly umístovány. Mezi terénní faktory se řadí:

- krajinný pokryv,
- překážky v komunikační cestě,
- charakteristika měřených prvků,
- bezpečnost místa,
- vlastnické poměry.

Pokrytí země poukazuje na to, že ve městě se nachází více typů povrchů, které ovlivňují hodnoty naměřených prvků. Každý typ povrchu má odlišné charakteristiky související s pohlcováním záření, odrazivostí a zahříváním. Do měření je třeba tento fakt zahrnout, protože data by měla být získávána na všech typech povrchu, aby mohlo být konstatováno, do jaké míry má daný typ povrchu vliv na chod vybraných prvků. Osazení více shodných povrchů uzly je žádoucí z důvodu ověření dat získaných na odlišných typech. Dalším cílem je, aby uzly byly umístěny v klidnějších i rušnějších částech

vymezeného území. Klidnějšími místy se rozumí park, zastíněné oblasti za budovou a rušnějšími naopak pruhy kolem rušných dopravních tepen. Nejvýhodnější je osazení jednoho typu povrchu a hlukově odlišné oblasti více senzory, aby mohla být porovnána i data získaná na stejném typu povrchu, který se nachází v odlišných částech území.

Terénní překážkou se rozumí objekt v cestě, který může narušovat komunikaci mezi dvěma uzly. Překážky mohou být uměle vytvořené nebo přírodní. Překážky různého tvaru, materiálu, barvy mohou odlišným způsobem ovlivňovat šíření signálu, záleží především na jejich struktuře a úhlu dopadu vlny šířící signál. Je třeba se vyvarovat překážkám mezi dvěma spolu komunikujícími uzly, aby nedocházelo ke ztrátě a modifikaci dat, která jsou jimi přenášena. S terénními překážkami souvisí i požadavek na přímou viditelnost mezi spolu komunikujícími uzly. Kvalita signálu je závislá na míře viditelnosti mezi uzly, které si mezi sebou posílají data. Pokud se tyto uzly nacházejí na území bez větších překážek, tak je signál pouze v malé míře ovlivněn rozptylem, šumem, nebo případnou jinou komunikací na shodných frekvencích, jejíž řešením je přeprogramování bezdrátové sensorové sítě na méně vytížený kanál.

Každý meteorologický prvek má definovanou standardizovanou výšku a míru zastínění, ve které musí být měřen. Tento požadavek umožňuje, aby byla porovnatelná data naměřená v odlišných místech, protože s výškou nad terénem se mohou naměřené hodnoty stejných meteorologických prvků lišit. Základní meteorologické prvky jsou zaznamenávány v určených klimatologických časech. Kromě tří základních meteorologických termínů mohou být voleny i podrobnější časy, které se odvíjí od podrobnějších klimatologických termínů. Lze si stanovit i vlastní intervaly měření, které budou na všech uzlech shodné, aby mohlo docházet k porovnání dat. Je vhodné zvolit interval, který nebude příliš podrobný, aby nedocházelo k redundancím v získaných datech, ale ani příliš málo podrobný, aby mohly být zaznamenány změny vybraného prvku. Interval záznamu dat je parametr, který poukazuje na to, v jakém časovém kroku mohou být data zaznamenávána. Interval záznamu souvisí s měřenými prvky, které mají stanoveny hlavní termíny svého zaznamenání.

Bezpečnost je požadavek, který je velmi obtížné splnit, ale je třeba, aby uzly byly v co největší míře chráněny proti odcizení, a tak musí být využity všechny dostupné možnosti, které přispějí ke zvýšené ochraně uzlů. Mezi tyto možnosti se počítá: umístění uzlů vysoko nad zemským povrchem, na neviditelném špatně dostupném místě, na oploceném pozemku nebo pod dohledem kamery.

Majetkové poměry hrají roli při umístování uzlů bezdrátové sensorové sítě na soukromých pozemcích, kde musí majitel souhlasit s jejich umístěním na jeho pozemek.

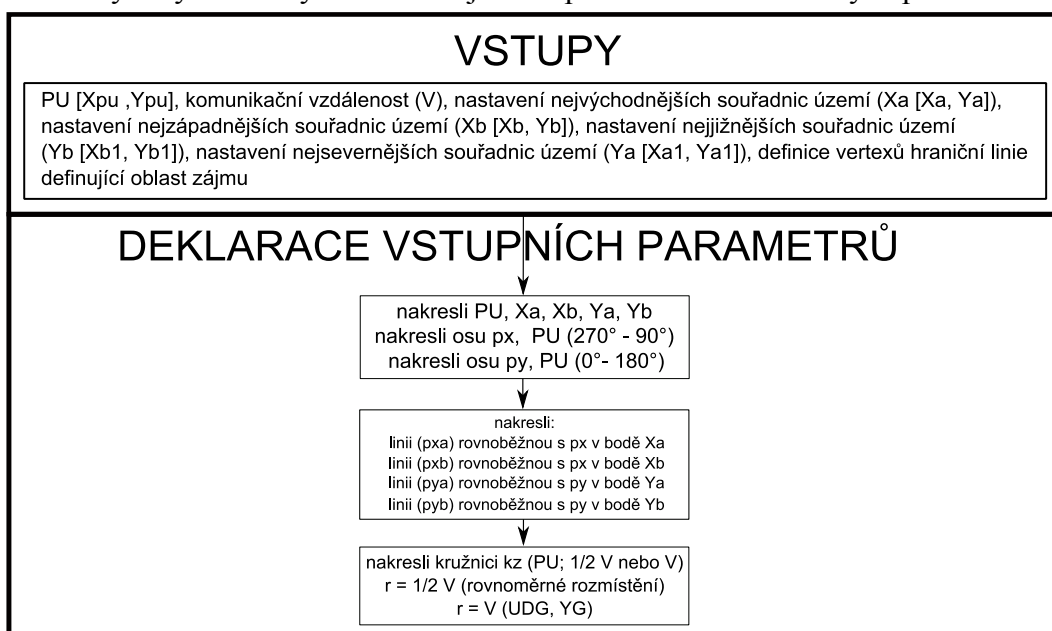
## **5.2 Vlastní algoritmy pro rozmístění uzlů**

Bylo stanoveno, že budou vytvořeny tři algoritmy navrhuující rozmístění uzlů bezdrátové sensorové sítě v terénu. První bude sloužit pro návrh rovnoměrného

rozmístění uzlů v terénu. Další dva algoritmy budou využívat navržených faktorů, teorie grafů a možností geografických informačních systémů.

Všechny algoritmy mají determinované základní vstupy, od nichž se odvíjí jejich konstrukce. Algoritmy vychází ze znalosti hranice regionu zájmu – definice jeho extrémních bodů (nejsevernějšího (Ya), nejvýchodnějšího (Xa), nejjižnějšího (Yb) a nejzápadnějšího (Xb)). Dále musí být známa poloha prvního uzlu (PU), který bude uzlem sběrným, poslední známou je maximální spolehlivá komunikační vzdálenost (V).

Pro lepší orientaci v prostoru regionu zájmu jsou známy i souřadnice os x a y, jejichž počátek je v místě, kde se nachází první (sběrný, počáteční) uzel (PU). Kolem tohoto uzlu je zkonstruována kružnice (kz) o poloměru maximální komunikační vzdálenosti (V). Tyto parametry jsou nazvány jako vstupní a jsou definovány vždy na začátku algoritmu (obr. 29). Každý algoritmus je založen na konstrukčních pravidlech jiného grafu, a tak pokračuje dále samostatně a končí úspěšně nebo neúspěšně. Úspěšný konec je takový, ve kterém jsou všechny uzly umístěny v oblasti zájmu na podkladě nadefinovaných podmínek.



Obr. 29. Vstupy do algoritmů společně s deklarací základních proměnných, zdroj: vlastní tvorba

### 5.2.1 Rovnoměrné rozmístění uzlů v terénu

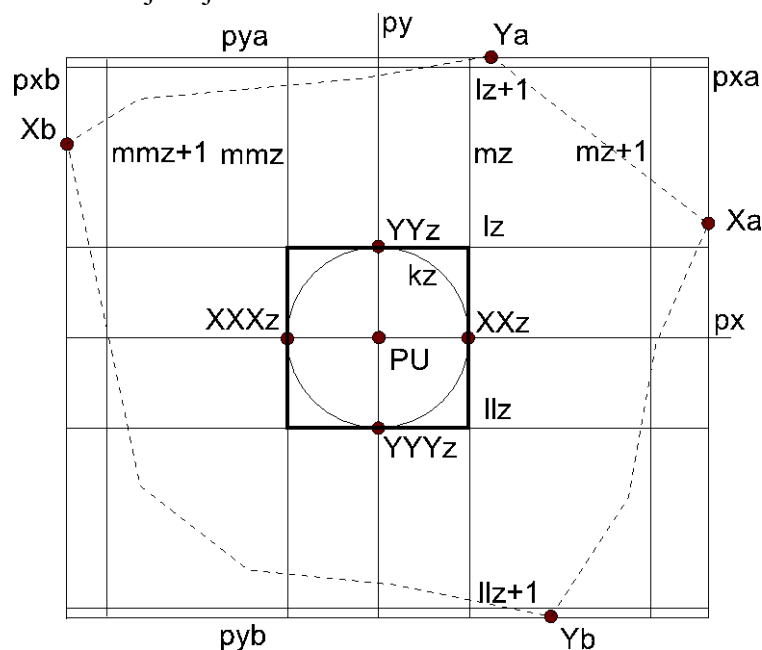
Požadavky na rovnoměrné rozmístění uzlů v terénu spočívají v definování:

- maximální spolehlivé komunikační vzdálenosti (V),
- pozici počátečního sběrného uzlu (PU).

Rovnoměrné rozmístění uzlů v terénu je podmíněno tvorbou gridové matice. Délka hrany čtverce je shodná s maximální spolehlivou komunikační vzdáleností. Ve středu základního čtverce je umístěn počáteční uzel, od nějž se odvíjí distribuce dalších uzlů v terénu. Předpokládá se, že uzly se umísťují vždy do středů čtverců. Komunikace probíhá tak, že všechny sousední uzly spolu mohou přes kratší hrany komunikovat. V tomto případě je navržená komunikační vzdálenost přesně rovna té maximální



spolehlivé. Pouze čtverce, které mají více než 50 % ze své plochy v oblasti zájmu, jsou uvažovány pro umístění uzlu. Algoritmus začíná definicí polohy počátečního uzlu, kolem kterého je zkonstruována kružnice o poloměru odpovídajícímu polovině maximální spolehlivé komunikační vzdálenosti ( $kz$ ,  $r = 1/2 V$ ). Linie ( $mz$ ,  $mmz$ ,  $lz$  a  $llz$ ) procházejí průsečíky kružnice s osovým křížem. Od těchto linií jsou ve všech směrech hledány další, které jsou s nimi rovnoběžné a jsou konstruovány vždy ve vzdálenosti, která odpovídá maximální spolehlivé. Od nově nakreslených linií se proces konstrukce linií opakuje, dokud nejsou překročeny extrémní body ve všech směrech. Poté je vypočítán obsah čtverce o hraně odpovídající jeho maximální spolehlivé komunikační vzdálenosti. Dále je zjišťováno, které čtverce nejsou celou svou plochou v oblasti zájmu, a jestli tyto čtverce mají v oblasti zájmu více než 50 % své rozlohy. Do středu čtverců, které mají více než 50 % svojí rozlohy v oblasti zájmu, je umístěn uzel. Vykreslené uzly jsou spočítány, čímž je určen počet uzlů, který by měl být ideálně umístěn v oblasti zájmu. Rozložení bodů, linií a jejich popisů je ukázáno na obrázku 30. Celý algoritmus určující rovnoměrné rozložení uzlů v oblasti zájmu je v Příloze 6.



Obr. 30. Princip vykreslení gridu s lomovými body při rovnoměrném rozmístění, zdroj: vlastní tvorba

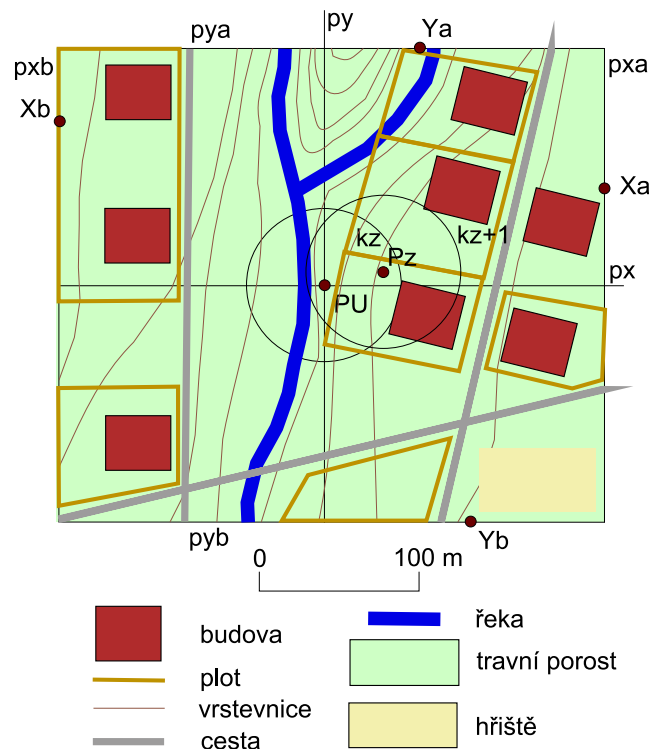
### 5.2.2 Rozmístění uzlů na podkladě Jednotkového grafu

Při hledání pozic pro umístění uzlů v terénu je třeba znát následující parametry:

- maximální spolehlivou komunikační vzdálenost ( $V$ ),
  - pozici počátečního sběrného uzlu ( $PU$ ),
  - počet uzlů v oblasti zájmu ( $N$ ),
  - pokrytí země v oblasti zájmu,
  - známé pozice významných překážek (zděných budov, terénních zlomů),
- 
- umístění uzlů v definované výšce nad zemským povrchem,

- umístění uzlů do chráněných (oplocených) oblastí.

Pokud je definována pozice počátečního uzlu je vykreslena hranice jeho spolehlivé komunikační vzdálenosti pomocí kruhového bufferu kolem něj. Alespoň jeden další uzel musí být situován v tomto bufferu. Tento uzel bude komunikačním sousedem počátečního uzlu. Pozice tohoto uzlu by se měla nacházet v oblasti, která je chráněná, což je v tomto případě oblast oplocená. Další podmínkou je, že se nebudou nacházet žádné významné překážky jako zděné stavby a terénní zlomy mezi počátečním uzlem a potenciální polohou uzlu. V navrženém algoritmu si uživatel může vybrat v jakém směru ( $0^\circ - 360^\circ$ ) a vzdálenostním rozmezí od počátečního uzlu chce nově umisťovaný uzel lokalizovat. Pokud je potenciální poloha uzlu mimo oplocený pozemek, tak si zvolí, jestli uzel umístí zde, nebo jeho polohu bude hledat v „bezpečnější“ části regionu zájmu. Významné překážky v cestě nejsou vyžadovány z důvodu vyšší spolehlivosti přenosu dat, bude uživatel odkázán na to, aby potenciální polohu uzlu hledal v jiné oblasti. Pokud je potenciální poloha uzlu vyhovující, je jí přidán nový atribut, který určuje pokrytí země místa nově umístěného uzlu. Dále je vyšetřováno, jestli se potenciální poloha uzlu nachází v zájmové oblasti. Pokud ano je tento uzel přidán a stává se komunikačním sousedem počátečního uzlu. Uživatel si poté zvolí, jestli chce situovat další uzel, který bude komunikovat s počátečním uzlem, nebo uzel, který bude komunikovat s nově vloženým uzlem. Poté se bude opakovat výše popsany postup a bude hledána potenciální pozice dalšího uzlu v oblasti zájmu. Celý proces probíhá až do chvíle, než jsou vyčerpány všechny uzly, které má uživatel k dispozici. Nákres ukazující situaci umisťování uzlů v terénu s popisy odpovídajícími popisům v samotném algoritmu (Příloha 7) jsou znázorněny na obrázku 31.



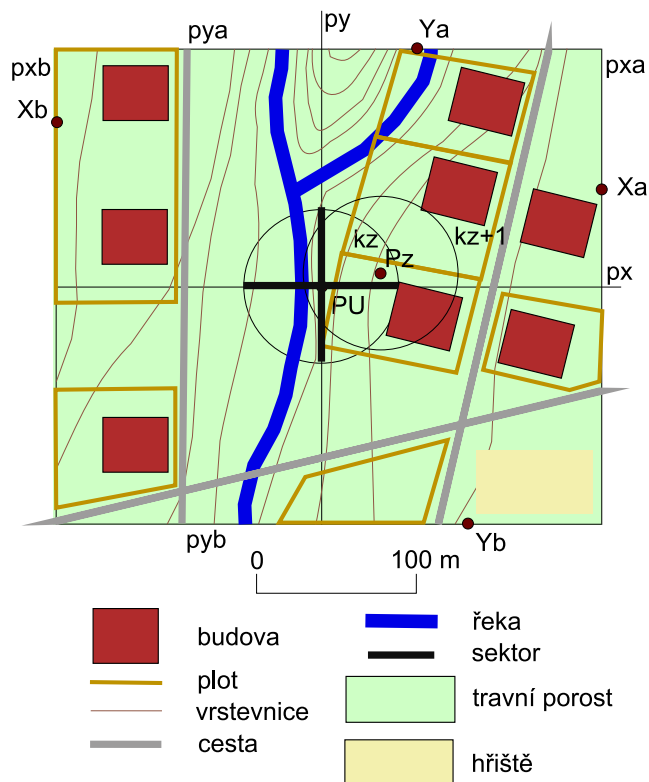
Obr. 31. Nákres umístění uzlů s popisy v terénu na podkladě Jednotkového grafu, zdroj: vlastní tvorba

### 5.2.3 Rozmístění uzlů na podkladě Yao grafu

Parametry, které musí být známy pro distribuci uzlů na podkladě Yao grafu, jsou:

- maximální spolehlivá komunikační vzdálenost (V),
  - pozice počátečního sběrného uzlu (PU),
  - počet sektorů (S) (velikost úhlu),
  - počet uzlů v oblasti zájmu (N),
  - známé pozice významných překážek (zděných budov, terénních zlomů),
- 
- umístění uzlů v definované výšce nad zemským povrchem,
  - umístění uzlů do chráněných (oplocených) oblastí.

Rozmístování uzlů pomocí tohoto grafu začíná u počátečního uzlu (PU), ke kterému je vytvořen buffer o poloměru odpovídajícím maximální spolehlivé komunikační vzdálenosti (V). V Yao grafu je nutné rozdělit prostor kolem uzlu na sektory. Všechny sektory musí mít stejnou velikost úhlu. Předpokládá se, že umístování uzlů začíná od severu (azimut odpovídá  $0^\circ$ ) a pokračuje východním směrem (po směru hodinových ručiček). Uživatel si zvolí, v jaké vzdálenosti a jakém úhlu by chtěl potenciální uzel umístit. Vždy je třeba dbát na to, aby tyto údaje byly menší než maximální spolehlivá komunikační vzdálenost a současně, aby odpovídaly úhlové údaje jednotlivým výsečím. Dále je sledováno, jestli se potenciální poloha uzlu nachází v oplocené oblasti. Pokud ano, algoritmus pokračuje dále. Pokud ne, tak se dotáže, jestli uživatel chce tuto polohu ponechat, nebo umístit uzel jinde. Dalším krokem je testování, jestli se mezi počátečním uzlem a potenciální polohou uzlu nachází překážky v podobě zděných budov nebo terénních zlomů. Pokud se nenachází, je v potenciální poloze přidán atribut o pokrytí země a uživatel je dotázán, jestli chce na pozemek s tímto využitím země uzel umístit. Nyní se zkoumá, jestli je potenciální poloha uzlu v oblasti zájmu. Pokud ano, je na toto místo umístěn uzel. Následuje testování, jestli počet umístěných uzlů dosáhl počtu uzlů, který byl k rozmístění v oblasti zájmu nadefinován, pokud tento počet nebyl dosažen, tak se určí, kolem kterého uzlu uživatel chce umístit další uzel a celý proces se opakuje. Obrázek 32 znázorňuje proces umístování uzlů v terénu s popisy, které jsou využity i ve vlastním algoritmu (Příloha 8).



Obr. 32. Proces rozmístování uzlu v terénu s popisky, zdroj: vlastní tvorba

### 5.3 Testování navrženého algoritmu rozmístěním konkrétních bezdrátových uzlů v terénu

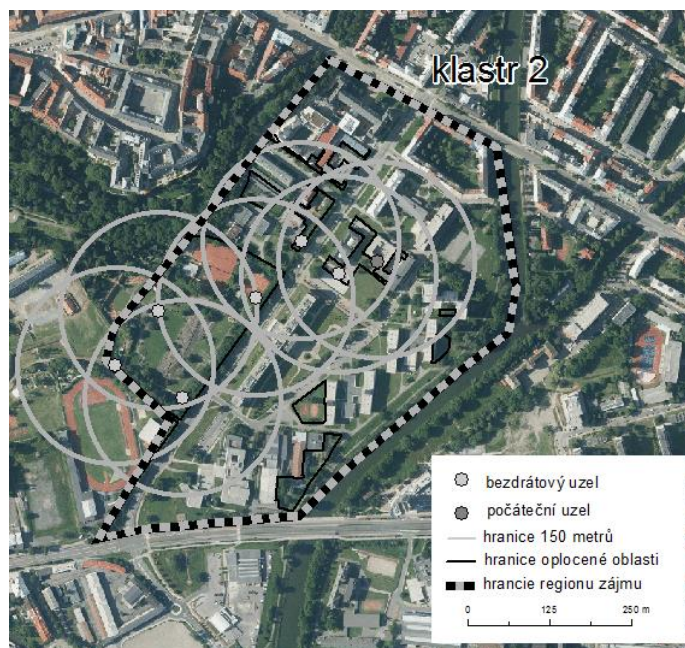
Bylo rozhodnuto, že v rámci olomoucké bezdrátové sensorové sítě budou uzly rozmístěny ve dvou klastrech, z nichž jeden bude sloužit jako testovací. Tento testovací klastr je označen číslem jedna a nachází se v areálu Vědeckotechnického parku na ulici Šlechtitelů na okraji města Olomouc, v městské části Holice. Druhý klastr se nachází v areálu vysokoškolských kolejí a Přírodovědecké fakulty na ulici 17. listopadu v centru města Olomouc. Obrázek 33 ukazuje nejenom vzájemnou polohu klastrů v Olomouci, ale také rovnoměrné rozložení uzlů v terénu, počáteční uzly jsou vždy umístěny tam, kde se nachází brána bezdrátové sensorové sítě, a tak tento bod slouží jako odrazový pro další rozmístování uzlů. Kromě počátečního bodu musela být stanovena i maximální spolehlivá komunikační vzdálenost, která činí 150 metrů a počet uzlů (13). Pokud budou uzly rozmístěny rovnoměrně, tak pro pokrytí prvního klastru by stačily čtyři, pro pokrytí druhého klastru, jehož rozloha je 2,4krát vyšší, by bylo třeba při stejné konfiguraci a rovnoměrném rozmístění uzlů využít 12 uzlů.



Obr. 33. Rovnoměrné rozmístění uzlů v klastru jedna a klastru dva v Olomouci, zdroj: vlastní tvorba, podklad ortofoto ČÚZK

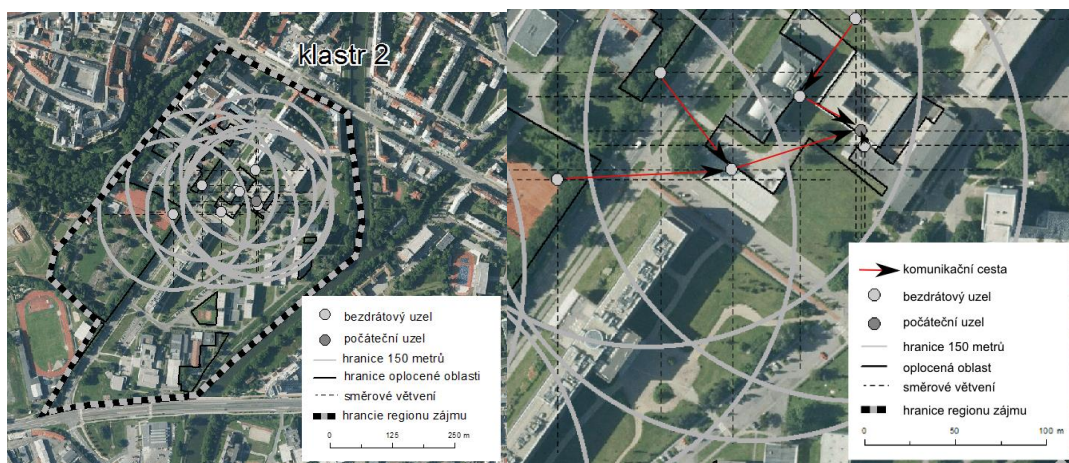
Podle dalších dvou algoritmů budou uzly umísťovány pouze ve druhém klastru, z důvodu příliš malé plochy a téměř nepřítomnosti překážek v prvním klastru.

Pokud jsou uzly umístěny podle algoritmu založeném na Jednotkovém grafu, tak jejich umístění je ovlivněno polohou zvoleného počátečního bodu, který se nachází za oknem kanceláře 2.27 na Katedře geoinformatiky, určením maximální spolehlivé komunikační vzdálenosti (150 metrů) a determinace počtu uzlů v terénu (6) (obr. 34). Pokud bude využito k rozmístění uzlů ve vybrané lokalitě šesti uzlů, které budou umístěny podle algoritmu založeném na Jednotkovém grafu, bude 62,69 % zájmového území pokryto signálem z těchto uzlů, přičemž se všechny uzly nacházejí v oplocených oblastech. Dále je dbáno na nepřítomnost významných překážek v jejich komunikační cestě. Celá bezdrátová sensorová síť je v ukázkovém příkladě koncipována tak, že je větvena do určitých směrů, které jsou dle jejího návrháře pro signál neoptimálnější. Nevýhodou tohoto větvení je, že existuje pouze jedna komunikační cesta do počátečního bodu, tak může docházet k výpadkům přenosu dat v celé této větvi a následným ztrátám dat.



Obr. 34. Rozmístění uzlů v oblasti zájmu na podkladě algoritmu založeném na Jednotkovém grafu, zdroj: vlastní tvorba, podklad ortofoto ČÚZK

Pokud budou uzly bezdrátové sensorové sítě umísťovány na podkladě algoritmu založeném na Yao grafu, je třeba využít výše zmíněných údajů o pozici počátečního bodu, maximální spolehlivé komunikační vzdálenosti a počtu uzlů. Dále je třeba přidat údaj o počtu sektorů, které budou kolem uzlů vytvořeny. Bude využito čtyř sektorů, což určuje, že jsou nastaveny čtyři komunikační cesty vedoucí od každého uzlu. Při umístění šesti uzlů v oblasti zájmu bylo stanoveno, že budou pokryty čtyři sektory kolem počátečního uzlu. Problém s umístěním uzlu nastal v první čtvrtině, kde se mezi počátečním uzlem a jakoukoli polohou v tomto kvadrantu nachází zděná budova, a proto není jisté, jestli by komunikace probíhala spolehlivě. Bylo stanoveno, že tento kvadrant nebude osazen a uzel bude využit při dalším větvení západním směrem tak, aby mohlo docházet k podrobnějšímu monitoringu okolí silnice 17. listopadu. Při rozložení uzlů v oblasti zájmu na podkladě Yao grafu a v konfiguraci, která je ukázána na obrázku 35. Signálem je pokryto pouze 25,04 % území z oblasti zájmu. U žádného uzlu nejsou osazeny všechny sektory z důvodu přítomnosti překážek nebo nepřítomnosti oplocené oblasti, která je preferována pro umístění uzlu. Tento graf umožňuje vytváření záložních cest, avšak hledání pozic nových uzlů je ztíženo směrovým dělením, což zapříčiňuje, že uzly jsou umísťovány velmi blízko sebe.



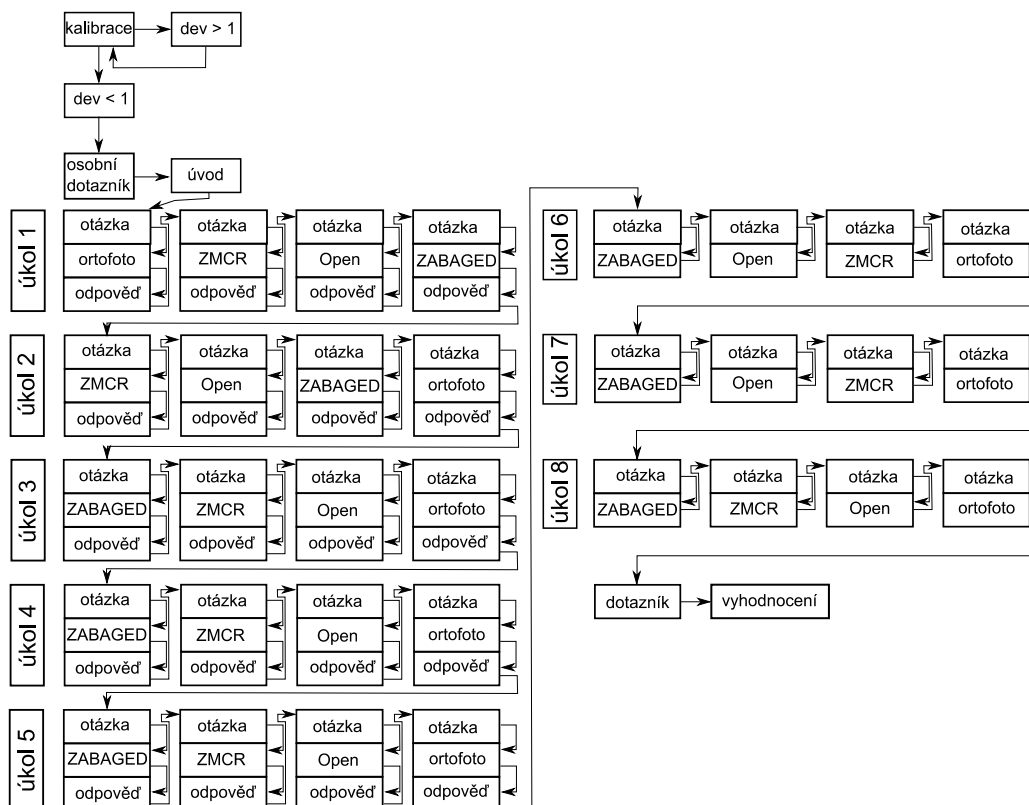
Obr. 35. Rozmístění uzlů v oblasti zájmu na podkladě algoritmu vycházejícího z Yao grafu, vlevo ucelený pohled na oblast zájmu, vpravo rozložení uzlů a jejich vzájemná komunikace, zdroj: vlastní tvorba, podklad ortofoto ČÚZK

Protože jsou uzly umisťovány ve městě bez zjevných terénních překážek, nebylo využito digitálního modelu reliéfu pro jejich lokalizaci. K vizualizaci uzlů v terénu bylo využito ortofota, jeho využití k tomuto kroku je rozvedeno v následující kapitole.

## 5.4 Mapový podklad vhodný pro vizualizaci uzlů

### 5.4.1 Návrh eye-tracking experimentu

K dotazníkovému šetření byly vybrány čtyři mapové podklady – Základní mapa České republiky (ZMCR), polohopisná složka ze Základní báze geografických dat (ZABAGED), ortofoto a OpenStreetMap (Open), které byly doplněny o tematickou složku. Celý dotazník se skládal z úvodního vyplnění osobních informací, následovala prvotní část seznamující participanty s principem přenosu dat v bezdrátových sensorových sítích. Tento text sloužil jako srovnávací bod pro jednotlivé účastníky, protože každý účastník má jiné znalosti tohoto tématu, a proto při započítí dotazování musí být účastníkům představen stejný úhel pohledu. Samotný dotazník se skládal ze statické a interaktivní části. Ve statické části bylo položeno pět otázek. Každá otázka byla položena čtyřikrát z důvodu využití všech čtyř topografických podkladů, které byly řazeny tak, aby prvně byla otázka odpovídána na podkladu, na kterém je odpověď nejméně zřejmá. Schéma průběhu celého experimentu je ukázáno na obrázku 36. Experimentu se zúčastnilo 16 respondentů, jejichž podrobnější specifikace je uvedena v elektronické verzi přílohy na DVD ve složce eye\_tracking, kde se nachází i celé znění dotazníku doplněné o mapové podklady, na jejichž základě byl experiment prováděn.



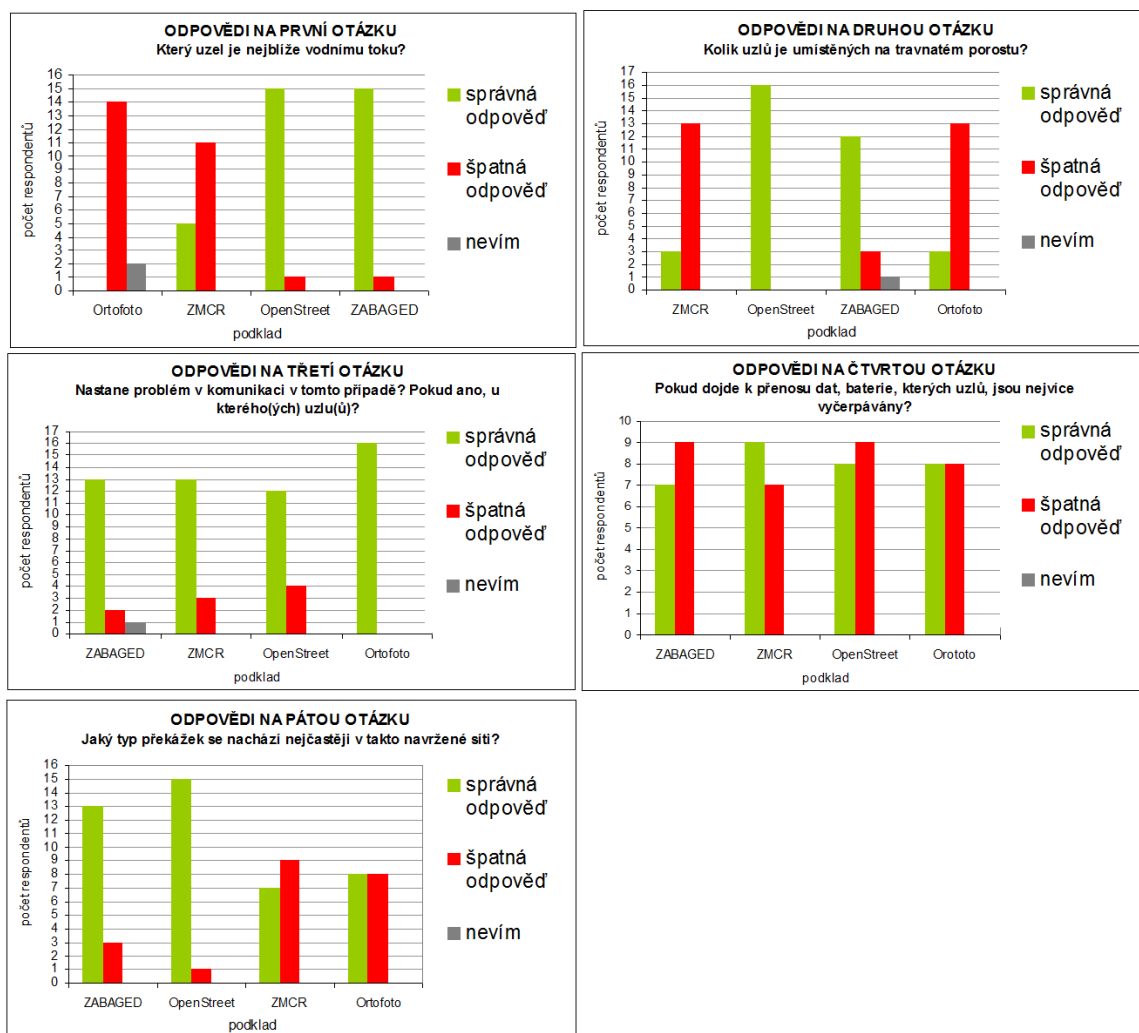
Obr. 36. Návrh eye-tracking experimentu, zdroj: vlastní tvorba

#### 5.4.2 Výsledky eye-tracking experimentu

Výsledky byly rozděleny do dvou částí – první skládající se z vyhodnocení statických otázek a druhé vyhodnocující interaktivní úlohy.

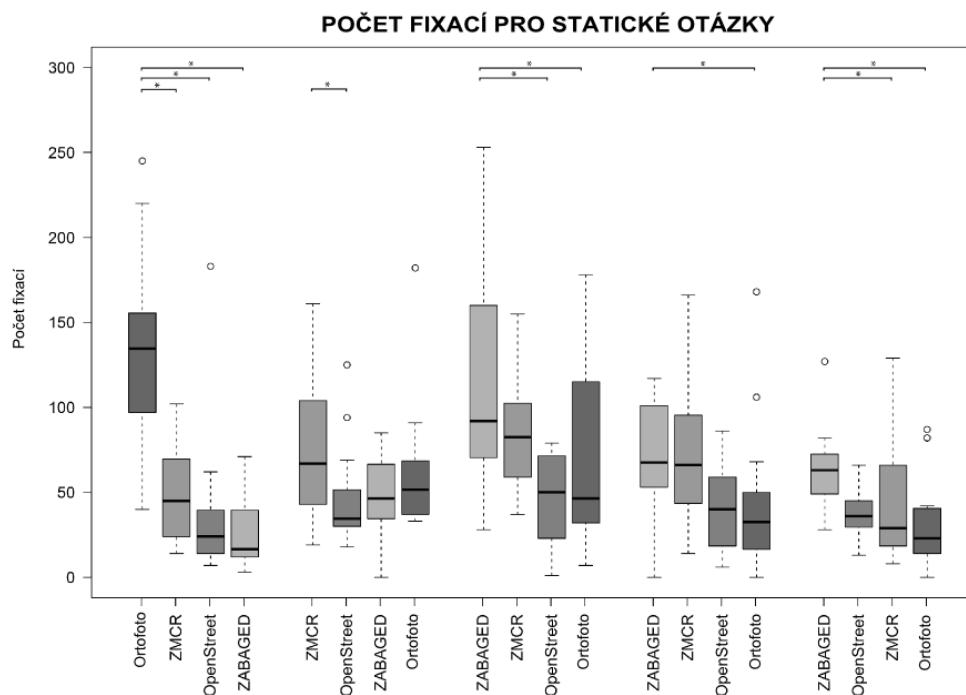
Nejprve bylo pohlíženo na správnost odpovědí respondentů při statických otázkách, na které respondent odpovídal 20krát. Vyhodnocení bylo rozděleno do tří kategorií – správně, špatně, nevím. Průměrná úspěšnost odpovědí jednoho respondenta byla 71,31 %. Nejvíce správných odpovědí bylo 18 a nejméně 9. U první otázky byl zaznamenán efekt učení, kdy v prvním případě byl zaznamenán nejvyšší počet špatných odpovědí, který se snižoval. Druhá otázka byla specifická, protože se odpověď vztahovala ke konkrétnímu podkladu, a tak efekt učení nemohl být zaznamenán, což dokazuje stejný počet špatných odpovědí v prvním i posledním případě. V dalších otázkách bylo zaznamenáno, že respondent buď pochopil problematiku bezdrátových sensorových sítí a bez ohledu na podklad odpovídal správně, nebo tuto problematiku korektně nepochopil a odpovědi byly špatné. Výsledné odpovědi na otázky jsou prezentovány na obrázku 37.





Obr. 37. Odpovědi na dotazníkové statické otázky, zdroj: vlastní měření

Bylo vypočítáno pět eye-tracking metrik (trvání úkolu, počet fixací, délka prohlížené trasy, frekvence fixací a průměrná délka fixace) pro data o pohybu očí. Frekvence fixací a průměrná doba trvání nebyly statisticky významné. Statisticky významné rozdíly v jednotlivých podkladech byly zjištěny při použití metrik – trvání úkolu, počtu fixací a délce prohlížené trasy. Ve všech případech byly počítány mediánové hodnoty. Analýza dat proběhla na podkladě Wilcoxonova testu. Statisticky významný rozdíl byl nalezen ve všech případech mezi prvně a posledně prezentovaným podkladem, z čehož je zřejmé, že respondenti strávili nejvíce času nad prvně zobrazeným podkladem. Výsledky jsou znázorněny v boxplotu na obrázku 38. Statisticky významné rozdíly jsou na obrázku označeny hvězdičkou. Atypické výsledky přinesla druhá otázka, protože pro respondenty byl pro nalezení zatravněné oblasti nejvíce komplikovaný podklad ve formě ortofota, kde byl počet fixací výrazně větší než v podkladech mu předcházejících. Byly zde zařazeny pouze výsledky počtu fixací, protože zjištěné statistické rozdíly byly velmi malé. Všechny metriky spolu korelují, a tak výsledky jsou velmi podobné.



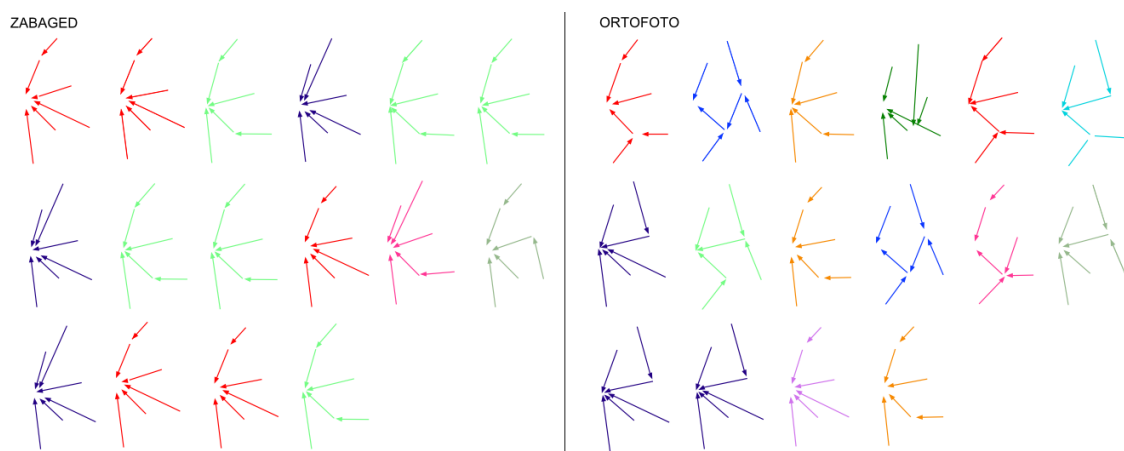
Obr. 38. Počet fixací na jednotlivé mapové podklady ve statických otázkách, zdroj: vlastní měření

V další fázi vyhodnocení dat se předpokládalo, že respondent se zaměří na místa, kde jsou situovány komponenty bezdrátové sensorové sítě, a tak v programu Ogama byly vytvořeny oblasti zájmu kolem všech šesti uzlů a brány. Tyto oblasti byly vyznačeny pomocí kruhu s centrem v bodě, kde se uzel nebo brána nachází. Poloměr kruhu byl stanoven na 50 metrů, a tak všechny fixace v tomto kruhu byly započítány k vybranému uzlu. Nejvyšší počet fixací byl zjištěn na prvně zobrazeném podkladu, posledně zobrazený podklad měl nejmenší počet fixací pouze u úlohy číslo čtyři a pět. Nejvíce byla ve všech případech pozornost soustředěna na bránu, ke které byla data z uzlů směřována. Vysoké počty fixací byly pozorovány i u uzlů, které představovaly správnou odpověď. U otázky čtyři byl u první správné odpovědi nejvyšší počet fixací, zatímco u druhé korektní odpovědi byl počet fixací až třetí nejvyšší, což ovšem poukazovalo na to, že respondenti tento uzel ihned vyhodnotili tak, že se jedná o správnou odpověď. Počty fixací v oblastech zájmu jsou zobrazeny na obrázku 39.

		Fixace v						
		Uzel 1	Uzel 2	Uzel 3	Uzel 4	Uzel 5	Uzel 6	Brána
Úkol 3	ZABAGED	447	26	158	53	190	170	406
	ZMCR	250	68	107	37	93	21	508
	OpenStreet	127	36	34	17	70	30	298
	Ortofoto	145	96	80	26	135	37	276
	Počet fixací	969	226	379	133	488	258	1488
Úkol 4	ZABAGED	358	186	58	61	146	85	312
	ZMCR	215	113	55	33	84	38	174
	OpenStreet	136	39	8	18	22	22	131
	Ortofoto	135	67	11	21	22	27	85
	Počet fixací	844	405	132	133	274	172	702
Úkol 5	ZABAGED	143	69	37	11	103	2	165
	OpenStreet	87	33	14	7	22	10	207
	ZMCR	83	28	24	15	28	11	144
	Ortofoto	43	40	21	11	27	1	132
	Počet fixací	356	170	96	44	180	24	648

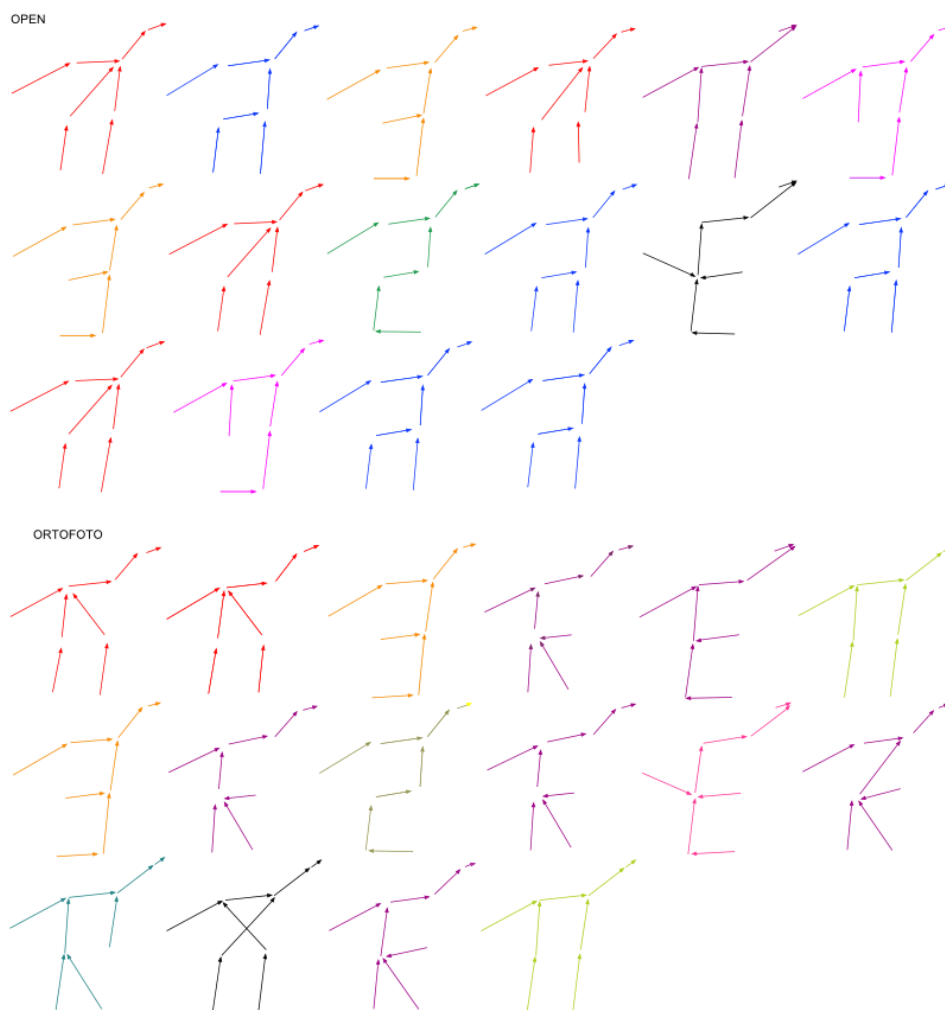
Obr. 39. Počet fixací na okolí uzlů ve třech statických úlohách, které se tematicky více zaměřovaly na bezdrátové senzorové sítě, zdroj: vlastní měření

Interaktivní úkoly prověřily respondenty s ohledem na korektnost pochopení problematiky a umožnily identifikovat, která omezení působící na přenos dat v reálném terénu jsou upřednostňována. Experiment probíhal nad vybranými mapovými podklady v Google kreslení. Uživatel měl v prvním a druhém úkolu nakreslené uzly v terénu a měl je efektivně propojit. V posledním úkolu uživatelé volili i pozice uzlů v terénu. Uzly na těchto pozicích museli poté i propojit. Všechny interaktivní úkoly byly vyhodnoceny kvalitativně. V prvním interaktivním úkolu bylo v oblasti umístěno pro meteorologický monitoring šest uzlů a jedna brána, a tak se nabízelo až 720 možností jejich propojení. Respondenti nakreslili na čtyřech mapových podkladech 17 různých grafů, což značí, že bylo využito pouze 2,36 % ze všech možností, je třeba poznamenat, že ne všechna propojení by vedla ke správnému výsledku a data směřovala k bráně. Nejvíce různých propojení bylo zaznamenáno na ortofotu, nejnižší rozmanitost byla na podkladu ZABAGED (obr. 40). Stejně návrhy v rámci jednoho mapového podkladu jsou vyznačeny shodnou barvou. Pořadí jednotlivých respondentů na prvním i druhém podkladu si odpovídá.



Obr. 40. Propojení na podkladech ZABAGED a ortofoto, zdroj: vlastní tvorba dle odpovědí respondentů

V dalším úkolu bylo zobrazeno osm uzlů pro sledování svahu náchylného k erozi. Propojení těchto uzlů bylo možné 40 320 způsoby, tento počet je ovlivněn jednak třísetmetrovou komunikační vzdáleností a jednak tím, že ne všechna propojení vedou k přenosu dat do brány. Bylo nakresleno 15 různých možností propojení napříč všemi respondenty a všemi mapovými podklady. Nejvíce rozdílných návrhů komunikačních cest bylo zaznamenáno na ortofotu a ZMCR (obr. 41), nejméně jich bylo na OpenStreet mapovém podkladu. Stejně návrhy v rámci jednoho mapového podkladu jsou vyznačeny shodnou barvou. Pořadí jednotlivých respondentů na prvním i druhém podkladu si odpovídá.



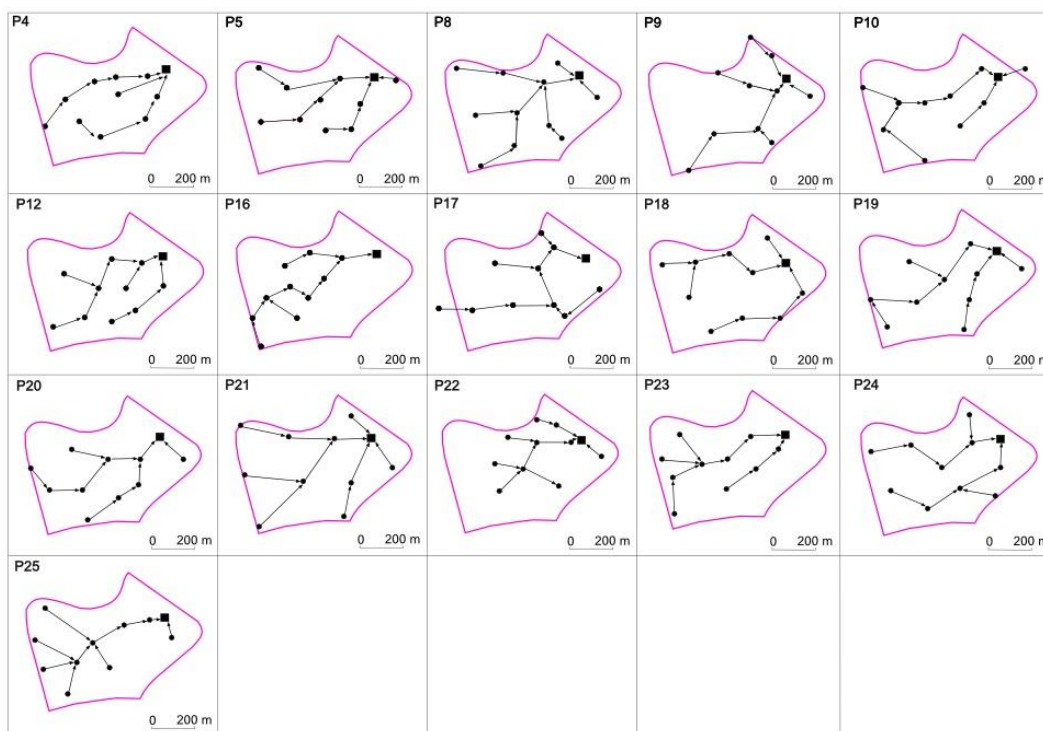
Obr. 41. Propojení na podkladech OpenStreetMap a ortofoto, zdroj: vlastní tvorba dle odpovědi respondentů

Komunikační limit donutil respondenty zaměřit pozornost na měřítko mapy (tab. 9). Rozdílný počet navržených komunikačních cest závisel na stupni generalizace mapového podkladu, efektu učení a preferencích respondenta, které se odvíjely od toho, co dle jeho názoru nejvíce ovlivňuje přenos dat v bezdrátové senzorové síti.

Tab. 9. Počet fixací na měřítko mapy v interaktivních úlohách, zdroj: vlastní měření

Počet fixací na měřítko					
Úkol 6		Úkol 7		Úkol 8	
ZABAGED	1	ZABAGED	122	ZABAGED	68
OpenStreet	0	OpenStreet	30	ZMCR	8
ZMCR	0	ZMCR	8	OpenStreet	13
Ortofoto	0	Ortofoto	1	Ortofoto	1

Úkol osm se zaměřil na preference respondenta s umístěním uzlu, protože respondenti umísťovali 10 uzlů do oblastí zájmu, byli limitováni umístěním brány a spolehlivou komunikační vzdáleností a měli preferovat oplocené oblasti. Nákrasy od uživatelů jsou zobrazeny na obrázku 42.

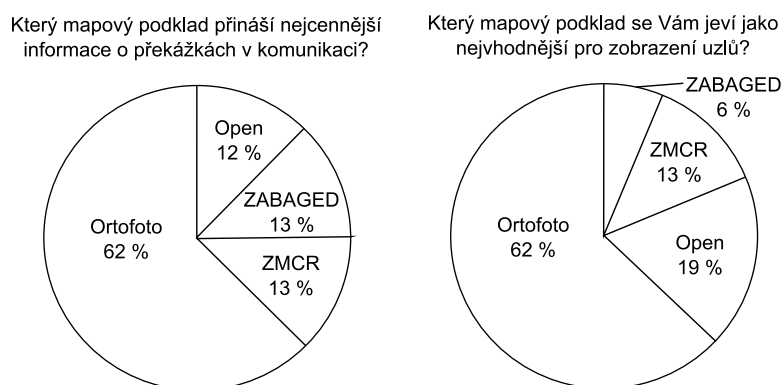


Obr. 42. Schémata rozmístění uzlů a návrhu komunikačních toků jednotlivými respondenty v osmém úkolu, zdroj: vlastní tvorba

Nejvíce sledovanou oblastí byla brána a pravý horní roh. Kromě jednoho respondenta, poznali všichni oblast zájmu (areál vysokoškolských kolejí Univerzity Palackého) a uvedli, že ji znají dobře. ZABAGED a OpenStreetMap v podkladu zobrazili pouze zděné budovy, Základní mapa ČR přinesla informace o terénu a ortofoto zobrazilo reálnou situaci v terénu. Předpokládalo se, že nákrasy budou podobné na podkladě ZABAGEDu a OpenStreetMapy, protože respondenti více dbali na to, co viděli v mapě a už si příliš neuvědomovali, že musí brát ohled i na vzdálenost, počet komunikačních

sousedů, záložní komunikační cesty atd. Tyto faktory je možné do rozmístování zahrnout i bez ohledu na mapový podklad. Návrhy byly podobné ve 44 % v šestém úkolu, v sedmém úkolu byly návrhy podobné v celé polovině případů. Respondenti zaměřili svou pozornost na překážky a vzdálenost mezi uzly v těchto případech. V případě zobrazení terénních charakteristik je zřejmé, že větší roli než komunikační vzdálenost hrál terén společně se zděnými budovami v úkolu číslo šest, avšak v úkolu číslo sedm pouze 56 % respondentů se při návrhu vyhnulo zřejmému terénnímu zlomu, ale maximální spolehlivá komunikační vzdálenost byla v 95 % dodržena. V posledním úkolu respondenti umísťovali uzly, jímž byla na úkor hledání oplocených oblastí snížena pozornost na překážky v komunikační cestě. Rozptyl umístění uzlů do oplocených oblastí napříč všemi respondenty a všemi úlohami se pohyboval od 59 % do 66 %.

Po poslední otázce následoval dotazník, který se zaměřoval na zpětnou vazbu od respondentů. Poslední otázka byla zaměřena na to, jaký mapový podklad by respondenti volili, kdyby chtěli znát informace o překážkách, a který by zvolili jako podklad pro mapu zobrazující rozložení uzlů v terénu. Výsledky jsou ukázány na obrázku 43.



Obr. 43. Výsledky dotazníkového šetření provedeného po vyplnění všech úkolů, zdroj: vlastní měření

Na počátku experimentu byla snaha sjednotit respondenty se zaměřením se na definovanou problematiku z tematického hlediska. Úkoly nebyly časově omezeny, což přispělo k tomu, že respondenti, kteří mají problém s orientací v mapě, měli možnost se s ní seznámit. Problém byl spatřován v efektu učení, protože mnohokrát nebylo možné jednoznačně říci, jestli respondenti již neznali oblast při poslední úloze, avšak v zadání bylo, že se mají řídit mapovým podkladem, a tak i z časů vyplňování a počtu fixací je možné konstatovat, že respondenti se skutečně mapovým podkladem řídili.

Distribuce uzlů v třídímnímním prostředí je ovlivněna mnoha faktory viz kapitola 5.1 Faktory ovlivňující rozmístění uzlů ve venkovním prostředí. Dle respondentů, kteří byli uvedeni do problematiky bezdrátových senzorových sítí, byly stanoven podklad pro vizualizaci uzlů a podklad, který přináší největší množství informace pro umístění uzlů v terénu. Ortofoto totiž umožňuje lepší přehled o situaci v terénu. Nejvíce byla zaměřena pozornost na zděné budovy jako překážky ovlivňující přenos dat.

## 6. DC3 - KONFIGURACE BEZDRÁTOVÉ SENZOROVÉ SÍTĚ V OLOMOUCI

V této kapitole je sumarizováno nastavení bezdrátové senzorové sítě, které je rozděleno na dvě části. První, která testuje nasazení bezdrátové senzorové sítě v Olomouci, a druhou, která pojednává o databázovém úložišti dat.

### 6.1 DC3a - Testování bezdrátové senzorové sítě v Olomouci

Nejprve bylo nutné seznámit se s nasazovanou technologií a provést její nasazení v olomouckém prostředí. O konkrétně využívané technologii pro olomoucký monitoring již bylo pojednáváno v kapitole 4.6.1 Modely uzlů Waspnote Plug&Sense. Shrnutí základních informací o bezdrátové senzorové síti nasazené v Olomouci je uvedeno v tabulce 10.

Tab. 10. Základní parametry olomoucké bezdrátové senzorové sítě

Výčet parametrů E - BOSS	Parametry E - BOSS
Aplikace	Meteorologický monitoring
Architektura	klastrová
Počet klastrů	2
Lokalizace prvního regionu zájmu	Olomouc - Holice
Lokalizace druhého regionu zájmu	Olomouc centrum
Rozloha prvního regionu zájmu	0,082 km <sup>2</sup>
Rozloha druhého regionu zájmu	0,2 km <sup>2</sup>
Počet uzlů v prvním regionu zájmu	4
Počet uzlů v druhém regionu zájmu	6
Výška senzorů nad zemským povrchem	2 m, senzory orientovány na severozápad

#### 6.1.1 Upevnění uzlů Waspnote Plug&Sense v terénu

Uzly byly prvně testovně nasazeny pouze ve druhém klastru ve dvou krátkých obdobích od 25. 9. do 8. 10. 2014, a od 8. 12. do 16. 12. 2014. Uzly byly umístěny do Botanické zahrady a rozária nedaleko Přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého. Při těchto testovacích měřeních bylo odzkoušeno upevnění uzlů na kmeny jehličnatých stromů tak, aby senzory upevněné na uzly byly situovány do výšky dvou metrů a orientovány na stejnou světovou stranu (severovýchod) (obr. 44). Toto umístění se jevilo jako nevhodné z důvodu podmínek, které nevyhovují meteorologickým měřením. Dále nebylo možné určit, do jaké míry jsou naměřené hodnoty ovlivněny fotosyntézou rostlin. Pro měření byly vytvořeny shodné podmínky na všech místech, tak hodnoty získané těmito uzly jsou vzájemně porovnatelné. Vyhodnocení těchto dvou krátkodobých měření je obsaženo v bakalářské práci Radka Dostála (Dostál, 2015).



Obr. 44. Umístění uzlu na strom, zdroj: vlastní fotografie

Ve druhé etapě byly uzly umístěny do prvního klastru, ve kterém byly situovány na dvouapůlmetrové dřevěné tyče tak, aby se senzory nacházely ve výšce dva metry nad zemským povrchem (obr. 45, vpravo). Instalace uzlů se senzory do tohoto prostředí byla provedena dne 9. 4. 2015 v první konfiguraci (data jsou využitelná až od 11. 4.). Druhá konfigurace byla uvedena do provozu dne 16. 9. 2015, od této doby byla v této konfiguraci bezdrátová sensorová síť v provozu do 13. ledna 2017. Pozice uzlů v druhé konfiguraci jsou označeny písmeny a znázorněny na obrázku 45, vlevo.



Obr. 45. Polohy uzlů v Holici od 3. 9. 2015, ukázka upevnění uzlu na dřevěné tyči v terénu, zdroj: vlastní tematická složka, ortofoto ČÚZK, vlastní fotografie

Bezdrátová sensorová síť byla opětovně nasazena v centru města (ve druhém klastru) od 16. 5. 2016, ale až od 19. 5. 2016 byla získávána plnohodnotná data. Senzory jsou situovány do výšky dvou metrů nad zemský povrch a připojeny k uzlům upevněným na tyč (obr. 46). Pouze jedna pozice v tomto klastru byla dlouhodobě v provozu. Na této tyči jsou od 17. 5. 2016 situovány i další senzory a datalogery využívané Katedrou geoinformatiky k meteorologickým měřením. Tyto senzory měří teplotu vzduchu, relativní vlhkost vzduchu, teplotu půdy a srážky. Data jsou rádiově posílána na server a zobrazována v aplikaci EnviroData.





Obr. 46. Polohy uzlů v centru města od 16. 5. 2016, ukázka upevnění uzlu na tyči v terénu, zdroj: vlastní tematická složka, ortofoto ČÚZK, vlastní fotografie

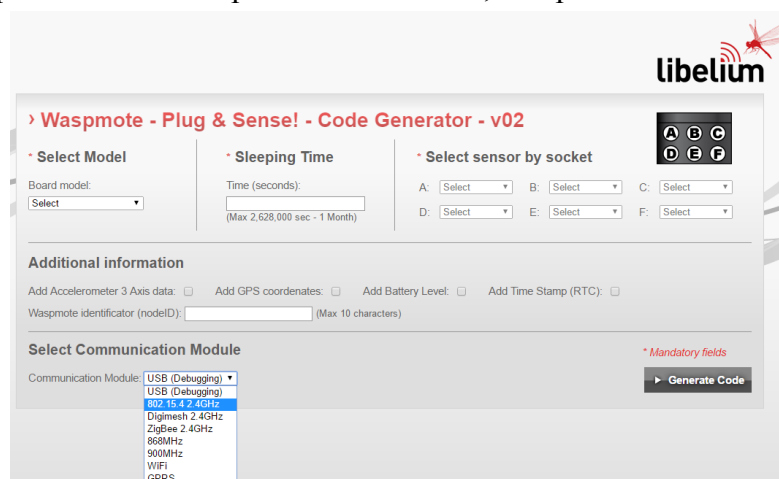
### 6.1.2 Komunikační protokoly

Pro uvedení uzlů bezdrátové sensorové sítě do provozu bylo nutné vytvořit protokoly, na jejichž podkladě bylo možné zprovoznit komunikaci buď mezi uzly navzájem, nebo mezi uzly a bránou za uživatelem stanovených podmínek.

Společnost Libelium nazývá své uzly pro venkovní použití Plug&Sense. Název odkazuje na jednoduchost používání této technologie a její snadnou konfiguraci. Pro lepší uživatelský komfort, který nevyžaduje programování od uživatele, byl vytvořen generátor kódu, který je dostupný pod tímto odkazem<sup>10</sup>. Náhled na jeho rozhraní je na obrázku 47. Generátor kódu umožňuje vybrat model uzlu Wasmote Plug&Sense, nastavení času záznamu, výběr senzorů, které jsou zapojeny do jednotlivých konektorů. Každý model umožňuje připojení odlišných senzorů, které jsou limitovány integrovanou sensorovou deskou. Uživatel si dále může vybrat, jestli chce zobrazovat informace o poloze akcelerometru, který je do uzlů integrován, přidat zeměpisné souřadnice, zobrazit stav baterie nebo pracovat s časovou značkou. V posledním kroku si uživatel zvolí způsob komunikace, který je závislý na typu integrovaného komunikačního rozhraní do základní desky. Pokud je vybrán bezdrátový typ přenosu, tak do formuláře přibudou další dvě okna, která pojednávají o definování jednoznačného identifikátoru uzlu (ID) a fyzické adresy integrované do uzlu (MAC). Testování částí kódu, které neřeší bezdrátový přenos dat, je možné provést pomocí připojení uzlu do USB počítače a zobrazením hodnot v programu integrovaného vývojového prostředí (Integrated Development Environment, IDE) pro Wasmote. Tento program umožňuje tvorbu, kompilaci, nahrání kódu včetně

<sup>10</sup> [http://www.libelium.com/development/wasmote/code\\_generator](http://www.libelium.com/development/wasmote/code_generator)

následného zobrazení získaných hodnot v programovacích jazycích C, C++ a Java. Pro tuto práci byla použita verze Wasmote PRO IDE 04, Wasmote PRO API 023.



Obr. 47. Ukázka generátoru kódu na stránkách Libelium, zdroj: stránky společnosti Libelium

Vygenerované protokoly nebyly pro použití v rámci olomoucké bezdrátové sensorové sítě dostatečné, a tak musely být opraveny. Ve vygenerovaných protokolech chyběly informace o síťové adrese (Network ID), identifikaci sítě (PANID) a kanálu. Tyto informace jsou klíčové v případě přenosu dat pomocí protokolu IEEE 802.15.4 v E-BOSS. Přestože byla v generátoru kódů zvolena tato varianta podporovaného protokolu, tyto informace chyběly. Zjištění bylo předáno dále členům technické podpory společnosti Libelium. Kromě tohoto nedostatku jsou generované protokoly definují, že naměřená data jsou tištěna do jednoho pole v databázi, což způsobuje problémy při dalším zpracování dat a z pohledu databázového zpracování dat je tento způsob značně neefektivní. Velmi často docházelo k chybám v přenosu dat, a proto byl vytvořen skript na jejich opravu. Pro efektivnější uložení dat je třeba vytvořit vlastní protokol, který posílá data v rámcích. Tento protokol nemohl být generován pomocí generátoru, a tak byl od začátku vytvořen.

Zpočátku byl pro přenos dat vygenerován a poté upraven protokol pro každý uzel pro případ, že by tento uzel zasilal data přímo do brány. V protokolu jsou vyznačeny pomocí komentářů části, které se při reálném provozu nejčastěji mění – tyto informace se týkají intervalu záznamu dat, sledovaných prvků, specifikace MAC adresy přístroje představujícího přijímač nebo způsobu kódování. Každý model uzlu musí mít svůj komunikační protokol, protože v něm je jinak definováno nastavení měřicích senzorů.

Dále byly vytvořeny protokoly definující přenos dat v rámcích. Přenos dat v rámcích umožňuje uložení naměřených hodnot zvlášť do polí tabulky, a tak není potřeba data následně rozdělovat z jednoho pole. Chyby v přenosu dat pomocí tohoto protokolu nebyly zaznamenány. Pro přenos dat v jiné než hvězdicové topologii byl vytvořen univerzální protokol, ve kterém je třeba měnit parametry na podkladě požadavků provozovatele.

Každý protokol se skládá ze tří hlavních částí – první, ve které jsou deklarovány knihovny a proměnné, které budou v protokolu použity. Druhá část řeší neopakující se oblast protokolu, ve které je vytvořen přenášený paket, který obsahuje úvodní zprávu a detekuje funkčnost bezdrátového přenosu. Následuje opakující se část protokolu, ve které jsou postupně zapínány senzory, které budou v definovaném intervalu snímat hodnoty venkovního prostředí. Dále je vytvářen paket pro přenesení dat do cílové destinace, jsou nastaveny jeho parametry a určena data, která budou dále předána. Po přenesení paketu jsou senzory vypínány a zapnou se, jakmile nastane čas dalšího měření. Komunikační protokoly jsou uloženy v elektronických přílohách na DVD ve složce komunikacni\_protokoly.

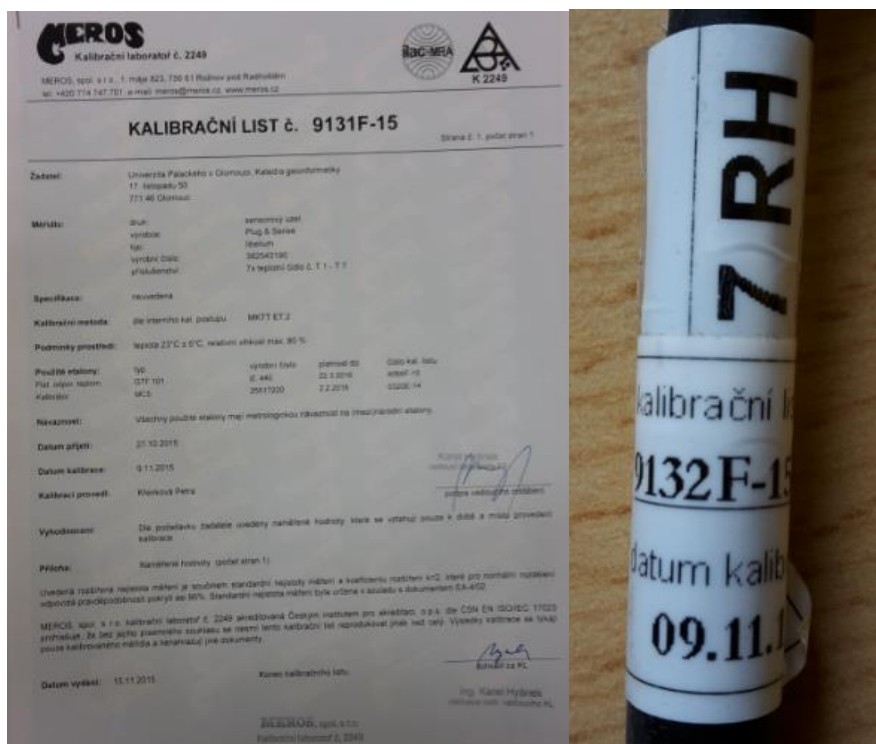
### 6.1.3 Vlastní topologie

Pro olomouckou bezdrátovou senzorovou síť byla zvolena hvězdicová topologie. Jedná se o základní topologii bezdrátového přenosu dat. Původně bylo zamýšleno využití stromové topologie. Tato topologie není přímo podporována vybraným komunikačním protokolem, ale je možné nastavit *peer to peer* komunikaci. Po zkušebních přenosech dat do brány přes další uzel bylo vyloučeno použití komunikace uzlu přes další uzel. Problémy se objevovaly již v samotném komunikačním protokolu, kdy byla nesprávně v bráně zapisována data z koncového uzlu i směrovacího uzlu. Dále se objevovaly problémy s výdrží baterie směrovacího uzlu. Výdrž baterie uzlu se poměrně špatně předpokládala, jak dosvědčuje kapitola 6.1.5.2 Výdrž baterie, a tak bylo od přenosu dat přes směrovač zcela ustoupeno. Proti využití této topologie hovoří i data o úspěšnosti přenosu dat, která byla v některých případech velmi nízká, což by způsobilo absenci dat. Hvězdicová topologie byla zvolena z důvodu vyšší spolehlivosti přenosu dat z uzlů do brány a nižší spotřeby baterie ve směrovacích uzlech.

### 6.1.4 Vlastní kalibrace senzorů

Pro kalibraci senzorů (teplota, vlhkost a CO<sub>2</sub>) připojených k uzlů Waspnote Plug&Sense vytvořen protokol pro zobrazení dat v počítači v reálném čase (elektronická příloha – DVD, složka komunikacni\_protokoly). V říjnu a listopadu došlo k rekalibraci teplotních a vlhkostních čidel pro každý uzel z řady Smart Environment v akreditované kalibrační laboratoři MEROS v Rožnově pod Radhoštěm. Kalibrace teplotních čidel byla časově náročná a byla prováděna v pěti teplotních bodech (-20 °C, -10 °C, 0 °C, 10 °C, 20 °C) s přesností 0,2 °C. Ukázka kalibračního listu a označení nakalibrovaného teplotního senzoru je na obrázku 48. Tabulka naměřených hodnot v porovnání s etalonem je zobrazena na obrázku 49. Vlhkostní senzory byly kalibrovány v rozsahu 5 % až 90 %. I k této kalibraci byl vydán kalibrační záznam společně s tabulkou naměřených hodnot, které kolísaly v rozmezí od - 8,9 do 10,2 od hodnoty etalonu. Tři vlhkostní čidla z deseti dodaných byla označena jako vadná a bylo doporučeno je k měření nepoužívat. Při měření pomocí uzlů z řady Smart Environment se fluktuace v měření objevovaly velmi

často i po jejich nakalibrování, a tak byly pro lepší přehled o průběhu hodnot všech měřených veličin použity klouzavé průměry.



Obr. 48. Kalibrační list pro teplotní senzory (vlevo), označení nakalibrovaného vlhkostního senzoru (vlevo), zdroj: vlastní fotografie

Teplotní čidlo T1					
Etalonová hodnota [°C]	-19,98	-10,00	0,01	10,47	20,02
Naměřená hodnota [°C]	-19,35	-9,33	1,16	11,29	20,00
Chyba měřidla [°C]	0,63	0,67	1,15	0,82	-0,02
Nejistota měření [°C]	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20

Teplotní čidlo T5					
Etalonová hodnota [°C]	-19,89	-9,92	0,36	10,32	20,34
Naměřená hodnota [°C]	-19,68	-9,68	0,54	10,21	19,89
Chyba měřidla [°C]	0,21	0,24	0,18	-0,11	-0,45
Nejistota měření [°C]	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20

Teplotní čidlo T2					
Etalonová hodnota [°C]	-20,28	-10,18	0,13	10,03	20,02
Naměřená hodnota [°C]	-18,60	-8,71	1,29	10,65	20,62
Chyba měřidla [°C]	2,22	1,47	1,16	0,62	0,60
Nejistota měření [°C]	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20

Teplotní čidlo T6					
Etalonová hodnota [°C]	-20,05	-9,89	0,39	10,30	20,37
Naměřená hodnota [°C]	-21,50	-11,61	-1,61	8,06	17,95
Chyba měřidla [°C]	-1,45	-1,72	-2,00	-2,24	-2,42
Nejistota měření [°C]	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20

Teplotní čidlo T3					
Etalonová hodnota [°C]	-20,00	-10,10	0,14	10,33	20,15
Naměřená hodnota [°C]	-18,06	-8,71	1,29	10,65	20,62
Chyba měřidla [°C]	-0,64	-1,51	-1,22	-1,41	0,60
Nejistota měření [°C]	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20

Teplotní čidlo T7					
Etalonová hodnota [°C]	-20,02	-9,86	0,33	10,26	20,32
Naměřená hodnota [°C]	-19,03	-9,46	0,65	10,53	20,53
Chyba měřidla [°C]	0,99	0,40	0,32	0,27	0,21
Nejistota měření [°C]	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20

Teplotní čidlo T4					
Etalonová hodnota [°C]	-19,98	-9,92	0,27	10,06	20,15
Naměřená hodnota [°C]	-20,32	-7,74	3,16	11,54	18,28
Chyba měřidla [°C]	-0,34	2,18	2,89	1,48	-1,87
Nejistota měření [°C]	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20

Obr. 49. Ukázka hodnot naměřených senzory při kalibraci, upraveno dle údajů dodaným ke kalibračnímu protokolu

Nejprve byla kalibrace řešena s dodavatelem technologie firmou Libelium. Kalibrace pro firmu provádí externí firma a v době řešení problému nebylo možné zpětně dodat uzly k rekalibraci. Tato procedura je časově i finančně náročná, náklady na dopravu by celou cenu ještě zvedly, a tak bylo doporučeno najít kalibrační řešení v blízkosti výskytu uzlů.

Postup kalibrace chemických senzorů byl řešen v článku od Suchánek (2014). Autor se podílel na vývoji prezentovaného kalibračního přístroje. Na ověření jím získaných hodnot byly používány senzory od e2technology, které byly zakoupeny i pro monitoring v Olomouci. Pomocí tohoto přístroje nebylo možné spolehlivě otestovat senzory vlastněné Katedrou geoinformatiky, a tak bylo řešení kalibrace těchto čidel dále hledáno.

Dále byla kalibrace chemických senzorů konzultována v průběhu stáže na Katedře chemie v Cambridge s profesorem Rodericem Lee Jonesem v říjnu 2014. Tyto senzory byly označeny za nepřesné a jejich kalibrace za časově i finančně náročnou, a tak kvůli příliš velké investici kalibrace nebyla doporučena.

Po návratu ze zahraniční stáže byla kalibrace čidel znečišťovatelů ovzduší konzultována s panem Petrem Braunem z akreditované kalibrační laboratoře TESO z Prahy. Po osobní konzultaci a zkušební kalibraci čidel oxidu uhličitého a oxidu dusičitého na jednom uzlu bylo rozhodnuto, že kalibrace těchto čidel nebude příliš efektivní. Uzly a senzory nejsou natolik kvalitní, aby tato finančně náročná procedura měla význam. Uzly nebyly schopny zaznamenat přímé změny ve vystavení se rozdílným koncentracím polutantu. Při testech vystavení se vyšším koncentracím polutantů byla změna zaznamenána až po více než 10 minutách, v některých situacích změna nebyla zaznamenána vůbec. Kalibrace chemických prvků je finančně náročná, kalibrace jednoho senzoru v pěti hladinách koncentrací se pohybuje kolem 3500 Kč.

### **6.1.5 Interval záznamu dat**

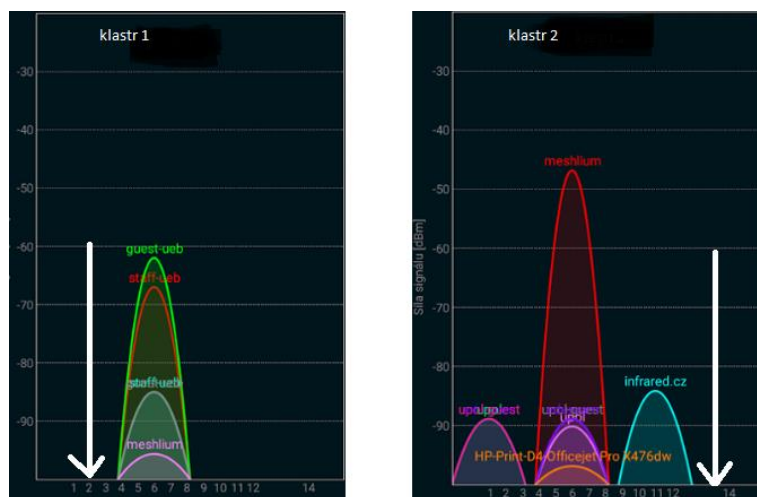
Pro olomouckou bezdrátovou sensorovou síť byl stanoven monitorovací interval na pět minut. Toto časové rozmezí umožňuje přenést dostatek dat, která nejsou redundantní. Problém se může vyskytnout v případě, že zaznamenaná data jsou zatížena chybou, ale je potřeba brát ohled i na baterie bezdrátových uzlů, jejichž výdrž je intervalem záznamu dat velmi ovlivněna. V bakalářské práci Radka Dostála (Dostál, 2015) byla měření prováděna v rozmezí deseti minut, ale právě s ohledem na chyby v měření, byl tento interval v průběhu zpracování disertační práce snížen. V případě zatížení měření chybou na jednom uzlu, mohou být měření nahrazena jiným uzlem z oblasti.

### **6.1.6 Testování technických parametrů uzlů Waspnote Plug&Sense při reálném nasazení**

Testování technických parametrů bezdrátové sensorové sítě musí být provedeno na počátku rozmístění uzlů v terénu v zájmové prostředí. Emary a Ramakrishnan (2013) se ve své studii soustředí na technické parametry zahrnující úspěšnost doručení dat a spotřebu baterie, které pomocí simulací ověřují. V rámci olomoucké bezdrátové sítě byla prvně sledována zátěž komunikačních kanálů v pásmu 2,4 GHz, následovalo sledování stavu baterie při různých konfiguracích sítě. Dále byla sledována síla signálu s využitím více druhů antén a v neposlední řadě byla počítána úspěšnost přenosu dat jednotlivých uzlů do brány.

### 6.1.5.1 Zátěž komunikačního pásma 2,4 GHz v olomouckých klastrech

Při použití základního komunikačního protokolu IEEE 802.15.4 pro bezdrátovou senzorovou síť v městském prostředí je nutné ověřit zatíženost jednotlivých kanálů, na které se pásmo 2,4 GHz dělí a situovat komunikaci na ten nejméně vytižený kanál. Toto bylo ověřeno pomocí programu Wi-Fi Analyzer 3.10.1-1, který je volně dostupný pro operační systém Android. V programu bylo nastaveno, že se mají zobrazit všechny kanály dostupné v pásmu 2,4 GHz a zachytit všechna zařízení, která v tomto rozmezí vysílají pomocí protokolu Wi-Fi. Předpokladem bylo, že nebude činných velké množství dalších zařízení pracujících s jiným protokolem, než je Wi-Fi v těchto frekvencích. Vždy byl vygenerován graf, který měl na ose x zobrazen kanál a na ose y byla k vidění síla signálu zařízení vysílajících ve vybraném kanálu. Každý zachycený signál byl popsán dle jména, které má uvedené v názvu (obr. 50). Data z prvního klastru zde zobrazená byla pořízena dne 2. 8. 2016 v 13:01. Z těchto dat je zřejmé, že všechna zařízení fungují na kanále číslo šest, a tak byl tento kanál z jakékoli další komunikace mezi uzly a bránou vyloučen. Pro komunikaci mezi uzly a bránou byl zvolen kanál číslo dva, na jehož frekvencích v této oblasti žádný jiný přístroj nekomunikuje pomocí Wi-Fi vysílače. Ve druhém klastru dle záznamu ze dne 1. 8. 2016 v 15:13 hodin komunikuje v pásmu 2,4 GHz více přístrojů pomocí Wi-Fi, což bylo s ohledem na to, že se brána nachází v centru města očekáváno. Nejvíce komunikace probíhá opět ve střední části pásma na kanále číslo šest. Zatížená je i oblast nižších kanálů, která byla pro komunikaci mezi uzly využita v prvním klastru. Pouze jeden přístroj vysílá Wi-Fi signál i na vyšším kanálu, a tak se pozornost zaměřila právě na tuto oblast a byl zvolen 14. kanál pro komunikaci mezi uzly a bránou.



Obr. 50. Ukázka rozložení síly Wi-Fi signálu na frekvenci 2,4 GHz v prvním a ve druhém klastru, zdroj: vlastní měření

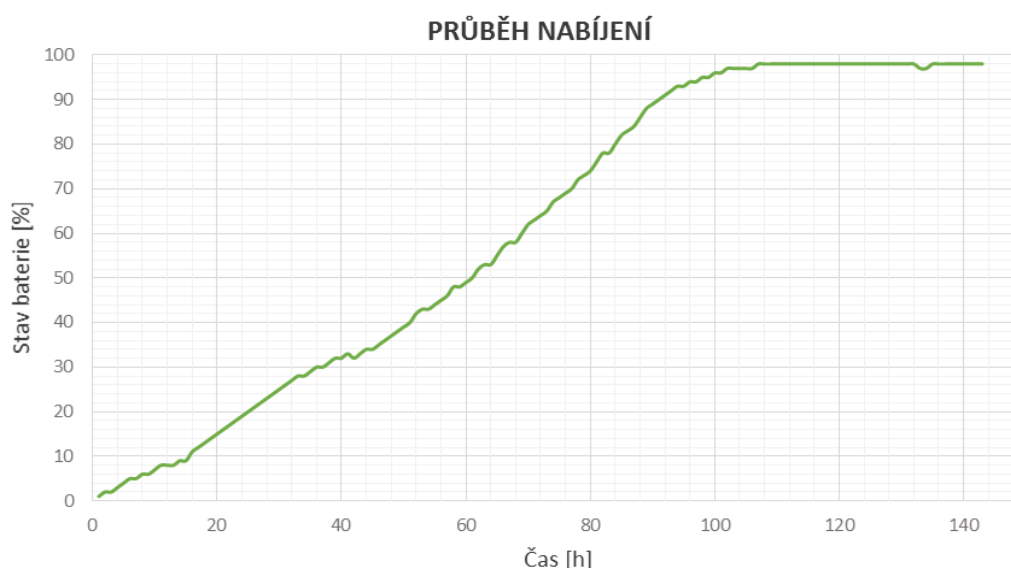
Ve druhém klastru bylo testováno i použití nižších frekvencí pro komunikaci mezi uzly a bránou, avšak data byla korektně přenesena na krátkou vzdálenost (do osmi metrů) pouze v případě, že brána byla situována ve venkovním prostředí, což není její ideální pozice s ohledem na drátové napojení do vnitřní sítě a elektrického zdroje energie. Jakmile byla brána přenesena za okno, nebyla zaznamenána žádná data.

Je důležité testování zatížení kanálů opakovat v čase, protože rozložení komunikace se může s ohledem na umístění nových přístrojů měnit. Test zatížení by se měl provést vždy, když dojde k výpadkům komunikace, protože vyšší zatížení kanálu může být jedním z důvodů nižší spolehlivosti přenosu dat v bezdrátové senzorové síti.

#### 6.1.5.2 Výdrž baterie uzlů při reálném nasazení

Na vybíjení baterie uzlu má vliv mnoho faktorů, a tak byla výdrž baterie v uzlech testována v rozdílných konfiguracích. První část testovaných konfigurací byla provedena ve vnitřním a druhá ve venkovním prostředí.

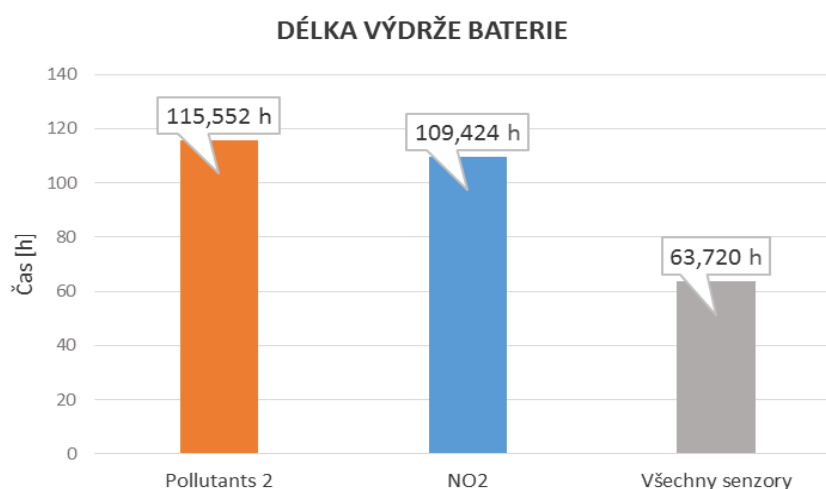
Ke zjištění stavu baterie uzlu musel být napsán protokol, na kterém bylo ověřeno, že nabíjení uzlů po jeho nahrání do uzlu probíhá neefektivněji (elektronická příloha na DVD ve složce komunikaci\_protokol). Tento protokol byl vždy používán k ověření stavu baterie uzlu v procentech. Údaje o stavu baterie uzlu musely být dodány i do všech ostatních protokolů, které byly používány v terénu. Vždy byl zjišťován stav baterie v procentech, v ojedinělých případech byl doplněn o zjištění stavu ve Voltech. Již při přípravě uzlů bylo zjištěno, že jejich nabití je časově náročnější, než je uvedeno v dokumentaci od společnosti Libelium. Sledování průběhu nabíjení baterie bylo uskutečněno v domácím prostředí na počátku roku 2016 (obr. 51). Ve skutečnosti nabití uzlu trvalo více než dvakrát déle, a to 144 hodin při nabíjení přes USB a 140 hodin při nabíjení z elektrické zásuvky. Nutno podotknout, že baterie uzlu nebyla zcela nová, byla dva roky stará, ale nikdy nebyla použita pro energeticky náročnější úkoly. Při všech testech byly baterie uzlu nabity na maximální hodnoty, které se pohybovaly od 90 % do 98 %. Nikdy nebylo dosaženo 100 %, přesto maximální nabití uzlu představovalo časově náročnou část práce.



Obr. 51. Průběh nabíjení baterie uzlu přes USB, zdroj: vlastní měření

Pro testování výdrže baterie byly ve vnitřním prostředí zvoleny následující scénáře – energetické zatížení senzorem (byla sledována výdrž baterie při zapojení jednotlivých senzorů, postupně byly vystřídány všechny senzory) a vliv intervalu záznamu dat (při zapojení všech senzorů). Ve venkovním prostředí byla sledována komunikační vzdálenost, vliv meteorologických prvků, a jestli mají překážky mezi komunikujícími komponentami vliv na výdrž baterie. Vnitřní testování baterie probíhalo také v první polovině roku 2016. Data byla zobrazována v reálném čase v programu PuTTY suit v0.65, který získané hodnoty ukládal přímo do souboru ve formátu .log, ze kterého bylo nutné extrahovat informace o stavu baterie a časovou značku, což bylo provedeno v programu PSpad v.4.6.9. Export probíhal na základě hledaných výrazů – Format a Battery Level. Data byla dále importována do programu Microsoft Excel 2003, kde byly vytvořeny grafy. Při vnitřním testování byl uzel připojen do počítače pomocí USB rozhraní, a tak muselo být ověřeno, jestli se uzel zároveň nenabíjí. Výrobce garantuje, že pokud je energetický výdej uzlu vyšší než příjem, tak se uzel vybíjí, ale ukázalo se, že časy získané vybíjením ve vnitřním prostředí není možné porovnávat s časy vybíjení získanými připojením uzlů k bráně. Toto testování je použitelné pouze z pohledu trendu vybíjení baterie.

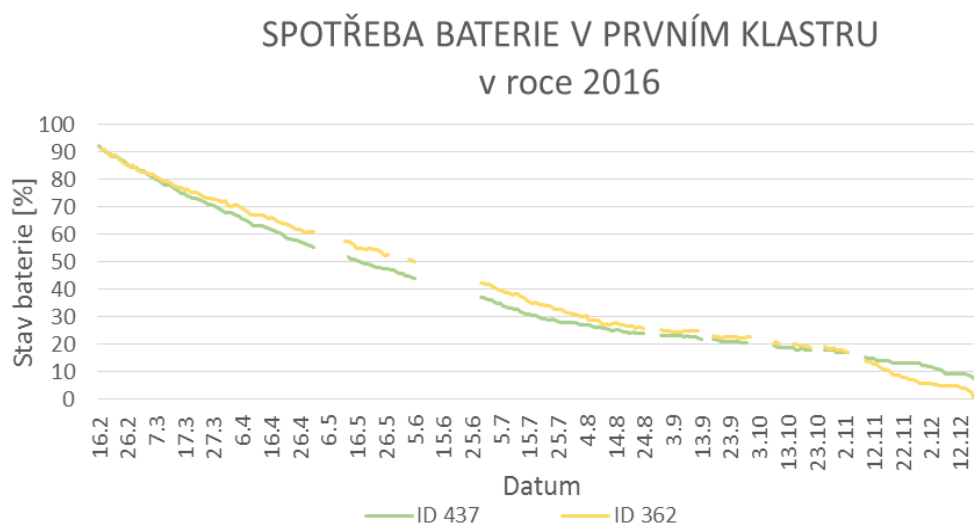
Dle Libelium (2016a) má nejvyšší energetickou spotřebu uzel sledující hodnoty oxidu uhličitého (50 mA), následuje senzor Air pollutants 2 sledující  $C_4H_{10}$ ,  $CH_3CH_2OH$ ,  $CH_4$ ,  $H_2$  a  $CO$  (42 mA), dále senzor snímající hodnoty velmi těkavých organických látek (VOC) (32 mA), nejmenší energetickou náročnost má senzor sledující oxid dusičitý (26 mA). Nepředpokládalo se, že by se uzel při zapojení pouze jednoho senzoru zcela vybil v krátkém časovém okamžiku (v rámci týdne), i přestože data byla posílána nepřetržitě. Avšak tato situace vybití baterie uzlu nastala v případě zapojení pouze senzoru sledujícího oxid dusičitý a senzoru Air Pollutants 2. Tato situace nastala, přestože ani jeden z těchto dvou senzorů nepatří mezi ten energeticky nejnáročnější. Pokud byly zapojeny všechny senzory, tak se baterie uzlu vybila za necelé tři dny, což je velmi krátký časový okamžik, kdy by uzel mohl spolehlivě pracovat v terénu (obr. 52).



Obr. 52. Délka výdrže baterií jednotlivých senzorů, zdroj: vlastní měření



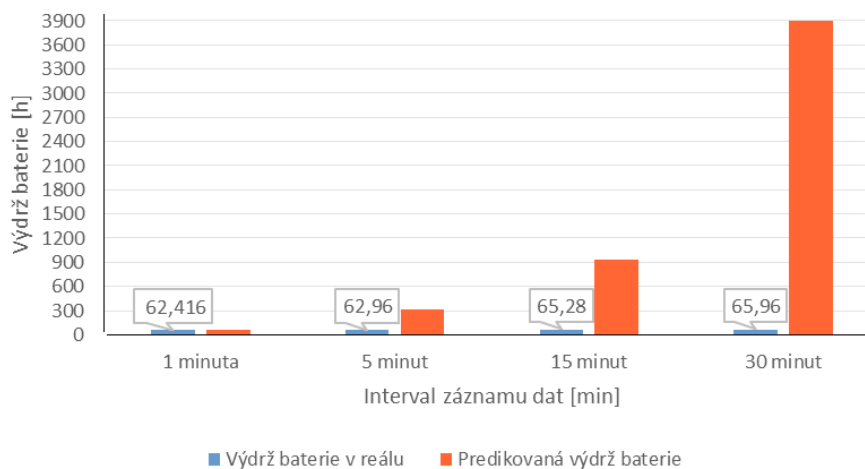
Pro srovnání vybíjení baterie v případě napojení uzlu k počítači a posílání dat do brány byl jeden uzel (ID 437) od 16. 2. 2016 umístěn vedle brány prvního klastru a v intervalu jedné minuty posílal hodnoty teploty, která byla v místnosti během roku téměř konstantní. Spotřeba teplotního senzoru je nízká (6  $\mu$ A). Trend jeho vybíjení je znázorněn na obrázku 53. Na tomto obrázku je znázorněn i průběh vybíjení uzlu ID 362 umístěného ve venkovních podmínkách. Tento uzel byl dán do terénu plně nabitý ve stejný den jako uzel ID 437. Interval záznamu dat uzlu ID 362 byl stanoven na pět minut, uzel byl ve vzdálenosti 108 metrů od brány. Z výsledků je možné konstatovat, že interval záznamu měl vyšší vliv na vybíjení baterie, než samotná komunikační vzdálenost.



Obr. 53. Spotřeba baterie v prvním klastru u uzlu umístěného ve venkovních podmínkách (ID 362) měřícího s v kratším intervalu a uzlu umístěného vedle brány (ID 437) získávajícího data s vyšší frekvencí, zdroj: vlastní měření

Ve vnitřním prostředí byla hodnocena délka výdrže baterie při různých intervalech záznamu, která se s vyšším intervalem záznamu dat snižovala, avšak ze získaných dat je patrné, že není příliš velký rozdíl mezi výdrží baterie při minutovém intervalu záznamu a při půlhodinovém intervalu záznamu. Přitom bylo očekáváno, že výdrž baterie při půlhodinovém intervalu záznamu bude značně vyšší než při minutovém intervalu záznamu. Z výdrže baterie při minutovém intervalu záznamu dat byly vypočítány predikce výdrže baterie při jednotlivých intervalech záznamu dat, kterým by reálná situace měla více odpovídat (obr. 54). Pro účely tohoto testování byly vždy zapojeny všechny senzory.

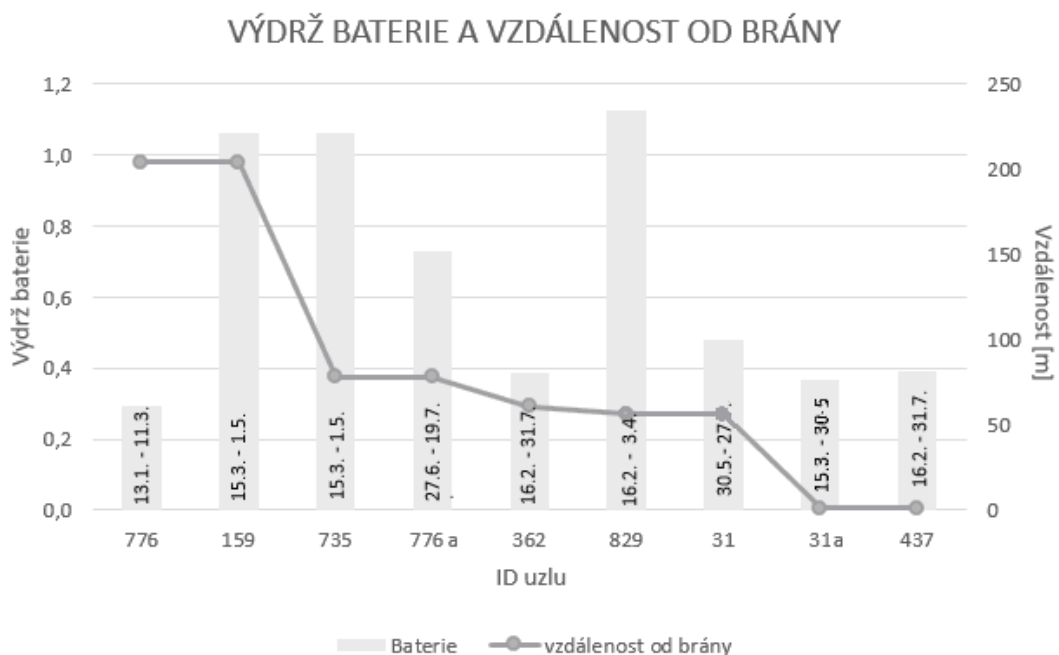
### DÉLKA VÝDRŽE BATERIE UZLU PŘI RŮZNÝCH INTERVALECH ZÁZNAMU



Obr. 54. Výdrž baterie při reálném měření s rozdílným intervalem záznamu a její predikce, zdroj: vlastní měření

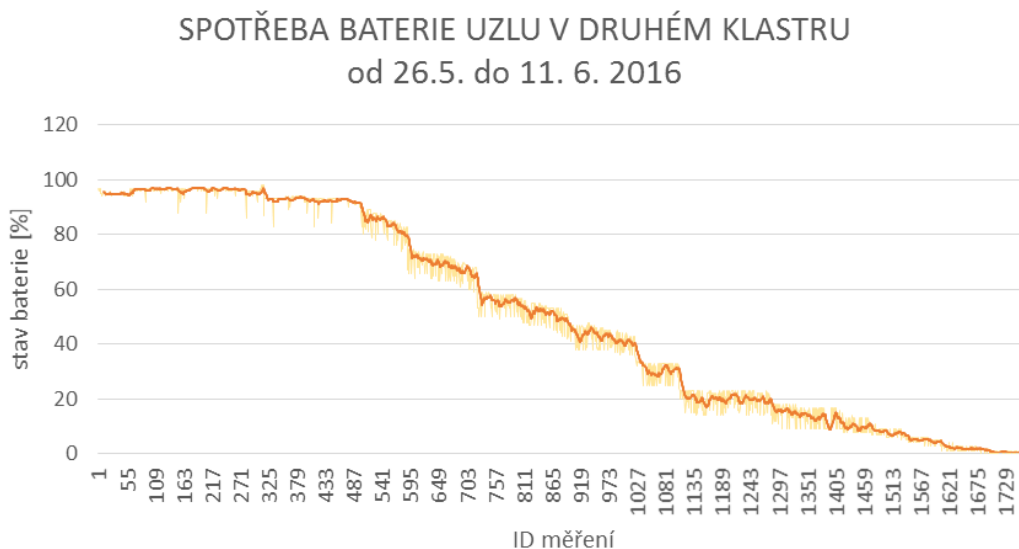
Vliv komunikační vzdálenosti na výdrž baterie byl demonstrován v prvním i druhém klastru olomoucké bezdrátové senzorové sítě. V prvním klastru byl vliv vzdálenosti testován ve dvou konfiguracích. První byla funkční do září roku 2015 a druhá poté od ledna roku 2016. Testování z první konfigurace je v bakalářské práci od Koníček (2016).

Obrázek 55 ukazuje ID uzlu, datum, kdy se nacházel v terénu, výdrž jeho baterie v závislosti na vzdálenosti uzlu od brány. Čím větší je vzdálenost uzlu od brány, tím by spotřeba baterie uzlu měla být vyšší, což je značně ovlivněno nejen jeho polohou ale i samotným uzlem a povětrnostními podmínkami, ve kterých byl uzel v terénu umístěn. Výdrž baterie byla počítána pro první půlrok roku 2016. Výpočet byl proveden z hodnoty úrovně baterie na počátku umístění uzlu do terénu a hodnoty baterie v čase, kdy z něj byla obdržena poslední data. Rozdíl stavu baterií v počátečním a koncovém stavu byl podělen počtem dní, po které se nacházel uzel v terénu. Čím blíže byl tento podíl nule, tím více poukazoval na vyšší výdrž baterie v terénu. Všechny uzly měly počáteční stav baterie vyšší než 90 %, a tak lze konstatovat, že byly plně nabity. Výsledek, že uzly, které byly u brány, neměly tak vysokou spotřebu baterie, byl očekáván, ale předpokladu se zcela vymykal uzel s ID 776, který byl umístěn nejdále od brány, a jehož spotřeba baterie byla vůbec nejnižší. Uzel ID 829 měl nejvyšší spotřebu baterie, což bylo způsobeno jeho špatným technickým stavem, který byl na podkladě těchto měření odhalen. Kromě těchto dvou případů uzlů, byl předpoklad výdrže baterie v závislosti na vzdálenosti naplněn.



Obr. 55. Výdrž baterie jednotlivých uzlů v závislosti na vzdálenosti uzlu od brány, zdroj: vlastní měření

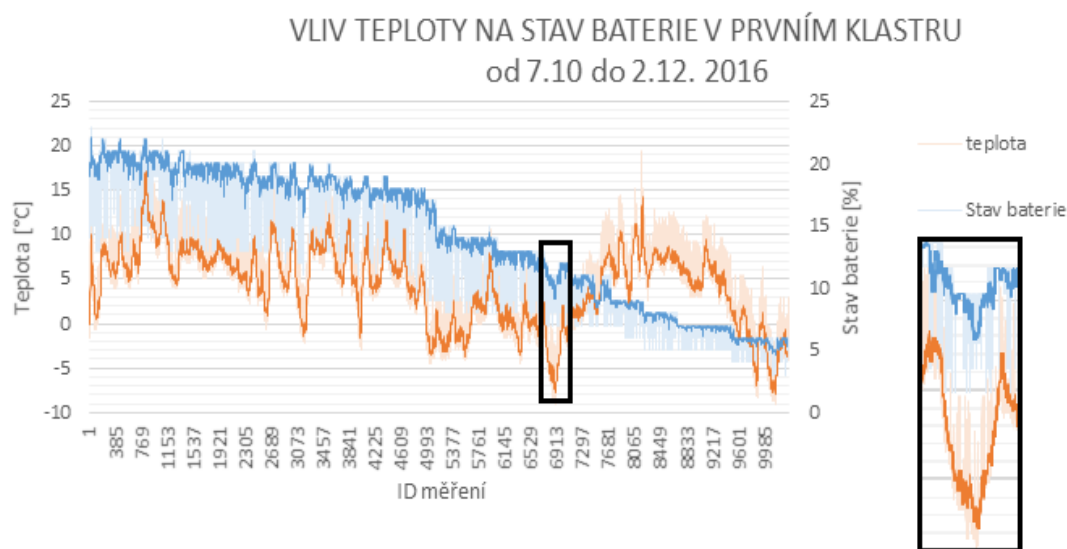
Ve druhém klastru bylo provedeno sledování výdrže baterie v několika etapách. Uzly umístěné v tomto klastru, měly vysoké hodnoty spotřeby baterie, přestože komunikují na krátkou vzdálenost. Příkladem je obrázek 56, ve kterém je baterie uzlu s ID 776, který má nastaven pětiminutový interval záznamu dat a napojeny všechny senzory, spotřeba uzlu byla velmi vysoká a k úplnému vybití uzlu došlo již po 16 dnech ostrého provozu. Podobný trend vybití baterie měly zpočátku i další uzly umístěné na totožném místě.



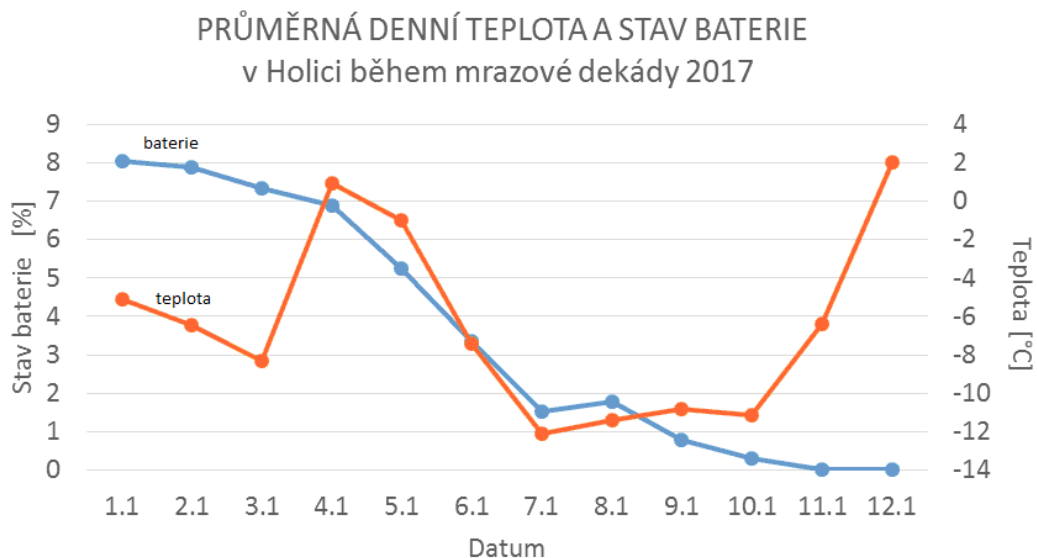
Obr. 56. Strmě klesající stav baterie uzlu v druhém klastru, zdroj: vlastní měření

Překážky mají vliv spíše než na výdrž baterie na úspěšnost přenosu dat. Uzel s ID 735 byl ten, který se nacházel za překážkou, trend jeho vybíjení je shodný s ostatními uzly (obr. 55).

Byl prokázán vliv meteorologických prvků na výdrž baterie. Kolísání hodnot stavu baterie odpovídá křivce průběhu teploty. Pokud je zaznamenán prudký pokles teploty, tak poklesne i stav baterie, křivka stupně nabití baterie kopíruje během svého klesání v menším měřítku křivku teploty. Pokud jsou opět vyšší hodnoty teploty, tak křivka stupně nabití opět vzroste. Hodnoty stupně nabití baterie kolísají až o šest procent v intervalu měření nastaveném na pět minut, poté se ale opět vrátí na dříve změřenou hodnotu. Pokud jsou zaznamenány teploty pod bodem mrazu delší dobu, tak po vyšplhání teplot nad hodnotu bodu mrazu, se stupeň nabití baterie opět zvedne téměř k hodnotě, která byla zaznamenána před započítáním mrazu. Pokud nízké teploty přetrvávaly delší dobu než jeden den, tak se hodnota stupně nabití baterie již nedostala na úroveň nabití před započítáním mrazů. Viditelný je i skok v trendu, protože v něm lze nalézt větší skok, který by při konstantních teplotách nenastal. Obrázek 52 ukazující vybíjení uzlů ve venkovním a vnitřním prostředí je důkazem tohoto tvrzení. Obrázek 57 ukazuje zimní teploty v prvním klastru a ve výřezu je znázorněn úsek, kdy byly teploty nejnižší a kdy i výrazně poklesl stav baterie, který byl po navýšení teplot opět vyrovnán. Nejnižší teploty byly zaznamenány na počátku roku 2017, kdy se i denní průměrné hodnoty po čtyři dny pohybovaly pod  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . V tomto období se velmi rychle vybíjel uzel (ID 776) v prvním klastru, kterému klesl stav baterie o 8 % za deset dnů (Obr. 58).

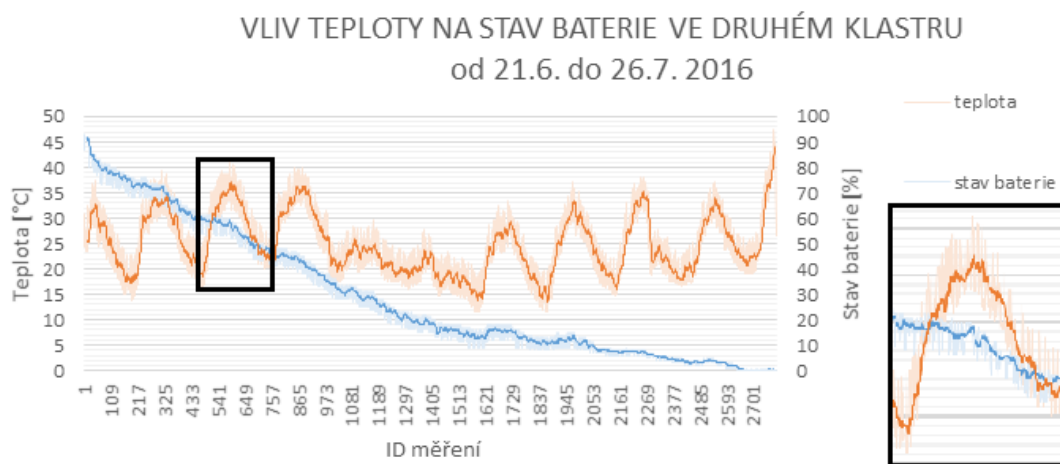


Obr. 57. Vliv teploty vzduchu na stav baterie v prvním klastru v podzimních měsících, zdroj: vlastní měření



Obr. 58. Průměrná denní teplota ve vztahu ke stavu baterie v prvním klastru v lednu 2017, zdroj: vlastní měření

V průběhu měření nebyl zaznamenán výraznější vliv vysokých teplot na rychlejší vybíjení baterie uzlu. Obrázek 59 ukazuje nejvyšší dosažené teploty v létě a je patrné, že v případě vyšších teplot nedochází ke kopírování průběhu teplotní křivky.

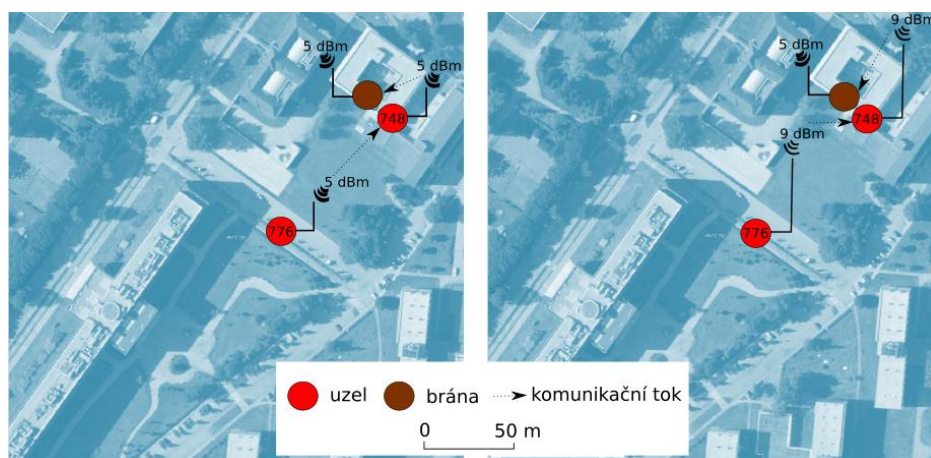


Obr. 59. Vliv teploty vzduchu na stav baterie ve druhém klastru v letních měsících, zdroj: vlastní měření

#### 6.1.5.3 Testování hodnot síly signálu při reálném nasazení

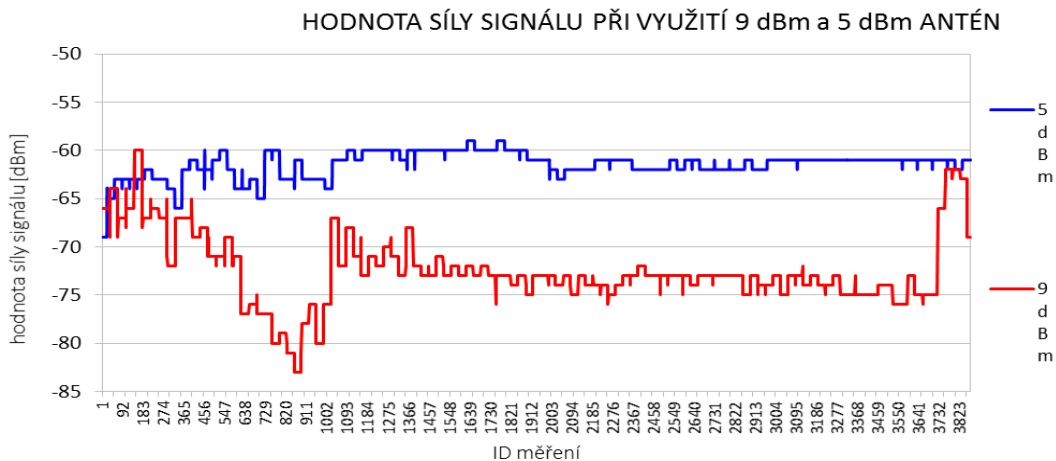
V Olomouci došlo nejprve k testování méně výkonných antén (5 dBm) a více výkonných antén (9 dBm) na stejnou vzdálenost. Poté byly na delší vzdálenost testovány antény, které v prvním testu měly vyšší hodnoty síly signálu. Protokol využitý k přenosu hodnot síly signálu je uveden v elektronické příloze – DVD ve složce komunikacni\_protokoly.

Vypovídající výsledky hodnot síly signálu jsou prováděny s anténami, které mají shodné parametry, a tak byly vykonány testy, ve kterých byly na vysílací i přijímací uzly nasazeny antény se stejnými parametry. Testy proběhly ve dnech 28. 6. - 30. 6. 2016. Nejdříve byly ověřovány hodnoty síly signálu při využití výkonnějších antén (9 dBm). Uzly byly poté dobity a následně byly testovány méně výkonné antény (5 dBm), které byly dodány výrobcem společně s uzly. Interval posílání dat byl nastaven na deset sekund. K testování bylo jako vysílače (ID 776) i přijímače (ID 748) využito uzlů Waspnote Plug&Sense z řady Smart Environment. Přijímač byl umístěn za oknem kanceláře na Katedře geoinformatiky v blízkosti brány. Vysílač byl zavěšen na stromě ve vzdálenosti 98 metrů od přijímače (obr. 60), který posílal data do MySQL databáze v bráně.



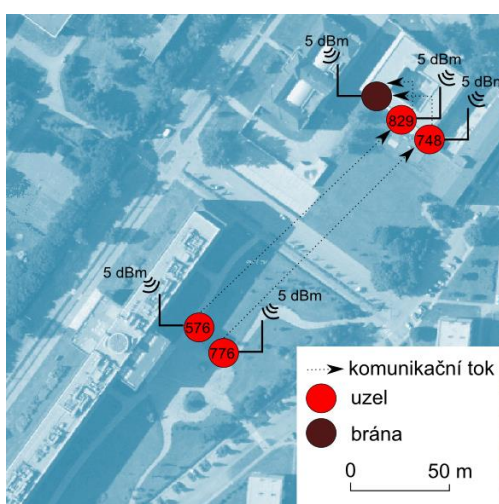
Obr. 60. Rozmístění komponent v terénu při testování výkonnější antén, zdroj: vlastní měření, podklad ČÚZK

Pokud byly zapojeny dvě výkonnější antény, byla úspěšnost přenosu dat 47,64 %. V případě zapojení méně výkonných antén byla úspěšnost přenosu dat 48,47 %. Co se týče stavu baterie, tak vysílací uzly byly nabity nad 90 %. Energeticky byl více namáhán uzel, který vysílal hodnoty síly signálu než ten, který je přijímal. Hodnoty síly signálu byly dlouhodobě vyšší při využití méně výkonných antén, což vykazuje zamítnutí původního tvrzení, které počítá s vyšší kvalitou přenosu při využití výkonnějších antén. Hodnoty získané výkonnějšími anténami byly průměrně o 10 dBm horší (obr. 61). Díky těmto poznatkům nebylo zakoupeno více výkonnějších antén, ale byly využity antény doručené dodavatelem k dlouhodobějšímu měření.

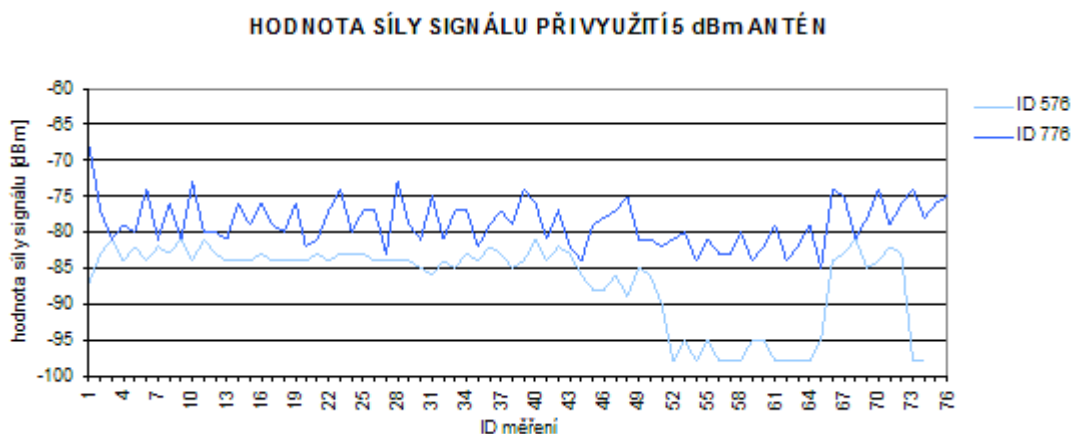


Obr. 61. Hodnota síly signálu při využití antén s rozdílnou výkonností, zdroj: vlastní měření

Důkazem toho, že s větší vzdáleností se zhoršuje hodnota síly signálu, je test provedený 16. 6. 2016. Na vysílače i přijímače z řady Smart Environment byly nasazeny méně výkonné antény. Přijímače byly vzdálené 148 metrů od vysílačů. Ty byly také osazeny méně výkonnými anténami (obr. 62). Přijímací uzel ID 829 byl z řady Smart Agriculture, druhý přijímací uzel ID 748 byl z řady Smart Environment. Oba uzly, jejichž síla signálu byla testována, byly nabity na 40 %, přijímací uzly byly připojeny k počítači, aby mohly být hodnoty rovnou zobrazovány. Test probíhal pouze 18 minut a 19 sekund. Interval záznamu dat byl stanoven na 10 sekund. I tak je z hodnot síly signálu patrné, že jsou velmi vysoké a zvolená vzdálenost v tomto prostředí je pro úspěšný přenos dlouhá. Úspěšnost přenosu dat byla stanovena na 64,17 % (ID 576 – ID 829) a na 64,46 % (ID 776 – ID 748) (obr. 63). Hodnota síly signálu uzlu ID 576 od měření s ID 52 začala klesat a blížila se až hodnotě -100 dBm, pokles byl zapříčiněn špatným natočením antény na vysílači.



Obr. 62. Rozmístění komponent v terénu při testování méně výkonných antén, zdroj: vlastní měření, podklad ČÚZK

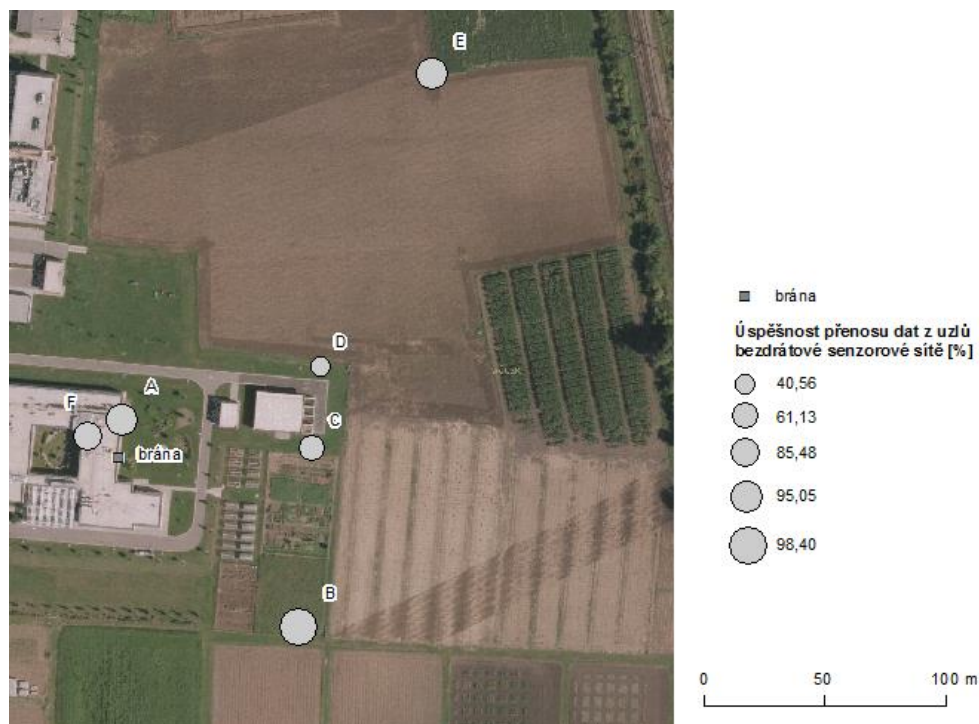


Obr. 63. Hodnota síly signálu při využití méně výkonných antén na delší vzdálenost, zdroj: vlastní měření

#### 6.1.5.4 Úspěšnost přenosu dat při reálném nasazení

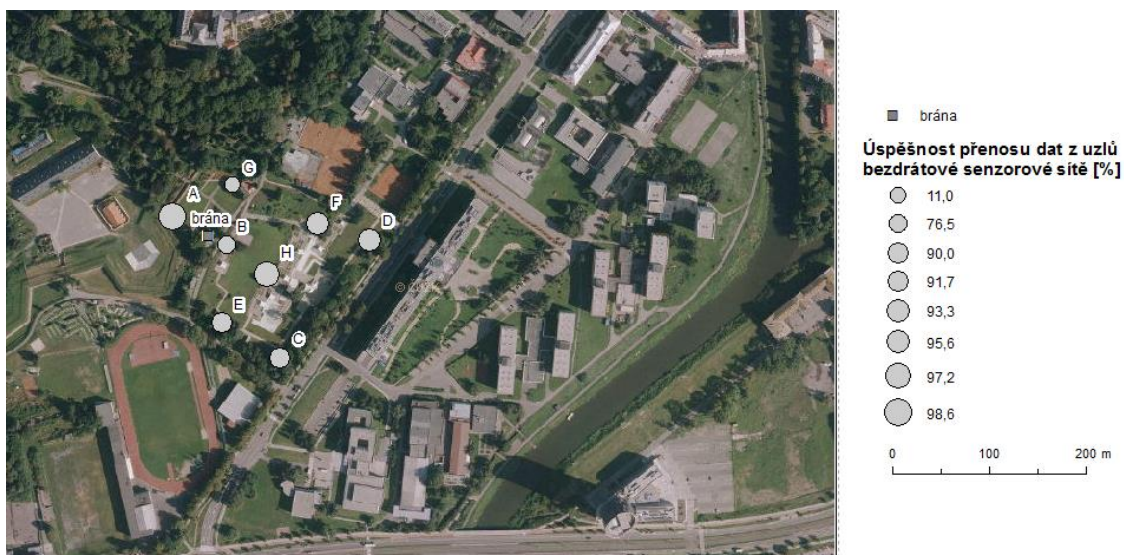
Byla zjišťována úspěšnost přenosu dat za prvních 31 dnů od nasazení bezdrátových uzlů do terénu v prvním klastru na všech pozicích. Prvních 31 dnů od začátku nasazení uzlu bylo zvoleno, aby byl vyloučen vliv nabití baterie na úspěšnost přenosu dat (obr. 64). Uzly, pro které se úspěšnost přenosu počítala, byly v terénu nasazeny od února do dubna 2016 a přenášely data přímo do brány. Díky nasazení v tomto období nebyl zaznamenán žádný výrazný vliv teplotních extrémů. Předpokladem bylo, že čím je uzel dále od brány, tím je vyšší pravděpodobnost, že data budou přenesena s nižší úspěšností. Toto tvrzení se nepotvrdilo. Nejnižší úspěšnost přenosu dat byla zaznamenána u uzlu nacházejícím se ve venkovním prostředí nejbližší bráně. Toto však bylo způsobeno vadným vybavením uzlu nacházejícím se na této pozici, což se projevilo již dříve při zjišťování stavu baterie (ID 829). Tato pozice byla v červenci zrušena z důvodu nové výsadby na poli, a tak nemohla být úspěšnost posílání z této pozice znova ověřena. Nízká úspěšnost přenosu dat z pozice F, druhé nejbližší k přijímači, byla způsobena vzájemným rušením se s uzlem na pozici A. Velmi překvapující je velmi vysoká úspěšnost přenesení dat nejvzdálenějšího uzlu. Velmi vysokou úspěšnost přenosu dat měl i uzel na pozici B, což se také projevilo při výpočtu výdrže baterie.





Obr. 64. Úspěšnost přenosu dat z jednotlivých pozic v prvním klastru v první polovině roku 2016. Do výpočtu byly zahrnuty pouze údaje z prvních 31 dnů, kdy uzel na dané pozici figuroval, zdroj: vlastní měření, ortofoto ČÚZK

Ve druhém klastru byla testována úspěšnost přenosu dat v Botanické zahradě a rozáriu v prosinci 2014 (obr. 65). Na malé ploše se zde nacházelo osm uzlů, z nichž nejnižší úspěšnost přenosu dat byla zaznamenána u uzlu G, což bylo způsobeno tím, že tento uzel se nacházel ve smrkovém porostu za zděnou budovou. Velmi nízká úspěšnost přenosu dat byla i u nejbližšího uzlu. Úspěšnost přenosu dat u zbývajících uzlů je vyšší než 90 %, což je s ohledem na úspěšnost přenosu dat v prvním klastru vysoké číslo a uzly v tomto rozložení by mohly být nasazeny k dlouhodobému monitoringu. Takto vysoká úspěšnost přenosu dat byla zapříčiněna tím, že zde byly umístěny zcela nové uzly s lepším stavem baterie i ostatních součástí.



Obr. 65. Úspěšnost přenosu dat z pozic uzlů v Botanické zahradě a rozáriu za celou dobu operace uzlů v zimních obdobích 2014, zdroj: vlastní měření, ortofoto ČÚZK

Úspěšnost přenosu dat a výdrž baterie jednotlivých uzlů byly počítány pro první klastr (tab. 11), kde byla výdrž baterie z dlouhodobého hlediska vyšší, a tak se zde nevystřídalo tolik uzlů jako v klastru druhém. Čím nižší je vypočítána hodnota výdrže baterie, tím déle uzel operoval v terénu. Uzly se zde nacházely na více pozicích – na sedmi (od A po G). Pozice A a F se nacházely uvnitř budovy. Nejčastěji se uzly měnily na pozici nacházející se za zděnou budovou (D), kde byla nízká úspěšnost přenosu dat, poté na pozici C. Po dobu provozu v roce 2016 se nacházel na pozici B jeden uzel. Tento uzel měl nejvyšší úspěšnost přenosu dat a byl zcela vybit až 19. prosince 2016. Uzel s celkovou druhou nejvyšší úspěšností přenosu dat byl umístěn na pozici F. Uzel s druhou nejvyšší úspěšností přenosu dat ve venkovním prostředí byl na pozici E, jež je nejdále od brány.

Tab. 11. Uzly nasazené v prvním klastru v roce 2016

ID uzlu	V terénu od	V terénu do	Počáteční baterie	Koncová baterie	Úspěšnost [%]	Výdrž baterie	pozice
362	18.2	19.12	90	1	92,55	0,29	B
829	18.2	7.4	88	37	55,35	1,04	C
159	15.3	12.7	63	21	72,79	0,35	E
735	15.3	1.5	98	44	36,37	1,13	D
31	15.3	2.5	99	73	88,82	0,19	F
31	12.5	27.7	69	43	47,48	0,19	D
735	30.5	6.6	98	88	71,83	1,25	D
735	27.6	19.7	64	42	39,07	0,96	E
576	27.6	2.7	97	89	28,85	1,33	D
262	20.7	24.8	neuveveno	neuveveno	67,18	nelze vypočítat	E
190	11.8	19.12	90	1	79,77	0,64	G
62	11.8	30.9	94	65	62,78	0,57	D
776	24.8	19.12	92	27	80,98	0,55	E
576	8.11	7.12	56	2	14,95	1,80	D

Úspěšnost přenosu dat byla specifikována pro druhý klastr pro období od června do začátku prosince roku 2016. Hodnoty úspěšnosti přenosu dat jsou uloženy v tabulce 12. Všechny uzly z této tabulky byly umístěny na stejném místě vzdáleném 32 metrů od brány. Uzly se nacházely dva metry nad zemským povrchem. Brána byla situována za oknem v prvním patře budovy, ve které sídlí Katedra geoinformatiky. Z výsledků je patrné, že rozptyl úspěšně přenesených paketů mezi uzly byl velký. Nicméně je nutné konstatovat, že výdrž baterie v létě byla velmi nízká a uzly, přestože byly plně nabité, nevydržely pracovat déle než deset dnů. Nelze ani konstatovat, že by na přenos dat měl vliv technický stav jednotlivých uzlů, protože u uzlů se shodným ID se úspěšnost přenosu dat značně lišila v různých periodách nasazení. Stejně tak nemá patřičný vliv na úspěšnost přenosu dat ani stupeň nabití baterie uzlu. Důkazem tohoto tvrzení je uzel s ID 829, který byl nasazen do terénu na podzim a byl nabit pouze na 33 %. Po měsíci a půl provozu jeho stav baterie klesl o dvacet procent a uzel nadále operoval v terénu do ledna 2017. Díky výsledkům tohoto šetření je patrné, že nelze jednoznačně konstatovat vliv polohy uzlu na úspěšnost přenosu dat, avšak pokud je uzel více nabit, je vyšší pravděpodobnost, že uzel bude přenášet data s vyšší úspěšností.

Tab. 12. Uzly nasazené ve druhém klastru v roce 2016

ID uzlu	V terénu od	V terénu do	Počáteční baterie	Koncová baterie	Úspěšnost [%]	Výdrž baterie
776	26.5	11.6	96	0	34,26	5,65
735	27.5	30.5	98	98	83,39	0,00
829	2.6	9.6	93	87	93,48	0,75
829	21.6	11.7	95	36	77,85	2,81
615	21.6	2.7	93	0	86,98	8,45
748	4.7	11.7	94	5	96	11,13
748	20.7	30.7	95	0	67,19	23,75
829	21.7	11.8	46	0	98,01	2,09
615	2.8	11.8	78	0	97,16	7,80
262	16.8	20.8	28	21	31,7	1,40
576	16.8	23.8	46	0	71,77	5,75
829	22.8	24.8	73	67	83,07	2,00
615	30.8	9.9	86	0	95,62	7,82
829	8.9	13.9	55	53	26,17	0,33
829	22.9	9.10	50	33	69,51	0,94
576	23.9	1.10	65	0	91,62	7,22
829	9.10	30.11	33	13	79,95	0,38
735	11.10	30.11	96	50	66,97	0,88

### 6.1.7 Neočekávané situace znemožňující záznam dat

V průběhu měření se vyskytly situace, se kterými nebylo na počátku počítáno a které znemožnily získání dat, jejich přenos do databáze či jejich uložení v databázi.

První situací, která zkomplikovala měření v prvním klastru, bylo poškození anemometru malé meteorologické stanice (obr. 66) a přeríznutí prodlužovacích kabelů, které tuto stanici spojovaly s uzlem (obr. 67). Tyto problémy byly způsobeny těžkou technikou a byly objeveny 17. 12. 2015 při pravidelné terénní kontrole. Kabely byly

připájeny a anemometr byl přilepen lepidlem tak, aby nebyla narušena jeho konstrukce. Vše bylo vráceno do terénu dne 19. 12. 2016.

Napojení brány do sítě provázely problémy v obou klastrech, protože brána se chovala jako unikátní DNS resolver (Open DNS Resolver), a tak mohla být zneužita pro DDoS (Denial of Service Attack) útoky. Napadající události byly zaznamenány jak v prvním, tak ve druhém klastru prostřednictvím detekčních systému CESNETu. Brána v prvním klastru je napojena do sítě Regionálního centra Haná a druhá brána funguje pod sítí Univerzity Palackého v Olomouci. Problém s útoky na bránu byl vyřešen s pomocí podpory ze strany firmy Libelium tím, že bylo nutné se připojit pomocí programu FilleZilla s využitím ssh (Secure Shell) protokolu do brány a v konfiguračních souborech na straně brány deaktivovat DNS systém. V době této konfigurace byly brány odpojeny.

Další zaznamenanou nepříjemností bylo, že docházelo k rozbití kontaktů u kombinovaných teplotních a vlhkostních senzorů, které byly přervány nepřetržitým nasazením v terénu (obr. 67). Pokud byly zaznamenány chybné hodnoty zasílané těmito senzory, tak byly senzory staženy a pospájeny. V červnu 2016 došlo k objednání nové sady těchto senzorů, protože ty původní již nebyly použitelné.

Velmi omezujícím byly výpadky brány. Tyto výpadky způsobily, že v jednotlivých obdobích nebyla zaznamenána žádná data. První dlouhodobý výpadek brány v prvním klastru byl na podzim 2015 (od 2. 11. 2015 do 23. 11. 2015) a byl způsoben zhořelým adaptérem, který byl uznán k reklamaci a firma Libelium obratem zaslala nový.

Data nebyla zaznamenána v případě chybné komunikace s databází ani v případě, že brána byla vypnutá – takové situace nastávaly po bouřce nebo po vypnutí elektrického proudu, kdy se brána uvedla do režimu spánku a musela být manuálně restartována. V tomto případě nebylo možné dálkové připojení.

Data nebyla zaznamenána ani v případě neočekávané chyby při komunikaci brány s integrovanou databází MySQL. Výskyt této chyby byl zaznamenán několikrát v roce 2016 a byl způsoben nedostatečnou pamětí. Pro nápravu chyby je nutné vymazat část paměti a restartovat bránu. Tento proces je možné provádět i na dálku.



Obr. 66. Problémy s nefunkčním anemometrem způsobené těžkou polní technikou, zdroj: vlastní fotografie



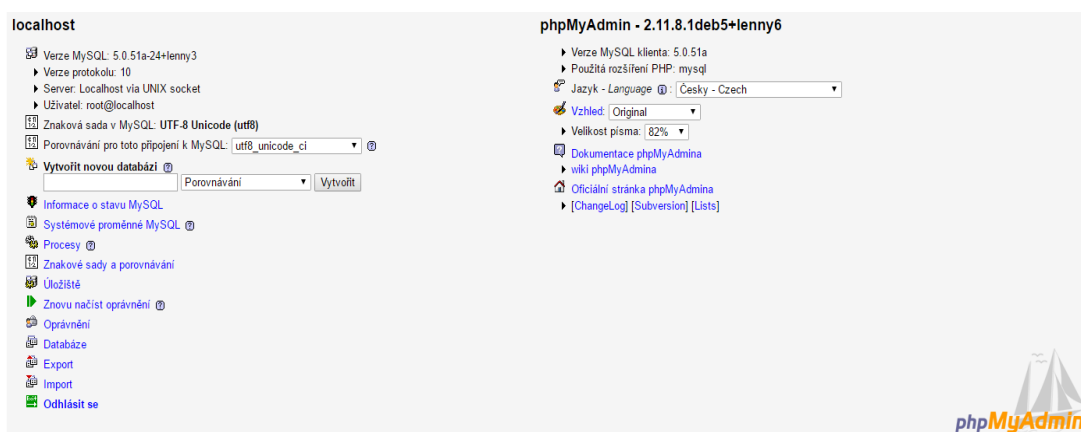
Obr. 67. Přerýznutý drát u anemometru (vlevo), chybný kontakt u kombinovaného teplotního a vlhkostního senzoru (vpravo), zdroj: vlastní fotografie

## 6.2. DC3b - Uložení a předzpracování dat

Uložení a předzpracování dat je klíčovým prvkem pro jejich následné využití, a proto bude popsána struktura databáze a poté i tvorba záložní databáze.

### 6.2.1 Databáze integrované do bran

MySQL databáze v branách jsou spravovány pomocí phpMyAdmin webového klienta. Všechny informace o nastavení serveru a phpMyAdmin jsou uvedeny na obrázku 68. Tyto údaje jsou identické pro databáze a přístup k nim v obou branách.



Obr. 68. Informace o MySQL webovém klientovi, zdroj: databáze integrovaná do brány Meshlium

Do databáze v bráně je možné přistupovat několika způsoby. První z těchto způsobů je založen na bezdrátovém propojení brány a počítače. Po připojení počítače k síti s názvem Meshlium je nutné zadat adresu (10.10.10.1/myadmin). Poté se objeví přihlašovací okno. Další možností, jak přistupovat k bráně, je využití drátového propojení brány a počítače. K samotnému připojení je nutné do prohlížeče zadat adresu brány

(192.168.1.100/myadmin). Po zadání těchto údajů se objeví přihlašovací okno. Poslední možností přihlášení do brány, které je možné i v případě, že se uživatel nenachází v její blízkosti, je využití připojení brány k ethernetu a nastavit ji veřejnou IP adresu, která umožní přístup k bráně i mimo firemní síť. Po spuštění webového prohlížeče zapsat tuto IP adresu a připojit se k bráně. Přihlašovací údaje pro první přístup k bráně jsou integrovány výrobcem a jsou uvedeny v technické dokumentaci brány. Bráně v prvním klastru byla přidělena veřejná IP adresa Regionálním centrem Haná. Bráně ve druhém klastru přidělilo veřejnou IP adresu CVT (Centrum výpočetní techniky) Univerzity Palackého v Olomouci. Přidělené přihlašovací údaje do databáze byly po aktivaci dálkového přístupu v obou branách změněny, aby nedocházelo k nežádaným přístupům.

V databázovém serveru jsou integrovány čtyři databáze, z nichž ta nejdůležitější nese název **MeshliumDB**. V této databázi bylo vytvořeno 12 tabulek pracujících s uzly, senzory. Nejdůležitější tabulkou v této databázi je tabulka *sensorParser*. Do této tabulky jsou ukládána data naměřená senzory připojenými k uzlům. Data byla ukládána dvěma možnými způsoby. Způsob uložení dat byl definován komunikačním protokolem nahraným do uzlu (viz kapitola 6.1.2 Komunikační protokoly). Tabulka *sensorParser* obsahuje jedenáct sloupců. První sloupec s názvem *id* je číslem paketu, který byl do brány přenesen. *Id* je automaticky inkrementováno pro každý nový záznam. Druhý sloupec *id\_wasp* je místem pro poznámku vysílacího uzlu. Sloupec *id\_secret* obsahuje identifikační číslo uzlu, který data zaslal. Tento údaj je automaticky generován bránou. Sloupec *frame\_type* reprezentuje použitý typ rámce. V případě olomoucké sítě byl použit ASCII rámeček. Nejčastěji obdržená hodnota byla 128, která je defaultní a je používána pro rámce v příkladech. Další sloupec *frame\_number* označuje číslo měření, ke kterému data přísluší. Hodnoty se pohybují od 0 do 128. Po naplnění horní hranice se začne příslušnost rámců počítat opět od nuly. Sloupec *sensor* popisuje zkratku názvu senzoru. Data vztažená k tomuto senzoru jsou uložena v dalším sloupci s názvem *value*. Dalším sloupcem v tabulce je sloupec *timestamp*, který nese časovou značku, kdy data byla naměřena. Sloupec *sync* definuje, kolikrát byla data z databáze v bráně přenesena do externí databáze (synchronizována). Sloupec *raw* slouží k uložení dat. Do tohoto sloupce byla ukládána veškerá data ze senzorů, která nebyla přenášena v rámcích. Poslední sloupec *parser\_type* značí typ parsování, který byl nastaven na nulu.

Tabulka *Sensors* obsahuje šest sloupců. Sloupec *id* identifikuje unikátní hodnotu. Sloupce *name* a *description* jsou zaměřeny na popis názvů senzorů. Sloupec *id\_ascii* zobrazuje zkratky senzorů, které jsou použity v tabulce *sensorParser* k označení senzoru, k němuž přísluší naměřené hodnoty. Výčet všech zkratek, které byly použity při měřeních a testování od roku 2014, je uveden v tabulce 13. Jsou zde uvedeny zkratky, které byly použity jak při prvotním přenosu dat bez rámců, tak při přenosu dat v rámcích. Zkratky stejných senzorů se při rozdílných typech zápisu lišily. Na počátku měření nebyly zkratky unikátní, a tak se vyskytovalo to, že jedna zkratka zastupovala více měřených prvků, což značí nesprávný postup, ze kterého vyplývá, že hodnoty určitého prvku mohou být hůře dohledatelné. Při hledání hodnot musel být dodán další atribut, kterým bylo například *id*

uzlu. Pokud se ve výčtu objevily i položky se zkratkami senzorů, které nebyly zakoupeny, jednalo se o testování a tyto zkratky byly zaznamenány pouze v krátkých časových intervalech. V případě zaznamenání dat v rámcích zase docházelo k tomu, že jeden prvek měl více zkratek, což bylo způsobeno tím, že bylo využito více modelů uzlů a senzorových desek.

Tab. 13. Zkratky měřených prvků

Záznam dat bez rámců		Záznam dat v rámcích	
Zkratka	Ropis zkratky	Zkratka	Ropis zkratky
CA	teplota vzduchu	TCB	teplota vzduchu
ST	teplota vzduchu	TCA	teplota vzduchu
CB	relativní vlhkost vzduchu	HUMA	relativní vlhkost vzduchu
SH	relativní vlhkost vzduchu	HUMB	relativní vlhkost vzduchu
CC	CO2	CO2	CO2
CC	solární radiace	PAR	solární radiace
CD	NO2	NO2	NO2
CE	VOC	VOC	VOC
CF	Air Pollutants 2	AP2	Air Pollutants 2
WA	rychlost větru	ANE	rychlost větru
WV	směr větru	ANE	rychlost větru
WP	srážky	PLV1	srážky současná hodina
BAT	stav baterie	PLV2	srážky předchozí hodina
BAT	napětí baterie	PLV3	srážky posledních 24 hodin
		BAT	baterie
		CO	oxid uhelnatý
		LUM	luminiozita
		O3	ozon
		US	ultrasound
		ACC	akcelerometr
		STR	textový řetězec
		RSSI	hodnota RSSI
		TIME	čas
		MILLIS	milis
		MBT	Meshlium Bluetooth skener
		NWIFI	Meshlium Wifi skener
		PS	statut parkovacího místa
		TFA	neuveдено
		NULL	neuveдено

Tabulky *Meshlium* a *Wasmote* obsahují informace o poloze brány respektive uzlů. Kromě souřadnice x a y je určeno, který referenční systém byl pro určení polohy použit. Zbývající tabulky jsou systémové a nebyly v rámci práce nikterak využity.

## 6.2.2 Externí databáze

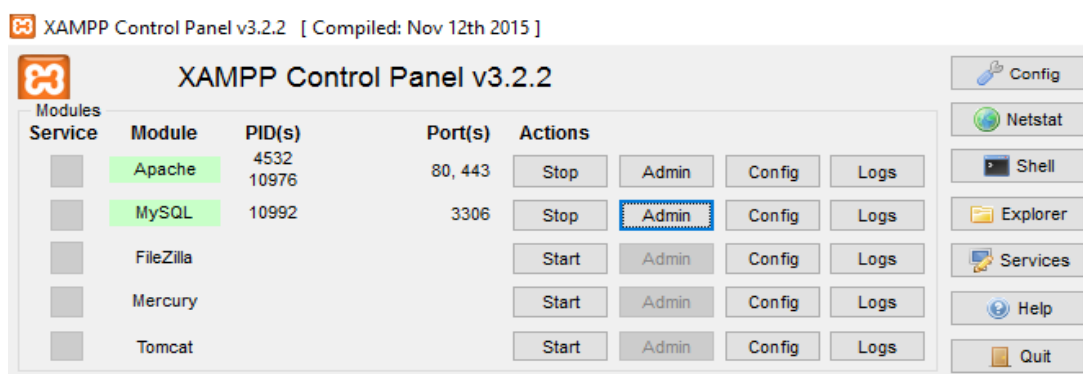
Tato podkapitola popisuje proces tvorby záložní databáze a zaměřuje se na to, jaká data musí být odfiltrována z dalších výpočtů a zpracování.

K tvorbě záložní databáze došlo z několika důvodů. Prvním z nich byla záloha dat. Dalším důvodem byla nutnost odstranění hrubých a systematických chyb v měření. Dále bylo nutné zajistit přístup k naměřeným datům i dalším uživatelům a není možné, aby jim byl umožněn přístup k databázi, která uchovává primární data. Tato externí databáze

obsahuje čtyři tabulky. První sada tabulek (*data\_klastr1* a *data\_klastr2*) je čistou kopií tabulky *sensorParser* z brány prvního (*data\_klastr1*) a druhého klastru (*data\_klastr2*). Do druhé sady tabulek (*data\_klastr1\_filtrovana* a *data\_klastr2\_filtrovana*) nebyly zapisovány hrubé a systematické chyby v měřeních. K těmto tabulkám jsou přidělena přístupová práva pro zájemce o data z experimentální bezdrátové senzorové sítě v Olomouci.

### 6.2.2.1 Tvorba externí databáze

K tvorbě záložní databáze bylo zvoleno prostředí XAMPP pro Windows, verze 5.6.28. Základní rozhraní XAMPPu je na obrázku 69.



Obr. 69. Prostředí XAMPP, zdroj: vlastní měření

K práci s databázovým serverem je nutné nejprve zapnout webový server Apache, který má defaultní nastavení na portu číslo 80. Dále musí být zapnut databázový server MariaDB. Tento databázový server byl zvolen z toho důvodu, že se jedná o open source a je možné provést synchronizaci s MySQL databází integrovanou do brány. Přístup do databáze je zajištěn přes webové prostředí phpMyAdmin. Defaultně je v tomto prostředí již vytvořeno pět databází naplněných tabulkami.

Po prvním přihlášení je nutné nastavit heslo k uživatelskému účtu root. Toto heslo je poté nutno nastavit i v konfiguračním souboru phpMyAdmin *config.inc.php*. Heslo, jméno uživatele a název serveru jsou údaje, které se vždy musí shodovat na straně serveru i databáze.

K přenosu dat z lokální databáze do externí může dojít několika způsoby. Prvním je využití webového rozhraní brány a návodu k synchronizaci databáze. Druhým je replikace lokální databáze.

Při využití prvního synchronizace dat je nutné zajistit veřejnou IP adresu počítače, či propojení webového serveru s veřejnou IP adresou, aby mohlo dojít k propojení databázového serveru na straně brány a na straně uživatele. Po připojení webového serveru k veřejné IP adrese v konfiguračním souboru (*phpMyAdmin config.inc.php*) byla v databázovém prostředí vytvořena databáze **meshlium**. V této databázi byly vytvořeny tabulky *data\_klastr1* a *data\_klastr2*. Do těchto tabulek byla přenášena data z tabulek *sensorParser* v prvním i druhém klastru (kód je uložen v elektronické příloze – DVD ve složce *databazove\_kody*). V prvním klastru byly do tabulky *data\_klastr1* zahrnuta data,



kteřá byla přenesena v rámci od 16. 12. 2016, 14:00. Ve druhém klastru byly do tabulky *data\_klastr2* přenesena data od 24. 5. 2016, 9:56. Tyto časy byly vybrány, protože v tuto dobu byla data přenášena v rámci. Tabulky mají shodnou strukturu s tabulkou *sensorParser*, obsahují devět atributů, z nichž nejdůležitější jsou ty, které nesou informace o identifikaci uzlu (*id\_secret*), názvu senzoru (*sensor*), hodnotu zaznamenanou senzorem (*value*) a časovou značku (*timestamp*). Tabulkám v záložní databázi je nutné přidělit práva. Všechny údaje nezbytné pro synchronizaci databázi jsou zapsány ve webovém prostředí samotné brány v záložce zabývající se bezdrátovou sensorovou sítí v sekci zaměřené na databázi, respektive externí databázi. V této části je možné ověřit si propojení databázi a při úspěšném propojení je možné databáze synchronizovat. Pro synchronizaci musí být nastavena shodná IP adresa, port, jméno uživatele a heslo ve webovém prostředí brány a v externí databázi. Dále je ve webovém rozhraní brány možné nastavit čas, po kterém se data budou do externí databáze přenášet. Vždy se přenáší všechna data, která mají ve sloupci *sync* hodnotu nula. Data, která byla již jednou synchronizována, mají nastavenou hodnotu *sync* na číslo jedna. Synchronizace běží každých 20 sekund a synchronizuje se maximálně 200 položek najednou. Interval synchronizace je možné měnit, nejprve jsou synchronizována starší data (Libelium, 2016c). Proces synchronizace probíhá až do okamžiku, kdy je vypnut nebo odstaven webový server, nebo dokud nejsou přenesena všechna data z brány. Aby byla zachována plnohodnotná záloha tabulek *sensorParser* z obou klastrů, byly v databázi vytvořeny další tabulky (*data\_klastr1\_filtrovana* a *data\_klastr2\_filtrovana*), do kterých byla filtrována data bez hrubých a systematických chyb popsanych v následujících kapitolách.

Při druhém způsobu přenosu dat je třeba provést replikaci MySQL databáze. Jedná se o základní kopii dat z jednoho databázového serveru na druhý, jak je popsáno v Kofler (2007), Boronczyk (2016) a mnoha dalších publikacích. Replikace databázi z obou klastrů nebyla v rámci práce prováděna.

#### 6.2.2.2 Filtrace dat

V datech přenesených z uzlů bezdrátové sensorové sítě do primární databáze se nachází velké množství hrubých i systematických chyb způsobených jak chybami v měření, tak i způsobem přenosu a uložení dat.

##### *Hrubé chyby*

Mezi hrubé chyby nacházející se v datech, se řadí textové řetězce ve sloupci *value*, které jsou v tomto sloupci ukládány v případě, že uzel byl přidán do terénu, aby se ohlásil nebo v případě, že došlo k vybití jeho baterie.

Dále se objevují výrazné odchylky od reálných hodnot. Tyto odchylky se vyskytovaly v případě, že došlo k přerušení kontaktů mezi senzorem a zaznamenávacím zařízením. V tomto případě se objevovaly defaultní hodnoty do té doby, než byla chyba opravena. Nejčastěji tak byly zaznamenány hodnoty teploty rovny  $-39,7$  °C (obr. 70) a relativní

vlhkosti stanovené na hodnotu -2,08 % u modelu Smart Agriculture. Chybně zaznamenané relativní vlhkosti u uzlů Smart Environment měly hodnotu -25,8 % a teploty 62,9 °C.

timestamp	sync	raw
2015-07-18 08:41:14	0	I:382549735#N:26954#ST:24.47#SH:61.03#WA:0.00#WP:0...
2015-07-18 08:42:09	0	I:382542829#N:542#ST:-39.70#SH:-2.08#WA:0.00#WP:0....

Obr. 70. Ukázka hrubé chyby v měření, zdroj: vlastní měření

Náprava těchto hrubých chyb spočívá v odfiltrování záznamů, které obsahují textová data, ve sloupci *value*. Dále byly odfiltrovány teploty vyšší než 40 °C a teploty nižší než minus 25 °C. Tyto hodnoty byly odfiltrovány, protože v roce 2016 a na počátku roku 2017 takové extrémní teploty nenastaly, a tak na podkladě těchto hodnot lze vyloučit hrubé chyby v měření. Pro vlhkost bylo ve filtru nastaveno, že se může pohybovat pouze v rozmezí 0 % až 100 %. Velmi často se v naměřených hodnotách objevovaly relativní vlhkosti vyšší než 100 %, což je hrubá chyba.

### Systematické chyby

Výrazné chyby se objevovaly v měření teplot i poté, co byly měřiče nakalibrovány. Důkazem tohoto jsou změny teploty vyšší než 10 °C v pětiminutovém intervalu měření. Chyby v měření chemických senzorů nemohly být odhaleny, protože senzory nebyly korektně nakalibrovány.

Na počátku výzkumu nebyla data přenášena v rámcích, a tak docházelo k chybným záznamům dat. Tyto chybné záznamy spočívaly v nesprávném zapsání dat do řádku (obr. 71). Způsobů chybného zápisu dat bylo několik, a tak musely být všechny identifikovány a ošetřeny ve vytvořeném skriptu, který tato data upravuje. Z tohoto důvodu bylo koncem roku 2016 od tohoto přenosu dat upuštěno.

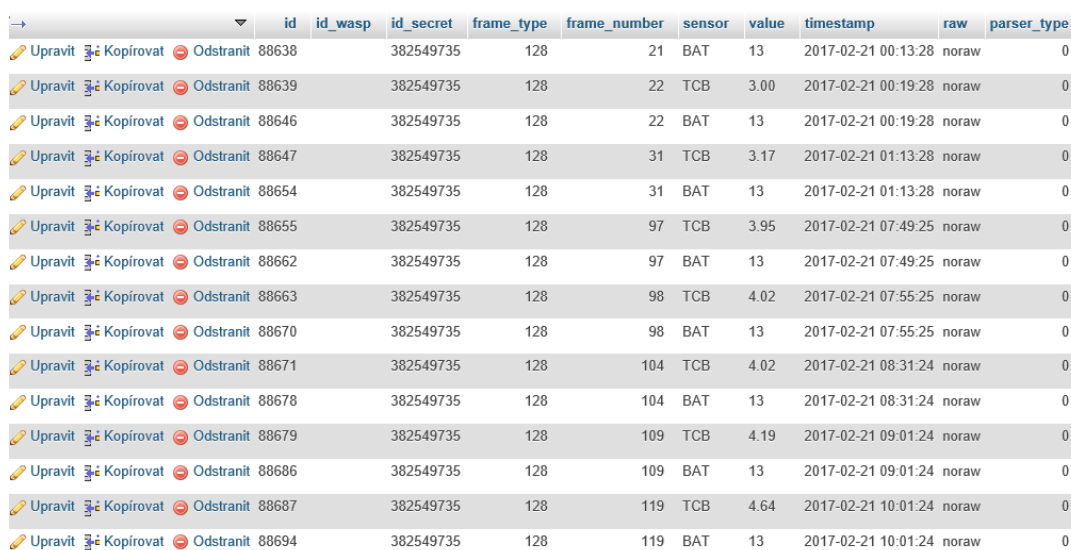
timestamp	sync	raw
2015-07-18 08:41:14	0	I:382549735#N:26954#ST:24.47#SH:61.03#WA:0.00#WP:0...
2015-07-18 08:42:09	0	I:382542829#N:542#ST:-39.70#SH:-2.08#WA:0.00#WP:0....
2015-07-18 08:42:09	0	W
2015-07-18 08:46:31	0	I:382549735#N:26955#ST:24.53#SH:60.81#WA:0.00#WP:0...
2015-07-18 08:47:26	0	I:382542829#N:543#ST:-39.70#SH:-2.08#WA:0.00#WP:0....
2015-07-18 08:51:48	0	I:382549735#N:26956#ST:25.07#SH:60.07#WA:0.00#WP:0...
2015-07-18 08:52:43	0	I:382542829#N:544#ST:-39.70#SH:-2.08#WA:0.00#WP:0....
2015-07-18 08:57:05	0	I:382549735#N:26957#ST:24.89#SH:58.31#WA:0.00#WP:0...
2015-07-18 08:58:00	0	I:382542829#N:545#ST:-39.70#SH:-2.08#WA:0.00#WP:
2015-07-18 08:58:00	0	0.00#WV:W

Obr. 71. Chybně zaznamenaná data v databázi, zdroj: vlastní měření

Ze systematických chyb byly napraveny ty, které poukazovaly na chybná měření v krátkém časovém úseku, byla tak vyloučena teplotní data, mezi kterými byl rozdíl v pětiminutovém intervalu měření vyšší než 10 °C.

### 6.2.2.3 Tvorba tabulek filtrovaných dat a triggerů

Trigger *filtr\_dat* byl vytvořen nad tabulkami *data\_klastr1* a *data\_klastr2*. Tento trigger má nastavenou aktivaci před vložením dat do nové tabulky *data\_klastr1\_filtrovana* nebo *data\_klastr2\_filtrovana*. Trigger má nastaveny podmínky pro ošetření hrubých a systematických chyb, které byly zmíněny výše. Obrázek 72 ukazuje náhled do tabulky *data\_klastr2\_filtrovana*.



	id	id_wasp	id_secret	frame_type	frame_number	sensor	value	timestamp	raw	parser_type
Upravit Kopírovat Odstranit	88638		382549735	128	21	BAT	13	2017-02-21 00:13:28	noraw	0
Upravit Kopírovat Odstranit	88639		382549735	128	22	TCB	3.00	2017-02-21 00:19:28	noraw	0
Upravit Kopírovat Odstranit	88646		382549735	128	22	BAT	13	2017-02-21 00:19:28	noraw	0
Upravit Kopírovat Odstranit	88647		382549735	128	31	TCB	3.17	2017-02-21 01:13:28	noraw	0
Upravit Kopírovat Odstranit	88654		382549735	128	31	BAT	13	2017-02-21 01:13:28	noraw	0
Upravit Kopírovat Odstranit	88655		382549735	128	97	TCB	3.95	2017-02-21 07:49:25	noraw	0
Upravit Kopírovat Odstranit	88662		382549735	128	97	BAT	13	2017-02-21 07:49:25	noraw	0
Upravit Kopírovat Odstranit	88663		382549735	128	98	TCB	4.02	2017-02-21 07:55:25	noraw	0
Upravit Kopírovat Odstranit	88670		382549735	128	98	BAT	13	2017-02-21 07:55:25	noraw	0
Upravit Kopírovat Odstranit	88671		382549735	128	104	TCB	4.02	2017-02-21 08:31:24	noraw	0
Upravit Kopírovat Odstranit	88678		382549735	128	104	BAT	13	2017-02-21 08:31:24	noraw	0
Upravit Kopírovat Odstranit	88679		382549735	128	109	TCB	4.19	2017-02-21 09:01:24	noraw	0
Upravit Kopírovat Odstranit	88686		382549735	128	109	BAT	13	2017-02-21 09:01:24	noraw	0
Upravit Kopírovat Odstranit	88687		382549735	128	119	TCB	4.64	2017-02-21 10:01:24	noraw	0
Upravit Kopírovat Odstranit	88694		382549735	128	119	BAT	13	2017-02-21 10:01:24	noraw	0

Obr. 72. Náhled do tabulky *data\_klastr2\_filtrovana*, zdroj: vlastní měření

Zdrojové kódy triggerů pro první i druhý klastr jsou uvedeny v elektronické příloze – DVD ve složce *databazove\_kody*.

Pro prohlížení dat byl vytvořen uživatel *wsn*, kterému byl přidělen bezheslový přístup do tabulek *data\_klastr1\_filtrovana* a *data\_klastr2\_filtrovana* a v rámci prohlížení dat mu bylo umožněno používat příkaz pro výběr dat dle jím zadaných parametrů (SELECT).

## 7. DC4 – ZPRACOVÁNÍ TEMATICKÝCH DAT A JEJICH VIZUALIZACE

V rámci této kapitoly jsou tematická data rozdělena na dvě části – první zaměřující se na naměřené hodnoty základních meteorologických prvků a druhou zabývající se znečišťovateli ovzduší v Olomouci.

### 7.1 Základní meteorologické prvky

Nejprve bude provedeno porovnání hodnot základních meteorologických prvků s referenčními hodnotami získanými od ČHMÚ. Dále byl řešen vztah mezi základními meteorologickými prvky získanými v jednotlivých klastrech. K porovnání hodnot bude třeba zaměřit pozornost na nasazení uzlů v prvním i druhém klastru, ať již na jejich ID nebo na časové období, ve kterém získávaly data. Pozornost bude zaměřena na rozdíly teplotních hodnot a to, jestli v Olomouci dochází k tvorbě tepelného ostrova při daném rozmístění měřidel. Vliv terénu nebyl uvažován, protože nadmořská výška obou klastrů je takřka identická, rozdíl činí pouze 4 výškové metry.

#### 7.1.1 Porovnání naměřených hodnot s referenčními hodnotami

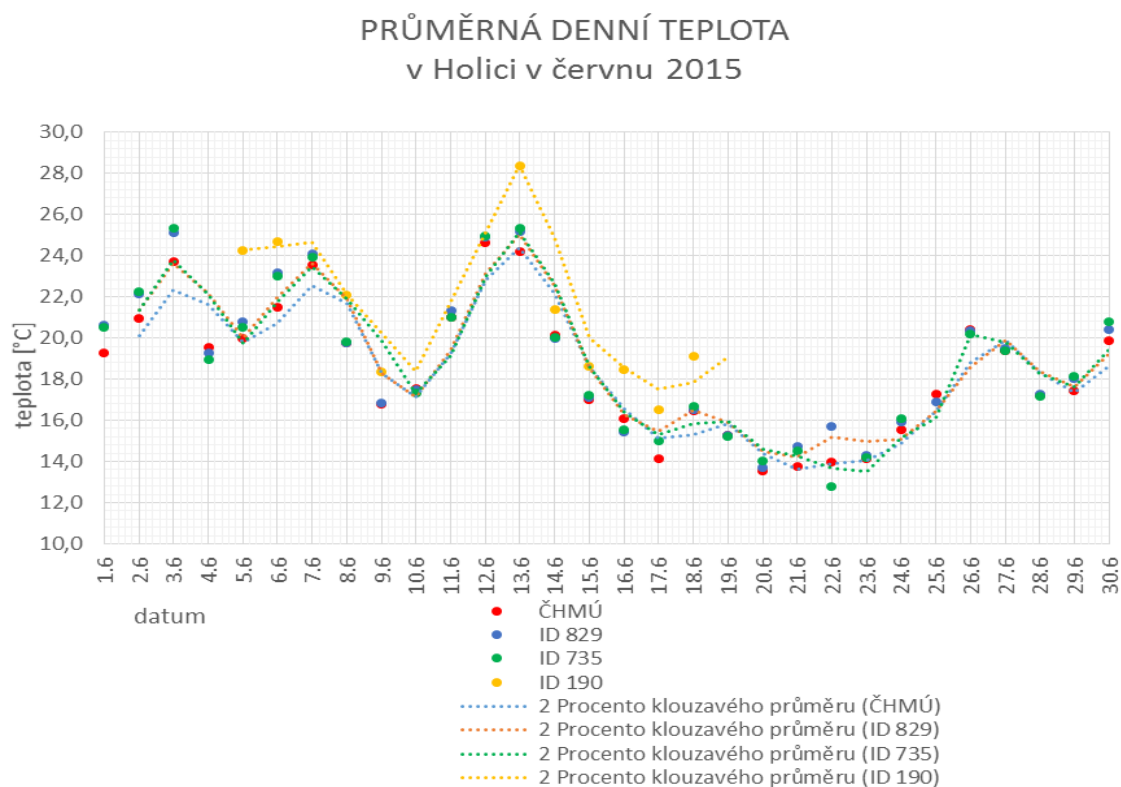
Pro rok 2015 byly referenční hodnoty základních meteorologických prvků získány od Českého hydrometeorologického ústavu, jehož stanice se nachází na sousedním pozemku prvního klastru. V tomto roce byla prováděna měření pouze v prvním klastru. V listopadu 2015 proběhla kalibrace senzorů, a tak bylo možné ověřit její vliv na měření v reálném provozu. V roce 2016 již nebylo o data z Českého hydrometeorologického ústavu žádáno a v případě potřeby ověření měření bylo možné využít data od pana Roberta Šišmy nebo ze stanice Katedry geoinformatiky.

Porovnání naměřených dat s referenčními daty bylo provedeno pro všech šest uzlů a jejich senzory, které byly za půl roku dostupnosti referenčních dat do terénu nasazeny. Nutno upozornit na fakt, že data z uzlů nejsou vždy obdržena ve shodném čase, a tak bylo nutné pomocí funkce MROUND() sjednotit časy záznamu, aby byly v grafech porovnatelné. Jednalo se o čtyři uzly z řady Smart Environment (ID 776, ID 190, ID 362, ID 748) a o dva uzly z řady Smart Agriculture (ID 735 a ID 829). V letních a podzimních měsících nebyly senzory nakalibrovány, v zimním měsíci již byly po kalibraci nasazeny do terénu. Porovnání teplotních a vlhkostních hodnot proběhlo pomocí výpočtu průměrných denních teplot z hodnot získaných v klimatologických termínech měření dle vzorce  $((t = t_7+t_{14}+t_{21}+t_{28})/4)$  (Vysoudil, 2013). Byly porovnány průměrné denní teploty a denní průměrné vlhkosti vzduchu ze všech činných uzlů. Pokud nebyla uzlem zaznamenána hodnota ve stanovený čas, tak se brala hodnota pět minut před nebo po klimatologickém čase měření. Pokud ani v tuto dobu nebylo nic zaznamenáno, bylo určeno, že je málo dat a data nebyla k výpočtu průměrné denní hodnoty použita. Kromě průměrných hodnot teploty byly zjišťována maxima a minima teplot (viz elektornické přílohy ve složce tematicka\_data). Tyto hodnoty poukážou na přesnost měření senzoru.

Extrémní hodnoty vlhkosti vzduchu nejsou uloženy v přílohách, protože vlhkostní měření vykazují vyšší rozmanitost než teplotní, a pokud byly zaznamenány chybné hodnoty, tak se toto projeví již v průměrných denních hodnotách.

Malá srážkoměrná stanice byla na uzly z řady Smart Agriculture napojena až od září, sledovala směr a rychlost větru. Porovnání dat pro směr a rychlost větru bylo tedy provedeno pro měsíc září. Byla snaha porovnat jak oba uzly z řady Smart Agriculture vzájemně, tak porovnat i získaná data v daty od ČHMÚ.

Porovnání teplotních dat z uzlů a ČHMÚ stanice v průběhu letního měsíce června je uvedeno na obrázku 73. Jedná se o typickou ukázkou vyšší kvality měření uzlů z řady Smart Agriculture a nestabilnosti v měření senzorů připevněných na uzel Smart Environment. Uzel ID 190 má shodný trend se zbývajícím uzly, nicméně teploty jím získané jsou nadhodnocené. Data jsou proložena klouzavým průměrem s hranicí dvou procent. Tento klouzavý průměr umožňuje vyhladit získaná data a tímto získat lepší představu o průběhu hodnot na uzlech a referenčních datech.

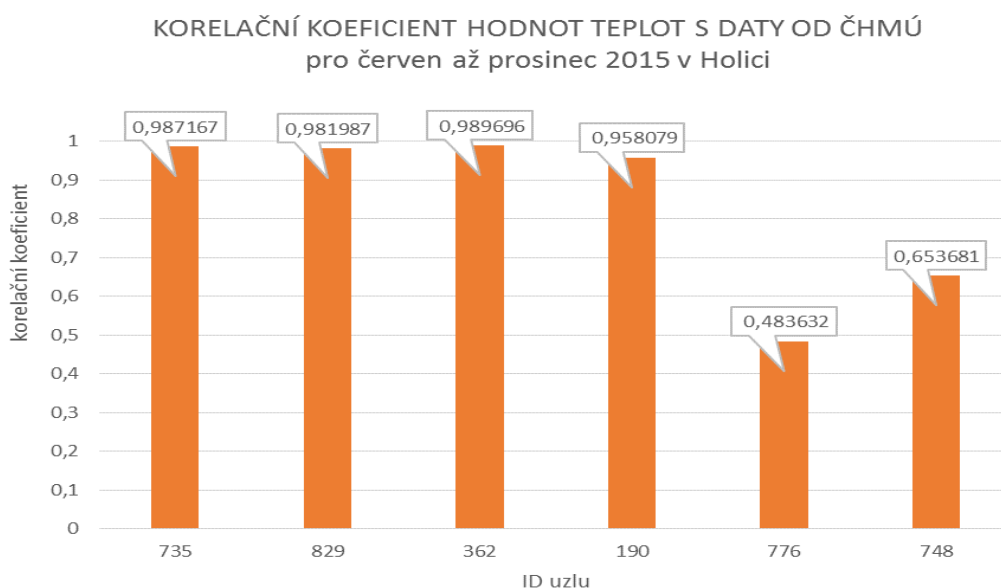


Obr. 73. Průměrná denní teplota ze tří uzlů a ze stanice ČHMÚ pro červen 2015 v Holicí, zdroj: vlastní měření

Z extrémních hodnot teplot uvedených v elektornických přílohách na DVD ve složce tematicka\_data je patrné, že uzly nezískávaly korektní data. Rozdíly oproti referenčním datům se projevily více na příkladu maximálních teplot. Uzel ID 362 vykazoval velmi

vysoké maximální teploty, které dosahovaly až 100 stupňů Celsia. Uzel ID 735 se nejvíce v hodnotách extrémů přibližoval k referenčním datům. Následoval jej uzel ID 829, přestože jím byla zaznamenána jedna na první pohled nekorektní maximální hodnota (42052,00 °C).

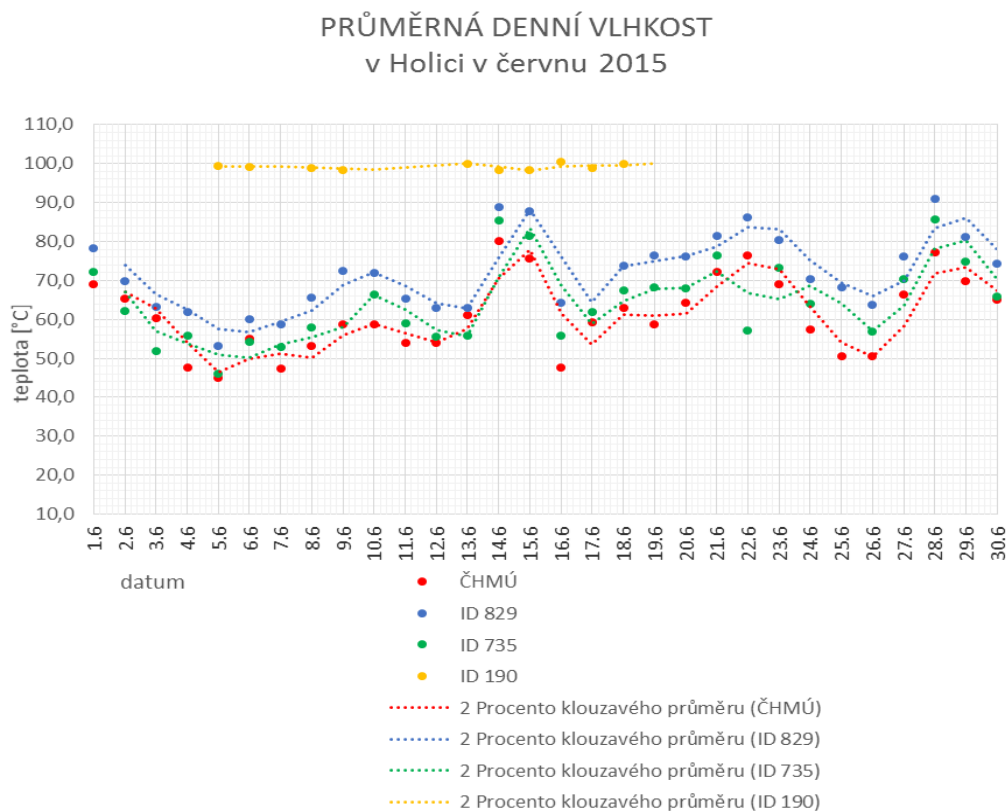
Korelační koeficient byl vypočítán postupně pro všechny průměrné denní teploty vypočítané z hodnot jednotlivých uzlů ve vztahu k hodnotám získaným na stanici ČHMÚ (obr. 74). Nejvyšší korelační koeficienty byly zjištěny u uzlů z řady Smart Agriculture a u jednoho uzlu z řady Smart Environment, který byl v terénu umístěn přes letní měsíce. Tento uzel vykazoval poměrně přesné hodnoty měření i v období, kdy ještě nebyl nakalibrován. Nejnižší hodnoty korelačního koeficientu pro průměrné denní teploty byly zjištěny u uzlu ID 776 z řady Smart Environment, který byl ve venkovních podmínkách pouze po čtyři dny. Tento malý soubor dat se odráží na nízké hodnotě korelačního koeficientu, přesto ale na první pohled je zřejmé, že hodnoty naměřené tímto uzlem jsou nadhodnoceny. Toto tvrzení dokazují i denní extrémní teploty, z nichž maximální teploty jsou až o deset stupňů vyšší než ty získané na stanici.



Obr. 74. Korelační koeficient pro teplotní měření v Holicích v druhé polovině roku 2015, zdroj: vlastní měření

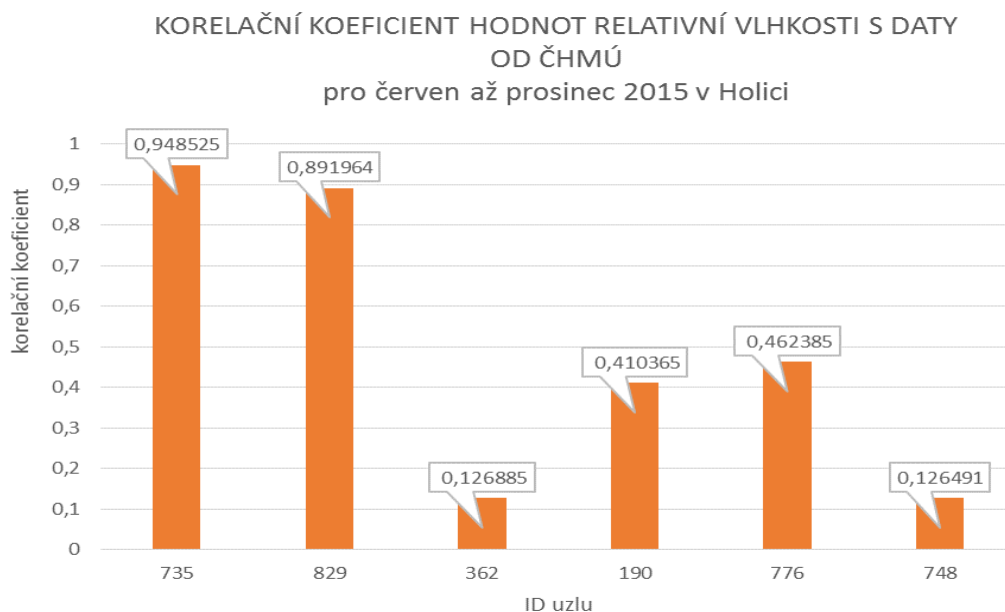
Průměrné denní vlhkosti vzduchu byly počítány stejným způsobem jako průměrné denní teploty a také pro všechny uzly nasazené v půlroce, kdy byla k dispozici data od ČHMÚ. Při měření relativní vlhkosti vzduchu docházelo u uzlů z řady Smart Environment k tomu, že vlhkovní senzory nepracovaly korektně, protože data zaznamenaná velmi často přesahovala hranici 100 %, což je zřejmé i z průměrných denních hodnot (obr. 75), a tak vlhkovní data získaná uzlem ID 190 nemohla být brána v potaz. Průměrné denní hodnoty vlhkosti vzduchu získané uzly z řady Smart Agriculture

mají shodný trend jako referenční data, ale pohybují se ve vyšších hodnotách. Získané hodnoty byly proloženy klouzavým průměrem s hranicí dvou procent.



Obr. 75. Průměrná denní vlhkost ze tří uzlů a stanice ČHMÚ pro červen 2015 v Holici, zdroj: vlastní měření

Dle vypočtených korelačních hodnot mezi průměrnými denními vlhkostmi z dat od ČHMÚ a dat získaných od senzorů je zřejmé, že uzly z řady Smart Environment jsou pro vlhkostní měření nepoužitelné a to i poté, co byly nakalibrovány (obr. 76). U dvou uzlů byly indikovány velmi nízké hodnoty korelačního koeficientu. U uzlů z řady Smart Agriculture je korelační koeficient vyšší, a tak hodnoty získané těmito uzly mohou být použity k dalším výpočtům a analýzám.



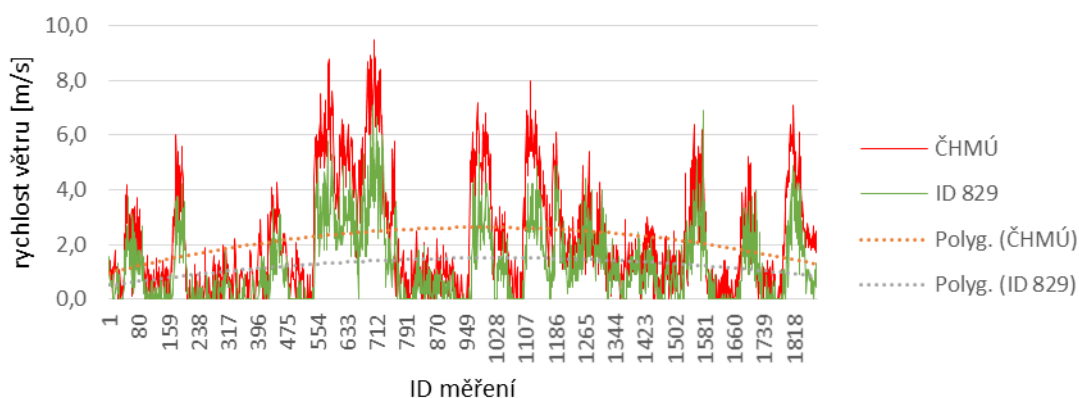
Obr. 76. Korelační koeficient pro vlhkostní měření v Holici v druhé polovině roku 2015, zdroj: vlastní měření

Směr a rychlost větru byly měřeny uzly z řady Smart Agriculture na malé meteorologické stanici. Jednalo se o měření přízemních charakteristik tohoto jevu, a tak nelze očekávat úplnou shodu s daty získanými od ČHMÚ, protože na této stanici se měří rychlost větru v 10 metrech nad zemským povrchem, aby hodnoty rychlosti větru nebyly ovlivněny terénem.

Pokud se hodnoty rychlosti větru naměřené uzly přeci jen porovnají s referenčními daty, jsou hodnoty rychlosti větru vyšší ty naměřené Českou hydrometeorologickou stanicí. Ve vlastních datech dochází k vyšším odchýlkám v měřených časových intervalech pro měsíc září. Data z tohoto měsíce byla použita, protože se jedná o měsíc, kdy bylo nasbíráno nejvíce dat uzly Smart Agriculture (ID 735 a ID 829). Korelační koeficient byl vyšší pro uzel s označením ID 829 a dosahoval hodnoty 0,784955. Pro uzel s ID 735 byl korelační koeficient o dvě setiny nižší. Na obrázku 77 je ukázáno porovnání referenčních dat a dat získaných uzlem ID 829, jímž naměřené hodnoty jsou přesnější. Polynomický trend obou souborů dat je velmi podobný. Lze předpokládat, že vyšší hodnoty změřené senzory než referenční stanicí mají původ v umístění větroměrů do odlišných výšek. Uzly naměřené hodnoty jsou nižší, protože jsou ovlivněny překážkami v terénu, především travnatým porostem v místech jejich lokalizace.

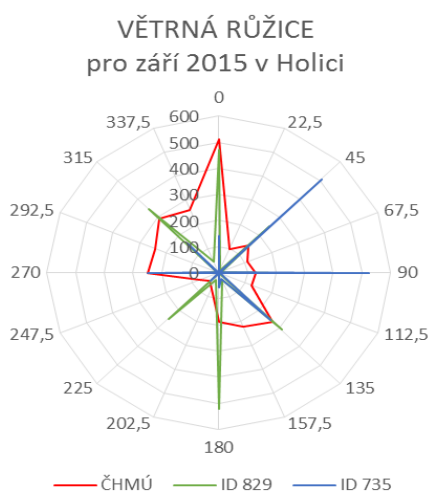


**POROVNÁNÍ HODNOT RYCHLOSTI VĚTRU Z UZLU S ID 829  
K REFERENČNÍM DATŮM  
v Holici v září 2015**



Obr. 77. Porovnání uzlu ID 829 s daty z ČHMÚ pro září 2015 v Holici, zdroj: vlastní měření

Dva uzly sledovaly směr větru (ID 735, ID 829). Nejdelsí souvislá řada těchto dat byla získána za září 2015. V porovnání s referenčními daty jsou naměřená data odlišná. Ani hodnoty změřené uzly, které byly od sebe vzdálené 169 metrů, se neshodují. Přestože byl směr větru měřen na uzlech ve shodných podmínkách, tak pouze v 12,34 % se hodnoty směru větru na obou uzlech shodovaly. Větrná růžice pro vyhodnocení převládajícího směru větru od 3. 9. do 23. 9. 2015 v Holici poukazuje na nižší citlivost senzorů oproti stanici ČHMÚ (obr. 78). Při měření uzlem s ID 735 převažují severní a jižní větry. Uzel s ID 829 zaznamenal nejvíce větrů vanoucích ze západu a severozápadu. Na stanici ČHMÚ došlo ke shodě s uzlem s ID 829 s převažujícími severními větry, po severním směru byly na stanici zaznamenány četné severozápadní větry.



Obr. 78. Četnost směrů větru v září 2015 v Holici, zdroj: vlastní měření

### **7.1.2 Vztah mezi naměřenými hodnotami základních meteorologických prvků v klastrech**

Vztah mezi naměřenými daty v obou klastrech byl sledován pro červen až prosinec 2016. Konec sledování byl stanoven na 15. 12. 2016, protože dne 16. 12. 2016 došlo ke změně typu přenosu dat v prvním klastru a data začala být přenášena v rámcích. Tento začátek nového typu přenosu dat byl provázen komplikacemi způsobenými odlišným nastavením uzlů a jiným zápisem dat, který způsobil rychlejší vybití uzlů, a tak bylo rozhodnuto, že tato data již nebudou k porovnání použita. Všechny uzly byly umístěny ve vzdálenosti alespoň 3 metry od budov na travnatém povrchu. Senzory byly ve výšce 2 metry nad zemským povrchem. Uzly v prvním klastru jsou v grafech znázorněny chladnými barvami, uzly ve druhém klastru jsou v teplých barvách.

Nejprve jsou vyjmenovány uzly, které byly v obou klastrech využity ke sledování ve zmíněném půlroce. Poté je při porovnání meteorologických prvků věnována největší pozornost teplotním hodnotám. Následně jsou sledovány vlhkostní hodnoty, meteorologická stanice byla nasazena vždy pouze v jednom klastru. K tomuto došlo z důvodu nedostatku uzlů, na které tato stanice může být napojena.

#### *7.1.2.1 Uzly nasazené v prvním klastru*

V prvním klastru bylo po toto období vystřídáno devět uzlů ve venkovním prostředí a jeden uzel byl umístěn uvnitř. To, jak uzly byly v prvním klastru v provozu, je uvedeno v digitální příloze – DVD ve složce provoz\_uzlu. Uzly z řady Smart Agriculture jsou následující ID 735, ID 031 a ID 262. Ostatní uzly jsou méně přesné modely Smart Environment.

Z uzlů, které byly během tohoto půlroku použity, byly s referenčními daty v roce 2015 porovnány teplotní a vlhkostní senzory následujících uzlů ID 362, ID 190, ID 776 a ID 735. Nejhorší korelační koeficient pro teplotní měření byl zjištěn pro uzel ID 776. Vlhkostní měření byla při porovnání použitelná pouze z uzlů ID 735. Během měření v roce 2016 bylo nejvíce dat získáno uzlem ID 362, který se v terénu nacházel od února 2016 a pracoval až do vybití baterie dne 16. 12. 2016. Uzel s ID 576 měl v podzimních a zimních měsících chybně připojený teplotní senzor, a tak jím naměřené hodnoty teploty nemohly být použity. Taktéž hodnoty vlhkosti vzduchu přesahovaly 100 %, a tak ani vlhkostní měření získaná tímto uzlem nemohou být použita. Uzel s ID 190 taktéž vykazoval chybná měření vlhkosti překračující hranici 100 %. Uzel ID 776 ve vlhkostních měřeních vykazoval záporné hodnoty, a tak také nemohl být použit. Malá meteorologická stanice zaznamenávající směr a rychlost větru byla v provozu pouze od 1. 6. do 19. 7. 2016.

#### *7.1.2.2 Uzly nasazené ve druhém klastru*

Ve druhém klastru byly nasazeny maximálně tři uzly, které byly umístěny na jedné tyči. V tomto klastru bylo vystřídáno osm uzlů, z toho tři z řady Smart Agriculture (ID 829, ID 735, ID 031) a pět z řady Smart Environment (ID 776, ID 576, ID 615,

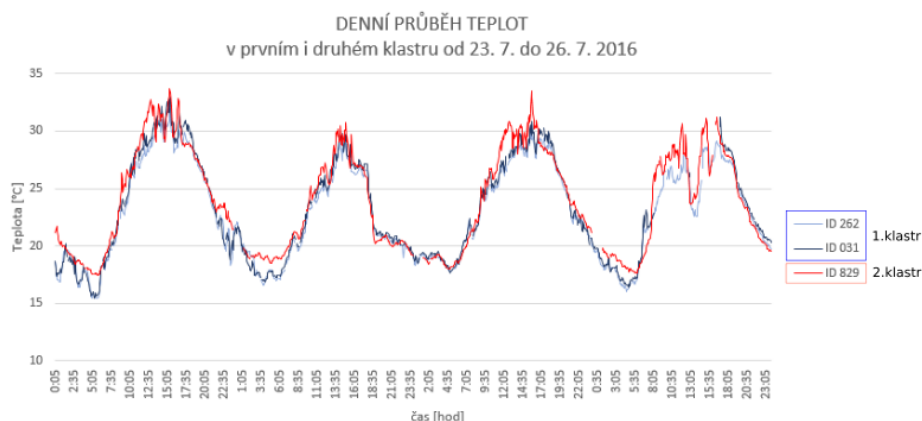
ID 748, ID 262). Rozvržení uzlů v terénu je uvedeno v elektornické příloze na DVD ve složce provoz\_uzlu.

Uzel s ID 031 byl v provozu pouze po dobu jedné hodiny, a tak jeho data také nemohla být využita. Uzel ID 262 také nemohl být využit, protože jeho data byla po dobu pěti dnů zaznamenána vždy až po dvanácté dopolední hodině. Tyto dva zmíněné uzly nejsou kvůli zmíněným problémům uvedeny v příloze pojednávající o nasazení uzlů v terénu. Data získaná uzlem ID 735 v letním období nemohla být použita. Při měření měl chybně napojený kombinovaný senzor měřící teplotu a vlhkost, a tak hodnoty jím naměřené nemohly být použity. Při druhém podzimním využití tohoto uzlu již bylo vše v pořádku. Uzel s ID 576 zaznamenával hodnoty vlhkosti vzduchu přesahující hranici 100 %. V několika případech se objevily hodnoty vlhkosti nad 100 % i u uzlu ID 615. Jelikož těchto hodnot nebylo mnoho a ostatní měření nevykazovala značné odchylky od dat získaných ostatními uzly, byly vymazány pouze tyto hodnoty a zbývající data zůstala ponechána. Malá meteorologická stanice získávající data o srážkách, směru a rychlosti větru byla zapojena pouze s malými výkyvy po celou dobu měření.

### 7.1.2.3 Porovnání meteorologických hodnot získaných v obou klastrech

Z pohledu meteorologických hodnocení je nutné brát ohled na denní chod meteorologických prvků, nástupy extrémních hodnot a následně počítat s průměrnými hodnotami jednotlivých prvků za vybrané období Vysoudil (2013), Tolasz a kol. (2007).

Denní průběh teplot zaznamenaný v obou klastrech přesnějšími uzly po dobu čtyř letních dnů poukazuje na vyšší maximální hodnoty teplot ve druhém klastru, zároveň není v tomto klastru zaznamenan tak výrazný pokles teplot v nočních hodinách (obr. 79). Tyto čtyři dny byly vybrány, protože se jednalo období, ve kterém bylo získáno nejvíce hodnot alespoň třemi přesnějšími uzly.



Obr. 79. Denní průběh teplot v prvním i druhém klastru od 23. 7. do 26. 7. 2016, zdroj: vlastní měření

Souhrn tabulek (tab. 14) ukazuje extrémní teploty ve vybraných čtyřech dnech společně s teplotní amplitudou. K těmto teplotám je dodán čas, ve kterém byly hodnoty zaznamenány. V letním období se maximální teploty vyskytovaly mezi druhou a pátou

hodinou odpolední, minimální teploty byly mezi čtvrtou a šestou hodinou ráno. Maximální denní teplota v Olomouci je vyznačena červeně, minimální teplota naměřená v Olomouci je označena modře. Nejvícekrát byla nejvyšší teplota naměřena uzlem v druhém klastru. Nejnižší teploty byly vždy na uzlech v prvním klastru. Denní maximální teplota nasávala zpravidla dříve v prvním klastru, podobný trend měla i denní minima, která byla nejvícekrát dříve zaznamenána uzlem v prvním klastru. Teplotní amplituda byla pouze v jednom případě vyšší na uzlu ve druhém klastru. Rozdíl mezi teplotními amplitudami v obou klastrech nebyl v těchto dnech výrazný.

Tab. 14. Denní extrémní teploty v prvním i druhém klastru v červenci 2016 (nejvyšší denní hodnoty ze všech uzlů jsou označeny červeně, nejnižší modře), zdroj: vlastní měření

<b>ID 262</b>	23.7	24.7	25.7	26.7
Denní maximum	31,95	29,22	29,89	29,17
Denní minimum	15,43	16,56	17,74	16,00
Denní amplituda	16,52	12,66	12,15	13,17

<b>ID 262</b>	23.7	24.7	25.7	26.7
Denní maximum	15:30	14:55	15:40	16:35
Denní minimum	5:40	3:55	5:00	4:30

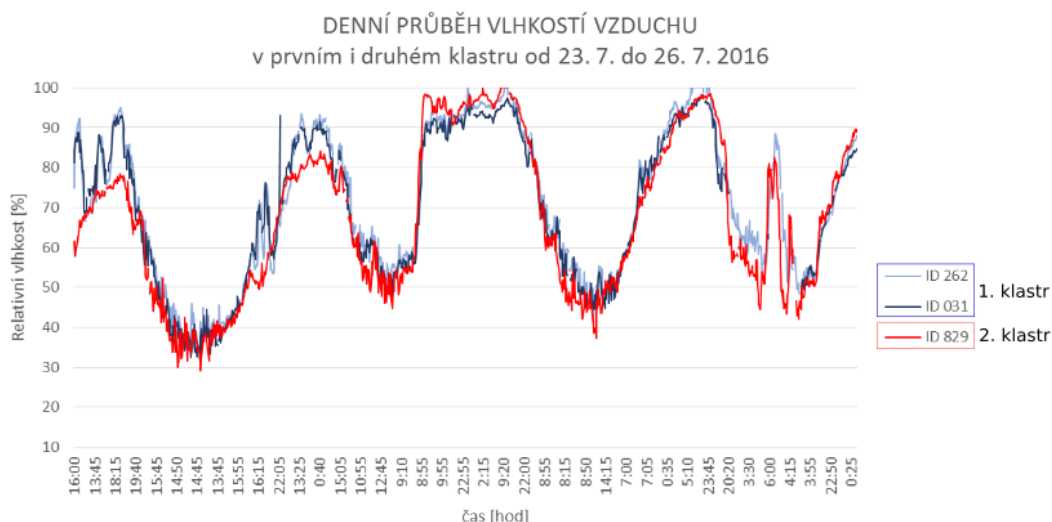
<b>ID 031</b>	23.7	24.7	25.7	26.7
Denní maximum	32,91	29,81	30,81	32,47
Denní minimum	15,47	16,9	17,67	16,37
Denní amplituda	17,44	12,91	13,14	16,1

<b>ID 031</b>	23.7	24.7	25.7	26.7
Denní maximum	15:30	14:10	15:55	15:20
Denní minimum	5:20	4:15	4:55	4:55

<b>ID 829</b>	23.7	24.7	25.7	26.7
Denní maximum	33,67	30,74	33,50	31,19
Denní minimum	17,44	18,46	17,98	17,62
Denní amplituda	16,23	12,28	15,52	13,57

<b>ID 829</b>	23.7	24.7	25.7	26.7
Denní maximum	15:25	15:00	15:50	16:40
Denní minimum	5:45	4:55	4:45	5:40

Denní průběh vlhkostí v těchto čtyřech dnech na uzlech s přesnějšími vlhkostními senzory poukazuje na to, že jejich průběh je velmi podobný (obr. 80). Jediný rozdíl je patrný ve vyšší rozkolísanosti relativních vlhkostí v prvním klastru, které díky shodnému průběhu na obou uzlech v tomto klastru nejsou způsobeny výkyvem senzoru. Relativní vlhkosti jsou v denních hodinách velmi podobné na všech uzlech. Patrná je inverznost této veličiny ve vztahu k teplotě vzduchu – nejnižší vlhkosti jsou totiž zaznamenány v průběhu dne a nejvyšší v průběhu noci.



Obr. 80. Denní průběh vlhkostí vzduchu v prvním i druhém klastru od 23. 7. 2016 do 26. 7. 2016, zdroj: vlastní měření

Souhrnné tabulky sledující extrémní vlhkoštní hodnoty ve vybraných dnech poukazují na vyrovnané vyšší hodnoty vlhkosti vzduchu, avšak nižší hodnoty vlhkosti vzduchu jsou ve většině případů ve druhém klastru (tab. 15). Nejvyšší vlhkosti vzduchu byly zpravidla v prvním klastru, nejnižší ve druhé. Tyto údaje odpovídají údajům o denních průbězích teplot i předpokladům, které poukazují na to, že i když ne příliš výrazně tak i přesto je centrum města teplejší s nižší převládající vlhkostí vzduchu.

Tab. 15. Extrémní denní vlhkosti vzduchu v prvním a druhém klastru v červenci 2016 (nejvyšší denní hodnoty ze všech uzlů jsou označeny červeně, nejnižší modře, zdroj: vlastní měření

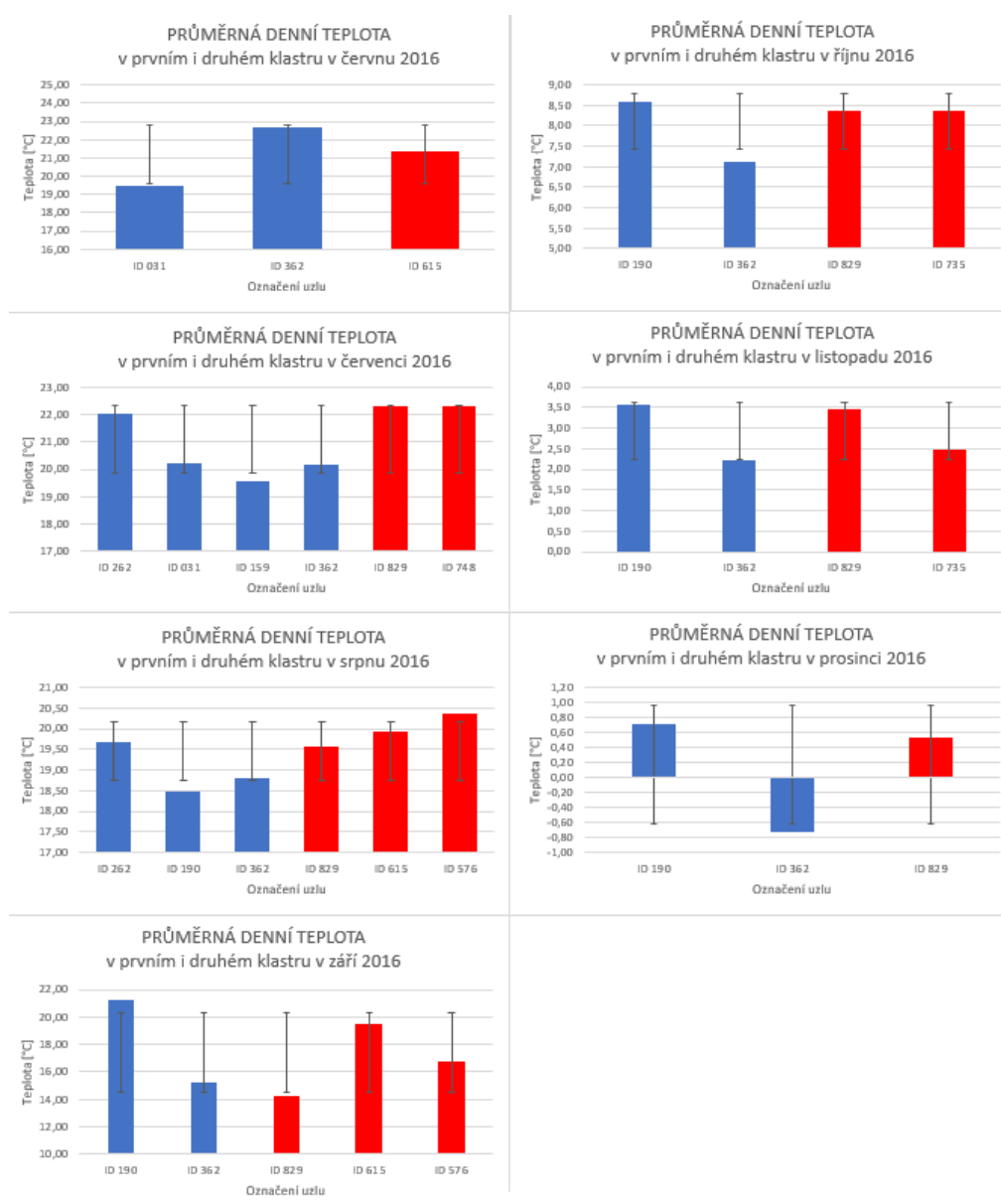
<b>ID 262</b>	23.7	24.7	25.7	26.7
Denní maximum	94,96	95,5	100	100
Denní minimum	33,66	49,6	43,29	48,51
Denní amplituda	61,3	45,9	56,71	51,49

<b>ID 031</b>	23.7	24.7	25.7	26.7
Denní maximum	93,17	93,01	97,4	98,12
Denní minimum	31,1	47,65	44,46	45,62
Denní amplituda	62,07	45,36	52,94	52,5

<b>ID 829</b>	23.7	24.7	25.7	26.7
Denní maximum	78,16	98,46	100	98,58
Denní minimum	32	46,38	38,4	42,44
Denní amplituda	46,16	52,08	61,6	56,14

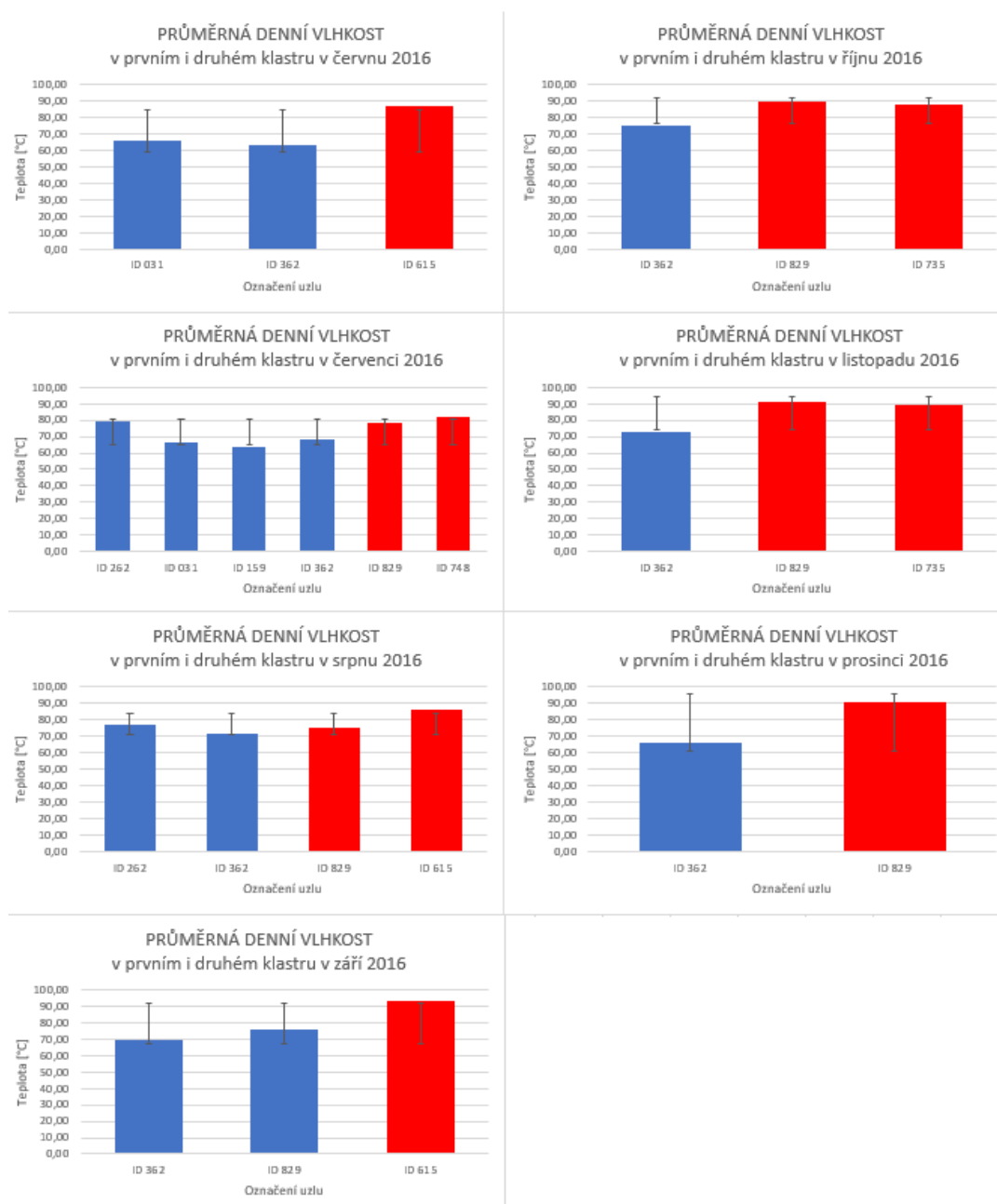
Průměrná měsíční teplota v prvním klastru byla počítána pro uzly, které měly alespoň po tři dny vypočítanou průměrnou hodnotu teploty a zároveň byly v tyto dny zaznamenány hodnoty v obou klastrech alespoň jedním uzlem, aby se vyloučily možné extrémní hodnoty pouze v jednom klastru. Do výpočtu byly zahrnuty uzly s vyšší i nižší

přesností měření. Průměrné teploty na jednotlivých uzlech jsou znázorněny na obrázku 81. Nejvíce dat bylo získáno v letních měsících. Z měření je zřejmé, že teploty získané ve druhém klastru jsou zpravidla vyšší než v prvním klastru. Grafy jsou doplněny jednocentní směrodatnou odchylkou od celkové průměrné hodnoty teploty v Olomouci. Uzel ID 190 z prvního klastru měl vypočítány vyšší hodnoty průměrné denní teploty v nejvíce případech. Naopak v srpnu měl tento uzel nejnižší hodnoty teploty ze všech uzlů, což poukazuje na nekonzistentnost měření tohoto uzlu. Je zřejmé, že teploty získané jednotlivými uzly mají podobný trend. Nejnižší směrodatné odchylky mezi měřeními byly v srpnu, naopak nejvyšší byly v prosinci. Ani měření provedená dvěma přesnějšími uzly na jednom místě nejsou totožná a vykazují rozdíl až jeden stupeň (v listopadu). V ostatních případech je zřejmé, že tyto přesnější senzory jsou vhodnější pro měření, a tak hodnoty z nich jsou více využívány.



Obr. 81. Průměrná denní teplota v prvním (modře) i druhém (červeně) klastru v roce 2016, zdroj: vlastní měření

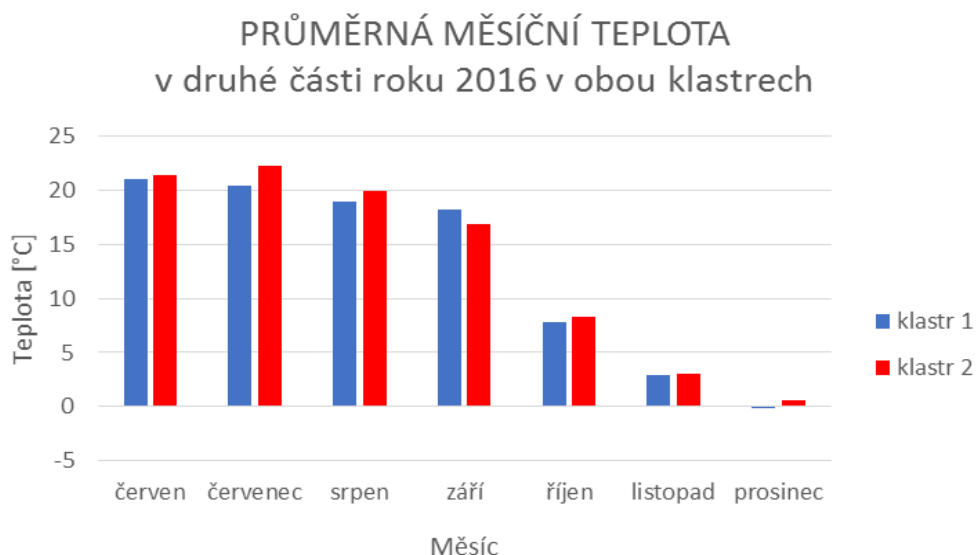
Průměrné denní vlhkosti byly počítány stejným způsobem jako průměrné hodnoty teplotní. Z výpočtů byly vyloučeny uzly, které vykazovaly chybná vlhkostní měření (obr. 82). Průměrné denní vlhkosti naměřené jednotlivými uzly poukazují na to, že vyšší hodnoty relativní vlhkosti vzduchu se vyskytovaly ve druhém klastru až v 98 % případů. Směrodatné odchylky nejsou tak velké jako v případě teplotních hodnot.



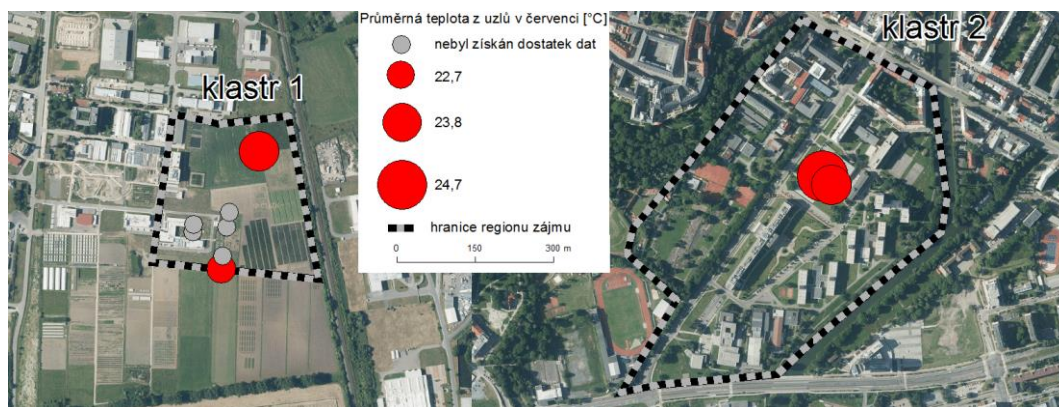
Obr. 82. Průměrná denní vlhkost v prvním (modře) i druhém (červeně) klastru v roce 2016, zdroj: vlastní měření

Pokud je sledována průměrná měsíční teplota v obou klastrech, tak v šesti případech byla vyšší teplota získána ve druhém klastru (obr. 83). Nejvyšší rozdíly v teplotních hodnotách obou klastrů jsou zaznamenány v letních měsících, což poukazuje na možnost

výskytu tepelného ostrova. Rozdíl mezi teplotami je nejvyšší v červenci, ale ani ten není natolik vysoký, aby mohlo být konstatováno, že se v centru města nachází jednoznačně vyšší teploty než na jeho okraji. Rozložení teplot na jednotlivých uzlech v tomto teplotně nejvíce rozdílném měsíci je ilustrováno na obrázku 84. Z tohoto je zřejmé, že přestože ve druhém klastru jsou senzory umístěny na jedné tyči, tak hodnoty jimi získané jsou rozdílné. V prvním klastru není tak vysoký rozdíl mezi uzly, které jsou umístěné 249 metrů od sebe.



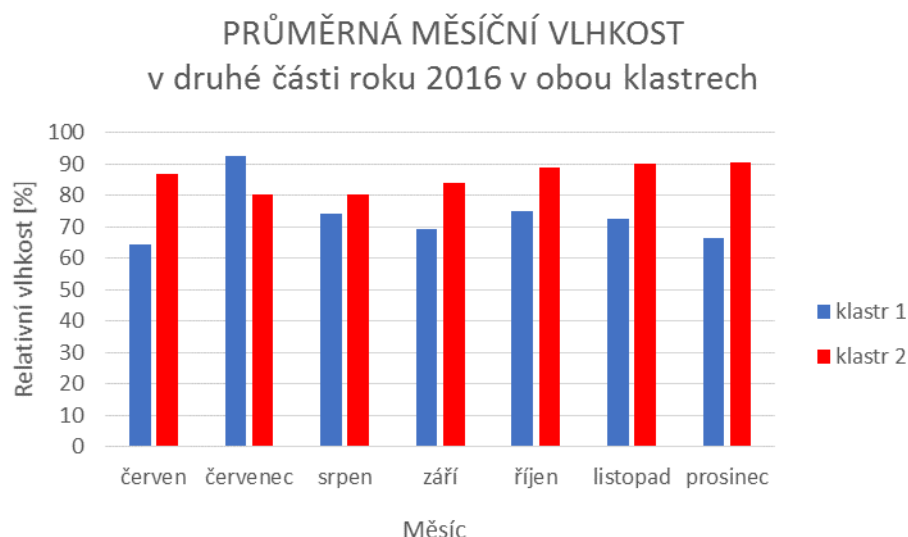
Obr. 83. Průměrná měsíční teplota v prvním (modře) i druhém (červeně) klastru v roce 2016, zdroj: vlastní měření



Obr. 84. Prostorové zobrazení průměrných teplot v červnu v obou klastrech, zdroj: vlastní měření, podklad ČÚZK

Hodnoty průměrné měsíční vlhkosti jsou vyšší ve druhém klastru (obr. 85). Výjimkou je měsíc červenec, kdy byly vyšší průměrné hodnoty vlhkosti vyšší v prvním klastru o více než 10 %.





Obr. 85. Průměrná měsíční vlhkost v druhé části roku 2016 v obou klastrech, zdroj: vlastní měření

#### 7.1.2.4 Tepelný ostrov v Olomouci

Tepelné ostrovy byly diskutovány v kapitole 3.1 Klima města. Na podkladě dat získaných uzly od června do prosince 2016 je možné konstatovat, že tepelný ostrov se při lokalizaci uzlů, která byla provedena, neprojevuje. Pro zvýšení přesnosti měření byly počítány průměry pro jednotlivé klastry z více uzlů, aby byly vyloučeny chyby zanesené měřením pouze jedním uzlem.

## 7.2 Znečišťovatelé ovzduší

V rámci této kapitoly jsou sledováni znečišťovatelé ovzduší v Olomouci. Pozornost je zaměřena na oxid dusičitý a velmi těkavé organické látky. K účelu poukázání na vývoj polutantů byly využity hodnoty NO<sub>2</sub> a VOC získané uzly v prvním klastru v roce 2015. Dále je v rámci této kapitoly ukázána práce s nekalibrovanými chemickými daty, v rámci níž je provedeno porovnání denního, týdenního a měsíčního vývoje hodnot chemických polutantů.

### 7.2.1 Chemická data z olomoucké sítě

Za období od června do prosince 2015 musely být vybrány periody, ve kterých byly zaznamenány hodnoty oxidu dusičitého a velmi těkavých organických látek v prvním klastru. Uzel ID 190 zaznamenával chemická data od 4. 6. 2015 do 9. 7. 2015, jednalo se o nejdelší periodu, po kterou byla chemická data kontinuálně zaznamenána v celém půlročním období. Pouze hodnoty CO<sub>2</sub> a VOC byly zaznamenány v červnu. Uzly se senzory sledující chemické znečištění byly po této letní periodě nasazeny opět do terénu až v září, jednalo se pouze o část tohoto měsíce (od 8. 9. do 10. 9.). Tato perioda byla zároveň jedinou periodou, po kterou byla zaznamenána i data týkající se směru a rychlosti větru. V listopadu a prosinci byl nasazen uzel ID 748, který od 1. 12. chybně

zaznamenával teploty. V prosinci byly dále v terénu dva uzly ID 362 a ID 776. Data jimi získaná však nejsou kontinuální, protože docházelo k výpadkům brány.

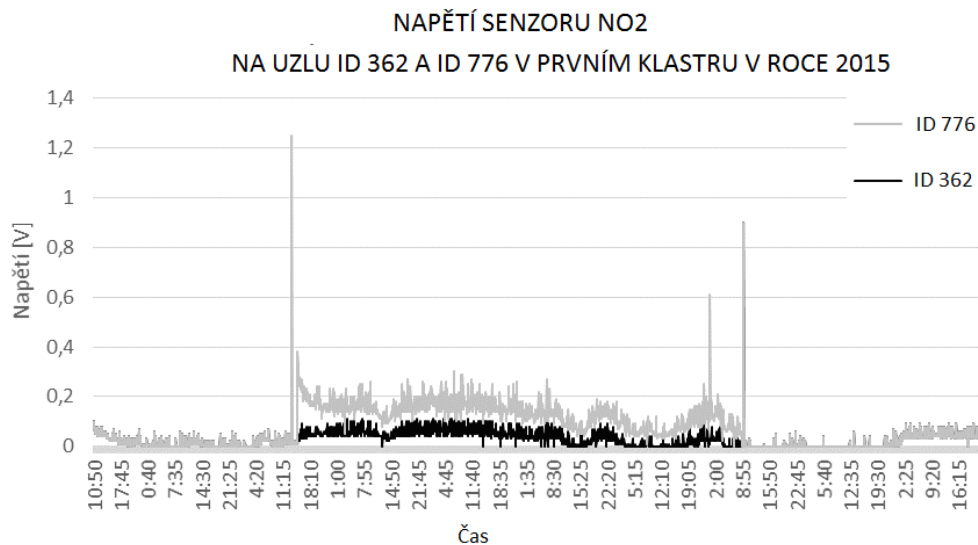
### **7.2.2 Práce s nenakalibrovanými chemickými senzory**

Všechna chemická data byla ze senzorů, které byly dlouho dobu po kalibraci, zaznamenávaly pouze hodnoty napětí ve Voltech. Tyto hodnoty byly přepočteny na odpor senzoru, který více koresponduje s průběhem změn polutantů v čase. Pro korektní výpočet koncentrace polutantu je nutné znát odpor senzoru v případě, že je čistý vzduch. Dále je nutné zjistit tento odpor při známých koncentracích polutantu v několika bodech, aby byla zjištěna závislost mezi odporem senzoru a skutečnou koncentrací polutantu. Tato závislost není zjištěna v případě nenakalibrovaných hodnot přímo pro senzor, může být převzat její trend, který se může lišit (“Gases sensor calibration process consideration?,” 2016).

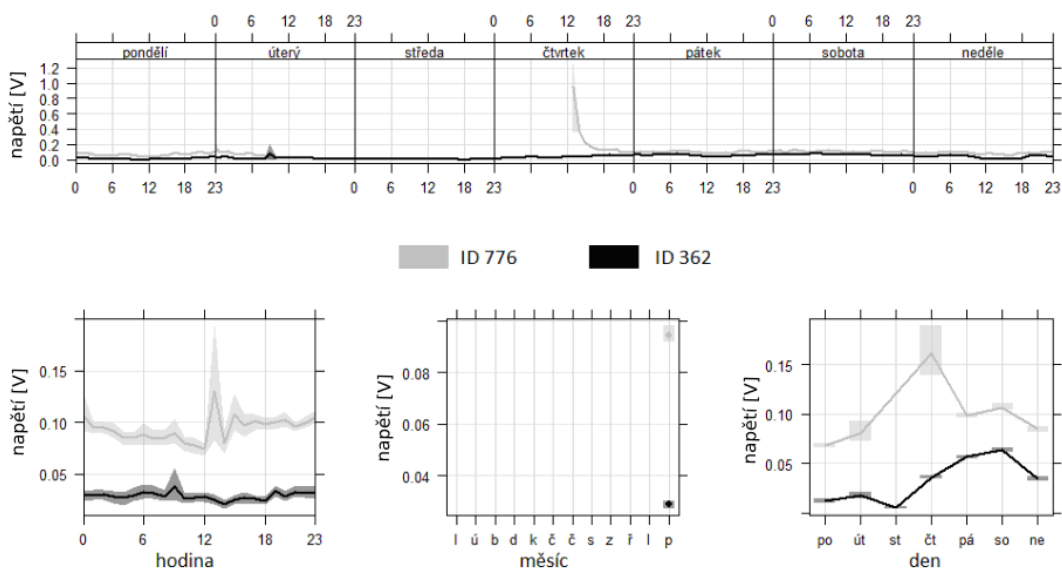
Tato část práce je zaměřena na práci s nenakalibrovanými senzory sledujícími NO<sub>2</sub> a VOC v prvním i druhém klastru. Nejprve je popsána práce s těmito senzory v roce 2015, kdy byla získána data z REZZO 1 a 2 (viz kapitola 3.7.3 Zdroje znečištění NO<sub>2</sub> a VOC v Olomouci), ale protože v tomto roce nebyla získána dostatečně dlouhá kontinuální řada dat, byl postup vyzkoušen i na nejdelší časové řadě získané uzlem ID 362 v prvním klastru. Ve druhém klastru nebyly uzly sledující chemické látky příliš používány, protože u nich docházelo k brzkému vybíjení baterie, přesto je nakonec ukázáno i jak vypadala situace v tomto klastru. Postup, který ukazuje práci se senzorem monitorujícím oxid uhličitý, je uveden v příspěvku “How to get voltage to ppm?” (2016). Tento senzor nebyl primárně používán, protože pro tento polutant nebyly získány jeho zdroje z REZZO 1 a 2, ale závěrem je práce s ním ukázána.

#### *7.2.2.1 Měření polutantů v prvním klastru - Senzor NO<sub>2</sub> (MiCS-2714)*

V prosinci byly získány záznamy o oxidu dusičitém dvěma uzly, přesto nemohlo dojít k přímému porovnání hodnot, avšak trend chodu by měl být na obou uzlech podobný. Pro názornost získaných dat byly zobrazeny časové průběhy hodnot oxidu dusičitého z obou uzlů (obr. 86). Z tohoto zobrazení je patrné, že každý senzor získává hodnoty v jiném rozsahu napětí, ale až na pár výchylek v měření uzlu ID 776, je trend podobný. Kromě tohoto základního zobrazení došlo z těchto hodnot k výpočtu průměrných hodnot s 95% intervalem spolehlivosti (obr. 87). Z tohoto zobrazení je zřejmé, že v datech z uzlu ID 776 je patrná jedna výchylka mající hodnoty napětí nad 1 Volt a že z dlouhodobého hlediska je trend na obou uzlech velmi podobný.



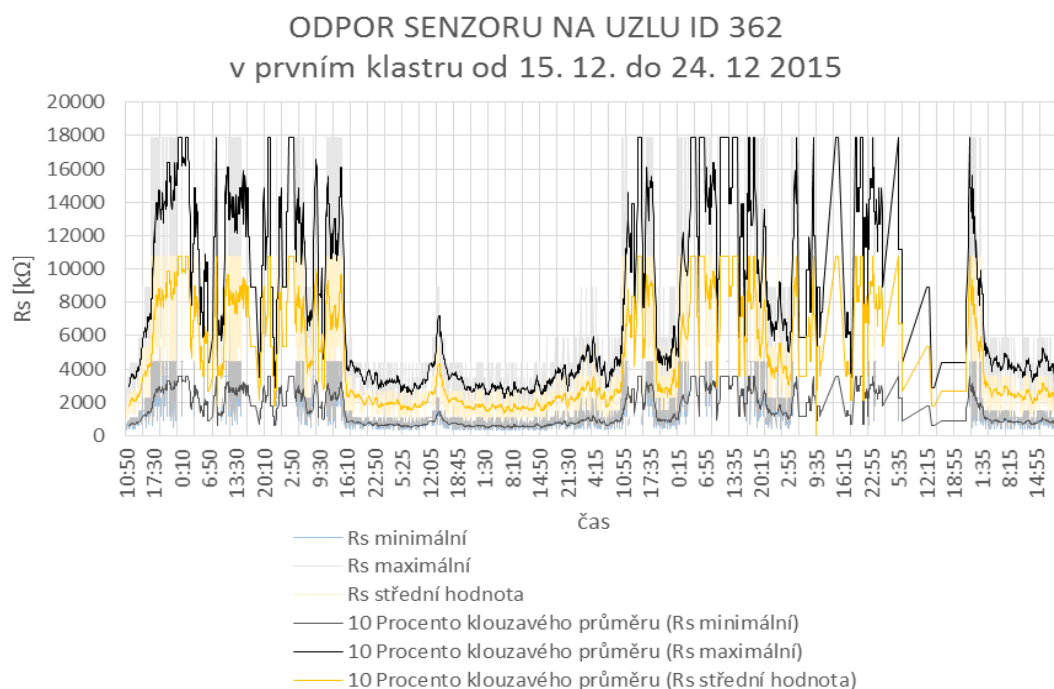
Obr. 86. Napětí senzoru NO<sub>2</sub> u uzlů ID 362 a ID 776 v prvním klastru v roce 2015, zdroj: vlastní měření



Obr. 87. Průměrné napětí senzoru NO<sub>2</sub> u uzlů ID 362 a ID 776 v prvním klastru v roce 2015 v hodinovém, denním, týdením a měsíčním režimu, zdroj: vlastní měření

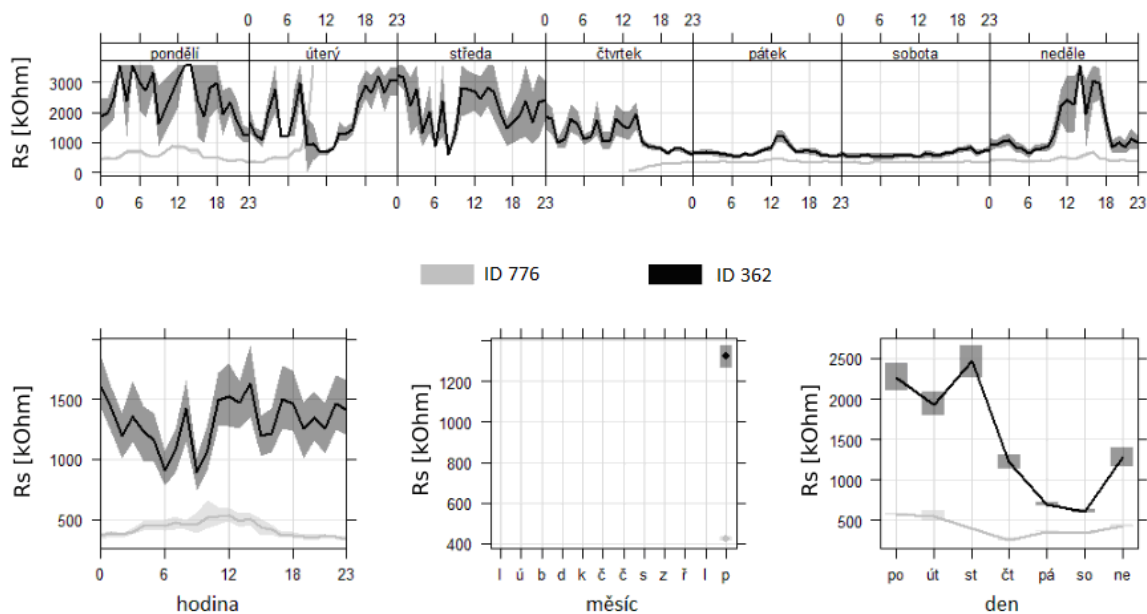
V datech získaných bezdrátovou senzorovou sítí v Olomouci byly vypočítány hodnoty odporu senzoru při nejvyšší i nejnižší hodnotě zatížení rezistoru, která je uvedena v dokumentu (“Gases sensor calibration process consideration?,” 2016). Z vypočtených extrémních hodnot byla stanovena střední hodnota. Tato data již korespondují s chodem vzdušného polutantu v Olomouci, a tak lze konstatovat, že pouze jednou byly hodnoty odporu senzoru nižší než 45,5 k $\Omega$  a překročily tak normální koncentraci polutantu s využitím uzlu ID 362. Druhá nejnižší hodnota již byla takřka sedmkrát vyšší než normální koncentrace oxidu dusičitého, a tak lze konstatovat, že normální koncentrace oxidu dusičitého ve městě nebyla překročena při měření uzlem ID 362. Co se týče hodnot

z uzlu ID 776, tak při využití minimálního odporu senzoru, byla hodnota normální koncentrace oxidu dusičitého překročena ve dvou případech. Třetí nejnižší hodnota již byla dvakrát vyšší, a tak lze konstatovat i u tohoto uzlu, že normální koncentrace nebyly výrazně překročeny. Obrázek 88 ukazuje průběh hodnoty odporu senzoru NO<sub>2</sub> od úterý 15. 12. do čtvrtku 24. 12. 2015 na uzlu ID 362. Naměřené hodnoty byly proloženy desetiprocentním klouzavým průměrem, aby byl lépe vystihnut trend chodu naměřených hodnot. Hodnoty velmi kolísaly v čase, nejvyšších hodnoty odporu senzoru byly zpravidla v nočních a odpoledních hodinách. Od pátku do neděle byly zaznamenány málo kolísající hodnoty, nejstabilnější situace nastala v sobotu. Tento trend je možné již považovat ze trend chodu oxidu dusičitého v čase.



Obr. 88. Odpor senzoru uzlu ID 362 v prvním klastru od 15. 12. do 24. 12. 2015, zobrazeny jsou hodnoty odporu senzoru při minimální, střední a maximální hodnotě zatěžujícího odporu, zdroj: vlastní měření

Pokud budou brány v potaz hodnoty  $R_s$  vypočtené pro uzel ID 776, je zřejmé, že tento uzel zaznamenával vyšší hodnoty napětí, a proto jsou hodnoty  $R_s$  značně nižší než u uzlu ID 362. Hodnoty  $R_s$  pod klíčovou hodnotou 45,5 k $\Omega$  byly zaznamenány pouze ve dvou případech, a tak na základě hodnot z tohoto uzlu nelze tvrdit, že byla výrazně překročena klíčová koncentrace oxidu dusičitého ve městě. Na obrázku 89 je ukázán průměr minimálních hodnot odporu senzoru obou uzlů během jednotlivých dnů v týdnu, následován průměrem hodinovým, denním a měsíčním. Data jsou proložena pětiprocentním intervalem spolehlivosti. Na podkladě těchto dat nelze konstatovat ani, jestli trend je podobný, protože uzel ID 362 měl podstatně vyšší rozkolísanost v měření a data jsou tak i z tohoto pohledu neporovnatelná.



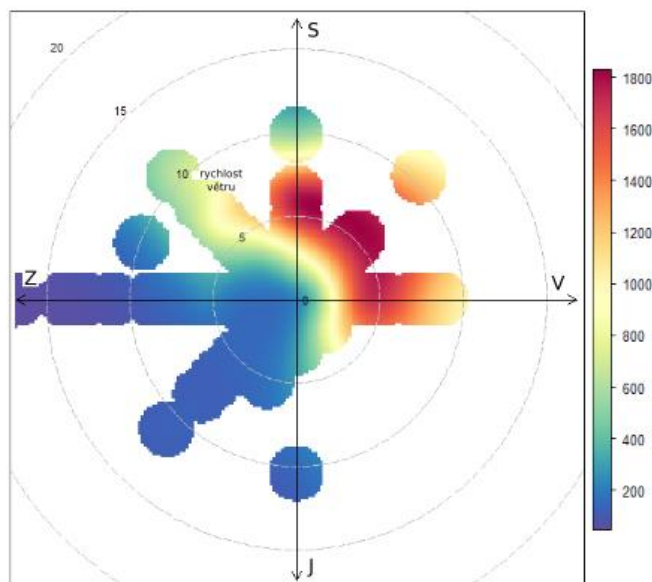
Obr. 89. Hodinový, denní, týdenní a měsíční chod odporu senzoru NO<sub>2</sub> na uzlech ID 776 a ID 362 situovaných od 15. 12. do 24. 12. 2015 v prvním klastru, zdroj: vlastní měření

Hodnocení výskytu polutantů je nejefektivnější, pokud jsou využity i informace o směru a rychlosti větru, protože poté lze predikovat z jakého směru nejvíce polutantů přichází. K vyzkoušení tohoto tvrzení byla použita data od 8. 9. do 10. 9. 2015, protože pouze v tomto období byly obdrženy informace jak o polutantech, tak o směru a rychlosti větru. Odpor senzoru byl zpočátku velmi nízký, ale po dvou dnech se rapidně zvýšil (obr. 90). Pokud budou brány v potaz hodnoty vypočítané pro minimální odpor senzoru, tak byly třináctkrát pod hodnotou 45,5 kΩ, což značí, že by mohla být překročena normální koncentrace oxidu dusičitého, které by v maximální hodnotě sahaly na hodnotu 37 ppm. Při použití průměrných hodnoty zatížení senzoru již k překročení normální koncentrace oxidu dusičitého nedochází.



Obr. 90. Odpor senzoru NO<sub>2</sub> při rozdílných zatíženích senzoru na uzlu ID 190 v prvním klastru od 8. 9. do 10. 9. 2015, zdroj: vlastní měření

Hodnocení směru a rychlosti větru s ohledem na hodnoty odporu senzoru poukazuje na to, že nejvyšší hodnoty NO<sub>2</sub> přicházejí ze severního až východního směru. Nejvyšší rychlosti větru přichází ze západu, ale koncentrace NO<sub>2</sub> přicházející z tohoto směru nejsou nikterak výrazné (obr. 91Obr. 91).

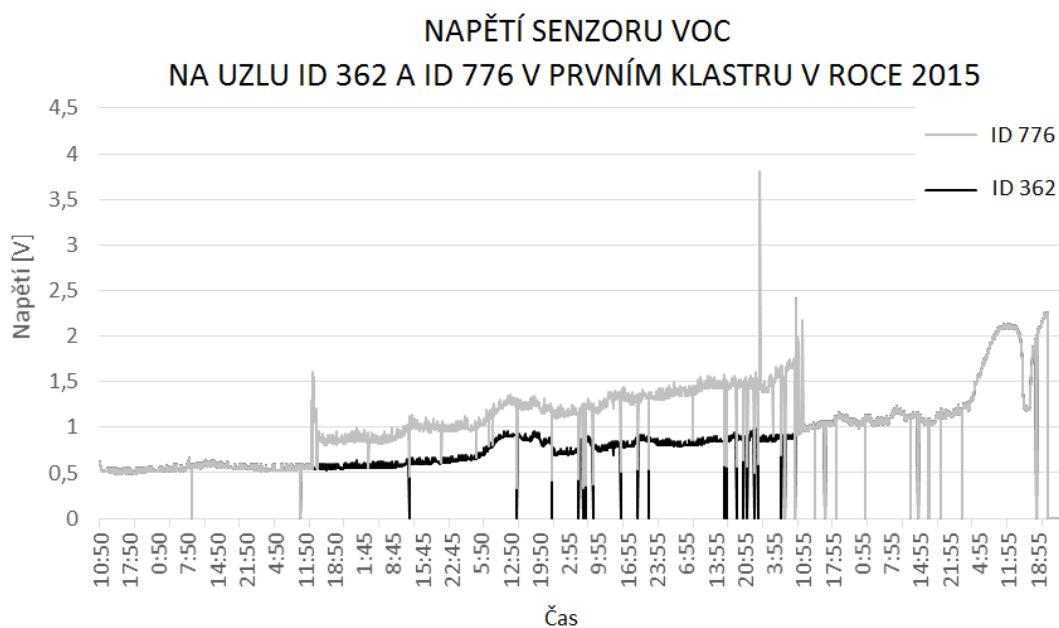


Obr. 91. Rozdělení směrů a rychlostí větru a k nim přílušející hodnoty odporu senzoru NO<sub>2</sub> z uzlu ID 776, zdroj: vlastní měření

Každopádně práce s nenakalibrovanými senzory je velmi nepřesná a data takto získaná nelze považovat za relevantní. K ověření získané hodnoty odporu senzoru je nutné znát buď referenční data nebo mít více takových nenakalibrovaných měření, aby mohlo být stanoveno, do jaké míry který senzor získává korektní data.

#### 7.2.2.2 Měření polutantů v prvním klastru - Senzor VOC (MiCS-5524)

Pokud jsou brány v potaz hodnoty změřené senzory snímajícími velmi těžké organické látky, tak jde opět o hodnoty napětí získané jednotlivými senzory. Tyto hodnoty je možné přepočítat na odpor senzoru ( $R_s$ ) dle rovnice uvedené v kapitole 3.6.3. Úspěšnost přenosu dat. Dosazení hodnot bylo provedeno pomocí dokumentu (“Gases sensor calibration process consideration?,” 2016). Pokud bude zobrazeno napětí získané senzory připevněnými na uzel ID 362 a ID 776 v zimním období, tak lze konstatovat, že trend v hodnotách obdržných oběma uzly je shodný, přestože se hodnoty napětí pohybují v odlišných hladinách (obr. 92).

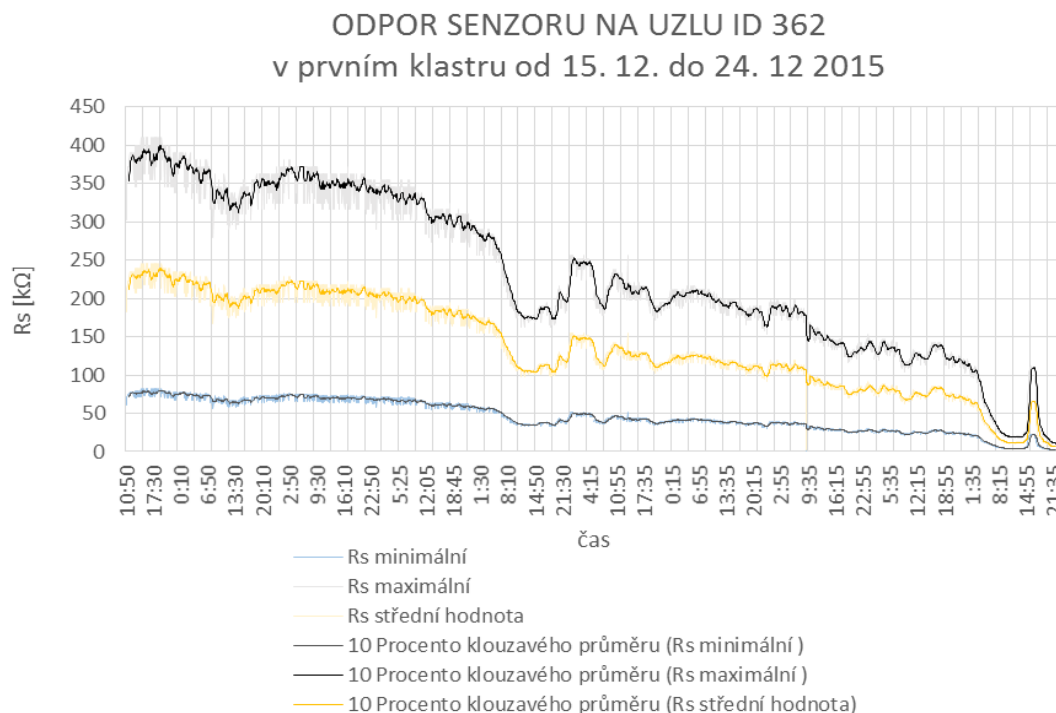


Obr. 92. napětí senzoru VOC na uzlu ID 362 a ID 776 v prvním a druhém klastru v roce 2015, zdroj: vlastní měření

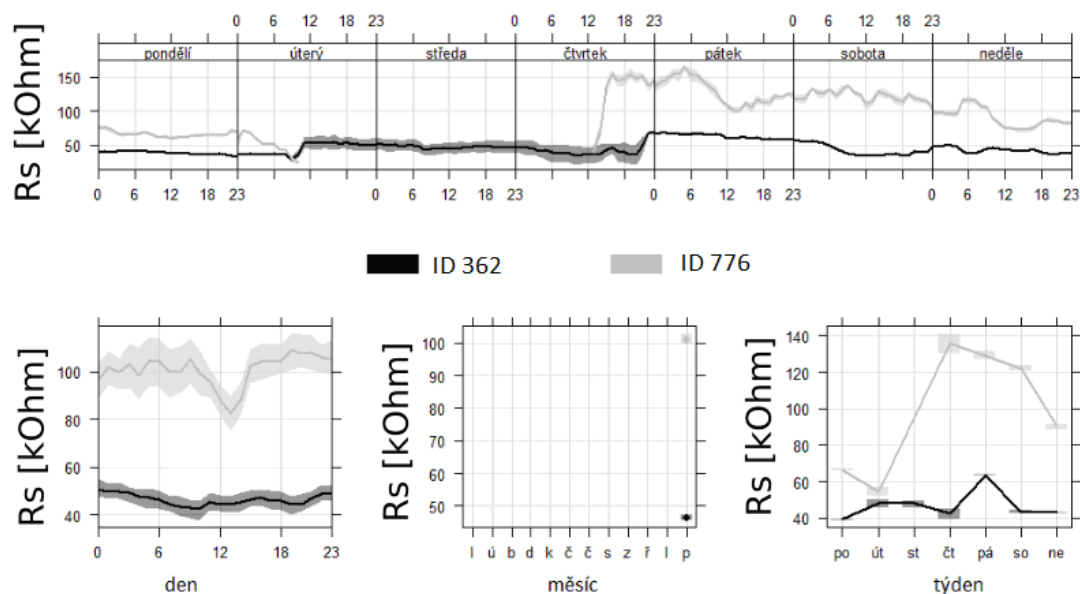
Při výpočtu odporu senzoru velmi těkavých organických látek byla pro konstrukci grafu závislosti odporu senzoru a koncentrace velmi těkavých organických látek použita závislost uvedená v příspěvku “Ga v30 06: VOC sensor | Libelium,” (2016). V tomto příspěvku dochází v komentáři k uvedení, že hodnoty, dle kterých je senzor kalibrován, odpovídají odporu zatížení, ale v samotném kódu je počítáno s odporem senzoru, a tak mohlo být předpokládáno, že se v poznámce jednalo o překlep. Ve skriptu zobrazujícím reálné měření s tímto kódem je uveden jako výstup odpor senzoru a koncentrace, ale hodnoty nekorrespondují s hodnotami, které byly uvedeny v samotném kódu, a tak lze předpokládat, že hodnoty jsou ilustrativní a senzor není nakalibrován. Dále bude pracováno s hodnotami z programového kódu. Pokud by toto bylo použito, tak při použití nejnižšího odporu senzoru by limit velmi těkavých organických látek byl překročen ve všech termínech měření. Při použití maximálních hodnot odporu senzoru by pouze ve 27 případech tento limit nebyl překročen s využitím uzlu ID 362. Při využití hodnot z uzlu ID 776 byla normální koncentrace při minimálním odporu senzoru překročena také ve všech případech, při využití maximálního odporu senzoru nebyl tento limit překročen ve 47 případech.

Obrázek 93 ukazuje vývoj odporu senzoru velmi těkavých organických látek získaných z uzlu ID 362 s využitím tří odporů zatížení. Nejvyššího nahromadění velmi těkavých organických látek bylo dosaženo na počátku měření, poté byl zaznamenán klesající stav. Hodnoty získané uzlem ID 776 jsou v tomto případě ve vyšších hodnotách než hodnoty získané uzlem s ID 362. Z průměrného týdenního průběhu velmi těkavých organických látek s 95 % intervalem spolehlivosti je zřejmé, že nevyšších hodnot bylo

dosaženo na konci pracovního týdne (obr. 94). Denní průměrné hodnoty uzlu ID 776 ukazují výchylku směrem k nižším hodnotám po jedné hodině odpoledne.



Obr. 93. Odpor senzoru na uzlu ID 362 využitím minimální, střední a maximální hodnoty zatěžujícího odporu s křivkou 10% klouzavého průměru v prvním klastru od 15. 12. do 24. 12. 2015, zdroj: vlastní měření

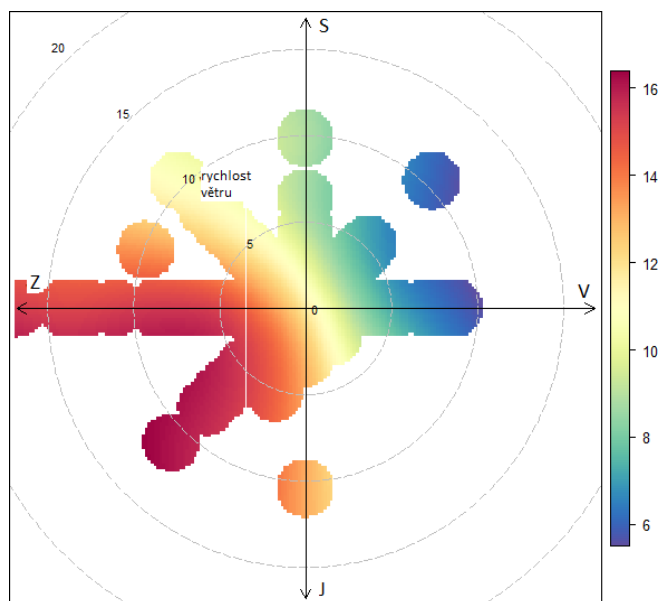


Obr. 94. Hodinový, denní, týdenní a měsíční chod odporu senzoru VOC na uzlech ID 776 a ID 362 situovaných od 15. 12. do 24. 12. 2015 v prvním klastru, zdroj: vlastní měření

Z obrázku 95 je patrné, že nejvíce vanou silné větry ze západní strany a právě z této strany je přinášeno i nejvíce velmi těžkých látek. Velmi vysoké hodnoty odporu senzoru



jsou soustředěny i do jihozápadního směru. Pokud bude přihlíženo k největším znečišťovatelům ovzduší velmi těkavými organickými látkami, tak lze předpokládat, že při západních až jižních větrech jsou zplodiny unášeny nad holický areál, ve kterém jsou uzly umístěny.

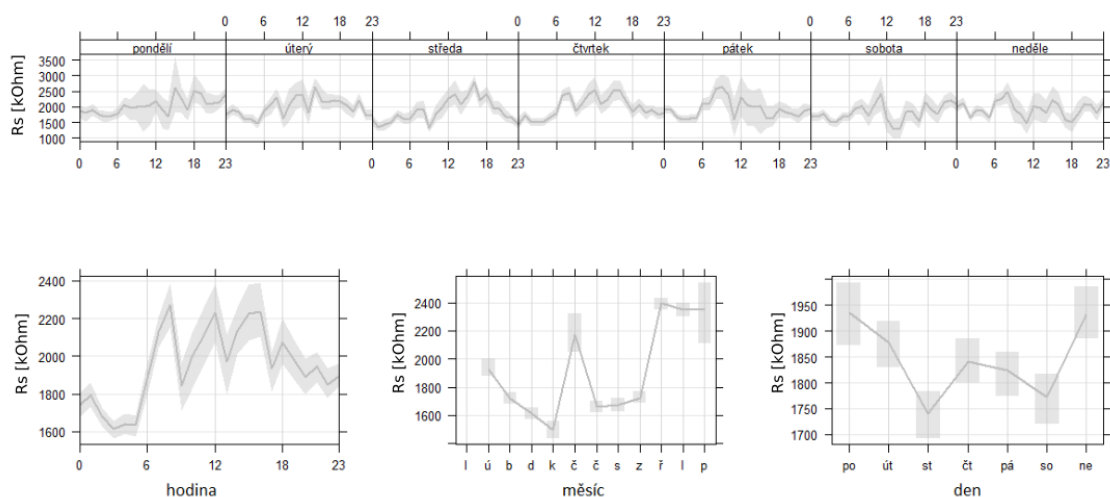


Obr. 95. Rozdělení směrů a rychlostí větru a k nim přílušející hodnoty odporu senzoru VOC z uzlu ID 776, zdroj: vlastní měření

### 7.2.2.3 Dlouhodobé měření oxidu dusičitého a velmi těkavých organických látek v roce 2016

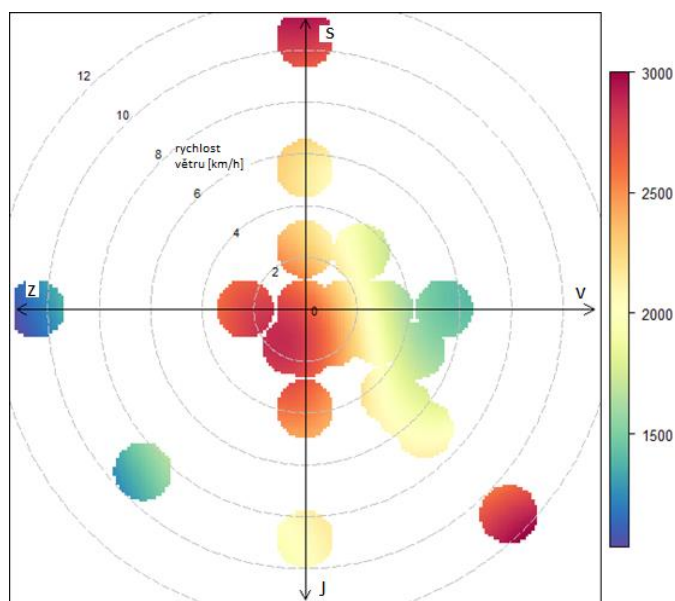
Nejdéle měřícím uzlem byl uzel ID 362 situovaný v prvním klastru od 16. 2. 2016 do 14. 12. 2016. Pro tento uzel byl vypočítán odpor senzorů snímajících oxid dusičitý a velmi těkavé organické látky.

Nejprve byl sledován minimální odpor senzoru sledujícího oxid dusičitý. Průměrné hodnoty tohoto odporu s 95% intervalem spolehlivosti jsou zobrazeny v průběhu dne, týdne, měsíce i roku na obrázku 96. Tyto hodnoty vypočtené pro dny a hodiny více odpovídají rozložení polutantu během roku, protože bylo získáno více hodnot než ve výpočtech výše. Nejvíce oxidu dusičitého bylo v ovzduší v červenci a poté v podzimních měsících a v prosinci. Týdenní průběh oxidu dusičitého fluktuuje, nejvíce polutantu bylo v ovzduší v pondělky a neděle. Nejméně bylo naopak ve středy. V rámci dne, od páté hodiny ranní, docházelo ke zvyšování hodnot oxidu dusičitého, poté docházelo ke kolísání hodnot.



Obr. 96. Odpor senzoru NO<sub>2</sub> uzlu ID 362 v prvním klastru od února do prosince 2016, zdroj: vlastní měření

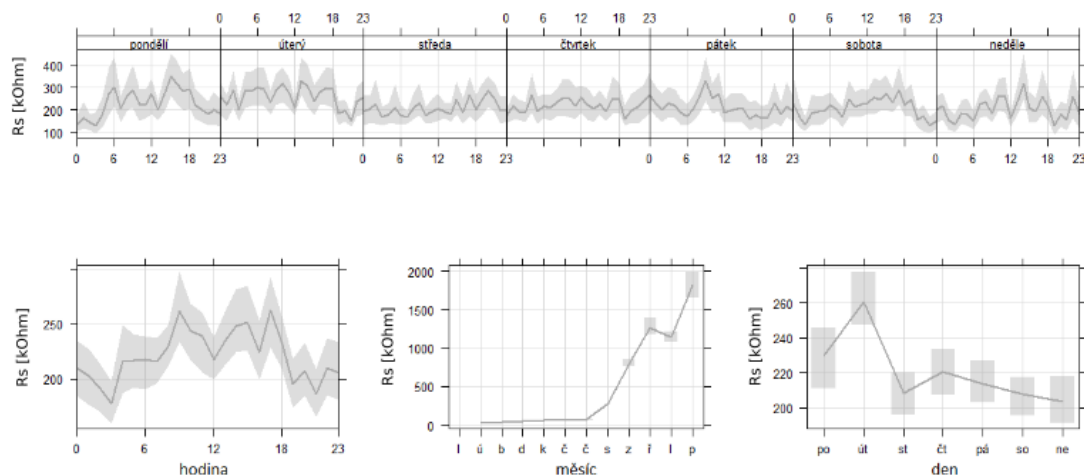
Pokud se data z tohoto uzlu zkombinují s daty o větrné situaci, tak může dojít k vykreslení povětrnostních dat společně s daty chemickými za měsíc červen (obr. 97). V tomto měsíci bylo získáno nejvíce korektních dat o směru a rychlosti větru. Nejvyšší hodnoty odporu senzoru oxidu dusičitého jsou spojeny se západním až jižním směrem. Při vysokých rychlostech větru byly zaznamenány vysoké koncentrace oxidu dusičitého i v severním a severovýchodním sektoru.



Obr. 97. Rozdělení směrů a rychlostí větru a k nim přílušející hodnoty odporu senzoru NO<sub>2</sub> z uzlu ID 362, zdroj: vlastní měření

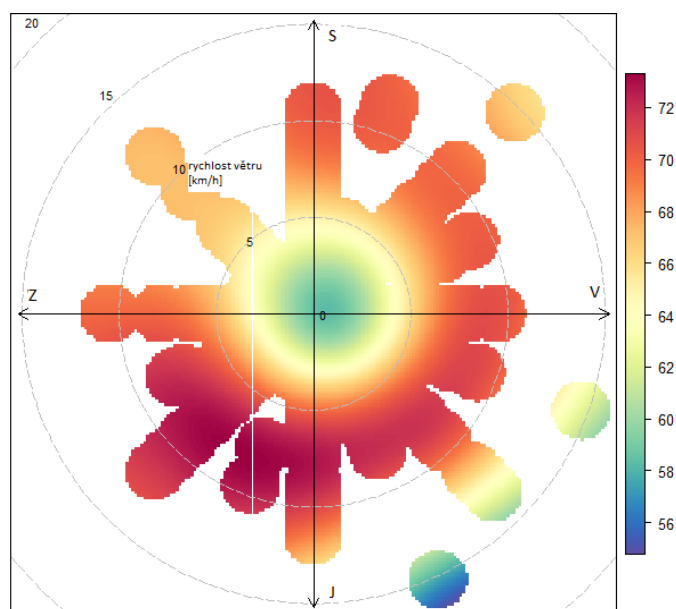
Odpor senzoru velmi těkavých organických látek byl také sledován při jeho minimálních hodnotách na uzlu ID 362 od února do prosince 2016 (obr. 98). Byly počítány průměrné hodnoty odporu senzoru velmi těkavých organických látek pro den, týden, měsíc i rok. Týdenní průběh velmi těkavých organických látek velmi fluktuuje. V průběhu týdne bylo nejvíce polutantu soustředěno na úterý. Nejméně bylo ve středu,

nastala tak shodná situace jako v případě oxidu dusičitého. V průběhu dne hodnoty velmi kolísaly, nejnižší byly zaznamenány ve tři hodiny ráno. Od srpna docházelo k navyšování hodnot až do prosince, kdy bylo dosaženo maxima.



Obr. 98. Odpor senzoru VOC uzlu ID 362 v prvním klastru od února do prosince 2016, zdroj: vlastní měření

Pokud se data zkombinují s daty o chodu směru a rychlosti větru, tak nejvyšší koncentrace se vyskytly směrem od jihu k západu. Hodnoty byly ale ve všech směrech poměrně vysoké. Nejméně polutantu se vyskytovalo v kvadrantu severozápadním (obr. 99).



Obr. 99. Rozdělení směrů a rychlostí větru a k nim přílušejší hodnoty odporu senzoru VOC z uzlu ID 362, zdroj: vlastní měření

#### 7.2.2.4 Krátkodobé versus dlouhodobé polutantů v prvním klastru

Pokud budou sledovány hodnoty odporu senzoru ze zkušebního a z dlouhodobého měření v Olomouci-Holici, je zřejmé, že nelze časově stanovit výskyt extrémních hodnot odporu senzoru oxidu dusičitého. Pokud bude brán zřetel na směr a rychlost větru, tak se nejvyšší hodnoty odporu senzoru oxidu dusičitého přesunuly ze severovýchodní části v roce 2015 do jihozápadní a více se soustředí kolem místa lokalizace uzlu v roce 2016. Toto pozdější rozložení více odpovídá tomu, jak byly největší znečišťovatelé rozloženi v terénu v roce 2015. Dá se předpokládat, že toto rozložení bylo podobné i v roce 2016.

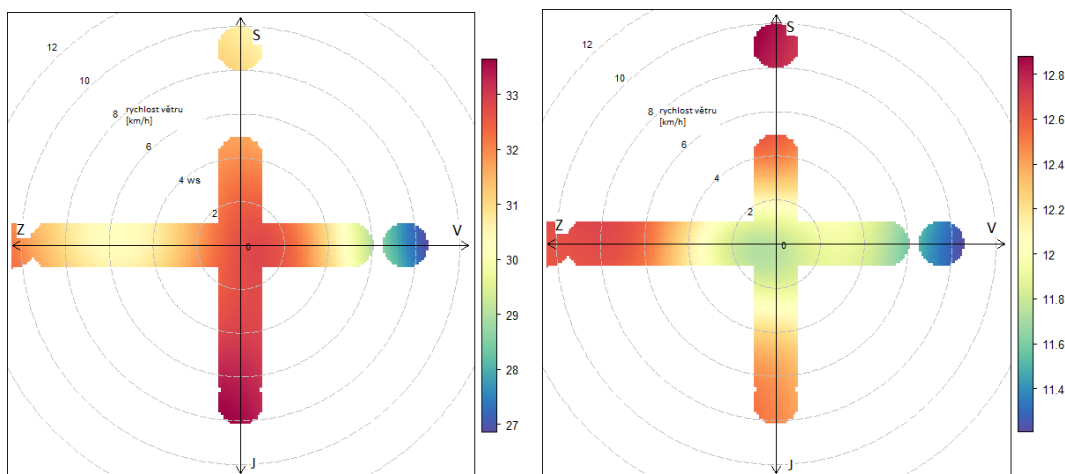
Co se týče hodnot odporu senzoru velmi těkavých organických látek, tak jejich rozložení v rámci dne i týdne je také zcela jiné v obou případech. Zajímavostí je rozložení velmi těkavých organických látek do světových stran v dlouhodobém případě (rok 2016), protože velmi těkavé organické látky se vyskytují ve všech směrech s nejméně výraznou severozápadní stranou. Tato strana je naopak druhou nejvýraznější v kratším měření. Výkyvy v rozložení odporu senzoru je možné přičítat nejen jinému období, jinému senzoru ale v neposlední řadě i množství dat, ze kterých vše bylo zobrazováno.

#### 7.2.2.5 Měření polutantů ve druhém klastru

Měření polutantů ve druhém klastru bylo zkomplikováno faktem, že v tomto klastru se uzly s chemickými senzory příliš nevyskytovaly. Uzel ID 776 získal nejdelší kontinuální řadu dat v měsíci červnu (od 1. 6. do 11. 6.), ale v tomto období nebyla zaznamenána data o směru a rychlosti větru. Druhou nejdelší periodou měření polutantů byla epizoda od 20. 7. 2016 do 30. 7. 2016, od 21. 7. 2016 byla získávána i data o směru a rychlosti větru (uzlem ID 829), a tak byla k zobrazení situace použita část měsíce července 2016. Jedná se letní periodu měření, kdy by hodnoty polutantů měly být na nižší úrovni. Teplotní hodnoty se pohybovaly mezi 15,6 °C do 33,7 °C. CO<sub>2</sub> v tomto klastru nebylo řešeno, protože hodnoty napětí senzoru měřícího tento polutant byly po celou dobu identické.

Z hodnot odporu senzoru byly vypočítány průměrné hodnoty s 95% intervalem spolehlivosti. Nejvyšší hodnoty byly v pátek a v sobotu, nejnižší v úterý. V průběhu dne se nejvyšší hodnoty koncentrovaly po šesté hodině večerní, naopak nejnižší byly kolem poledne. Velmi těkavé organické látky měly zcela jiný průběh a nejvyšší hodnoty byly v těch dnech, ve kterých byly nejnižší hodnoty oxidu dusičitého. V rámci dne byly nejnižší hodnoty v ranních hodinách jako důsledek klesajících hodnot získaných po půlnoci.

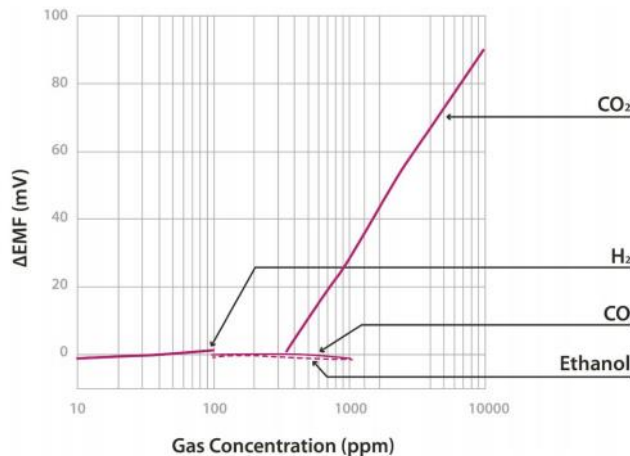
Směr větru byl zaznamenán pouze s citlivostí na hlavní čtyři světové strany, a tak je vidno, že nejvyšších rychlostí dosahuje vítr ze západu. Nejvyšší odpory rezistoru oxidu dusičitého se nacházejí v místě lokalizace uzlu a poté na jih od něj. Hodnoty velmi těkavých organických látek jsou nejvyšší na severu a na západě (obr. 100).



Obr. 100. Rozdělení směrů a rychlostí větru a k nim přílušeující hodnoty odporu senzoru NO<sub>2</sub> (vlevo) a VOC (vpravo) z uzlu 776, zdroj: vlastní měření

#### 7.2.2.6 Měření polutantů v prvním klastru - Senzor CO<sub>2</sub> (TGS4161)

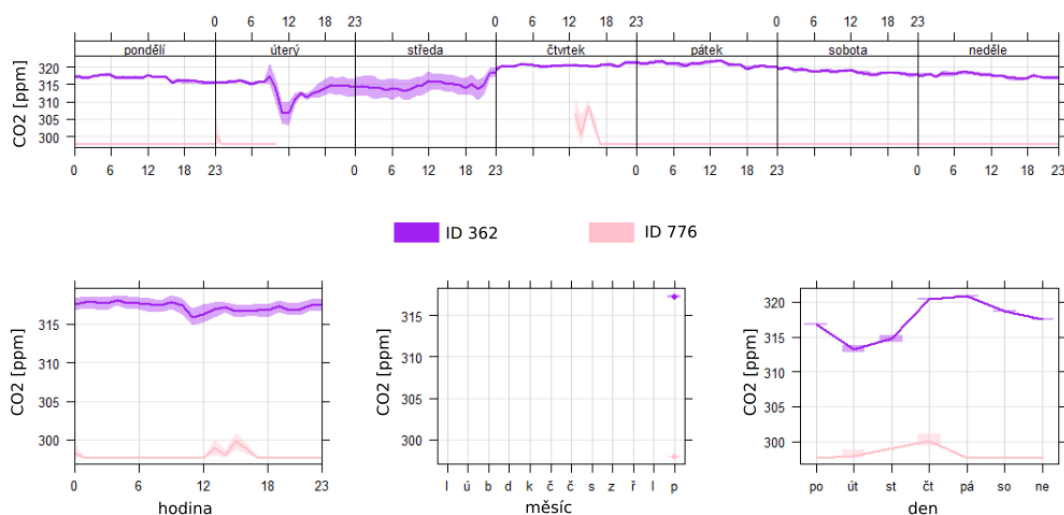
K práci s daty oxidu uhličitého je třeba znát výstup senzoru ve Voltech, napětí při normální koncentraci (220 mV), EMF napětí senzoru a rozdíl v EMF při napětí 220 mV. Hodnota napětí mezi 220 mV až 490 mV se objevuje v případě normální koncentrace oxidu uhličitého ve vzduchu (350 ppm). Obrázek 101 ukazuje závislost delta EMF a koncentrace oxidu uhličitého. Celý postup převodu je uveden v příspěvku “How to get voltage to ppm?” (2016).



Obr. 101. Závislostní křivka koncentrace oxidu uhličitého, zdroj: Libelium (2016a)

Na podkladě tohoto postupu byly vypočítány “koncentrace” oxidu uhličitého získané dvěma senzory z prvního klastru v prosinci 2015 (obr. 102). Výpočet byl proveden pouze pro tuto krátkou periodu, protože nebyly získány zdroje tohoto polutantu a senzor velmi často zaznamenával konstatní hodnoty. Rozdíl v “koncentracích” je zapříčiněn zcela jinými hodnotami napětí získaných jednotlivými uzly. Velmi podobná situace nastala i v případě měření oxidu dusičitého na těchto uzlech, avšak při měření velmi těžkavých

organických látek byla situace zcela opačná. Dle výpočtů nebyla v těchto dnech překročena normální koncentrace oxidu uhličitého. Z denního chodu lze vysledovat, že nejnižší hodnoty oxidu uhličitého se objevují v dopoledních hodinách, nejvyšší po poledni. Z týdenního chodu lze vysledovat, že nejvyšší hodnoty nastávají v ve čtvrtek a pátek, nejnižší jsou na počátku pracovního týdne.



Obr. 102. „Koncentrace“ oxidu uhličitého na uzlech ID 362 a ID 776 v prvním klastru od 15. 12. do 24. 12. 2015, zdroj: vlastní měření

#### 7.2.2.7 Zhodnocení měření chemických polutantů nenakalibrovanými přístroji

Práce s nenakalibrovanými chemickými přístroji je velmi nepřesná. Ve většině případů jsou měřeny hodnoty napětí senzoru, které je nutné přepočítat na odpor senzoru. Není možné odvodit závislost mezi hodnotami získanými senzorem a jim odpovídající koncentraci pro daný senzor. Z hodnot napětí senzoru je však možné odvodit časový chod polutantu na daném měřiči, data z více měřičů se nemohou rovnocenně porovnávat a vyslovit tak závěry, že na jednom místě byly koncentrace vyšší než ve druhém místě (Cable, 2005; Fishbain a kol., 2017; “Gases sensor calibration process consideration?,” 2016). Lze zobrazit trend chodu vybraných prvků na jednotlivých měřičích. Při práci s nenakalibrovanými daty je vhodné znát koncentrace polutantu v místě, kde je měření prováděno, aby mohlo být vyhodnoceno, jestli získané hodnoty odporu senzoru opravdu korespondují se skutečnými hodnotami prvku. Dále je vhodné znát zdroje znečištění v místě měření, protože může dojít k identifikaci zdroje znečištění. V případě chemických měření je náročná údržba měřičů, a tak měření chemických prvků pomocí malých stanic je třeba zvážit, přesná měření vyžadují velkou časovou i finanční investici.

V případě Olomoucké bezdrátové sensorové sítě k těmto investicím nedošlo, nebyla zakoupena ani data ze stacionárních stanic v Olomouci, protože by se jednalo pouze o jeden polutant, který byl měřen ve zcela jiné části města, než se nacházely déle funkční uzly bezdrátové sensorové sítě. Nedošlo ani ke sledování hodnot polutantu v obou klastrech, protože toto „srovnání“ by bylo značně nepřesné.

## 8. VÝSLEDKY

Cílem disertační práce bylo navrhnout a vybudovat experimentální bezdrátovou senzorovou síť (E - BOSS) sledující meteorologické prvky v Olomouci. Disertační práce se soustředí na celý proces tvorby bezdrátové senzorové sítě.

Disertační práce byla rozdělena na čtyři dílčí cíle, které vedly k naplnění hlavního cíle práce. Nejprve bylo nutné vybrat komponenty bezdrátové senzorové sítě v Olomouci (DC 1) a následně navrhnout postup, jak umístit uzly v terénu (DC 2). Bezdrátová senzorová síť byla poté konfigurována (DC 3). Tato konfigurace zahrnovala testování technických parametrů reálně nasazených uzlů (DC 3a) a tvorbu úložiště nasbíraných dat (DC 3b). Závěrem byla zpracována a vizualizována tematická data (DC 4).

### DC1 – Výběr komponent bezdrátové senzorové sítě

- rešerše monitoringu klimatu pomocí bezdrátových senzorových sítí ve světě a v České republice
- stanovení kritérií pro výběr komponent bezdrátové senzorové sítě
- definice požadavků na bezdrátovou senzorovou síť v Olomouci, deklarace vhodných hodnot kritérií
- zpracovaná multikriteriální analýza nabízených komponent

Výsledky prvního dílčího cíle byly publikovány v následujících titulech:

HEJLOVÁ, V., VOŽENÍLEK, V.: Wireless Sensor Network Components for Air Pollution Monitoring in the Urban Environment: Criteria and Analysis for Their Selection. *Wireless Sensor Network*, Vol. 5 No. 12, 2013, pp. 229-240.

HEJLOVÁ V., VOŽENÍLEK, V.: Selection of Nodes and Sensors for Monitoring of Air Pollutants Related to City Traffic. *5th International Conference on Innovations in Bio-Inspired Computing and Applications, IBICA 2014*. 2014, vol. 303, pp. 251-260, ISSN 21945357 ; 9783319081557 (ISBN).

HEJLOVÁ, V.: Determination of Criteria Weight Values for Monitoring of Air Pollutants Related to Traffic, *Conference Proceedings Vol. 3, SGEM, Albena, 2014*

### DC2 – Rozmístění uzlů bezdrátové senzorové sítě

- stanovení faktorů ovlivňujících lokalizaci uzlů v terénu
- algoritmus rovnoměrného rozmístění uzlů v terénu
- algoritmus rozmístění uzlů na podkladě Jednotkového grafu
- algoritmus rozmístění uzlů na podkladě Yao grafu
- podklad vhodný pro vizualizaci uzlů

Výsledky druhého dílčího cíle byly publikovány v následujících titulech:

HEJLOVÁ, V.: Spatial Distribution of Wireless Sensor Nodes in the Urban Environment, *Scitepress Digital Library, CD- ROM, Lisabon, 2014*.

HEJLOVÁ, V., POPELKA, S.: Využití eye-trackingu v bezdrátových senzorových sítích. *Sborník abstraktů, 2015*.

### **DC3 – Konfigurace bezdrátové senzorové sítě v Olomouci**

#### **DC3a – Testování bezdrátové senzorové sítě v Olomouci**

- komunikační protokoly (základní komunikace uzlu s bránou pro každý model, komunikace uzlu s bránou v rámci pro každý model, zjištění stavu baterie, přenos hodnot síly signálu, komunikace mezi uzly, zobrazení teplotních a vlhkostních hodnot, zobrazení hodnot CO<sub>2</sub>)
- upevnění uzlů v terénu ve dvou klastrech
- zatíženost komunikačních kanálů v obou klastrech
- ověření výdrže baterie ve vnitřních a venkovních scénářích
- testování síly signálu s využitím dvou typů antén
- deklarování úspěšnosti přenosu dat z různých pozic v rámci klastru

Výsledky třetího dílčího cíle byly publikovány v následujících titulech:

HEJLOVÁ, V., VOŽENÍLEK, V.: Současný stav výzkumu klimatu městského prostředí ve světě. Meteorologické zprávy, 5, 2015.

HEJLOVÁ, V., POHANKA, T., BUTAZZO, W., PECHANEC, V., NWAUOGU, CH. Communication Distance of Jennic Wireless Nodes in the Small Area. Conference Proceedings, Vol. 1, SGEM, Albena

HEJLOVÁ, V., POHANKA, T.: Configuration of Wireless Sensor Network in Olomouc City. GIS Ostrava 2017. (Lecture Notes in Geoinformation and Cartography Series).

#### **DC3b – Předzpracování a uložení dat**

- popis struktury primární databáze
- vytvořená záložní databáze s naplněnými tabulkami
- filtr pro nezobrazení hrubých a systematických chyb v datech

Výsledky třetího dílčího cíle byly publikovány v následujících titulech:

POHANKA, T., PECHANEC, V., HEJLOVÁ, V.: Python Web Server for Sensor Data Visualization. SGEM, Albena

### **DC4 – Zpracování tematických dat a jejich vizualizace**

- porovnání dat s referenčními daty od ČHMÚ (ověření přesnosti měření jednotlivých uzlů a senzorů)
- vztah mezi naměřenými hodnotami základních meteorologických prvků v klastrech
- postup práce s nenakalibrovanými chemickými daty
- zobrazení trendů v chemických datech, jejich zobrazení společně s meteorologickými daty a stacionárními znečišťovacími ovzduší v Olomouci

Výsledky čtvrtého dílčího cíle byly publikovány v následujících titulech:

HEJLOVÁ, V.: Application of Wireless Sensor Network for Temperature and Humidity Monitoring, Conference Proceedings Vol. 1, SGEM. Albena, 2014.



## 9. DISKUZE

V rámci jednotlivých kapitol již byla diskutována rozhodnutí, která byla v rámci práce učiněna. Zde jsou diskutována ta klíčová.

### **Výběr monitorovací technologie**

Monitorovací technologie byla vybírána na úplném disertační práce. S ohledem na autorčiny předchozí zkušenosti se sensorovým měřením získané v rámci diplomové práce bylo rozhodnuto, že bude probíhat bezdrátový monitoring s dálkovým přístupem. Zkušenosti s bezdrátovým přenosem dat byly kromě studia literatury čerpány na Katedře informatiky Univerzity Palackého v Olomouci a na Katedře elektroniky a telekomunikací Polytechnické univerzity v Turíně.

Na podkladě těchto konzultací spojených i s praktickými zkušenostmi s touto technologií bylo zvoleno takové nastavení ulů a sensorů, které bylo zakoupeno (viz kapitola 4.4. Požadavky na bezdrátovou sensorovou síť v Olomouci (E-BOSS)). Není možné zakoupit technologii nastavenou tak, aby se ve 100 % shodovala s požadavky, a aby její nasazení bylo typu Plug and Sense přinášející minimální interakci do konstrukce základní či sensorové desky. Zpočátku se zakoupená konfigurace jevila jako vhodná pro městský monitoring, ale postupem času se ukázalo, že vývoj v této oblasti jde velmi rychle dopředu, vybrané nastavení velmi rychle zastarává a vyžaduje další investice pro vylepšení všech nedostatků, které byly odhaleny až po nasazení technologie do terénu. Jako největší nedostatek se jevila zvolená komunikační technologie, která se ukázala jako velmi neefektivní pro přenos dat ve městě. V rámci komunikace na krátkou vzdálenost se objevily i komplikace s příliš přetíženými rádiovými frekvencemi a překážkami v komunikační cestě. Zejména překážky v podobě zděných budov představovaly nepropustnou komunikační bariéru i na velmi krátkou přenosovou vzdálenost. Po ověření tohoto způsobu komunikace je nutné konstatovat, že pro městské prostředí není příliš efektivní. Pro budoucí efektivnější práci bylo rozhodnuto o jeho nahrazením komunikačním rozhraním LoRa. Dalším velmi významným nedostatkem projevujícím se v tematických měřeních byla jejich nízká přesnost.

### **Architektura bezdrátové sensorové sítě**

Architektura bezdrátové sensorové sítě byla zvolena klastrová s využitím dvou klastrů. V průběhu tvorby práce byl upřesněn její záměr a s ohledem na krátký spolehlivý komunikační dosah uzlů se jako výhodnější ukázalo osadit jimi alespoň dvě oblasti. Data získaná z jedné oblasti by byla redundantní. Sběr dat ve dvou rozdílných klastrech přináší i tematické srovnání dat z rozdílných prostředí ve městě. Data byla ukládána v každém klastru zvlášť, ale pro lepší přístup k datům z obou klastrů byla vytvořena i záložní databáze, kde se nacházela data zproštěná hrubých a systematických chyb.

## Nastavení přenosu dat z uzlů

Data z uzlů byla přenášena ihned po zaznamenání v intervalu pěti minut. S ohledem na nižší energetickou náročnost je možné data uložit na uzel a poté je přenést hromadně. Nevýhodou tohoto typu přenosu je, že naměřená data nejsou uživateli k dispozici ihned, a proto od něj bylo upuštěno. Problémem, který se u hromadného přenosu dat projevil, bylo, že ne vždy byla takto přenášená data korektně v bráně zapsána.

## Topologie

Topologie bezdrátové sensorové sítě je jednou z velmi diskutovaných kapitol. Nejvíce používané topologie v bezdrátových sensorových sítích jsou hvězdicová, stromová a mesh. Hvězdicová topologie je základní, umožňuje pouze komunikaci mezi uzlem a sběrným bodem. Nejedná se o topologii, která by měla být využívána v bezdrátových sensorových sítích, protože uzly by měly komunikovat i mezi sebou a efektivně tak zvětšit území, ze kterého získávají data. Toto prostorové rozšíření s sebou však nese i technická úskalí, která jsou před monitorováním na větším území upřednostňována. I v rámci disertační práce byla pro konfiguraci uzlů v klastrech zvolena hvězdicová topologie. Důvodem pro tuto volbu bylo, že vybrané komunikační rozhraní sice umožňuje posílání dat mezi uzly, ale pouze v konfiguraci *peer to peer*, při níž dochází k nesprávnému přenášení dat přes směrovač. Z testování této komunikace plyne, že data buď nebyla vůbec přenesena, nebo byla nesprávně zapsána. Dalším problémem, který se při jiné než hvězdicové konfiguraci objevil, byla vysoká spotřeba baterie směrovačích uzlů.

## Kalibrace

Přesnost měření je jedním z důležitých faktorů, a proto je třeba klást důraz na kalibraci senzorů. Kalibrace senzorů snímajících základní meteorologické prvky není vyžadována příliš často, ale i přesto je nutné ověřovat kvalitu měření těchto senzorů. Toto ověření je časově a finančně náročné, protože je nutné jej provést pro každý přístroj a mu příslušící senzory, které nesmí být zaměněny. Práce s chemickými senzory je ještě náročnější. Kalibrovány byly pouze teplotní a vlhkostní senzory. Jakmile byla přesnost kalibrace ověřena v terénu a bylo zjištěno, že odchylky v měření se příliš nezměnily a po jejich opětovném nasazení do terénu byly opět vyšší (záleželo na konfiguraci vybraného uzlu), bylo rozhodnuto, že meteorologické senzory se již kalibrovat nebudou a bude počítáno s tím, že chyba měření je  $\pm 2$  °C. V kalibrační laboratoři proběhl i pokus o kalibraci NO<sub>2</sub> a CO<sub>2</sub> senzorů. Ten se bohužel nezdařil, protože senzor nebyl schopen ani v hodnotách napětí, ani v přepočítaných hodnotách čtených pomocí programu IDE i na bráně Meshlium, zaznamenat změny napětí. Z tohoto důvodu bylo od kalibrace upuštěno a pozornost byla zaměřena na relativní hodnoty.

## Nespojitost dat

Data získaná v rámci bezdrátové sensorové sítě jsou v prvním klastru za rok a půl měření neúplná, proto nebylo možné vytvořit delší časovou řadu. Přestože byl vždy

v provozu alespoň jeden uzel, tak výpadky brány způsobily, že data nebyla vůbec zaznamenána. Těchto výpadků se po dobu měření objevilo více. Tím nejvýraznějším bylo shoření adaptéru na podzim roku 2015.

### **Měření staniční versus bezdrátové**

Tento problém byl s ohledem na základní meteorologickou veličinu, teplotu, diskutován s docentkou Anitou Bokwou z Jagellonské univerzity v Krakově, která se v článku „Influence of diversified relief on the urban heat island in the city of Kraków, Poland“ (Bokwa a kol., 2015) zabývá morfologií reliéfu a rozložením teploty v Krakově a okolí. Používá ale data pouze z několika stanic, což může přinášet nepřesnosti ve výpočtu v místech, kde data nebyla získána. Zde ale vstupuje velmi významný argument, a to že senzory na stacionárních meteorologických stanicích jsou přesnější než senzory umístěné na bezdrátových přístrojích. Kontrola přesnosti měření na větším množství takových přístrojů může být náročnější, a tak vyvstává otázka, jestli sledovat prvek na více místech a méně přesně nebo na méně místech ale přesněji. Senzory připojené k bezdrátovým přístrojům jsou přesnější s postupem doby, což ale může zapříčinit vyšší náklady na nákup i případnou údržbu. Na druhou stranu je zde ale i záložní měření pro případ výpadku. Vyvstává tak otázka, kterou z variant zvolit. Tu si s ohledem na potřebná data, myšlené výstupy i finanční náročnost musí odpovědět sám uživatel. V rámci olomoucké bezdrátové sítě bylo rozhodnuto, že přednost bude dána hustějšímu monitoringu.

### **Rozdíl oproti tezím**

Oproti tezím došlo k nejvýraznějšímu rozdílu v tom, že nebyly sledovány polutanty okolo ulice 17. listopadu. Toto bylo zapříčiněno jednak tím, že senzory nebyly nakalibrovány, a jednak tím, že se přenos dat mezi uzly ukázal jako značně neefektivní. Do tohoto ještě zasáhl subjektivní faktor spočívající v tom, že uzly by nebylo možné chránit oproti odcizení. Z tohoto důvodu byly senzory ve druhém klastru ponechány pouze v oplocené části u budovy Katedry geoinformatiky.

Dalším rozdílem je, že přestože bylo vytvořeno základní webové rozhraní, tak nebylo v rámci práce prezentováno. Důraz byl kladen na databázi, ze které si uživatel stáhne data, jaká potřebuje. Webového rozhraní by bylo třeba v případě, že by uzly byly přemísťovány, ale to v rámci ostrého provozu (od května 2015) nebyly.

Závěrem diskuze je nutné zmínit, že vývoj jde neustále dopředu a komponenty, které byly pro práci vybrány, nemusí být nyní aktuální a mohou se vyskytovat vhodnější řešení. Je také třeba, aby na počátku zakoupené komponenty mohly být obměňovány, rozšiřovány. Komponenty, které byly zakoupeny pro měření Katedrou geoinformatiky byly obměněny pouze částečně. Došlo k výměně kombinovaných teplotních a vlhkostních čidel a zakoupení čidla CO<sub>2</sub>. Nyní by mělo dojít k výměně baterií, zakoupení výkonnějšího komunikačního rozhraní a zakoupení nových senzorů a jejich případné kalibraci.

## 10. ZÁVĚR

S technologickým pokrokem se do popředí dostávají stále nové technologie pro monitoring okolního prostředí. S postupem času se tyto technologie začínají používat nejen k monitoringu okolního prostředí, ale i k usnadnění, zpříjemnění a zrychlení denních úkonů prováděných v domácnostech, městech a vnějším okolním prostředí. Od 90. let zažívá obrovský rozmach bezdrátový monitoring. Tento *online* monitoring byl zvolen ke sledování meteorologických prvků v Olomouci.

Disertační práce, jejímž cílem bylo ověřit a vybudovat experimentální bezdrátovou senzorovou síť v Olomouci, byla rozdělena na čtyři dílčí cíle. Práce je zaměřena na celý proces práce s bezdrátovou senzorovou sítí od výběru komponent přes konfiguraci až po základní zpracování dat a přináší tak komplexní popis budování bezdrátové senzorové sítě.

Nejprve bylo nutné stanovit účel monitoringu a vybrat komponenty bezdrátové senzorové sítě (DC 1). Kritéria pro prvotní analýzu a definování jejich ideálních parametrů bylo učiněno. V rámci olomoucké bezdrátové senzorové sítě byl zvolen rádiový přenos založený na základním komunikačním protokolu vytvořeném pro bezdrátovou senzorovou síť, IEEE 802.15.4. Tento protokol nebyl v České republice k dlouhodobému monitoringu použit, a tak bylo třeba ověřit jeho možnosti. Důraz byl kladen na sledování základních meteorologických prvků zahrnujících teplotu vzduchu, relativní vlhkost vzduchu, směr a rychlost větru. Z chemických prvků byl sledován oxid uhličitý, oxid dusičitý, velmi těkavé organické látky a další vzdušné polutanty měřené senzorem Air Pollutants II. Dle výsledků multikriteriální analýzy byly vybrány uzly Waspnote Plug and Sense, modely Smart Environment, Smart Agriculture a Smart Agriculture PRO, od španělské společnosti Libelium.

Rozmístění uzlů ve venkovním prostředí je spjato s mnoha omezeními, která souvisí s technickými parametry uzlů i s terénními faktory (DC 2). Velmi omezujícím parametrem je také bezpečnost umístění uzlů ve městě. Je třeba zaměřit pozornost na oplocené nebo kamerou hlídané oblasti, protože tyto předměty jsou velmi často kradeny. Mezi velmi omezující technické parametry patří délka výdrže baterie uzlu, která je klíčová a souvisí se vzdáleností komunikujících přístrojů, s počtem napojených senzorů, intervalem záznamu i s počtem vzájemně komunikujících přístrojů. Do distribučních algoritmů nejsou doposud plnohodnotně zapojeny terénní faktory, a tak byly vytvořeny tři algoritmy, z nichž jeden sloužil jako přehledový pro rozmístění uzlů ve venkovním prostředí a další dva již pracovaly s technickými i terénními parametry. Podkladem pro tvorbu algoritmů byla grafová teorie. Mapový podklad, ortofoto, byl zvolen na podkladě eye-tracking šetření.

Ověření navržené konfigurace uzlů bezdrátové senzorové sítě bylo řešeno ve třetím dílčím cíli (DC 3). Uzly olomoucké bezdrátové senzorové sítě byly rozmístěny do dvou klastrů. První klastř se nacházel v olomoucké části Holice a druhý u budovy Katedry geoinformatiky téměř v centru města. V prvním klastru se nacházelo sedm pozic pro uzly,

kteře byly umístěny na dřevěné tyče do výšky dvou metrů. Ne všechny pozice byly vždy osazeny uzlem, což bylo způsobeno nedostatkem zakoupených uzlů. Ve druhém klastru byla pouze jedna pozice pro uzel, na které se většinu času nacházely ve výšce dvou metrů nad zemským povrchem dva uzly.

Nejvýznamnější technické parametry bezdrátové sensorové sítě, které byly sledovány, zahrnovaly detekci nejméně komunikačně zatíženého kanálu v 2,4 GHz pásmu, určení výdrže baterie při různých scénářích, sledování hodnot síly signálu při využití méně a více výkonných antén a v neposlední řadě byla sledována úspěšnost korektně přenesených dat. V každém klastru byl vybrán nejvhodnější kanál pro přenos dat. Dle očekávání byl první klustr komunikací méně zatížen, a tak byl vybrán kanál na nižších frekvencích. Ve druhém klastru byly signály rozprostřeny téměř po celém pásmu, kromě posledního kanálu, který byl nakonec využit pro komunikaci v bezdrátové sensorové síti. Bylo zjištěno, že výdrž baterie je velmi významně ovlivněna meteorologickými podmínkami především pak nízkými teplotami (pod 0 °C). Další velmi významný faktor podílející se na vybíjení baterie uzlu je interval záznamu dat, přenosová vzdálenost, počet napojených sensorů a uzlů. Překážky v komunikaci neovlivňují délku výdrže baterie, ale velmi významně snižují úspěšnost přenosu dat. Ta je snížena i s vyšší komunikační vzdáleností, stupněm nabití uzlu, výkonem antény a mírou rušení signálu.

Každý klustr byl opatřen bránou s integrovanou MySQL databází, do které byla posílána data. Data z těchto databází byla synchronizována a posílána do záložní databáze. V této databázi byly vytvořeny triggerly filtrující hrubé chyby v datech. Díky napojení obou bran do ethernetového rozhraní mohlo docházet k základní údržbě bezdrátové sensorové sítě a k dálkovému přístupu k datům.

Na tematická data byl zaměřen čtvrtý dílčí cíl (DC 4). Tematická data získaná senzory integrovanými do uzlů Waspnote Plug and Sense modelů Smart Environment jsou poměrně nepřesná, protože chyba měření teplotních sensorů je stanovena na  $\pm 2$  °C. Toto je poměrně vysoká nepřesnost, která nenabývala nižších hodnot ani po nakalibrování sensorů v akreditované kalibrační laboratoři. Vlhkostní senzory nasazené na tyto uzly vykazují také vysoké odchylky od skutečného stavu, velmi často se objevují nereálné hodnoty vlhkosti vzduchu. Nicméně korelační koeficienty mezi referenčními daty z ČHMÚ a naměřenými daty jsou poměrně vysoké, a to jak jejich denní tak jejich průměrné hodnoty. Nejvýraznějším výsledkem je porovnání teplotních a vlhkostních hodnot v obou klastrech, při kterém bylo zjištěno, že vyšší teploty se pohybují ve druhém klastru v letních měsících. U vlhkostí vzduchu je situace opačná. V 98 % případů se vyšší hodnoty objevují v prvním klastru. Přesnost měření chemických sensorů je spekulativní a nemohla být kvůli problémům s jejich kalibrací ověřena. Při relativních měřeních napětí bylo možné vypočítat odpor sensorů, který koresponduje s chodem koncentrace polutantu. Díky tomuto výpočtu bylo možné predikovat jeho denní, týdenní, měsíční i roční výskyt a rozložení. S ohledem na známou polohu významných bodových zdrojů znečištění se potvrdilo, že nejvíce polutantů přichází ze směru, kde se tyto zdroje nachází.

Bezdrátová sensorová síť v konfiguraci, v jaké byla použita v Olomouci přináší mnoho komplikací při sběru dat. Největší nevýhodou bylo zvolené komunikační rozhraní, které má krátký dosah a komunikace je velmi často rušena. Uzly jsou tak umístěny v blízkosti brány a sledovaná oblast se tak bez použití více bran velmi špatně rozšiřuje. Dálkový přístup k bráně umožňující správu dat je velkou výhodou této technologie, která má potenciál dalšího rozvoje. Stejně tak velký potenciál využití mají bezdrátové sensorové sítě, které se v případě nakalibrování senzorů, mohou stát velmi vhodným doplňkem staničních měření ve městě.

## POUŽITÁ LITERATURA A INFORMAČNÍ ZDROJE

- Abdul, H.N.H., Agbay, Christopher, P.D., Flores, I.S.L., Linsangan, Manuel, A., 2014. Low Cost Internet Based Wireless Sensor Network for Air Pollution Monitoring using Zigbee Module, in: 2014 Fourth International Conference on Digital Information and Communication Technology and It's Applications (Dictap). Ieee, New York, pp. 310–314.
- Akyildiz, I.F., Jornet, J.M., Han, C., 2014. Terahertz band: Next frontier for wireless communications. *Phys. Commun.* 12, 16–32. doi:10.1016/j.phycom.2014.01.006
- Akyildiz, I.F., Vuran, M.C., 2010. *Wireless Sensor Networks*. John Wiley & Sons.
- Al-Ali, A.R., Zualkernan, I., Aloul, F., 2010. A Mobile GPRS-Sensors Array for Air Pollution Monitoring. *IEEE Sens. J.* 10, 1666–1671. doi:10.1109/JSEN.2010.2045890
- Ammari, H.M., 2013. *The Art of Wireless Sensor Networks: Volume 2: Advanced Topics and Applications*. Springer Science & Business Media.
- Ananda, J., Herath, G., 2009. A critical review of multi-criteria decision making methods with special reference to forest management and planning. *Ecol. Econ.* 68, 2535–2548. doi:10.1016/j.ecolecon.2009.05.010
- Argany, M., Mostafavi, M.A., Karimipour, F., Gagné, C., 2011. A GIS Based Wireless Sensor Network Coverage Estimation and Optimization: A Voronoi Approach, in: Gavrilova, M.L., Tan, C.J.K., Mostafavi, M.A. (Eds.), *Transactions on Computational Science XIV, Lecture Notes in Computer Science*. Springer Berlin Heidelberg, pp. 151–172.
- Asín, A., Malahorra, M., 2010. Sensor networks to monitor air pollution in cities | Libelium [WWW Document]. URL [http://www.libelium.com/smart\\_cities\\_wsn\\_air\\_pollution/](http://www.libelium.com/smart_cities_wsn_air_pollution/) (accessed 3.8.16).
- Babaei, H., Romoozi, M., Rostmai, M., 2011. A 3D signal obstruction model for realistic mobility models in Mobile Ad Hoc Networks. *IJCSI*.
- Bahramgiri, M., Hajlaghay, M., Mirrokni, V.S., 2002. Fault-tolerant and 3-dimensional distributed topology control algorithms in wireless multi-hop networks, in: *Eleventh International Conference on Computer Communications and Networks, 2002. Proceedings*. Presented at the Eleventh International Conference on Computer Communications and Networks, 2002. Proceedings, pp. 392–397. doi:10.1109/ICCCN.2002.1043097
- Barakeh, Z.A., Delbart, V., Bonnet, F., 2014. Multiple Gas Sensors System for Environmental and Air Quality Assessments - A Way to Perform Environmental Monitoring in Smart Cities: SCITEPRESS - Science and Technology Publications, pp. 360–364. doi:10.5220/0004711303600364
- Bardwell, J., 2002. Converting Signal Strength Percentage to dBm Values.
- Baronti, P., Pillai, P., Chook, V.W.C., Chessa, S., Gotta, A., Hu, Y.F., 2007. Wireless sensor networks: A survey on the state of the art and the 802.15.4 and ZigBee standards. *Comput. Commun.* 30, 1655–1695. doi:10.1016/j.comcom.2006.12.020
- Bayo, A., Antolín, D., Medrano, N., Calvo, B., Celma, S., 2010. Early detection and monitoring of forest fire with a wireless sensor network system. *Procedia Eng., Eurosensor XXIV Conference Eurosensor XXIV Conference 5*, 248–251. doi:10.1016/j.proeng.2010.09.094
- Beneš, V., 2012. Bezdrátová senzorová síť.
- Benkhelifa, I., Nouali-Taboudjemmat, N., Moussaoui, S., 2014. Disaster Management Projects using Wireless Sensor Networks: An Overview. 2014 28th Int. Conf. Adv. Inf. Netw. Appl. Workshop Waina 605–610. doi:10.1109/WAINA.2014.99
- Bielsa, Alberto, 2011. Libelium - Smart City project in Salamanca to monitor Air Quality and Urban Traffic with Waspnote | Libelium [WWW Document]. URL [http://www.libelium.com/smart\\_city\\_air\\_quality\\_urban\\_traffic\\_waspnote/](http://www.libelium.com/smart_city_air_quality_urban_traffic_waspnote/) (accessed 3.8.16).

- Bokwa, A., Hajto, M.J., Walawender, J.P., Szymanowski, M., 2015. Influence of diversified relief on the urban heat island in the city of Kraków, Poland. *Theor. Appl. Climatol.* 122, 365–382. doi:10.1007/s00704-015-1577-9
- Boronczyk, T., 2016. MySQL Okamžitě. Computer Press.
- Botts, M., Percivall, G., Reed, C., Davidson, J., 2006. OGC® sensor web enablement: Overview and high level architecture, in: *International Conference on GeoSensor Networks*. Springer, pp. 175–190.
- Burghard, R., Katzschner, L., Kupski, S., Chao, R., Spit, T., 2010. Urban climatic map of Arnhem city.
- Burroughs, W.J., 2007. *Climate Change: A Multidisciplinary Approach*. Cambridge University Press.
- Cable, M., 2005. *Calibration: A Technician's Guide*. ISA.
- Cai, Q.Y., Cammers-Goodwin, A., Grimes, C.A., 2000. A wireless, remote query magnetoelastic CO2 sensor. *J. Environ. Monit.* 2, 556–560. doi:10.1039/b004929h
- Černý, A., 2016. O2 IT Services [WWW Document]. O2 IT Serv. URL <http://www.o2its.cz/chytre-mesto-kolin/> (accessed 10.30.16).
- Červenka, V., 2014. Návrh paketového analyzátoru pro bezdrátové senzorové sítě s ethernet rozhraním.
- Česká televize, 2016. Ve Valašském Meziříčí začali používat chytré popelnice. Samy ohlásí, že jsou plné [WWW Document]. ČT24. URL <http://www.ceskatelevize.cz/ct24/regiony/1956904-ve-valasskem-mezirici-zacali-pouzivat-chytre-popelnice-samy-ohlasi-ze-jsou-plne> (accessed 11.26.16).
- Český hydrometeorologický ústav, 2014. ČHMÚ - měření a hodnocení atmosféry a hydrosféry. Český hydrometeorologický ústav, Praha.
- Chaiwatpongsakorn, C., Lu, M., Keener, T.C., Khang, S.-J., 2014. The Deployment of Carbon Monoxide Wireless Sensor Network (CO-WSN) for Ambient Air Monitoring. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 11, 6246–6264. doi:10.3390/ijerph110606246
- Chaurasiya, V.K., Jain, N., Nandi, G.C., 2014. A novel distance estimation approach for 3D localization in wireless sensor network using multi dimensional scaling. *Inf. Fusion, Special Issue: Resource Constrained Networks* 15, 5–18. doi:10.1016/j.inffus.2013.06.003
- ČHMÚ, 2017a. ISKO [WWW Document]. Inf. O Kvalitě Ovzduší V ČR - Hl. Stránka. URL [http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/web\\_generator/actual\\_hour\\_data\\_CZ.html](http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/web_generator/actual_hour_data_CZ.html) (accessed 3.1.17).
- ČHMÚ, 2017b. ISKO [WWW Document]. URL [http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/web\\_generator/aqindex\\_slide2/mp\\_MOLJA\\_CZ.html](http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/web_generator/aqindex_slide2/mp_MOLJA_CZ.html) (accessed 3.1.17).
- ČHMÚ, 2017c. ISKO [WWW Document]. Inf. O Kvalitě Ovzduší V ČR. URL [http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/web\\_generator/aqindex\\_slide2/mp\\_MOLSA\\_CZ.html](http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/web_generator/aqindex_slide2/mp_MOLSA_CZ.html) (accessed 3.1.17).
- Cho, J., Yoo, J., 2014. Implementation of Distributed Health-aware Bicycle System for Making Real-time Air-pollution Map. *IEMEK J. Embed. Syst. Appl.* 9, 229–235. doi:10.14372/IEMEK.2014.9.4.229
- Choi, S., Kim, N., Cha, H., Ha, R., 2009. Micro Sensor Node for Air Pollutant Monitoring: Hardware and Software Issues. *Sensors* 9, 7970–7987. doi:10.3390/s91007970
- Chong, C.-Y., Kumar, S.P., 2003. Sensor networks: evolution, opportunities, and challenges. *Proc. IEEE* 91, 1247–1256. doi:10.1109/JPROC.2003.814918
- Coltekin, A. (Ed.), 2009. valuating the effectiveness of interactive map interface designs: a case study integrating usability metrics with eye-movement analysis. *Cartogr. Geogr. Inf. Sci.* 36.
- Cöltekin, A., Demsar, U., Brychtová, A., Vandroj, J., 2014. Eye-hand coordination during visual search on geographic displays, in: *Proceedings of the 2nd International Workshop on Eye Tracking for Spatial Research (ET4S 2014)*.
- Čurda, J., Janský, B., Kocum, J., 2011. Vliv fyzickogeografických faktorů na extremitu povodní v povodí Vydry. *Geografie* 116, 335–353.
- CzechGlobe, 2016. CzechGlobe | Ústav výzkumu globální změny AV ČR, v. v. i. [WWW Document]. URL <http://www.czechglobe.cz/cs/o-globalni-zmene/> (accessed 7.7.16).



- Deak, G., Curran, K., Condell, J., 2012. A survey of active and passive indoor localisation systems. *Comput. Commun.* 35, 1939–1954. doi:10.1016/j.comcom.2012.06.004
- Devarakonda, S., Sevusu, P., Liu, H., Liu, R., Iftode, L., Nath, B., 2013. Real-time air quality monitoring through mobile sensing in metropolitan areas, in: *Proceedings of the 2nd ACM SIGKDD International Workshop on Urban Computing*. ACM, p. 15.
- Dhillon, S.S., Chakrabarty, K., 2003. Sensor placement for effective coverage and surveillance in distributed sensor networks, in: *2003 IEEE Wireless Communications and Networking, 2003. WCNC 2003*. Presented at the 2003 IEEE Wireless Communications and Networking, 2003. WCNC 2003, pp. 1609–1614 vol.3. doi:10.1109/WCNC.2003.1200627
- Di Marco, P., 2008. Protocol design and implementation for wireless sensor networks.
- Dobrovolný, P., 2012. The surface urban heat island in the city of Brno (Czech Republic) derived from land surface temperatures and selected reasons for its spatial variability. *Theor. Appl. Climatol.* 112, 89–98. doi:10.1007/s00704-012-0717-8
- Dostál, R., 2015. Měření základních meteorologických prvků pomocí bezdrátových senzorových sítí. UP Olomouc.
- e2v, 2006. MiCS-2714 NO2 Sensor.
- El-Bendary, N., Fouad, M.M.M., Ramadan, R.A., Banerjee, S., Hassanien, A.E., 2013. Smart environmental monitoring using wireless sensor networks. *Wirel. Sens. Netw. Theory Appl.*
- Emary, I.M.M.E., Ramakrishnan, S., 2013. *Wireless Sensor Networks: From Theory to Applications*. CRC Press.
- Esposito, E., De Vito, S., Salvato, M., Bright, V., Jones, R.L., Popoola, O., 2016. Dynamic neural network architectures for on field stochastic calibration of indicative low cost air quality sensing systems. *Sens. Actuators B Chem.* 231, 701–713. doi:10.1016/j.snb.2016.03.038
- Fabrikant, S.I., Hespanha, S.R., Andrienko, N., Andrienko, G., Montello, D.R., 2008. Evaluating the effectiveness of interactive map interface designs: a case study integrating usability metrics with eye-movement analysis. *Cartogr. J.* 45.
- Feng, L., Qiu, T., Sun, Z., Xia, F., Zhou, Y., 2014. A coverage strategy for wireless sensor networks in a three-dimensional environment. *Int. J. Ad Hoc Ubiquitous Comput.* 15, 83–94.
- Fernández, P., Santana, J.M., Ortega, S., Trujillo, A., Suárez, J.P., Domínguez, C., Santana, J., Sánchez, A., 2016. SmartPort: A Platform for Sensor Data Monitoring in a Seaport Based on FIWARE. *Sensors* 16, 417. doi:10.3390/s16030417
- Fishbain, B., Lerner, U., Castell, N., Cole-Hunter, T., Popoola, O., Broday, D.M., Iñiguez, T.M., Nieuwenhuijsen, M., Jovasevic-Stojanovic, M., Topalovic, D., Jones, R.L., Galea, K.S., Etzion, Y., Kizel, F., Golumbic, Y.N., Baram-Tsabari, A., Yacobi, T., Drahtler, D., Robinson, J.A., Kocman, D., Horvat, M., Svecova, V., Arpacı, A., Bartonova, A., 2017. An evaluation tool kit of air quality micro-sensing units. *Sci. Total Environ.* 575, 639–648. doi:10.1016/j.scitotenv.2016.09.061
- Fotue, D., Tanonkou, G.A., 2009. An ad-hoc Wireless Sensor Networks with Application to Air Pollution Detection., in: *Conference: Proceedings of the ISCA First International Conference on Sensor Networks and Applications*. San Francisco, pp. 48–53.
- Fowler, A.M., Macreadie, P.I., Booth, D.J., 2015. Renewables-to-reefs: participatory multicriteria decision analysis is required to optimize wind farm decommissioning. *Mar. Pollut. Bull.* 98, 368–371. doi:10.1016/j.marpolbul.2015.07.002
- Fuhrmann, S., Ahonen-Rainio, P., Edsall, R.M., Fabrikant, S.I., Koua, E.L., Tobón, C., Ware, C., Wilson, S., 2005. Making Useful and Useable Geovisualization, in: *Exploring Geovisualization*. Elsevier, pp. 551–566.
- Ga v30 06: VOC sensor | Libelium [WWW Document], 2016. URL <http://www.libelium.com/development/waspote/examples/ga-v30-06-voc-sensor-reading/> (accessed 2.28.17).

- Gascón, D., 2016. Ga v30 09: NO2 sensor | Libelium [WWW Document]. URL <http://www.libelium.com/development/waspmote/examples/ga-v30-09-no2-sensor-reading/http://www.libelium.com/development/waspmote/examples/ga-v30-09-no2-sensor-reading/> (accessed 2.26.17).
- Gases sensor calibration process consideration?, 2016.
- Gomez, M., Hidalgo, D., 2014. New Strategy for a good Management and Control of Pollution Caused by urban Traffic. *Int. J. Environ. Res.* 8, 1215–1222.
- Grafy automatických stanic [WWW Document], 2017. URL <http://portal.chmi.cz/aktualni-situace/aktualni-stav-pocasi/ceska-republika/stanice/grafy-automatickych-stanic> (accessed 4.22.17).
- Guo, X., Zhao, C., Yang, X., Sun, C., 2011. A Deterministic Sensor Node Deployment Method with Target Coverage and Node Connectivity, in: Deng, H., Miao, D., Lei, J., Wang, F.L. (Eds.), *Artificial Intelligence and Computational Intelligence, Lecture Notes in Computer Science*. Springer Berlin Heidelberg, pp. 201–207.
- Guoqiang, M., 2009. *Localization Algorithms and Strategies for Wireless Sensor Networks: Monitoring and Surveillance Techniques for Target Tracking: Monitoring and Surveillance Techniques for Target Tracking*. IGI Global.
- Guvenc, I., Gezici, S., Sahinoglu, Z., Kozat, U.C., 2011. *Reliable Communications for Short-Range Wireless Systems*. Cambridge University Press.
- Hasenfratz, D., Saukh, O., Walser, C., Hueglin, C., Fierz, M., Arn, T., Beutel, J., Thiele, L., 2015. Deriving High-resolution Urban Air Pollution Maps Using Mobile Sensor Nodes. *Pervasive Mob Comput* 16, 268–285. doi:10.1016/j.pmcj.2014.11.008
- Hejlová, V., 2015. Bezdrátová senzorová síť sledující znečištění ovzduší. VŠB-TU, Ostrava.
- Hejlová, V., 2014. Spatial Distribution of Wireless Sensor Nodes in the Urban Environment. Presented at the *Sensornets*, Lisabon, pp. 3–10.
- Hejlová, V., 2012. Monitoring a modelování povrchového odtoku s využitím GIS. Olomouc.
- Hejlová, V., Voženilek, V., 2015. Současný stav výzkumu klimatu městského prostředí ve světě. *Meteorol. Zprávy* 68.
- Heurtefeux, K., Valois, F., 2012. Is RSSI a Good Choice for Localization in Wireless Sensor Network?, in: 2012 IEEE 26th International Conference on Advanced Information Networking and Applications. Presented at the 2012 IEEE 26th International Conference on Advanced Information Networking and Applications, pp. 732–739. doi:10.1109/AINA.2012.19
- Hoffmann, F., Kaufmann, M., Kriegel, K., 1991. The art gallery theorem for polygons with holes, in: , 32nd Annual Symposium on Foundations of Computer Science, 1991. Proceedings. Presented at the , 32nd Annual Symposium on Foundations of Computer Science, 1991. Proceedings, pp. 39–48. doi:10.1109/SFCS.1991.185346
- How to get voltage to ppm? [WWW Document], 2016. URL <https://www.libelium.com/forum/viewtopic.php?f=20&t=13173> (accessed 2.25.17).
- Hu, K., Sivaraman, V., Luxan, B.G., Rahman, A., 2016. Design and Evaluation of a Metropolitan Air Pollution Sensing System. *Ieee Sens. J.* 16, 1448–1459. doi:10.1109/JSEN.2015.2499308
- Hu, S.-C., Wang, Y.-C., Huang, C.-Y., Tseng, Y.-C., 2011. Measuring Air Quality in City Areas by Vehicular Wireless Sensor Networks. *J Syst Softw* 84, 2005–2012. doi:10.1016/j.jss.2011.06.043
- Hynčica, O., Pavlata, K., 2011. Časopis Automa - Bezdrátové komunikační systémy založené na IEEE 802.15.4 v procesní automatizaci (1. část) [WWW Document]. URL <http://automa.cz/bezdratove-komunikacni-systemy-zalozene-na-ieee-802-15-4-v-procesni-automatizaci-1-cast-43411.html> (accessed 7.2.16).
- Idso, C.D., Idso, S.B., Balling, R.C., 2001. An intensive two-week study of an urban CO<sub>2</sub> dome in Phoenix, Arizona, USA. *Atmos. Environ.* 35, 995–1000.
- IEEE, 2016. IEEE-SA -IEEE Get Program - 802.21: Media Independent Handover Services [WWW Document]. URL <http://standards.ieee.org/about/get/802/802.22.html> (accessed 7.9.16).

- IEEE, 2006. Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs).
- IEEE, n.d. IEEE-SA - IEEE Get Program [WWW Document]. URL <http://standards.ieee.org/about/get/> (accessed 7.9.16).
- Imisní monitoring [WWW Document], n.d. URL <http://89.185.253.76:81/ovzdusi-olomouc/> (accessed 3.1.17).
- iRegiony, 2016. [http://regiony.impuls.cz/chytry-pisek-muze-inspirovat-dalsi-ceska-mesta-frl-/jihocesky-kraj.aspx?c=A160619\\_194421\\_imp-jihocesky\\_sucha#utm\\_source=rss&utm\\_medium=feed&utm\\_campaign=iregiony&utm\\_content=main](http://regiony.impuls.cz/chytry-pisek-muze-inspirovat-dalsi-ceska-mesta-frl-/jihocesky-kraj.aspx?c=A160619_194421_imp-jihocesky_sucha#utm_source=rss&utm_medium=feed&utm_campaign=iregiony&utm_content=main) [WWW Document]. IRegiony – Rádio Impuls. URL [http://regiony.impuls.cz/chytry-pisek-muze-inspirovat-dalsi-ceska-mesta-frl-/jihocesky-kraj.aspx?c=A160619\\_194421\\_imp-jihocesky\\_sucha#utm\\_source=rss&utm\\_medium=feed&utm\\_campaign=iregiony&utm\\_content=main](http://regiony.impuls.cz/chytry-pisek-muze-inspirovat-dalsi-ceska-mesta-frl-/jihocesky-kraj.aspx?c=A160619_194421_imp-jihocesky_sucha#utm_source=rss&utm_medium=feed&utm_campaign=iregiony&utm_content=main) (accessed 7.19.16).
- Jamil, M.S., Jamil, M.A., Mazhar, A., Ikram, A., Ahmed, A., Munawar, U., 2015. Smart Environment Monitoring System by Employing Wireless Sensor Networks on Vehicles for Pollution Free Smart Cities. *Procedia Eng., Humanitarian Technology: Science, Systems and Global Impact 2015, HumTech2015* 107, 480–484. doi:10.1016/j.proeng.2015.06.106
- Jančík, P., 2013. Atlas ostravského ovzduší. VŠB-TU, Ostrava.
- Jangra, A., Richa, Swati, Priyanka, 2010. Wireless Sensor Network (WSN): Architectural Design issues and Challenges.
- Jin, M., Rong, G., Wu, H., Shuai, L., Guo, X., 2012. Optimal surface deployment problem in wireless sensor networks, in: 2012 Proceedings IEEE INFOCOM. Presented at the 2012 Proceedings IEEE INFOCOM, pp. 2345–2353. doi:10.1109/INFCOM.2012.6195622
- Jirásek, O., 2013. Senzorové sítě v environmentálních studiích. UP Olomouc, Olomouc.
- Joint Technical Committee, 2013. ISO/IEC 20005:2013(en), Information technology — Sensor networks — Services and interfaces supporting collaborative information processing in intelligent sensor networks [WWW Document]. URL <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-iec:20005:ed-1:v1:en> (accessed 7.13.16).
- Kabara, J., Calle, M., Kabara, J., Calle, M., 2012. MAC Protocols Used by Wireless Sensor Networks and a General Method of Performance Evaluation, MAC Protocols Used by Wireless Sensor Networks and a General Method of Performance Evaluation. *Int. J. Distrib. Sens. Netw. Int. J. Distrib. Sens. Netw.* 2012, 2012, e834784. doi:10.1155/2012/834784, 10.1155/2012/834784
- Kadri, A., Yaacoub, E., Mushtaha, M., Abu-Dayya, A., 2013. Wireless Sensor Network for Real-Time Air Pollution Monitoring. 2013 First Int. Conf. Commun. Signal Process. Their Appl. Iccspa13.
- K. Khedo, K., Perseedoss, R., Mungur, A., 2010. A Wireless Sensor Network Air Pollution Monitoring System. *Int. J. Wirel. Mob. Netw.* 2, 31–45. doi:10.5121/ijwmn.2010.2203
- Kangas, J., Kangas, A., 2005. Multiple criteria decision support in forest management—the approach, methods applied, and experiences gained. For. Ecol. Manag., Decision Support in Multi Purpose Forestry Decision Support in Multi Purpose Forestry Selected papers from the symposium on “Development and Application of Decision Support Tools in Multiple Purpose Forest Management” 207, 133–143. doi:10.1016/j.foreco.2004.10.023
- Karimipour, F., Argany, M., Mostafavi, M., 2013. Spatial Coverage Estimation and Optimization in Geosensor Networks Deployment, in: *Wireless Sensor Networks: From Theory to Applications*. CRC Press, pp. 59–84.
- Karl, H., Willig, A., 2007. *Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks*. John Wiley & Sons.
- Kaur, H., Sawhney, R.S., Komal, N., 2012. Wireless Sensor Networks for Disaster Management. *Int. J. Adv. Res. Comput. Eng. Technol.* 1, 129–134.
- Khemnar, D., Kasar, A.R., Tembhornikar, N.P., 2013. GRIN - WSN Based Air Pollution Monitoring System.

- Kinkade, B.R., Daly, J.T., Johnson, E.A., 2000. MEMS device for mass market gas and chemical sensors, in: Peeters, E., Paul, O. (Eds.), *Micromachined Devices and Components Vi*. Spie-Int Soc Optical Engineering, Bellingham, pp. 180–187.
- Kleerekoper, L., van Esch, M., Salcedo, T.B., 2012. How to make a city climate-proof, addressing the urban heat island effect. *Resour. Conserv. Recycl., Climate Proofing Cities* 64, 30–38. doi:10.1016/j.resconrec.2011.06.004
- Kofler, M., 2007. *Mistrovství v MySQL 5*. Computer Press.
- Kohno, M., Matsunaga, M., Anzai, Y., 1999. An adaptive sensor network system for complex environments. *Robot. Auton. Syst.* 28, 115–125. doi:10.1016/S0921-8890(99)00010-X
- Koniček, J., 2016. Optimalizace energetického zatížení uzlu waspmote plug&sense s ohledem na vybrané faktory.
- Kozel, J., 2016. Víceúrovňová analýza městského a příměstského klimatu na příkladu středně velkých měst. [WWW Document]. URL <http://is.muni.cz/www/680/km/klimabrno/index.htm> (accessed 7.17.16).
- Kreibich, O., Neuzil, J., 2011. Bezdrátové senzorové sítě. *MM Průmyslové Spektrum* 2011.
- Kulczycki, M., 2011. Prostorová analýza režimu teploty na stanicích Metropolitní staniční sítě Olomouc (MESSO). Olomouc.
- Lambrechts, J., Sinha, S., 2016. *Microsensing Networks for Sustainable Cities*. Springer.
- Lazos, L., Poovendran, R., 2006. Coverage In Heterogeneous Sensor Networks, in: 2006 4th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks. Presented at the 2006 4th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks, pp. 1–10. doi:10.1109/WIOPT.2006.1666447
- Leixner, M., 2012. Návrh paketového analyzátoru pro bezdrátové senzorové sítě s ethernet rozhraním.
- Li, C., Wang, L., Sun, T., Yang, S., Gan, X., Yang, F., Wang, X., 2014. Topology Analysis of Wireless Sensor Networks Based on Nodes' Spatial Distribution. *IEEE Trans. Wirel. Commun.* 13, 2454–2453. doi:10.1109/TWC.2014.031714.130038
- Libelium, 2016a. *Waspote Plug&Sense Sensor Guide*.
- Libelium, 2016b. *Waspote Plug&Sense Technical Guide*.
- Libelium, 2016c. *Meshlium X treme, Technical Guide*.
- Libelium, 2015. *Gases 2.0 Technical Guide*.
- Libelium Agriculture, 2015. *Agriculture 2.0 Technical Guide*.
- Libelium Networking, 2016. *Wapote 802.15.4 Networking Guide*.
- Lipina, P., Žídek, D., 2003. *Návod pro pozorovatele meteorologických stanic ČHMÚ*. Ostrava.
- Litschman, T., Rožnovský, J., 2005. Příspěvek ke studiu městského klimatu v Brně.
- Liu, B., Brass, P., Dousse, O., Nain, P., Towsley, D., 2005. Mobility Improves Coverage of Sensor Networks, in: *Proceedings of the 6th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing, MobiHoc '05*. ACM, New York, NY, USA, pp. 300–308. doi:10.1145/1062689.1062728
- Liu, J.-H., Chen, Y.-F., Lin, T.-S., Chen, C.-P., Chen, P.-T., Wen, T.-H., Sun, C.-H., Juang, J.-Y., Jiang, J.-A., 2012. An air quality monitoring system for urban areas based on the technology of wireless sensor networks. *Int. J. Smart Sens. Intell. Syst.* 5, 191–214.
- LoRa, 2016. *LoRa Technology* [WWW Document]. URL <https://www.lora-alliance.org/What-Is-LoRa/Technology> (accessed 7.16.16).
- Lorencová, E., Hubatová, M., Haasnoot, M., Vačkář, D., 2014. Exploring adaptation pathways: Case of Prague urban heat island.
- Ma, Y., Richards, M., Ghanem, M., Guo, Y., Hassard, J., 2008. Air Pollution Monitoring and Mining Based on Sensor Grid in London. *Sensors* 8, 3601–3623. doi:10.3390/s80603601

- Manisekaran, S.V., Venkatesan, R., Manisekaran, S.V., Venkatesan, R., 2014. Cluster-Based Architecture for Range-Free Localization in Wireless Sensor Networks, Cluster-Based Architecture for Range-Free Localization in Wireless Sensor Networks. *Int. J. Distrib. Sens. Netw. Int. J. Distrib. Sens. Netw.* 2014, 2014, e963473. doi:10.1155/2014/963473, 10.1155/2014/963473
- Mansour, S., Nasser, N., Karim, L., Ali, A., 2014. Wireless Sensor Network-based air quality monitoring system, in: 2014 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC). Presented at the 2014 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC), pp. 545–550. doi:10.1109/ICCNC.2014.6785394
- Marin-Perez, R., García-Pintado, J., Gómez, A.S., 2012. A Real-Time Measurement System for Long-Life Flood Monitoring and Warning Applications. *Sensors* 12, 4213–4236. doi:10.3390/s120404213
- Matějka, K., 2014. Meteorologická stanice Rudolfovo [WWW Document]. URL <http://www.infodatasys.cz/climate/rudolfovo/stanice.htm> (accessed 1.7.17).
- Mead, M.I., Popoola, O.A.M., Stewart, G.B., Landshoff, P., Calleja, M., Hayes, M., Baldovi, J.J., McLeod, M.W., Hodgson, T.F., Dicks, J., Lewis, A., Cohen, J., Baron, R., Saffell, J.R., Jones, R.L., 2013. The use of electrochemical sensors for monitoring urban air quality in low-cost, high-density networks. *Atmos. Environ.* 70, 186–203. doi:10.1016/j.atmosenv.2012.11.060
- Mendes, L.D.P., J.P.C. Rodrigues, J., 2011. A survey on cross-layer solutions for wireless sensor networks. *J. Netw. Comput. Appl., Efficient and Robust Security and Services of Wireless Mesh Networks* 34, 523–534. doi:10.1016/j.jnca.2010.11.009
- Méndez, D., Pérez, A.J., Labrador, M.A., Marrón, J.J., 2011. P-Sense: A participatory sensing system for air pollution monitoring and control, in: 2011 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PERCOM Workshops). Presented at the 2011 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PERCOM Workshops), pp. 344–347. doi:10.1109/PERCOMW.2011.5766902
- Mestre, P., Serodio, C., Morais, R., Azevedo, J., Melo-Pinto, P., 2010. Vegetation Growth Detection Using Wireless Sensor Networks, in: World Congress on Engineering, WCE 2010. IAENG, Hong Kong.
- Městské klima, 2012. Městské klima: městské a příměstské klima Olomouce a okolí [WWW Document]. URL <http://mestskeklima.upol.cz/> (accessed 7.7.16).
- Meteorologické stanice ČHMÚ [WWW Document], 2016. URL [http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/poboc/OS/stanice/ShowStations\\_CZ.html](http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/poboc/OS/stanice/ShowStations_CZ.html) (accessed 7.7.16).
- Miao, C., Dai, G., Zhao, X., Tang, Z., Chen, Q., 2015. 3D Self-Deployment Algorithm in Mobile Wireless Sensor Networks. *Int. J. Distrib. Sens. Netw.* 11, 721921. doi:10.1155/2015/721921
- Mizera, J., 2011. Využití senzorových bezdrátových sítí pro monitorování životního prostředí.
- Moltchanov, S., Levy, I., Etzion, Y., Lerner, U., Broday, D.M., Fishbain, B., 2015. On the feasibility of measuring urban air pollution by wireless distributed sensor networks. *Sci. Total Environ.* 502, 537–547. doi:10.1016/j.scitotenv.2014.09.059
- Mueller, M.D., Hasenfratz, D., Saukh, O., Fierz, M., Hueglin, C., 2016. Statistical modelling of particle number concentration in Zurich at high spatio-temporal resolution utilizing data from a mobile sensor network. *Atmos. Environ.* 126, 171–181. doi:10.1016/j.atmosenv.2015.11.033
- Muller, C.L., Chapman, L., Grimmond, C.S.B., Young, D.T., Cai, X., 2013. Sensors and the city: a review of urban meteorological networks. *Int. J. Climatol.* 33, 1585–1600. doi:10.1002/joc.3678
- Murthy, C.S.R., Manoj, B.S., 2004. *Ad Hoc Wireless Networks: Architectures and Protocols*. Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, NJ, USA.
- Murty, R.N., Mainland, G., Rose, I., Chowdhury, A.R., Gosain, A., Bers, J., Welsh, M., 2008. CitySense: An Urban-Scale Wireless Sensor Network and Testbed, in: 2008 IEEE Conference on Technologies for Homeland Security. Presented at the 2008 IEEE Conference on Technologies for Homeland Security, pp. 583–588. doi:10.1109/THS.2008.4534518
- Mu-Sheng Lin, Jenq-Shiou Leu, Kuen-Han Li, Jean-LienC Wu, 2013. Overview of IEEE 802.15.4 Wireless Sensor Networks in Three-Dimensional Terrains, in: *Wireless Sensor Networks*. CRC Press, pp. 87–118.

- Na, A., Priest, M., 2007. Sensor Observation Service.
- Navrátil, B., 2016. Teplotní ostrov na Vsetíně. Vsetínské Nov.
- Neal, J.C., Atkinson, P.M., Hutton, C.W., 2012. Adaptive space–time sampling with wireless sensor nodes for flood forecasting. *J. Hydrol.* 414–415, 136–147. doi:10.1016/j.jhydrol.2011.10.021
- Ng, E., 2012. Towards planning and practical understanding of the need for meteorological and climatic information in the design of high-density cities: A case-based study of Hong Kong. *Int. J. Climatol.* 32, 582–598. doi:10.1002/joc.2292
- Ng, E., Ren, C., 2015. *The Urban Climatic Map: A Methodology for Sustainable Urban Planning*. Routledge.
- Nguyen, T.T., Thanh, H.D., Hoang Son, L., Trong Le, V., 2015. Optimization for the sensor placement problem in 3D environments. *IEEE*, pp. 327–333. doi:10.1109/ICNSC.2015.7116057
- Ni, X., Ishii, S., Kildishev, A.V., Shalaev, V.M., 2013. Ultra-thin, planar, Babinet-inverted plasmonic metalenses. *Light Sci. Appl.* 2, e72. doi:10.1038/lsa.2013.28
- OGC, 2016. SWE Common Data Model Encoding Standard | OGC [WWW Document]. URL <http://www.opengeospatial.org/standards/swecommon> (accessed 7.12.16).
- OGC® PUCK Protocol Standard | OGC [WWW Document], 2016. URL <http://www.opengeospatial.org/standards/puck> (accessed 7.12.16).
- Omookun, G.A., 2015. *A Survey of ZigBee Wireless Sensor Network Technology: Topology, Applications and Challenges*.
- Ooms, K., De Maeyer, P., Fack, V., 2014. Study of the attentive behavior of novice and expert map users using eye tracking. *Cartogr. Geogr. Inf. Sci.* 41, 37–54. doi:10.1080/15230406.2013.860255
- OpenSense [WWW Document], 2015. URL <http://www.opensense.ethz.ch/trac/> (accessed 3.8.16).
- Ortiz, C.D., Puig, J.M., Palau, C.E., Esteve, M., 2007. 3D Wireless Sensor Network Modeling and Simulation, in: *International Conference on Sensor Technologies and Applications, 2007. SensorComm 2007*. Presented at the International Conference on Sensor Technologies and Applications, 2007. *SensorComm 2007*, pp. 307–312. doi:10.1109/SENSORCOMM.2007.4394939
- Pavlis, J., 2011. ZigBee - když je pomalejší síť výhodnější [WWW Document]. URL <http://notebook.cz/clanky/technologie/2011/ZigBee> (accessed 7.4.16).
- Pekárek, J., 2009. *Lokalizace komunikačních uzlů v bezdrátových senzorových sítích*. Vysoké učení technické v Brně.
- Peterka, J., 2015. SIGFOX: Internet věcí bez internetu a jen pro některé věci [WWW Document]. Lupa.cz. URL <http://www.lupa.cz/clanky/sigfox-internet-veci-bez-internetu-a-jen-pro-nektere-veci/> (accessed 7.16.16).
- Pister, K., S...J., n.d. *Smart Dust*.
- Plug & Sense! Sensor Networks made easy - Models | Libelium [WWW Document], 2016. URL <http://www.libelium.com/products/plug-sense/models/> (accessed 3.6.17).
- Podhorský, M., 2012. *Bezdrátové Senzorové Sítě v Průmyslové Praxi*. Bachelor Thesis VUT Brno Brno.
- Poe, W.Y., Schmitt, J.B., 2009. Node Deployment in Large Wireless Sensor Networks: Coverage, Energy Consumption, and Worst-case Delay, in: *Asian Internet Engineering Conference, AINTEC '09*. ACM, New York, NY, USA, pp. 77–84. doi:10.1145/1711113.1711127
- Polanský, R., 2016. *Smart City Písek*. Czech Smart City Clust.
- Polanský, R., n.d. *Smart projekty*. Czech Smart City Clust.
- Polastre, J., Szewczyk, R., Mainwaring, A., Culler, D., Anderson, J., 2004. *Wireless Sensor Networks*, in: Raghavendra, C.S., Sivalingam, K.M., Znati, T. (Eds.), . Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA, USA, pp. 399–423.
- Poole, I., n.d. *What is ZigBee | Wireless Networking Technology | Tutorial* [WWW Document]. URL <http://www.radio-electronics.com/info/wireless/zigbee/zigbee.php> (accessed 7.4.16).

- Popelka, S., Brychtova, A., Svobodova, J., Brus, J., Dolezal, J., 2013. Advanced visibility analyses and visibility evaluation using eye-tracking, in: 2013 21st International Conference on Geoinformatics. Presented at the 2013 21st International Conference on Geoinformatics, pp. 1–6. doi:10.1109/Geoinformatics.2013.6626176
- Popoola, O., Mead, I., Bright, V., Baron, R., Saffell, J., Stewart, G., Kaye, P., Jones, R., 2013. A Portable Low-Cost High Density Sensor Network for Air Quality at London Heathrow Airport. Presented at the EGU General Assembly Conference Abstracts, p. EGU2013-1907.
- Prasad, R.V., Baig, M.Z., Mishra, R.K., P, R., Desai, U.B., Merchant, S.N., 2011. Real Time Wireless Air Pollution Monitoring system. *ICTACT J. Commun. Technol.* 2, 370–375.
- Rajasegarar, S., Zhang, P., Zhou, Y., Karunasekera, S., Leckie, C., Palaniswami, M., 2014. High Resolution Spatio-temporal Monitoring of Air Pollutants Using Wireless Sensor Networks. 2014 Ieee Ninth Int. Conf. Intell. Sens. Sens. Netw. Inf. Process. Ieee Issnip 2014.
- Range of RSSI Value [WWW Document], 2009. URL <https://www.libelium.com/forum/viewtopic.php?f=14&t=8373&p=18301&hilit=rssi#p18301> (accessed 6.18.16).
- Re, G.L., Peri, D., Vassallo, S.D., 2014. Urban Air Quality Monitoring Using Vehicular Sensor Networks, in: Gaglio, S., Re, G.L. (Eds.), *Advances onto the Internet of Things, Advances in Intelligent Systems and Computing*. Springer International Publishing, pp. 311–323.
- Ren, C., Lau, K.L., Yiu, K.P., Ng, E., 2013. The application of urban climatic mapping to the urban planning of high-density cities: The case of Kaohsiung, Taiwan. *Cities* 31, 1–16. doi:10.1016/j.cities.2012.12.005
- Ren, C., Ng, E.Y., Katzschner, L., 2011. Urban climatic map studies: a review. *Int. J. Climatol.* 31, 2213–2233. doi:10.1002/joc.2237
- Řepka, M., Lipina, P., Vysoudil, M., 2010. Historie a současnost meteorologických pozorování v okrese Olomouc.
- Řezník, T., 2012. Emergency Support System Management of Geographic Information for Command and Control Systems. Univerzita obrany, Brno.
- Rezník, T., Lukas, V., Horáková, S., others, 2015. Towards Farm-Oriented Open Data in Europe: the Scope and Pilots of the European Project“ FOODIE.” *AGRIS -Line Pap. Econ. Inform.* 7, 51.
- Ripka, P., 2014. Fakulta elektrotechnická.
- Roseline, R., Devapriya, M., Sumathi, P., 2013. Pollution Monitoring Using Sensors and Wireless Sensor Networks: A Survey. *Int. J. Appl. Innov. Eng. Manag.* 2.
- Roy, S., Mukherjee, N., 2012. Topology Construction of 3D Wireless Sensor Network, in: Meghanathan, N., Nagamalai, D., Chaki, N. (Eds.), *Advances in Computing and Information Technology, Advances in Intelligent Systems and Computing*. Springer Berlin Heidelberg, pp. 533–542.
- Šafránek, M., Kocur, Z., Neruda, 2009. Datové přenosy u polárního kruhu [WWW Document]. URL <http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2009040001> (accessed 7.18.16).
- Sagar, Goel, R., 2015. Wireless Sensor Network Deployed for Air Pollution Monitoring System in any Area. *SSRG Int. J. Electr. Electron. Eng. SSRG-IJEEE* 1–5.
- Samanta, S., Tembhare, P.U., Pote, C.R., 2013. A survey on 3D localization in wireless sensor networks. *Int. J. Comput. Eng. Res.* 3, 90–94.
- Saukh, O., Hasenfratz, D., Thiele, L., 2015. Reducing Multi-hop Calibration Errors in Large-scale Mobile Sensor Networks, in: *Proceedings of the 14th International Conference on Information Processing in Sensor Networks, IPSN '15*. ACM, New York, NY, USA, pp. 274–285. doi:10.1145/2737095.2737113
- Sausen, P.S., Spohny, M.A., Perkusichy, A., 2008. Energy efficient blind flooding in wireless sensors networks, in: *Industrial Electronics, 2008. IECON 2008. 34th Annual Conference of IEEE. IEEE*, pp. 1736–1741.

- Scheideler, C., 2007. Overlay networks for wireless ad hoc networks, in: *Wireless Communications*. Springer, pp. 237–258.
- Sensor Web Enablement (SWE)|OGC [WWW Document], 2016. URL <http://www.opengeospatial.org/ogc/markets-technologies/swe> (accessed 7.9.16).
- Severino, R., 2008. On the use of IEEE 802.15. 4/ZigBee for Time-Sensitive Wireless Sensor Network Applications. Instituto Politécnico do Porto. Instituto Superior de Engenharia do Porto.
- Shaban, K.B., Kadri, A., Rezk, E., 2016. Urban Air Pollution Monitoring System With Forecasting Models. *IEEE Sens. J.* 16, 2598–2606. doi:10.1109/JSEN.2016.2514378
- Shermer, T.C., 1992. Recent results in art galleries [geometry]. *Proc. IEEE* 80, 1384–1399. doi:10.1109/5.163407
- Si, P., Li, Q., Zhang, Y., Fang, Y., 2015. Information-Centric Resource Management for Air Pollution Monitoring with Multihop Cellular Network Architecture, in: Xu, K., Zhu, H. (Eds.), *Wireless Algorithms, Systems, and Applications*. Springer-Verlag Berlin, Berlin, pp. 457–466.
- Simons, I., Echterhoff, J., 2011. OGC® Sensor Planning Service Implementation Standard.
- Šišma, R., 2016. Historie 2016 | Meteocentrum Olomouc.
- Skalák, P., Žák, N., Zahradníček, P., Helman, K., 2015. Příspěvek projektu UHI k poznání klimatu Prahy. *Meteorol. Zprávy* 68.
- Soparia, J., Bhatt, N., 2014. A Survey on Comparative Study of Wireless Sensor Network Topologies. *Int. J. Comput. Appl.* 87.
- Sosinsky, B., 2009. *Networking Bible*. John Wiley & Sons.
- Státní zdravotní ústav, 2014. Systém monitorování zdravotního stavu obyvatelstva České republiky ve vztahu k životnímu prostředí.
- Stephens, 2016. IEEE 802.11, The Working Group Setting the Standards for Wireless LANs [WWW Document]. URL <http://ieee802.org/11/> (accessed 7.9.16).
- Štěřba, Z., Šašinka, Č., Stachoň, Z., Kubíček, P., Tamm, S., 2014. Mixed Research Design in Cartography: A Combination of Qualitative and Quantitative Approaches 64.
- Stojkoska, B.R., 2014. Nodes Localization in 3D Wireless Sensor Networks Based on Multidimensional Scaling Algorithm, Nodes Localization in 3D Wireless Sensor Networks Based on Multidimensional Scaling Algorithm. *Int. Sch. Res. Not. Int. Sch. Res. Not.* 2014, 2014, e845027. doi:10.1155/2014/845027, 10.1155/2014/845027
- Stojmenović, I. (Ed.), 2005. *Handbook of sensor networks: algorithms and architectures*. Wiley, Hoboken, NJ.
- Štoud, J., 2015. Bezdrátový senzorový systém.
- Stříž, n.d. Meteorologické stanice ČHMÚ [WWW Document]. URL [http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/poboc/OS/stanice/ShowStations\\_CZ.html](http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/poboc/OS/stanice/ShowStations_CZ.html) (accessed 7.18.16).
- Suchánek, J., 2014. The concept of wireless sensor network for early warning in the case of accidental releases [WWW Document]. <http://sgem.org/sgemlib>. URL <http://www.sgem.org/sgemlib/spip.php?article4615> (accessed 3.10.17).
- Talašová, J., 2003. Fuzzy metody vícekritériálního hodnocení a rozhodování /.
- Tolasz, R., 2009. Meteorologie a klimatologie tvoří v českém hydrometeorologickém ústavu nedělitelný systém. *Meteorol. Zprávy*.
- Tolasz, R., Taťána Míková, Valeriánová, A., Voženílek, V., 2007. Atlas podnebí Česka. ČHMÚ a Univerzita Palackého v Olomouci.
- Townsend, A.M., 2013. *Smart Cities: Big Data, Civic Hackers, and the Quest for a New Utopia*. W. W. Norton & Company.
- Tsow, F., Forzani, E., Rai, A., Wang, R., Tsui, R., Mastroianni, S., Knobbe, C., Gandolfi, A.J., Tao, N.J., 2009. A Wearable and Wireless Sensor System for Real-Time Monitoring of Toxic Environmental Volatile Organic Compounds. *IEEE Sens. J.* 9, 1734–1740. doi:10.1109/JSEN.2009.2030747



- UHI, 2016. UHI -Zaměření projektu [WWW Document].
- Upal Mahfuz, M., Ahmed, K.M., 2005. A review of micro-nano-scale wireless sensor networks for environmental protection: Prospects and challenges. *Sci. Technol. Adv. Mater.* 6, 302–306. doi:10.1016/j.stam.2005.02.008
- Ustad, M.V.K., Mali, A.S., Kibile, M.S.S., 2014. Zigbee Based Wireless Air Pollution Monitoring System Using Low Cost and Energy Efficient Sensors. *Int. J. Eng. Trends Technol.* 10.
- Voogt, J. A., 2002. Urban Heat Island, in: *Encyclopedia of Global Environmental Change, Volume 3, Causes and Consequences of Global Environmental Change*. Willey, pp. 660–666.
- Výborný, F., 2012. Bezdrátová senzorová síť z komponent Arduino.
- Vysoudil, M., 2013. Meteoroloie a klimatologie. Univerzita Palackého v Olomouci, Olomouc.
- Vysoudil, M., 2007. Možnosti sběru dat pro studium topoklimatu. *Misc. Geogr.* 13 167–174.
- Wang, M., Wang, Y., Li, Q., 2013. Deployment of Wireless Sensor Networks for Air Quality Monitoring, in: Liu, X., Zhang, K., Li, M. (Eds.), *Advances in Manufacturing Science and Engineering, Pts 1-4*. Trans Tech Publications Ltd, Stafa-Zurich, pp. 1851–1855.
- Wang, Q., Balasingham, I., 2010. Wireless Sensor Networks - An Introduction, in: Tan, Y.K. (Ed.), *Wireless Sensor Networks: Application-Centric Design*. InTech.
- Winkelman, R., 2007. Chapter 5: Topology [WWW Document]. URL <http://fcit.usf.edu/network/chap5/chap5.htm> (accessed 7.2.16).
- Wong, K. j, Chua, C.C., Li, Q., 2009. Environmental Monitoring Using Wireless Vehicular Sensor Networks, in: *5th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2009. WiCom '09*. Presented at the 5th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2009. WiCom '09, pp. 1–4. doi:10.1109/WICOM.2009.5303846
- Wu, Z., Jedari, E., Muscedere, R., Rashidzadeh, R., 2016. Improved particle filter based on WLAN RSSI fingerprinting and smart sensors for indoor localization. *Comput. Commun.* 83, 64–71. doi:10.1016/j.comcom.2016.03.001
- Yaacoub, E., Kadri, A., Mushtaha, M., Abu-Dayya, A., 2013. Air quality monitoring and analysis in Qatar using a wireless sensor network deployment, in: *Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), 2013 9th International*. Presented at the Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), 2013 9th International, pp. 596–601. doi:10.1109/IWCMC.2013.6583625
- Yaswanth, D., Syed Umar, 2013. A Study on Pollution Monitoring system in Wireless Sensor Networks 3.
- Yick, J., Mukherjee, B., Ghosal, D., 2008. Wireless sensor network survey. *Comput. Netw.* 52, 2292–2330. doi:10.1016/j.comnet.2008.04.002
- Yu, L., Wang, N., Meng, X., 2005. Real-time forest fire detection with wireless sensor networks, in: *Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2005. Proceedings. 2005 International Conference on*. IEEE, pp. 1214–1217.
- Záboj, O., 2009. Kalibrace teplotních snímačů. Brno.
- Záděra, Z., 2011. Návrh senzorové sítě pro monitoring osob a věcí v budově.
- Zhang, H., Liu, C., 2012. A review on node deployment of wireless sensor network. *Intenational J. Comput. Sci.* 6, 378–383.
- Zhao, J., Wen, Y., Shang, R., Wang, G., 2004. Optimizing Sensor Node Distribution with Genetic Algorithm in Wireless Sensor Network, in: Yin, F.-L., Wang, J., Guo, C. (Eds.), *Advances in Neural Networks - ISNN 2004, Lecture Notes in Computer Science*. Springer Berlin Heidelberg, pp. 242–247.
- Zou, Y., Chakrabarty, K., 2003. Sensor deployment and target localization based on virtual forces, in: *IEEE INFOCOM. Institute of Electrical Engineers Inc (IEEE)*, pp. 1293–1303.

## SUMMARY

Wireless sensor networks are new fast evolving technology developed during the cold war by the American Army (Chong and Kumar, 2003). This technology has been widely used for monitoring of the environment. Wireless sensor networks are closely connected to the phenomenon of these days - „Smart Cities“, cities with processes driven by sensors. The goal of the concept is to decrease the energy consumption and enable the adaptation of the city to the inhabitants needs. „Smart Cities“ are being developed despite the fact that the distribution of nodes in the urban environment is problematic due to many factors influencing their distribution. The biggest advantage of wireless sensor network is the real time monitoring and the possibility of monitoring in hardly accessible areas. The mentioned facts and authors previous experience with monitoring lead to the idea of using this technology to a city climate monitoring. City climate is an important component of city environment. It has a huge influence on the health and composure of the inhabitants, fauna, flora and even on the immaterial objects within the city. The climatic research is focused on two major phenomenon – Urban Heat Island (UHI) and Urban CO<sub>2</sub> Dome (Hejlová and Voženílek, 2015).

The aim of this dissertation thesis was to create and verify wireless sensor network in Olomouc. The thesis solves the whole process of wireless sensor creation from selection of wireless sensor network components to processing and visualization of the data. The thesis was divided to four aims. The whole process from selection to evaluation of data obtained by the wireless nodes is described in four partial aims of this dissertation thesis.

Aim 1 – Selection of wireless sensor network components

Aim 2 – Distribution of wireless nodes

Aim 3 – Wireless sensor network configuration

Aim 3a - Tests of Olomouc wireless sensor network

Aim 3b - Data pre-processing and saving

Aim 4 – Data processing and visualization

First of all, wireless sensor network producers were searched. The attention was aimed at technical parameters of commercially offered products. Criteria for evaluation of commercially offered components were suggested. The optimal values of criteria for Olomouc wireless sensor network were defined. The multicriteria analysis with the utility function determined the utility of commercially offered product for Olomouc was computed. The highest utility was calculated for Waspote Plug and Sense nodes (models Smart Environment, Smart Agriculture and Smart Agriculture PRO), produced by Spanish Company Libelium. These nodes monitored temperature, relative humidity, precipitation, solar radiation, wind speed and direction, CO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, VOC and selected air pollutants with Air Pollutants 2 sensor. IEEE 802.15.4 was the used communication

protocol. These nodes were encapsulated so that they were directly used for outdoor monitoring.

Distribution of nodes in outdoor environment is influenced by many factors including technical parameters of nodes and terrain proportions. Distribution of nodes taking into account technical parameters of nodes and terrain proportion was done on the basis of Unit Disk Graph and Yao Graph. Very limiting factor for distribution of nodes outdoor is criminality because these devices are very often stolen. Orthophoto was selected as the most suitable basemap displaying thematic content during the eye-tracking experiment.

The communication protocols were developed and loaded to the nodes. It was decided that the nodes will be situated in two clusters in Olomouc. The first cluster was situated in the uptown and the second in the center of the city. Seven positions for nodes were situated in the first cluster, one position for node was situated in the second cluster. The nodes were not situated in all positions all the time, this was caused by the small number of nodes owned by the Department of Geoinformatics. Every cluster had one gateway for data gathering. The most important technical parameters of the wireless sensor network were tested. These parameters included determination of the least loaded communication channel in the both clusters, investigation of battery consumption under different scenarios, RSSI tests and data delivery ratio evaluation. The selection of the communication least loaded channel increased data delivery ratio. The results showed that the highest influence on the distribution of nodes had obstacles situated in the communication path. Distance between communicating nodes had the second highest influence on data success delivery and battery consumption. The reliable communication distance for Olomouc wireless sensor network was set to 100 meters. Other parameters such as recording interval, number of sensors were considered during the technical parameters tests. These tests should be done at the beginning of wireless sensor network configuration because the positions with high reliability of data delivery were identified.

Data from the gateway in the both clusters were sent to the external database. This database was synchronized with the primary databases in the gateways. Data were filtered from rough and systematic errors.

The thematic data obtained by the wireless sensor network were evaluated and visualized. First of all, determination of measured data precision was done. The temperature and relative humidity data were compared with data from the Czech Hydrometeorological Institute. The precision of temperature and humidity sensors connected to Smart Environment model was low even after the calibration process. Relative humidity sensors showed values over 100 % so that these values were filtered. Correlation coefficients for temperature sensors were high for Smart Agriculture models. Secondly, temperature and humidity values from both clusters were compared. Higher daily and monthly temperatures occurred in the first cluster but the differences in the temperature values were not as high as expected. Relative humidity values were higher in 98 % in the first cluster. Data from chemical sensors were only relative. Sensor resistance was declared,

the sensor resistance showed the real changes in gases concentration. The trends in their courses were investigated and sources of them were investigated. It was confirmed that the highest amount of pollutants is oriented on the directions where the sources of them are situated.

Wireless sensor network is very fast evolving and dynamic technology. The hardware and software parts has to be aimed at the concrete application and the life of these components is not so long so that these parts have to be altered. The huge advantage is online monitoring and the possibility of easy relocation of the sensors after technical parameters investigation.

## **PŘÍLOHY**

# SEZNAM PŘÍLOH

## Vázané přílohy

- Příloha 1. Skupiny kritérií výběru sensorových desek/senzorů seřazené dle jejich důležitosti
- Příloha 2. Skupiny kritérií výběru brány seřazené dle jejich důležitosti
- Příloha 3. Parametry kritérií pro výběr sensorových desek/senzorů vhodné pro E - BOSS
- Příloha 4. Parametry kritérií pro výběr brány vhodné pro E - BOSS
- Příloha 5. Specifikace použitých senzorů, údaje jsou převzaty z technické dokumentace uzlů

## Volné přílohy

- Příloha 6. Algoritmus rovnoměrného rozmístění uzlů v oblasti zájmu
- Příloha 7. Algoritmus pro rozmístění uzlů v terénu na podkladě Jednotkového grafu
- Příloha 8. Algoritmus pro umístění uzlů na podkladě Yao grafu
- Příloha 9. DVD

## Struktura DVD

- 1. databazove\_kody
  - filtr\_chyb.doc
  - vytvoreni\_tabulka.doc
- 2. eye-tracking
  - interaktivni\_ukoly (složka obsahující podklady pro interaktivní úkoly)
  - staticke\_ukoly (složka obsahující složky s podklady pro statické úkoly)
  - eye\_tracking\_dotaznik.pdf
  - udaje\_o\_respondentech.jpg
  - doplnujici\_dotaznik.jpg
- 3. komunikacni\_protokoly
  - kalibrace.pde
  - kalibrace\_CO2.pde
  - rssi\_brama.pde
  - rssi\_teploata\_brama.pde
  - SA\_posilani\_ramcu.pde
  - SA\_PRO\_posilani\_ramcu.pde
  - SA\_PRO\_uzel\_brama\_bez\_ramcu.pde
  - SA\_uzel\_brama\_bez\_ramcu.pde
  - SE\_posilani\_ramcu.pde
  - SE\_uzel\_brama\_bez\_ramcu.pde
  - stav\_baterie.pde
- 4. provoz\_uzlu
  - funkcnost\_uzlu\_druhy\_klastr.pdf
  - funkcnost\_uzlu\_prvni\_klastr.pdf

## 5. senzorove\_site

vyuziti\_senzorovych\_siti.pdf

multikriterialni\_analyza.xls

## 6. tematicka\_data

data\_chmu (složka s daty od ČHMÚ)

erko\_vybrane\_ukoly (data pro úkoly realizované v tematické části práce)

klastr1\_2015 (složka s primárními daty a upravenými daty v .xls)

klastr1\_2016 (složka s upravenými ročními daty (.csv), extrémní hodnoty (.xls), porovnání teplot (.xlsx))

klastr1\_2017 (složka s upravenými daty (.csv))

klastr2\_2014 (složka s primárními daty (.csv) )

klastr2\_2016 (složka s upravenými ročními daty (.csv), porovnání teplot (.xlsx))

klastr2\_2017 (složka s upravenými daty (.csv))

## 7. text\_prace

disertacni\_prace.pdf

**Příloha 1.** Skupiny kritérií výběru sensorových desek/senzorů seřazené dle jejich důležitosti (barva odlišuje kritéria pro uzly (modrá), sensorové desky/senzory (oranžová), brány (zelená))

Číslo Skupiny	Skupiny kritérií pro výběr sensorových desek/senzorů	Kritéria výběru sensorových desek/senzorů	Důležitost celkem	Rostoucí/ klesající / booleovská/ typová preference
<b>1</b>	<b>Nabízené měřené prvky</b>			
		prvky měřené dostupnými senzory	1	max
		kalibrace	2	ano
<b>2</b>	<b>Odolnost vůči vnějším vlivům</b>			
		provozní teplota	3	max
		ochranné prvky	3	ano
<b>3</b>	<b>Možnosti rozšíření</b>			
		sensorové napětí	5	min
		kompatibilita s uzly	4	ano
<b>4</b>	<b>Fyzické parametry</b>			
		rozměry	6	min
		váha	6	min
<b>5</b>	<b>Cena</b>			
		cenové náklady [€]	5	min

**Příloha 2.** Skupiny kritérií výběru brány seřazené dle jejich důležitosti (barva odlišuje kritéria pro uzly (modrá), sensorové desky/senzory (oranžová), brány (zelená))

Číslo skupiny	Skupiny kritérií pro výběr brány	Kritéria výběru brány	Důležitost celkem	Rostoucí/ klesající / booleovská/ typová preference
<b>1</b>	<b>Komunikační modely</b>			
		možnosti komunikace	1	max
		dosah komunikace	1	max
		topologie	2	typ
<b>2</b>	<b>Zdroje energie</b>			
		možnosti napájení	1	max
		výdrž baterie	2	max
		spotřeba energie	2	min
<b>3</b>	<b>Odolnost vůči vnějším vlivům</b>			
		provozní teplota	5	max
		ochranné prvky	5	ano
<b>4</b>	<b>Technické aspekty</b>			
		úroveň znalostí programování	4	min
		software	6	typ
		kapacita paměti	3	max
		bezpečnost	3	max
<b>5</b>	<b>Možnosti rozšíření</b>			
		flexibilita	5	max
		kompatibilní uzly	2	ano
		GPS	7	ano
<b>6</b>	<b>Fyzické parametry</b>			
		rozměry	8	min



**Příloha 2.** Skupiny kritérií výběru brány seřazené dle jejich důležitosti (barva odlišuje kritéria pro uzly (modrá), sensorové desky/senzory (oranžová), brány (zelená))

Číslo skupiny	Skupiny kritérií pro výběr brány	Kritéria výběru brány	Důležitost celkem	Rostoucí/ klesající / booleovská/ typová preference
		váha	8	min
7	Cena			
		cenové náklady [€]	6	min

**Příloha 3.** Parametry kritérií pro výběr sensorových desek/senzorů vhodné pro E - BOSS

Číslo skupiny	Skupiny kritérií pro sensorových desek/senzorů	Kritéria výběru sensorových desek/senzorů	Požadavky na E - BOSS
1	Nabízené měřené prvky		
		prvky měřené dostupnými senzory	CO <sub>2</sub> , NO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> , CO, CH <sub>4</sub> , teplota, relativní vlhkost, sluneční radiace, směru a rychlost větru
		kalibrace	ano
2	Odolnost vůči vnějším vlivům		
		provozní teplota [°C]	-30 až +40
		ochranné prvky	ano
3	Možnosti rozšíření		
		sensorové napětí [V]	3 až 5
		kompatibilita s uzly	maximální
4	Fyzické parametry		
		rozměry [mm]	20 x 20 x 20
		váha [g]	10
5	Cena		
		cenové náklady [€]	záleží na typu senzoru, průměrně 80

**Příloha 4.** Parametry kritérií pro výběr brány vhodné pro E - BOSS

Číslo skupiny	Skupiny kritérií pro výběr brány	Kritéria výběru brány	Požadavky na E - BOSS
1	Komunikační modely		
		možnosti komunikace	Zigbee, IEEE 802.15.4, GPRS/GSM, ethernet
		dosah komunikace [m]	
		topologie	stromová, <i>peer to peer</i> , hvězdicová
2	Zdroje energie		
		možnosti napájení	POE, baterie
		výdrž baterie [rok]	1
		spotřeba energie	minimální
3	Odolnost vůči vnějším vlivům		
		provozní teplota [°C]	-30 až +40
		ochranné prvky	ano
4	Technické aspekty		
		úroveň znalostí programování	nízká
		Software	open source
		kapacita paměti [GB]	4
		bezpečnost	heslo, případně šifrování
5	Možnosti rozšíření		
		flexibilita	ano
		kompatibilní uzly	ano
5	Možnosti rozšíření		
		GPS	ne
6	Fyzické parametry		
		rozměry [mm]	200 x 200 x 200
		váha [g]	1500
7	Cena		
		cenové náklady [€]	400

**Příloha 5.** Specifikace použitých senzorů, údaje jsou převzaty z technické dokumentace uzlů

Specifikace senzoru MCP9700A

Rozhraní měření senzoru MCP9700A	- 40 °C až +125 °C
Výstupní napětí při 0 °C	500 mV
Senzitivita	10 mV/°C
Přenos měření při 0 °C až ~ 70 °C	2 °C
Přenos měření při -40 °C až ~ 125 °C	2 °C
Napětí	2,3 ~ 5,5 V
Čas odpovědi	1,65 sekundy
Průměrná spotřeba	6 μA
Maximální spotřeba	12 μA

Specifikace senzoru 808H5V5

Rozhraní měření	0 % až 100 %
Výstupní napětí při 25°C	0,8 až 3,9 V
Senzitivita	10 mV/°C
Přenos měření při 0 °C až ~ 70 °C	≤ ± 4 %
Průměrný elektrický proud	0,38 mA
Čas odpovědi	< 15 sekund
Průměrná spotřeba	0,38 μA
Maximální spotřeba	0,5 μA

**Příloha 5.** Specifikace použitých senzorů, údaje jsou převzaty z technické dokumentace uzlů

## Specifikace senzoru SHT75

Teplota vzduchu		Vlhkost vzduchu	
Rozhraní měření	-40 °C až 123,8 °C	Rozhraní měření	0 % až 100 %
Přenos měření při 0 °C až +70 °C	0,04 °C	Přesnost měření	±1,8 %
Opakovatelnost	±0,1 °C	Opakovatelnost	±0,1 %
Čas odpovědi	5 až 30 sekund	Čas odpovědi	8 sekund
Ukládací teplota	10 °C až 50 °C	Ukládací vlhkost vzduchu	0 % až 100 %

## Specifikace senzoru TGS4161

Rozhraní měření	350 ppm až 10 000 ppm
Napětí při koncentraci 350 ppm	220 mV až 490 mV
Senzitivita	44 mV až 72 mV
Napětí baterie	5V ±0.2V DC
Operační teplota	-10 ~ +50°C
Čas odpovědi	1,5 minuty
Průměrná spotřeba	50 mA

## Specifikace senzoru MiCS-2710

Rozhraní měření	0,05 ppm až 5 ppm
Odpor vzduchu	0,8 kΩ ~ 8kΩ
Senzitivita	6 ~ 100
Napětí baterie	1,7 V ± 2,5V DC
Operační teplota	-30 ~ +85°C
Čas odpovědi	30 sekund
Průměrná spotřeba	26 mA

**Příloha 5.** Specifikace použitých senzorů, údaje jsou převzaty z technické dokumentace uzlů

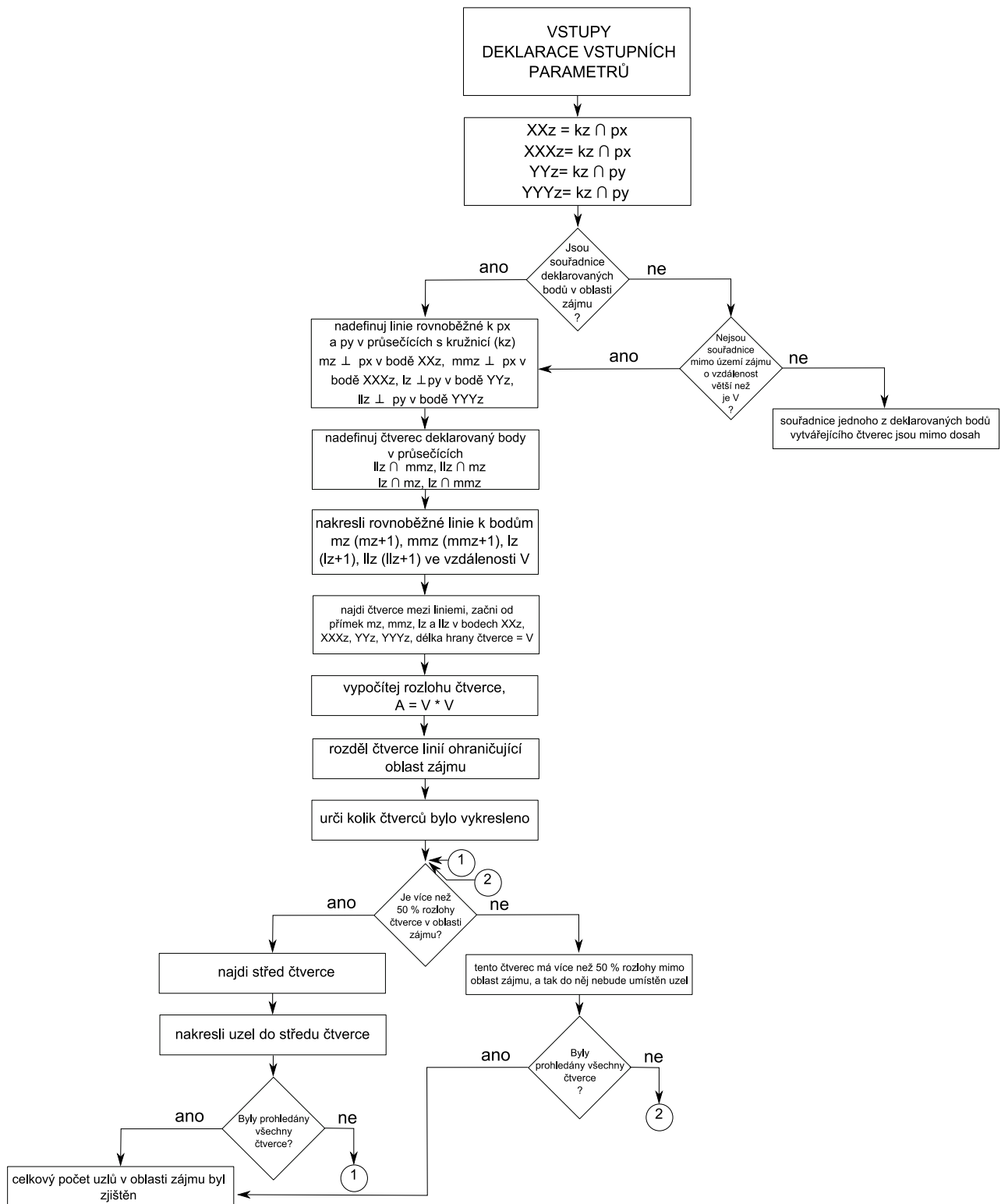
Specifikace senzoru MiCS-5521

Rozhraní měření	30 ppm ~ 400 ppm
Odpor vzduchu	100 k $\Omega$ ~ 1000 k $\Omega$
Senzitivita	1,8 ~ 6
Napětí baterie	2,1 V $\pm$ 5V DC
Operační teplota	-30 ~ +85°C
Čas odpovědi	30 sekund
Průměrná spotřeba	32 mA

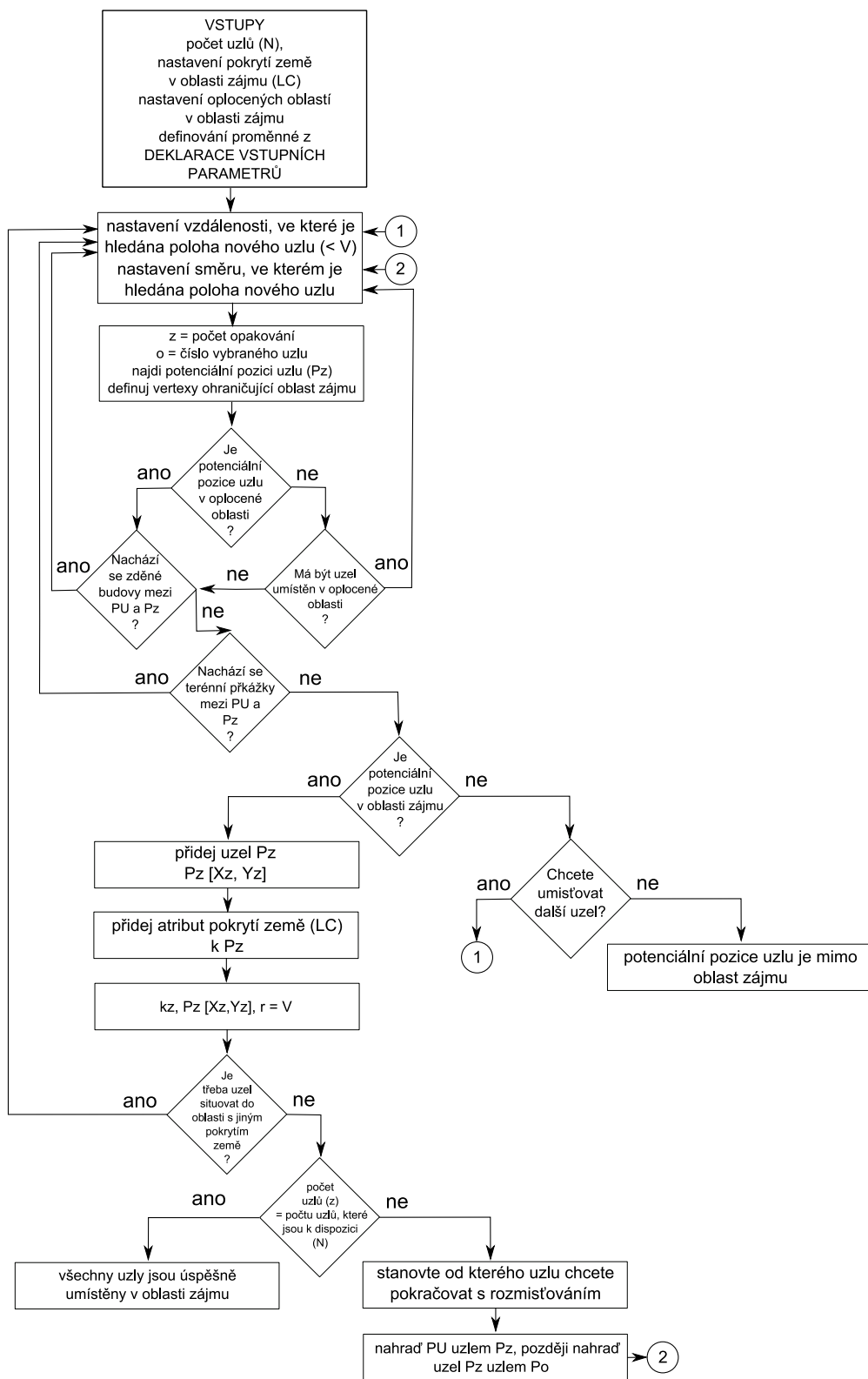
Specifikace senzoru TGS2600

Rozhraní měření	3 ppm ~ 100 ppm
Odpor vzduchu	10 k $\Omega$ ~ 90 k $\Omega$
Senzitivita	0,3 ~ 0,6
Napětí baterie	5 V $\pm$ 0,2V DC
Operační teplota	10 ~ +40 °C
Čas odpovědi	30 sekund
Průměrná spotřeba	46 mA

## Příloha 6. Algoritmus rovnoměrného rozmístění uzlů v oblasti zájmu



**Příloha 7.** Algoritmus pro rozmístění uzlů v terénu na podkladě Jednotkového grafu









**KATEDRA GEOINFORMATIKY**

Univerzita Palackého v Olomouci | Přírodovědecká fakulta

**BEZDRÁTOVÁ SENZOROVÁ SÍŤ PRO  
MONITORING OVZDUŠÍ VE STŘEDU MĚSTA  
OLOMOUCE (E-BOSS)**

**AUTOREFERÁT DISERTAČNÍ PRÁCE**

Studijní program: P1314 Geografie

Obor studia: 1302V011 Geoinformatika a kartografie

Školitel: doc. RNDr. Vilém Pechanec, Ph.D.

**Mgr. Vendula HEJLOVÁ**

**WIRELESS SENSOR NETWORK FOR AIR POLLUTION  
MONITORING IN THE CENTER OF OLOMOUC CITY**

**Ph.D. THESIS SUMMARY**

Study Programme: Geography

Specialization: Geoinformatics and Cartography

Supervisor: doc. RNDr. Vilém Pechanec, Ph.D.

**Department of Geoinformatics**

Faculty of Science, Palacký University Olomouc

**Olomouc 2017**

*Disertační práce byla vypracována v prezenční formě doktorského studia na Katedře geoinformatiky Přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého v Olomouci.*

*Dissertation thesis was compiled within Ph.D. study at the Department of Geoinformatics, Faculty of Science, Palacký University Olomouc.*

**Předkladatel / Submitter:**

Mgr. Vendula Hejlová

**Školitel / Supervisor:**

doc. RNDr. Vilém Pechanec, Ph.D.

Katedra geoinformatiky

Přírodovědecká fakulta Univerzity Palackého v Olomouci

17. listopadu 50

771 46 Olomouc

**Oponenti / Opponents:**

doc. Ing. Petr Rapant, CSc. (VŠB – Technická Univerzita Ostrava)

doc. RNDr. Tomáš Řezník, Ph.D. (Masarykova univerzita, Brno)

doc. Ing. Petr Jančík, Ph.D. (VŠB – Technická Univerzita Ostrava)

Autoreferát byl zaslán dne / Summary was posted on: \_\_\_\_\_

Obhajoba disertační práce se koná dne \_\_\_\_\_ před komisí pro obhajoby disertačních prací doktorského studia v oboru P1314 Geografie, studijním oboru 1302V011 Geoinformatika a kartografie, v prostorách Katedry geoinformatiky Přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého v Olomouci, 17. listopadu 50, 771 46 Olomouc.

The defence of the dissertation thesis will be held on \_\_\_\_\_ at the commission for the defence of dissertation thesis of Ph.D. degree in study programme P1314 Geography, specialization Geoinformatics and cartography, in the premises of the Department of Geoinformatics, Faculty of Science, Palacký University Olomouc, 17. listopadu 50, 771 46 Olomouc.

*S disertační prací je možno se seznámit na studijním oddělení Přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého v Olomouci, 17. listopadu 12, 77 46 Olomouc.*

*The dissertation thesis is available at the Study Department, Faculty of Science, Palacký University in Olomouc, 17. listopadu 12, 771 46 Olomouc.*

© Vendula Hejlová, 2017

ISSN 1805-7500

ISBN 978-80-244-5162-6

## Obsah

1.	Abstrakt.....	4
2.	Cíle práce a postup řešení.....	5
3.	Výběr komponent bezdrátové senzorové sítě.....	9
4.	Rozmístění uzlů bezdrátové senzorové sítě.....	14
5.	Konfigurace bezdrátové senzorové sítě.....	23
6.	Zpracování tematických dat a jejich vizualizace.....	29
7.	Výsledky.....	34
8.	Diskuze.....	35
9.	Závěr.....	37
10.	Použité zdroje.....	39
	Odborný životopis autora.....	42
	Seznam vybraných publikací autora související s disertační prací.....	43
	Ostatní publikace autora.....	44

## Contents

	Curriculum vitae.....	42
	Author's selected publications related to the dissertation.....	43
	Another author's publications.....	44
	Annotation.....	45
	Summary.....	46

## Abstrakt

Cílem disertační práce je vybudovat a ověřit bezdrátovou sensorovou síť v městském prostředí. V disertační práci je popsán celý proces od rozhodnutí využití této technologie přes výběr komponent a konfiguraci až po závěrečné vyhodnocení naměřených dat.

První dílčí cíl je zaměřen na výběr komponent bezdrátové sensorové sítě. V rámci tohoto dílčího cíle je rozhodnuto, že bezdrátová sensorová síť bude sledovat klima města. Dalším krokem je provedení průzkum trhu a stanovení kritéria výběru komponent. Dále jsou nastaveny ideální hodnoty kritérií pro olomouckou bezdrátovou sensorovou síť. Na podkladě těchto údajů jsou pomocí multikritériální analýzy z nabízených možností vybrány komponenty pro olomouckou bezdrátovou sensorovou síť.

Obsahem druhého dílčího cíle je navrhnout rozmístění uzlů bezdrátové sensorové sítě v terénu. V rámci distribučních algoritmů pro bezdrátové sensorové síť je pouze zřídka řešen terén, a tak bylo přistoupeno k návrhu algoritmů, které při rozmísťování uzlů berou v potaz technické možnosti uzlů i terénní parametry. Propojení uzlů je založeno na teorii grafů.

Třetí dílčí cíl se soustředí na ověření konfigurace uzlů, do nichž jsou nahrány vytvořené komunikační protokoly. Uzly jsou rozmístěny do dvou klastrů do terénu. Jeden klaster se nachází na kraji města Olomouc a druhý v jeho centru. Technická data z bezdrátové sensorové sítě jsou zhodnocena. Tato technická data zahrnují identifikaci kanálu, který je nejméně zatížen komunikací, ověření výdrže baterie v rozdílných konfiguracích, sledování síly signálu a zhodnocení úspěšnosti přenesených paketů. Dále je konfigurováno úložiště dat ze senzorů v bráně a vytvořeno záložní, do nějž jsou filtrována data bez hrubých a systematických chyb.

Čtvrtý dílčí cíl se zaměřuje na meteorologické a chemické prvky získané bezdrátovou sensorovou sítí. Nejprve je provedeno porovnání naměřených meteorologických dat s daty referenčními. Po vyhodnocení přesnosti měření je pozornost zaměřena na teplotní a vlhkostní data získaná v obou klastrech. Dále je uveden návod pro práci s nenakalibrovanými chemickými čidly a ukázány denní, týdenní a měsíční trendy v jejich chodu. Závěrem jsou spojena meteorologická a chemická data a vyvozeny závěry o zdrojích znečištění ovzduší v Olomouci.

Klíčová slova:

Bezdrátová sensorová síť, parametry bezdrátové sensorové sítě, rozložení uzlů v terénu, senzory

## Cíle práce a postup řešení

Cílem disertační práce je navrhnout a vybudovat experimentální bezdrátovou senzorovou síť pro monitoring vybraných základních meteorologických prvků a znečišťovatelů ovzduší (E – BOSS) a ověřit ji nasazením ve městě Olomouc.

K monitoringu je v současné době využíváno velké množství přístrojů, které mohou pracovat v *offline* nebo *online* režimu (Murthy and Manoj, 2004). *Offline* způsob monitoringu je značně neefektivní a k získání reálných dat vyžaduje častou přítomnost pořizovatele u sledujících zařízení, a tak bylo rozhodnuto, že je třeba tuto práci více zefektivnit s využitím bezdrátových senzorových sítí. Bezdrátový monitoring byl prováděn v městském prostředí, kde se do popředí dostává sledování klimatu města (Hejlová a Voženílek, 2015). Monitoring základních meteorologických prvků současně s chemickými znečišťovateli byl posléze zvolen za vhodné zaměření bezdrátové senzorové sítě v Olomouci.

Disertační práce si klade za cíl ověřit tuto technologii v městském prostředí, kde se nachází velké množství rušivých elementů. Zároveň chce poukázat na to, že je nutné věnovat pozornost počáteční inicializaci uzlů i senzorů. Práce se zabývá celým procesem od výběru komponent bezdrátové senzorové sítě přes jejich konfiguraci až po vizualizaci naměřených dat. Z tohoto důvodu je nutné podotknout, že nelze očekávat, že bude získáno a zpracováno velké množství dat, protože za dobu trvání práce nebylo možné při důrazu na konfiguraci a rozložení uzlů v terénu možné získat ucelenou časovou řadu.

Práce je rozdělena na čtyři dílčí cíle (DC). Tyto dílčí cíle jsou rozebrány v následujícím textu.

**DC 1 – Výběr komponent bezdrátové senzorové sítě**

**DC 2 – Rozmístění uzlů bezdrátové senzorové sítě**

**DC 3 – Konfigurace bezdrátové senzorové sítě**

**DC 3a – Testování bezdrátové senzorové sítě v Olomouci**

**DC 3b – Uložení a předzpracování dat**

**DC 4 – Zpracování tematických a jejich vizualizace**

**Prvním dílčím cílem** je vybrat komponenty bezdrátové senzorové sítě. Nejprve je nutné navrhnout zaměření bezdrátové senzorové sítě v Olomouci. Dalším krokem je provedení průzkumu trhu s vyhodnocením dostupných komponent bezdrátových senzorových sítí. Po tomto kroku následuje stanovení kritérií ovlivňujících jejich výběr a definice parametrů vhodných pro olomouckou bezdrátovou senzorovou síť. Dále je provedena analýza stanovující pořadí

vhodnosti dostupných komponent. Výběr komponent hraje důležitou roli v celém procesu budování bezdrátové sensorové sítě, protože se jedná o zásadní rozhodnutí, na jehož základě budou shromážděna data o vybraných prvcích v olomouckém prostředí.

Výsledkem prvního dílčího cíle je zpracovaná multikriteriální analýza s agregovanou funkcí užítka, na jejichž základě jsou vybrány komponenty bezdrátové sensorové sítě nasazené pro monitoring v Olomouci.

**Druhý dílčí cíl** se zaměřuje na rozmístění uzlů bezdrátové sensorové sítě v terénu. Nejprve je proveden výběr lokalit, ve kterých budou komponenty bezdrátové sensorové sítě v Olomouci rozmístěny. Je stanoveno, že uzly budou pokryty dvě oblasti (klastry). Na základě všech faktorů ovlivňujících rozmístění uzlů v terénu jsou navrženy algoritmy určující polohu komponent bezdrátové sensorové sítě v terénu s ohledem na technické možnosti používaných uzlů i na terénní charakteristiky. Návrh rozmístění uzlů v terénu je třeba vizualizovat na vhodném mapovém podkladě, jehož výběr je jedním z úkolů tohoto dílčího cíle. Mapový podklad neslouží pouze k vizualizaci uzlů, ale může posloužit také k identifikaci překážek, které se mohou v navržených datových tocích mezi uzly objevit. Při hledání překážek v komunikaci mezi uzly je mapový podklad pouze prvním nástrojem, který poukáže na možné nesrovnalosti, které musí být vždy ověřeny v terénu.

Výsledkem druhého dílčího cíle jsou tři algoritmy rozmisťující uzly bezdrátové sensorové sítě v terénu. Pro vizualizaci uzlů bezdrátové sensorové je vybrán podklad, který vykazuje nejlepší výsledky respondentů sledovaných pomocí technologie eye-tracking. Kromě určení nejvhodnějšího podkladu pro zobrazení uzlů je vybrán i podklad, který přináší nejvíce informace o terénu a o překážkách v něm situovaných.

**Třetí dílčí cíl** je rozdělen na dva podcíle, z nichž se první soustředí na testování bezdrátové sensorové sítě v Olomouci (DC 3a), a druhý řeší uložení a předzpracování získaných dat (DC 3b). Nejprve je navrženo, jak budou uzly v terénu upevněny. Poté jsou navrženy komunikační protokoly pro přenos dat v rozdílných konfiguracích. Uzly jsou nasazeny do terénu. Technická data týkající se přenosu dat jsou zhodnocena. Sledované technické parametry uzlů zahrnují výběr vhodného kanálu pro přenos dat, výdrž baterie, zhodnocení síly signálu a výpočet spolehlivosti přenosu dat z jednotlivých uzlů v městském prostředí. Zhodnocení technických dat vede k návrhu parametrů, které optimalizují funkčnost bezdrátové sensorové sítě v Olomouci. Druhá část třetího dílčího cíle je zaměřena na tvorbu záložní databáze, synchronizované s databázemi ve sběrných bodech a očišťující data od hrubých a systematických chyb v měřeních.

V rámci tohoto dílčího cíle jsou vytvořeny protokoly pro komunikaci mezi senzory a bránou, mezi senzory vzájemně, pro zobrazení stavu baterie, pro sledování hodnot síly signálu a pro kalibraci čidel. Dále jsou vyhodnocena měření technických parametrů uzlů zapojených do bezdrátové sensorové sítě. Na

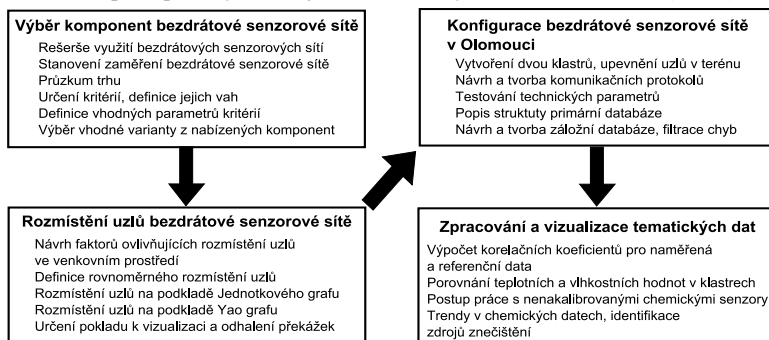
základě tohoto vyhodnocení jsou navrženy parametry optimalizující rozložení komponent v Olomouci. Dále je vytvořena záložní databáze, kde jsou ukládána data odfiltrovaná od hrubých a systematických chyb v měřeních.

**Dílčí cíl číslo čtyři** je zaměřen a zpracování a vizualizaci získaných dat. Tento dílčí cíl se soustředí na tematická data získaná bezdrátovou senzorovou sítí. Nejprve je řešena přesnost měření jednotlivých senzorů v porovnání s referenčními daty získanými od Českého hydrometeorologického ústavu. Následuje porovnání meteorologických dat získaných v obou klastrech se zaměřením se na teplotní hodnoty. Druhá část této kapitoly je zaměřena na práci s chemickými daty v obou klastrech.

Výsledkem třetího dílčího cíle jsou stanovené korelační koeficienty porovnávající data z nasazených uzlů společně s referenčními daty od ČHMÚ. Naměřené teplotní a vlhkostní hodnoty z obou klastrů jsou porovnány. Dále je sumarizován postup práce s nenakalibrovanými chemickými senzory. Denní, týdenní a měsíční trendy v chodu těchto znečišťovatelů jsou sledovány. Tyto trendy jsou dány do souvislosti s meteorologickými daty a je konstatováno jejich rozložení.

### Postup práce

V první fázi tvorby disertační práce byla provedena rešerše využití bezdrátové senzorové sítě v městském prostředí, která byla zaměřená na monitoring znečištění ovzduší ve městě. Kromě studia odborné literatury byly uskutečněny konzultace s odborníky zaměřené na jednotlivé úkoly řešené v rámci práce. Poté následoval postup, který odráží jednotlivé kroky v rámci dílčích cílů (obr. 1).



Obr. 1. Postup řešení disertační práce

### Přípravné práce

V rámci přípravných prací bylo nezbytné nastudovat literaturu soustředící se jednak na technické pozadí práce s bezdrátovou senzorovou sítí a také na jejich využití, především pak ke sledování klimatu města. Byly vytyčeny jednotlivé

dílčí cíle, které tvořily osnovu tvorby disertační práce, a které byly postupně konzultovány a řešeny.

### **DC1**

Výběr komponent bezdrátové senzorové sítě je klíčovou záležitostí pro bezdrátovou senzorovou síť uskutečňovaný v rámci prvního dílčího cíle. V odborných publikacích, uvedených v rešerši disertační práce, nebylo nikde specifikováno, jak byla bezdrátová senzorová síť vybrána. Výběr jedné z mnoha možností je v odborných studiích nejčastěji uskutečňován pomocí multikriteriální analýzy (Talašová, 2003), která své uplatnění našla i v environmentálních studiích (Kangas a Kangas (2005), Ananda a Herath (2009), Fowler a kol. (2015) a další).

Po návrhu využití bezdrátové senzorové sítě v Olomouci byl proveden průzkum trhu a následně byla stanovena kritéria ovlivňující výběr jednotlivých komponent. Každému kritériu byla přidělena jeho důležitost při výběru. Zároveň byly navrženy jeho ideální parametry pro olomouckou bezdrátovou senzorovou síť. Váhy kritérií byly stanoveny na podkladě následujících čtyř metod:

- metody párového porovnání,
- kompenzační metody,
- metody založené na pořadí,
- metody Fullerova trojúhelníku.

Po stanovení vah byla využita multikriteriální analýza s agregovanou funkcí užítku k určení pořadí dostupných technických komponent. Komponenty s nejvyšší hodnotou užítku byly vybrány pro instalaci v Olomouci.

### **DC2**

V rámci řešení druhého dílčího cíle byla pozornost zaměřena na distribuční algoritmy, které primárně nepracují s terénem, a tak byly odvozeny faktory, které návrh rozmístění uzlů bezdrátové senzorové sítě v terénu nejvíce ovlivňují, a které vycházely z definice dle Akyildiz a Vuran, (2010). Tyto faktory byly autorkou práce upraveny a přizpůsobeny k tomu, aby byly využitelné pro práci ve 3D prostředí (Hejlová, 2014). Pro propojení uzlů bezdrátové senzorové sítě byla vybrána grafová teorie, protože pomocí ní je možné uzly efektivně propojit (Stojmenović, 2005a). Poté mohly být vytvořeny tři distribuční algoritmy, z nichž dva pracují s technickými možnostmi uzlů i s terénními parametry. Podkladem pro algoritmy pracující s terénními parametry byly dva typy grafů – Jednotkový a Yao. Tyto algoritmy byly poté ověřeny při rozmístování uzlů v reálném terénu, které proběhlo ve dvou klastrech. První byl situován na okraj města a druhý do centra.

K získání odpovědí na otázky týkající se vhodného mapového podkladu a mapového podkladu, který poskytuje nejvíce informace o překážkách byl nachystán eye-tracking experiment. Tohoto experimentu se zúčastnilo 16 respondentů, kteří odpovídali na statické i dynamické otázky zobrazené na



čtyřech mapových podkladech (ZABAGED, OpenStreetMap, ZMČR10, ortofoto).

### DC3

Ve třetím dílčím cíli byly uzly bezdrátové senzorové sítě nasazeny do terénu ve dvou klastrech, ve kterých jim byly přiděleny pozice. Tomuto nasazení předcházelo testování vytvořených komunikačních protokolů. Ty byly nejprve testovány v kancelářských podmínkách, až uzly byly postupně přemístěny do venkovního prostředí. Kromě komunikačních protokolů byla pozornost zaměřena i na tvorbu protokolu pro efektivní nabíjení baterie v uzlech. Dle Emary a Ramakrishnan (2013) je nezbytné otestovat technické parametry nasazované bezdrátové senzorové sítě, které zahrnují sledování úspěšnosti přenosu dat a stavu baterie. Tyto parametry byly doplněny o hledání nejméně zatíženého komunikačního kanálu v 2,4 GHz pásmu a o sledování hodnoty síly signálu.

V neposlední řadě byl proveden návrh struktury záložní databáze společně s vytyčením hrubých a systematických chyb v měření, na jejichž podkladě byl vytvořen filtr pro jejich vyjmutí ze záložních tabulek, aby data mohla být přímo použita k výpočtům.

### DC4

Při řešení čtvrtého dílčího cíle byly vyhodnoceny a vizualizovány výsledky meteorologických a chemických měření v Olomouci. Pomocí stanovení korelačních koeficientů mezi naměřenými a referenčními hodnotami byly vyhodnoceny přesnosti měření jednotlivých uzlů a jim přidělených senzorů. Následně byly sledovány průměrné teplotní a vlhkostní hodnoty získané v jednotlivých klastrech. Poslední část řešení spočívá v nalezení možnosti práce s nenakalibrovanými chemickými senzory a vyhodnocení takto získaných dat.

## Výběr komponent bezdrátové senzorové sítě

Vhodně zvolená kritéria, na jejichž podkladě jsou hodnoceny možné varianty řešení problému, slouží jako podklad pro určení vhodné varianty pomocí metody vícekritériálního rozhodování, která je založena na vyhledání možných variant řešení problému ze zadané množiny možných řešení. Vícekritériální analýza umožňuje vybrat z množiny možných variant tu nejlepší s ohledem na definovaná kritéria (Talašová, 2003).

Při výběru hardwarových komponent hrají důležitou roli faktory jako velikost uzlu, náklady na jejich pořízení nebo spotřeba energie. Podle Karl a Willig (2007) by „v některých extrémních případech mohl být celý uzel menší než  $1 \text{ cm}^3$ , s váhou nižší než 100 g, levnější než 1 USD a spotřebou nižší než  $100 \mu\text{W}^{\text{s}}$ “. Senzorové desky/senzory musí splňovat požadavky na aplikaci bezdrátové senzorové sítě a měřit prvky a jevy, které vyhovují stanovené úloze. Na bránu

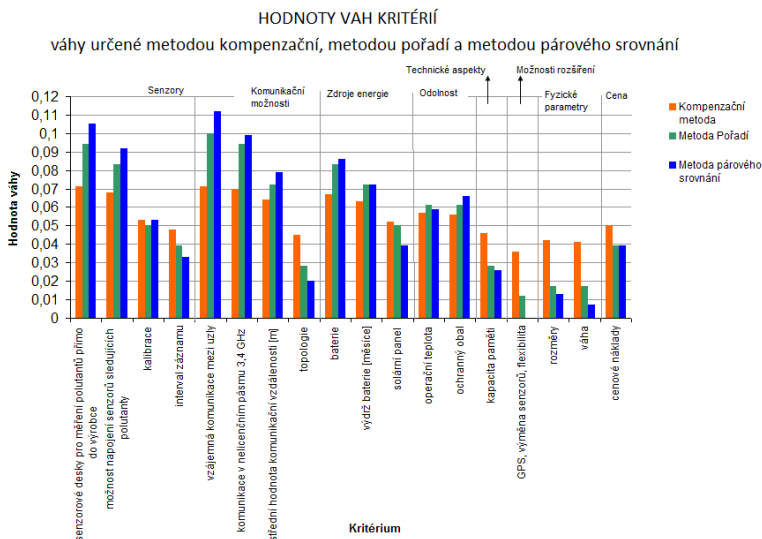
jsou kladeny především požadavky týkající se její flexibility, velikosti paměti, schopnosti komunikace na velkou vzdálenost a využití ethernetu umožňující dálkový přístup. Výpočet pomocí vícekritériální analýzy byl proveden pro uzly, ke kterým byly přiděleny i požadavky na senzorové desky/senzory. Uzly spolu se senzory tvoří nejvýznamnější technickou komponentu. Vybraná uzlová varianta bude doplněna bránou vyráběnou stejnou společností. Pokud bude výsledek analýzy nejednoznačný, bude přihlédnuto i k požadavkům kladeným na výrobce. Ke stanovení vah kritérií byly využity následující metody - metoda párového porovnání (metoda Fullerova trojúhelníku), metoda pořadí, kompenzační metoda a metoda párového srovnání. Ke stanovení pořadí variant bylo využíváno vah stanovených metodou pořadí, kompenzační metodou a metodou párového srovnání. Hodnocení použitých metod pro stanovení vah kritérií je rozebráno v Hejlova (2014). Po stanovení vah zmíněnými metodami byla vybrána analýza, která s ohledem na typ stanovených kritérií určí výsledek uspořádání vybraných variant. Vybraná metoda se řadí mezi metody založené na váženém průměru dílčích hodnocení a nazývá se metoda váženého součtu. Ke stanovení konečného pořadí byla využívána agregovaná funkce užítku, která se řadí mezi složitější algoritmy využívané k výpočtu (Talašová, 2003). Výsledky po použití agregované funkce užítku budou porovnány a na jejich podkladě bude vybrána varianta vhodná ke koupi.

Bylo vytvořeno osm skupin kritérií, které byly tematicky rozděleny. Důležitost kritérií byla stanovena na základě definování ideální varianty a následných konzultací, během kterých došlo ke shodě v jejich konečném pořadí. Všechna kritéria jsou strukturovaně uvedena v tabulce 1. Kromě kritérií jsou v tabulce uvedeny i požadavky na olomouckou bezdrátovou senzorovou síť.

Tab. 1. Kritéria výběru uzlů doplněná o požadavky na olomouckou bezdrátovou senzorovou síť

Císlo skupiny	Skupiny kritérií pro výběr uzlů	Kritéria výběru uzlů	Požadavky na E-BOSS
1	Nabízené senzorové desky/senzory		
		senzorové desky pro měření polutantů přímo od výrobce	ano
		možnost napojení senzorů sledujících polutanty	nutné pokud není od výrobce
		počet napojených senzorových desek/senzorů	minimálně 6
		frekvence vzájemn. dat [min]	15
		zabudované senzory	teploměr, akcelerometr
2	Komunikační modely		
		vzájemná komunikace mezi uzly	ano
		možnosti komunikace	protokol Zigbee (IEEE 802.15.4) komunikace v pásmu 3,4 GHz nebo 5 MHz
		dosah komunikace [m]	300
		topologie	stromová, peer to peer, hvězdicová
3	Zdroje energie		
		možnosti napájení	baterie
		výdrž baterie [rok]	rok v provozu bez dobíjení, možnost napojení solárního panele
		spotřeba energie	-
4	Odolnost vůči vnějším vlivům		
		provozní teplota [°C]	-30 až +40
		ochranné prvky	ano
5	Technické aspekty		
		úroveň znalosti programování software	nizká
		kapacita paměti [KB]	open source
		vstup/výstup	600
			musí zahrnovat USB
6	Možnost rozšíření		
		flexibilita	ano
		výměna senzorových desek/senzorů	ano
		GPS	ne, ale musí jít dokoupit
7	Fyzické parametry		
		rozměry [mm]	100 x 100 x 100
		váha [g]	100
8	Cena		
		cenové náklady na jeden uzel [€]	300

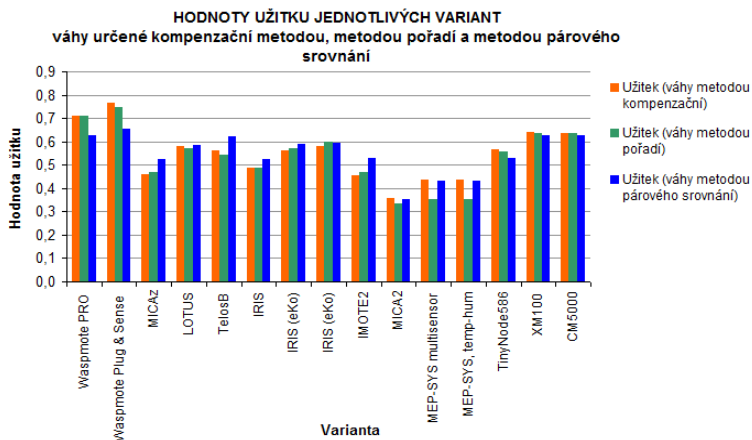
Při počítání vah pomocí metody párového srovnání byl rozptýl mezi nejvyšší a nejnižší hodnotou váhy výrazně vyšší než v případě metody kompenzační. Rozdíly mezi vahami, které mají nižší hodnotu kritérií, byly způsobeny větším rozpětím množiny hodnot, ze které byly váhy kompenzační metodou získávány. Nejvyšší hodnoty váhy byly vypočteny pro skupinu zabývající se možnostmi napojení senzorů a komunikačními možnostmi (obr. 2). Hodnoty vah určené pomocí metody Fullerova trojúhelníku byly stanoveny pouze pro skupiny kritérií, protože tato metoda srovnává vzájemně kritéria a vykazuje dobré výsledky pouze v případě, že počet kritérií nepřesahuje číslo devět. Váhově nejlépe ohodnocenou skupinou kritérií podle této metody se stala skupina, která se týká nabízených senzorových desek a senzorů, které lze napojit na uzlu.



Obr. 2. Hodnoty vah kritérií

Výpočet užítku jednotlivých variant pomocí metody váženého součtu poukazuje na to, že nevhodnější variantou uzlů, jsou uzly Waspnote Plug & Sense, které jsou nabízeny španělskou firmou Libelium (obr. 3). Uzly, které dosáhly druhého nejvyššího užítku, jsou také vyráběny touto společností, ale jejich hodnocení bylo sníženo o kritérium, které poukazuje na ochranný obal uzlu. Třetího nejvyššího hodnocení dosáhly uzly nabízené společností AdvanticSys. Důvodem vyšších hodnot užítku uzlů nabízených těmito společnostmi je, že obě společnosti nabízejí přímo senzorové desky/senzory, které měří polutanty. Toto kritérium bylo opatřeno nejvyšší vahou, až za ním bylo kritérium, které se zabývalo možnostmi napojení senzorových desek/senzorů měřících prvky znečišťující ovzduší produkovaných jinou společností. Z uzlů, na které nejsou

přímo od výrobce poskytovány sensorové desky/senzory, jsou vyzdvihnuty uzly eKo od společnosti Memsic. Tyto uzly je možné aplikovat přímo pro měření ve venkovních podmínkách, a tak v celkovém hodnocení bylo vyzdvignuto toto kritérium. Nejmenší užitek má uzel MICA2, který komunikuje v pásmu, které nevyhovuje podmínce, a protože kritérium na komunikaci v povoleném pásmu má vysokou váhu, je výsledný užitek nízký. Rozdíl mezi nejlepší a nejhorší variantou je nejvyšší s využitím vah určených pomocí metody pořadí, 0,37, je v případě hodnocení uzlů vhodných pro E-BOSS. Tento rozdíl je poměrně značný a poukazuje na to, že nejhorší varianta nesplňuje mnohé nároky kladené na tuto bezdrátovou sensorovou síť. Nejnižší rozdíl mezi variantou s nejvyšším a nejnižším užitekem je v případě využití metody párového srovnání pro stanovení vah (0,30). Nejlepší varianta vyhovuje v 76 % pomocí vah určených metodou kompenzační, v 75 % s využitím vah určených metodou pořadí. Nejnižší hodnota užitku nejlepší varianty je vypočítána s využitím metody párového srovnání, její hodnota je 65 %.



Obr. 3. Hodnoty užitku jednotlivých uzlů

### Uzly Waspnote Plug&and Sense

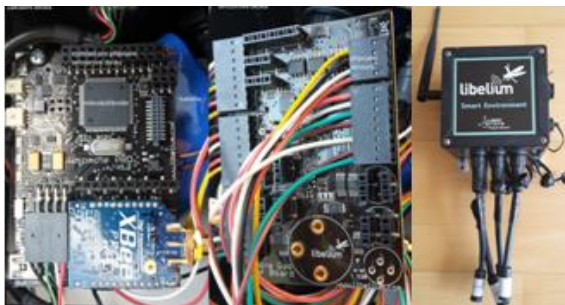
Uzly Waspnote Plug&Sense jsou vyráběny ve 12 modelech. Jednotlivé modely uzlů jsou vyčleňovány, protože každá sensorová deska napojená na základní desku má jiné možnosti připojení senzorů, a tak každý model je schopen snímat pouze vybrané prvky (Libelium, 2016a). Modely použité v této práci jsou:

- Smart Environment (sledování znečišťovatelů ovzduší),
- Smart Agriculture (precizní zemědělství),

- Smart Agriculture PRO (precizní zemědělství).

Všechny uzly Waspnote Plug&Sense mají základní i sensorovou desku uloženou ve voděodolném obalu (IP65). Základní deska obsahuje mikroprocesor, rozhraní pro připojení baterie, antény, senzorů, zabudované senzory a další vstupní rozhraní.

Uzly nasazené v olomoucké bezdrátové sensorové síti mají integrované komunikační rozhraní IEEE 802.15.4. K doplnění byl nainstalován i slot pro připojení SIM karty umožňující komunikaci skrz mobilní síť. Uzly jsou vybaveny lithiovou dobíjecí baterií s kapacitou 6600 mAh s napětím 3,3 V až 4,2 V. K propojení uzlů s počítačem je využíváno standardizovaného USB konektoru. Pro vyšší výdrž baterie jsou k uzlu připojitelné solární panely. K uzlům Waspnote Plug&Sense modelu Smart Environment jsou připojeny senzory monitorující teplotu vzduchu, vlhkost vzduchu, CO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, VOC a kombinovaný senzor pro měření vzdušných polutantů (C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>, CH<sub>3</sub>CH<sub>2</sub>OH, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub> a CO). K uzlům Smart Agriculture je připojen kombinovaný senzor pro měření teploty a vlhkosti vzduchu a malá meteorologická stanice, která umožňuje sledovat srážky, směr a rychlost větru. Uzly Smart Agriculture PRO mají také připojen kombinovaný senzor pro měření teploty a vlhkosti vzduchu, dále byl zakoupen senzor pro měření solární radiace. Obrázek 4 ukazuje základní a sensorovou desku modelů Smart Environment. Tyto desky jsou umístěny uvnitř obalu, ven z obalu jsou vedeny samotné senzory (Libelium, 2016a).



Obr. 4. Základní deska (vlevo), sensorová deska (uprostřed) a vnější vzhled uzlu ve voděodolném obalu s připojenými senzory (vpravo)

### Brána Meshlium

Meshlium pracuje jako linuxový směrovač, který shromažďuje data z uzlů nakonfigurovaných do bezdrátové sítě. Router může obsahovat šest různých rádiových rozhraní. Zakoupený router může vysílat signál přes Wi-Fi, IEEE 802.15.4 a mobilní síť. Všechny součásti brány jsou odolné vůči povětrnostním podmínkám a ukryté v aluminiovém obalu (IP65). Síťování může být kontrolováno dvěma přístupy, a to webovým rozhraním (Web Manager) nebo

pomocí SSH připojení přímo k bráně. Meshlium je možné programovat pomocí několika jazyků (Java, PHP, C, C++, Perl, Python), kromě toho brána pracuje s dvěma databázovými systémy (MySQL a PostgreSQL) (Libelium, 2016b).

## Rozmístění uzlů bezdrátové sensorové sítě

Akyildiz a Vuran, (2010) shrnují faktory, které rozmístování uzlů nejvíce ovlivňují. Při rozmístování komponent ve 3D prostředí je třeba brát ohled na větší množství faktorů, které návrh ovlivňují (Emary a Ramakrishnan, 2013). V práci jsou faktory děleny na předdistribuční kroky, technické a terénní.

### Předdistribuční kroky

Při návrhu rozmístění uzlů bezdrátové sensorové sítě musí být nejprve nadefinovány základní parametry. Předdistribuční kroky zahrnují:

- určení účelu aplikace bezdrátové sensorové sítě (Co chci monitorovat?),
- definici místa, kde budou uzly lokalizovány (Kde chci zahájit monitoring?),
- vyjádření počtu uzlů v regionu zájmu (Kolik uzlů chci mít v oblasti zájmu?),
- určení výšky senzorů nad zemským povrchem (Jaké jsou požadavky na sledování vybraných prvků?).

### Technické faktory

Mezi technické faktory ovlivňující rozmístění uzlů bezdrátové sensorové sítě v terénu jsou počítány ty, které souvisí s technickou vybaveností a možnostmi uzlů. Mezi technické faktory se řadí:

- výdrž baterie uzlu,
- komunikační vzdálenost,
- vyvážené množství sousedů,
- záložní cesty komunikace.

Nejvýznamnějším technickým parametrem uzlu je výdrž jeho baterie. Baterie není ve všech uzlech vyčerpávána rovnoměrně, protože některé uzly jsou více zatěžovány, a tak je jejich baterie rychleji vyčerpávána. Je nutné zajistit, aby baterie některých uzlů nebyly přenosem dat extrémně zatíženy a nedocházelo k jejich brzkému vybití a případným ztrátám dat, které proudí přes tyto uzly k bráně. Každý uzel by měl mít vyvážené množství svých sousedů tak, aby jeden uzel nebyl komunikací příliš zatížen a přes další uzly proudilo pouze omezené množství dat. Vyváženost komunikace souvisí s energetickou výdrží jednotlivých uzlů zapojených do sítě. Baterie v uzlu se dle Murthy a Manoj

(2004) vybíjí druhou mocninou vzdálenosti komunikace, a tak čím kratší je komunikační vzdálenost, tím baterie vydrží déle. Spolehlivá komunikační vzdálenost je taková, ve které nebude docházet k vysokým ztrátám dat zapříčiněným nedostatečnou silou signálu. Vzdálenost komunikace závisí na použitém protokolu, pomocí kterého jsou získaná data přenášena, na terénních charakteristikách, míře rušení signálu atd. (Stojkoska, 2014). Záložní cesty toku dat jsou nezbytné v případě výpadku měření náhodného uzlu, protože při neexistenci záložních cest nemohou být nasměrována přenášená data až do brány, ve které jsou ukládána, a tak může dojít ke ztrátám dat.

### **Terénní faktory**

Terénní faktory ovlivňující rozmístění uzlů bezdrátové sensorové sítě jsou tvořeny krajinným pokrytím, charakteristikou měřených prvků a vlastnickými poměry v území, kde jsou uzly umístěovány. Mezi terénní faktory se řadí:

- pokrytí země,
- překážky v komunikační cestě,
- charakteristika měřených prvků,
- bezpečnost místa,
- vlastnické poměry.

Pokrytí země poukazuje na to, že ve městě se nachází více typů povrchů, které ovlivňují hodnoty naměřených prvků. Každý typ povrchu má odlišné charakteristiky související s pohlcováním záření, odrazivostí a zahříváním. Terénní překážkou se rozumí objekt v cestě, který může narušovat komunikaci mezi dvěma uzly. Překážky mohou být uměle vytvořené nebo přírodní. Překážky různého tvaru, materiálu, barvy mohou odlišným způsobem ovlivňovat šíření signálu, záleží především na jejich struktuře a úhlu dopadu vlny šířící signál. Je třeba se vyvarovat překážkám mezi dvěma spolu komunikujícími uzly, aby nedocházelo ke ztrátě a modifikaci dat, která jsou jimi přenášena. Kvalita signálu je závislá na míře viditelnosti mezi uzly, které si mezi sebou posílají data. Každý meteorologický prvek má definovanou standardizovanou výšku a míru zastínění, ve které musí být měřen. Tento požadavek umožňuje, aby byla porovnatelná data naměřená v odlišných místech, protože s výškou nad terénem se mohou naměřené hodnoty stejných meteorologických prvků lišit. Základní meteorologické prvky jsou zaznamenávány v určených klimatologických časech. Kromě tří základních meteorologických termínů mohou být voleny i podrobnější časy, které se odvíjí od podrobnějších klimatologických termínů. Lze si stanovit i vlastní intervaly měření, které budou na všech uzlech shodné, aby mohlo docházet k porovnání dat. Je vhodné zvolit interval, který nebude příliš podrobný, aby nedocházelo k redundancím v získaných datech, ale ani příliš málo podrobný, aby mohly být zaznamenány změny vybraného prvku. Bezpečnost je požadavek, který je velmi obtížné splnit, ale je třeba, aby uzly byly v co největší míře chráněny proti odcizení, a tak musí být využity všechny dostupné možnosti, které přispějí ke zvýšené ochraně uzlů. Mezi tyto možnosti



se počítá: umístění uzlů vysoko nad zemským povrchem, na neviditelném špatně dostupném místě, v oploceném pozemku nebo pod dohledem kamery. Majetkové poměry hrají roli při umisťování uzlů bezdrátové sensorové sítě na soukromých pozemcích, kde musí majitel souhlasit s jejich umístěním na jeho pozemek.

### **Propojení uzlů ve venkovním prostředí**

Propojení uzlů je efektivně řešeno pomocí teorie grafů. Uzly grafu reprezentují bezdrátové uzly a hrany grafu jsou komunikační cesty mezi uzly (Sausen a kol., 2008). V bezdrátových sensorových sítích jsou nejčastěji používány tyto grafy:

- Jednotkový graf (Unit Disk Graph, UDG),
- Minimum Spanning Tree (MST), Localized Spanning Tree (LST),
- Gabrielův graf (GG),
- Yao graf (YG),
- Graf relativního sousedství (Relative Neighborhood Graph),
- Delaunay triangulace a Voronoiovy polygony (Stojmenović, 2005a).

Jednotkový graf a Yao graf jsou grafy, které mohou být dle autorky efektivně použity v distribučním procesu.

Konstrukce Jednotkového grafu je založena definicí výchozího bodu, kolem kterého je vytvořen buffer, který určuje maximální komunikační vzdálenost tohoto výchozího uzlu. Tato vzdálenost může představovat i průměrný počet sousedů definovaných pro komunikaci s jedním uzlem. Pokud je od počátečního uzlu hledána pozice pro nový uzel, se kterým ten počáteční bude komunikovat, hodnota poloměru bufferu odpovídá maximální spolehlivé komunikační vzdálenosti v regionu zájmu. V tomto bufferu se musí nalézat alespoň jeden další uzel, který bude komunikačním sousedem pro ten počáteční. Další buffer s poloměrem maximální spolehlivé komunikační vzdálenosti je vytvořen kolem druhého uzlu a v tomto bufferu se opět musí nacházet pozice jeho komunikačního souseda. Celý proces distribuce uzlů je opakován, dokud uzly nejsou vyčerpány. Konstrukce tohoto grafu je determinována známou pozicí počátečního uzlu a známou maximální spolehlivou komunikační vzdáleností (Stojmenović, 2005a).

Yao graf je orientovaný, a tak je náročnější na konstrukci. Vždy je prvně deklarován počáteční bod, od kterého začíná komunikace a kolem něj je definován buffer, který určuje maximální komunikační vzdálenost. V Yao grafu je oproti Jednotkovému grafu definováno i směrové dělení, které určuje počet segmentů kolem hlavního uzlu. V každém tomto uzlu v dosahu maximální spolehlivé komunikační vzdálenosti musí být umístěn alespoň jeden

komunikační soused počátečního uzlu. Rozrůstání sítě probíhá v jednotlivých směrech analogickým způsobem (Scheideler, 2007).

### **Vlastní algoritmy pro rozmístění uzlů bezdrátové sensorové sítě**

Navrženy jsou tři algoritmy rozmísťující uzly bezdrátové sensorové sítě v terénu. První slouží pro návrh rovnoměrného rozmístění uzlů v terénu. Další dva algoritmy jsou založeny na podmínkách konstrukce vybraných grafů a využívají navržených faktorů, teorie grafů a možností geografických informačních systémů.

Všechny algoritmy mají determinované základní vstupy, od nichž se odvíjí jejich konstrukce. Algoritmy vychází ze znalosti hranice regionu zájmu – definice jeho extrémních bodů (nejsevernějšího (Ya), nejvýchodnějšího (Xa), nejjihnějšího (Yb) a nejzápadnějšího (Xb)). Dále musí být známa poloha prvního uzlu (PU), který je uzlem sběrným, poslední známou je maximální spolehlivá komunikační vzdálenost (V). Pro lepší orientaci v prostoru regionu zájmu jsou známy i souřadnice os x a y, jejichž počátek je v místě, kde se nachází první (sběrný, počáteční) uzel (PU). Kolem tohoto uzlu je zkonstruována kružnice (kz) o poloměru maximální komunikační vzdálenosti (V).

Požadavky na **rovnoměrné rozmístění uzlů** v terénu spočívají v definování:

- maximální spolehlivé komunikační vzdálenosti (V),
- pozici počátečního sběrného uzlu (PU).

Rovnoměrné rozmístění uzlů v terénu je podmíněno tvorbou gridové matice. Délka hrany čtverce je shodná s maximální spolehlivou komunikační vzdáleností. Ve středu základního čtverce je umístěn počáteční uzel, od nějž se odvíjí distribuce dalších uzlů v terénu. Předpokládá se, že uzly se umístí vždy do středů čtverců. Komunikace probíhá tak, že všechny sousední uzly spolu mohou přes kratší hrany komunikovat. V tomto případě je navržená komunikační vzdálenost přesně rovna té maximální spolehlivé. Pouze čtverce, které mají více než 50 % ze své plochy v oblasti zájmu, jsou uvažovány pro umístění uzlu.



*Obr. 5. Rovnoměrné rozmístění uzlů v olomouckých klastrech, za počáteční uzly jsou považovány brány, spolehlivá komunikační vzdálenost byla nastavena na 100 metrů*

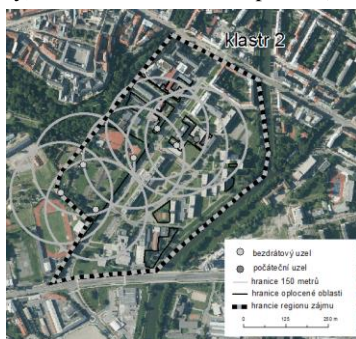
### **Rozmístění uzlů na podkladě Jednotkového grafu**

Při hledání pozic pro umístění uzlů v terénu je třeba znát následující parametry:

- maximální spolehlivou komunikační vzdálenost ( $V$ ),
  - pozici počátečního sběrného uzlu (PU),
  - počet uzlů v oblasti zájmu ( $N$ ),
  - pokrytí země v oblasti zájmu,
  - známé pozice významných překážek (zděných budov, terénních zlomů),
- 
- umístění uzlů v definované výšce nad zemským povrchem,
  - umístění uzlů do chráněných (oplocených) oblastí.

Pokud je definována pozice počátečního uzlu, je vykreslena hranice jeho spolehlivé komunikační vzdálenosti pomocí kruhového bufferu kolem něj. Alespoň jeden další uzel musí být situován v tomto bufferu. Tento uzel je komunikačním sousedem počátečního uzlu. Pozice tohoto uzlu by se měla nacházet v oblasti, která je chráněná, což je v tomto případě oblast oplocená. Další podmínkou je, že se nebudou nacházet žádné významné překážky jako zděné stavby a terénní zlomy mezi počátečním uzlem a potenciální polohou uzlu. V navrženém algoritmu si uživatel může vybrat v jakém směru ( $0^\circ - 360^\circ$ )

a vzdálenostním rozmezí od počátečního uzlu chce nově umístěovaný uzel lokalizovat. Pokud je potenciální poloha uzlu mimo oplocený pozemek, tak si zvolí, jestli uzel umístí zde, nebo jeho polohu bude hledat v „bezpečnější“ části regionu zájmu. Významné překážky v komunikační cestě nejsou vyžadovány, pokud se tam nachází, je uživatel odkázán na hledání potenciální polohy uzlu v jiné oblasti. Pokud je potenciální poloha uzlu vyhovující, je jí přidán nový atribut, který určuje pokrytí země místa nově umístěného uzlu. Dále je vyšetřováno, jestli se potenciální poloha uzlu nachází v zájmové oblasti. Pokud ano je tento uzel přidán a stává se komunikačním sousedem počátečního uzlu. Uživatel si poté zvolí, jestli chce situovat další uzel, který bude komunikovat s počátečním uzlem, nebo uzel, který bude komunikovat s nově vloženým uzlem. Poté se bude opakovat výše popsaný postup a bude hledána potenciální pozice dalšího uzlu v oblasti zájmu. Celý proces probíhá až do chvíle, než jsou vyčerpány všechny uzly, které má uživatel k dispozici (obr. 6).



*Obr. 6. Rozmístění uzlů ve druhém klastru na podkladě Jednotkového grafu a terénu*

### **Rozmístění uzlů na podkladě Yao grafu**

Parametry, které musí být známy pro distribuci uzlů na podkladě Yao grafu, jsou:

- maximální spolehlivá komunikační vzdálenost ( $V$ ),
  - pozice počátečního sběrného uzlu (PU),
  - počet sektorů ( $S$ ) (velikost úhlu),
  - počet uzlů v oblasti zájmu ( $N$ ),
  - známé pozice významných překážek (zděných budov, terénních zlomů),
- 
- umístění uzlů v definované výšce nad zemským povrchem,
  - umístění uzlů do chráněných (oplocených) oblastí.

Rozmístěování uzlů pomocí tohoto grafu začíná u počátečního uzlu (PU), ke kterému je vytvořen buffer o poloměru odpovídajícím maximální spolehlivé

komunikační vzdálenosti ( $V$ ). V Yao grafu je nutné rozdělit prostor kolem uzlu na sektory. Všechny sektory musí mít stejnou velikost úhlu. Předpokládá se, že umístování uzlů začíná od severu (azimut odpovídá  $0^\circ$ ) a pokračuje východním směrem (po směru hodinových ručiček). Uživatel si zvolí, v jaké vzdálenosti a v jakém úhlu by chtěl potenciální uzel umístit. Vždy je třeba dbát na to, aby tyto údaje byly menší než maximální spolehlivá komunikační vzdálenost a současně, aby odpovídaly úhlové údaje jednotlivým výšečím. Dále je sledováno, jestli se potenciální poloha uzlu nachází v oplotené oblasti. Pokud ano, algoritmus pokračuje dále. Pokud ne, tak se dotáže, jestli uživatel chce tuto polohu ponechat, nebo umístit uzel jinde. Dalším krokem je testování, jestli se mezi počátečním uzlem a potenciální polohou uzlu nachází překážky v podobě zděných budov nebo terénních zlomů. Pokud se nenachází, je v potenciální poloze přidán atribut o pokrytí země a uživatel je dotázán, jestli chce na pozemek s tímto využitím země uzel umístit. Nyní se zkoumá, jestli je potenciální poloha uzlu v oblasti zájmu. Pokud ano, je na toto místo umístěn uzel. Následuje testování, jestli počet umístěných uzlů dosáhl počtu uzlů, který byl k rozmístění v oblasti zájmu nadefinován, pokud tento počet nebyl dosažen, tak se určí, kolem kterého uzlu uživatel chce umístit další uzel a celý proces se opakuje.



Obr. 7. Rozmístění uzlů ve druhém klastru na podkladě Yao grafu a terénu

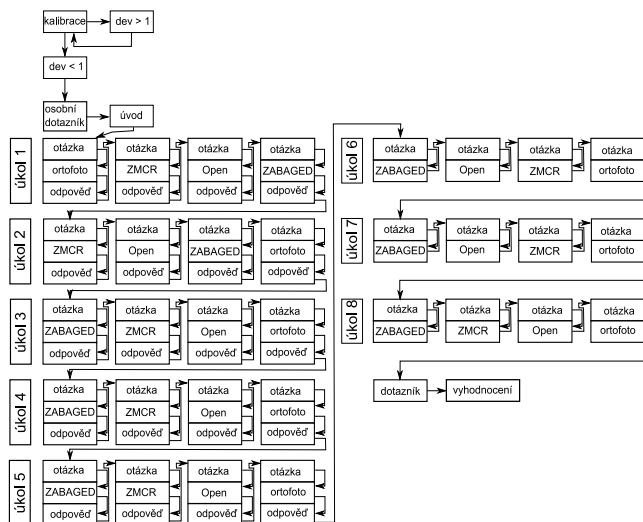
### Podklad vhodný pro vizualizaci uzlů v terénu

Vizualizace uzlů v terénu je doposud nepříliš probádanou problematikou, a tak byl proveden dotazníkový průzkum pomocí technologie eye-tracking. Tato technologie může být také využita pro srovnání účelu, porovnání dvou alternativních návrhů, k výběru vhodnější varianty k použití, definování výhod a nevýhod (Fuhrmann a kol., 2005). S poklesem ceny je tato technologie stále častěji využívána v kartografických studiích (Cöltekin a kol., 2014; Popelka a kol., 2013; Štěrbá a kol., 2014).

Na počátku experimentu byly stanoveny dvě hlavní otázky. Který mapový podklad je vhodný pro vizualizaci uzlů v terénu a který podklad přináší nejvíce informací o překážkách v komunikační cestě mezi uzly?

Nejprve byl navrhnut eye-tracking experiment, jehož schéma je na obrázku 8. Na počátku experimentu respondent sumarizoval základní osobní údaje a přečetl si text o bezdrátových senzorových sítích soustředění na faktory ovlivňující rozmístění uzlů v bezdrátové senzorové síti, aby poté mohl definovat komunikační cesty v bezdrátové senzorové síti s ohledem na prezentované faktory. Celý experiment se skládal z osmi úkolů, z nichž pět bylo statických a tři interaktivní. K šetření byly vybrány čtyři mapové podklady – Základní mapa České republiky (ZMCR), polohopisná složka ze Základní báze geografických dat (ZABAGED), ortofoto a OpenStreetMap (Open), které byly doplněny o tematickou složku. K experimentu bylo přizváno 16 respondentů, kteří měli geoinformatické nebo informatické vzdělání.

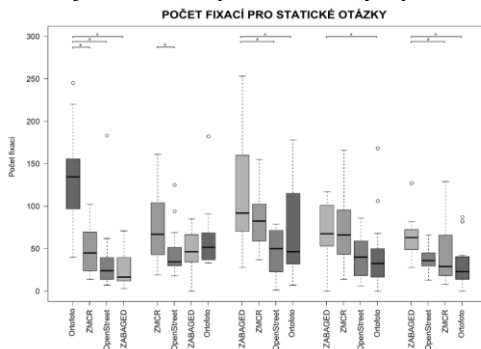
Nejprve bylo pohlíženo na správnost odpovědí respondentů při statických otázkách, na které respondent odpovídal 20krát. Vyhodnocení bylo rozděleno do tří kategorií – správně, špatně, nevím. Průměrná úspěšnost odpovědi jednoho respondenta byla 71,31 %. Nejvíce správných odpovědí bylo 18 a nejméně 9.



Obr. 8. Návrh eye-tracking experimentu

Bylo počítáno pět eye-tracking metrik (trvání úkolu, počet fixací, délka prohlížené trasy, frekvence fixací a průměrná délka fixace) pro data o pohybu

očí. Statisticky významné rozdíly v jednotlivých podkladech byly zjištěny při použití metrik – trvání úkolu, počtu fixací a délce prohlížené trasy. Ve všech případech byly počítány mediánové hodnoty. Analýza dat proběhla na podkladě Wilcoxonova testu. Statisticky významný rozdíl byl nalezen ve všech případech mezi prvně a posledně prezentovaným podkladem, z čehož je zřejmé, že respondenti strávili nejvíce času nad prvně zobrazeným podkladem.

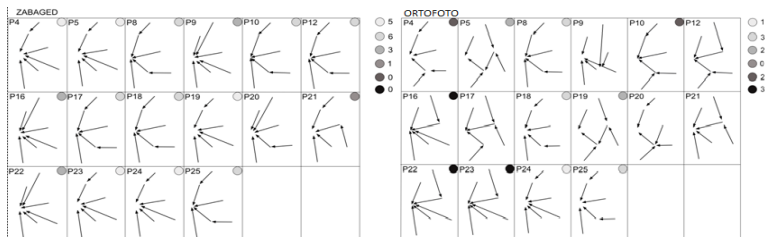


Obr. 9. Počet fixací pro statické otázky

Oblasti zájmu (AOI) byly vytvořeny kolem všech uzlů a brány. Tyto oblasti byly vyznačeny pomocí kruhu s centrem v bodě, kde se uzel nebo brána nacházely. Poloměr kruhu byl stanoven na 50 metrů, a tak všechny fixace v tomto kruhu byly započítány k vybranému uzlu. Bylo zjištěno, že celkem nejvíce fixací bylo vždy u prvně zobrazeného mapového podkladu. Fixace byly v největší míře zaznamenány v oblasti, kde se nacházela brána, poté byly zpravidla soustředěny kolem uzlu, který představoval správnou odpověď na otázku. Otázka čtyři měla dvě správné odpovědi, u jedné z nich byl zaznamenán nejvyšší počet fixací, u druhé až třetí nejvyšší, což poukazuje na to, že respondenti ihned vyhodnotili, že vliv na výdrž baterie v uzlu má vzdálenost, ale již nepočítali s tím, že i směrovací uzel se vybíjí více, než zbytek zakreslených uzlů.

Interaktivita úkolů spočívala v tom, že respondenti sami pomocí nástroje Google kreslení navrhovali komunikační cesty mezi uzly, které tvořily tematickou složku mapy. V posledním úkolu sami respondenti navrhovali rozložení uzlů i komunikační trasy. Nejvíce shodných návrhů se nachází na podkladě ZABAGED v prvně řešeném úkolu, kde bylo zadáno, že kolem vodního toku probíhá hydrologický monitoring. Nejvíce odlišných návrhů bylo zaznamenáno na ortofotu, které prezentuje komplexní pohled na území a návrhy nad ním jsou nejkompexnější (obr. 10). V zadání druhého interaktivního úkolu byla definována i maximální spolehlivá komunikační vzdálenost mezi uzly, a tak docházelo k nejvyššímu počtu fixací na měřítko. Nejméně rozličných návrhů

bylo v tomto případě zaznamenáno na podkladě Open, který je velmi podobný ZABAGEDu v tomto území. Nejvíce různých návrhů bylo nakresleno nad podklady ZMCR a ortofoto. V případě zobrazení terénních charakteristik je zřejmé, že větší roli než komunikační vzdálenost hrál terén společně se zděnými budovami ve druhém interaktivním úkolu, avšak pouze 56 % respondentů se při návrhu vyhnulo zřejmému terénnímu zlomu, ale maximální spolehlivá komunikační vzdálenost byla v 95 % dodržena.



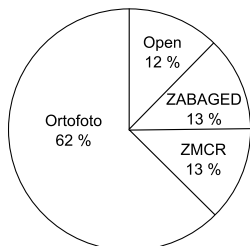
Obr. 10.. Návrh komunikačních tras v prvním interaktivním úkolu nad podkladem, kde bylo zaznamenáno nejvíce shodných tras a nad podkladem, kdy bylo nejméně shodných tras

V posledním úkolu respondenti umísťovali uzly. V podmínkách úkolu bylo zadána spolehlivá komunikační vzdálenost a bylo doporučeno umísťovat uzly do oplocených oblastí. Na úkor hledání oplocených oblastí snížena pozornost na překážky v komunikační cestě. Rozptýl umístění uzlů do oplocených oblastí napříč všemi respondenty a všemi úlohami se pohyboval od 59 % do 66 %. Dále byla sledována vzdálenost mezi uzly. Kromě jednoho respondenta se ostatní snažili brát v potaz i existenci více komunikačních toků. Nejčastěji tak vznikaly dvě větve stromu směřující k bráně.

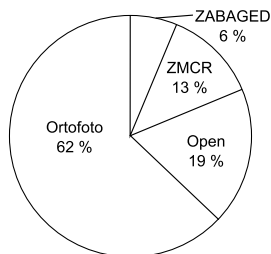
Po poslední otázce následoval dotazník, který se zaměřoval na zpětnou vazbu od respondentů. Poslední otázka byla zaměřena na to, jaký mapový podklad by respondenti volili, kdyby chtěli znát informace o překážkách, a který by zvolili jako podklad pro mapu zobrazující rozložení uzlů v terénu. Výsledky jsou ukázány na obrázku 11.



Který mapový podklad přináší nejčastěji informace o překážkách v komunikaci?



Který mapový podklad se Vám jeví jako nejvhodnější pro zobrazení uzlů?



Obr. 11. Odpovědi na dvě klíčové otázky definované na počátku experimentu

## Konfigurace bezdrátové senzorové sítě

### Komunikační protokoly a upevnění uzlů v terénu

Pro uvedení uzlů bezdrátové senzorové sítě do provozu bylo nutné vytvořit protokoly, na jejichž podkladě bylo možné zprovoznit komunikaci mezi uzly navzájem, mezi uzly a bránou za uživatelem stanovených podmínek. Nejprve byly vytvořeny protokoly pomocí generátoru kódů, který společnost Libelium nabízí na svých stránkách. Ty musely být upraveny v programu integrovaného vývojového prostředí (Integrated Development Environment, IDE) pro Wasmote, protože v nich nebyly uvedeny informace o ID sítě a síťové adrese. Dále byly vytvořeny protokoly pro efektivnější přenos dat v rámci, identifikaci stupně nabití baterie uzlu, posílání hodnot síly signálu (RSSI) a pro přenos dat přes směrovače. Tyto protokoly byly nejprve testovány v kancelářských podmínkách a poté byly nahrány do uzlů umístěných za účelem testování ve druhém klastru.

Uzly byly prvně nasazeny pouze ve druhém klastru ve dvou krátkých obdobích od 25. 9. do 8. 10. 2014, a od 8. 12. do 16. 12. 2014. Uzly byly umístěny do Botanické zahrady a rozária nedaleko Přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého. Při těchto testovacích měřeních bylo odzkoušeno upevnění uzlů na kmeny jehličnatých stromů tak, aby senzory upevněné na uzly byly situovány do výšky dvou metrů a orientovány na stejnou světovou stranu (severovýchod).

Ve druhé etapě byly uzly umístěny do prvního klastru, ve kterém byly situovány na dvouapůlmetrové dřevěné tyče tak, aby se senzory nacházely ve výšce dva metry nad zemským povrchem (obr. 12, vpravo). Instalace uzlů se senzory do tohoto prostředí byla provedena dne 9. 4. 2015 v první konfiguraci (data jsou využitelná až od 11. 4.). Druhá konfigurace byla uvedena do provozu dne 16. 9. 2015, od této doby byla v této konfiguraci bezdrátová senzorová síť v provozu

do 13. ledna 2017. Pozice uzlů v druhé konfiguraci jsou označeny písmeny a znázorněny na obrázku 12 vlevo.

Bezdrátová senzorová síť byla opětovně nasazena v centru města (ve druhém klastru) od 16. 5. 2016, ale až od 19. 5. 2016 byla získávána plnohodnotná data. Senzory jsou situovány do výšky dvou metrů nad zemský povrch a připojeny k uzlům upevněným na tyč (obr. 13). Pouze jedna pozice v tomto klastru byla dlouhodobě v provozu. Na této tyči jsou od 17. 5. 2016 situovány i další senzory a dataloggery využívané Katedrou geoinformatiky k meteorologickým měřením. Tyto senzory měří teplotu vzduchu, relativní vlhkost vzduchu, teplotu půdy a srážky. Data jsou rádiově posílána na server a zobrazována pomocí software EasyLog.



Obr. 12. Druhá konfigurace uzlů v prvním klastru (vlevo), upevnění uzlů v terénu (vpravo)



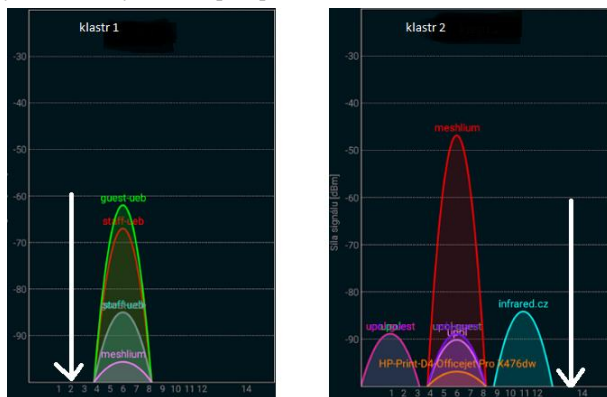
Obr. 13. Konfigurace uzlů ve druhém klastru (vlevo), umístění uzlů v terénu (vpravo)

## Testování technických parametrů uzlů Waspnote Plug&Sense při reálném nasazení

Testování technických parametrů bezdrátové senzorové sítě je provedeno na počátku rozmístění uzlů v terénu. Emary a Ramakrishnan (2013) se ve své studii soustředí na technické parametry zahrnující úspěšnost doručení dat a spotřebu baterie, které pomocí simulací ověřují. V rámci olomoucké bezdrátové sítě byla prvně sledována zátěž komunikačních kanálů v pásmu 2,4 GHz, následovalo sledování stavu baterie při různých konfiguracích sítě. Dále byla sledována síla signálu s využitím více druhů antén a v neposlední řadě byla počítána úspěšnost přenosu dat jednotlivých uzlů do brány.

### Zátěž komunikačního pásma 2,4 GHz

Při použití základního komunikačního protokolu IEEE 802.15.4 pro bezdrátovou senzorovou síť v městském prostředí je nutné ověřit zatíženost jednotlivých kanálů, na které se pásmo 2,4 GHz dělí a situovat komunikaci na ten nejméně vytižený kanál. Vytíženost kanálů se může v čase měnit, a tak je vhodné toto testování opakovat v čase. Síla a rozložení Wi-Fi signálu byla ověřena pomocí programu Wi-Fi Analyzer 3.10.1-1, který je volně dostupný pro operační systém Android. V prvním klastru se veškerá Wi-Fi komunikace odehrává na kanále číslo šest. Pro komunikaci mezi uzly a bránou byl zvolen druhý kanál, na kterém není vedena žádná Wi-Fi komunikace. Druhý klastr je komunikací více zatížen a jednotlivé komunikace jsou v něm rovnoměrně rozloženy, pro komunikaci mezi uzly a bránou byl zvolen předposlední kanál.



Obr. 14. Ukázka rozložení síly Wi-Fi signálu na frekvenci 2,4 GHz v prvním a ve druhém klastru, dle vlastního měření

## Výdrž baterie

Výrobce na základní desku uzlů připojuje lithiové baterie s kapacitou 6600 mAh a napětím 3,3 V až 4,2 V. Baterie jsou voděodolné a jsou schopné pracovat při teplotách - 10 °C až 50 °C, jejich výdrž je garantována až na jeden rok provozu. Není však uvedeno, za jaké konfigurace, je tato výdrž udávána.

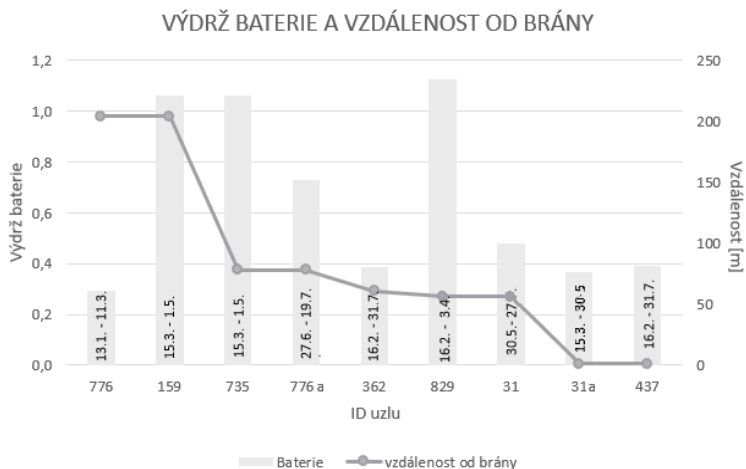
Pro testování výdrže baterie byly ve vnitřním prostředí zvoleny následující scénáře – energetické zatížení senzorem (byla sledována výdrž baterie při zapojení jednotlivých senzorů, postupně byly vystřídány všechny senzory) a vliv intervalu záznamu dat (byly testovány čtyři intervaly záznamu při zapojení všech senzorů). Ve venkovním prostředí byla sledována komunikační vzdálenost, vliv meteorologických prvků, a jestli mají překážky mezi komunikujícími komponentami vliv na výdrž baterie. Vnitřní testování baterie probíhalo také v první polovině roku 2016. Data byla zobrazována v reálném čase v programu PuTTY suit v0.65, který získané hodnoty ukládal přímo do souboru ve formátu .log, ze kterého bylo nutné extrahovat informace o stavu baterie a časovou značku, což bylo provedeno v programu PSPad v.4.6.9. Při venkovním testování byla data posílána přímo do brány.

Dle Libelium (2016a) má nejvyšší energetickou spotřebu uzel sledující hodnoty oxidu uhličitého (50 mA), následuje senzor Air Pollutants 2 sledující C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>, CH<sub>3</sub>CH<sub>2</sub>OH, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub> a CO (42 mA), dále senzor snímající hodnoty velmi těkavých organických látek (VOC) (32 mA), nejmenší energetickou náročnost má senzor sledující oxid dusičitý (26 mA). Testováním se ukázalo, že nejrychleji baterii vybíjí senzor NO<sub>2</sub>, který má garantovanou nejnižší spotřebu baterie. Druhý senzor, při jehož napojení se uzel rychle vybil, byl senzor Air Pollutants 2. Vůbec nejrychleji je baterie vybita při zapojení všech senzorů.

Ve vnitřním prostředí byla hodnocena délka výdrže baterie při různých intervalech záznamu, která se s vyšším intervalem záznamu dat snižovala, avšak ze získaných dat je patrné, že není příliš velký rozdíl mezi výdrží baterie při minutovém intervalu záznamu (62,41 hodin) a při půlhodinovém intervalu záznamu (65,96 hodin).

Obrázek 15 ukazuje ID uzlu, datum, kdy se nacházel v terénu, výdrž jeho baterie v závislosti na vzdálenosti uzlu od brány. Čím větší je vzdálenost uzlu od brány, tím by spotřeba baterie uzlu měla být vyšší, což je značně ovlivněno nejen jeho polohou ale i samotným uzlem a povětrnostními podmínkami, ve kterých byl uzel v terénu umístěn. Výdrž baterie byla počítána pro první půlrok roku 2016. Výpočet byl proveden z hodnoty úrovně baterie na počátku umístění uzlu do terénu a hodnoty baterie v čase, kdy z něj byla obdržena poslední data. Rozdíl stavu baterií v počátečním a koncovém stavu byl podělen počtem dní, po které se nacházel uzel v terénu. Čím blíže byl tento podíl nule, tím více poukazoval na vyšší výdrž baterie v terénu. Všechny uzly měly počáteční stav baterie vyšší než 90 %, a tak lze konstatovat, že byly plně nabity. Výsledek, že uzly, které byly u brány, neměly tak vysokou spotřebu baterie, byl očekáván, ale předpokladu se zcela vymykal uzel s ID 776, který byl umístěn nejdále od brány, a jehož

spotřeba baterie byla vůbec nejnižší. Uzel ID 829 měl nejvyšší spotřebu baterie, což bylo způsobeno jeho špatným technickým stavem, který byl na podkladě těchto měření odhalen. Kromě těchto dvou případů uzlů, byl předpoklad výdrže baterie v závislosti na vzdálenosti naplněn.



*Obr. 15. Výdrž baterie se vzdáleností od brány*

Překážky mají vliv spíše než na výdrž baterie na úspěšnost přenosu dat. Uzel s ID 735 byl ten, který se nacházel za překážkou, trend jeho vybíjení byl shodný s ostatními uzly.

Byl prokázán vliv nízkých teplot na výdrž baterie. Kolísání hodnot stavu baterie odpovídá křivce průběhu teploty. Pokud je zaznamenán prudký pokles teploty, tak poklesne i stav baterie, křivka stupně nabití baterie kopíruje během svého klesání v menším měřítku křivku teploty.

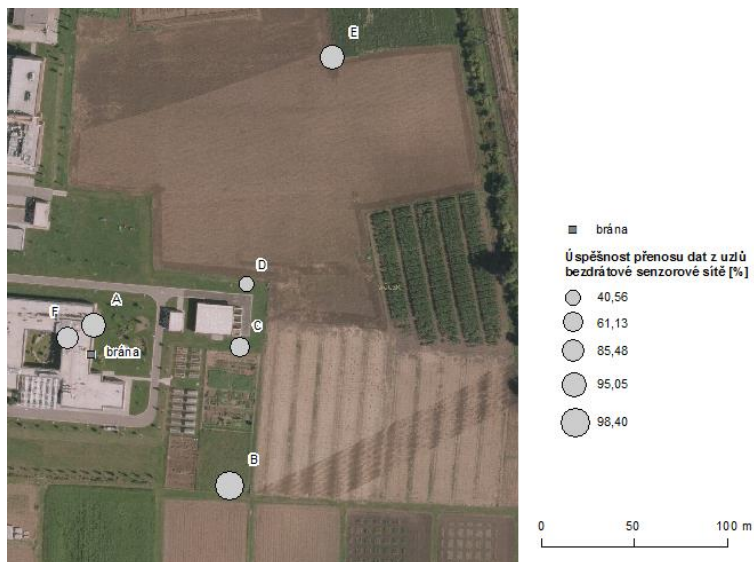
### **Síla signálu (RSSI)**

Síla signálu je veličina, která odkazuje na hodnotu síly signálu paketu vysílacího uzlu. Pokud jsou hodnoty síly signálu obdrženy v dBm, pohybují se v záporných číslech od 0 dBm do -120 dBm. Čím blíže jsou tyto hodnoty nule, tím je vyšší kvalita signálu přijímaného paketu. Ideální hodnota RSSI pro spolehlivý přenos paketů je pro uzly Waspnote Plug&Sense -37 dBm (Libelium Networking, 2016).

Reálné testy proběhly ve dnech 28. 6. 2016 - 30. 6. 2016. Nejdříve byly ověřovány hodnoty síly signálu při využití výkonnějších antén (9 dBm). Uzly byly poté dobity a následně byly testovány méně výkonné antény (5 dBm), které byly dodány výrobcem společně s uzly. Interval posílání dat byl nastaven na deset sekund. K testování byly jako vysílače (ID 776) i přijímače (ID 748) použity modely Smart Environment. Přijímač byl umístěn za oknem kanceláře na Katedře geoinformatiky v blízkosti brány. Vysílač byl zavěšen na stromě ve vzdálenosti 98 metrů od přijímače který posílal data do MySQL databáze v bráně. Pokud byly zapojeny dvě výkonnější antény, byla úspěšnost přenosu dat 47,64 %. V případě zapojení méně výkonných antén byla úspěšnost přenosu dat 48,47 %. Hodnoty síly signálu byly při využití méně výkonných antén průměrně o 10 dBm vyšší, což zamítá původní tvrzení, které počítá s vyšší kvalitou přenosu při využití výkonnějších antén.

### **Úspěšnost přenosu dat (DDR)**

Úspěšnost přenosu dat udává poměr přenesených paketů a paketů, které měly být přeneseny během určeného časového úseku dle nastaveného intervalu měření. Nejprve byla zjišťována úspěšnost přenosu dat za prvních 31 dnů od nasazení bezdrátových uzlů do terénu v prvním klastru. Prvních 31 dnů od začátku nasazení uzlu bylo zvoleno, aby byl vyloučen vliv nabití baterie na úspěšnost přenosu dat. Nejvyšší úspěšnost přenosu dat měl uzel na pozici B, následovaný uzlem na pozici A. Nejhorší úspěšnost přenosu dat byla dle očekávání vypočítána pro uzel na pozici D, která se nachází za zděnou budovou. Nízká úspěšnost uzlu na pozici C je způsobena jeho špatných technickým stavem a nemožností ověření měření pro tuto pozici z důvodu jejího osetí.



Obr. 16. Úspěšnost přenosu dat z jednotlivých pozic v prvním klastru

### Neočekávané situace znemožňující záznam dat

V průběhu měření se vyskytly situace, se kterými nebylo na počátku počítáno a které znemožnily získání dat, jejich přenos do databáze či jejich uložení v databázi.

První situací, která zkomplikovala měření v prvním klastru, bylo poškození anemometru malé meteorologické stanice a přerývání prodlužovacích kabelů, které tuto stanici spojovaly s uzlem.

Napojení brány do sítě provázely problémy v obou klastrech, protože brána se chovala jako unikátní DNS Resolver (Open DNS Resolver), a tak mohla být zneužita pro DDoS (Denial of Service Attack) útoky. Bylo nutné se připojit do brány a v konfiguračních souborech na straně brány deaktivovat DNS systém. V době této konfigurace byly brány odpojeny.

Další zaznamenanou nepříjemností bylo, že docházelo k rozbití kontaktů u kombinovaných teplotních a vlhkostních senzorů, které byly přerývány nepřetržitým nasazením v terénu

Velmi omezujícím byly výpadky brány. Tyto výpadky způsobily, že v jednotlivých obdobích nebyla zaznamenána žádná data. První dlouhodobý výpadek brány v prvním klastru byl na podzim 2015 (od 2. 11. 2015 do 23. 11. 2015) a byl způsoben shořelým adaptérem.

Data nebyla zaznamenána v případě chybné komunikace s databází ani v případě, že brána byla vypnutá – takové situace nastávaly po bouřce nebo po vypnutí elektrického proudu, kdy se brána uvedla do režimu spánku a musela být manuálně restartována. V tomto případě nebylo možné dálkové připojení.

Data nebyla zaznamenána ani v případě neočekávané chyby při komunikaci brány s integrovanou databází MySQL. Pro nápravu chyby je nutné vymazat část paměti a restartovat bránu. Tento proces je možné provádět i na dálku.

### **Uložení a předzpracování dat**

Data byla ukládána v MySQL databázi integrované do obou bran. Aby byla zachována primární data a zároveň, aby bylo možné přistupovat přímo k datům zproštěných chyb v měřeních, byla vytvořena záložní databáze. Bylo nutné zajistit přístup k naměřeným datům i dalším uživatelům a není možné, aby jim byl umožněn přístup k databázi, která uchovává primární data. Tato externí databáze obsahuje čtyři tabulky (dvě sady). První sada tabulek (*data\_klastr1* a *data\_klastr2*) je čistou kopií tabulky *sensorParser* z brány prvního (*data\_klastr1*) a druhého klastru (*data\_klastr2*). Do druhé sady tabulek (*data\_klastr1\_filtrovana* a *data\_klastr2\_filtrovana*) nebyly zapisovány hrubé a systematické chyby v měřeních. K těmto tabulkám byla přidělena přístupová práva pro zájemce o data z experimentální bezdrátové senzorové sítě v Olomouci.

## **Zpracování tematických dat a jejich vizualizace**

V rámci práce byla zpracována jak základní meteorologická tak chemická data ze senzorů. Práci se samotnými tematickými daty předcházelo testování ukazující přesnost měření jednotlivých senzorů.

### **Kalibrace senzorů**

V říjnu a listopadu došlo k recalibraci teplotních a vlhkostních čidel pro každý uzel z řady Smart Environment v akreditované kalibrační laboratoři MEROS v Rožnově pod Radhoštěm. Kalibrace teplotních čidel byla časově náročná a byla prováděna v pěti teplotních bodech (-20 °C, -10 °C, 0 °C, 10 °C, 20 °C) s přesností 0,2 °C. Vlhkostní senzory byly kalibrovány v rozsahu 5 % až 90 %. I k této kalibraci byl vydán kalibrační záznam společně s tabulkou naměřených hodnot, které kolísaly v rozmezí -8,9 do 10,2 od hodnoty etalonu.

Kalibrace chemických senzorů byla řešena ve článku od Suchánek (2014). Autor se podílel na vývoji prezentovaného kalibračního přístroje. Na ověření jím získaných hodnot byly používány senzory od e2technology, které byly zakoupeny pro monitoring v Olomouci. Pomocí tohoto přístroje nebylo možné spolehlivě otestovat senzory vlastněné Katedrou geoinformatiky, a tak bylo řešení kalibrace těchto čidel dále hledáno. Dále byla kalibrace chemických senzorů konzultována v průběhu stáže na Katedře chemie v Cambridge s profesorem Rodericem Lee Jonesem v říjnu 2014. Pan profesor tyto senzory



označil za poměrně nepřesné a jejich kalibraci za náročnou jak časově tak finančně. Jejich použití pro přesná měření nedoporučoval. Kalibrace čidel znečišťovatelů ovzduší byla konzultována s panem Petrem Braunem z akreditované kalibrační laboratoře TESO z Prahy. Po osobní konzultaci a zkušební kalibraci čidel oxidu uhličitého a oxidu dusičitého na jednom uzlu bylo rozhodnuto, že kalibrace těchto čidel nebude příliš efektivní. Uzly nebyly schopny zaznamenat přímé změny ve vystavení se rozdílným koncentracím polutantu. Při testech vystavení se vyšším koncentracím polutantů byla změna zaznamenána až po více než 10 minutách, v některých situacích změna nebyla zaznamenána vůbec. Kalibrace chemických prvků je finančně náročná, kalibrace jednoho senzoru v pěti hladinách koncentrací se pohybuje kolem 3500 Kč. Po těchto diskuzích s odborníky a zkouškách kalibrace bylo od této procedury upuštěno.

Pokud nejsou chemické senzory delší dobu nakalibrované je vhodné sledovat hodnoty napětí ve Voltech, které jsou relativní a vztaženy ke konkrétnímu uzlu. Čím vyšší hodnota napětí je zaznamenána, tím nižší koncentrace polutantu se nachází v ovzduší (Libelium, 2015). Odpor senzoru ( $R_s$ ) se vypočítá dle následujícího vzorce uvedeného v Libelium (2016c):

$$R_s = (V_c * R_i) / V_{out} - R_i$$

kde:

$V_c$  je napětí senzoru [V] (1,8 V pro NO<sub>2</sub> senzor, 2,5 V pro VOC senzor a 5 V pro CO<sub>2</sub> senzor),

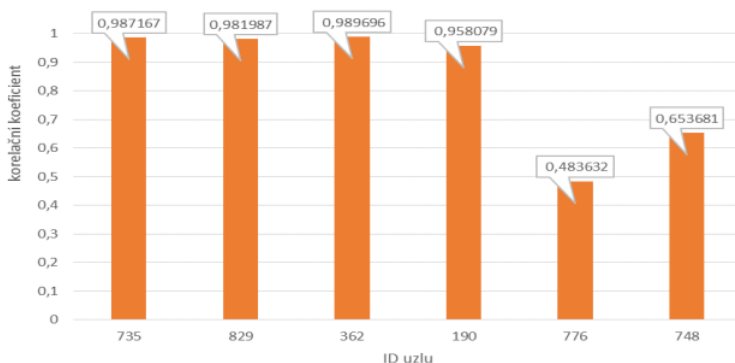
$V_{out}$  je napětí naměřené senzorem [V],

$R_i$  je zatěžující odpor [kΩ].

### **Meteorologická data**

Meteorologickými daty jsou myšleny naměřené hodnoty teploty, relativní vlhkosti vzduchu, směru a rychlosti větru z období červen až prosinec 2015. Referenční data představovala data získaná od Českého hydrometeorologického ústavu. Korelace byla počítána pro průměrné denní hodnoty vypočítané z klimatologických termínů měření pro jednotlivé senzory a průměrné denní hodnoty získané z měření ČHMÚ. Uzly ID 735 a ID 829 jsou z řady Smart Agriculture a mají integrovány přesnější teplotní senzory s chybou  $\pm 0,2$  °C. Zbývající uzly jsou z řady Smart Environment a mají připojena méně přesná teplotní čidla ( $\pm 2$  °C). Přesnost měření byla zvýšena kalibrací. Nejvyšší korelační koeficient byl vypočítán pro uzel ID 362, nejnižší byl pro uzel ID 776 (obr. 17). Hodnoty relativní vlhkosti z uzlů a z referenčních dat byly identicky porovnány. Nejvyšší korelační hodnoty (0,987 (ID 735), 0,981 (ID 829)) byly vypočítány pro uzly z řady Smart Agriculture, korelační hodnoty pro uzly z řady Smart Environment byly o více než 0,5 horší.

### KORELAČNÍ KOEFICIENT HODNOT TEPLOT S DATY OD ČHMÚ pro červen až prosinec 2015 v Holici



Obr. 17. Korelační koeficient pro teplotní čidla v prvním klastru a data z ČHMÚ

Hodnoty rychlosti větru naměřené senzory a ČHMÚ nebyly přímo porovnatelné, protože v bezdrátové senzorové síti byly měřeny přízemní rychlosti větru, zatímco na stanici se měřily rychlosti větru ve výšce 10 metrů. Přesto byl vypočítán korelační koeficient, a ten nejvyšší měl hodnotu 0,781 pro uzel s ID 829. Směry větru se z výše uvedeného důvodu také neshodují. V bezdrátové senzorové síti se objevovaly nejčastěji větry vanoucí z východu až jihu. Zatímco v měření ze stanice převažují severní větry.

#### **Vztah mezi naměřenými hodnotami základních meteorologických prvků v klastrech**

Vztah mezi naměřenými daty v obou klastrech byl sledován od 1. června do 15. prosince 2016.

Denní průběhy teplot v obou klastrech jsou velmi podobné. V prvním klastru byl zaznamenán pozdější nástup maximálních hodnot, minimální hodnoty byly zaznamenány dříve než v prvním klastru. Průměrné denní teploty vypočítané z hodnot získaných v klimatologických termínech měření jsou zpravidla vyšší ve druhém klastru (obr. 18). Nejvyšší rozdíl mezi teplotami v klastrech byl zaznamenán v červenci. V tomto měsíci se dal očekávat výskyt tepelného ostrova v centru města, avšak rozdíl nejvyšší a nejnižší zaznamenané teploty byl pouze dva stupně. Jeden uzel v prvním a jeden ve druhém klastru dokonce vykazovaly stejné průměrné měsíční hodnoty teploty. Průměrné měsíční hodnoty relativní vlhkosti byly zpravidla vyšší v prvním klastru, výjimku tvořil měsíc červenec.



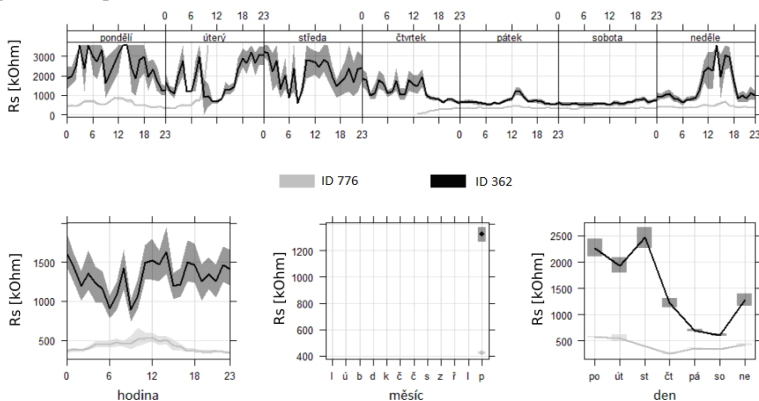
Obr. 18. Průměrná denní teplota v prvním (modře) i druhém (červeně) klastru v roce 2016

### Znečišťovatelé ovzduší

Pozornost je zaměřena na oxid dusičitý a velmi těžké organické látky. Data pro tuto práci byla poskytnuta ČHMÚ za rok 2015 z Registru znečištění ovzduší (REZZO 1, 2). V těchto kategoriích jsou zahrnuty velké a střední stacionární zdroje znečištění (Jančík, 2013). K účelu poukázání na vývoj polutantů byly využity hodnoty NO<sub>2</sub> a VOC získané uzly v prvním klastru v roce 2015.

Jelikož se pracuje s nenakalibrovanými chemickými senzory a veškerá naměřená data odpovídají chodu napětí senzoru, je nutné vypočítat odpor sensorů, který koresponduje s chodem polutantu. Hodnoty odporu senzoru lze srovnávat pouze v rámci senzoru, nelze srovnávat senzory mezi sebou, avšak je možné sledovat, jestli mají shodný trend vývoje.

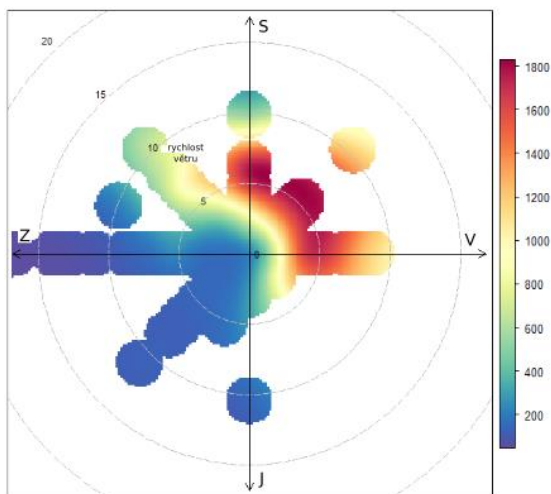
Pokud budou brány v potaz hodnoty odporu senzoru oxidu dusičitého vypočtené pro uzel ID 776 za období od 15.12. do 24.12. 2015, sledovány s hodnotami z uzlu ID 362, je zřejmé, že prvně jmenovaný uzel zaznamenával vyšší hodnoty napětí než uzel ID 362. Hodnoty  $R_s$  pod klíčovou hodnotou 45,5 k $\Omega$  (signalizující překročení hranice 10 ppm) byly zaznamenány pouze ve dvou případech, a tak na základě hodnot z tohoto uzlu nelze tvrdit, že byla výrazně překročena klíčová koncentrace oxidu dusičitého ve městě. Na obrázku 19 je ukázán průměr minimálních hodnot odporu senzoru obou uzlů během jednotlivých dnů v týdnu, následován průměrem hodinovým, denním a měsíčním. Data jsou proložena pětiprocentním intervalem spolehlivosti. Na podkladě těchto dat nelze konstatovat ani, jestli trend je podobný, protože uzel ID 362 měl podstatně vyšší rozkolísanost v měření a data jsou tak i z tohoto pohledu neporovnatelná.



Obr. 19. Hodinový, denní, týdenní a měsíční chod odporu senzoru  $\text{NO}_2$  na uzlech ID 776 a ID 362 situovaných od 15. 12. do 24. 12. 2015 v prvním klastru, dle vlastního měření

Obrázek 20 ukazuje rozložení oxidu dusičitého s ohledem na světové strany. Je patrné, že s nejvyšší intenzitou vanou západní větry, naopak nejvíce zplodin je koncentrováno v severovýchodním kvadrantu. Tímto směrem se nachází znečišťovatelé ovzduší oxidem dusičitým, kteří jsou zaznamenáni v REZZO 1, 2. Nejedná se však o největší znečišťovatele v Olomouci a okolí, ti jsou v jihozápadní směru.

Obdobně je možné pracovat i s dalšími chemickými senzory, které nejsou nakalibrované. Senzor oxidu uhličitého má pro zobrazení dat jiný postup, který je popsán v disertační práci.



Obr. 20. Rozdělení směrů a rychlostí větru a k nim příslušející hodnoty odporu senzoru  $\text{NO}_2$  z uzlu ID 776, dle vlastního měření

## Výsledky

Cílem disertační práce bylo navrhout a vybudovat experimentální bezdrátovou senzorovou síť (E - BOSS) sledující meteorologické prvky v Olomouci. Disertační práce se soustředí na celý proces tvorby bezdrátové senzorové sítě.

Disertační práce byla rozdělena na čtyři dílčí cíle, které vedly k naplnění hlavního cíle práce. Nejprve bylo nutné vybrat komponenty bezdrátové senzorové sítě v Olomouci (DC 1) a následně navrhnout postup, jak umístit uzly v terénu (DC 2). Bezdrátová senzorová síť byla poté konfigurována (DC 3). Tato konfigurace zahrnovala testování technických parametrů reálně nasazených uzlů (DC 3a) a tvorbu úložiště nasbíraných dat (DC 3b). Závěrem byla zpracována a vizualizována tematická data (DC 4).

### DC1 – Výběr komponent bezdrátové senzorové sítě

- rešerše monitoringu klimatu pomocí bezdrátových senzorových sítí ve světě a v České republice
- stanovení kritérií pro výběr komponent bezdrátové senzorové sítě

- definice požadavků na bezdrátovou senzorovou síť v Olomouci, deklarace vhodných hodnot kritérií
- zpracovaná multikriteriální analýza nabízených komponent

#### **DC2 – Rozmístění uzlů bezdrátové senzorové sítě**

- stanovení faktorů ovlivňujících lokalizaci uzlů v terénu
- algoritmus rovnoměrného rozmístění uzlů v terénu
- algoritmus rozmístění uzlů na podkladě Jednotkového grafu
- algoritmus rozmístění uzlů na podkladě Yao grafu
- podklad vhodný pro vizualizaci uzlů

#### **DC3 – Konfigurace bezdrátové senzorové sítě v Olomouci**

##### **DC3a – Testování bezdrátové senzorové sítě v Olomouci**

- komunikační protokoly (základní komunikace uzlu s bránou pro každý model, komunikace uzlu s bránou v rámci pro každý model, zjištění stavu baterie, přenos hodnot síly signálu, komunikace mezi uzly, zobrazení teplotních a vlhkostních hodnot, zobrazení hodnot CO<sub>2</sub>)
- upevnění uzlů v terénu ve dvou klastrech
- zatíženost komunikačních kanálů v obou klastrech
- ověření výdrže baterie ve vnitřních a venkovních scénářích
- testování síly signálu s využitím dvou typů antén
- deklarování úspěšnosti přenosu dat z různých pozic v rámci klastru

##### **DC3b – Předzpracování a uložení dat**

- popis struktury primární databáze
- vytvoření záložní databáze s naplněnými tabulkami
- filtr pro nezobrazení hrubých a systematických chyb v datech

#### **DC4 – Zpracování tematických dat a jejich vizualizace**

- porovnání dat s referenčními daty od ČHMÚ (ověření přesnosti měření jednotlivých uzlů a senzorů)
- vztah mezi naměřenými hodnotami základních meteorologických prvků v klastrech
- postup práce s nenakalibrovanými chemickými daty
- zobrazení trendů v chemických datech, jejich zobrazení společně s meteorologickými daty a stacionárními znečišťovacími ovzduší v Olomouci

## Diskuze

Rozhodnutí učiněná v této práci jsou popsána již v jejím průběhu. Zde jsou diskutována ta, která jsou nejzásadnější.

### **Výběr monitorovací technologie**

Monitorovací technologie byla vybírána na úplném počátku disertační práce. S ohledem na autorčiny předchozí zkušenosti se senzorovým měřením získané v rámci diplomové práce bylo rozhodnuto, že bude probíhat bezdrátový monitoring s dálkovým přístupem. Zkušenosti s bezdrátovým přenosem dat byly kromě studia literatury čerpány na Katedře informatiky Univerzity Palackého v Olomouci a na Katedře elektroniky a telekomunikací Polytechnické univerzity v Turíně.

Na podkladě konzultací spojených s praktickými zkušenostmi bylo zvoleno takové nastavení uzlů a senzorů, které bylo zakoupeno. Není možné zakoupit technologii nastavenou tak, aby se ve 100 % shodovala s požadavky, a aby její nasazení bylo typu Plug&Sense přinášející minimální interakci do konstrukce základní či senzorové desky. Zpočátku se zakoupená konfigurace jevila jako vhodná pro městský monitoring, ale postupem času se ukázalo, že vývoj v této oblasti jde velmi rychle dopředu, vybrané nastavení velmi rychle zastarává a vyžaduje další investice pro vylepšení všech nedostatků, které byly odhaleny až po nasazení technologie do terénu. Jako největší nedostatek se jevila zvolená komunikační technologie, která se ukázala jako velmi neefektivní pro přenos dat ve městě. V rámci komunikace na krátkou vzdálenost se objevily i komplikace s přetíženými rádiovými frekvencemi a překážkami v komunikační cestě. Zejména překážky v podobě zděných budov představovaly nepropustnou komunikační bariéru. Pro budoucí efektivnější práci bylo rozhodnuto o jeho nahrazením komunikačním rozhraním LoRa.

### **Architektura bezdrátové senzorové sítě**

Architektura bezdrátové senzorové sítě byla zvolena klastrová s využitím dvou klastrů. V průběhu tvorby práce byl upřesněn její záměr a s ohledem na krátký spolehlivý komunikační dosah uzlů se jako výhodnější ukázalo osadit jimi alespoň dvě oblasti. Data získaná z jedné oblasti by byla redundantní. Sběr dat ve dvou rozdílných klastrech přináší i tematické srovnání dat z rozdílných prostředí ve městě. Data byla ukládána v každém klastru zvlášť, ale pro lepší přístup k datům z obou klastrů byla vytvořena i záložní databáze, kde se nacházela data zproštěná hrubých a systematických chyb.

### **Topologie**

Topologie bezdrátové senzorové sítě je jednou z velmi diskutovaných kapitol. Nejvíce používané topologie v bezdrátových senzorových sítích jsou hvězdicová, stromová a mesh. Hvězdicová topologie je základní, umožňuje pouze

komunikaci mezi uzlem a sběrným bodem. Nejedná se o topologii, která by měla být využívána v bezdrátových sensorových sítích, protože uzly by měly komunikovat i mezi sebou a efektivně tak zvětšit území, ze kterého získávají data. Toto prostorové rozšíření s sebou však nese i technická úskalí, která jsou před monitorováním na větším území upřednostňována. I v rámci disertační práce byla pro konfiguraci uzlů v klastrech zvolena hvězdicová topologie. Důvodem pro tuto volbu bylo, že vybrané komunikační rozhraní sice umožňuje posílání dat mezi uzly, ale pouze v konfiguraci peer to peer, při níž dochází k nesprávnému přenašení dat přes směrovač. Z testování této komunikace plyne, že data buď nebyla vůbec přenesena, nebo byla nesprávně zapsána. Dalším problémem, který se při jiné než hvězdicové konfiguraci objevil, byla vysoká potřeba baterie směrovacího uzlu.

### **Kalibrace**

Přesnost měření je jedním z důležitých faktorů, a proto je třeba klást důraz na kalibraci senzorů. Kalibrace senzorů snímajících základní meteorologické prvky není vyžadována příliš často, ale i přesto je nutné ověřovat kvalitu měření těchto senzorů. Toto ověření je časově a finančně náročné, protože je nutné jej provést pro každý přístroj a mu příslušné senzory, které nesmí být zaměněny. Práce s chemickými senzory je ještě náročnější. Kalibrovány byly pouze teplotní a vlhkostní senzory. Jakmile byla přesnost kalibrace ověřena v terénu, bylo zjištěno, že odchylky v měření se příliš nezměnily a po jejich opětovném nasazení do terénu byly opět vyšší (záleželo na konfiguraci vybraného uzlu), bylo rozhodnuto, že meteorologické senzory se již kalibrovat nebudou. V kalibrační laboratoři proběhl i pokus o kalibraci NO<sub>2</sub> a CO<sub>2</sub> senzorů. Ten se nezdařil, senzor nebyl schopen ani v hodnotách napětí, ani v přepočítaných hodnotách čtených pomocí programu IDE i na bráně Meshlium, zaznamenat změny napětí. Z tohoto důvodu bylo od kalibrace upuštěno a pozornost byla zaměřena na relativní hodnoty.

### **Nespojitost dat**

Data získaná v rámci bezdrátové sensorové sítě jsou v prvním klastru za rok a půl měření neúplná, proto nebylo možné vytvořit delší časovou řadu. Přestože byl vždy v provozu alespoň jeden uzel, tak výpadky brány způsobily, že data nebyla vůbec zaznamenána. Těchto výpadků se po dobu měření objevilo více. Tím nejvýraznějším bylo shoření adaptéru na podzim roku 2015.

## **Závěr**

S technologickým pokrokem se do popředí dostávají stále nové technologie pro monitoring okolního prostředí. S postupem času se tyto technologie začínají používat nejen k monitoringu okolního prostředí, ale i k usnadnění, zpříjemnění a zrychlení denních úkonů prováděných v domácnostech, městech a okolním



prostředí. Od 90. let zažívá obrovský rozmach bezdrátový monitoring. Tento monitoring byl zvolen ke sledování meteorologických prvků v Olomouci.

Disertační práce, jejímž cílem bylo ověřit a vybudovat experimentální bezdrátovou senzorovou síť v Olomouci, byla rozdělena na čtyři dílčí cíle. Práce je zaměřena na celý proces práce s bezdrátovou senzorovou sítí od výběru komponent přes konfiguraci až po základní zpracování dat a tvoří tak komplexní popis budování bezdrátové senzorové sítě.

Nejprve byl stanoven účel monitoringu a vybrány komponenty bezdrátové senzorové sítě (DC 1). Stanovení kritérií pro prvotní analýzu a definování jejich ideálních parametrů bylo učiněno. V rámci olomoucké bezdrátové senzorové sítě byl zvolen rádiový přenos založený na základním komunikačním protokolu vytvořeném pro bezdrátovou senzorovou síť, IEEE 802.15.4. Tento protokol nebyl v České republice k dlouhodobému monitoringu použit, a tak bylo třeba ověřit jeho možnosti. Důraz byl kladen na sledování základních meteorologických prvků zahrnujících teplotu vzduchu, relativní vlhkost vzduchu, směr a rychlost větru. Z chemických prvků byl sledován oxid uhličitý, oxid dusičitý, velmi těkavé organické látky a další vzdušné polutanty měřené senzorem Air Pollutants II. Dle výsledků multikritériální analýzy byly vybrány uzly Waspnote Plug and Sense, modely Smart Environment, Smart Agriculture a Smart Agriculture PRO.

Rozmístění uzlů ve venkovním prostředí je spojeno s mnoha omezeními, která souvisí s technickými parametry uzlů a s terénními faktory (DC 2). Velmi omezujícím parametrem je také bezpečnost umístění uzlů ve městě. Je třeba zaměřit pozornost na oplocené nebo kamerou hlídané oblasti, protože tyto předměty jsou velmi často kradeny. Mezi velmi omezující technické parametry patří délka výdrže baterie uzlu, která je klíčová a souvisí se vzdáleností komunikujících přístrojů, s počtem napojených senzorů, intervalem záznamu i s počtem vzájemně komunikujících přístrojů. Do distribučních algoritmů nejsou doposud plnohodnotně zapojeny terénní faktory, a tak byly vytvořeny tři algoritmy, z nichž jeden sloužil jako přehledový pro rozmístění uzlů ve venkovním prostředí a další dva již pracovaly s technickými i terénními parametry. Podkladem pro tvorbu algoritmů byla grafová teorie. Mapový podklad, ortofoto, byl zvolen na podkladě eye-tracking šetření.

Ověření navržené konfigurace uzlů bezdrátové senzorové sítě bylo řešeno ve třetím dílčím cíli (DC 3). Uzly olomoucké bezdrátové senzorové sítě byly rozmístěny do dvou klastrů. První klastř se nacházel v olomoucké části Holice a druhý u budovy Katedry geoinformatiky téměř v centru města. V prvním klastru se nacházelo sedm pozic pro uzly, které byly umístěny na dřevěné tyče do výšky dvou metrů. Ne všechny pozice byly vždy osazeny uzlem, což bylo způsobeno nedostatkem zakoupených uzlů. Ve druhém klastru byla pouze jedna

pozice pro uzly, na které se většinu času nacházely ve výšce dvou metrů nad zemským povrchem dva uzly.

Nejvýznamnější technické parametry bezdrátové sensorové sítě, které byly sledovány, zahrnovaly detekci nejméně komunikačně zatíženého kanálu v 2,4 GHz pásmu, určení výdrže baterie při různých scénářích, sledování hodnot síly signálu při využití méně a více výkonných antén a v neposlední řadě byla sledována úspěšnost korektně přenesených dat. V každém klastru byl vybrán nejvhodnější kanál pro přenos dat. Dle očekávání byl první klastr komunikací méně zatížen, a tak byl vybrán kanál na nižších frekvencích. Ve druhém klastru byly signály rozprostřeny téměř po celém pásmu, kromě posledního kanálu, který byl nakonec využit pro komunikaci v bezdrátové sensorové síti. Bylo zjištěno, že výdrž baterie je velmi významně ovlivněna meteorologickými podmínkami především pak nízkými teplotami (pod 0 °C). Další velmi významný faktor podílející se na vybíjení baterie uzlu je interval záznamu dat, přenosová vzdálenost, počet napojených senzorů a uzlů. Překážky v komunikaci neovlivňují délku výdrže baterie, ale velmi významně snižují úspěšnost přenosu dat. Ta je snížena i s vyšší komunikační vzdáleností, stupněm nabití uzlu, výkonem antény a mírou rušení signálu.

Každý klastr byl opatřen bránou s integrovanou MySQL databází, do které byla posílána data. Data z těchto databází byla synchronizována a posílána do záložní databáze. V této databázi byly vytvořeny triggerly filtrující chyby v datech. Díky napojení obou bran do ethernetového rozhraní mohlo docházet k základní údržbě bezdrátové sensorové sítě a k dálkovému přístupu k datům.

Na tematická data byl zaměřen čtvrtý dílčí cíl (DC 4). Tematická data získaná senzory integrovanými do uzlů Waspote Plug and Sense modelů Smart Environment jsou poměrně nepřesná, protože chyba měření teplotních senzorů je stanovena na  $\pm 2$  °C. Toto je poměrně vysoká nepřesnost, která nenabývala nižších hodnot ani po nakalibrování senzorů v akreditované kalibrační laboratoři MEROS v Rožnově pod Radhoštěm. Vlhkostní senzory nasazené na tyto uzly vykazují také vysoké odchylky od skutečného stavu, velmi často se objevují nereálné hodnoty vlhkosti vzduchu. Nicméně korelační koeficienty mezi referenčními daty z ČHMÚ a naměřenými daty jsou poměrně vysoké, a to jak jejich denní, tak jejich průměrné hodnoty. Nejvýraznějším výsledkem je porovnání teplotních a vlhkostních hodnot v obou klastrech, při kterém bylo zjištěno, že vyšší teploty se pohybují ve druhém klastru v letních měsících. U relativních vlhkostí vzduchu je situace opačná, a to protože v 98 % případů se vyšší hodnoty objevují v prvním klastru. Co se týká chemických dat, tak přesnost jejich měření je spekulativní a nemohla být kvůli problémům s jejich kalibrací ověřena. Nicméně při relativních měřeních napětí bylo možné vypočítat odpor jednotlivých senzorů, který koresponduje s chodem koncentrace polutantu. Díky tomuto výpočtu bylo možné predikovat jeho denní, týdenní, měsíční i roční rozložení. S ohledem na známou polohu bodových zdrojů

znečištění se potvrdilo, že nejvíce polutantů přichází ze směru, kde se tyto zdroje nachází.

Závěrem by autorka chtěla vyzdvihnout dynamiku tohoto řešení měření, které je možné přesunout ve vhodnou konfiguraci na jiné místo, kde lze okamžitě zahájit nová měření. Nespornou výhodou je také možnost reálného zaznamenání a přístupu k datům, na kterou navazuje uživatelská možnost přizpůsobení si této technologie.

## Použité zdroje

- Akyildiz, I.F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y., Cayirci, E., 2002. Wireless sensor networks: a survey. *Comput. Netw.* 38, 393–422. doi:10.1016/S1389-1286(01)00302-4
- Akyildiz, I.F., Vuran, M.C., 2010. *Wireless Sensor Networks*. John Wiley & Sons.
- Ananda, J., Herath, G., 2009. A critical review of multi-criteria decision making methods with special reference to forest management and planning. *Ecol. Econ.* 68, 2535–2548. doi:10.1016/j.ecolecon.2009.05.010
- Chong, C.-Y., Kumar, S.P., 2003. Sensor networks: evolution, opportunities, and challenges. *Proc. IEEE* 91, 1247–1256. doi:10.1109/JPROC.2003.814918
- Cöltekin, A., Demsar, U., Brychtová, A., Vandrol, J., 2014. Eye-hand coordination during visual search on geographic displays, in: *Proceedings of the 2nd International Workshop on Eye Tracking for Spatial Research (ET4S 2014)*.
- Emary, I.M.M.E., Ramakrishnan, S., 2013. *Wireless Sensor Networks: From Theory to Applications*. CRC Press.
- Fowler, A.M., Macreadie, P.I., Booth, D.J., 2015. Renewables-to-reefs: participatory multicriteria decision analysis is required to optimize wind farm decommissioning. *Mar. Pollut. Bull.* 98, 368–371. doi:10.1016/j.marpolbul.2015.07.002
- Fuhrmann, S., Ahonen-Rainio, P., Edsall, R.M., Fabrikant, S.I., Koua, E.L., Tobón, C., Ware, C., Wilson, S., 2005. Making Useful and Useable Geovisualization, in: *Exploring Geovisualization*. Elsevier, pp. 551–566.
- Libelium, 2016c, Gases sensor calibration process consideration?
- Hejlová, V., 2014. Spatial Distribution of Wireless Sensor Nodes in the Urban Environment, in: *Sensornets*. Presented at the 3rd SENSORNETS, Lisboa.

- Hejlova, V., 2014. Determination of Criteria Weights Values for Wireless Sensor Network Oriented on Monitoring of Air Pollutants Related to Traffic, in: Geoconference on Energy and Clean Technologies, Vol II. Stef92 Technology Ltd, Sofia, pp. 343–350.
- Hejlová, V., Voženílek, V., 2015. Současný stav výzkumu klimatu městského prostředí ve světě. Meteorol. Zprávy 68.
- Jančík, P., 2013. Atlas ostravského ovzduší. VŠB-TU, Ostrava.
- Kangas, J., Kangas, A., 2005. Multiple criteria decision support in forest management—the approach, methods applied, and experiences gained. For. Ecol. Manag., Decision Support in Multi Purpose Forestry Decision Support in Multi Purpose Forestry Selected papers from the symposium on “Development and Application of Decision Support Tools in Multiple Purpose Forest Management” 207, 133–143. doi:10.1016/j.foreco.2004.10.023
- Karl, H., Willig, A., 2007. Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks. John Wiley & Sons.
- Libelium, 2016a. Waspote Plug&Sense Sensor Guide.
- Libelium, 2016b. Meshlium X treme, Technical Guide.
- Libelium, 2015. Gases 2.0 Technical Guide.
- Libelium Networking, 2016. Wapote 802.15.4 Networking Guide.
- Murthy, C.S.R., Manoj, B.S., 2004. Ad Hoc Wireless Networks: Architectures and Protocols. Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, NJ, USA.
- Popelka, S., Brychtova, A., Svobodova, J., Brus, J., Dolezal, J., 2013. Advanced visibility analyses and visibility evaluation using eye-tracking, in: 2013 21st International Conference on Geoinformatics. Presented at the 2013 21st International Conference on Geoinformatics, pp. 1–6. doi:10.1109/Geoinformatics.2013.6626176
- Příbylová, T., 2012. Metody rozhodování za rizika a jejich použití v ekonomické praxi.
- Sausen, P.S., Spohny, M.A., Perkusichy, A., 2008. Energy efficient blind flooding in wireless sensors networks, in: Industrial Electronics, 2008. IECON 2008. 34th Annual Conference of IEEE. IEEE, pp. 1736–1741.
- Scheideler, C., 2007. Overlay networks for wireless ad hoc networks, in: Wireless Communications. Springer, pp. 237–258.
- Štěrba, Z., Šašinka, Č., Stachoň, Z., Kubíček, P., Tamm, S., 2014. Mixed Research Design in Cartography: A Combination of Qualitative and Quantitative Approaches 64.
- Stojkoska, B.R., 2014. Nodes Localization in 3D Wireless Sensor Networks Based on Multidimensional Scaling Algorithm, Nodes Localization in 3D Wireless Sensor Networks Based on Multidimensional Scaling

Algorithm. Int. Sch. Res. Not. Int. Sch. Res. Not. 2014, 2014, e845027.  
doi:10.1155/2014/845027, 10.1155/2014/845027

Stojmenović, I. (Ed.), 2005a. Handbook of sensor networks: algorithms and architectures. Wiley, Hoboken, NJ.

Stojmenović, I. (Ed.), 2005b. Handbook of sensor networks: algorithms and architectures. Wiley, Hoboken, NJ.

Suchánek, J., 2014. THE CONCEPT OF WIRELESS SENSOR NETWORK FOR EARLY WARNING IN THE CASE OF ACCIDENTAL RELEASES [WWW Document]. <http://sgem.org/sgemlib>. URL <http://www.sgem.org/sgemlib/spip.php?article4615> (accessed 3.10.17).

Talašová, J., 2003. Fuzzy metody vícekritériálního hodnocení a rozhodování. UP Olomouc

## Odborný životopis autora / Curriculum vitae

### OSOBNÍ ÚDAJE / PERSONAL INFORMATION

---

Jméno / Name	Vendula Hejlová
Bydliště / Address	Smetanova 756/49, Valašské Meziříčí, 75701
E-mail / E-mail	venda.hejlova@gmail.com
Narozen / Birth	8. 8. 1987, Valašské Meziříčí

### VZDĚLÁNÍ / EDUCATION

---

2012–dosud	Univerzita Palackého v Olomouci, <b>doktorské studium, obor Geoinformatika a kartografie / PhD study Geoinformatics and Cartography</b>
2010–2012	Univerzita Palackého v Olomouci, navazující <b>Mgr. studium, obor Geoinformatika / Master's degree: specialization Geoinformatics</b>
2007–2010	Univerzita Palackého v Olomouci, <b>Bc. studium, obor Geografie-Geoinformatika / Bachelor's degree: Geography–Geoinformatics</b>

### PRAXE / EXPERIENCE

---

2016–dosud	Ústav pro hospodářskou úpravu lesu Brandýs nad Labem, pobočka Kroměříž (projektant v Analytickém centru NIL/ <i>designer</i> )
2014–2015	Univerzita Palackého v Olomouci, projekt OP VK StatGIS team (vědecký pracovník / <i>researcher</i> ) <i>Budování výzkumně-vzdělávacího týmu v oblasti modelování přírodních jevů a využití geoinformačních systémů, s vazbou na zapojení do mezinárodních sítí a programů</i>
2015	IGA 2015 ( <i>Pokročilá integrace senzorových sítí a bezkontaktního monitoringu krajiny v oblasti precizního zemědělství</i> )
2013	IGA 2013 ( <i>Statistické inference nad daty ze senzorů a senzorových sítí - předzpracování, modelování, verifikace</i> )

### VÝUKOVÉ AKTIVITY / TEACHING

---

2012–2016	cvičení na Katedře geoinformatiky UP: cvičení na Katedře geoinformatiky UP: Programové prostředky, Geoinformatika ve fyzické geografii, Modelování a simulace, Modelování přírodních hazardů, Geoinformační technologie <i>seminars of: GIS, Geoinformatics in Physical Geography, Modelling and Simulation, Natural Hazards modelling, Geoinformation technologies</i>
-----------	--

### STÁŽE / MOBILITY

---

2013	Politecnico di Torino
2014	University of Cambridge
2015	Jagiellonian University in Cracow

## Seznam vybraných publikací autora souvisejících s disertační prací / Author's selected publications related to the dissertation

### **Publikace v konferenčním sborníku v databázi ISI Proceedings (D)**

Papers in conference proceedings on the database ISI Proceedings (D)

HEJLOVÁ, V.: Spatial Distribution of Wireless Sensor Nodes in the Urban Environment, Scitepress Digital Library, Lisabon, 2014.

### **Publikace z konferencí na Web of Science**

Papers in conference proceedings on the database Web of Science (Jneimp)

HEJLOVÁ V., VOŽENÍLEK V. Selection of Nodes and Sensors for Monitoring of Air Pollutants Related to City Traffic. 5th International Conference on Innovations in Bio-Inspired Computing and Applications, IBICA 2014. 2014, vol. 303, pp. 251-260, ISSN 21945357 ; 9783319081557 (ISBN). ISBN 21945357 (ISSN); 9783319081557. DOI 10.1007/978-3-319-08156-4\_25.

HEJLOVÁ, V.: Determination of Criteria Weight Values for Monitoring of Air Pollutants Related to Traffic, Conference Proceedings Vol. 3, SGEM, Albena, 2014.

HEJLOVÁ, V.: Application of Wireless Sensor Network for Temperature and Humidity Monitoring, Conference Proceedings Vol. 1, SGEM, Albena, 2014.

HEJLOVÁ, V., POHANKA, T., BUTAZZO, W., PECHANEC, V., NWAUOGU, CH. Communication Distance of Jennic Wireless Nodes in the Small Area. Conference Proceedings, Vol. 1, SGEM, Albena

POHANKA, T., PECHANEC, V., HEJLOVÁ, V.: Python Web Server for Sensor Data Visualization. SGEM, Albena

HEJLOVÁ, V., POHANKA, T.: Configuration of Wireless Sensor Network in Olomouc. GIS Ostrava 2017 (Lecture Notes in Geoinformation and Cartography Series)

### **Článek v odborném časopise**

HEJLOVÁ, V., VOŽENÍLEK, V.: Wireless Sensor Network Components for Air Pollution Monitoring in the Urban Environment: Criteria and Analysis for Their Selection, Wireless Sensor Network, Vol. 5 No. 12, 2013, pp. 229-240. doi: 10.4236/wsn.2013.512027.

### **Domácí recenzované publikace**

HEJLOVÁ, V., VOŽENÍLEK, V.: Současný stav výzkumu klimatu městského prostředí ve světě. Meteorologické zprávy, 5, 2015.

MĚŘIJOVSKÝ, J., BRUS, J., HEJLOVÁ, V., POHANKA, T. Hodnocení vývoje zemědělských plodin na základě dat DPZ. Mapa, 2015. IGA\_PrF\_2015\_012/2

### **Publikace v konferenčním sborníku domácí (ostatní)**

Papers in conference proceedings – Czech (other)

HEJLOVÁ, V., MĚŘIČKOVÁ, J.: Nasazení bezdrátové senzorové sítě pro monitoring vzdušných polutantů produkovaných dopravou v městském prostředí, Sborník abstraktů s ISBN, 2014. Geomatika v projektech.

HEJLOVÁ, V.: Bezdrátová senzorová síť sledující znečištění ovzduší. Sborník GIS Ostrava. VŠB-TU Ostrava. Ostrava, 2015. GIS Ostrava.

HEJLOVÁ, V.: Mapové podklady pro vizualizaci umístění bezdrátových uzlů a překážek v jejich umístění. Kartografická konference v Lednici. Sborník abstraktů, 2015

HEJLOVÁ, V.: Bezdrátová senzorová síť – nová technologie získání podkladů pro klima města? Sborník abstraktů, 2015. GIS v plánování měst a regionů.

HEJLOVÁ, V.: Bezdrátová senzorová síť ve městě – od výběru komponent přes konfiguraci až po sběr environmentálních dat. Sborník abstraktů, 2016. Geomatika v projektech.

HEJLOVÁ, V.: Bezdrátová senzorová síť pro monitoring meteorologických prvků v Olomouci. Sborník abstraktů, 2016. GIS v plánování měst a regionů.

## **Ostatní publikace autora / Another author's publications**

### **Zahraniční publikace / Foreign publications**

### **Domácí publikace / Czech publications**

HEJLOVÁ, V., MIŘIJOVSKÝ, J., PECHANEC, V.: Monitoring a modelování povrchového odtoku s využitím GIS. Sborník GIS Ostrava 2013. VŠB – TU Ostrava. Ostrava, 2013.

HEJLOVÁ, V., MĚŘIČKOVÁ, J.: Měření a vizualizace průtoku malého vodního toku, Praha, 2014. Sjezd ČGS.



## Annotation

The aim of the thesis was to construct and evaluate wireless sensor network for meteorological and air pollution monitoring in city environment.

The first part of this thesis was focused on the definition of the purpose of wireless sensor network in Olomouc. Criteria for wireless sensor network components selection were determined. Commercially offered products were analysed. The selection of the most suitable components for Olomouc wireless sensor network was done using multicriteria analysis.

Communication protocols for the effective data sending were developed. Communication algorithms for outdoor environment are not effective so that author designed two algorithms dealing with technical and terrain parameters on the basis of graph theory. The basemap for wireless sensor network visualization was selected during the eye-tracking experiment.

The communication protocols were developed and tested. The nodes were situated on wooden bars in two clusters within the city. The first cluster was located in the center of Olomouc City, in the Faculty of Science Campus. The second cluster was situated in the uptown part of the city, in Scientific Park of Palacký University. Technical parameters of nodes were tested. These technical parameters included definition of the communication least loaded channel in the 2.4 GHz range, definition of battery consumption under different scenarios, determination of Received Signal Strength Indication (RSSI) using antennas with different capacity, determination of data delivery ratio (DDR).

Thematic part of data was evaluated. The attention was aimed at comparison of measured values with etalon data. Sensors connected to Smart Environment nodes were less equal and suitable for measurements than sensors connected to the other models. Temperature and humidity data from the clusters showed the average variability of temperature and humidity values in the two Olomouc clusters. Chemical sensors were not calibrated so that they showed relative data comparable only within the concrete sensor. Trends in the course of the concrete sensor values can be discovered. Combination of this data with wind speed and direction values is the demanded part because these plots model the situation and shows the sectors with the highest pollution.

Keywords: wireless sensor network, distribution of nodes, monitoring

## Summary

The aim of the thesis „*Wireless Sensor Network for Air Pollution Monitoring in the Center of Olomouc City*“ was to construct and evaluate wireless sensor network for meteorological and air pollution monitoring in city environment.

Wireless sensor networks are new fast evolving technology, that has been developed during the cold war by the American Army (Chong and Kumar, 2003). This technology has been widely used for monitoring of the environment. Wireless sensor networks are closely connected to the phenomenon of these days - „Smart Cities“, cities with processes driven by sensors. The goal of the concept is to decrease the energy consumption and enable the adaptation of the city to the needs of inhabitants. „Smart Cities“ are being developed despite the fact that the distribution of nodes in the urban environment is problematic due to a lot of factors influencing their distribution. The biggest advantage of wireless sensor network is the real time monitoring and the possibility of monitoring in hardly accessible areas. The mentioned facts and authors previous experience with monitoring lead to the idea of using this technology to city climate monitoring. City climate is an important component of city environment. It has a huge influence on the health and composure of the inhabitants, fauna, flora and even on the immaterial objects within the city. The climatic research is focused on two major phenomenon – Urban Heat Island (UHI) and Urban CO<sub>2</sub> Dome (Hejlová and Voženilek, 2015).

The whole process from selection to evaluation of data obtained by the wireless nodes is described in four major aims of this dissertation thesis.

### **Aim 1 – Selection of wireless sensor network components**

#### **Aim 2 – Distribution of wireless nodes**

#### **Aim 3 – Wireless sensor network configuration**

##### **Aim 3a - Tests of Olomouc wireless sensor network**

##### **Aim 3b - Data pre-processing and saving**

#### **Aim 4 – Data processing and visualization**

### **Aim 1 – Selection of wireless sensor network components**

The selection of the wireless sensor network components is very important, it is a crucial decision. The measurements will be performed on its basis. First of all, the elementary parameters of the wireless sensor network have to be determined. These parameters include:

- determination of the purpose of wireless sensor network building,
- selection of the nodes localization (the region of interest),

- computation of area of the region of interest,
- determination of the number of nodes,
- search for the producers (analyzing commercially offered components and comparing their functionality),
- definition of the criteria for the evaluation of selected commercially offered components,
- definition of the most suitable parameters of criteria for the intended wireless sensor network,
- comparison of parameters of criteria to offered options to the ideal (suggested) one (intended configuration).

The most suitable components for the related application selection process were not described in any article relating to wireless sensor network applied for meteorological and air pollution monitoring under real conditions. The multicriteria decision-making process is the most suitable method for the optimal option determination. A criterion in a decision-making process is the scale used for the comparison of the chosen option parameters. The importance of every criterion which is a basis for the determination of its weight is identified (Talašová, 2003; Přibyllová, 2012). Definition of the most suitable parameters for all the options is necessary, the utility of the options is computed from these data.

**Results of the Aim 1 are:**

- survey on wireless sensor network for air pollution monitoring
- determination of Olomouc wireless sensor network purpose
- determination of criteria for wireless sensor network components selection
- design of ideal criteria Olomouc wireless sensor network values
- multicriteria analyse determining the most suitable option for Olomouc monitoring

**Aim 2 – Distribution of wireless nodes**

The third dimension describing terrain characteristics is more and more often considered in the distribution process of wireless nodes. According to Akyildiz et al. (2002) factors influencing the distribution of wireless nodes in the second dimension are: fault tolerance, scalability, production costs, hardware constraints, topology, environment, transmission media and power consumption. Wireless nodes in the real world are usually distributed in a 3-dimensional field containing different kinds of obstacles and terrain proportions.

First of all, algorithm describing the equal distribution of nodes in the terrain is proposed. This algorithm deals with the reliable communication distance, definition of the starting point (SP) and borders of the region of interest. This algorithm does not include terrain parameters. It is a tool for definition of ideal number of nodes situated in the region of interest.

Communication in wireless sensor network can be described by a graph. Vertices in the graph symbolize nodes and edges depict communication paths among nodes.

Graphs effectively used in distribution process of wireless nodes are UDG and YG. UDG defines a circle around the nodes. The size of the circle is defined by the unit which is the same for all the nodes in the wireless network. This unit is either the communication distance or the average count of neighbours per one node. At least one other wireless node is situated in this circle. The nearest node in the circle is a communication neighbour of the first node (Stojmenović, 2005b). The first node from which the distribution process begins is called starting point (SP). Construction of UDG is determined by the starting point (SP) and a communication distance. Tree topology is used for communication in this type of graph. Space around all wireless nodes is segmented into sectors in YG. All the sectors have the same angle size. Every node communicates with the nearest node in each sector. The communication distance is declared by circles around the nodes. The space around SP is covered equally by nodes. Construction of YG is determined by SP, communication distance and count of sectors (size of the angle) (Scheideler, 2007; Stojmenović, 2005b).

The most suitable basemap for displaying the wireless sensor network thematic content and the basemap showing the obstacles in the communication path were chosen during the eye-tracking experiment.

#### **Results of the Aim 2 are:**

- grid distribution algorithm
- graph based algorithms dealing with technical nodes parameters and terrain proportions
- evaluation of the most suitable basemap for nodes distribution, determination of basemap showing the information about obstacles in communication path

#### **Aim 3 – Wireless sensor network configuration**

##### **Aim 3a – Tests of Olomouc wireless sensor network**

This part is aimed at suggestion of communication protocols for the most important communication between nodes and gateway. Two kinds of communication protocols were suggested for every node model. The first kind of protocol was generated with the code generator and adjusted. The second one was more sophisticated and used frames for data transmission. Other protocols dealt with battery charging, generating RSSI values, communication among

nodes, getting temperature, relative humidity and CO<sub>2</sub> values during the calibration process.

It was considered that the nodes will be distributed in two clusters in Olomouc City. The first cluster is situated in the uptown part of Olomouc, the second one is in the center of the city. Technical parameters of the nodes were verified. These technical parameters included determination of the communication least loaded channel, tests of battery life under different scenarios, RSSI tests and definition of data delivery ratio.

### **Aim 3b – Data pre-processing and saving**

Structure of the primary databases integrated to the both gateway was described. The new external database for synchronizing of data from the primary databases was developed. Filters dealing with rough and systematic errors in the primary data were described. Data from this database can be used directly in the research.

### **Results of the Aim 3 are:**

#### **Aim 3a – Tests of Olomouc wireless sensor network**

- communication protocols
- distribution of nodes in the terrain in two clusters
- determination of the communication least loaded channels
- battery life evaluation under different indoor and outdoor scenarios
- RSSI tests using two types of antenna
- determination of DDR for the nodes positions

#### **Aim 3b – Data pre-processing and saving**

- description of the primary database structure
- suggestion of structure of the new external database
- filter detecting rough and systematic errors in data

#### **Aim 4 – Data processing and visualization**

This part is aimed at processing and visualization of measured values. This aim is concentrated on visualization of obtained data. First of all, precision of measured values is solved. This data is compared with reference values from stationary station performed by Czech Hydrometeorological Institute. The attention is aimed at temperature and relative humidity values in the both clusters. Secondly, work with no calibrated chemical sensor is described.

### **Results of the Aim 4 are:**

- verification data obtained by wireless sensor network
- comparison of temperature and relative humidity values in the both clusters to the indication of „Urban Heat Island“

- description of work with no calibrated chemical sensors
- visualization of trends in chemical data, visualization of chemical data together with meteorological data and stationary sources of pollution

## Conclusion

Technological progress causes that new technologies for outdoor monitoring are coming out. These technologies are not used only for monitoring but they are becoming a part of Smart Cities. The goal of this concept is to make humans lives more comfortable so that wireless monitoring becomes very important. This kind of monitoring was selected for meteorological monitoring in Olomouc.

The aim of this dissertation thesis was to create and verify wireless sensor network in Olomouc. The thesis solves the whole process of wireless sensor creation from selection of wireless sensor network components to processing and visualization of the data. The thesis was divided to four aims.

First of all, wireless sensor network producers were searched. The attention was aimed at technical parameters of commercially offered products. Criteria for evaluation of commercially offered components were suggested. The optimal values of criteria for Olomouc wireless sensor network were defined. The multicriteria analysis with the utility function determined the utility of commercially offered product for Olomouc. The highest utility was calculated for Waspnote Plug and Sense nodes (models Smart Environment, Smart Agriculture and Smart Agriculture PRO), produced by Spanish Company Libelium. These nodes monitored temperature, relative humidity, precipitation, solar radiation, wind speed and direction, CO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, VOC and selected air pollutants with Air Pollutants 2 sensor. IEEE 802.15.4 was the used communication protocol. These nodes were encapsulated so that they were directly used for outdoor monitoring.

Distribution of nodes in outdoor environment is influenced by a lot of factors including technical parameters of nodes and terrain proportions. Distribution of nodes taking into account technical parameters of nodes nad terrain proportion was done on the basis of Unit Disk Graph and Yao Graph. Very limiting factor for distribution of nodes outdoor is criminality because these devices are very often stolen. Orthophoto was selected as the most suitable basemap displaying thematic content during the eye-tracking experiment.

The communication protocols were developed and loaded to the nodes. It was decided that the nodes will be situated in two clusters in Olomouc. The first cluster was situated in the uptown and the second in the center of the city. Seven positions for nodes were situated in the first cluster, one position for node was situated in the second cluster. The nodes were not situated in all positions all the time, this was caused by the small number of nodes owned by the Department

of Geoinformatics. Every cluster had one gateway for data gathering. The most important technical parameters of the wireless sensor network were tested. These parameters included determination of the least loaded communication channel in the both clusters, investigation of battery consumption under different scenario, RSSI tests and data delivery ratio evaluation. The selection of the communication least loaded channel increased data delivery ratio. The results showed that the highest influence on the distribution of nodes had obstacles situated in the communication path. Distance between communicating nodes had the second highest influence on data success delivery and battery consumption. The reliable communication distance for Olomouc wireless sensor network was set to 100 meters. Other parameters such as recording interval, number of sensors were considered during the technical parameters tests. These tests should be done at the beginning of wireless sensor network configuration because the positions with high reliability of data delivery were identified.

Data from the gateway in the both clusters were sent to the external database. This database was synchronized with the primary databases in the gateways. Data were filtered from rough and systematic errors.

The thematic data obtained by the wireless sensor network were evaluated and visualized. First of all, determination of measured data precision was done. The temperature and relative humidity data were compared with data from the Czech Hydrometeorological Institute. The precision of temperature and humidity sensors connected to Smart Environment model was low even after the calibration process. Relative humidity sensors showed values over 100 % so that these values were filtered. Correlation coefficients for temperature sensors were high for Smart Agriculture models. Secondly, temperature and humidity values from both clusters were compared. Higher daily and monthly temperatures occurred in the first cluster but the differences in the temperature values were not as high as expected. Relative humidity values were higher in 98 % in the first cluster. Data from chemical sensors were only relative. So that sensor resistance was declared, this sensor resistance showed the real changes in gases concentration. The trends in their courses were investigated and sources of them were investigated.

Wireless sensor network is very fast evolving and dynamic technology. The hardware and software parts has to be aimed at the concrete application and the life of these components is not so long so that these parts have to be altered. The huge advantage is online monitoring and the possibility of easy relocation of the sensors after technical parameters investigation.

Vendula Hejlová

**Bezdrátová senzorová síť pro monitoring ovzduší ve středu města Olomouce  
(E-BOSS)**

**Wireless Sensor Network For Air Pollution Monitoring in the Center of Olomouc  
City**

Určeno pro studenty, partnerská akademická pracoviště a veřejnost.

Výkonný redaktor: prof. RDNr. Zdeněk Dvořák DrSc.et Ph.D.

Odpovědná redaktorka: Mgr. Lucie Loutocká

Technická redakce: Mgr. Vendula Hejlová

Publikace neprošla redakční jazykovou úpravou.

Vydala a vytiskla Univerzita Palackého v Olomouci

Křížkovského 8, 771 47 Olomouc

[www.vydavatelstvi.upol.cz](http://www.vydavatelstvi.upol.cz)

[www.e-shop.upol.cz](http://www.e-shop.upol.cz)

[vup@upol.cz](mailto:vup@upol.cz)

1. vydání

Olomouc 2017

Edice GEOINFO-CARTO-THESIS, svazek XII.

ISSN 1805-7500

ISBN 978-80-244-5162-6

Neprodejná publikace