


# Řízení rizik ve vybrané oblasti – měření polutantů v pracovním prostředí

Bc. Lukáš Mařík

---

Diplomová práce  
2023

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta logistiky a krizového řízení

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta logistiky a krizového řízení  
Ústav krizového řízení

Akademický rok: 2022/2023

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	<b>Bc. Lukáš Mařík</b>
Osobní číslo:	<b>L21279</b>
Studijní program:	<b>N1032A020002 Bezpečnost společnosti</b>
Specializace:	<b>Rizikové inženýrství</b>
Forma studia:	<b>Kombinovaná</b>
Téma práce:	<b>Měření polutantů v pracovním prostředí</b>

## Zásady pro vypracování

1. Zpracujte teoretický vstup do řešené problematiky.
2. Navrhněte a vytvořte zařízení pro měření škodlivin.
3. Realizujte měření škodlivin ve zvoleném prostředí.
4. Vyhodnotte získané výstupy.

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

**Seznam doporučené literatury:**

1. AKHTAR, Rais a Cosimo PALAGIANO, ed.. *Climate Change and Air Pollution: The Impact on Human Health in Developed and Developing Countries*. Cham (Switzerland): Springer International Publishing, 2018. ISBN 978-3-319-61346-8.
2. PLUSCHKE, Peter a Hans SCHLEIBINGER, ed.. *Indoor Air Pollution*. Second Edition. Berlin (Germany): Springer-Verlag GmbH Germany, 2018. ISBN 978-3-662-56065-5.
3. SKÁČEL, František a Viktor TEKÁČ. *Analýza ovzduší*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2019. ISBN 978-80-7592-038-6.

Další odborná literatura dle doporučení vedoucího diplomové práce.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jakub Rak, Ph.D.**  
Ústav ochrany obyvatelstva

Datum zadání diplomové práce: **1. prosince 2022**  
Termín odevzdání diplomové práce: **28. dubna 2023**

L.S.

---

**doc. Ing. Zuzana Tučková, Ph.D.**  
děkanka

---

**Ing. et Ing. Jiří Konečný, Ph.D.**  
ředitel ústavu

V Uherském Hradišti dne 2. prosince 2022

## PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

- diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem diplomové práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

### Prohlašuji,

- že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

V Uherském Hradišti, dne: 20.4.2023

Jméno a příjmení studenta: Bc. Lukáš Mařík

.....  
podpis studenta

## **ABSTRAKT**

Tato diplomová práce se zabývá monitoringem a hodnocením kvality vnitřního vzduchu. V teoretické části jsou uvedeny teoretické základy problematiky měření a hodnocení vzdušných polutantů. V praktické části je popsána konstrukce zařízení k měření vzdušných polutantů, která je následně použita pro měření a hodnocení kvality vnitřního vzduchu. V závěru praktické části jsou uvedeny výsledky měření, definovány vztahy mezi jednotlivými měřenými veličinami a navržena okamžitá a dlouhodobá nápravná opatření, při jejichž realizaci dojde ke zlepšení výchozího stavu.

Klíčová slova: polutanty, kvalita vnitřního vzduchu, monitoring, měřící zařízení

## **ABSTRACT**

The diploma thesis deals with monitoring and quality evaluation of the indoor air, which directly influences human health. The theoretical facts of the measurement and evaluation of the air pollutants are introduced in the theoretical part. Construction of the device used to air pollutants measurement is described in the practical part. The device is later used to measure and evaluate the quality of indoor air. The results of measurements are presented in the summary of the practical part together with the definition of the relations between the particular measured values. Then the immediate and long-term corrective actions which improve the starting position are proposed.

Keywords: pollutants, indoor air quality, monitoring, measurement device

Na tomto místě bych rád poděkoval především vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Jakubu Rakovi, Ph.D. za poskytnutí tématu, odborné vedení, cenné rady a trpělivost při vytváření diplomové práce. Dále bych rád poděkoval celé své rodině za podporu během studia.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

## **OBSAH**

<b>ÚVOD.....</b>	<b>8</b>
<b>CÍL PRÁCE A POUŽITÉ METODY.....</b>	<b>9</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST.....</b>	<b>11</b>
<b>1 VZDUŠNÉ POLUTANTY A JEJICH VLIV NA LIDSKÉ ZDRAVÍ.....</b>	<b>12</b>
1.1 PRÁVNÍ RÁMEC.....	12
1.2 PLYNY.....	13
1.3 POLYCYKLIČKÉ AROMATICKÉ UHLOVODÍKY .....	23
1.4 TĚKAVÉ ORGANICKÉ SLOUČENINY .....	25
1.5 ČÁSTICE VE VZDUCHU .....	33
<b>2 MĚŘENÍ KONCENTRACÍ VZDUŠNÝCH POLUTANTŮ.....</b>	<b>37</b>
2.1 SENZORY PLYNŮ .....	37
2.2 SNÍMAČE PM.....	40
2.3 HODNOCENÍ KVALITY OVZDUŠÍ.....	40
2.4 PREVENTIVNÍ OPATŘENÍ KE ZLEPŠENÍ KVALITY VNITŘNÍHO VZDUCHU .....	43
<b>ZÁVĚR TEORETICKÉ ČÁSTI .....</b>	<b>45</b>
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST.....</b>	<b>48</b>
<b>3 ZAŘÍZENÍ PRO MĚŘENÍ VZDUŠNÝCH POLUTANTŮ.....</b>	<b>49</b>
3.1 MĚŘÍCÍ JEDNOTKA.....	50
3.2 NAMĚŘENÁ DATA.....	59
3.3 KOMUNIKACE S MĚŘÍCÍ JEDNOTKOU .....	61
3.4 OVLÁDACÍ PROGRAM PRO PC.....	65
3.5 PROVOZ ZAŘÍZENÍ .....	70
<b>4 MĚŘENÍ POLUTANTŮ NA PRACOVIŠTI.....</b>	<b>73</b>
4.1 MĚŘENÍ NA PRACOVIŠTI .....	73
4.2 ANALÝZA DAT.....	76
4.3 VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ A NÁVRHY NA ZLEPŠENÍ.....	94
<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>99</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>101</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>108</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ.....</b>	<b>109</b>
<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>111</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>113</b>

## ÚVOD

V posledních letech je mezi lidmi, kteří si váží zdravého života, stále větší poptávka po čistém vzduchu. Pokud jde o kvalitu ovzduší, většina z nich se oprávněně obává znečištění atmosféry, ale mají tendenci zapomínat na znečištění vnitřního ovzduší. Být doma, nebo v kanceláři, nás před znečištěným ovzduším nechrání. Pandemie nám připomněla, abychom se náležitě starali o kvalitu ovzduší ve škole, v kanceláři i doma. A to z dobrého důvodu: vzduch, který dýcháme, ovlivňuje to, jak se učíme, pracujeme a relaxujeme. Vzhledem k tomu, že trávíme 80 až 90 % našeho času v uzavřených prostorech, měření a kontrola kvality vnitřního vzduchu by neměla být považována za druhořadý problém. Kromě venkovního vystavení výfukovým plynům, ozónu nebo pesticidům (které mají vliv na kvalitu vnitřního ovzduší), mohou různé zdroje ovlivnit kvalitu vnitřního vzduchu, včetně stavebních materiálů, skladovaných chemikálií, kondenzace vody, prachu a barev. Bohužel v mnoha částech světa je kvalita vzduchu uvnitř budov ve skutečnosti horší než venku a tento koktejl znečištěného vzduchu ovlivňuje naši pohodu, naše každodenní činnosti, naše fyzické a duševní zdraví, což má za následek menší osobní svobodu. Dýchat čistý vzduch je nezbytné, ve skutečnosti by to mělo být základní lidské právo. V mnoha zemích po celém světě je na veřejných prostranstvích zakázáno kouření, naše kuchyně jsou vybaveny digestoři a máme tendenci zavírat okna obrácená směrem k silnici kvůli hluku. Ve skutečnosti je pohoda často považována za důležitější než čistota, pokud jde o vnitřní vzduch. Máme tendenci se starat nejvíce o nevíтанé pachy, teplotu a úroveň vlhkosti, když jste doma nebo v kanceláři. Větší hotely a nákupní centra osvěžují svůj větraný vzduch a zákazníci se tak cítí pohodlněji. Poptávka po čistém vnitřním vzduchu však celosvětově roste, i když se to v jednotlivých regionech liší. Vznikající systémy hodnocení kvality vnitřního ovzduší ve veřejných budovách a hotelech jsou důkazem tohoto rostoucího povědomí. To se týká i technologických možností, které jsou neustále se vyvíjející od drahých nástrojů k dostupným spotřebitelským zařízením. Díky cenově dostupnému kontinuálnímu měření kvality vzduchu, se stávají nákladná jednorázová měření prováděná specializovanými firmami zastaralými. Inteligentní řešení připojená k internetu věci se brzy stanou standardem pro mnoho lidí v digitalizovaných zemích. Nejen veřejné budovy budou vybaveny technologiemi, které poskytují pohledy založené na datech nájemcům, zaměstnancům nebo hostům, ale v blízké budoucnosti budou tato řešení využívat i soukromé byty a domy.



## CÍL PRÁCE A POUŽITÉ METODY

Téma práce nebylo vybráno náhodně, nýbrž se zcela jasným cílem. Tím je provést posouzení kvality vnitřního vzduchu v budově Základní školy a Mateřské školy ve Velkém Újezdě. Požadavek na toto posouzení vzešel z diskuse mezi autorem práce a ředitelem školy, kdy byl během tvorby rozpočtu pro rok 2023 posuzován požadavek ředitele školy na navýšení rozpočtu školy o cca 400 tisíc Kč z důvodu zvýšení cen energií. Hlavním argumentem bylo tvrzení ředitele školy, že z důvodu větrání ve třídách během přestávek, kdy je nahrazován vydýchaný vnitřní vzduch vzduchem venkovním, dochází ke zvýšené spotřebě zemního plynu na topení. Délka větrání je však dána pouze pocitově, tedy každý větrá dle svého uvážení, jelikož neexistují žádná jasná pravidla, jak dlouho větrat. Není tedy nijak exaktně stanoveno nakolik větrání ovlivňuje kvalitu vzduchu ve třídách. Měření, které by poskytlo potřebné podklady lze samozřejmě zajistit prostřednictvím autorizované firmy, avšak toto je jednak finančně náročné a také čas měření je omezen na několik hodin, tedy výsledky mají vypovídající hodnotu pouze pro tento časový úsek. Proto se autor rozhodl pro vytvoření zařízení, které poskytne potřebná data, která bude možné analyzovat a poté stanovit jasná pravidla a nápravná opatření pro zajištění kvalitního vnitřního vzduchu v celé budově školy.

Na základě teoretických poznatků získaných metodou literární rešerše bude zpracován teoretický vstup do problematiky měření škodlivin. Pro každý z hlavních polutantů budou zjištěny jeho chemické a fyzikální vlastnosti, možné zdroje emisí, účinky na lidské zdraví a způsoby měření jeho koncentrace v ovzduší. Dále bude proveden souhrn požadavků na kvalitu vnitřního ovzduší dle platných právních předpisů České republiky a za účelem správného definování opatření pro zlepšení kvality vnitřního vzduchu v praktické části budou v závěru teoretické části shrnuta doporučení, která uvádí odborná literatura.

V praktické části práce je cílem navrhnout a vytvořit konstrukci zařízení pro měření vybraných vzdušných polutantů. Metodou měření a následně metodou komparace, s daty z etalonu pro jednotlivé měřené veličiny, bude vyhodnocena přesnost a použitelnost vytvořeného zařízení. S takto ověřeným zařízením bude provedeno měření vybraných vzdušných polutantů ve vybrané třídě. Následně dojde k vyhodnocení naměřených dat dle limitů stanovených v platných právních předpisech. Metodou analýzy budou popsány vztahy jednotlivých veličin a metodou syntézy budou stanoveny závislosti jednotlivých veličin. Na základě stanovených závislostí budou navržena opatření pro zlepšení kvality vnitřního vzduchu a zároveň pro snížení energetické spotřeby základní školy. Pro účely měření kvality vnitřního vzduchu budou v realizovaném zařízení použity senzory pro teplotu

a vlhkost vzduchu, polétavý prach, koncentraci oxidu uhličitého a koncentraci organických těkavých látek. Výskyt vzdušných polutantů, jako je oxid uhelnatý, oxid siřičitý, oxidy dusíku, ozón a dalších se vzhledem k povaze monitorovaných prostor nepředpokládá. Taktéž cena senzorů na měření dalších polutantů by zvýšila neúměrně cenu navrhovaného měřicího zařízení, které bude navrženo tak, aby byla realizovatelné za přijatelnou cenu. Nicméně, stanice pro měření vzdušných polutantů bude navržena jako rozšířitelná a stanici lze tedy do budoucna možné doplnit o libovolné existující senzory a čidla s datovou sběrnici I<sup>2</sup>C či SPI.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 VZDUŠNÉ POLUTANTY A JEJICH VLIV NA LIDSKÉ ZDRAVÍ

Do nedávné minulosti byla hlavní motivace pro sledování a měření kvality vzduchu v uzavřených místnostech spojena s kontrolou a měřením přítomnosti, a v případě jejich výskytu i koncentrací, látek nebezpečných lidskému zdraví. Šlo tedy především o zajištění bezpečných pracovních podmínek na pracovišti. V dnešní době se dostává do popředí dlouhodobé zajištění zdravého prostředí v každodenním životě, včetně zajištění kvalitního vzduchu v místě výkonu práce a v domácnostech. Výzkumy zjišťují, že i velmi malé koncentrace různých látek mohou, díky dlouhodobému působení, poškozovat lidské zdraví. (Vojáček, 2019)

### 1.1 Právní rámec

Kvalitou vzduchu v místnostech se odborně na různých úrovních zabývá hned několik různých organizací a institucí. V ČR jsou aktuálně platné následující právní předpisy:

**Zákon č. 201/2012 Sb. o ochraně ovzduší** – uvádí imisní limity, které jsou závazné pro orgány ochrany ovzduší a je definován počet jejich překročení za kalendářní rok. (Zákon č. 201/2012 Sb., 2012)

**Zákon č. 258/2000 Sb. o ochraně veřejného zdraví** – upravuje práva a povinnosti fyzických a právnických osob v oblasti ochrany a podpory veřejného zdraví a soustavu orgánů ochrany veřejného zdraví. (Zákon č. 258/2000 Sb., 2000)

**Zákon č. 263/2016 Sb. atomový zákon** – stanovuje maximální příkon prostorového dávkového ekvivalentu v obytné nebo pobytové místnosti pro radon. (Novák, 1997)

**Nařízení vlády č. 361/2007 Sb., kterým se stanoví podmínky ochrany zdraví při práci** – definuje nejvyšší přípustné koncentrace plynů a par s toxickým účinkem v pracovním prostředí. To udává tzv. PEL hranici (přípustný expoziční limit), což je limit, při kterém je povoleno pracovat 8 hodin denně / 5 dní v týdnu, a NPK-P limit (nejvyšší přípustná koncentrace), což je nejvyšší přípustná koncentrace na pracovišti. (Nařízení vlády č. 361/2007 Sb., 2007)

**Vyhláška Ministerstva zdravotnictví č. 6/2003 Sb.** – stanovuje hygienický limit pro vnitřní prostředí pobytových místností v  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . (Vyhláška č. 6/2003 Sb., 2003)

V žádném z výše uvedených předpisů není nařízeno kontinuální měření koncentrací vzdušných polutantů uvnitř běžných budov, nicméně vyžaduje se dodržování stanovených limitů.

Dále jsou tu postupně se měnící a upřesňující doporučení WHO vydávající různé doporučující zprávy a pak doporučující i limitní závazné zákony a vyhlášky EU, resp. s nimi spojené zákony jednotlivých zemí EU. (Vojáček, 2019)

WHO vydala knihu **WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants**, kde je detailně řešen nejen vznik polutantů a jejich vliv na zdraví, ale je zde řešena i problematika odstranění jejich negativního vlivu v uzavřených místnostech. Celkem bylo vytipováno devět plynných látek. (WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants, 2010)

Pro úplnost následujícího seznamu vzdušných polutantů je tento doplněn o oxid uhličitý, který bude monitorovaným plynem v praktické části práce.

## 1.2 Plyny

Vzduch je směs plynů tvořící plynný obal Země – atmosféru – sahající až do výše asi 100 km. Ovlivňuje chemické reakce jak v neživé přírodě, tak i v živých organismech. Zvýšená koncentrace níže uvedených plynů může mít dopad na lidské zdraví.

Nejběžnějšími sloučeninami dusíku a kyslíku jsou oxid dusnatý (NO) a oxid dusičitý (NO<sub>2</sub>). Dále do této skupiny můžeme zařadit oxid dusitý (N<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), tetraoxid dusíku (N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) a oxid dusičný (N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>). Ostatní oxidy dusíku se vyskytují jen v omezeném množství. Mluvíme-li o oxidech dusíku označovaných NO<sub>x</sub>, máme na mysli především směs dvou druhů oxidů dusíku. (What is NO<sub>x</sub>?, 2022)

**Oxid dusnatý (NO)** je v plynném stavu bezbarvý, pro člověka jedovatý a za přítomnosti vlhkosti leptavý plyn. (National Center for Biotechnology Information, 2023)

Tabulka 1 Základní charakteristiky NO. Zdroj NCBI. (vlastní zpracování)

Parametr	Hodnota
Sumární vzorec	NO
Molární hmotnost	30,01 g.mol <sup>-1</sup>
Teplota tání	-163,6 °C

Parametr	Hodnota
Teplota varu	-151,7 °C

**Oxid dusičitý (NO<sub>2</sub>)** je v plynném stavu červenohnědý, agresivní, prudce jedovatý plyn. (National Center for Biotechnology Information, 2023)

Tabulka 2 Základní charakteristiky NO<sub>2</sub>. Zdroj NCBI. (vlastní zpracování)

Parametr	Hodnota
Sumární vzorec	NO <sub>2</sub>
Molární hmotnost	46,01 g.mol <sup>-1</sup>
Teplota tání	-11,2 °C
Teplota varu	21,15 °C

Oxidy dusíku se uplatňují v chemickém průmyslu při syntéze kyseliny dusičné, nejrůznějších laků, nátěrů, výbušnin, při nitrifikaci organických látek, mohou sloužit také jako raketové palivo. (National Center for Biotechnology Information, 2023)

Ve vzduchu vznikají oxidy dusíku různými reakcemi kyslíku a dusíku při vysokých teplotách během spalovacího procesu. Čím vyšší je teplota spalování, tím více oxidu dusnatého vzniká. Ve skutečnosti je 90-95 % oxidů dusíku obvykle emitováno jako oxid dusnatý a pouze 5-10 % jako oxid dusičitý, ačkoli byly pozorovány podstatné rozdíly mezi jednotlivými typy zdrojů. Ve venkovních podmínkách oxid dusnatý rychle oxiduje za vzniku oxidu dusičitého dostupnými oxidanty (jako je kyslík, ozón a VOC). Dýchaný vzduch s vysokou koncentrací NO<sub>x</sub> může dráždit dýchací cesty. Takové krátkodobé expozice mohou zhoršit respirační onemocnění, zejména astma, což vede k respiračním symptomům (jako je kašel, sípání nebo potíže s dýcháním), hospitalizaci a návštěvám pohotovosti. Delší expozice zvýšeným koncentracím NO<sub>x</sub> může přispět k rozvoji astmatu a potenciálně zvýšit náchylnost k respiračním infekcím. Lidé s astmatem, stejně jako děti a starší lidé jsou obecně vystaveni většímu riziku zdravotních účinků NO<sub>x</sub>. NO<sub>x</sub> reagují s jinými chemikáliemi ve vzduchu za vzniku pevných částic a ozónu. Oba jsou také škodliví při vdechování kvůli účinkům na dýchací systém. Při otravách směsmi oxidů dusíku je velmi nebezpečná hlavně

dlouhodobá latence účinku. Vysoké hladiny NO<sub>x</sub> jsou také škodlivé pro vegetaci – poškozují listy, snižují růst a výnosy plodin. (WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants, 2010, s. 201-247)

Zákon o ochraně ovzduší 201/2012 Sb. stanovuje imisní limit 200 µg.m<sup>-3</sup> (maximální hodinový průměr) a 40 µg/m<sup>3</sup> (průměr kalendářní rok). (Zákon č. 201/2012 Sb., 2012)

Vyhláška Ministerstva zdravotnictví č. 6/2003 Sb. stanovuje limit 100 µg.m<sup>-3</sup> (průměr za 1 hodinu). (Vyhláška č. 6/2003 Sb., 2003)

Narizení vlády č. 361/2007 Sb. stanovuje limity pro NO<sub>2</sub> / NO 0,96 / 2,5 mg.m<sup>-3</sup> (limit PEL) a 1,91 / 5 mg.m<sup>-3</sup> (limit NPK-P). (Narizení vlády č. 361/2007 Sb., 2007)

WHO uvádí bezpečné limity 200 µg.m<sup>-3</sup> (maximální hodinový průměr) a 40 µg. m<sup>-3</sup> (průměr za kalendářní rok). (WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants, 2010, s. 248)

**Oxid uhelnatý (CO)** je bezbarvý, nedráždivý toxický plyn bez zápachu a chuti. Vzniká nedokonalým spalováním uhlíkatých paliv, jako je dřevo, benzín, uhlí, zemní plyn a petrolej. Volně se mísí se vzduchem v jakémkoli poměru, je hořlavý a se vzduchem může tvořit výbušné směsi. Intenzivně reaguje s kyslíkem, acetylenem, chlorem, fluorem a oxidem dusným. Oxid uhelnatý není pro člověka zjiitelný zrakem, chutí ani čichem. (National Center for Biotechnology Information, 2023)

Tabulka 3 Základní charakteristiky CO. Zdroj NCBI. (vlastní zpracování)

Parametr	Hodnota
Sumární vzorec	CO
Molární hmotnost	28,01 g.mol <sup>-1</sup>
Teplota tání	-205,1 °C
Teplota varu	-191,5 °C

Antropogenní emise jsou zodpovědné za dvě třetiny oxidu uhelnatého v atmosféře a přírodní emise tvoří zbývající jednu třetinu. K vystavení nízkým úrovním oxidu uhelnatého může také dojít venku v blízkosti silnic a na parkovištích, protože je produkován výfukovými plyny motorových vozidel poháněných benzínem a naftou. Oxid uhelnatý je v uzavřených prostorech produkován především pomocí spalovacích zdrojů (vaření a vytápění) a je také

vnášen infiltrací oxidu uhelnatého z venkovního vzduchu do vnitřního prostředí. Ve vyspělých zemích jsou nejdůležitějším zdrojem expozice oxidu uhelnatému ve vnitřním ovzduší emise z vadných, nesprávně instalovaných, špatně udržovaných nebo špatně větraných kuchyňských nebo topných spotřebičů spalujících fosilní paliva. V domácnostech v rozvojových zemích je spalování paliv z biomasy a tabákový kouř nejdůležitějšími zdroji oxidu uhelnatého. Ucpané komíny, krby na dřevo, dekorativní krby, plynové hořáky a přídatná topidla bez řádně fungujících bezpečnostních prvků mohou vypouštět oxid uhelnatý do vnitřních prostor. Spalování nekvalitních pevných paliv a biopaliv v malých kamnech nebo krbech může vytvářet vysoké emise oxidu uhelnatého, které se mohou stát pro obyvatele smrtelnými, pokud nejsou spaliny odváděny ven komínem během celého procesu spalování. (Pluschke a Schleibinger, 2018, s. 125-140; WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants, 2010, s. 55-57)

Na začátku spalování převažují uvolňované znečišťující látky pevné částice (elementární a organický uhlík), ale ke konci již dominuje oxid uhelnatý. Spalování vysoce kvalitních paliv, jako je zemní plyn, butan nebo propan, obvykle produkuje mnohem méně oxidu uhelnatého za předpokladu, že je přiváděn dostatek vzduchu pro zajištění úplného spalování. Nicméně i zařízení používající taková paliva mohou způsobit smrtelnou otravu oxidem uhelnatým, pokud nejsou řádně udržována nebo odvětrávána nebo pokud nejsou správně nastaveny poměry vzduch/palivo. Existuje několik zdravotních problémů spojených s expozicí oxidem uhelnatým. Zdá se, že nejlépe pochopené zdravotní účinky má hypoxie v důsledku vazby oxidu uhelnatého na hemoglobin, když v lidském těle reaguje s hemoglobinem za vzniku karboxyhemoglobinu (COHb). Tento snižuje kapacitu krve přenášet kyslík a také snižuje disociaci kyslíku do extravaskulární tkáně. COHb je široce používán jako biomarker pro expozici oxidem uhelnatým. Oxid uhelnatý se dále také váže s myoglobinem, cytochromoxidázou a cytochromem P450, ale rozsah a účinky takové vazby jsou méně dobře prozkoumány. Vysoké expozice (přes několik stovek  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) mohou způsobit bezvědomí a smrt. Může dojít k vážnému a trvalému poškození centrální nervové soustavy, a to i v případech, kdy jednotlivci nepocítují ztrátu vědomí. (WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants, 2010, s. 56-87; Pluschke a Schleibinger, 2018)

Zákon o ochraně ovzduší 201/2012 Sb. stanovuje imisní limit CO  $10 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  (maximální denní osmihodinový průměr). (Zákon č. 201/2012 Sb., 2012)

Vyhláška Ministerstva zdravotnictví č. 6/2003 Sb. stanovuje limit CO  $5 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  (průměr za 1 hodinu). (Vyhláška č. 6/2003 Sb., 2003)



Nařízení vlády č. 361/2007 Sb. jsou limity CO 23 mg.m<sup>-3</sup> (limit PEL) a 117 mg.m<sup>-3</sup> (limit NPK-P). (Nařízení vlády č. 361/2007 Sb., 2007)

WHO uvádí bezpečné limity CO 100 mg.m<sup>-3</sup> při působení max. 15 minut, 10 mg.m<sup>-3</sup> průměrné koncentrace za 8 hodin a 7 mg.m<sup>-3</sup> průměrné koncentrace za 24 hodin. (WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants, 2010, s. 88)

**Oxid uhličitý (CO<sub>2</sub>)** je za běžných podmínek bezbarvý plyn bez zápachu. Relativně netoxický a nehořlavý. (National Center for Biotechnology Information, 2023)

Tabulka 4 Základní charakteristiky CO<sub>2</sub>. Zdroj NCBI. (vlastní zpracování)

Parametr	Hodnota
Sumární vzorec	CO <sub>2</sub>
Molární hmotnost	44,01 g.mol <sup>-1</sup>
Teplota tání	-56,6 °C
Teplota sublimace	-78,48 °C

Atmosférický oxid uhličitý pochází ze dvou primárních zdrojů – přírodních a lidských činností. Mezi přirozené zdroje oxidu uhličitého patří většina živočichů, kteří oxid uhličitý vydechují jako odpadní produkt. Lidské aktivity, které vedou k emisím oxidu uhličitého, pocházejí především z výroby energie, včetně spalování uhlí, ropy nebo zemního plynu. Při pobytu v prostoru se zvýšenou koncentrací CO<sub>2</sub> dochází k vychýlení acidobazické rovnováhy naší krve. Ta se následně stává kyselější (snižuje se její pH) a tím klesá její schopnost transportu kyslíku, jelikož hemoglobinu klesá schopnost na sebe kyslík vázat. (Vliv koncentrace CO<sub>2</sub> na zdraví člověka, 2017)

Tabulka 5 Koncentrace CO<sub>2</sub> ve vzduchu a potenciální zdravotní problémy. Zdroj Enectiva. (vlastní zpracování)

Koncentrace CO <sub>2</sub>	Potenciální zdravotní problémy
350-400 ppm	Úroveň venkovního prostředí.
400-1000 ppm	Doporučená úroveň CO <sub>2</sub> ve vnitřních prostorách.
1200-1500 ppm	Doporučená maximální úroveň CO <sub>2</sub> ve vnitřních prostorách.

Koncentrace CO <sub>2</sub>	Potenciální zdravotní problémy
1000-2000 ppm	Nastávají příznaky únavy a snižování koncentrace.
2000-5000 ppm	Nastávají možné bolesti hlavy.
5000 ppm	Maximální bezpečná koncentrace bez zdravotních rizik.
> 15000 ppm	Nevolnost a zvýšený tep.
> 15000 ppm	Dýchací potíže.
> 40000 ppm	Možná ztráta vědomí.

Nařízení vlády č. 361/2007 Sb. uvádí minimální množství přiváděného čerstvého vzduchu na pracoviště. Pro každého zaměstnance vykonávajícího práci vsedě s minimální pohybovou aktivitou, nebo práci spojenou s lehkým pohybem rukou či paží bez přítomnosti chemických látek, prachů a jiných zdrojů znečištění je stanoveno minimální množství přiváděného vzduchu na 25 m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>. Pro zaměstnance, u kterých převažuje práce vestoje s trvalým zapojením paží, rukou, nohou, chůze po zvlněném terénu bez zátěže, práce v předklonu nebo vkleče musí být zajištěno 70 m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>. Zaměstnanec těžce fyzicky pracující potřebuje ke svému výkonu 90 m<sup>3</sup> čerstvého vzduchu za hodinu. (Nařízení vlády č. 361/2007 Sb., 2007)

Vyhláška č. 268/2009 Sb v platném znění uvádí, že pobytové místnosti musí mít zajištěno dostatečné přirozené nebo nucené větrání a musí být dostatečně vytápěny s možností regulace vnitřní teploty. Jako ukazatel kvality vnitřního prostředí slouží oxid uhličitý CO<sub>2</sub>, jehož koncentrace ve vnitřním vzduchu nesmí překročit hodnotu 1500 ppm. (Vyhláška č. 268/2009 Sb., 2009)

Vyhláška č. 343/2009 Sb. udává požadavky na přívod vzduchu v jednotlivých prostorech školních zařízení. (Vyhláška č. 343/2009 Sb., 2009)

Tabulka 6 Množství přiváděného čerstvého vzduchu ve školních zařízeních.  
Zdroj Vyhláška č. 343/2009 Sb. (vlastní zpracování)

Typ prostoru	Množství vzduchu (m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> )
Učebny	20-30 na 1 žáka
Tělocvičny	20-90 na 1 žáka

Typ prostoru	Množství vzduchu ( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )
Šatny	20 na 1 žáka
Umývárny	30 na 1 umývadlo
Sprchy	150-200 na 1 sprchu
Záchody	50 na 1 kabinu, 25 na pisoár

**Oxid siřičitý ( $\text{SO}_2$ )** je za běžných podmínek bezbarvý, štiplavě páchnoucí, jedovatý plyn. (National Center for Biotechnology Information, 2023)

Tabulka 7 Základní charakteristiky  $\text{SO}_2$ . Zdroj NCBI. (vlastní zpracování)

Parametr	Hodnota
Sumární vzorec	$\text{SO}_2$
Molární hmotnost	$64,07 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$
Teplota tání	$-72,46 \text{ }^\circ\text{C}$
Teplota varu	$-10,02 \text{ }^\circ\text{C}$

Největším zdrojem  $\text{SO}_2$  v atmosféře je spalování fosilních paliv v elektrárnách a dalších průmyslových zařízeních, hlavním přírodním zdrojem emisí  $\text{SO}_2$  je vulkanická činnost. Emise  $\text{SO}_2$ , které vedou k vysokým koncentracím  $\text{SO}_2$  v ovzduší, obecně také vedou k tvorbě jiných oxidů síry ( $\text{SO}_x$ ).  $\text{SO}_x$  mohou reagovat s jinými sloučeninami v atmosféře za vzniku malých částic. Tyto částice přispívají ke znečištění částicemi (PM). Krátkodobé vystavení  $\text{SO}_2$  může poškodit lidský dýchací systém a ztížit dýchání. Lidé s astmatem, zejména děti, jsou na tyto účinky  $\text{SO}_2$  citliví. Dlouhodobá expozice může mít za následek změny čichu (včetně zvýšené tolerance k nízkým hladinám oxidu siřičitého), zvýšenou náchylnost k respiračním infekcím, příznaky chronické bronchitidy a zrychlený pokles funkce plic. Dlouhodobá expozice může být pro děti závažnější kvůli jejich potenciální delší délce života. Zákon o ochraně ovzduší 201/2012 Sb. stanovuje imisní limit  $\text{SO}_2$  na 1 hodinu  $350 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  (maximální počet překročení 24/rok) a pro 24 hodin  $125 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  (maximální počet překročení 3/rok). (Zákon č. 201/2012 Sb., 2012)

IARC nepovažuje SO<sub>2</sub> za karcinogenní pro člověka (Skupina 3). (World Cancer Report 2003, 2003)

WHO uvádí bezpečnou míru SO<sub>2</sub> na 20 µg.m<sup>-3</sup>(denní průměr) a 500 µg.m<sup>-3</sup> (průměr za 10 minut). (WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide, 2005)

**Ozon (O<sub>3</sub>)** je bezbarvý plyn bez zápachu tvořený třemi molekulami kyslíku (O<sub>3</sub>) a je přirozenou součástí životního prostředí.

Tabulka 8 Základní charakteristiky ozonu. Zdroj NCBI. (vlastní zpracování)

Parametr	Hodnota
Sumární vzorec	O <sub>3</sub>
Molární hmotnost	48,00 g.mol <sup>-1</sup>
Teplota tání	-192,2 °C
Teplota sublimace	-112 °C

Přibližně 90 % atmosférického O<sub>3</sub> se nachází ve stratosféře, známý jako ozónová vrstva, se vyskytuje přirozeně a tvoří ochrannou bariéru, která zabraňuje ultrafialovému slunečnímu záření ze slunce proniknout na zemský povrch a poškodit rostlinný a živočišný život. Zbývajících 10 % atmosférického ozonu se nachází v troposféře, která sahá od povrchu Země až po stratosféru. Ozon v troposféře není emitován přímo do ovzduší jako plyn, ale vzniká fotochemickou reakcí oxidů dusíku (NO<sub>x</sub>) a těkavých organických sloučenin (VOC). Oxidy dusíku a těkavé organické sloučeniny se rozpadají v přítomnosti intenzivního slunečního záření a rekombinují se do nových struktur, čímž vzniká ozón. NO<sub>x</sub> a VOC jsou známé jako prekurzorové plyny O<sub>3</sub>, protože jejich přítomnost, koncentrace a chemická reaktivita předcházejí a vedou k produkci nežádoucího ozonu. (Akhtar a Palagiano, 2018)

Ozón ve vzduchu, který dýcháme, může poškodit naše zdraví, zejména v horkých slunečných dnech, kdy ozón může dosáhnout nezdravé úrovně. I relativně nízké hladiny ozonu mohou mít zdravotní následky. V závislosti na úrovni expozice může ozón způsobit kašel nebo škrábání v krku, ztížit hluboké dýchání, zanítit a poškodit dýchací cesty, způsobit, že plíce budou náchylnější k infekci. Zhoršení plicních onemocnění, jako je astma, emfyzém a chronická bronchitida. (Health Effects of Ozone Pollution, 2022)

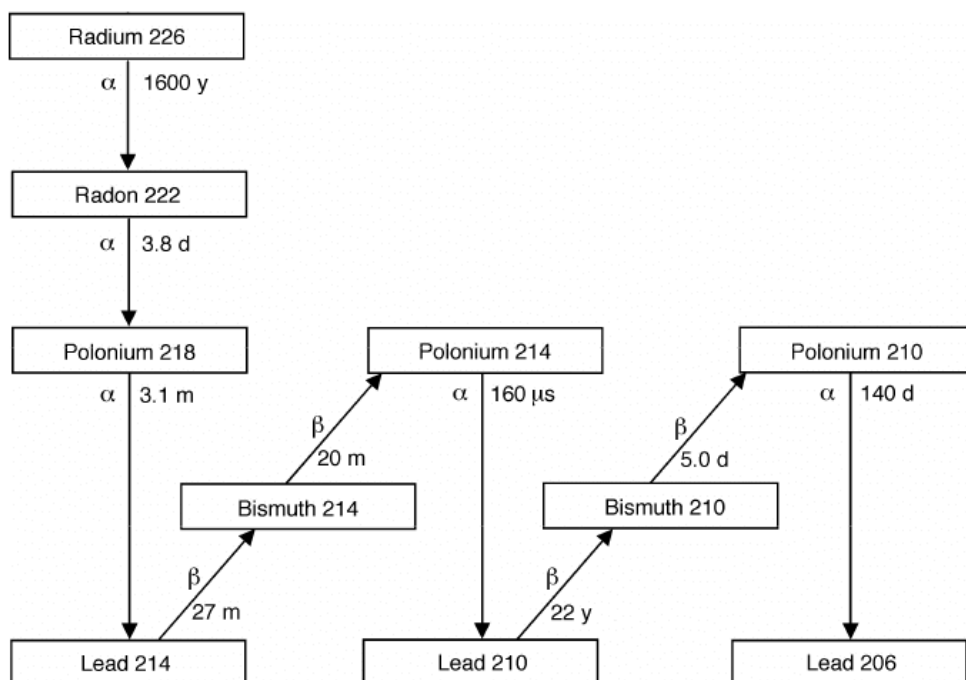
Zákon o ochraně ovzduší 201/2012 Sb. stanovuje imisní limit  $O_3$  jako maximální denní osmihodinový průměr  $120 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  (maximální počet překročení 25 za rok). (Zákon č. 201/2012 Sb., 2012)

Vyhláška Ministerstva zdravotnictví č. 6/2003 Sb. stanovuje hygienický limit  $O_3$  pro vnitřní prostředí pobytových místností na  $100 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . (Vyhláška č. 6/2003 Sb., 2003)

Nářízení vlády č. 361/2007 Sb. jsou stanoveny limity pro  $O_3$   $0,1 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  (limit PEL) a  $0,2 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  (limit NPK-P). (Nářízení vlády č. 361/2007 Sb., 2007)

WHO uvádí bezpečnou míru  $O_3$   $100 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  (8hodinový průměr).

**Radon (Rn)** je přirozeně se vyskytující radioaktivní vzácný plyn, který má řadu izotopů. Je bezbarvý a bez zápachu. Radon je významným zdrojem ionizujícího záření (alfa) přírodního původu a hlavním přispěvatelem k dávce ionizujícího záření, které je vystavena populace. Pochází hlavně z expozice radonu a produktů jeho rozpadu přenášených vzduchem v domácnostech. Nejstabilnějším z izotopů je radon-222 ( $^{222}\text{Rn}$ ) s poločasem rozpadu 3,8 dne, tento je všeobecně označován jednoduše jako „radon“ nebo „radonový plyn“. Je členem rozpadové řady uranu-238 ( $^{238}\text{U}$ ) a jeho bezprostředním rodičem je radium-226 ( $^{226}\text{Ra}$ ). (The Basic Radon ( $^{222}\text{Rn}$ ) Decay Chain, c2008-2023)



Obrázek 1 Rozpadová řada radonu. Zdroj ResearchGate

Domy se špatně utěsněnými základy, postavené na vysoce propustném terénu a s několika vstupními body pro půdní plyn mohou čerpat více než 10 % vnitřního vzduchu z půdy. I když má půdní plyn jen mírné úrovně radonu, úrovně uvnitř takového domu mohou být velmi vysoké. Ve srovnání s půdním plynem se radon vydechovaný ze stavebních materiálů ve většině případů významně nepodílí na hladinách radonu v interiéru. Existují některé stavební materiály, které mohou mít vysoké koncentrace radia. Příkladem jsou kamencové břidlice a stavební materiály vyrobené ze sopečného tufu, fosfosádrovec jako vedlejší produkt a některé průmyslové odpadní materiály. U novostaveb se v současnosti provádí měření objemové aktivity radonu a při překročení povolené hranice se provádí izolace podlahy nebo odvětrání. (WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants, 2010, s. 347-366)

Zvýšené koncentrace radonu v interiéru může být způsobena také vodou dodávanou do objektu, jedná se především o individuální zdroje vody (studny). Radon se ve větší míře z vody uvolňuje především při sprchování, koupání, praní, mytí a vaření. Voda dodávaná do veřejných vodovodů musí být na přítomnost radonu testována dle vyhlášky č. 184/1997 Sb. (Měření radonu v interiéru, c2012-2023)

Při vdechování plynného radonu mohou hustě ionizující částice alfa emitované usazenými produkty rozpadu radonu s krátkou životností interagovat s biologickou tkání v plicích, což vede k poškození DNA. Molekulární a buněčné studie prokázaly, že je možné, že poškození DNA související s radonem může nastat při jakékoli úrovni expozice radonu, protože i jediná alfa částice může způsobit velké genetické poškození buňky. Radon je hlavním přispěvatelem k dávce ionizujícího záření, kterou dostává široká populace. Venkovní hladiny radonu jsou obvykle velmi nízké, s průměrnými hodnotami v rozmezí 5-20 Bq.m<sup>-3</sup>. Zveřejněné odhady podílu rakovin plic, které lze přičíst radonové expozici v domácnostech, se pohybují od 3 % do 14 % v závislosti na průměrné koncentraci radonu v dané zemi a metodách výpočtu. Protože většina lidí je vystavena nízkým nebo středním koncentracím radonu, je většina rakovin plic souvisejících s radonem způsobena spíše těmito úrovněmi expozice než vyššími koncentracemi. Většina případů rakoviny plic vyvolaných radonem se vyskytuje u kuřáků a bývalých kuřáků v důsledku silného kombinovaného účinku kouření a expozice radonu. Přesto je expozice radonu primární příčinou rakoviny plic u lidí, kteří nikdy nekouřili. (WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants, 2010, s. 347-366)

Limity pro radon stanovuje Zákon č.263/2016 Sb. – Zákon atomový zákon. Referenční úroveň objemové aktivity radonu je  $300 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$  pro průměrnou hodnotu při výměně vzduchu, která odpovídá běžnému užívání. Referenční úroveň pro maximální příkon prostorového dávkového ekvivalentu v obytné nebo pobytové místnosti ve výšce 1 m nad podlahou a vzdálenosti 0,5 m od stěny je  $1 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ . (Novák, 1997)

Mezinárodní agentura pro výzkum rakoviny (IARC) považuje radon za lidský karcinogen (Skupina 1). (WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants, 2010, s. 369)

WHO International Radon Project stanovil referenční hodnotu na  $100 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ . (WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants, 2010, s. 369)

### 1.3 Polycyklické aromatické uhlovodíky

Polycyklické aromatické uhlovodíky (PAH) jsou třídou organických sloučenin produkovaných nedokonalým spalováním nebo vysokotlakými procesy. PAH se často skládají ze tří nebo více kondenzovaných benzenových kruhů obsahujících pouze uhlík a vodík. PAH jsou pevné látky s nízkou těkavostí při pokojové teplotě. Jsou relativně nerozpustné ve vodě a většina může být fotooxidována a degradována na jednodušší látky. PAH se nacházejí v průmyslových odvětvích, která vyrábějí nebo používají uhelný dehet, koks nebo bitumen (asfalt). Černouhelný dehet a kreosot, což jsou složité směsi kapalných a pevných aromatických uhlovodíků vyráběné v koksovacích pecích, obsahují značné množství benzo(a)pyrenu a dalších PAH. PAH se vyrábějí ve zplyňovacích zařízeních uhlí, komunálních spalovnách, udírnách a některých zařízeních na výrobu hliníku. Cigaretový kouř taktéž obsahuje mnoho PAH, kouření cigaret a tabákový kouř v životním prostředí jsou proto dalšími zdroji PAH. (Gehle, 2011)

**Benzo[a]pyren (B[a]P)** je za běžných podmínek je žlutě zbarvený krystalický, aromatický uhlovodík sestávající z pěti kondenzovaných benzenových kruhů a vzniklý při nedokonalém spalování organické hmoty. (National Center for Biotechnology Information, 2023)

Tabulka 9 Základní charakteristiky B[a]P. Zdroj NCBI. (vlastní zpracování)

Parametr	Hodnota
Sumární vzorec	$\text{C}_{20}\text{H}_{12}$
Molární hmotnost	$252,31 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$

Parametr	Hodnota
Teplota tání	179 °C
Teplota varu	495 °C (rozklad)

Vzhledem k obtížím při vypracovávání pokynů pro směsi PAH je B[a]P považován za nejlepší jednotlivou indikační sloučeninu. Jeho toxikologie je nejlépe známá, většina jednotlivých údajů o koncentraci PAH v okolním a vnitřním vzduchu je pro B[a]P a B[a]P se široce používá jako indikátorová sloučenina pro expozici v epidemiologických studiích. (WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants, 2010, s. 22-23)

Údaje z hodnocení zdraví naznačují, že rakovina plic je nejzávažnějším zdravotním rizikem vyplývajícím z expozice PAH ve vnitřním ovzduší. B[a]P je jedním z nejúčinnějších karcinogenů mezi známými PAH. B[a]P se vyskytuje v grilovaných a uzených výrobcích, v tucích a olejích, v sušeném ovoci a cereáliích, v tabákovém kouři, ve výfukových zplodinách, v kouři z vytápění objektů, ve zplodinách z řady průmyslových oborů, elektráren či tepláren. Při použití moderních technologií uzení a při použití „tekutého kouře“ je obsah B[a]P a ostatních PAU podstatně nižší. Přítomnost B[a]P (PAH) je hlavní příčinou vzniku rakoviny plic, přijaté s potravou působí rakovinu zažívacího traktu a v případě dermálního kontaktu rakoviny kůže. (WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants, 2010, s. 323-324)

Zákon o ochraně ovzduší 201/2012 Sb. stanovuje imisní limit B[a]P  $1 \text{ ng.m}^{-3}$  (průměr na 1 kalendářní rok). (Zákon č. 201/2012 Sb., 2012)

Vyhláška Ministerstva zdravotnictví č. 6/2003 Sb. nestanovuje hygienický limit pro vnitřní prostředí pobytových místností. (Vyhláška č. 6/2003 Sb., 2003)

Nářízení vlády č. 361/2007 Sb. jsou limity pro B[a]P  $0,005 \text{ mg.m}^{-3}$  (limit PEL) a  $0,025 \text{ mg.m}^{-3}$  (limit NPK-P). (Nářízení vlády č. 361/2007 Sb., 2007)

WHO uvádí míru rizika vzniku rakoviny plic jako  $8,7 \times 10^{-5}$  na každý  $1 \text{ ng.m}^{-3}$  B[a]P (při vyšší koncentraci se riziko úměrně zvyšuje). (WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants, 2010, s. 324)

IARC považuje vnitřní emise B[a]P a PAH za lidský karcinogen (Skupina 1). (WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants, 2010, s. 325)



## 1.4 Těkavé organické sloučeniny

Těkavé organické sloučeniny (VOC – volatile organic compound) jsou sloučeniny, které mají vysoký tlak par a nízkou rozpustnost ve vodě. Mnoho VOC jsou člověkem vyrobené chemikálie, které se používají a vyrábějí při výrobě barev, léčiv a chladiv. VOC jsou typicky průmyslová rozpouštědla, jako je trichlorethylen; palivové kyslíkaté látky, jako je methyl-terc-butylether (MTBE); nebo vedlejší produkty vyrobené chlorací při úpravě vody, jako je chloroform. VOC jsou často součástí ropných paliv, hydraulických kapalin, ředidel barev a chemických čisticích prostředků. VOC jsou běžné kontaminanty podzemní vody. VOC jsou emitovány jako plyny z určitých pevných látek nebo kapalin. VOC zahrnují různé chemikálie, z nichž některé mohou mít krátkodobé i dlouhodobé nepříznivé účinky na zdraví. Koncentrace mnoha VOC jsou trvale vyšší uvnitř (až desetkrát vyšší) než venku. VOC jsou emitovány širokou škálou produktů čítajících tisíce. Příklady zahrnují: barvy a laky, odstraňovače nátěrů, čisticí prostředky, pesticidy, stavební materiály a vybavení, kancelářské vybavení, jako jsou kopírky a tiskárny, korekční kapaliny a samopropisovací papír, grafické a řemeslné materiály včetně lepidel a permanentních popisovačů. Organické chemikálie jsou široce používány jako přísady do výrobků pro domácnost. Barvy, laky a vosk obsahují organická rozpouštědla, stejně jako mnoho čisticích, dezinfekčních, kosmetických, odmašťovacích a hobby produktů. Paliva se skládají z organických chemikálií. Všechny tyto produkty mohou uvolňovat organické sloučeniny, když je po-užíváte, a do určité míry, i při skladování. (Pluschke a Schleibinger, 2018, str. 71-96)

V průmyslu zabývajícím se systémy HVAC se často vyskytuje fráze nazývaná syndrom nemocných budov, která se používá k popisu kancelářského prostředí, ve kterém jsou zaměstnanci nemocní nebo nemocní častěji, než se očekává vedení. (Indoor Air Facts No. 4, 1991)

**Benzen (C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>)** je organická, sladce zapáchající sloučenina používaná jako rozpouštědlo a základní surovina pro výrobu řady chemikálií. (National Center for Biotechnology Information, 2023)

Tabulka 10 Základní charakteristiky benzenu. Zdroj NCBI. (vlastní zpracování)

Parametr	Hodnota
Sumární vzorec	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>
Molární hmotnost	78,11 g.mol <sup>-1</sup>
Teplota tání	5,5 °C
Teplota varu	80,1 °C

Benzen relativně rychle těká do atmosféry (kde se také podílí na vzniku fotochemického smogu), tedy do lidského těla se se dostává primárně vdechováním. (Petrлік a Válek, 2022)

V minulosti byl benzen široce používán jako rozpouštědlo, především v průmyslových barvách, odstraňovačích barev, lepidlech, odmašťovacích prostředcích, denaturovaném lihu, uměleckých a řemeslných potřebách. Stanovením nižších limitů vedlo ke snížení jeho použití, ale obsah benzenu může být stále problémem v některých částech světa, jako jsou některé africké země. Současným hlavním zdrojem benzenu v životním prostředí je automobilová doprava, průmyslová výroba, hutní průmysl a spalování odpadů. Velké množství benzenu obsahuje i cigaretový kouř. Benzen ve vnitřním vzduchu může pocházet z venkovního vzduchu a také z vnitřních zdrojů, jako jsou barvy, používání repelentů proti komárům, kopírování, tisk, skladování a používání rozpouštědel, stavební materiály, nábytek, garáže, topení a varné systémy. Jeho vnitřní koncentrace jsou také ovlivněny klimatickými podmínkami, které mají vliv na rychlost výměny vzduchu nuceným nebo přirozeným větráním. Jedním z prvních příznaků chronické toxicity benzenu jsou změny kostní dřevě. Aplastická anémie je jedním z nejzávažnějších účinků, kdy kmenové buňky nikdy nedosáhnou zralosti. Aplastická anémie může přejít v myelodysplastický syndrom a poté v leukémii. Hlavní omezení těchto studií spočívají v nedostatku přesných údajů týkajících se měření expozice, možné společné expozice jiným látkám a nepřítomnosti vhodné kontrolní skupiny. Při akutní intoxikaci poškozuje orgány krve tvorby, nervovou soustavu a imunitní systém. Existuje mnoho zpráv o lidských úmrtích při vdechování vysokých koncentrací benzenu. Smrt nastala náhle nebo několik hodin po expozici. Často nebyly známy koncentrace benzenu, kterým byly oběti vystaveny. Smrt je často připisována asfyxii, zástavě dechu nebo selhání centrálního nervového systému. (Akhtar a Palagiano, 2018, s. 375-378; WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants, 2010, s. 15-37)

Zákon o ochraně ovzduší 201/2012 Sb. stanovuje imisní limit benzenu  $5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  (průměr za 1 kalendářní rok). Benzen je vyjádřen ve skupině celkový organický uhlík (TOC). (Zákon č. 201/2012 Sb., 2012)

Vyhláška Ministerstva zdravotnictví č. 6/2003 Sb. stanovuje limit benzenu  $7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  (průměr za 1 hodinu). (Vyhláška č. 6/2003 Sb., 2003)

Nářízením vlády č. 361/2007 Sb. jsou stanoveny limity benzenu  $3 \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$  (limit PEL) a  $10 \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$  (limit NPK-P). (Nářízením vlády č. 361/2007 Sb., 2007)

WHO uvádí, že při dlouhodobém vystavení koncentraci benzenu  $1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  je riziko vzniku leukémie cca  $6 \times 10^{-6}$  (při vyšší koncentraci se riziko úměrně zvyšuje). (WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants, 2010, s. 39)

IARC považuje benzen za lidský karcinogen (Skupina 1). (WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants, 2010, s. 39)

Vojáček (Vojáček, 2019) člení hodnocení kvality vzduchu založené na koncentraci VOC vyjádřenou v ppb.

Tabulka 11 Koncentrace VOC a hodnocení kvality vzduchu. Zdroj automatizace.hw.cz  
(vlastní zpracování)

Koncentrace (ppb)	Hodnocení kvality vzduchu
0 až 300	dobrá kvalita vzduchu
300 až 600	ještě vyhovující kvalita vzduchu
600 až 1000	zhoršená kvalita vzduchu, může zhoršovat komfort pobytu,
1000 až 3000	špatná kvalita vzduchu, může ovlivňovat kvalitu dýchání a bolesti hlavy
3000 až 10000	nezdravá kvalita vzduchu, může již způsobit zdravotní problémy
nad 10000	nebezpečný vzduch, může již rychle způsobit významné zdravotní problémy

**Formaldehyd (CH<sub>2</sub>O)** je bezbarvý plyn, hořlavý a vysoce reaktivní při pokojové teplotě. Je všude přítomný v životním prostředí, protože je tvořen především četnými přírodními zdroji a antropogenní činností. (National Center for Biotechnology Information, 2023)

Tabulka 12 Základní charakteristiky formaldehydu.  
Zdroj NCBI. (vlastní zpracování)

Parametr	Hodnota
Sumární vzorec	CH <sub>2</sub> O
Molární hmotnost	30,03 g.mol <sup>-1</sup>
Teplota tání	-92 °C
Teplota varu	-19,1 °C

Formaldehyd je široce průmyslově vyráběn po celém světě pro použití při výrobě pryskyřic, jako dezinfekční a fixační prostředek, nebo jako konzervační prostředek ve spotřebních výrobcích. Všechny tyto umělé produkty a jejich použití jsou hlavními nepřímými zdroji formaldehydu, zejména v interiérech. Je třeba poznamenat, že sekundární tvorba formaldehydu nastává ve vzduchu oxidací těkavých organických sloučenin (VOC) a dále reakcemi mezi ozonem (hlavně z venkovního prostředí) a alkeny (zejména terpeny). Příspěvek těchto sekundárních chemických procesů ke koncentracím v ovzduší a ve vnitřních prostorech stále není plně kvantifikován. Do životního prostředí se uvolňuje spalováním biomasy (požáry lesů a křovin), rozkladem biomasy a například i sopečnou činností. Antropogenní zdroje zahrnují přímé zdroje, jako jsou průmyslové emise, spalování paliv z dopravy. Zdrojem emisí formaldehydu do atmosféry jsou ale i další spalovací procesy (elektrárny, spalovny atd.). Zdroje formaldehydu ve vnitřním prostředí zahrnují: nábytek a dřevěné výrobky obsahující pryskyřice na bázi formaldehydu, jako jsou dřevotřískové desky, překližky a dřevovláknité desky střední hustoty, izolační materiály (na počátku 80. let 20. století byla hlavním zdrojem znečištění vnitřních prostor izolace z močovinoformaldehydové pěny), textilie, výrobky pro kutily, jako jsou barvy, tapety, lepidla, lepidla, laky a laky; čisticí prostředky pro domácnost, jako jsou saponáty, dezinfekční prostředky, změkčovadla, čističe koberců a obuvnické výrobky; kosmetika, jako jsou tekutá mýdla, šampony, laky na nehty a tužidla na nehty; elektronické vybavení, včetně počítačů a kopírek; a další spotřební zboží, jako jsou insekticidy a papírové výrobky. Jak již bylo zmíněno výše, sekundární tvorba formaldehydu nastává v interiéru prostřednictvím chemických reakcí například mezi ozonem a terpeny. Hlavní cestou expozice formaldehydu je inhalace, tedy nejdůležitějším způsobem řízení koncentrace formaldehydu je rychlost výměny vzduchu a použití materiálů a produktů s nízkými emisemi. (WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants, 2010, s. 103-142)

Zákon o ochraně ovzduší 201/2012 Sb. nestanovuje pro formaldehyd imisní limity. (Bejčková, 2018)

Vyhláška Ministerstva zdravotnictví č. 6/2003 Sb. stanovuje hygienický limit pro vnitřní prostředí pobytových místností pro formaldehyd na  $60 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . (Vyhláška č. 6/2003 Sb., 2003)

Nářízení vlády č. 361/2007 Sb. jsou  $0,5 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  (limit PEL) a  $1 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  (limit NPK-P). (Nářízení vlády č. 361/2007 Sb., 2007)

WHO uvádí, že by dlouhodobé koncentrace formaldehydu neměla dlouhodobě překračovat  $60 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . (WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants, 2010)

**Naftalen ( $\text{C}_{10}\text{H}_8$ )** je bílý krystalický prášek s charakteristickým zápachem. Jedná se o dvou-složkový aromatický uhlovodík izolovaný z černouhelného dehtu. Používaná synonyma jsou antimit, naftalín, naftalin, naften a dehtový kafr. (National Center for Biotechnology Information, 2023)

Tabulka 13 Základní charakteristiky naftalenu. Zdroj NCBI. (vlastní zpracování)

Parametr	Hodnota
Sumární vzorec	$\text{C}_{10}\text{H}_8$
Molární hmotnost	$165,83 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$
Teplota tání	$-22 \text{ }^\circ\text{C}$
Teplota varu	$121 \text{ }^\circ\text{C}$

Používá se jako surovina při výrobě anhydridu kyseliny ftalové pro syntézu ftalátových změkčovadel a syntetických pryskyřic. Používá se také jako surovina pro naftalensulfonové kyseliny často používané při výrobě změkčovadel pro beton, jako přísady do sádrokartonových desek, jako disperzanty v syntetických a přírodních kaučuky a jako činidla v kožedělném průmyslu. Venkovní zdroje naftalenu pocházejí hlavně z fugitivních emisí a výfukových plynů motorových vozidel. Úniky do půdy a vody během skladování, přepravy a likvidace topného oleje a černouhelného dehtu se uvolňují do atmosféry odpařováním, fotolýzou, adsorpcí a biodegradací. Obvyklými vnitřními zdroji naftalenu jsou neventilované petrolejové ohřívače a tabákový kouř. Venkovní zdroje mohou přispět k nízkým hladinám naftalenu v interiéru. Nejvyšší vnitřní koncentrace, obvykle řádově

nad úroveň venkovního vzduchu, však pocházejí ze spotřebních produktů, jako jsou víceúčelová rozpouštědla, maziva, herbicidy, laky na vlasy, neventilované petrolejové ohřívače, tabákový kouř, pryžové materiály a – většina důležité – naftalenové repelenty proti hmyzu (kuličky proti molům) používané k ochraně textilií uložených uvnitř ve skříních (ačkoli toto použití se snížilo, zejména v západní Evropě). Vzhledem k tomu, že lidé tráví většinu času uvnitř budov, hraje v celkové expozici člověka naftalenu hlavní roli inhalace vnitřního vzduchu. Hlavními zdravotními riziky expozice naftalenu jsou léze dýchacích cest, včetně karcinogenity dýchacího traktu prokázané ve studiích na zvířatech a hemolytická anémie u lidí. Pokud jde o vznik šedého zákalu pozorovaný u pokusných zvířat po vysoké orální expozici naftalenu (ale ne po jeho vdechnutí), existují pouze náznaky, že souvislost s expozicí naftalenu u lidí vůbec existuje. Většina zpráv o hemolytické anémii u lidí se týká dermálního kontaktu s oděvy ošetřenými naftalenovými naftalínovými kuličkami nebo neúmyslného či sebevražedného požití naftalenových kuliček. (WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants, 2010, s. 157-186)

Vyhláška Ministerstva zdravotnictví č. 6/2003 Sb. nestanovuje hygienický limit naftalenu pro vnitřní prostředí pobytových místností. (Vyhláška č. 6/2003 Sb., 2003)

Nařízením vlády č. 361/2007 Sb. jsou stanoveny limity  $50 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  (limit PEL) a  $100 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  (limit NPK-P). (Nařízení vlády č. 361/2007 Sb., 2007)

Naftalen byl IARC klasifikován ve skupině 2B jako možná karcinogenní pro člověka. (WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants, 2010, s. 186)

WHO uvádí limit pro trvalou dlouhodobou bezpečnou koncentraci naftalenu  $0,01 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ . (WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants, 2010, s. 186)

**Tetrachlorethylen (PCE)** je snadno těkává, bezbarvá kapalina nasládlé vůně. Hlavní průmyslové aplikace PCE jsou jako prostředek pro chemické čištění, odmašťovač pro vyrobené kovové díly a průmyslové rozpouštědlo. (National Center for Biotechnology Information, 2023)

Tabulka 14 Základní charakteristiky PCE. Zdroj NCBI. (vlastní zpracování)

Parametr	Hodnota
Sumární vzorec	$\text{C}_2\text{Cl}_4$

Parametr	Hodnota
Molární hmotnost	165,83 g.mol <sup>-1</sup>
Teplota tání	-22 °C
Teplota varu	121 °C

Mezi další aplikace se řadí konečná úprava a zpracování textilií, výroba odstraňovačů barev a tiskařských barev a formulace lepidel a speciálních čisticích kapalin. Spotřebitelské produkty, které mohou obsahovat PCE, zahrnují lepidla, osvěžovače, odstraňovače skvrn, vodoodpudivé prostředky, čističe dřeva, čističe motorových vozidel a chemicky ošetřené tkaniny. Lidé, kteří jsou delší dobu vystaveni nižším hladinám PCE ve vzduchu, mohou mít změny nálady, paměti, pozornosti, reakční doby nebo vidění. U zvířat vystavených PCE se projeví účinky na játra a ledviny a změny v chemii mozku, ale v současné době nevíme, co tato zjištění znamenají pro lidi. PCE může mít vliv na těhotenství a nenarozené děti. U zvířat bylo prokázáno, že PCE způsobuje rakovinu jater, ledvin a krevního systému. Není jasné, zda se tyto účinky mohou objevit také u lidí, protože lidé a zvířata se liší v tom, jak jejich tělo zachází s PCE. (Tetrachloroethylene, 2015)

Vyhláška Ministerstva zdravotnictví č. 6/2003 Sb. stanovuje hygienický limit PCE pro vnitřní prostředí pobytových místností na 150 µg.m<sup>-3</sup>. (Vyhláška č. 6/2003 Sb., 2003)

Nařízení vlády č. 361/2007 Sb. jsou limity PCE 138 mg.m<sup>-3</sup> (limit PEL) a 275 mg.m<sup>-3</sup> (limit NPK-P). (Nařízení vlády č. 361/2007 Sb., 2007)

Referenční koncentrace PCE vydaná SZÚ podle § 45 zákona č. 86/2002 o ochraně ovzduší ve znění následných právních úprav (472/2005 Sb.) je stanovena na úrovni 250 µg.m<sup>-3</sup> ve venkovním ovzduší. (Referenční koncentrace vydané SZÚ Praha, 2003)

IARC považuje PCE za pravděpodobně karcinogenní pro člověka (Skupina 2A). (Trichloroethylene, Tetrachloroethylene, and Some Other Chlorinated Agents, 2014)

WHO uvádí bezpečnou míru PCE při dlouhodobém vystavení 0,25 mg.m<sup>-3</sup>. (WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants, 2010, s. 443)

**Trichlorethylen (TCE)** je uměle vyráběná, bezbarvá nehořlavá kapalina sladké vůně, používaná především pro odmašťování a čištění kovových dílů (80-95 % spotřeby). Mezi jeho další aplikace patří průmyslové chemické čištění, tisk, výroba tiskařských barev, extrak-

ční procesy, výroba barev a potisk textilu. (National Center for Biotechnology Information, 2023)

Tabulka 15 Základní charakteristiky TCE. Zdroj NCBI. (vlastní zpracování)

Parametr	Hodnota
Sumární vzorec	$C_2HCl_3$
Molární hmotnost	$131,40 \text{ g.mol}^{-1}$
Teplota tání	$-84,8 \text{ }^\circ\text{C}$
Teplota varu	$86,7 \text{ }^\circ\text{C}$

Důkazy naznačují souvislost mezi expozicí TCE a exacerbací nebo indukci autoimunity. Pracovní studie u lidí naznačují souvislost mezi používáním odmašťovacích rozpouštědel a nepříznivými vlivy na plod. Epidemiologické studie v obecné populaci naznačují malformace, perinatální úmrtí a nízkou porodní hmotnost, ale možné zkreslení a nesprávná klasifikace expozice brání vyvození jasných závěrů. Neexistuje tedy dostatek důkazů pro souvislost mezi vývojovými účinky a expozicí TCE. Byly zjištěny pozitivní souvislosti mezi pracovní expozicí a riziky rakoviny jater, ledvin a žlučového a non-Hodgkinova lymfomu. Celkově se dospělo k závěru, že existují dostatečné důkazy naznačující souvislost mezi expozicí TCE a rakovinou (játra a ledviny). (Trichloroethylene, Tetrachloroethylene, and Some Other Chlorinated Agents, 2014; WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants, 2010, s. 377-402)

Vyhláška Ministerstva zdravotnictví č. 6/2003 Sb. stanovuje hygienický limit TCE pro vnitřní prostředí obytných místností na  $150 \mu\text{g.m}^{-3}$ . (Vyhláška č. 6/2003 Sb., 2003)

Nařízení vlády č. 361/2007 Sb. jsou stanoveny limity pro TCE  $250 \text{ mg.m}^{-3}$  (limit PEL) a  $750 \text{ mg.m}^{-3}$  (limit NPK-P). (Nařízení vlády č. 361/2007 Sb., 2007)

Referenční koncentrace je stanovena na úrovni  $2,3 \mu\text{g.m}^{-3}$  ve venkovním ovzduší. (Referenční koncentrace vydané SZÚ Praha, 2003)

IARC považuje TCE za lidský karcinogen (Skupina 1). (Trichloroethylene, Tetrachloroethylene, and Some Other Chlorinated Agents, 2014)



WHO uvádí míru rizika vzniku rakoviny plic  $1 \times 10^{-5}$  při dlouhodobému vystavení koncentraci TCE  $23 \text{ mg.m}^{-3}$  (při vyšší koncentraci se riziko úměrně zvyšuje). (WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants, 2010)

## 1.5 Částice ve vzduchu

Částice ve vzduchu PM (PM z anglického názvu "particulate matter"), nazývané též polétavý prach, nejsou jednou znečišťující látkou, ale spíše směsí mnoha chemických látek. Je to komplexní směs pevných látek a aerosolů složená z malých kapiček kapaliny, suchých pevných úlomků a pevných jader s kapalným povlakem. Částice se velmi liší velikostí, tvarem a chemickým složením a mohou obsahovat anorganické ionty, kovové sloučeniny, elementární uhlík, organické sloučeniny a sloučeniny ze zemské kůry. Čím menší je průměr částice, tím větší škody může typicky způsobit. PM často pocházejí z různých zdrojů emisí a mají také různé chemické složení. (Inhalable Particulate Matter and Health (PM2.5 and PM10), b.r.)

Pro potřeby měření se celosvětově ustanovily tři hlavní kategorie PM částic podle jejich velikosti, kde číslo za PM vyjadřuje velikost částic v  $\mu\text{m}$ .

**PM10** jsou hrubé částice prachu o aerodynamickém průměru menším nebo rovném  $10 \mu\text{m}$ . Jsou při dýchání zachyceny v horních cestách dýchacích. Krátkodobé expozice PM10 jsou spojeny s podrážděním dýchacích cest a častějším infekcím, při dlouhodobých pak k rozvoji vážných onemocnění dýchacích cest, včetně astmatu a chronické obstrukční plicní nemoci (CHOPN). (Inhalable Particulate Matter and Health (PM2.5 and PM10), b.r.)

Zákon o ochraně ovzduší č. 201/2012 Sb. stanovuje imisní limity pro PM10  $50 \mu\text{g.m}^{-3}/24 \text{ hod.}$  (smí být překročen max. 35krát za rok) a  $40 \mu\text{g.m}^{-3}/\text{rok}$  (průměr). Dále tento zákon stanovuje roční imisní limity pro celkový obsah znečišťující látky v částicích PM10 vyhlášené pro ochranu zdraví lidí. (Zákon č. 201/2012 Sb., 2012)

Tabulka 16 Roční imisní limity pro PM10 – znečišťující látky. Zdroj Zákon č. 201/2012 (vlastní zpracování)

Znečišťující látka	Doba průměrování	Imisní limit
Arsen	1 kalendářní rok	$6 \text{ ng.m}^{-3}$
Kadmium	1 kalendářní rok	$5 \text{ ng.m}^{-3}$

Znečišťující látka	Doba průměrování	Imisní limit
Nikl	1 kalendářní rok	20 ng.m <sup>-3</sup>
Benzo(a)pyren	1 kalendářní rok	1 ng.m <sup>-3</sup>

Vyhláška č. 6/2003 Sb. stanovuje limitní koncentrace chemických ukazatelů ve vnitřním prostředí staveb pro frakce prachu PM10 (prachové částice s převládající velikostí částic o průměru 10 μm, které projdou speciálním selektivním filtrem s 50 % účinností) na 150 μg.m<sup>-3</sup>. (Vyhláška č. 6/2003 Sb., 2003)

WHO stanovuje limitní emise pro PM10 na 15 μg.m<sup>-3</sup> (roční průměr) a 45 μg.m<sup>-3</sup> (24hodinový průměr). (New WHO air quality guidelines will save lives, 2022)

**PM2,5** jsou jemné částice prachu o aerodynamickém průměru menším nebo rovném 2,5 μm. Expozice PM2,5 je spojována s předčasným úmrtím, zejména u lidí s chronickými srdečními nebo plicními chorobami, a sníženým růstem plic u dětí. (Inhalable Particulate Matter and Health (PM2.5 and PM10), b.r.)

PM10 a PM2,5 často pocházejí z různých zdrojů emisí a mají také různé chemické složení. Emise ze spalování benzínu, oleje, motorové nafty nebo dřeva produkují velkou část znečištění PM2,5, které se nachází ve venkovním ovzduší, a také významnou část PM10. PM10 také zahrnuje prach ze staveníšť, skládek a zemědělství, lesních požárů a spalování odpadu, průmyslových zdrojů, větrem navátý prach z otevřených ploch, pyl a úlomky bakterií. (Outdoor Air Pollution, 2015)

Zákon o ochraně ovzduší č. 201/2012 Sb. stanovuje imisní limity pro PM2,5 na 25 μg.m<sup>-3</sup>/24 hod. (smí být překročen max. 35krát za rok) a 12 μg.m<sup>-3</sup>/rok (průměr). (Zákon č. 201/2012 Sb., 2012)

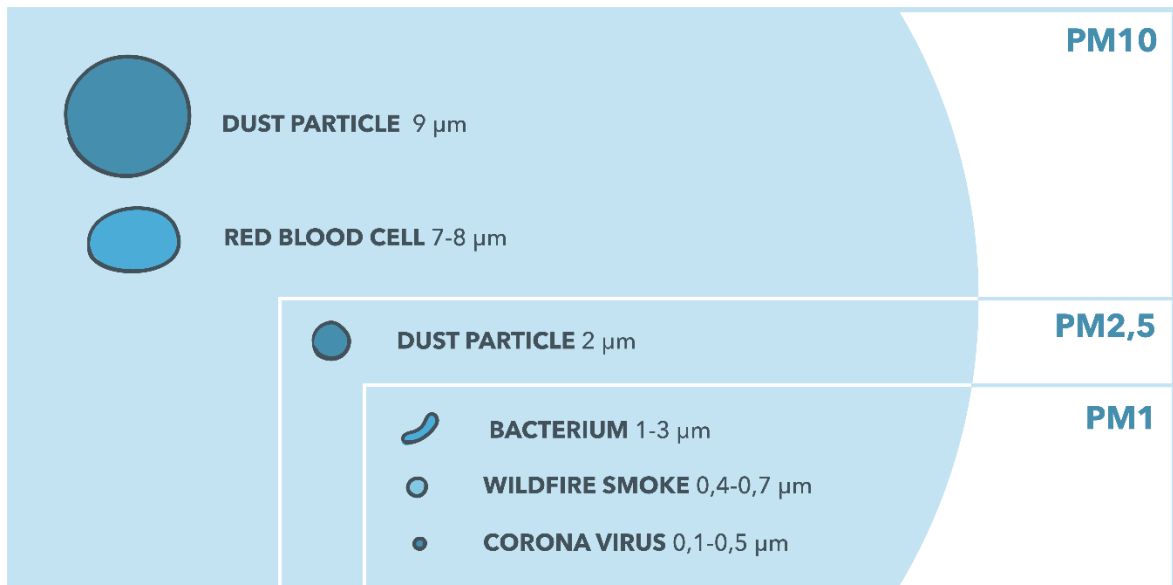
Vyhláška č. 6/2003 Sb. stanovuje limitní koncentrace chemických ukazatelů ve vnitřním prostředí staveb pro frakce prachu PM2,5 (prachové částice s převládající velikostí částic o průměru 2,5 μm, které projdou speciálním selektivním filtrem s 50 % účinností) na 80 μg.m<sup>-3</sup>. (Vyhláška č. 6/2003 Sb., 2003)

WHO stanovuje limitní emise pro PM2,5 na 5 μg.m<sup>-3</sup> (roční průměr) a 15 μg.m<sup>-3</sup> (24hodinový průměr). (New WHO air quality guidelines will save lives, 2022)

PM1 jsou velmi jemné částice o velikosti menší než 1  $\mu\text{m}$ , PM1 jsou považovány za obzvláště nebezpečné kvůli své extrémně malé velikosti, jsou tedy dostatečně malé na to, aby pronikly do plicní tkáně a dostaly se do krevního řečiště. PM1 pak může cirkulovat v celém těle a způsobit systémové zdravotní účinky. Navzdory svému menšímu průměru má typická částice PM1 větší fyzický povrch než jiné jemné částice, jako je PM2,5. To zvyšuje pravděpodobnost, že PM1 na svém povrchu přenášejí těžké kovy, chemikálie a těkavé organické sloučeniny (VOC) a při vdechování způsobují ještě větší škody. (Akhtar a Palagiano, 2018, s. 375-378; Outdoor Air Pollution, 2015)

Některé zdroje PM1 se vyskytují přirozeně, jako jsou minerální úlomky a aerosoly z mořské mlhy. Valná většina PM1 ve vzduchu pochází z lidské činnosti, jako jsou emise z továren a jiné průmyslové činnosti, výfukových plynů, částic z otěru pneumatik, kouř z lesních požárů nebo spalování dřeva v interiérech. Vzhledem k tomu, že většinu zdrojů PM1 je tvořena lidskou činností, jsou hustě osídlené městské oblasti, zejména ty s frekventovanými silnicemi nebo průmyslovými zařízeními, obzvláště náchylné ke znečištění částicemi PM1 a dalším typům znečištění částicemi. (What's the difference between PM2.5, and PM1?, 2019)

Emise ze spalování benzínu, oleje, motorové nafty nebo dřeva produkují velkou část tohoto znečištění PM2,5, které se nachází ve venkovním ovzduší, a také významnou část PM10. PM10 také zahrnuje prach ze staveníšť, skládek a zemědělství, lesních požárů a spalování křovin/odpadu, průmyslových zdrojů, větrem navátý prach z otevřených ploch, pyl a úlomky bakterií. Na rozdíl od PM10 a PM2,5 nejsou v ČR pro PM1 stanoveny emisní limity a technologie monitorování pro PM1 je omezená. Stále probíhá výzkum s cílem lépe porozumět specifickým škodám, které PM1 způsobují na rozdíl od jiných znečišťujících částic, jako jsou PM2,5 a ultrajemné částice (UFP). PM mohou být buď přímo emitovány ze zdrojů (primární částice), nebo mohou vznikat v atmosféře chemickými reakcemi plynů (sekundární částice), jako je oxid siřičitý ( $\text{SO}_2$ ), oxidy dusíku ( $\text{NO}_x$ ) a některé organické sloučeniny. Tyto organické sloučeniny mohou být emitovány jak z přírodních zdrojů, jako jsou stromy a vegetace, tak z umělých (antropogenních) zdrojů, jako jsou průmyslové procesy a výfukové plyny motorových vozidel. (Outdoor Air Pollution, 2015)



Obrázek 2 Porovnání velikosti částic PM. Zdroj IQAir

WHO stanovila v **Global Air Quality Guidelines (AQGs)** čtyři limity (kategorie) pro PM10 a PM2,5, definuje je však jako vliv denní a roční koncentrace k pravděpodobnosti poškození zdraví (onemocnění). (WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide, 2005)

Annual mean level	PM <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	PM <sub>2,5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	Basis for the selected level
WHO interim target 1	70	35	These levels are estimated to be associated with about 15% higher long-term mortality than at AQG levels.
WHO interim target 2	50	25	In addition to other health benefits, these levels lower risk of premature mortality by approximately 6% (2–11%) compared to interim target 1.
WHO interim target 3	30	15	In addition to other health benefits, these levels lower risk of premature mortality by approximately another 6% (2–11%) compared to interim target 2 levels.
WHO AQGs	20	10	These are the lowest levels at which total, cardiopulmonary and lung cancer mortality have been shown to increase with more than 95% confidence in response to PM <sub>2,5</sub> in the ACS study (323). <sup>a</sup> The use of the PM <sub>2,5</sub> guideline is preferred.

Obrázek 3 Global Air Quality Guidelines. Zdroj WHO

## 2 MĚŘENÍ KONCENTRACÍ VZDUŠNÝCH POLUTANTŮ

Každá látka na základě svých fyzikálně-chemických vlastností daných složením vyžaduje odlišné fyzikální způsoby měření. Moderní používané senzory pracují na principu převodu chemické koncentrace na elektrický signál, který lze následně již elektronicky zpracovat a vyhodnotit.

### 2.1 Senzory plynů

Pro měření kvality ovzduší by bylo ideální používat jeden senzor, který by měřil všechny zájmové polutanty. Bohužel ale v praxi zatím takový senzor neexistuje. Neexistuje zatím totiž jedna společná technologie, která by to umožňovala. Přesněji řečeno, je možné jedním senzorem analyzovat kvalitu vzduchu, ale pouze jako souhrnný plyn, kdy sice je možné informovat o jeho kvalitě, ale již nelze určit, která složka vzduchu konkrétně má jakou koncentraci. Pro přesnější analýzu vzduchu je tedy nutné použít hned několik různých typů senzorů každý reagující na odlišný plyn.

**GSE (Gas Sensitive Electrochemical) / EC (ElectroChemical)** kde je měřicí signál úměrný koncentraci sledovaného plynu je vytvářen na základě chemické redukce či oxidace molekul sledovaného plynu s elektrolytem uzavřeným v těle senzoru. Materiál elektrod, elektrolyt i napětí mezi elektrodami jsou zvoleny tak, aby na měřicí elektrodě docházelo k elektrochemické reakci doprovázené vznikem volných elektronů. Ty vytváří slabý elektrický proud, který je již možné následně zpracovat (zesílit a vyhodnotit) na hodnotu koncentrace. Tyto senzory mají poměrně krátkou životnost senzoru (cca 1 až 2 roky), kdy je stárnutí senzorů způsobeno nevratnými chemickými změnami vedoucími k postupnému vyčerpání elektrolytu.

**GSS (Gas Sensitive Semiconductor) / MOS (Metal-Oxide Sensor)** využívají technologii založenou na interakci molekul plynu s vodivým materiálem, u něhož mění plyn svoji přítomností jeho elektrickou vodivost a ta je pak následně již elektricky vyhodnocována. Použitelnými materiály jsou zejména oxidy kovů (např. oxidy zinku, cínu, wolframu, india), na jehož povrchu se vytvoří ve vzduchu rovnovážný stav s molekulami kyslíku, který se za přítomnosti jiného plynu poruší a způsobí změnu vodivosti. Pro některé plyny je tato snímací vrstva vytápěná na teploty 270 °C až 900 °C. V závislosti na konkrétním plynu (složce vzduchu) je nutné pro detekci použít jiný materiál. Vzhledem k jednoduchému principu lze touto technologií současně snímat a vyhodnocovat různé typů plynů v rámci jedné integrované součástky (senzoru).

Ve spojitosti se GSS/MOS senzory TVOC je možné se setkat i s veličinou  $\text{CO}_2\text{ekv}$  (či anglicky  $\text{CO}_2\text{eq}$ , nebo  $\text{eCO}_2$ ). Jde o to, že senzor neměří přímo koncentraci  $\text{CO}_2$ , ale přepočítává hrubý naměřený signál algoritmem na tzv. ekvivalent koncentraci  $\text{CO}_2$ . To je hodnota, která přirovnává vliv (účinek) jiných plynných látek na daleko známější hodnoty (vlivu)  $\text{CO}_2$ . Zde se vychází z uživatelsky již ustálené představy, že  $\text{CO}_2$  se často používá nejen jako ukazatel koncentrace tohoto konkrétního plynu, ale všeobecně se bere jako ukazatel celkové kvality vzduchu v místnosti. Také se zde využívá faktu, že GSS/MOS technologie senzorů vlastně přímo neměří molekuly VOC, ale fakticky spíše jejich reakce s molekulami kyslíku navázaného na povrchu snímací plošky z oxidu kovu. To ovlivňuje její elektrický odpor / vodivost.

**NDIR (Nondispersive Infrared Sensor)** senzor pracuje na základě absorpce části infračerveného (IR) spektra v molekulách měřeného plynu, kde koncentrace plynu je definována zeslabením intenzity infračerveného záření určité vlnové délky, které je generováno jednou, či více, infračervenými LED diodami a následně po průchodu komorou s plynem přijímané fotodetektorem, nebo akustickým snímačem. U současných moderních provedení tento princip představuje nejlepší výsledky měření, vyznačuje se selektivitou, dlouhodobou stabilitou a dlouhou životností. Nevýhodou je vyšší pořizovací cena a omezená možnost miniaturizace. Jistým limitujícím faktorem je skutečnost, že vyšší koncentrace plynu vedou k tzv. „oslepnutí“ senzoru, protože příliš mnoho molekul je schopno pohltit prakticky veškeré IR záření sledovaných vlnových délek, a tedy na přijímač záření již žádné nedopadne.

**PID (Photoionisation Detector)** je založený na měření počtu excitovaných iontů molekul ionizovaných plynů vlivem energie dodané fotony ultrafialového záření (dodávaným UV světlem). Vzniklé excitované (volné) kladné a záporné ionty jsou pak sbírány na měřicích elektrodách, kde generují elektrický signál. Ten je již následně zpracován (zesílen a vyhodnocen) v elektronice senzoru. Velikost signálu pak odpovídá koncentraci plynu v ovzduší.

(Vojáček, 2019)

Tabulka 17 Typy senzorů pro vybrané plyny. Zdroj NCBI. (vlastní zpracování)

Měřený plyn	Typy senzoru pro detekci plynu
Benzo[ <i>a</i> ]pyren	PID
Formaldehyd	GSE/EC
CO	GSS/MOS, GSE/EC, NDIR
CO <sub>2</sub>	GSS/MOS, GSE/EC, NDIR
Naftalen	GSS/MOS, PID
NO <sub>x</sub>	GSE/EC
O <sub>3</sub>	PID
Trichlorethylen	GSS/MOS, PID
Tetrachlorethylen	GSS/MOS, PID

### Přepočet koncentrací

Výrobci většinou uvádějí měřicí rozsahy a rozlišení senzorů plynů v poměrových jednotkách ppm (počet prvků v miliónu). Naopak v zákonech a nařízeních bývají často dovolené limity koncentrací uváděny v hmotnostních jednotkách mg.m<sup>-3</sup> nebo μg.m<sup>-3</sup>. Přesný přepočet z *X* koncentrace v ppm na *Y* koncentraci v mg.m<sup>-3</sup> využívá hodnoty molární hmotnosti látky *M* při 25 °C a 101,325 kPa. (Boguski, 2006)

$$Y = X * M / 24,45 \quad (1)$$

Pro TVOC se však obvykle uvádí univerzální přepočet, který odpovídá průměrné hmotnosti molekul VOC látek 78,95 g.mol<sup>-1</sup>. (Boguski, 2006)

$$1 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3} = 310 \text{ ppb} \quad (2)$$

**Objemová aktivita radonu** se stanovuje elektretovými dozimetry, které jsou rozmístěny v měřeném objektu. Dozimetry je tvořen expoziční komorou s elektretem, kdy se po vložení elektretu do expoziční komory se indukují elektrický náboj. Okolní vzduch včetně radonu

difunduje filtrem do citlivého objemu expoziční komory. V komoře dochází k přeměnám radonu a dalším přeměnám produktů přeměny radonu. Takto dochází k degradaci náboje na povrchu elektretu. Míra degradace náboje na povrchu elektretu během jeho expozice v interiéru vyjadřuje průměrnou objemovou aktivitu radonu za dobu expozice. (Měření radonu v interiéru, c2012-2023)

## 2.2 Snímače PM

Pro zjištění množství PM ve vzduchu je používáno několik metod. Některé metody využívají filtrace vzduchu přes vhodný filtr (dle velikosti zjišťovaných částic) účinným čerpadlem. **Gravimetrie** stanovuje množství částic z rozdílu hmotnosti filtru po a před expozicí. **Radiometrie (RADIO)** je založena na rozdílu absorpce beta záření mezi neexponovaným a exponovaným filtračním materiálem. **Křemenné oscilační mikrováhy (TEOM)** měří hmotnost vzorku zachyceného na filtru podle změny frekvence oscilujícího kuželového nosiče. (Skácel a Tekáč, 2019)

Optické senzory **OPC (Optical Particle Counter)** pracují na principu pohlcení či rozptýlení paprsku světla na PM částicích pro měření (zjištění) počtu, velikosti a koncentraci částic. Vychází se z jednoduchého poznatku, že čím více je částic prachu v měřeném vzorku vzduchu, tím méně světla přes ně projde. Množství pohlceného nebo odraženého světla na částicích je tak úměrné okamžité koncentraci částic v daném vzorku vzduchu. (SPS30, 2022)

## 2.3 Hodnocení kvality ovzduší

Jelikož je žádoucí monitorovat kvalitu vzduchu kontinuálně, tak byly zavedeny různé indikátory (indexy), které vyjadřují číselně stav ovzduší a jejich hodnota je tak snadno reprodukovatelná. Jsou používány jak pro hodnocení kvality venkovního vzduchu, tak i pro hodnocení kvality vzduchu uvnitř budov a místností.

V EU byl v roce 2017 zaveden nový index **European Air Quality Index (EAQI)**. (European Air Quality Index Calculation, 2021)



POLLUTANT	INDEX LEVEL <i>(based on pollutant concentrations in µg/m<sup>3</sup>)</i>					
	1 Very good	2 Good	3 Medium	4 Poor	5 Very Poor	6 Extremely Poor
Ozone (O <sub>3</sub> )	0-50	50-100	100-130	130-240	240-380	380-800
Nitrogen dioxide (NO <sub>2</sub> )	0-40	40-90	90-120	120-230	230-340	340-1000
Sulphur dioxide (SO <sub>2</sub> )	0-100	100-200	200-350	350-500	500-750	750-1250
Particules less than 10 µm (PM <sub>10</sub> )	0-20	20-40	40-50	50-100	100-150	150-1200
Particules less than 2.5 µm (PM <sub>2.5</sub> )	0-10	10-20	20-25	25-50	50-75	75-800

Note: PM10 and PM2.5 values are based on 24-hour running means

Obrázek 4 European Air Quality Index s vyhodnocením. Zdroj CAMS

Asi obecně nejznámější je **Air Quality Index (AQI)** pro pět hlavních látek znečišťujících ovzduší (přízemní ozón, souhrn částic PM<sub>2,5</sub> a PM<sub>10</sub>, oxid uhelnatý, oxid siřičitý a oxid dusičitý). (Air pollutants measured in AQI, 2022)

	US AQI Level	PM <sub>2.5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	Health Recommendation (for 24 hour exposure)
	Good 0-50	0-12.0	Air quality is satisfactory and poses little or no risk.
	Moderate 51-100	12.1-35.4	Sensitive individuals should avoid outdoor activity as they may experience respiratory symptoms.
	Unhealthy for Sensitive Groups 101-150	35.5-55.4	General public and sensitive individuals in particular are at risk to experience irritation and respiratory problems.
	Unhealthy 151-200	55.5-150.4	Increased likelihood of adverse effects and aggravation to the heart and lungs among general public.
	Very Unhealthy 201-300	150.5-250.4	General public will be noticeably affected. Sensitive groups should restrict outdoor activities.
	Hazardous 301+	250.5+	General public at high risk of experiencing strong irritations and adverse health effects. Should avoid outdoor activities.

Obrázek 5 Air Quality Index s vyhodnocením. Zdroj IQAir

Pro **hodnocení kvality vnitřního vzduchu** používají někteří výrobci měřících zařízení **Indoor Air Quality index (IAQ)**. Každý výrobce, či organizace však definuje jeho výpočet odlišně. Například IAQUK zahrnuje do výpočtu IAQ indexu teplotu, relativní vlhkost, CO, CO<sub>2</sub> a NO<sub>2</sub>. Má celkem pět úrovní kvality vnitřního vzduchu. (Riggs, 2015)

Rating	Excellent (5 points each)	Good (4 points each)	Fair (3 points each)	Poor (2 points each)	Inadequate (1 point each)
Temperature (°C)	18-21°C	Plus or minus 1°C (including variance in occupied rooms, seasons and times of day)	Plus or minus 2°C (including variance in occupied rooms, seasons and times of day)	Plus or minus 3°C (including variance in occupied rooms, seasons and times of day)	Plus or minus 4°C or more (including variance in occupied rooms, seasons and times of day)
Carbon Dioxide (PPM)	< 600	601 - 800	801 - 1500	1501 - 1800	> 1801
Relative Humidity (% RH)	40 - 60	< 40 / > 60	< 30 / > 70	< 20 / > 80	< 10 / > 90
Carbon Monoxide mg/m <sup>3</sup>	0	-	1 - 7	-	7 >
Nitrogen Dioxide (mg/m <sup>3</sup> )	< 0.2	-	0.2 - 0.4	-	0.4 >

Obrázek 6 IAQUK hodnocení IAQ indexu (výřez).  
Zdroj IAQUK.org.uk

Green Econometrics oproti IAQUK využívá pro stanovení IAQ indexu pouze koncentraci PM<sub>2,5</sub>, VOC a CO<sub>2</sub>. Má celkem sedm úrovní kvality vnitřního vzduchu. (Davies, 2020)

IAQ Index			
PM2.5	VOC	CO2	
µg/m <sup>3</sup>	µg/m <sup>3</sup>	ppm	Hazard Level
<12	100	700	Good
35	200	800	Moderate
56	300	1100	Poor
150	400	1500	Unhealthy
250	500	2000	Very Unhealthy
300	600	3000	Hazardous
500	700	5000	Extreme

Obrázek 7 Vyhodnocení IAQ indexu. Zdroj Green Econometrics

**Total VOC (TVOC)** je měření celkové koncentrace více VOC látek současně přítomných ve vzduchu. Měření koncentrací TVOC je výrazně levnější a, z pohledu konstrukce a ceny senzoru (zařízení), i výrazně jednodušší než oddělené měření koncentrace mnoha jednotlivých VOC. Proto se ve většině případů pro potřeby trvalé průběžné kontroly kvality vzduchu v místnostech využívá právě koncentrace TVOC, což ale přináší problémy s tím, co výsledné naměřené číslo koncentrace vlastně konkrétně znamená. Na základě výzkumu

VOC, které se obvykle vyskytují ve vnitřních prostředích, se objevilo několik popisu TVOC standardů. Například norma ISO 16000-29 definuje TVOC jako „směsný plyn VOC“ složený ze čtyřiceti jednotlivých sloučenin. Jedná se o standardizovanou směs plynů používanou k simulaci typického vnitřního vzduchu. Na druhou stranu někteří výrobci senzorů si definovali vlastní „typický mix IAQ“ složený z dvaceti dvou látek VOC při koncentracích podobných koncentracím stanoveným průměrně v obytných vnitřních prostředích. (What is air quality and how the terms VOC and TVOC relate to it, 2016; Vojáček, 2019)

Tabulka 18 Interpretace TVOC. Zdroj Vojáček. (vlastní zpracování)

Kvalita vzduchu	Hodnota TVOC	Potenciální zdravotní problémy
Dobrá.	0-300 ppb	Žádné.
Ještě vyhovující.	300-600 ppb	Žádné.
Zhoršená.	600-1000 ppb	Může zhoršovat komfort pobytu.
Špatná.	1000-3000 ppb	Může ovlivňovat kvalitu dýchání.
Nezdravá.	3000-10000 ppb	Může již způsobit zdravotní problémy.
Nebezpečný vzduch.	> 10000 ppb	Může již rychle způsobit významné problémy.

## 2.4 Preventivní opatření ke zlepšení kvality vnitřního vzduchu

Kvalita vzduchu v budovách ovlivňuje produktivitu a pohodu lidí. Když je jich na malém prostoru tolik, může se rychle hromadit prach a znečišťující látky. Pokud tento problém není řešen, lidé si budou často stěžovat na dýchací potíže a bolesti hlavy. Dodržováním následujících pěti doporučení dojde ke zlepšení kvality vzduchu v interiéru.

**Sledování kvality vnitřního vzduchu** – monitory kvality vzduchu jsou zařízení, která poskytují přesné údaje o znečišťujících látkách ve vzduchu. Tato zařízení dokáží detekovat oxid uhelnatý, spóry plísní, alergeny, VOC a další. Měly by se pravidelně provádět testy kvality vzduchu a provádět nezbytná zlepšení.

**Sledování úrovně vlhkosti vzduchu** – jako prevenci proti růstu plísní by se měla udržovat úroveň vlhkosti mezi 30-50 %. V zimních měsících se vlhkost snižuje, v létě naopak stoupá.

**Zlepšení větrání v budově** – kdykoli je to možné, měli by se otevřít okna, aby se do budovy dostal čerstvý vzduch. To pomáhá zvýšit proudění vzduchu a zmírnit jakékoli znečišťující látky ve vzduchu. Pro zlepšení proudění vzduchu, by se měl odstranit nábytek, skříně a úložné boxy, které mohou blokovat větrací otvory. Pokud otevření dveří nebo oken nestačí, měli by se použít ventilátory a potrubní systémy. K zachycení alergenů a prachových částic pomůže i kvalitní klimatizační systém.

**Včasná výměna vzduchových filtrů** – pokud jsou vzduchové filtry klimatizačních jednotek ucpané, pak v budově nebude plynulé proudění vzduchu. Postupem času prach ucpe filtry a ohrožuje lidské zdraví. Pokud nejsou vzduchové filtry často měněny, kvalita vzduchu se sníží, což vede k alergickým reakcím a nepříjemnému zápachu. V kancelářském prostředí mohou elektronická zařízení, jako jsou počítače, čističe a faxy, snadno sbírat prach.

**Udržování čistého pracovního prostoru** – i přesto, že udržování čistoty v místnosti může být až na konci seznamu priorit, je to něco, co by mělo mít prioritu. Jelikož zdravý vzduch je kritickou součástí lidského zdraví je pravidelný úklid nezbytnou součástí udržování čistého vzduchu v interiéru.

(5 GREAT TIPS TO IMPROVE INDOOR AIR QUALITY, 2021)

## ZÁVĚR TEORETICKÉ ČÁSTI

V úvodu teoretické části byla provedena literární rešerše vybrané odborné literatury, vztahující se k problematice měření a vyhodnocení vzdušných polutantů. Pro každý z hlavních polutantů jsou uvedeny jeho základní vlastnosti, hlavní zdroje emisí a popsány účinky na lidské zdraví, tyto jsou uvedeny v následující tabulce (Tab.19).

Tabulka 19 Účinky vybraných polutantů na lidské zdraví. Zdroj autor

Polutant	Vliv na lidské zdraví
Benzo[a]pyren	Může být vdechnut, ale prostupuje do organismu i pokožkou. Toxický, mutagenní, ohrožuje zdravý vývoj plodu, riziko onemocnění rakovinou a způsobuje podráždění nebo až popálení kůže.
Benzen	Snížení počtu červených krvinek vedoucí až k anémii či leukémii. Zvyšuje krvácivost a oslabuje imunitní systém člověka. Chronická otrava vyvolává také poškození jater, ledvin a úbytek bílých krvinek.
Formaldehyd	Podráždění sliznic horních cest dýchacích a spojivek, pocit'ované subjektivně jako suchost, dráždění ke kašli, pálení očí a slzení.
Naftalen	Změny v krevním obrazu, poškození jater a ledvin. Dráždí oči, při kontaktu hrozí riziko zákalu rohovky nebo zánětu spojivek. Při požití dráždí trávicí trakt, vyvolává zvracení a průjem.
Oxidy dusíku	Dráždění sliznic, kdy jsou nebezpečné už velmi malé koncentrace. Při otravách je velmi nebezpečná hlavně dlouhodobá latence účinku. První náznaky otravy se projevují pálením očí, poklesem krevního tlaku, bolestmi hlavy a dýchacími potížemi až po několika hodinách.
Oxid uhelnatý	Únava, lidé se srdečními problémy pocit'ují bolest na prsou. Při vyšších koncentracích může dojít k poruchám vidění a koordinace, bolestem hlavy, závratím, zmatečnému chování a může být pocit'ována žaludeční nevolnost.
Oxid uhličitý	Únava, snížení pozornosti, bolest hlavy. Při vyšších koncentracích závratě, dýchací potíže, třes, zmatenost a zvonění v uších.

Polutant	Vliv na lidské zdraví
Ozon	Kašel nebo škrábání v krku, ztížení hlubokého dýchání, zanícení a poškození dýchacích cest. Zhoršení plicních onemocnění, jako je astma, emfyzém a chronická bronchitida.
Oxid siřičitý	Ztížené dýchání, změny čichu, zvýšená náchylnost k respiračním infekcím, příznaky chronické bronchitidy a zrychlený pokles funkce plic.
Poléťavý prach	Zvýšený počet chronických onemocnění plic u dětí i dospělých (kašel a stížené dýchání), nevratné genetické změny, karcinogenní působení, poruchy plodnosti.
Tetrachlorethylen	Poškození mozku, očí, ledvin, jater, pokožky, hrtanu a existují důkazy karcinogenity.
Trichlorethylen	Bolest hlavy, ztráta stability a třes, větší množství způsobuje závratě a ospalost a může způsobit až bezvědomí a genetické poruchy. Nadměrné působení vyvolává podráždění pokožky a očí, a může nevratně poškozovat mozek (účinky na centrální nervový systém), srdce, ledviny a játra.

Souhrn aktuálních limitů uvedených v právních dokumentech ČR a doporučení WHO je uveden v tabulce níže (Tab.20), kde stanovený imisní limit je uveden na 1 hodinu (pokud není stanoven na 1 hodinu, tak je uveden pro průměr za 8 nebo 24 hodin).

Tabulka 20 Přehled limitů dle právních předpisů ČR a doporučení WHO.  
(vlastní zpracování)

Polutant	Zákon 201/2012 Sb.	Vyhláška 6/2003 Sb.	NV 361/2007 Sb. (PEL)	Doporučení WHO
Benzo[a]pyren	1 ng.m <sup>-3</sup>		0,005 mg.m <sup>-3</sup>	1 ng.m <sup>-3</sup>
Benzen	5 µg.m <sup>-3</sup>	7 µg.m <sup>-3</sup>	3 mg.m <sup>-3</sup>	1 µg.m <sup>-3</sup>
Formaldehyd		60 µg.m <sup>-3</sup>	0,5 mg.m <sup>-3</sup>	60 µg.m <sup>-3</sup>
Naftalen		50 mg.m <sup>-3</sup>		0,01 mg.m <sup>-3</sup>
Oxidy dusíku (NO <sub>2</sub> / NO)	200 µg.m <sup>-3</sup>	100 µg.m <sup>-3</sup>	0,96 / 2,5 mg.m <sup>-3</sup>	200 µg.m <sup>-3</sup>

Polutant	Zákon 201/2012 Sb.	Vyhláška 6/2003 Sb.	NV 361/2007 Sb. (PEL)	Doporučení WHO
Oxid uhelnatý	10 mg.m <sup>-3</sup>	5 mg.m <sup>-3</sup>	23 mg.m <sup>-3</sup>	10 mg.m <sup>-3</sup>
Oxid siřičitý	350 µg.m <sup>-3</sup>			20 µg.m <sup>-3</sup>
Ozon	120 mg.m <sup>-3</sup>	100 µg.m <sup>-3</sup>	100 µg.m <sup>-3</sup>	100 µg.m <sup>-3</sup>
PM10	50 µg.m <sup>-3</sup>	150 µg.m <sup>-3</sup>		45 µg.m <sup>-3</sup>
PM2,5	25 µg.m <sup>-3</sup>	80 µg.m <sup>-3</sup>		15 µg.m <sup>-3</sup>
Tetrachlorethylen		150 mg.m <sup>-3</sup>	138 mg.m <sup>-3</sup>	0,25 mg.m <sup>-3</sup>
Trichlorethylen		150 µg.m <sup>-3</sup>	250 mg.m <sup>-3</sup>	23 mg.m <sup>-3</sup>

Dále byla provedena literární rešerše s cílem zjištění, jaké technologie senzorů a čidel jsou v současné době využívány pro měření imisí hlavních vzdušných polutantů. Na základě této rešerše budou v praktické části použité příslušné senzory a čidla.

V závěru teoretické části byla uvedena obecná pravidla, při jejichž aplikaci a dodržování dojde prokazatelně ke zlepšení kvality vnitřního vzduchu. Tato doporučení budou sloužit jako podklad pro nápravné akce pro zlepšení kvality vnitřního vzduchu na monitorovaném pracovišti.

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**



### 3 ZAŘÍZENÍ PRO MĚŘENÍ VZDUŠNÝCH POLUTANTŮ

Pro měření vzdušných polutantů jsou dostupná různá zařízení, od jednoduchých zařízení, která měří pouze vybrané veličiny až po profesionální, které používají akreditované laboratoře. Je jistě výhodnější měřit kvalitu vzduchu kontinuálně než provést jednorázové měření, které nemá, z důvodu měnících se podmínek během roku, takovou vypovídající hodnotu. (Vojáček, 2019)

Právě za účelem možnosti kontinuálního měření bylo v rámci této práce vyvinuto měřicí zařízení Environmental Air Cube (EAC). Před zahájením práce na konstrukci zařízení byla zpracována DFMEA (PŘÍLOHA P I), která měla za účel předejít potencionálním selháním návrhu zařízení, či jeho částí.

Zařízení se skládá ze dvou částí, první je měřicí jednotka, která je schopna samostatného provozu na místě, kde je potřebné měření provést. Druhou je ovládací program, který umožňuje nastavení měření, přenos dat z/do měřicí jednotky, jejich zpracování a archivaci. Celé zařízení bylo konstruováno s cílem maximálních výrobních nákladů 3 000,- Kč proto, aby bylo při případné výrobě cenově dostupné.

Tabulka 21 Rozpočet konstrukce zařízení. Zdroj autor

Komponenta	Cena (Kč)
Součástky	1800
DPS	200
3D tisk	600
Ostatní (cín, vodiče, konektory)	400
<b>CELKEM</b>	<b>3000</b>

Veškeré zdrojové kódy jsou uloženy v elektronické podobě v archivu této práce na WWW adrese: [https://www.ctvrtyky.info/DP\\_Marik.zip](https://www.ctvrtyky.info/DP_Marik.zip).

Zařízení umožňuje měření ve dvou režimech. Prvním je manuální režim, při kterém uživatel spustí ručně měření na neomezenou dobu a toto měření může taktéž kdykoli ručně ukončit. Pro toto měření není nutné připojit měřicí jednotku k PC, jelikož jednotka provádí měření zcela samostatně. V režimu programového měření je pomocí ovládacího programu v PC

vytvořen program, který je nahrán do měřící jednotky a jednotka měří dle tohoto nastaveného programu. Toho lze využít například pro potřeby časově omezeného měření.

Tabulka 22 Typ, rozsah a přesnost veličin měřených měřící jednotkou. Zdroj autor

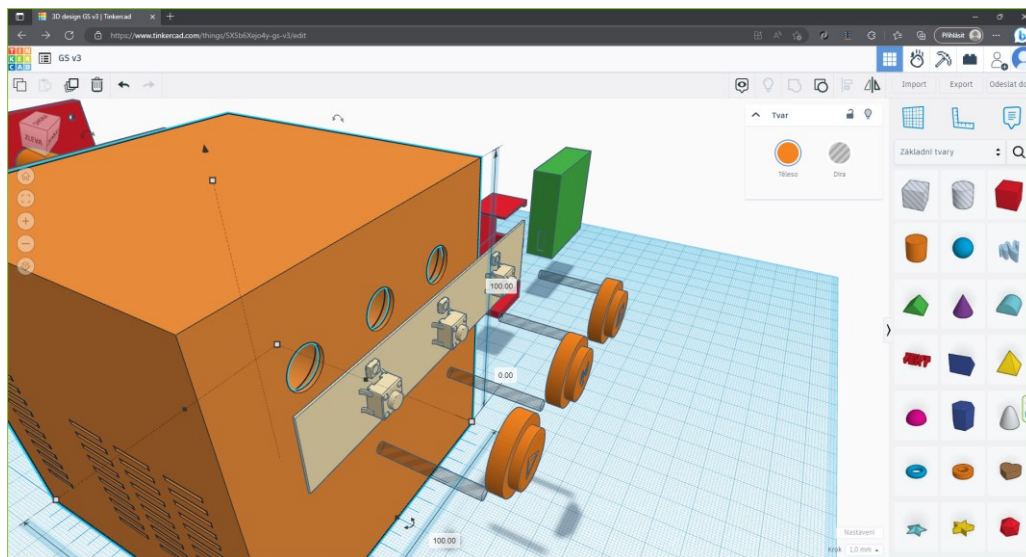
Měřená veličina	Rozsah	Přesnost
Teplota vzduchu	-40-85 °C	±0,5 %
Relativní vlhkost vzduchu	0-100 % RH	±3 %
Tlak vzduchu	300-1100 hPa	±0,25 %
Koncentrace TVOC	0,5-1000 ppm	5 %
Koncentrace eCO <sub>2</sub>	min. 400 ppm	5 %
Koncentrace CO <sub>2</sub>	400-5000 ppm	±40 ppm
IAQ index	0-500	
Polétavý prach	0-1000 µg.m-3	±10 %

### 3.1 Měřící jednotka

Měřící jednotka je koncipována jako kompaktní přenositelné zařízení, aby jej bylo možno umístit kdekoli, kde je potřebné provést měření. Díky zabudovanému akumulátoru jej lze provozovat i bez nutnosti napájení z elektrické sítě. Použitá paměťová karta o velikosti 2 GB umožňuje uložení více jak 10 tisíc denních záznamů (cca 27 let záznamu při periodě měření 1 minuta). Data z jednotky je možné sdílet i v síti internet za pomoci souboru JSON (aktuální data), nebo jako soubory CSV (denní záznamy).

**Mechanická konstrukce** měřící jednotky je řešena jako krychle o straně 100 mm kdy veškeré komponenty jsou umístěny uvnitř jejího těla. 3D návrh byl vytvořen v online programu Tinkercad a byl vytisknut z materiálu PETG, který neuvolňuje ze své struktury žádné VOC, ani jiné polutanty. Vstupy měřeného vzduchu jsou řešeny průduchy, aby okolní vzduch volně procházel celou jednotkou a měřený vzorek měl vypovídající hodnotu.

Při umístění čidel v těle měřicí jednotky byly respektovány pokyny výrobců tak, aby čidla svým umístěním a orientací zajistily správné měření. (Mechanical Design and Assembly Guidelines for SPS30, 2019; Design-in Guide SCD4x CO2 Sensor, 2021)



Obrázek 8 Snímek obrazovky programu Tinkercad. Zdroj autor

Pro **elektrickou konstrukci** byly jednotlivé komponenty zvoleny tak, aby splnili nejen stanovený rozpočet, ale aby také dosahovaly požadované přesnosti měření.

Tabulka 23 Komponenty použité pro konstrukci měřicí jednotky. Zdroj autor

Komponenta	Typ	Výrobce
Mikropočítač	D1 mini	WeMos
Senzor teploty, vlhkosti, tlaku a TVOC	BME680	BOSCH
Senzor CO <sub>2</sub>	SCD41	Sensirion
Senzor PM	SPS30	Sensirion
Obvod hodin reálného času	DS3231	Analog Devices
Obvod nabíjení akumulátoru	TP4056	TPOWER

**WeMos D1 Mini** je vývojová deska založená na mikroprocesoru ESP8266, tato deska je kompatibilní s Arduino IDE a NodeMCU. Všechny I/O piny mají přerušení a PWM (kromě pinu D0).

Tabulka 24 Základní parametry WeMos D1 mini. Zdroj wemos.cc (vlastní zpracování)

Parametr	Hodnota
Procesor	ESP8266 32bit (ESP-12F)
Paměť flash	32 Mb (4 MB)
Anténa	Onboard PCB
Rozhraní pro periferie	UART, SPI, I <sup>2</sup> C, SDIO, GPIO, ADC, PWM
WiFi protokol	IEEE 802.11 b/g/n
Logická úroveň	3,3 V
Napájecí napětí	5 V

**Senzor VOC, tlaku, vlhkosti a teploty BME680** integruje vysoce lineární a přesné senzory měřených veličin. Byl speciálně vyvinut pro mobilní aplikace a přenositelná zařízení, kde jsou kritickými požadavky velikost a nízká spotřeba energie. Sensor TVOC pracuje na principu GSS/MOS. (Gas sensor BME680, 2022)

Tabulka 25 Základní parametry BME680. Zdroj Bosch Sensortec (vlastní zpracování)

Parametr	Hodnota
Napájecí napětí	1,71-3,6 V
Komunikační rozhraní	I <sup>2</sup> C a SPI
Senzor teploty	-40-85 °C (přesnost ±0,5 %)
Senzor vlhkosti	0-100 % RH (přesnost ±3 %)
Senzor tlaku	300-1100 hPa (přesnost ±0,25 %)
Senzor VOC	0,5-1000 ppm (přesnost 5 %)

**Senzor CO<sub>2</sub> SCD41** funguje na principu fotoakustického snímání (NDIR) a patentované technologii PASens<sup>®</sup> a CMOSens<sup>®</sup> společnosti Sensirion, která umožňuje bezkonkurenčně malou velikost senzoru v kombinaci s vysokým výkonem. Integrovaný snímač vlhkosti a teploty, nejlepší ve své třídě, umožňuje vynikající kompenzaci signálu. (SCD41, 2022)

Tabulka 26 Základní parametry SCD41. Zdroj Sensirion (vlastní zpracování)

Parametr	Hodnota
Napájecí napětí	2,4-5,5 V
Komunikační rozhraní	I <sup>2</sup> C
Senzor teploty	-10-65 °C (přesnost ±0,8 %)
Senzor vlhkosti	0-95 % RH (přesnost ±3 %)
Senzor CO <sub>2</sub>	400-5000 ppm (přesnost ±40 ppm)

**Senzor částic (PM) SPS30** s certifikací MCERTS představuje nový technologický průlom v optických senzorech PM. Princip měření je založen na laserovém rozptylu a využívá inovativní technologii odolnosti proti znečištění. Tato technologie spolu s kvalitními komponenty s dlouhou životností umožňuje přesné měření od prvního spuštění přístroje a po celou dobu jeho životnosti déle než deset let. (SPS30, 2022)

Tabulka 27 Základní parametry SPS30. Zdroj Sensirion (vlastní zpracování)

Parametr	Hodnota
Napájecí napětí	4,5-5,5 V
Komunikační rozhraní	I <sup>2</sup> C a UART
Měřené velikosti PM	PM1.0, PM2.5, PM4, PM10
Koncentrace PM	0–1000 µg.m <sup>3</sup>
Přesnost měření	±10 %

**Obvod hodin reálného času DS3231** jsou přesné hodiny reálného času (dále RTC) s integrovaným teplotně kompenzovaným krystalovým oscilátorem (TCXO). RTC je zálo-

hován vlastním akumulátorem a udržuje přesný čas i když je napájení jednotky přerušeno. (DS3231, 2015)

Tabulka 28 Základní parametry DS3231. Zdroj Analog Devices (vlastní zpracování)

Parametr	Hodnota
Napájecí napětí	2,3-5,5 V
Komunikační rozhraní	I <sup>2</sup> C
Přesnost	±2ppm 0–40 °C, ±3.5ppm -40–85 °C

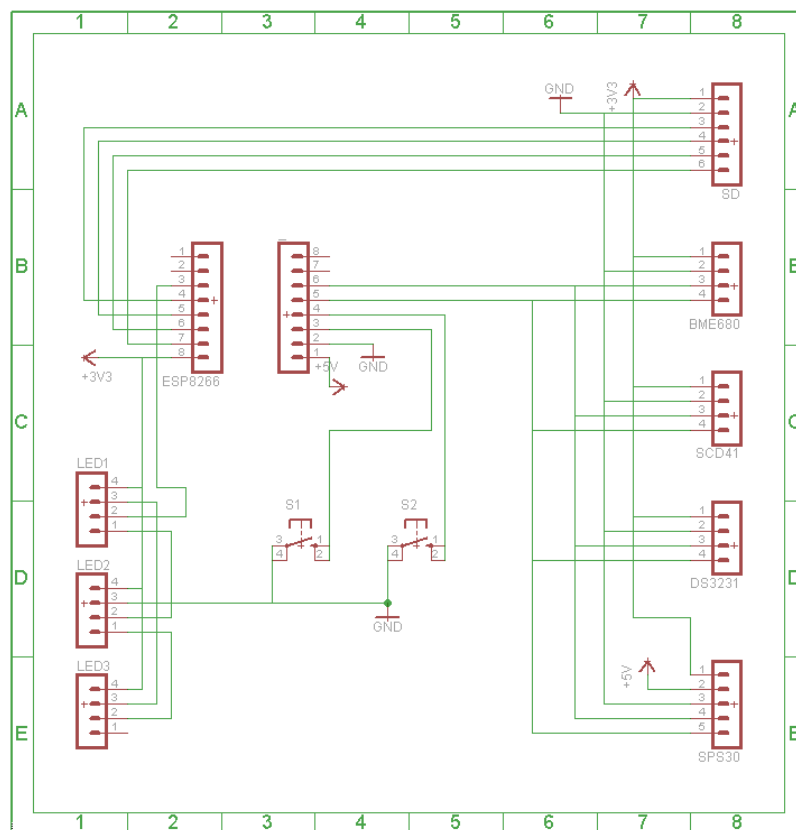
**TP4056** je kompletní lineární nabíječka s konstantním proudem/konstantním napětím pro jedno článkové lithium-iontové (lithium-polymerové) akumulátory. Díky vnitřní architektuře PMOSFET není vyžadována žádná blokovácí dioda (která má zabránit zápornému nabíjecímu proudu). Tepelná zpětná vazba reguluje nabíjecí proud, aby se omezila teplota při provozu s vysokým výkonem nebo při vysoké okolní teplotě. (TP4056, b.r.) Nabíjecí proud je v jednotce omezen na 0,5 A (maximálně) z důvodu zamezení ohřevu akumulátoru během nabíjení, které by způsobilo chyby měření (především hodnoty teploty vzduchu).

Tabulka 29 Základní parametry TP4056. Zdroj TPOWER (vlastní zpracování)

Parametr	Hodnota
Napájecí napětí	4-8 V
Nabíjecí napětí	4,2 V
Nabíjecí proud	500/1000 mA

**Lithium-polymerový akumulátor** o kapacitě 8000 mAh zajišťuje provoz měřící stanice i v místech bez dostupné elektrické sítě. Doba nabíjení je dána kapacitou akumulátoru a činí 16 hodin. Po provedení zkušebních měření v jednotlivých stavech stanice byly stanoveny kapacity akumulátoru (při spuštění s plně nabitým akumulátorem).

Jako **datové sběrnice** pro komunikaci periférií s mikropočítačem jsou použity I<sup>2</sup>C (RTC a senzory) a SPI (microSD karta).

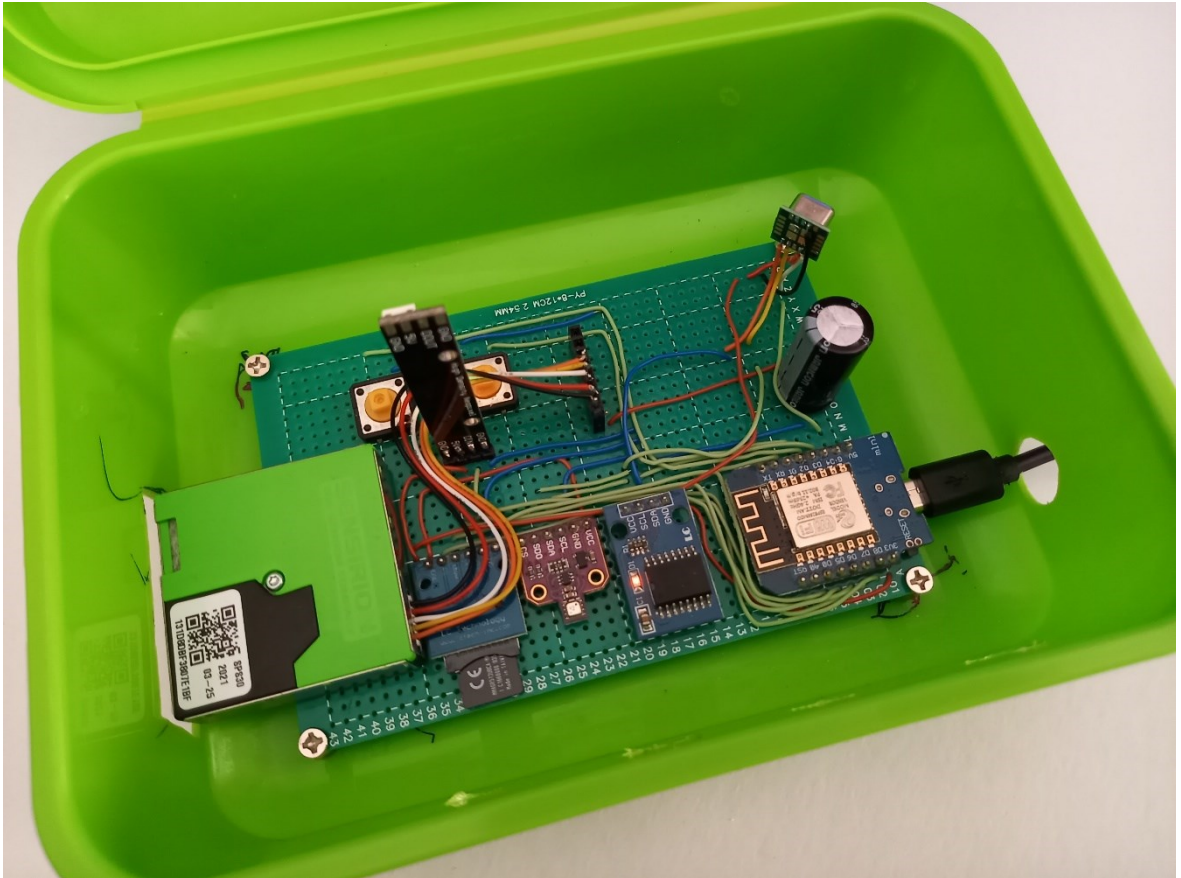


Obrázek 9 Schéma zapojení měřicí jednotky (bez napájení).  
Zdroj autor

Během vývoje byla nejdříve použita jedna deska plošných spojů (dále DPS), kde byly postupně propojeny jednotlivé komponenty a vyzkoušena jejich funkčnost tak, aby finální DPS byly již korektně navrženy.

Ve finální konstrukci je jednotka řešena jako tři kabely propojené desky plošných spojů, na nichž jsou osazeny použité komponenty.

1. DPS tlačítek – dva mikrospínače a tři LED.
2. DPS senzorů – senzory TVOC, CO<sub>2</sub>, konektor pro připojení senzoru PM a RTC.
3. Řídící DPS – mikroprocesor, nabíjecí modul akumulátoru, konektor pro microSD kartu, napěťový dělič pro snímání napětí baterie a konektor pro akumulátor.



Obrázek 10 Prototyp zařízení EAC. Zdroj autor

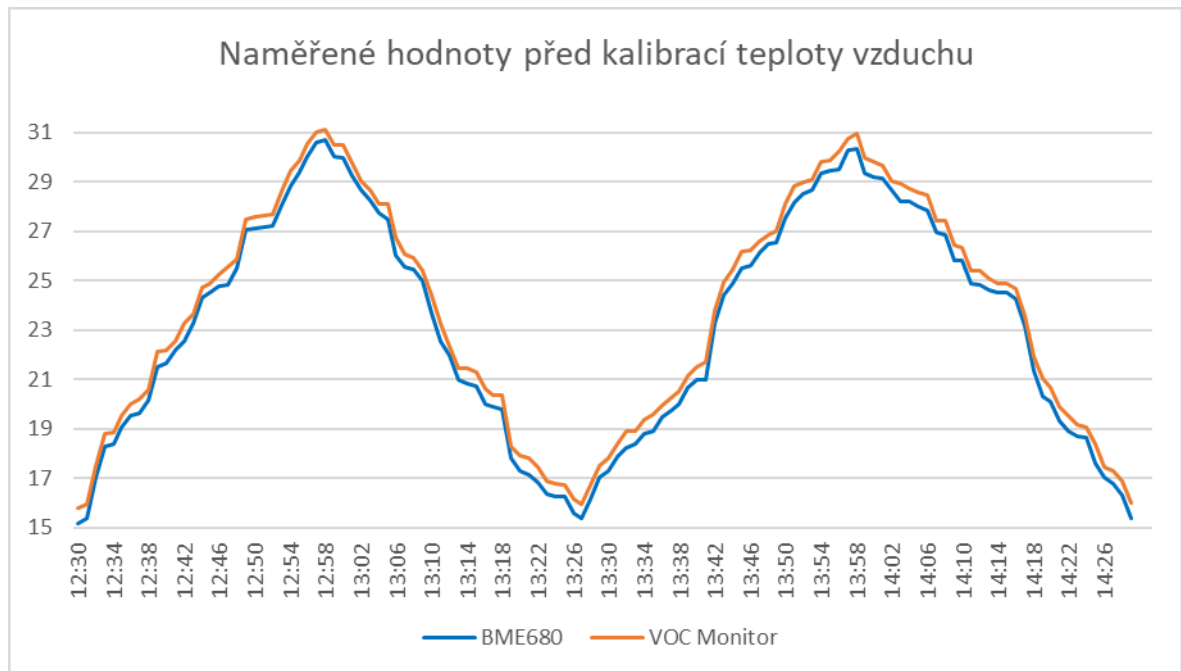
**Firmware** (dále FW) pro mikropočítač byl napsán v Arduino IDE verze 1.8.19 při použití knihoven pro jednotlivá čidla. Pro čidlo BME680 byla použita knihovna Bosch Sensortec Environmental Cluster (BSEC), která zajišťuje výpočet eCO<sub>2</sub> a TVOC. (Bosch Sensortec Environmental Cluster (BSEC), 2022)

**Kalibrace senzorů** byla provedena pro senzor BME680, ostatní senzory jsou kalibrovány již výrobcem a kalibrace tudíž není nutná. (SCD41, 2022; SPS30, 2022)

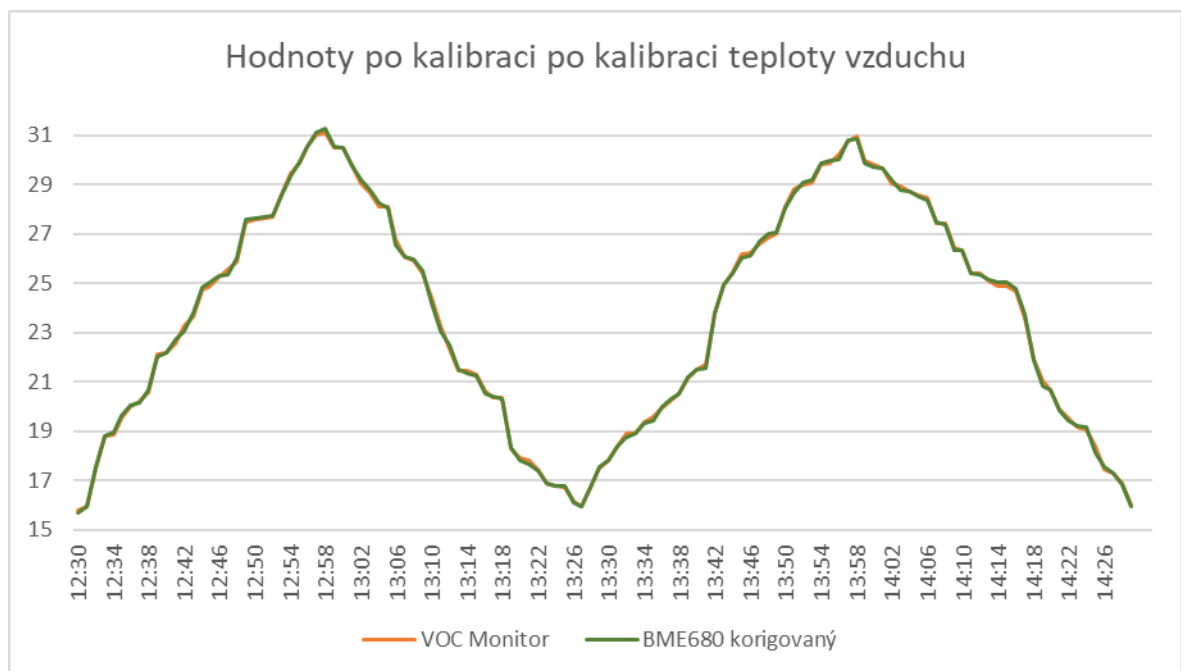
Pro kalibraci byl použit analyzátor pro měření VOC SI-AQ VOC Monitor (dále etalon). (Analyzátor pro měření VOC SI-AQ VOC Monitor, c2021)

Teplota vzduchu byla kalibrována v rozsahu 15-31 °C, kdy byly porovnány naměřené hodnoty etalonem a hodnoty naměřené senzorem BME680 v průběhu dvou hodin s četností vzorkování 60 sekund. Jako kalibrační konstanta byl použit průměrný rozdíl teplot, který činil 0,53 °C, který se následně přičetl k hodnotě naměřené BME680. Po tomto přepočtu je rozdíl v naměřených teplotách mezi etalonem a BME680  $\pm 0,2$  °C.



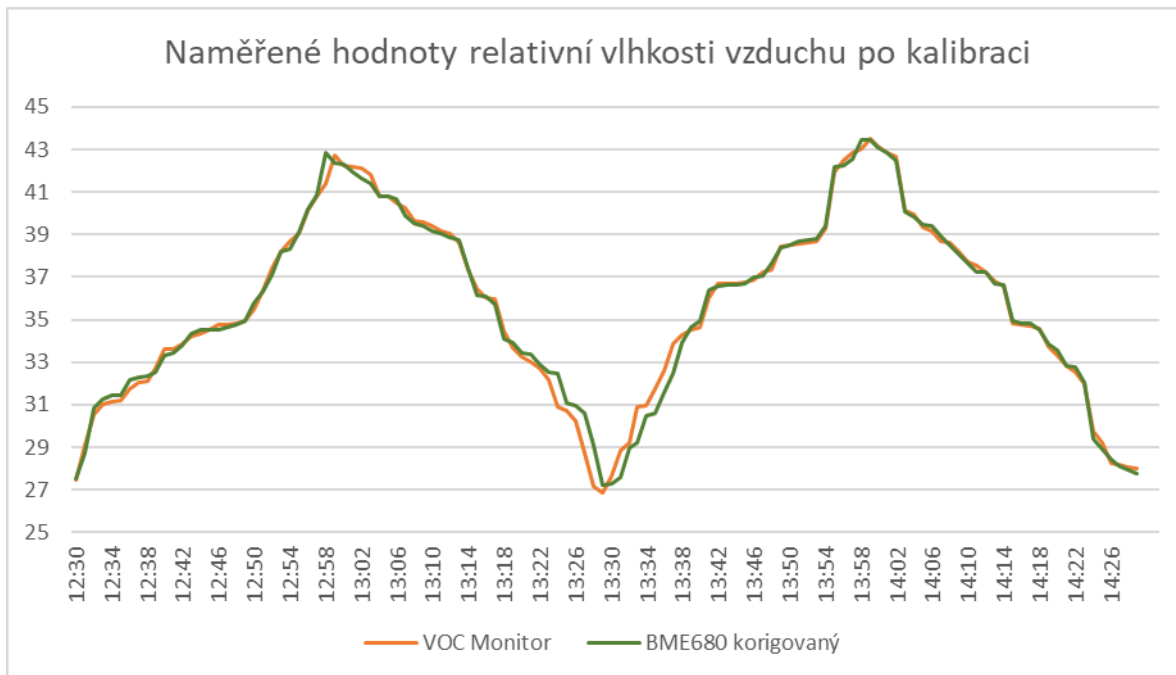


Obrázek 11 Naměřené hodnoty před kalibrací teploty vzduchu. Zdroj autor

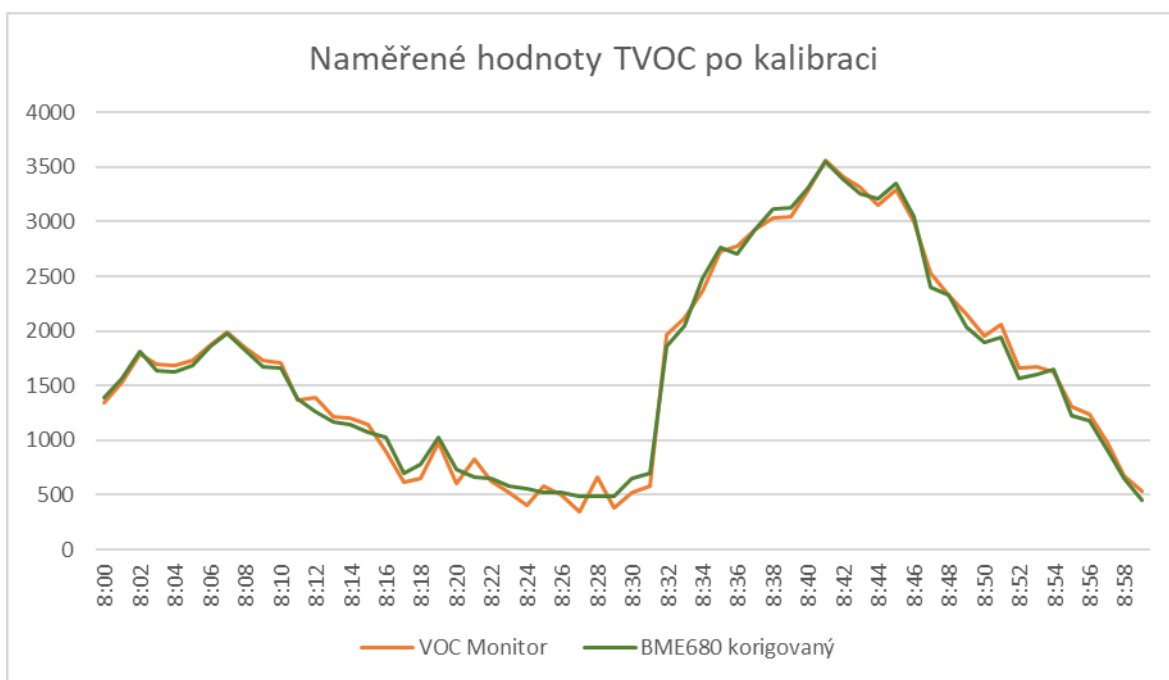


Obrázek 12 Porovnání naměřených hodnot teplot vzduchu po kalibraci. Zdroj autor

Pro kalibraci relativní vlhkosti vzduchu a TVOC byl použit stejný princip, jako byl použit pro kalibraci teploty vzduchu. Průměrný rozdíl relativních vlhkostí vzduchu byl 0,81 %, o tuto konstantu byla upravena hodnota naměřená BME680. Po přepočtu je rozdíl v hodnotách mezi etalonem a BME680  $\pm 2$  %.



Obrázek 13 Porovnání naměřených hodnot relativní teploty vzduchu po kalibraci. Zdroj autor



Obrázek 14 Porovnání naměřených hodnot koncentrace TVOC po kalibraci. Zdroj autor

Zvýšení koncentrace VOC bylo dosahováno umístěním kousku vaty s malým množstvím toluenu do uzavřeného prostoru na dobu jedné minuty, kde byl umístěn etalon a senzor. Snížení bylo naopak dosahováno umístěním etalonu a senzoru mimo místnost na čerstvý

vzduch. Průměrný rozdíl koncentrací TVOC byl 89,1 ppb, o tuto konstantu byla upravena hodnota naměřená BME680. Po přepočtu je rozdíl v hodnotách mezi etalonem a BME680  $\pm 150$  ppb, nicméně maximální naměřené hodnoty se liší mezi etalonem a BME680  $\pm 40$  ppb. Pro přesnější kalibraci by bylo nutno použít „směsný plyn VOC“ (viz kapitola 2.3 Hodnocení kvality ovzduší), který bohužel nebyl k dispozici. Stanovené kalibrační konstanty jsou zahrnuty ve zdrojovém kódu FW a tento již poskytuje na jejich základě upravené hodnoty.

Na základě zjištěných přesností BME680 během jeho kalibrace byly potvrzeny parametry deklarované výrobcem a senzor splňuje přesnost měření dle požadavků stanovených během návrhu měřicího zařízení.

**Rozpočet na konstrukci** zařízení byl dodržen a zařízení splňuje parametry, které byly stanoveny při jeho zadání.

Tabulka 30 Kalkulace konstrukce zařízení. Zdroj autor

Komponenta	Cena (Kč)
Součástky	2000
DPS	100
3D tisk	500
Ostatní (cín, vodiče, konektory)	370
<b>CELKEM</b>	<b>2970</b>

### 3.2 Naměřená data

Data jsou uložena v měřící stanici na micro SD kartě a jsou dostupná jak pomocí ovládacího programu, tak i prostřednictvím webového rozhraní měřící jednotky. Formát dat je textový soubor ve formátu CSV, což je jednoduchý souborový formát určený pro výměnu tabulkových dat. Soubor ve formátu CSV obsahuje řádky, ve kterých jsou jednotlivé položky odděleny znakem středníkem (;). Pro uložení času je využit UNIX timestamp, což je systém pro označení časových okamžiků. Systém identifikuje časové okamžiky pomocí počtu sekund uplynulých od okamžiku koordinovaného světového času 00:00:00 1. ledna 1970,

ale bez započítání přestupných sekund. Pro potřeby konverze do formátu data v aplikaci MS Excel (OpenOffice, LibreOffice a dalších) je možné využít vzorec:

$$\text{formát data} = \text{UNIX timestamp} / 86400 + 25569 \quad (3)$$

Soubory CSV jsou automaticky generovány měřicí jednotkou, kdy v případě, že probíhá měření (manuální i programové) je vždy při zahájení měření, nebo zahájením nového dne (v 0:01) vytvořen nový soubor CSV.

Tabulka 31 Formát pojmenování souboru CSV. Zdroj autor

Typ měření	Rok	Měsíc	Den	Extenze
M (manuální), P (programované)	RRRR	MM	DD	.csv

Tabulka 32 Struktura datového souboru CSV. Zdroj autor

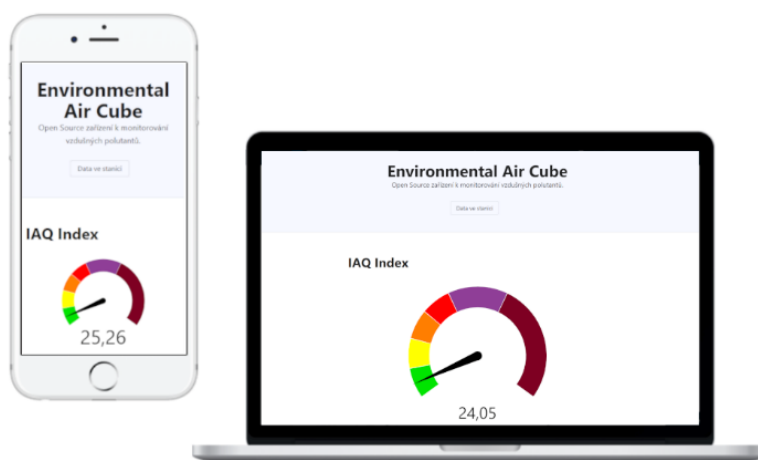
Údaj	Veličina	Jednotka
ts	Časová značka	UNIX timestamp
temp	Teplota	°C
hum	Relativní vlhkost vzduchu	%
press	Tlak vzduchu	hPa
CO2	Koncentrace CO <sub>2</sub>	ppm
eCO2	Ekvivalent koncentrace CO <sub>2</sub>	ppm
bVOC	TVOC	ppb
PM1_0	PM1	μg.m <sup>-3</sup>
PM2_5	PM2.5	μg.m <sup>-3</sup>
PM4	PM4	μg.m <sup>-3</sup>
PM10	PM10	μg.m <sup>-3</sup>
PMps	Průměrná velikost prach. částic	μm

Údaj	Veličina	Jednotka
IAQ	IAQ index	-
statIAQ	Statický IAQ index	-

### 3.3 Komunikace s měřicí jednotkou

Jak pro zobrazení webového rozhraní, tak i pro komunikaci s ovládacím programem je nutno připojit PC k WiFi síti EAC\_APoint s přístupovým heslem PWD123456. Název sítě i přístupové heslo lze změnit kdykoli v ovládacím programu.

S jednotkou lze pomocí počítače komunikovat dvěma způsoby. První je pomocí webového rozhraní, které je dostupné bez nutnosti mít nainstalovaný ovládací program. Ostatní funkce jsou, z důvodu zabezpečení, dostupné pouze pomocí něj.



Obrázek 15 Vzhled webového rozhraní na různých zařízeních.  
Zdroj autor

Pro základní komunikaci se zařízením prostřednictvím HTTP protokolu lze využít zadáním příkazu do adresového řádku internetového prohlížeče ve tvaru `http://192.168.4.1/příkaz`.

Tabulka 33 Příkazy pro základní HTTP komunikaci se zařízením. Zdroj autor

Příkaz	Funkce	Návratový formát
	Zobrazení domovské stránky zařízení.	HTML
ping	Ověření připojení zařízení.	JSON
sysinfo	Zobrazení systémových informací.	JSON
json	Naměřené hodnoty za posledních 60 minut.	JSON
listdir	Výpis souborů v daném adresáři.	JSON

**Domovskou stránku** měřící jednotky lze zobrazit zadáním adresy <http://192.168.4.1> do libovolného internetového prohlížeče. Po načtení jsou na ní zobrazeny základní informace o zařízení a lze zde také stáhnout uživatelský manuál (formát PDF) a ovládací program. Pokud probíhá měření, tak je zobrazen indikátor úrovně IAQ indexu, ten zobrazuje jak jeho číselnou hodnotu IAQ, tak i vizuálně (na barevné škále) jeho úroveň.

Dále lze po kliknutí na odkaz *Soubory ve stanici* zobrazit výpis všech souborů uložených na paměťové kartě, po kliknutí na název souboru lze tento stáhnout pro další zpracování.

**Aktuálně naměřené hodnoty** měřící jednotkou (pokud probíhá měření) jsou dostupné ve formátu JSON, což je formát pro výměnu dat, který se během posledních několika let zařadil mezi nejdůležitější formáty na webu. Tento soubor lze využít pro zpracování v libovolném programu, nebo na webovém stránce. Soubor se zobrazením aktuálně naměřených hodnoty ve formátu JSON je dostupný na adrese <http://192.168.4.1/json>. Každá měřená veličina má zaznamenaná maxima, minima a hodnoty za předchozích 60 minut. Maxima a minima jsou uvedena (včetně jejich času) za celou dobu aktuálně probíhajícího měření.

Tabulka 34 Struktura souboru JSON – aktuálně naměřené hodnoty. Zdroj autor

Název	Popis	Datový typ	Jednotky
time	Čas	array integer	UNIX timestamp
temp	Teplota vzduchu	objekt záznamu veličiny	°C

Název	Popis	Datový typ	Jednotky
hum	Relativní vlhkost vzduchu	objekt záznamu veličiny	%
pressure	Tlak vzduchu	objekt záznamu veličiny	hPa
CO2	Koncentrace CO <sub>2</sub>	objekt záznamu veličiny	ppm
eCO2	Ekvivalentní CO <sub>2</sub>	objekt záznamu veličiny	ppm
bVOC	TVOC	objekt záznamu veličiny	ppb
PM1_0	PM1	objekt záznamu veličiny	μg.m <sup>-3</sup>
PM2_5	PM2,5	objekt záznamu veličiny	μg.m <sup>-3</sup>
PM4	PM4	objekt záznamu veličiny	μg.m <sup>-3</sup>
PM10	PM10	objekt záznamu veličiny	μg.m <sup>-3</sup>
PM_part_size	Průměrná velikost PM	objekt záznamu veličiny	μm
IAQ	IAQ index	objekt záznamu veličiny	
staticIAQ	Statický IAQ index	objekt záznamu veličiny	

Tabulka 35 Formát objektu záznamu veličiny. Zdroj autor

Úroveň 1	Úroveň 2	Úroveň 3 (pole hodnot)	Formát
Veličina			string
	Minimum	Čas minima	UNIX timestamp
		Hodnota	float
	Maximum	Čas maxima	UNIX timestamp
		Hodnota	float
	Hodnoty	Pole hodnot	array float

**Systémové informace** jsou dostupné ve formátu JSON na adrese <http://192.168.4.1/sysinfo>. Tento soubor obsahuje kompletní informace o stavu zařízení a podobně jako soubor s aktuálně naměřenými hodnotami jej lze libovolně dále použít.

Tabulka 36 Struktura souboru JSON – systémové informace. Zdroj autor

Název	Popis	Formát	Jednotky
deviceid	Identifikace zařízení.	string	
sysstatus	Systémový status.	byte	
sdsiz	Velikost SD karty.	integer	byte
sdocc	Obsazené místo na SD kartě.	integer	byte
heap	Volná RAM.	byte	%
batt	Stav baterie.	byte	%
stime	Systémový čas.	integer	UNIX timestamp
stz	Časová zóna.	integer	hodiny
stemp	Systémová teplota.	byte	°C
apssid	Identifikátor přístupového bodu.	string	
apip	IP adresa přístupového bodu.	string	
mac	MAC adresa zařízení.	string	
apsec	Zabezpečení přístupového bodu.	boolean	
<b>Nepovinné položky, zobrazují se dle stavu připojení k WiFi.</b>			
cssid	Identifikátor bezdrátové sítě Wi-Fi.	string	
cip	IP adresa přidělená DNS serverem Wi-Fi.	string	
cconn	Stav připojení k AP bezdrátové sítě Wi-Fi.	boolean	
crssi	Síla signálu WiFi.	byte	%
<b>Nepovinné položky, zobrazují se dle stavu měření.</b>			
acteac	Název EAC souboru (programu).	string	
acteacst	Čas zahájení měření na základě programu.	integer	UNIX timestamp
acteacet	Čas ukončení měření na základě programu.	integer	UNIX timestamp
manst	Čas zahájení ručního měření.	integer	UNIX timestamp



Název	Popis	Formát	Jednotky
actcsv	Název aktuálního logovacího CSV souboru.	string	

### 3.4 Ovládací program pro PC

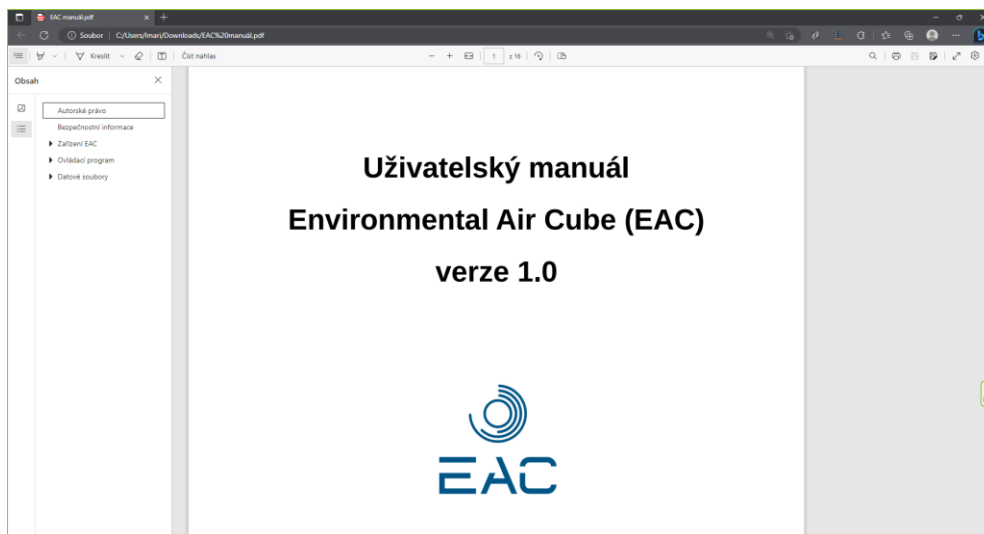
Pro ovládání jednotky a zpracování dat byl v prostředí programovacího jazyka Power Basic napsán EAC ovládací program. Tento umožňuje programování, vizualizaci naměřených dat, komunikaci, zpracování dat a systémové nastavení měřicí jednotky. Program je šířen v licenci BSD. (BSD licence, 2023)

Instalaci programu spustíme dvojitým kliknutím na ikoně instalace programu Instalace EAC SW, kdy jste v průběhu instalace vyzváni ke zvolení místa instalace. Program nezasahuje žádným způsobem do systémových registrů, ani neinstaluje žádné soubory do systémových složek operačního systému.

Tabulka 37 Požadavky pro běh ovládacího programu. Zdroj autor

Parametr	Minimální požadavek
Operační systém	MS WINDOWS
WiFi konektivita	IEEE 802.11 b
Místo na disku	4 MB pro program + data

Pro ovládací program byl zpracován manuál popisující všechny funkce zařízení, tento je dostupný přímo z webového rozhraní měřicí jednotky.

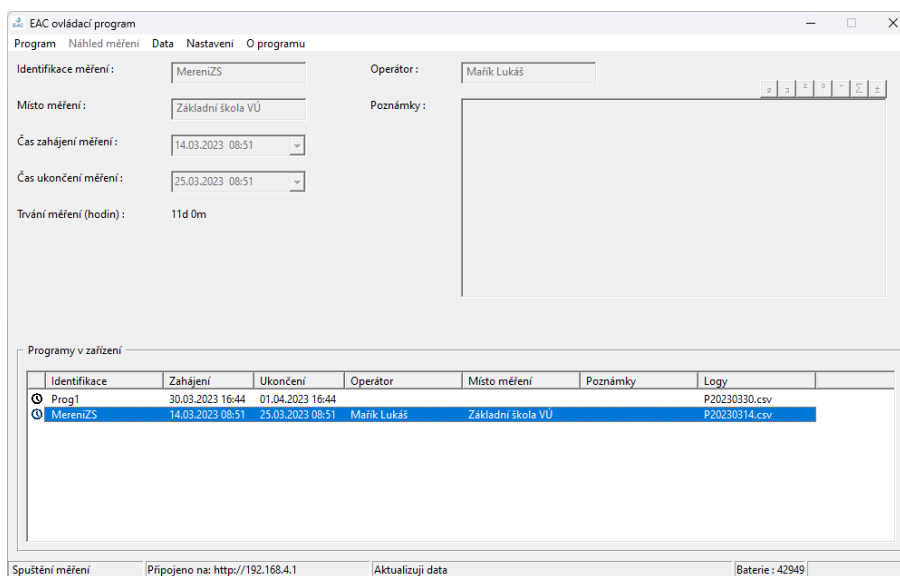


Obrázek 16 Snímek obrazovky s otevřeným manuálem programu. Zdroj autor

Program se spustí dvojitým kliknutím na ikonu programu, který při spuštění ověří, zda je připojen k přístupovému bodu a má dostatečně kvalitní spojení. Pokud tomu tak není, je uživatel informován o chybovém stavu, a to včetně stručného návodu, jak lze chybu opravit.

Po spuštění programu se dle stavu měřicí stanice je program otevřen v okně *Program* (pokud stanice neprovádí měření), nebo v okně *Náhled měření* (když probíhá měření).

V okně **Program** lze zadat nový program, povinným údajem je název programu a časy spuštění a ukončení měření, ostatní údaje jsou nepovinné. Název měřicího programu je omezen na 30 znaků. Po kliknutí na tlačítko Uložit program, se tento nahraje do měřicí stanice. V části *Programy v zařízení* lze po kliknutí na příslušný program zjistit veškeré detaily vybraného programu.



Obrázek 17 Okno ovládacího programu – program. Zdroj autor

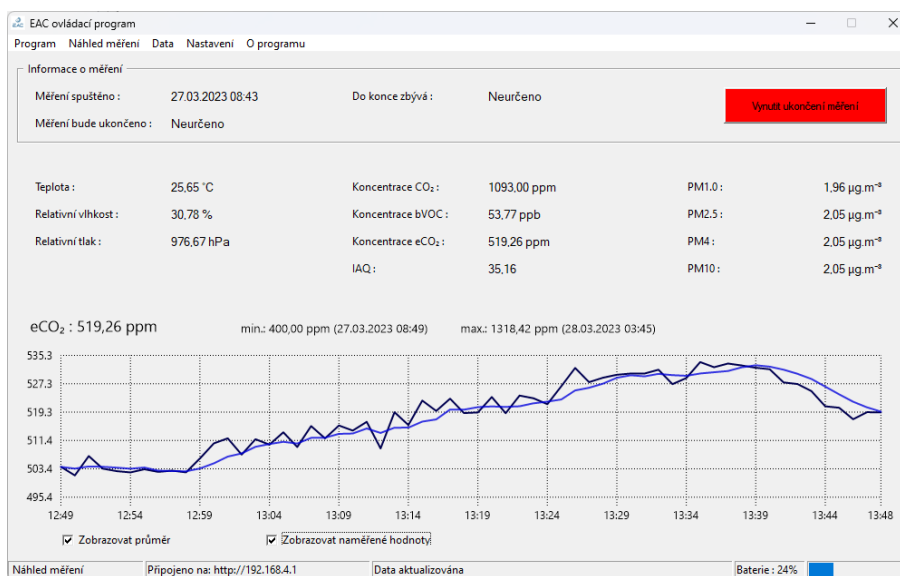
Programy jsou v měřicí stanici uloženy v jednotlivých souborech v nativním formátu EAC, v každém souboru jsou uložena data, která uživatel zadává při tvorbě měřícího programu v ovládacím programu zařízení a následně jej nahraje do měřící jednotky. V případě, že program ještě nebyl spuštěn (dle uživatelem zadaných údajů), lze tento editovat, případně smazat. Pokud již program proběhl, nebo probíhá, lze pouze zobrazit jeho detaily.

Tabulka 38 Struktura programového souboru EAC. Zdroj autor

Řádek	Údaj	Příklad
1	Identifikace měření	MereniFLKR.eac
2	Oddělovač	#####
3	Místo měření	Horní Dolní
4	Oddělovač	#####
5	Datum a čas zahájení měření	1673870440
6	Oddělovač	#####
7	Datum a čas ukončení měření	1674233545
8	Oddělovač	#####

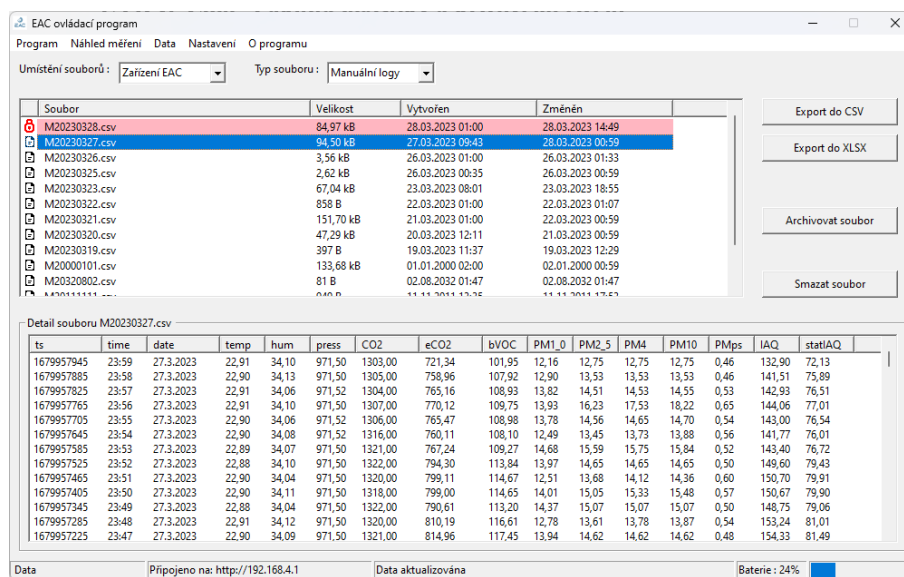
Řádek	Údaj	Příklad
9	Operátor	Lukáš Mařík
10	Oddělovač	#####
11	Poznámky	Libovolné poznámky.
12	Oddělovač	#####
13 a další	Seznam příslušných logovacích souborů	M20230217.csv

V okně *Náhled měření* (v případě, že měření probíhá) je zobrazen stav měření, včetně času zahájení a v případě programového měření i času ukončení a zbývajících času do konce měření. Dále jsou zde zobrazena aktuálně naměřená data za posledních 60 minut, kliknutím na příslušnou veličinu je zobrazena tato veličina i v grafu. Výběrem *Zobrazovat průměr* a *Zobrazovat naměřené hodnoty* lze zvolit zobrazení požadovaného grafu. Kliknutím na tlačítko *Vynutit ukončení měření* je uživatel vyzván, zda chce opravdu ukončit probíhající měření. Pokud je tímto způsobem ukončeno měření na základě programu, tak je program v měřicí stanici ukončen a smazán, data z měření však zůstávají v příslušném datovém souboru CSV (viz kapitola 3.3 Naměřená data).



Obrázek 18 Okno ovládacího programu – náhled měření. Zdroj autor

Veškerá naměřená data jsou dostupná v okně **Data**, zde je možné procházet programy a datové soubory v měřicí stanici i data uložená v databázi. Data je možné z měřicí stanice zobrazit, zálohovat, exportovat či archivovat do databáze. Volba *Umístění souborů* slouží pro výběr zdroje zobrazených dat, může jím být měřicí jednotka, nebo databáze. Volba *Typ souboru* umožňuje výběr typu zobrazených souborů. Jím mohou být uložené programy, nebo datové soubory CSV (jak z manuálního, tak i programového měření).



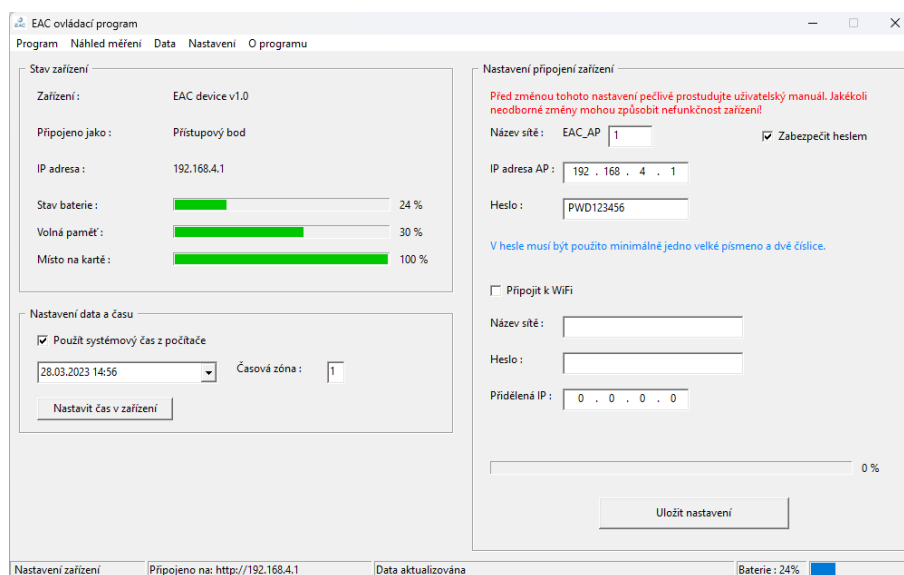
Obrázek 19 Okno ovládacího programu – data. Zdroj autor

Aktuálně probíhající program a aktivní datový soubor CSV jsou zvýrazněny červeným pozadím a ikonou zámku. Kliknutím na zvolený soubor se tento načte a zobrazí se jeho detaily. Datové CSV soubory je možné exportovat do datového CSV souboru, souboru ve formátu MS Excel, nebo je lze archivovat do databáze. Programy (extenze eac) lze zálohovat do databáze, to znamená, že vybraný program se importuje do databáze včetně všech příslušných naměřených dat. Během zálohování jsou staženy soubory do počítače a následně importovány do databáze, soubory v měřicí stanici nejsou importem dat dotčeny. Volbou *Smazat soubor* je, po potvrzení uživatelem, vybraný soubor smazán. Soubor po smazání již nelze obnovit.

Databáze ve formátu SQLite je vytvořena programem při prvním zálohování dat a je tvořena jedním souborem EAC\_data.db, který je uložen kořenovém adresáři ovládacího programu. Tento soubor obsahuje všechna archivovaná data a je doporučeno jej pravidelně zálohovat. (SQLite, 2023)

V databázi může uživatel procházet zálohovaná data s tím, že je možné zvolit časový úsek, který chce uživatel zobrazit a takto vybraná data je možné exportovat do datového souboru CSV, nebo do souboru XLSX (formát MS Excel).

Pro nastavení času měřicí stanice a změnu připojení k WiFi slouží okno *Nastavení*, kde jsou v části *Stav zařízení* zobrazeny informace o stavu měřicí jednotky. Část *Nastavení data a času* slouží k nastavení systémového času v měřicí jednotce, lze zadat vlastní čas a datum, nebo lze použít systémový čas z počítače se spuštěným ovládacím programem. V oddílu *Nastavení připojení* zařízení může uživatel změnit název přístupového bodu a heslo pro připojení k měřicí jednotce. Po změně názvu a uložení změn se program ukončí a uživatel musí připojit počítač pomocí WiFi k přístupovému bodu, jelikož došlo ke změně jeho názvu, či bylo změněno přístupové heslo. Dále zde může uživatel povolit připojení k WiFi sítí po zadání jejího názvu (SSID) a pokud je vyžadováno i zadáním hesla. Kliknutím na tlačítko *Uložit nastavení* je nastavení uloženo do měřicí stanice.



Obrázek 20 Okno ovládacího programu – nastavení. Zdroj autor

Okno *O programu* informuje uživatele o verzi, použitých zdrojích, licenci ovládacího programu a sponzorech celého projektu.

### 3.5 Provoz zařízení

Spuštění měřicí jednotky proběhne po zapnutí vypínačem na zadní stěně, bootloader načte firmware do paměti mikroprocesoru, který následně provede inicializaci všech periférií. Stav

měřicí jednotky je indikován kombinací barev jednotlivých tlačítek na čelním panelu, tímto jednoduchým způsobem informují uživatele o stavu, ve kterém se jednotka nachází.

Tlačítko 1	Tlačítko 2	Tlačítko 3
Zařízení připraveno	WiFi vypnutá	Baterie $\geq 75\%$
Čtení dat z čidel	Připojuje se k WiFi	$50\% \leq \text{baterie} < 75\%$
Přijímá / posílá data	WiFi přístupový bod	$25\% \leq \text{baterie} < 50\%$
Probíhá programové měření	WiFi připojeno	Baterie $< 25\%$
Probíhá manuální měření		

Obrázek 21 Provozní stavy měřicí jednotky. Zdroj autor

Pokud dojde během inicializace k chybě, tak FW dále nepokračuje v běhu a pomocí barevné kombinace tlačítek jsou zobrazeny chybové stavy.

Tlačítko 1	Tlačítko 2	Tlačítko 3
Chyba	Chyba	RTC
		Flash paměť
		SD karta
		BME680
		SCD41
		SPS30

Obrázek 22 Chybové stavy měřicí jednotky. Zdroj autor

Uživatel může ovládat měřicí jednotky buď ručně, nebo pomocí ovládacího programu. Pro ruční ovládání jsou k dispozici tlačítka na čelním panelu. Levé tlačítko ovládá zapnutí/vypnutí manuálního měření.

**Manuální měření** se ovládá levým tlačítkem, krátkým stisknutím dojde k zahájení měření, podržením tlačítka po dobu delší, než je pět sekund dojde k ukončení měření. Takto spuštěné měření není nijak časově omezeno a FW zařízení vytvoří pro každý den měření vlastní datový soubor CSV (viz kapitola 3.2 Naměřená data).

K ovládání WiFi se používá prostřední tlačítko, kdy krátkým stisknutím prostředního tlačítka se WiFi vypne a podržením tlačítka na dobu delší než je pět sekund se WiFi zapne. V případě, že je nastaveno připojení k WiFi se měřicí stanice připojí k nastavené WiFi, nastavení připojení k WiFi se upravuje v ovládacím programu.

Všechny ostatní funkce a nastavení jsou dostupné pouze z ovládacího programu (viz kapitola 3.4 Ovládací program pro PC).

**Spotřeba měřicí jednotky** je dána součtem spotřeby jednotlivých komponent použitých v konstrukci. Nejvyšší proudový odběr má WiFi (cca 100 mA) a senzor PM (cca 70 mA), proto byla při konstrukci zvolena možnost WiFi vypínat.

Tabulka 39 Spotřeba měřicí jednotky dle provozního režimu. Zdroj autor

Režim měřicí jednotky	Spotřeba	Doba provozu na akumulátor
Neměří bez WiFi	50 mA	128 hodin
Neměří s WiFi	150 mA	42 hodin
Měří bez WiFi	120 mA	53 hodin
Měří s WiFi	220 mA	29 hodin

**Nabíjení měřicí jednotky** se zahájí automaticky připojením pomocí konektoru na zdroj stejnosměrného napětí 5 V (1 A) a je automaticky ukončeno po dobití akumulátoru.

V případě vybití akumulátoru během měření bez připojení k síťovému adaptéru je měření ukončeno, měřicí jednotka se vypne a ochranný obvod zajistí ochranu akumulátoru proti nadměrnému vybití.



## 4 MĚŘENÍ POLUTANTŮ NA PRACOVIŠTI

Většina škol v České republice investovala do zateplení s cílem uspořit náklady na energie, toto však způsobilo problém s efektivním provětráváním. Ve třídách, kde je v průměru přes dvacet studentů, během krátké doby narůstají hodnoty CO<sub>2</sub> nad hygienické úrovně, které mohou vést k větší únavě žáků nebo snížené koncentraci při výuce. Pak nezbývá než otevřít okna a vydýchaný vzduch vyvětrat. Efekt úspory energie tím mizí a do třídy se kromě studeného vzduchu v zimním období dostává také hluk, prach a smog. (Větráme školy z.s., 2023)

### 4.1 Měření na pracovišti

Měření vzdušných polutantů proběhlo pomocí zařízení EAC v budově Základní školy a Mateřské školy Velký Újezd ve dnech 15. - 23. 3. 2023.



Obrázek 23 Budova ZŠ a MŠ Velký Újezd. Zdroj autor

Tabulka 40 Základní údaje o ZŠ a MŠ VÚ. Zdroj: ZŠ a MŠ VÚ  
(vlastní zpracování)

Obchodní název	Základní škola a Mateřská škola Velký Újezd
Adresa	Navrátilova 321, 783 55 Velký Újezd
IČO	75027640
Rejstřík	Obchodní rejstřík
Datum zápisu	18. 3. 2003
Právní forma	Příspěvková organizace
GPS souřadnice	49.5783997N, 17.4764825E

Budova školy se otvírá již v 6:40, jelikož nadpoloviční většina žáků do školy dojíždí a není žádoucí, aby se shromažďovali před budovou. Teplovodní topení je nastaveno na dobu od 6:30 do 17:00 a teplota cirkulační vody je nastavena na 50 °C, topení je vybaveno ekvitermní regulací.

Tabulka 41 Časový rozvrh provozu školy.  
Zdroj: ZŠ a MŠ VÚ (vlastní zpracování)

Vyučovací hodina	Čas
Učitelé přicházejí do školy	6:00 – 6:20
Otevření vchodu do školy pro žáky	6:40
1. hodina	07:20 – 08:05
2. hodina	08:15 – 09:00
3. hodina	09:20 – 10:05
4. hodina	10:15 – 11:00
5. hodina	11:10 – 11:55
6. hodina	12:05 – 12:50
7. hodina	12:45 – 13:30

Vyučovací hodina	Čas
8. hodina	13:40 – 14:25
9. hodina	14:30 – 15:15
Úklid	16:30 – 18:00
Uzavření vchodu do školy	18:00

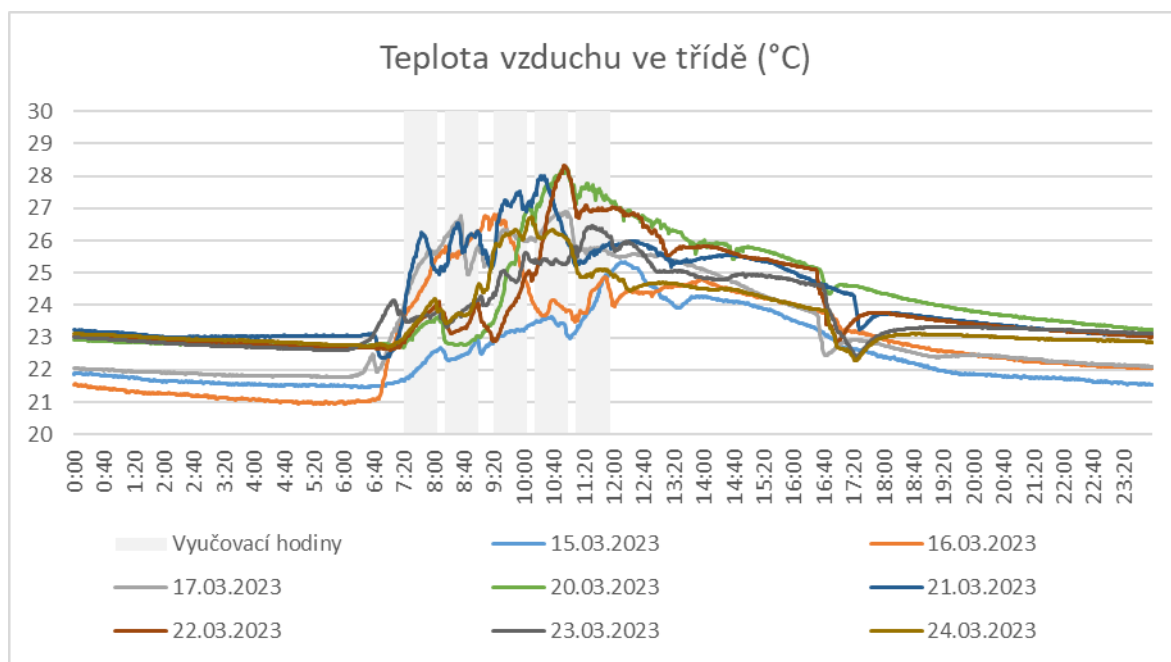
Místo pro měření bylo vybráno na základě požadavku ředitel školy a byla jím 2. třída ZŠ. Třída je ve druhém nadzemním podlaží budovy ZŠ, její rozměry jsou 7,6 x 8,9 x 3,2 m (šířka x hloubka x výška) a je orientována okny na jih. Ve třídě je 27 žáků a v průběhu měření byly všichni žáci a vyučující přítomni na výuce, vyučování ve třídě probíhalo pouze v prvních čtyřech vyučovacích hodinách. Vyučující na konci vyučovací hodiny otvírala pro vyvětrání třídy okna a tato byla otevřena po dobu každé přestávky včetně dveří na chodbu proto, aby se zvýšila výměna vzduchu v celé budově. Mimo vyučování byly zavřené dveře na chodbu i všechna okna.



Obrázek 24 Interiér monitorované třídy. Zdroj autor

## 4.2 Analýza dat

Po provedení měření a importu dat z měřicí jednotky byla provedena jejich analýza se zaměřením na kvalitu vnitřního vzduchu. Tato byla hodnocena z pohledu teploty vzduchu, relativní vlhkosti vzduchu, koncentrace CO<sub>2</sub>, TVOC a IAQ indexu. Tyto hodnoty popisují kvalitu vnitřního vzduchu a na jejich základě ji lze hodnotit. (Vyhláška č. 268/2009 Sb., 2009)



Obrázek 25 Graf naměřených dat – teplota vzduchu. Zdroj autor

Vyhláška 343/2009 Sb., stanovuje pro učebny určené k dlouhodobému pobytu minimální teplotu 20 °C, maximální teplotu 28 °C a optimální teplotu 22 ±2 °C. (Vyhláška č. 343/2009 Sb., 2009)

Tabulka 42 Hodnocení minimální teploty vnitřního vzduchu. Zdroj autor

Den	Minimální teplota (°C)	Čas minimální teploty (°C)	Výsledek
Středa 15. 3. 2023	21,66	7:21	VYHOVUJE
Čtvrtek 16. 3. 2023	23,58	7:20	VYHOVUJE

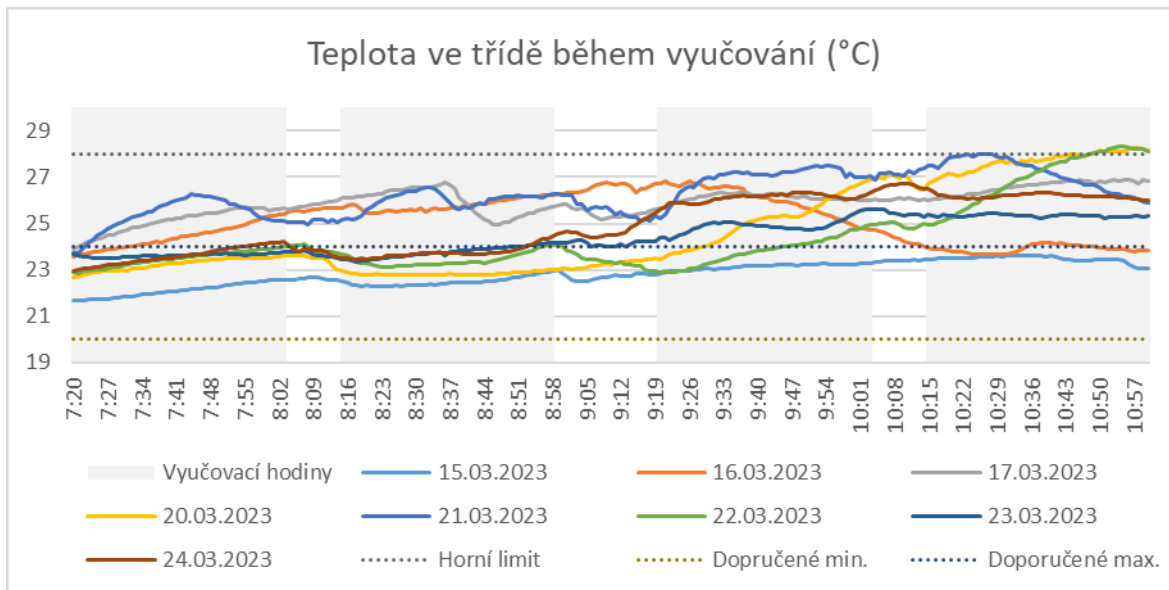
Den	Minimální teplota (°C)	Čas minimální teploty (°C)	Výsledek
Pátek 17. 3. 2023	23,9	7:20	VYHOVUJE
Pondělí 20. 3. 2023	22,75	7:20	VYHOVUJE
Úterý 21. 3. 2023	23,73	7:20	VYHOVUJE
Středa 22. 3. 2023	22,86	7:21	VYHOVUJE
Čtvrtek 23. 3. 2023	23,33	8:19	VYHOVUJE
Pátek 24. 3. 2023	22,97	7:20	VYHOVUJE

Překročení maximální teploty vzduchu je zapříčiněno především orientací oken na jih, kdy je v době kdy svítí slunce třída intenzivně vyhřívána. A to i přes fakt, že jsou na oknech instalovány vnitřní žaluzie, které mají třídu odstínit.

Tabulka 43 Hodnocení maximální teploty vnitřního vzduchu. Zdroj autor

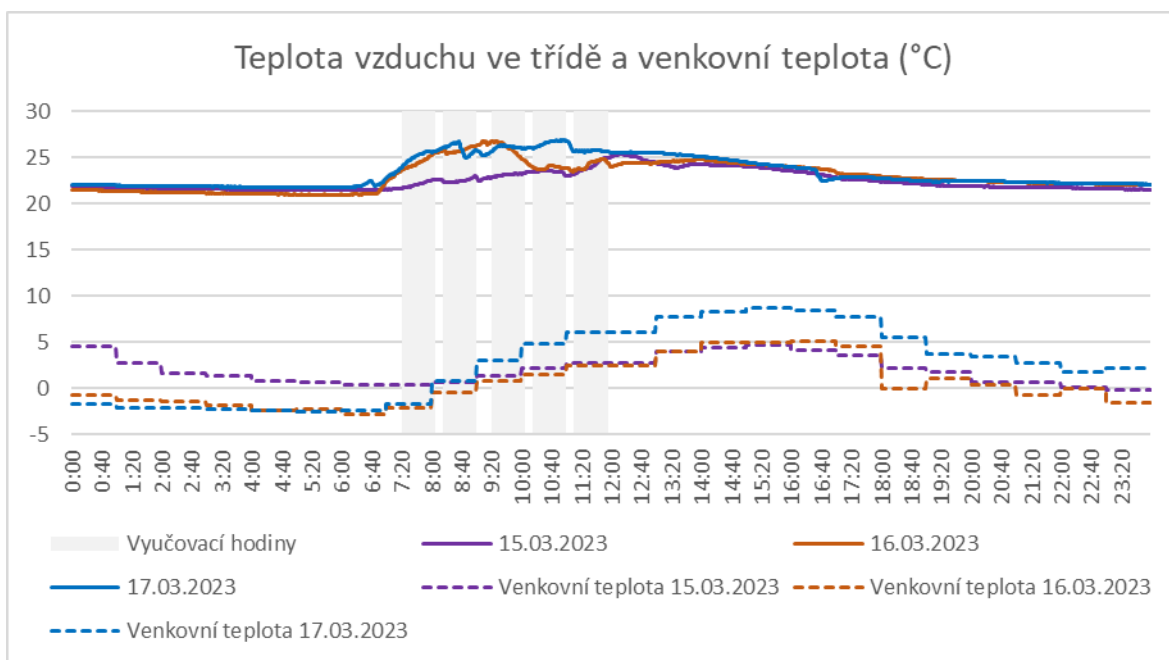
Den	Maximální teplota (°C)	Čas maximální teploty (°C)	Výsledek
Středa 15. 3. 2023	23,63	10:37	VYHOVUJE
Čtvrtek 16. 3. 2023	26,83	9:21	VYHOVUJE
Pátek 17. 3. 2023	26,89	10:55	VYHOVUJE
Pondělí 20. 3. 2023	28,25	10:57	NEVYHOVUJE
Úterý 21. 3. 2023	28,02	10:23	NEVYHOVUJE
Středa 22. 3. 2023	28,32	10:55	NEVYHOVUJE
Čtvrtek 23. 3. 2023	25,62	10:04	VYHOVUJE
Pátek 24. 3. 2023	26,74	10:11	VYHOVUJE





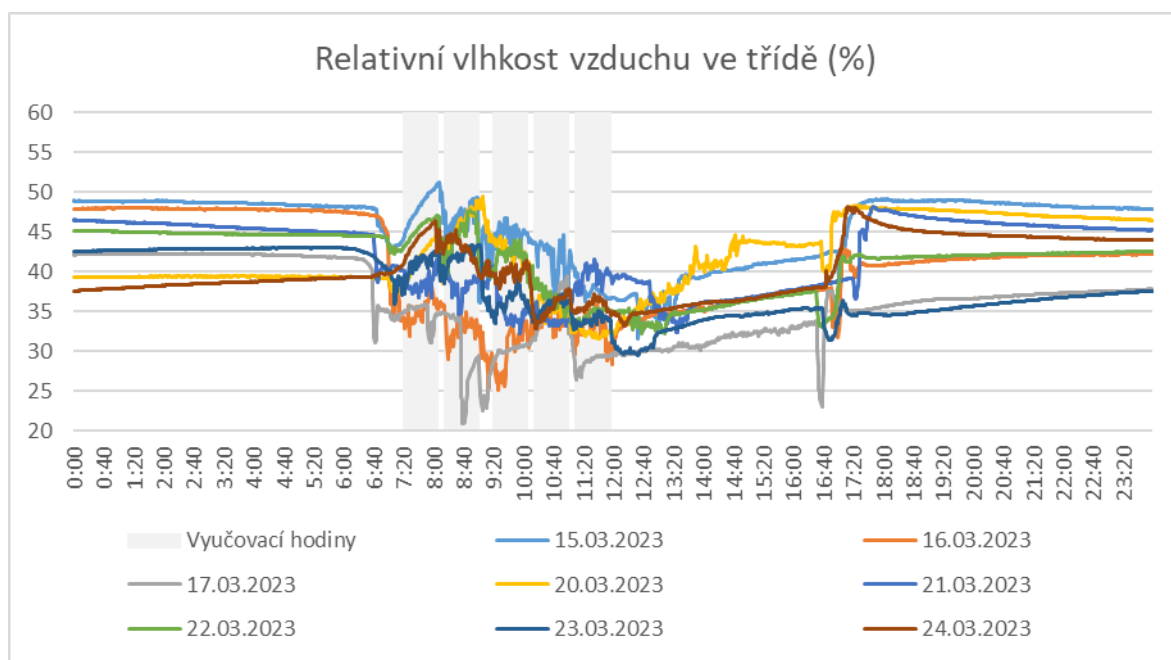
Obrázek 26 Graf průběhu teploty během vyučování. Zdroj autor

Jelikož je celá budova zateplena, tak nedochází v noci k prochladnutí budovy, toto bylo potvrzeno porovnáním venkovní a vnitřní teploty. Pro přehlednost jsou v grafu zobrazeny hodnoty pouze pro tři dny, kdy byla teplota venkovního vzduchu nejnižší.



Obrázek 27 Grafické porovnání venkovní a vnitřní teploty ve třídě. Zdroj autor

**Relativní vlhkost vzduchu** v budovách by měla být v rozsahu od 30 do 60 %, toto rozmezí stanovuje Vyhláška 343/2009 Sb. V chladných ročních obdobích ale klesá pod 30 %. Tím způsobuje například vysychání sliznic, což zhoršuje samočištění dýchacích cest a vede k snížení odolnosti proti různým virovým onemocněním. (Vyhláška č. 343/2009 Sb., 2009)



Obrázek 28 Graf naměřených dat – relativní vlhkost vzduchu. Zdroj autor

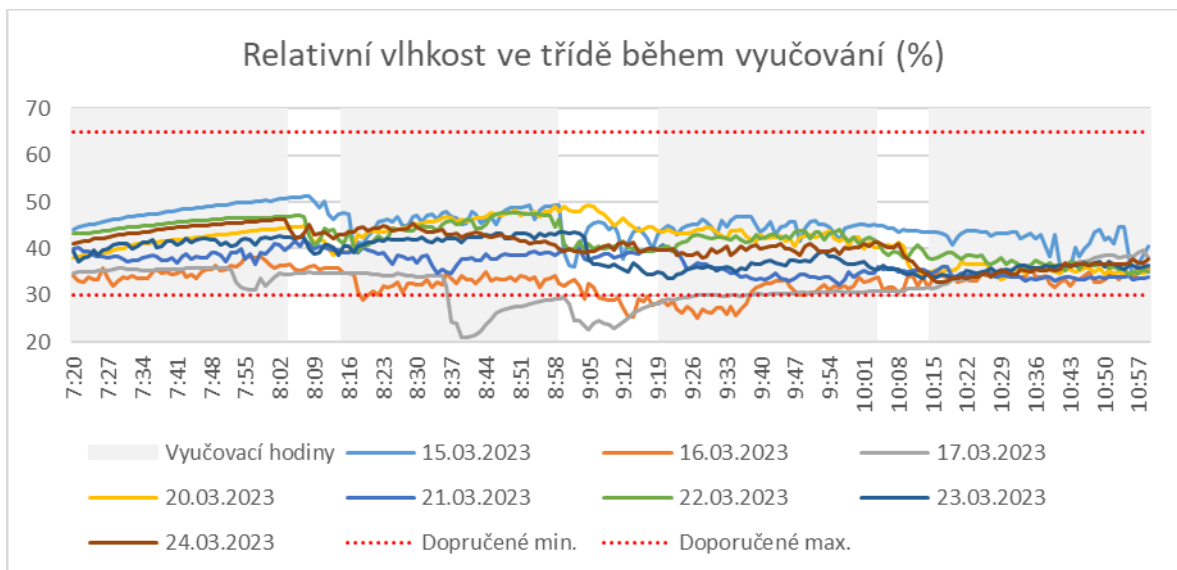
Tabulka 44 Hodnocení minimální relativní vlhkosti vnitřního vzduchu. Zdroj autor

Den	Minimální vlhkost (%)	Čas minimální vlhkosti	Hodnocení
Středa 15. 3. 2023	33,45	10:56	VYHOVUJE
Čtvrtek 16. 3. 2023	25,21	9:27	NEVYHOVUJE
Pátek 17. 3. 2023	20,92	10:58	NEVYHOVUJE
Pondělí 20. 3. 2023	33,44	10:29	VYHOVUJE
Úterý 21. 3. 2023	32,2	9:56	VYHOVUJE
Středa 22. 3. 2023	34,36	10:55	VYHOVUJE
Čtvrtek 23. 3. 2023	33,54	9:22	VYHOVUJE

Den	Minimální vlhkost (%)	Čas minimální vlhkosti	Hodnocení
Pátek 24. 3. 2023	32,85	10:16	VYHOVUJE

Tabulka 45 Hodnocení maximální relativní vlhkosti vnitřního vzduchu. Zdroj autor

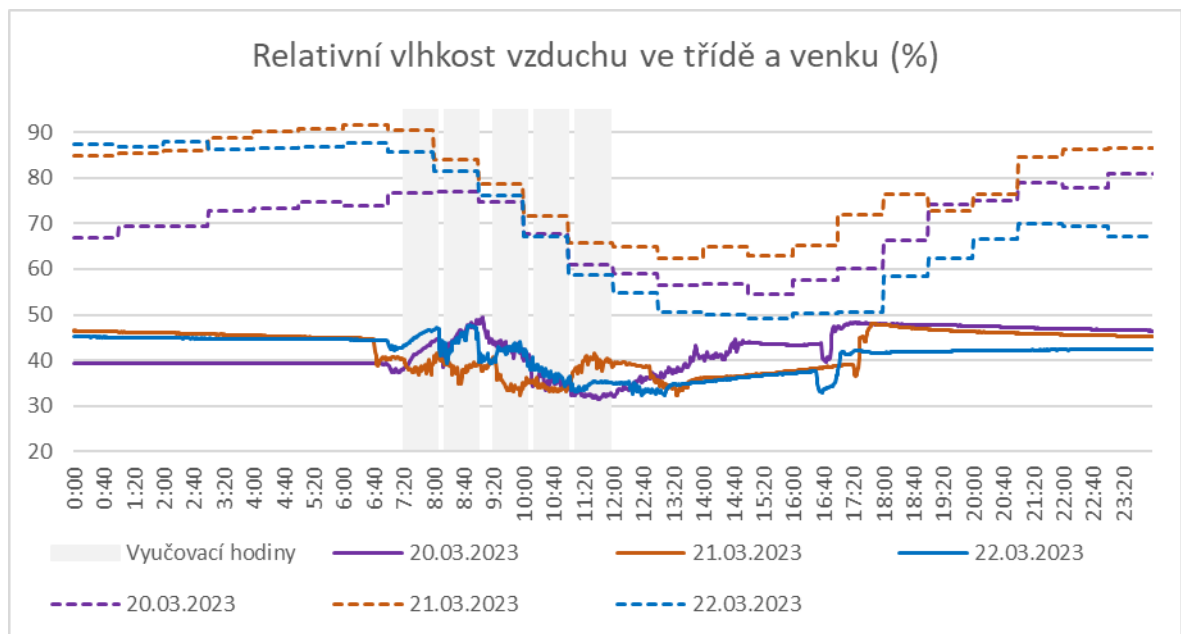
Den	Maximální vlhkost (%)	Čas maximální vlhkosti	Hodnocení
Středa 15. 3. 2023	51,28	8:08	VYHOVUJE
Čtvrtek 16. 3. 2023	38,19	7:58	VYHOVUJE
Pátek 17. 3. 2023	39,55	8:40	VYHOVUJE
Pondělí 20. 3. 2023	49,43	9:05	VYHOVUJE
Úterý 21. 3. 2023	41,78	8:07	VYHOVUJE
Středa 22. 3. 2023	47,63	8:49	VYHOVUJE
Čtvrtek 23. 3. 2023	43,4	8:59	VYHOVUJE
Pátek 24. 3. 2023	46,38	8:03	VYHOVUJE



Obrázek 29 Relativní vlhkost vnitřního vzduchu během vyučování. Zdroj autor



Pro porovnání vlivu vlhkosti venkovního vzduchu na vlhkost vnitřního vzduchu byly také porovnány hodnoty vlhkosti venkovního a vnitřního vzduchu pro dny s nejvyšší relativní vlhkostí venkovního vzduchu. Z tohoto vyplývá, že venkovní vzduch při větrání ovlivní relativní vlhkost vzduchu vnitřního, ale tato se rychle, po ukončení větrání, vyrovná zpět na úroveň blízkou stavu před zahájením větrání.



Obrázek 30 Graf naměřených dat – relativní vlhkost vzduchu (20.-22. 3. 2023). Zdroj autor

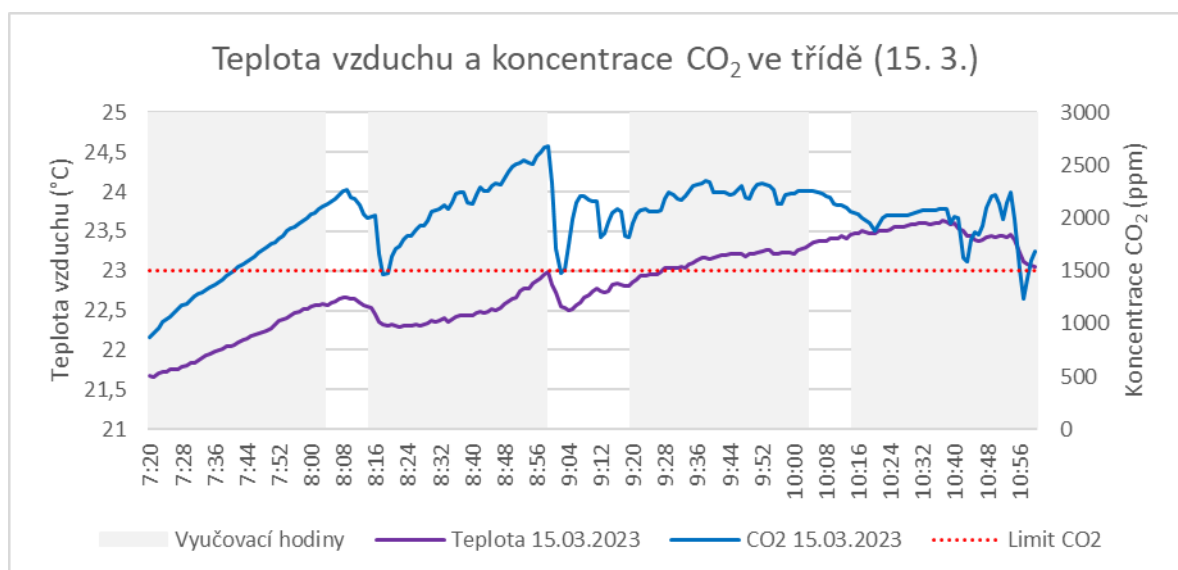
**Koncentrace CO<sub>2</sub>** v průběhu vyučování v prostoru zpravidla roste a dosahuje hodnot, které mohou vést ke zdravotním problémům. Z toho důvodu během přestávek probíhá výměna vzduchu ve třídě přísunem venkovního vzduchu otevřenými okny a dveřmi na chodbu.

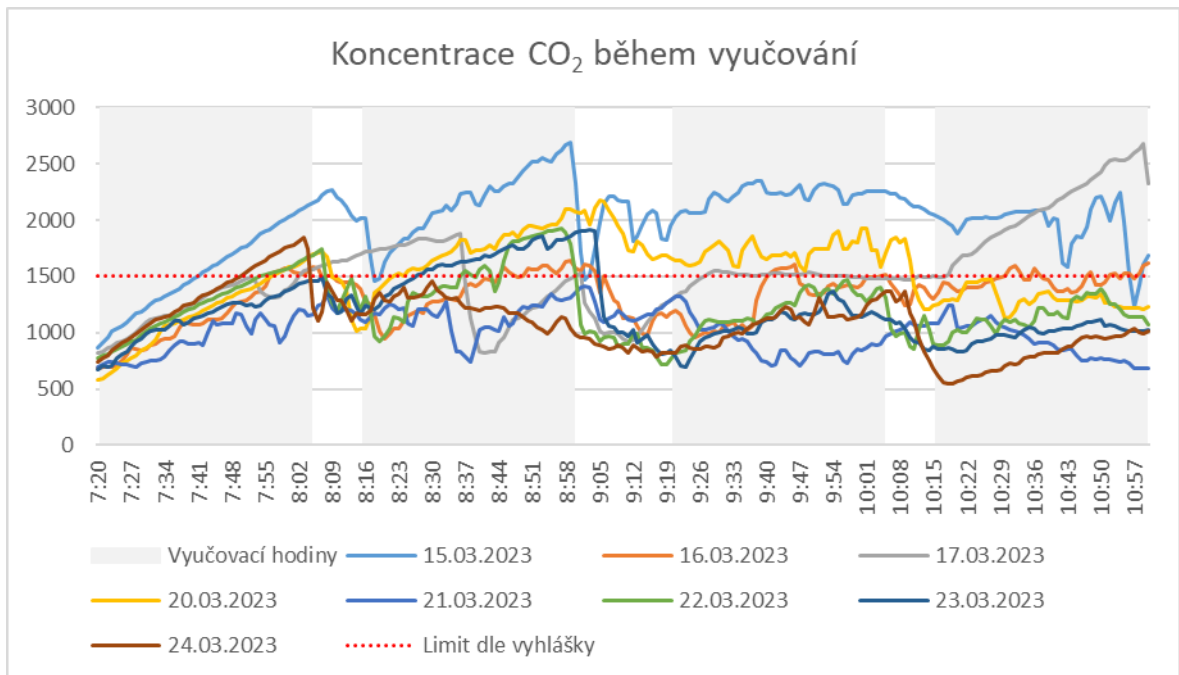
Vyhláška č. 268/2009 Sb stanovuje, že koncentrace ve vnitřním vzduchu nesmí překročit hodnotu 1500 ppm. (Vyhláška č. 268/2009 Sb., 2009)

Tabulka 46 Hodnocení koncentrace CO<sub>2</sub> ve třídě. Zdroj autor

Den	Maximální koncentrace CO <sub>2</sub> (ppm)	Čas maximální koncentrace CO <sub>2</sub>	Hodnocení
Středa 15. 3. 2023	2684	8:59	NEVYHOVUJE
Čtvrtek 16. 3. 2023	1639	8:59	NEVYHOVUJE
Pátek 17. 3. 2023	2675	10:59	NEVYHOVUJE
Pondělí 20. 3. 2023	2178	9:05	NEVYHOVUJE
Úterý 21. 3. 2023	1414	7:50	VYHOVUJE
Středa 22. 3. 2023	1929	8:57	NEVYHOVUJE
Čtvrtek 23. 3. 2023	1915	9:03	NEVYHOVUJE
Pátek 24. 3. 2023	1842	8:03	NEVYHOVUJE

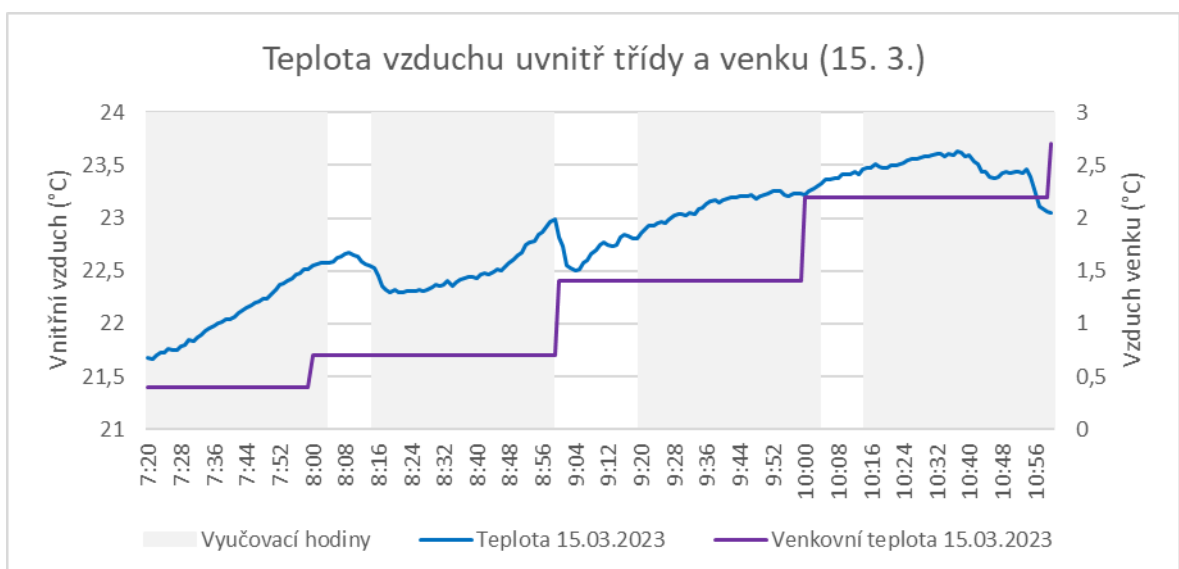
Ve dnech, kdy probíhalo měření byly venkovní teploty výrazně nižší než teplota uvnitř třídy. Z tohoto důvodu byla porovnána data teplot, relativní vlhkosti vnitřního vzduchu a koncentrace CO<sub>2</sub> pro prokázání dopadu větrání na koncentraci CO<sub>2</sub> ve třídě v jednotlivých dnech.

Obrázek 31 Teplota vzduchu a koncentrace CO<sub>2</sub> během vyučování 15. 3. 2023. Zdroj autor



Obrázek 32 Koncentrace CO<sub>2</sub> během vyučování. Zdroj autor

Analýza dat prokázala, že intenzita a doba větrání má prokazatelný pozitivní dopad na koncentraci CO<sub>2</sub> ve třídě, kdy zvýšením přísunu množství venkovního vzduchu dochází ke snížení koncentrace CO<sub>2</sub>, ovšem za cenu snížení teploty vnitřního vzduchu.

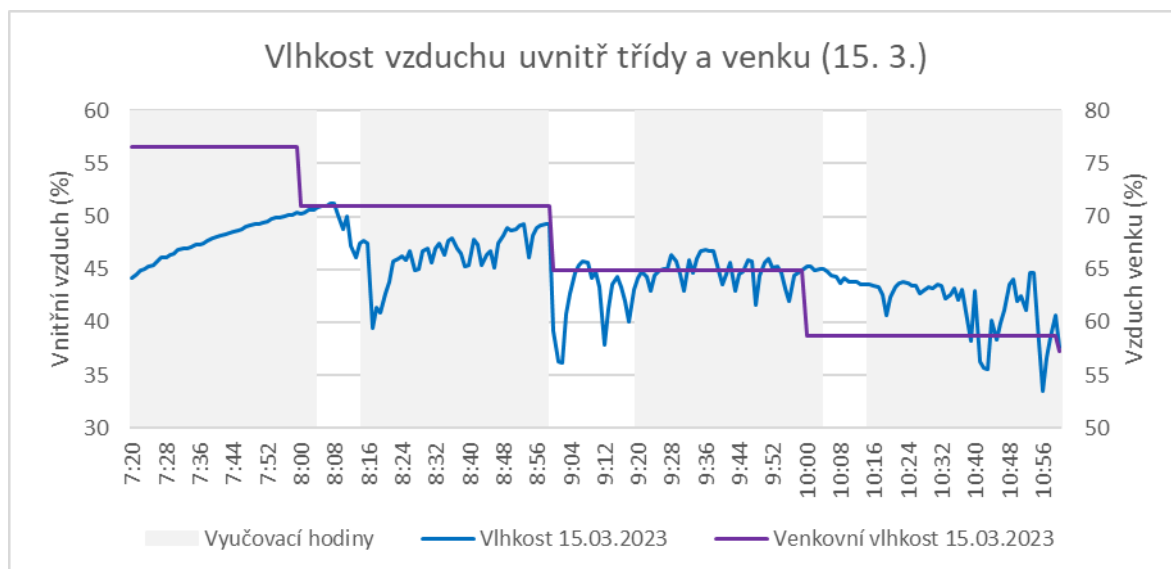


Obrázek 33 Teplota vnějšího a vnitřního vzduchu během vyučování 15. 3. 2023.

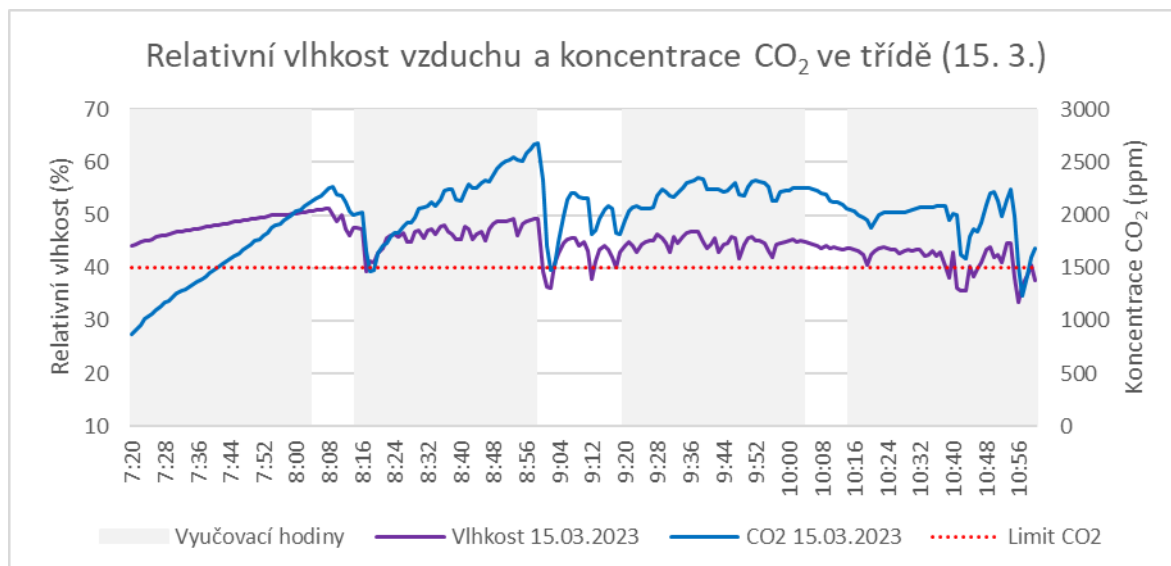
Zdroj autor

Pokles teploty však nebyl nijak dramatický a činil maximálně 0,2 °C za minutu větrání při rozdílu venkovní a vnitřní teploty cca 20 °C.

V další analýze byla porovnána závislost koncentrace CO<sub>2</sub> na vlhkosti vnitřního vzduchu. Obrázek níže pro přehlednost zobrazuje pouze grafy hodnot pro den 15. 3. 2023.



Obrázek 34 Relativní vlhkost vnitřního a venkovního vzduchu 15. 3. 2023. Zdroj autor

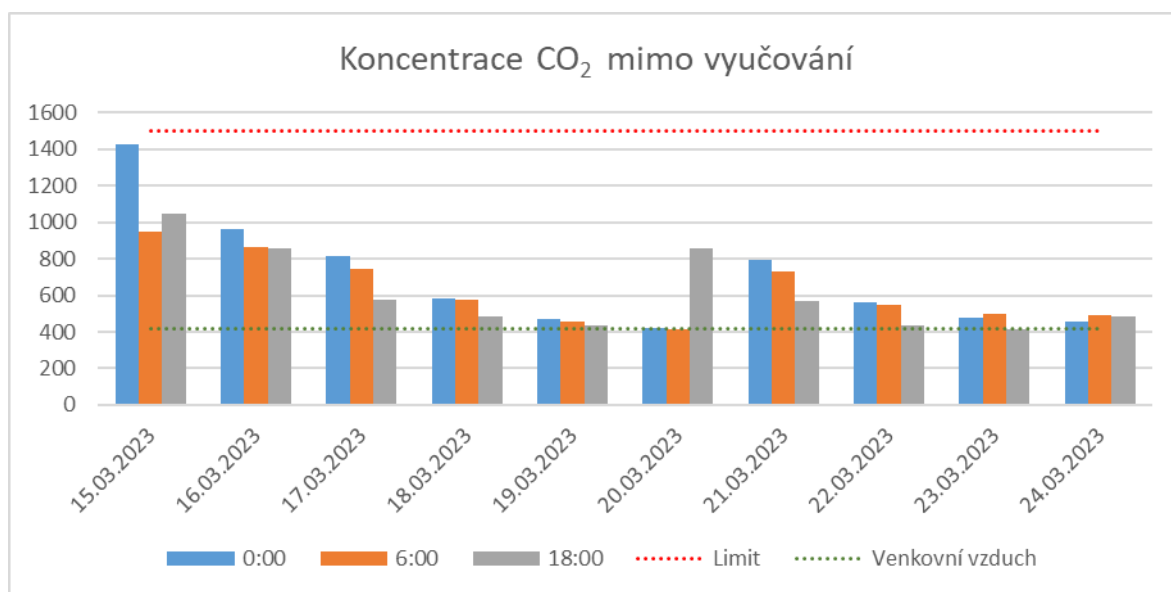


Obrázek 35 Relativní vlhkost vnitřního vzduchu a koncentrace CO<sub>2</sub> během vyučování. Zdroj autor

Analýza závislosti koncentrace CO<sub>2</sub> na vlhkosti vnitřního vzduchu prokázala přímou závislost koncentrace CO<sub>2</sub> na intenzitě a době výměny vnitřního vzduchu. Měření prokázalo

překročení limitní hodnoty koncentrace CO<sub>2</sub> (1500 ppm) ve dnech, kdy byla větrána třída pouze o přestávkách.

Data jasně ukázala, že i v uzavřené budově školy jsou koncentrace CO<sub>2</sub> vysoké, například 15. 3. 2023 byla koncentrace v 0:00 již 1426 ppm.



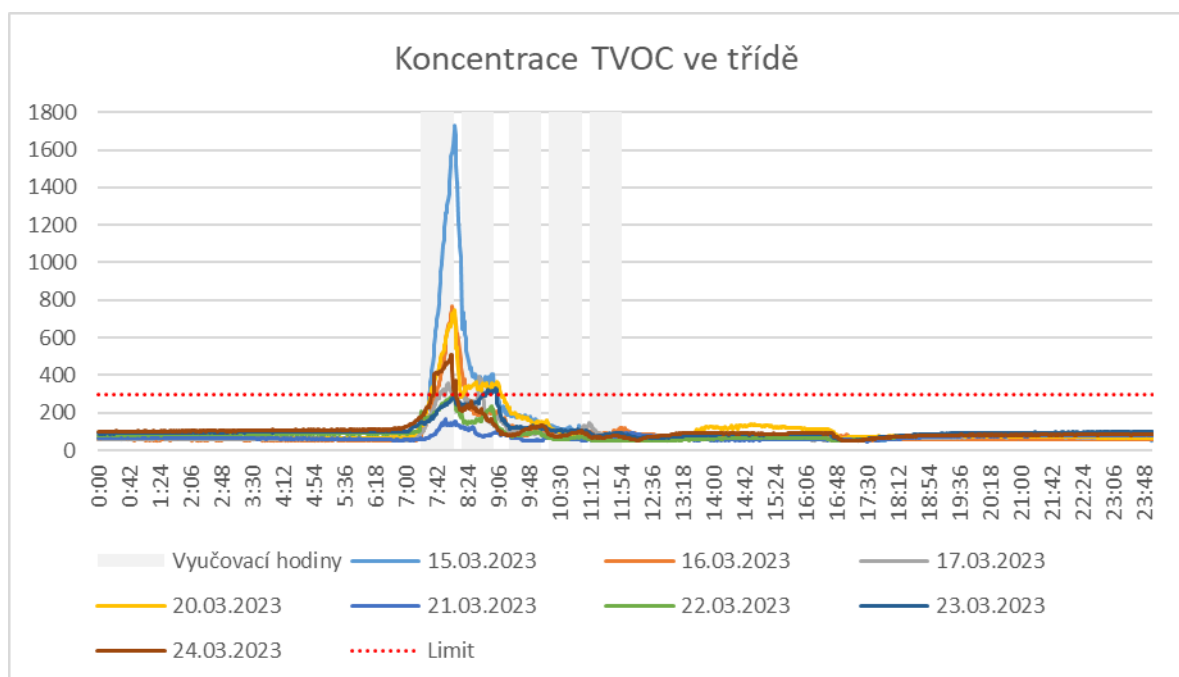
Obrázek 36 Koncentrace CO<sub>2</sub> v budově školy mimo vyučování. Zdroj autor

Čím vyšší je těkavost **VOC látky** (nižší bod varu), tím pravděpodobněji bude sloučenina emitována z produktu nebo povrchu do vzduchu. Velmi těkavé organické sloučeniny jsou tak těkavé, že je obtížné je měřit a nacházejí se téměř výhradně jako plyny ve vzduchu spíše než v materiálech nebo na površích. Nejméně těkavé sloučeniny nalezené ve vzduchu tvoří mnohem menší zlomek z celkového množství přítomných v interiéru, zatímco většina bude v pevných látkách nebo kapalinách, které je obsahují, nebo na površích včetně prachu, nábytku a stavebních materiálů.

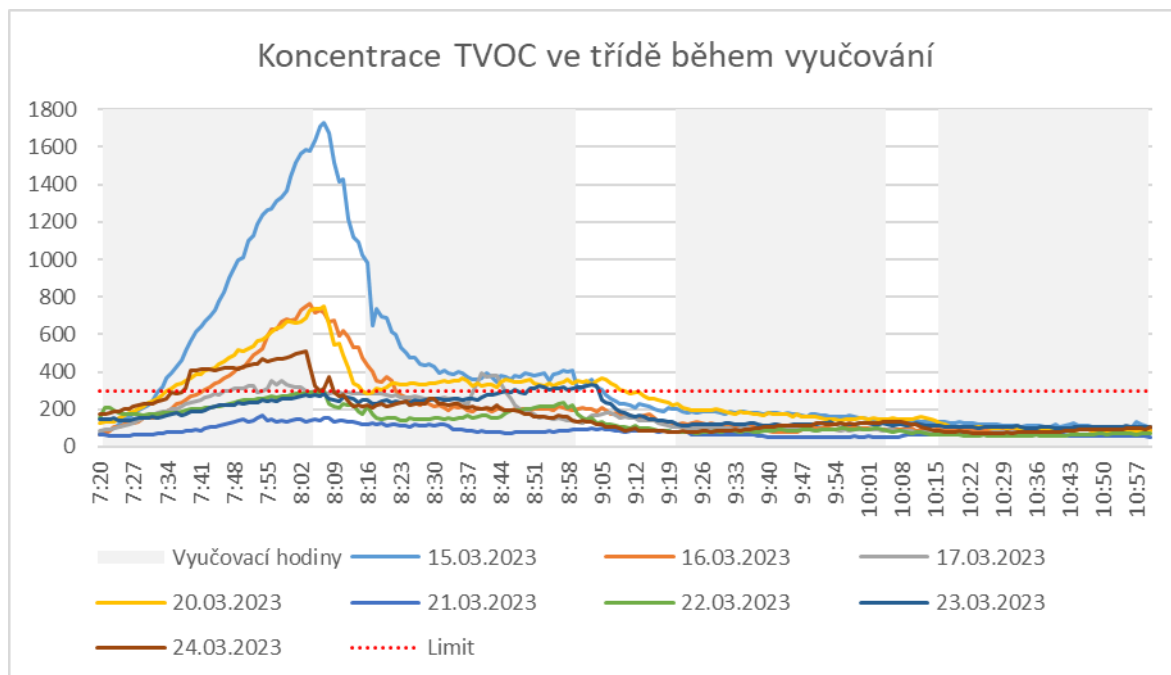
Tabulka 47 Hodnocení koncentrace TVOC ve třídě. Zdroj autor

Den	Maximální koncentrace TVOC (ppb)	Čas maximální koncentrace TVOC	Hodnocení
Středa 15. 3. 2023	1730,9	8:07	NEVYHOVUJE

Den	Maximální koncentrace TVOC (ppb)	Čas maximální koncentrace TVOC	Hodnocení
Čtvrtek 16. 3. 2023	766,12	8:04	NEVYHOVUJE
Pátek 17. 3. 2023	395,47	8:40	NEVYHOVUJE
Pondělí 20. 3. 2023	748,81	8:07	NEVYHOVUJE
Úterý 21. 3. 2023	167,37	7:54	VYHOVUJE
Středa 22. 3. 2023	295,16	8:07	VYHOVUJE
Čtvrtek 23. 3. 2023	328,78	9:03	NEVYHOVUJE
Pátek 24. 3. 2023	506,69	8:03	NEVYHOVUJE

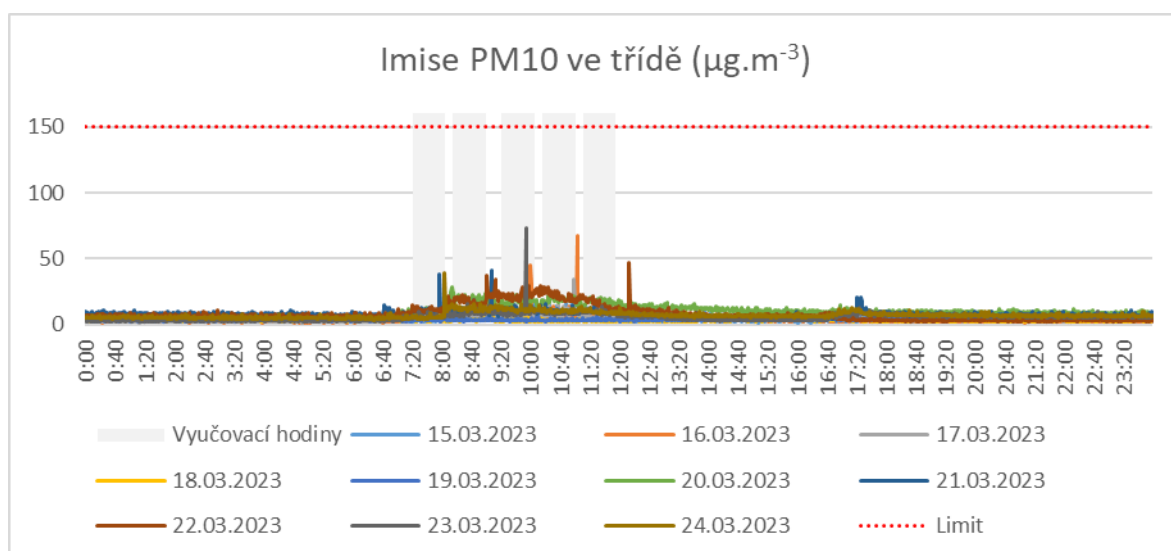


Obrázek 37 Koncentrace TVOC ve třídě. Zdroj autor

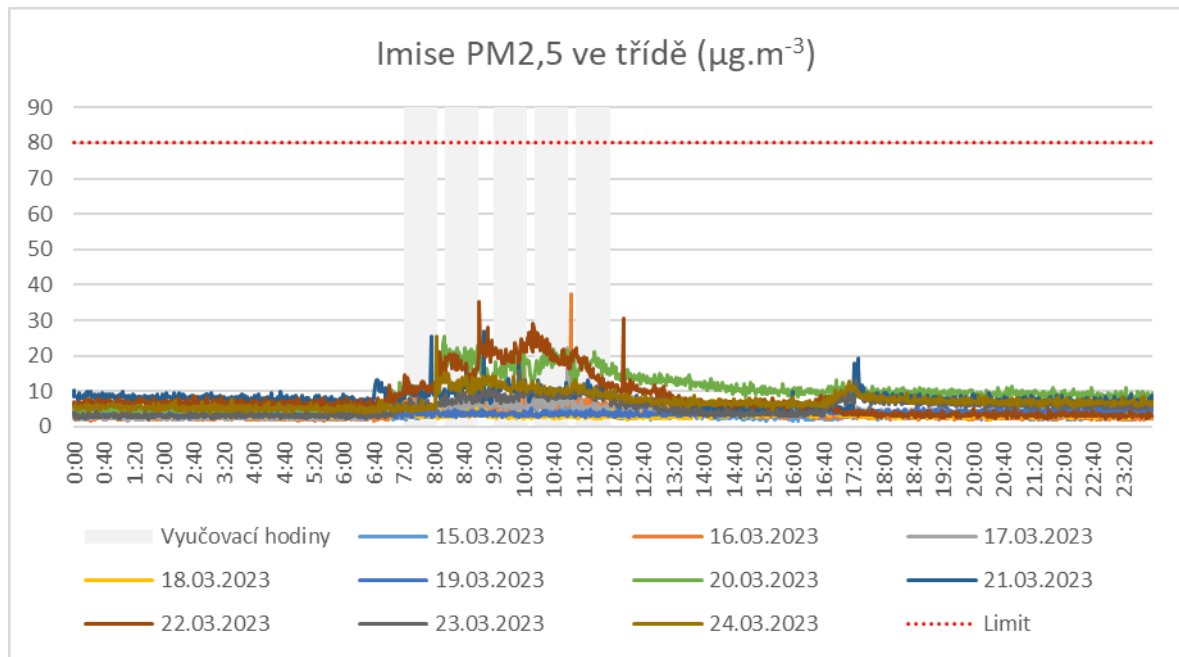


Obrázek 38 Koncentrace TVOC během vyučování. Zdroj autor

Množství částic **PM10** a **PM2,5** je spojené především se vzdušným prouděním uvnitř třídy, předpokládá se tedy jeho zvýšení během přestávek, kdy žáci opouštějí a vrací se do třídy, ale také dochází ke zvýšení prachu ve třídě z důvodu intenzivního větrání.



Obrázek 39 Imise PM10 ve třídě. Zdroj autor



Obrázek 40 Imise PM2,5 ve třídě. Zdroj autor

Během měření nebyly překročeny limity imisí částic PM10 a PM2,5. Nutno podotknout, že měření probíhalo v měsíci březnu, kdy rostliny venku ještě nekvetou a prašnost je, vlivem vlhké půdy, nižší. Předpokládá se, že množství částic se podstatně zvýší s množstvím pylu a prachu ve venkovním, a poté přeneseně, i ve vnitřním vzduchu.

Tabulka 48 Hodnocení imisí PM10 ve třídě. Zdroj autor

Den	Maximální imise PM10 ( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )	Čas maximální imise PM10	Hodnocení
Středa 15. 3. 2023	17,08	10:07	VYHOVUJE
Čtvrtek 16. 3. 2023	45,12	10:00	VYHOVUJE
Pátek 17. 3. 2023	34,69	10:59	VYHOVUJE
Pondělí 20. 3. 2023	28,55	8:14	VYHOVUJE
Úterý 21. 3. 2023	41,57	9:07	VYHOVUJE
Středa 22. 3. 2023	37,33	9:01	VYHOVUJE
Čtvrtek 23. 3. 2023	73,36	9:54	VYHOVUJE

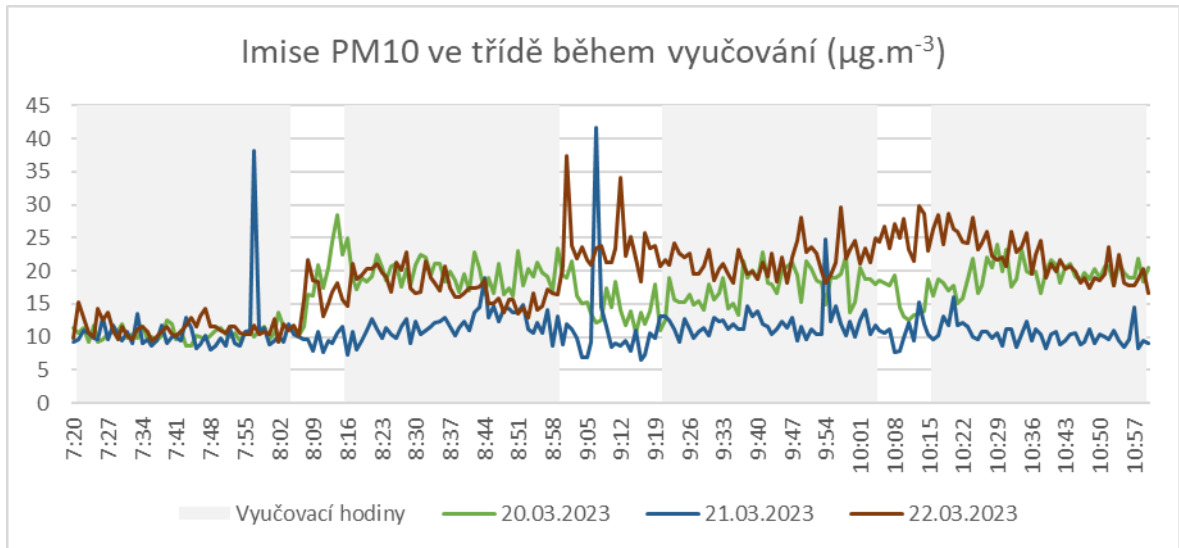


Den	Maximální imise PM10 ( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )	Čas maximální imise PM10	Hodnocení
Pátek 24. 3. 2023	39,42	8:04	VYHOVUJE

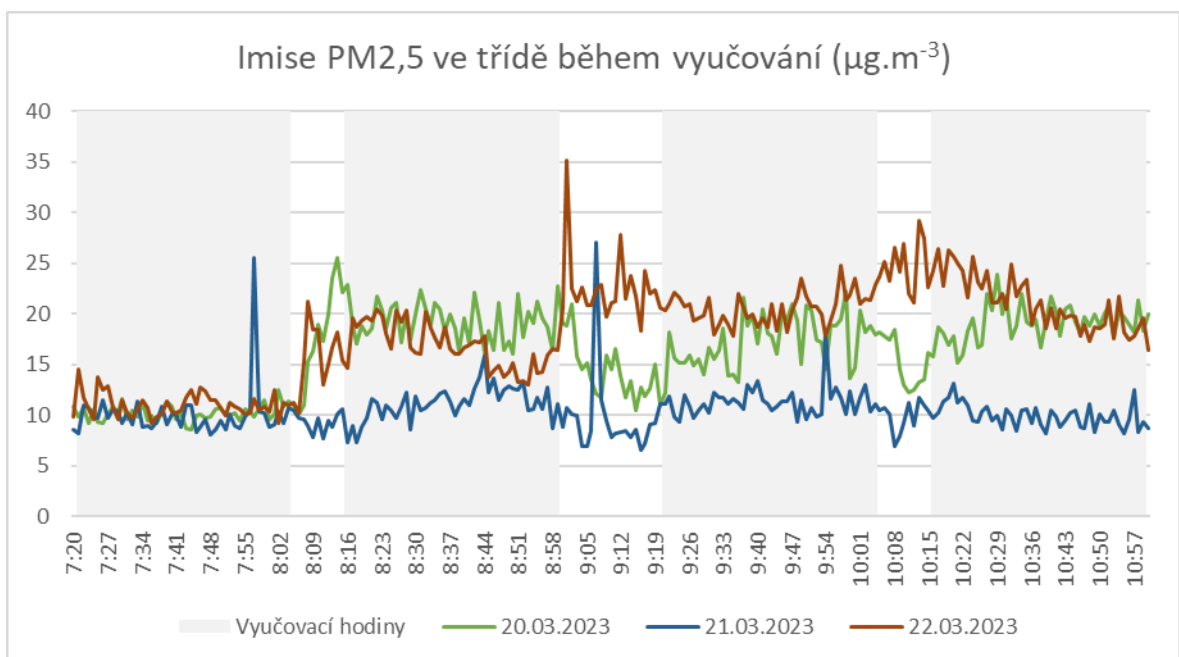
Tabulka 49 Hodnocení imisí PM2,5 ve třídě. Zdroj autor

Den	Maximální imise PM2,5 ( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )	Čas maximální imise PM2,5	Hodnocení
Středa 15. 3. 2023	10,16	10:07	VYHOVUJE
Čtvrtek 16. 3. 2023	20,1	10:00	VYHOVUJE
Pátek 17. 3. 2023	22,04	10:59	VYHOVUJE
Pondělí 20. 3. 2023	25,53	8:14	VYHOVUJE
Úterý 21. 3. 2023	27,08	9:07	VYHOVUJE
Středa 22. 3. 2023	35,1	9:01	VYHOVUJE
Čtvrtek 23. 3. 2023	15,8	9:54	VYHOVUJE
Pátek 24. 3. 2023	25,63	8:04	VYHOVUJE

Naměřené koncentrace částic PM10 a PM2,5 zobrazují skokové navýšení koncentrací PM10 a PM2,5 během přestávek, a potvrzují tak předpoklad, že pohyb žáků ve třídě a intenzivní větrání zvyšuje množství částic PM10 a PM2,5 ve vnitřním vzduchu. V grafech níže jsou pro přehlednost zobrazeny pouze grafy hodnot PM10 a PM2,5 pro dny 20.-22. 3. 2023.



Obrázek 41 Imise PM10 ve třídě během vyučování. Zdroj autor



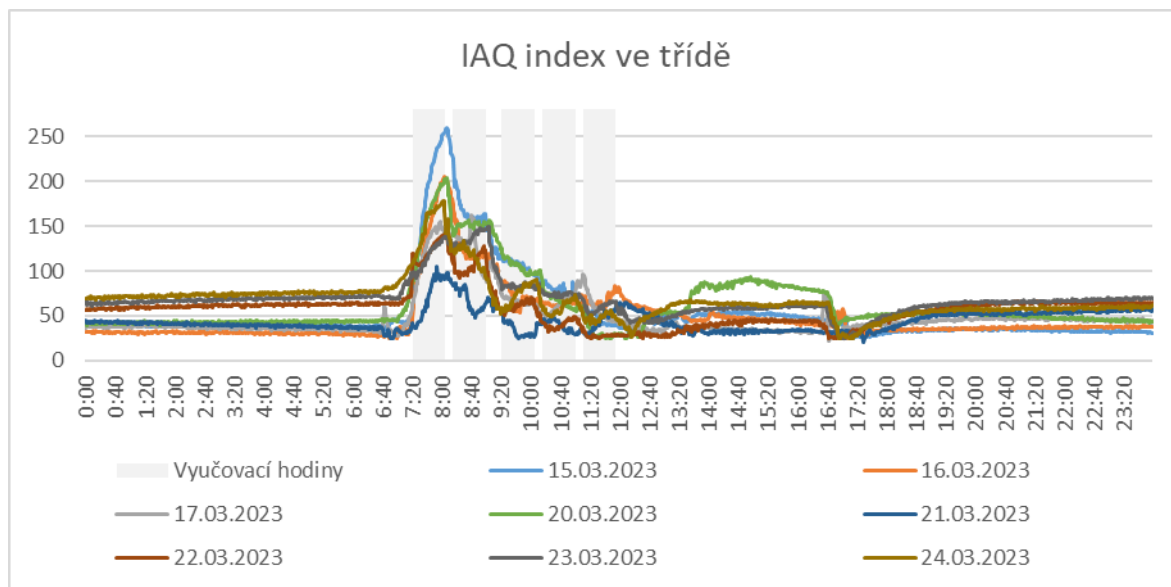
Obrázek 42 Imise PM2,5 ve třídě během vyučování. Zdroj autor

Jako komplexní ukazatel kvality vnitřního vzduchu byl použit **IAQ index**, tento kombinuje imise částic PM2,5 s koncentracemi CO<sub>2</sub> a TVOC ve vnitřním vzduchu. (Bhimaraju et al., 2021)

Výpočet TVOC zajišťuje použitá knihovna pro čidlo BME680 od firmy Bosch Sensortec Environmental Cluster (BSEC). (Bosch Sensortec Environmental Cluster (BSEC), 2022)

Tabulka 50 Vyhodnocení IAQ indexu a zdravotní rizika. Zdroj Green Econometrics (vlastní zpracování)

IAQ index	Kvalita vnitřního vzduchu	Zdravotní riziko
0 až 50	Dobrá	Kvalita ovzduší je uspokojivá a znečištění ovzduší představuje malé nebo žádné riziko.
51 až 100	Střední	Kvalita vzduchu je přijatelná. Pro některé lidi však může existovat riziko, zejména pro ty, kteří jsou neobvykle citliví na znečištění ovzduší.
101 až 150	Nezdravá pro skupiny citlivých osob	Členové citlivých skupin mohou pociťovat zdravotní účinky. Širší veřejnost je zasažena méně pravděpodobně.
151 až 200	Nezdravá	Někteří členové široké veřejnosti mohou pociťovat zdravotní účinky. Členové citlivých skupin mohou pociťovat vážnější zdravotní účinky.
201 až 300	Velmi nezdravá	Zvýšené riziko zdravotních účinků pro každého.
více jak 300	Nebezpečná	Zdravotní varování před nouzovými podmínkami. Pravděpodobněji postižení všech osob.

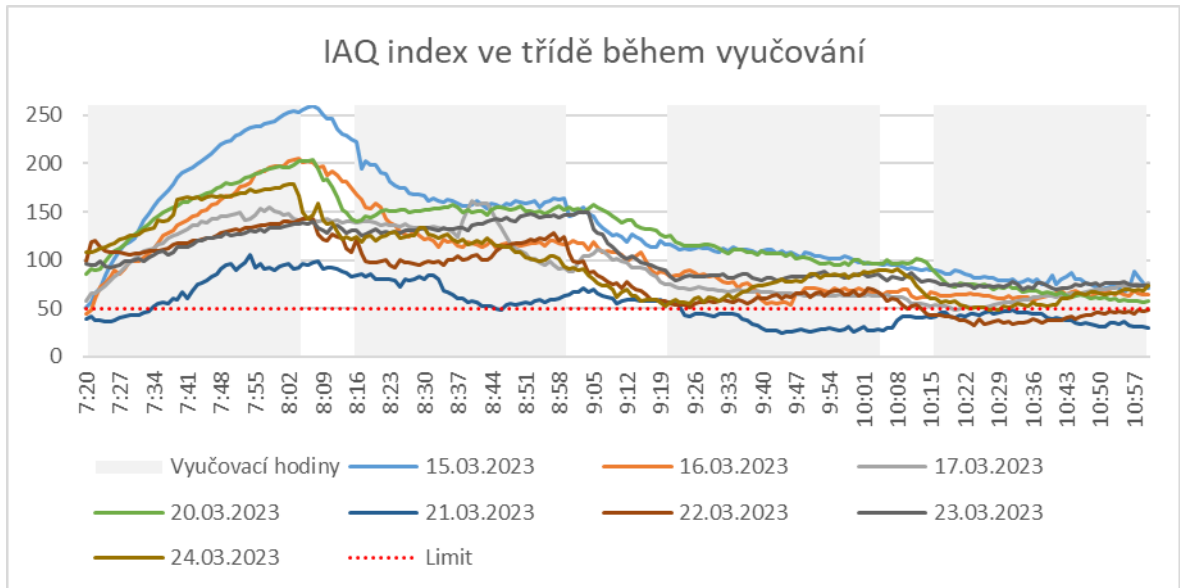


Obrázek 43 Úroveň IAQ indexu ve třídě. Zdroj autor

Pro hodnocení IAQ indexu byla zvolena maximální hodnota indexu 50 (dobrá kvalita vzduchu), jelikož ve třídě jsou žáci ve věku 7-8 let a dětský organismus je velmi citlivý a zranitelný.

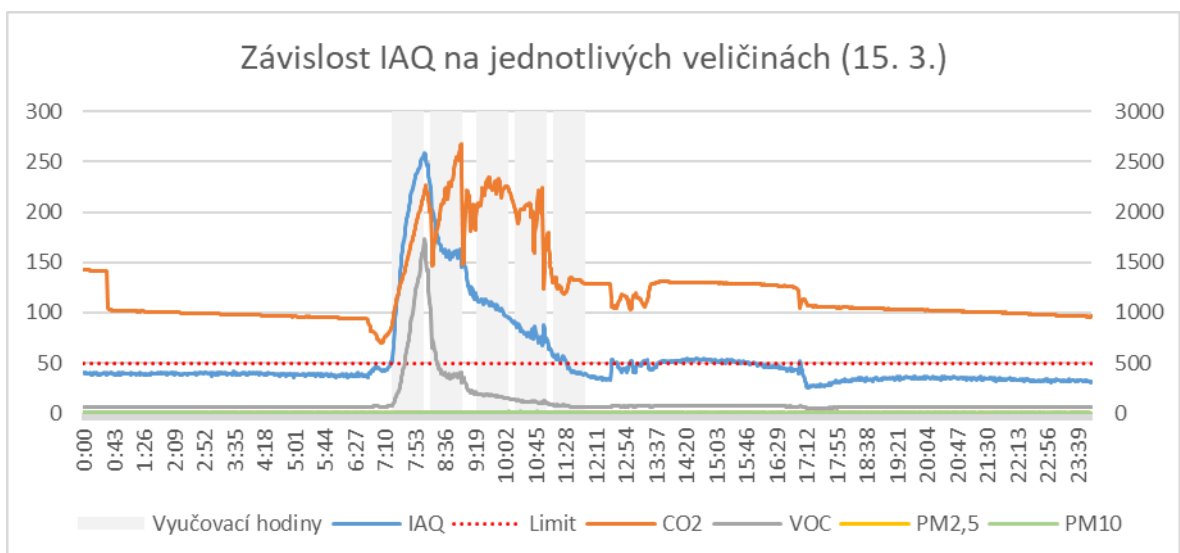
Tabulka 51 Hodnocení IAQ indexu ve třídě. Zdroj autor

Den	Maximální hodnota IAQ indexu	Čas maximální hodnoty IAQ indexu	Hodnocení
Středa 15. 3. 2023	259,47	8:07	NEVYHOVUJE
Čtvrtek 16. 3. 2023	205,55	8:04	NEVYHOVUJE
Pátek 17. 3. 2023	161,8	8:40	NEVYHOVUJE
Pondělí 20. 3. 2023	204,04	8:07	NEVYHOVUJE
Úterý 21. 3. 2023	104,92	7:54	NEVYHOVUJE
Středa 22. 3. 2023	142,45	8:07	NEVYHOVUJE
Čtvrtek 23. 3. 2023	149,59	9:03	NEVYHOVUJE
Pátek 24. 3. 2023	178,2	8:03	NEVYHOVUJE



Obrázek 44 Úroveň IAQ indexu ve třídě během vyučování. Zdroj autor

Naměřené hodnoty IAQ indexu odpovídají výpočtu této veličiny. V grafu pro den 15. 3. je viditelná jasná závislost IAQ indexu na koncentracích VOC a CO<sub>2</sub>, limity imisí PM částic nebyly během měření překročeny a měly tak minimální vliv na jeho výpočet. (Bhimaraju et al., 2021)



Obrázek 45 Závislost IAQ indexu na jednotlivých veličinách pro den 15. 3. 2023. Zdroj autor

### 4.3 Vyhodnocení měření a návrhy na zlepšení

Na základě dílčích hodnocení dat kvality vnitřního vzduchu lze konstatovat, že **kvalita vnitřního vzduchu ve 2. třídě Základní školy a Mateřské školy Velký Újezd**, na základě měření provedeného 15.-22.3.2003 zařízením EAC, **nevyhovuje limitům** stanovených v příslušných právních předpisech ČR.

Tabulka 52 Hodnocení kvality vnitřního vzduchu ve třídě. Zdroj autor

Veličina	Hodnocení
Teplota	NEVYHOVUJE
Relativní vlhkost	NEVYHOVUJE
Koncentrace CO <sub>2</sub>	NEVYHOVUJE
Koncentrace TVOC	NEVYHOVUJE
Částice PM10	VYHOVUJE
Částice PM2,5	VYHOVUJE
IAQ index	NEVYHOVUJE
<b>VÝSLEDNÉ HODNOCENÍ</b>	<b>NEVYHOVUJE</b>

Délka větrání nemá zásadní dopad na snížení **teploty vnitřního vzduchu**, ta se snižuje rychlostí cca 0,2 °C.min<sup>-1</sup>. Hodnoty teplot vnitřního vzduchu ukazují, že ve třídě je i během noci teplota vyšší, než je teplota minimální (20 °C). Je tedy možné snížení teploty o 2 °C v celé budově školy bez toho, aby byly překročeny hodnoty stanovené Vyhláškou č. 343/2009 Sb. (Vyhláška č. 343/2009 Sb., 2009)

Obecně je uváděno, že snížení teploty vnitřního vzduchu o 1 °C představuje energetickou úsporu 6 %. (Tipy na úsporu energie, b.r.)

Vyjádřeno v energetických úsporách, dojde tedy ke snížení energetické spotřeby celé školy o 12 % ročně. Finančně vyjádřeno se jedná při ročních nákladech na topení 2 300 000,- Kč (rok 2022) o roční předpokládanou úsporu ve výši 276 000,- Kč.

**Relativní vlhkost vnitřního vzduchu** je úzce provázána s intenzitou a četností větrání, lze konstatovat, že pokud bude třída dostatečně větrána, tak bude zaručena i doporučená úroveň relativní vlhkosti vzduchu.

V době, kdy je budova školy uzavřena klesají hodnoty **koncentrace CO<sub>2</sub>** velmi pomalu a výchozí hodnota při otevření školy je vyšší, než je hodnota koncentrace CO<sub>2</sub> ve venkovním vzduchu. Například 15.3. 2023 byla koncentrace CO<sub>2</sub> v budově v 6:00 již 1426 ppm, což je hraniční hodnota. Je tedy nutné budovu větrat i mimo vyučovací hodiny tak, aby výchozí hodnoty koncentrace CO<sub>2</sub> na začátku vyučování byly srovnatelné s koncentrací ve venkovním vzduchu (419 ppm). (Cykly koncentrací CO<sub>2</sub> a O<sub>2</sub> v atmosféře, 2023)

Definované vztahy vycházejí z předpokládané lineární závislosti mezi snížením koncentrace polutantu, nebo IAQ indexu, kdy dělencem v této rovnici je minutový pokles koncentrace (indexu). Tento byl stanoven jako rozdíl koncentrace (indexu) při zahájení větrání a koncentrace (indexu) při jeho ukončení, děleno počtem minut doby větrání.

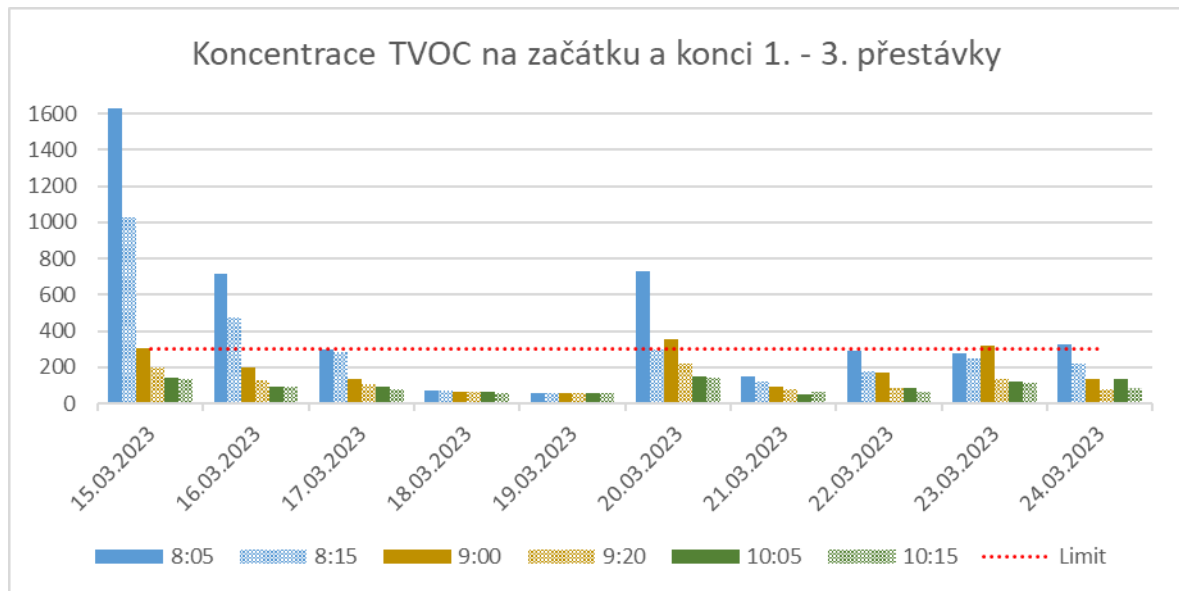
Pro stanovení času nutného k větrání, je možné využít vztahu mezi koncentrací CO<sub>2</sub> (ppm) a časem větrání, tento vychází z naměřených dat. Kde  $t$  je čas větrání v minutách,  $C_0$  počáteční koncentrace a  $C_1$  požadovaná cílová koncentrace.

$$t = \frac{C_0 - C_1}{115} \quad (4)$$

Koncentraci CO<sub>2</sub> ve vnitřním vzduchu lze snížit dostatečným větráním, nebo instalací zařízení na rekuperaci vzduchu. Tato výměna vzduchu musí být zajištěna i mimo vyučovací hodiny, jelikož v nedostatečně vyvětrané budově jsou vysoké hodnoty koncentrace CO<sub>2</sub> ještě před příchodem žáků. Ty se rychle zvyšují již po uplynutí několika desítek minut a jejich maxim je dosahováno na konci prvních dvou vyučovacích hodin.

Naměřené hodnoty **koncentrací TVOC** prokázaly, že k překročení limitu dochází vždy během první a druhé vyučovací hodiny s maximy hodnot vždy na jejich konci, poté již tyto hodnoty nerostou. Je evidentní, že tyto látky, respektive jejich zdroj, musí být vnášeny do třídy na začátku vyučování, kdy se během prvních dvou vyučovacích hodin VOC odpaří, naředí se větráním a poté se již jejich koncentrace nezvyšuje. Na základě ústního dotazování žáci sdělili fakt, že jim rodiče denně ráno oblékají čisté oblečení a je tedy důvodný předpoklad, že zdrojem zvýšené hladiny koncentrace TVOC jsou prací prostředky a aviváže

používané při praní prádla, případně jiné drogistické výrobky. Stejně jako u koncentrace  $\text{CO}_2$  má intenzivní větrání pozitivní dopad i na rychlé snížení koncentrace TVOC.



Obrázek 46 Koncentrace TVOC na začátku a konci 1.-3. přestávky. Zdroj autor

Pro stanovení času nutného k větrání, je možné využít vztahu mezi koncentrací TVOC (v ppb) a časem větrání, tento vychází z naměřených dat. Kde  $t$  je čas větrání v minutách,  $TVOC_{C0}$  počáteční koncentrace a  $TVOC_{C1}$  cílová koncentrace.

$$t = \frac{TVOC_{C0} - TVOC_{C1}}{60} \quad (5)$$

Imise **částic PM10 a PM2,5** vykazují skokové krátkodobé zvýšení při zahájení větrání, nicméně nedosahují ani poloviny stanovených limitů. Jejich imise se však mohou podstatně změnit s ročním obdobím (pyl, prach).

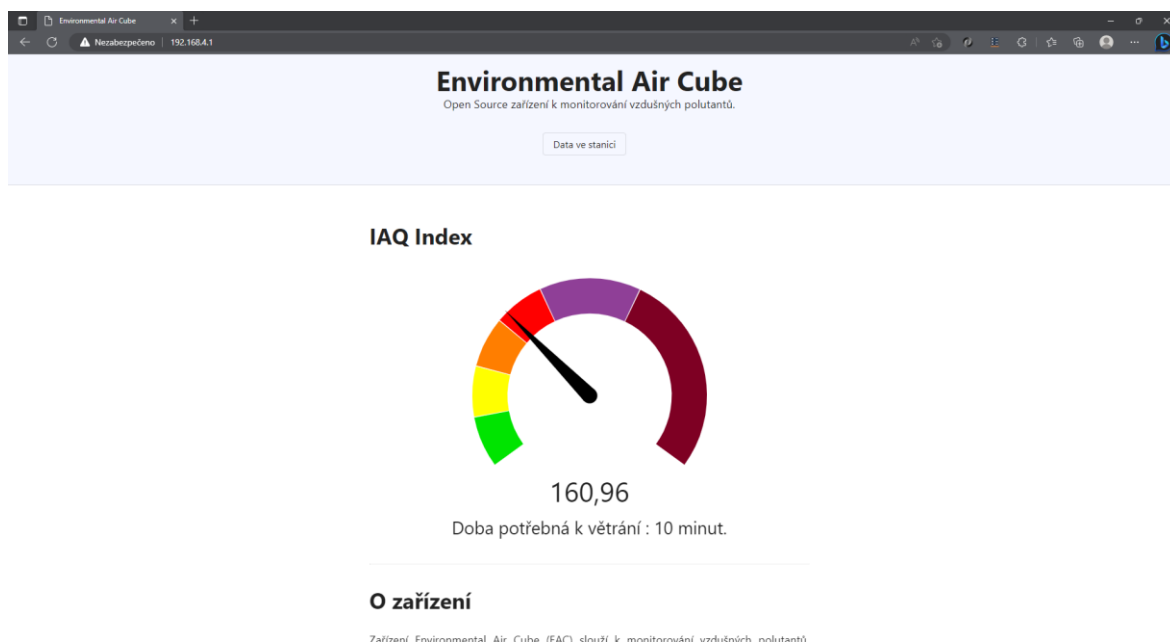
Pro souhrnné vyjádření kvality vnitřního vzduchu je výhodné použití **IAQ indexu**, který lze snadno vizualizovat, a zahrnuje v rámci svého výpočtu všechny výše uvedené polutanty. (Bhimaraju et al., 2021)



Pro stanovení času nutného k větrání, je možné využít vztahu mezi hodnotou IAQ indexu a časem větrání, tento vychází z naměřených dat. Kde  $t$  je čas větrání v minutách,  $IAQ_{C1}$  požadovaná cílová hodnota IAQ a  $IAQ_{C0}$  počáteční hodnota IAQ.

$$t = \frac{IAQ_{C0} - IAQ_{C1}}{11} \quad (6)$$

Webová stránka měřicí jednotky byla doplněna o funkci, která automaticky počítá a zobrazuje minimální potřebný čas větrání, tento výpočet vychází ze vztahu mezi hodnotou IAQ indexu a časem větrání (6). Pro jeho zobrazení lze využít webové rozhraní zařízení EAC, například zobrazením na smart TV, či jiném zařízení s internetovým prohlížečem.



Obrázek 47 Snímek obrazovky webového rozhraní měřicí jednotky se zobrazením času větrání. Zdroj autor

Toto opatření je okamžitě použitelné, nicméně neřeší klíčovou příčinu nevyhovující kvality vnitřního vzduchu ve třídě i v celé budově, kdy především koncentrace  $CO_2$  (1500 ppm) a VOC (300 ppb) jsou překračovány více jak 5ti násobně.

Riziky plynoucími ze zvýšené koncentrace  $CO_2$  jsou především únava a nesoustředěnost žáků na výuce. U citlivých jedinců může být negativním projevem i bolest hlavy a s ní spo-

jená nevolnost, dále dýchací potíže, třes, zmatenost a zvonění v uších. Koncentrace VOC jsou opakovaně překračovány během první a druhé vyučovací hodiny, kdy krátkodobé působení VOC může způsobit změnu ve vnímání vůní a chutí a také podráždění očí a sliznic. Další běžné účinky jsou vyčerpání, nesoustředěnost, suchá kůže až ekzémy nebo bolesti hlavy. Důsledkem dlouhodobé expozice VOC může být rakovinné bujení, mutace v genotypu nebo problémy s plodností. Zvláště náchylní jsou vůči VOC kojenci a malé děti, v tomto případě žáci, kteří ještě nemají vyvinutou dostatečně silnou obranyschopnost.

Jako hlavní příčina překračování stanovených limitů byla, na základě změřených dat a jejich následné analýze, určena nedostatečná výměna vzduchu v celé budově. Tato je v současnosti zajišťována nárazovým větráním o přestávkách, avšak jak bylo měřením prokázáno, toto větrání nezajistí dostatečnou výměnu vzduchu na další vyučovací hodinu. Pro snížení koncentrací CO<sub>2</sub> a VOC lze samozřejmě větrat třídu i během vyučování, ale pokud je venkovní teplota nižší, než teplota vnitřního vzduchu, tak má větrání dopad na ochlazení vzduchu ve třídě s následným potencionální zvýšením nemocnosti žáků.

Jako okamžité řešení je nutné zajistit dostatečné provětrání budovy mimo vyučovací hodiny, kdy by bylo vhodné využít dobu úklidu (16:30 – 18:00), během které by bylo otevřeno co nejvíce oken a dveří, čímž by se zajistil dostatečný přísun venkovního vzduchu. Potřebnou průběžnou výměnu vzduchu může do budoucna zajistit instalace rekuperace do budovy školy, která umožní dostatečnou výměnu vzduchu v celé budově bez nutnosti ohřívat, větráním nahrazený, venkovní vzduch. Toto opatření je však dlouhodobé a závislé na rozhodnutí zřizovatele, tím je městys Velký Újezd.

## ZÁVĚR

Cílem této práce bylo provedení posouzení kvality vnitřního vzduchu v budově Základní školy a Mateřské školy ve Velkém Újezdě. Pro účely měření kvality vnitřního vzduchu byly určeny jako hlavní parametry teplota a vlhkost vzduchu, imise polévatého prachu, koncentrace oxidu uhličitého a koncentrace organických těkavých látek. Výskyt dalších vzdušných polutantů, jako je oxid uhelnatý, oxid siřičitý, oxidy dusíku a dalších, se vzhledem k povaze monitorovaných prostor nepředpokládal.

Metodou literární rešerše byl v teoretické části práce zpracován teoretický vstup do problematiky měření škodlivin a shrnuty požadavky na kvalitu vnitřního ovzduší tak, jak jsou stanoveny platnými právními předpisy České republiky. Pro každý z hlavních polutantů byly uvedeny jeho základní vlastnosti, zdroje emisí, účinky na lidské zdraví a způsoby jejich měření. Pro stanovení nápravných opatření s cílem zlepšení kvality vnitřního vzduchu byl vytvořen přehled doporučených opatření, tento byl následně použit v praktické části. V závěru teoretické části práce byl vytvořen souhrn účinků uvedených polutantů na lidské zdraví a přehled aktuálních limitů dle platných právních předpisů ČR a doporučení WHO.

V praktické části práce byla navrhována a vytvořena konstrukce měřicí stanice vybraných vzdušných polutantů. Metodou měření a následně metodou komparace byla provedena kalibrace měřicí stanice, pro kterou bylo použito kalibrované profesionální zařízení. Na základě výsledků byla posouzena její přesnost a použitelnost. Vytvořené zařízení zcela splnilo požadovanou přesnost a opakovatelnost měření, také byl dodržen stanovený rozpočet na jeho konstrukci.

S takto ověřeným zařízením bylo provedeno měření vybraných vzdušných polutantů ve zvolené třídě a po provedení měření byla vyhodnocena kvalita vzduchu dle platných právních předpisů ČR. Závěrem provedeného měření je konstatování, že stávající kvalita vnitřního vzduchu v budově školy je nevyhovující. Během vyučování byly překročeny limity koncentrací oxidu uhličitého i těkavých organických látek, kdy se jejich účinky projevují především únavou a nesoustředěním žáků během vyučování. Nárazově lze podstatně snížit jejich koncentrace větráním pomocí otevřených oken a dveří na chodbu během přestávek. Toto větrání nemá podstatný vliv na pokles teploty vnitřního vzduchu, kdy jeho teplota klesá rychlostí  $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  při rozdílu venkovní a vnitřní teploty vzduchu  $20^{\circ}\text{C}$ . Především u koncentrace oxidu uhličitého bylo zjištěno, že je tato vysoká i v době, kdy je

budova školy uzavřena. Větrání budovy je tedy nedostatečné a je nutno ji řádně větrat, či zajistit výměnu vzduchu jiným způsobem, a to i mimo vyučovací hodiny.

Dále bylo zjištěno, že v budově školy se udržuje zbytečně vysoká teplota (22 °C) i přes skutečnost, že teplota cirkulační vody je řízena ekvitermní regulací. Pro ověření funkčnosti ekvitermní regulace byla objednána školou odborná firma, toto proběhne během měsíce května, jelikož při provedení ověření je nutné odstavit topení, což nebylo na začátku jara možné. Tuto teplotu lze, bez rizika překročení hygienických limitů (20-26 °C), snížit o 2 °C, což přinese snížení spotřeby zemního plynu o 12 % ročně (276 000,- Kč). Návratnost vytvořeného zařízení jsou tedy čtyři dny.

Pomocí metod analýzy a syntézy naměřených dat byly popsány vztahy jednotlivých veličin, tyto byly použity pro stanovení doby větrání tak, aby byla zajištěna dostatečná výměna vzduchu a předešlo se tak překročení limitů. Jako vhodné se jeví použití IAQ indexu, který zahrnuje ve svém výpočtu sledované veličiny a je možné jej jednoduchým způsobem vizualizovat, například lze využít webového rozhraní realizovaného měřicího zařízení EAC.

V závěru praktické části jsou stanovena krátkodobá i dlouhodobá nápravná opatření s cílem zlepšení kvality vnitřního vzduchu v budově školy. Realizovaným měřicím zařízením se dále provádí měření v jednotlivých prostorách školy a po vyhodnocení dat se stanovují příslušná nápravná opatření.

Na základě výsledků měření kvality vnitřního vzduchu v budově ZŠ a MŠ Zastupitelstvo městyse Velký Újezd (zřizovatel) na svém řádném zasedání dne 14. 3. 2023 schválilo instalaci fotovoltaické elektrárny o jmenovitém výkonu 100 kW na střeše budovy školy. Tato bude následně napájet navrhovanou rekuperaci a s ní spojenou vzduchotechniku, která zajišťí kvalitní vnitřní vzduch v celé budově školy. (VÝPIS USNESENÍ ze zápisu 3. zasedání Zastupitelstva městyse Velký Újezd, 2023)

Cíl práce považuji za splněný.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

AKHTAR, Rais a Cosimo PALAGIANO, ed., 2018. *Climate Change and Air Pollution: The Impact on Human Health in Developed and Developing Countries*. Cham (Switzerland): Springer International Publishing. ISBN 978-3-319-61346-8.

BAAN, Robert A., Bernard W. STEWART a Kurt STRAIF, ed., 2019. *Tumour Site Concordance and Mechanisms of Carcinogenesis* [online]. Lyon: International Agency for Research on Cancer, 317 s. [cit. 2023-03-21]. ISBN 978-92-832-2215-6. Dostupné z: <https://publications.iarc.fr/>

BEJČKOVÁ, Pavla, 2018. *Zákon o ochraně ovzduší: komentář*. Praha: Wolters Kluwer. Komentáře (Wolters Kluwer ČR). ISBN 978-80-7552-911-4.

BOGUSKI, Terrie K., 2006. *Understanding Units of Measurement*. 2nd issue. Manhattan. Dostupné také z: <https://teasing.com/media/library/tools/understanding-units-of-measurement.pdf>

BHIMARAJU, Hari et al., 2021. Understanding “Atmosome”, the Personal Atmospheric Exposome: Comprehensive Approach. *JMIR Biomedical Engineering* [online]. 6(4) [cit. 2023-04-12]. ISSN 2561-3278. Dostupné z: doi:10.2196/28920

DAVIES, Michael S., c2020. *3 Metrics to Guide Air Quality Health & Safety* [online]. Green Econometrics [cit. 2023-03-28]. Dostupné z: <https://greenecon.net/3-metrics-to-guide-air-quality-health-safety/carbon-footprint.html>

GEHLE, Kim, 2011. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs). *Agency for Toxic Substances and Disease Registry* [online]. Atlanta: Agency for Toxic Substances and Disease Registry [cit. 2023-03-23]. Dostupné z: <https://www.atsdr.cdc.gov/csem/polycyclic-aromatic-hydrocarbons/cover-page.html>

KONEČNÝ, Petr, 2021. *Školní řád – Základní škola a Mateřská škola Velký Újezd okres Olomouc, příspěvková organizace*. Velký Újezd. Dostupné také z: [http://www.skolavelkyujezd.cz/wp-content/uploads/2022/06/skolni\\_rad\\_2021-2022.pdf](http://www.skolavelkyujezd.cz/wp-content/uploads/2022/06/skolni_rad_2021-2022.pdf)

NOVÁK, Ivan, 1997. *Atomový zákon s komentářem*. Praha: Codex Bohemia. ISBN 80-85963-28-0.

PETRLÍK, Jindřich a Petr VÁLEK, 2022. Benzen. *Arnika* [online]. Praha: Arnika [cit. 2023-03-22]. Dostupné z: <https://arnika.org/toxicke-latky/databaze-latek/benzen>

PLUSCHKE, Peter a Hans SCHLEIBINGER, ed., 2018. *Indoor Air Pollution*. Second Edition. Berlin (Germany): Springer-Verlag GmbH Germany. ISBN 978-3-662-56065-5.

RIGGS, Julie, c2015. *IAQ Rating Index*. Dostupné také z: [https://github.com/Limych/ha-iaq/blob/dev/IAQ\\_Rating\\_Index.pdf](https://github.com/Limych/ha-iaq/blob/dev/IAQ_Rating_Index.pdf)

SKÁCEL, František a Viktor TEKÁČ, 2019. *Analýza ovzduší*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze. ISBN 978-80-7592-038-6.

VOJÁČEK, Antonín, 2019. Kvalita vzduchu v uzavřených místnostech. *HW SERVER* [online]. Praha: HW server [cit. 2023-03-21]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/kvalita-vzduchu-v-uzavrenych-mistnostech-1-co-sledovat-a-merit.html>

Air pollutants measured in AQI, c2022. *IQAir* [online]. La Mirada: IQAir [cit. 2023-03-28]. Dostupné z: <https://www.iqair.com/newsroom/what-is-aqi>

Analyzátor pro měření VOC SI-AQ VOC Monitor, c2021. *MERATEX* [online]. Košice: MERATEX [cit. 2023-04-04]. Dostupné z: <https://www.meratex.cz/analyzator-pro-mereni-voc-aq-voc-monitor/>

Bosch Sensortec Environmental Cluster (BSEC), c2022. *Bosch Sensortec* [online]. Reutlingen: Bosch Sensortec [cit. 2023-03-29]. Dostupné z: <https://www.bosch-sensortec.com/software-tools/software/bsec/>

Cykly koncentrací CO<sub>2</sub> a O<sub>2</sub> v atmosféře, c2023. *Fakta o klimatu* [online]. Brno: Otevřená data o klimatu, z. ú. [cit. 2023-04-12]. Dostupné z: <https://faktaoklimatu.cz/infografiky/cykly-koncentrace-co2>

ČSN ISO 15226 (013020): *Technická dokumentace – Model životního cyklu a přiřazení dokumentů*, 2003. Praha: Český normalizační institut.

*Design-in Guide SCD4x CO2 Sensor*, 2021. Stäfa. Dostupné také z: [https://sensirion.com/media/documents/0D0C9129/623B1183/Sensirion\\_CO2\\_Sensors\\_SCD4x\\_design-in\\_guide.pdf](https://sensirion.com/media/documents/0D0C9129/623B1183/Sensirion_CO2_Sensors_SCD4x_design-in_guide.pdf)

DS3231: Extremely Accurate I<sup>2</sup>C-Integrated RTC/TCXO/Crystal, c2015. *Analog Devices* [online]. Wilmington: Analog Devices [cit. 2023-03-27]. Dostupné z: <https://www.analog.com/en/products/ds3231.html>

ESP8266 – WeMos D1 mini – Pin-out, c2023. In: *Edi's Techlab* [online]. [cit. 2023-03-27]. Dostupné z: <https://edistechlab.com/esp8266-wemos-d1-mini-pin-out>

European Air Quality Index Calculation, c2021. *Copernicus Atmosphere Monitoring Service* [online]. Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS) [cit. 2023-03-28]. Dostupné z: <https://ecmwf-projects.github.io/copernicus-training-cams/proc-aq-index.html>

Gas sensor BME680, c2022. *Bosch Sensortec* [online]. Reutlingen: Bosch Sensortec [cit. 2023-03-27]. Dostupné z: <https://www.bosch-sensortec.com/products/environmental-sensors/gas-sensors/bme680/>

Health Effects of Ozone Pollution, c2022. *U.S. Environmental Protection Agency* [online]. Washington: U.S. Environmental Protection Agency [cit. 2023-03-26]. Dostupné z: <https://www.epa.gov/ground-level-ozone-pollution/health-effects-ozone-pollution>

*Indoor Air Facts No. 4: Sick Building Syndrome*, 1991. Washington, 4 s. Dostupné také z: [https://www.epa.gov/sites/default/files/2014-08/documents/sick\\_building\\_factsheet.pdf](https://www.epa.gov/sites/default/files/2014-08/documents/sick_building_factsheet.pdf)

Inhalable Particulate Matter and Health (PM2.5 and PM10), b.r. *The California Air Resources Board* [online]. Sacramento: The California Air Resources Board [cit. 2023-03-24]. Dostupné z: <https://ww2.arb.ca.gov/resources/inhalable-particulate-matter-and-health>

LOLIN D1 mini, c2021. *WEMOS* [online]. WEMOS [cit. 2023-03-27]. Dostupné z: [https://www.wemos.cc/en/latest/d1/d1\\_mini.html](https://www.wemos.cc/en/latest/d1/d1_mini.html)

*Mechanical Design and Assembly Guidelines for SPS30*, 2019. Stäfa. Dostupné také z: [https://sensirion.com/media/documents/7990F04A/616544B0/Sensirion\\_Part particulate\\_Matter\\_AppNotes\\_SPS30\\_Mechanical\\_Design\\_and\\_As.pdf](https://sensirion.com/media/documents/7990F04A/616544B0/Sensirion_Part particulate_Matter_AppNotes_SPS30_Mechanical_Design_and_As.pdf)

Měření radonu v interiéru, c2012-2023. *Radonline.cz* [online]. Radomyšl: Radonline.cz [cit. 2023-04-16]. Dostupné z: <http://www.radonline.cz/mereni-radonu-v-interieru>

*Nariadení vlády č. 361/2007 Sb.: Nariadení vlády, kterým se stanoví podmínky ochrany zdraví při práci*, 2007. In: Praha: Česká republika, ročník 2007, 111/2007, číslo 111. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2007-361>

*National Center for Biotechnology Information* [online], c2023. Washington: National Library of Medicine [cit. 2023-03-23]. Dostupné z: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/>

New WHO air quality guidelines will save lives, c2022. *IQAir* [online]. La Mirada: IQAir [cit. 2023-03-24]. Dostupné z: <https://www.iqair.com/newsroom/2021-WHO-air-quality-guidelines>

*Outdoor Air Pollution: IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans Volume 109*, c2015. Lyon: International Agency for Research on Cancer. ISBN 978-92-832-0147-2. ISSN 1017-1606. Dostupné také z: <https://publications.iarc.fr/538>

*Q&As on outdoor air pollution and cancer*, c2013. Lyon: International Agency for Research on Cancer. ISBN 978-92-832-0147-2. ISSN 1017-1606. Dostupné také z: [https://www.iarc.who.int/wp-content/uploads/2018/07/pr221\\_QA.pdf](https://www.iarc.who.int/wp-content/uploads/2018/07/pr221_QA.pdf)

*Referenční koncentrace vydané SZÚ Praha: podle § 27 odst. 6 písm. b) zákona č. 201/2012 Sb., o ochraně ovzduší*, 2003. Praha. Dostupné také z: [https://www.khsbrno.cz/dokumenty/hok/referencni\\_koncentrace\\_szu.pdf](https://www.khsbrno.cz/dokumenty/hok/referencni_koncentrace_szu.pdf)

SENSIRION AG, c2021. *Indoor Air Quality: The beginning of a new era*. Stäfa, 36 s. Dostupné také z: [https://www.sensirion.com/media/documents/87EDEFB9/62601F86/Sensirion\\_Indoor-Air-Quality\\_Brochure.pdf](https://www.sensirion.com/media/documents/87EDEFB9/62601F86/Sensirion_Indoor-Air-Quality_Brochure.pdf)

SCD41: CO<sub>2</sub> accuracy of  $\pm 40$  ppm + 5% MV @400-5000 ppm, low power, [2022]. *Sensirion* [online]. Stäfa: Sensirion [cit. 2023-03-27]. Dostupné z: <https://sensirion.com/products/catalog/SCD41/>

SPS30: PM<sub>2.5</sub> Sensor for HVAC and air quality applications SPS30, [2022]. *Sensirion* [online]. Stäfa: Sensirion [cit. 2023-03-27]. Dostupné z: <https://sensirion.com/products/catalog/SPS30>

*SQLite* [online], 2023. SQLite Consortium [cit. 2023-04-04]. Dostupné z: <https://sqlite.org/index.html>

Tetrachloroethylene, 2015. *Agency for Toxic Substances and Disease Registry* [online]. Atlanta: Agency for Toxic Substances and Disease Registry [cit. 2023-03-23]. Dostupné z: [https://www.atsdr.cdc.gov/sites/toxzine/tetrachloroethylene\\_toxzine.html](https://www.atsdr.cdc.gov/sites/toxzine/tetrachloroethylene_toxzine.html)

The Basic Radon (222 Rn) Decay Chain, c2008-2023. In: *ResearchGate* [online]. Berlin: ResearchGate [cit. 2023-03-23]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/figure/The-Basic-Radon-222-Rn-Decay-Chain-The-isotopes-and-their-atomic-masses-are-shown\\_fig1\\_51026112](https://www.researchgate.net/figure/The-Basic-Radon-222-Rn-Decay-Chain-The-isotopes-and-their-atomic-masses-are-shown_fig1_51026112)



TP4056, b.r. Dostupné také z: <https://www.ame.cz/TP4056-TP4056ES-LN4056-H-a261147.pdf>

*Trichloroethylene, Tetrachloroethylene, and Some Other Chlorinated Agents: IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans Volume 106* [online], 2014. Lyon: World Health Organization, 525 s. [cit. 2023-03-23]. ISBN 978-92-832-0172-8. Dostupné z: <https://publications.iarc.fr/Book-And-Report-Series/Iarc-Monographs-On-The-Identification-Of-Carcinogenic-Hazards-To-Humans/Trichloroethylene-Tetrachloroethylene-And-Some-Other-Chlorinated-Agents-2014>

*Understanding “Atmosome”, the Personal Atmospheric Exposome: Comprehensive Approach* [online]. [cit. 2023-04-12]. Dostupné z: [doi:10.2196/28920](https://doi.org/10.2196/28920)

*Větráme školy z.s.* [online], c2023. Chotěšov: Větráme Školy [cit. 2023-04-04]. Dostupné z: <https://www.vetrameskoly.cz/>

VINDRIKTNING: Senzor kvality vzduchu, c1999-2023. *IKEA* [online]. Delft: Inter IKEA Systems B.V. [cit. 2023-04-03]. Dostupné z: <https://www.ikea.com/cz/cs/p/vindriktning-senzor-kvality-vzduchu-80515910/>

Vliv koncentrace CO<sub>2</sub> na zdraví člověka, c2017. *Enectiva* [online]. Praha: Enerfis [cit. 2023-03-25]. Dostupné z: <https://www.enectiva.cz/cs/blog/2017/04/co2-vnitri-prostory/>

*Vyhláška č. 20/2012 Sb.: Vyhláška, kterou se mění vyhláška č. 268/2009 Sb., o technických požadavcích na stavby*, 2012. In: Praha: Česká republika, ročník 2012, číslo 20.

*Vyhláška č. 268/2009 Sb.: Vyhláška o technických požadavcích na stavby*, 2009. In: Praha: Česká republika, ročník 2009, číslo 268.

*Vyhláška č. 343/2009 Sb.: Vyhláška, kterou se mění vyhláška č. 410/2005 Sb., o hygienických požadavcích na prostory a provoz zařízení a provozoven pro výchovu a vzdělávání dětí a mladistvých*, 2009. In: Praha: Česká republika, ročník 2009, číslo 343.

*Vyhláška č. 410/2005 Sb.: Vyhláška o hygienických požadavcích na prostory a provoz zařízení a provozoven pro výchovu a vzdělávání dětí a mladistvých*, 2005. In: Praha: Česká republika, ročník 2005, číslo 410. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2005-410>

*Vyhláška č. 6/2003 Sb.: Vyhláška, kterou se stanoví hygienické limity chemických, fyzikálních a biologických ukazatelů pro vnitřní prostředí obytných místností některých*

*staveb*, 2003. In: Praha: Česká republika, ročník 2003, 4/2003, číslo 4. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2003-6>

*VÝPIS USNESENÍ ze zápisu 3. zasedání Zastupitelstva městyse Velký Újezd*, 2023. Velký Újezd. Dostupné také z: [https://www.velkyujezd.cz/tiken/upload/files/dokumenty/uredni\\_deska/2023/vypis.pdf](https://www.velkyujezd.cz/tiken/upload/files/dokumenty/uredni_deska/2023/vypis.pdf)

Výpočet energie vyzařované lidským tělem, 2006. *LowLevel* [online]. LowLevel [cit. 2023-04-08]. Dostupné z: <https://www.lowlevel.cz/log/cats/czech/V%C3%BDpo%C4%8Det%20energie%20vyza%C5%99ovan%C3%A9%20lidsk%C3%BDm%20t%C4%9Blem.html>

What is air quality and how the terms VOC and TVOC relate to it, c2016. *PROTRONIX* [online]. Chrudim: PROTRONIX [cit. 2023-03-26]. Dostupné z: <https://www.careforair.eu/en/what-is-air-quality-and-how-the-terms-voc-and-tvoc-relate-to-it/>

What is NOx?, c2022. *NOx Fund* [online]. Oslo: NOx Fund [cit. 2023-03-23]. Dostupné z: <https://www.noxfondet.no/en/articles/what-is-nox/>

What's the difference between PM2.5, and PM1?, c2019. *IQAir* [online]. La Mirada: IQAir [cit. 2023-03-24]. Dostupné z: <https://www.airthings.com/resources/pm-size-difference>

*WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide: Global update 2005. Summary of risk assessment.*, c2005. Geneve. Dostupné také z: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/69477>

*WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants*, c2010. Copenhagen: World Health Organization Regional Office for Europe, 484 s. ISBN 978-92-890-0213-4. Dostupné také z: <https://www.who.int/publications/i/item/9789289002134>

*World Cancer Report 2003* [online], c2003. Lyon: International Agency for Research on Cancer [cit. 2023-04-17]. ISBN 978-92-832-0411-4. Dostupné z: <https://publications.iarc.fr/Non-Series-Publications/World-Cancer-Reports/World-Cancer-Report-2003>

*Zákon č. 201/2012 Sb.: Zákon o ochraně ovzduší*, 2012. In: Praha: Česká republika, ročník 2012, 69/2012, číslo 69.

*Zákon č. 258/2000 Sb.: Zákon o ochraně veřejného zdraví a o změně některých souvisejících zákonů*, 2000. In: Praha: Česká republika, ročník 2000, číslo 258. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2000-258>

5 GREAT TIPS TO IMPROVE INDOOR AIR QUALITY, c2021. *Kanomax USA* [online]. Andover: Kanomax USA [cit. 2023-03-28]. Dostupné z: <https://kanomax-usa.com/5-great-tips-to-improve-indoor-air-quality/>

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

HVAC	Systemy topení, ventilace a klimatizace
IARC	Mezinárodní agentura pro výzkum rakoviny
I <sup>2</sup> C	Sériová datová sběrnice
I/O	Vstupně/výstupní
NCBI	Národní centrum pro biotechnologické informace
NPK	Nejvyšší přípustná koncentrace
PAH	Polycyklické aromatické uhlovodíky
PEL	Přípustný expoziční limit
PM	Tuhé částice
PMOSFET	Unipolární tranzistor
PWM	Pulzně šířková modulace
SPI	Sériová datová sběrnice
TVOC	Celkové množství těkavých organických látek
UFP	Ultra jemné částice
VOC	Těkavá organická látka
WHO	Světová zdravotnická organizace

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

Obrázek 1 Rozpadová řada radonu. Zdroj ResearchGate.....	21
Obrázek 2 Porovnání velikosti částic PM. Zdroj IQAir .....	36
Obrázek 3 Global Air Quality Guidelines. Zdroj WHO .....	36
Obrázek 4 European Air Quality Index s vyhodnocením. Zdroj CAMS.....	41
Obrázek 5 Air Quality Index s vyhodnocením. Zdroj IQAir.....	41
Obrázek 6 IAQUK hodnocení IAQ indexu (výřez). Zdroj IAQUK.org.uk.....	42
Obrázek 7 Vyhodnocení IAQ indexu. Zdroj Green Econometrics.....	42
Obrázek 8 Snímek obrazovky programu Tinkercad. Zdroj autor .....	51
Obrázek 9 Schéma zapojení měřící jednotky (bez napájení). Zdroj autor.....	55
Obrázek 10 Prototyp zařízení EAC. Zdroj autor .....	56
Obrázek 11 Naměřené hodnoty před kalibrací teploty vzduchu. Zdroj autor .....	57
Obrázek 12 Porovnání naměřených hodnot teplot vzduchu po kalibraci. Zdroj autor .....	57
Obrázek 13 Porovnání naměřených hodnot relativní teploty vzduchu po kalibraci. Zdroj autor .....	58
Obrázek 14 Porovnání naměřených hodnot koncentrace TVOC po kalibraci. Zdroj autor .....	58
Obrázek 15 Vzhled webového rozhraní na různých zařízeních. Zdroj autor .....	61
Obrázek 16 Snímek obrazovky s otevřeným manuálem programu. Zdroj autor.....	66
Obrázek 17 Okno ovládacího programu – program. Zdroj autor .....	67
Obrázek 18 Okno ovládacího programu – náhled měření. Zdroj autor .....	68
Obrázek 19 Okno ovládacího programu – data. Zdroj autor .....	69
Obrázek 20 Okno ovládacího programu – nastavení. Zdroj autor.....	70
Obrázek 21 Provozní stavy měřící jednotky. Zdroj autor.....	71
Obrázek 22 Chybové stavy měřící jednotky. Zdroj autor.....	71
Obrázek 23 Budova ZŠ a MŠ Velký Újezd. Zdroj autor.....	73
Obrázek 24 Interiér monitorované třídy. Zdroj autor .....	75
Obrázek 25 Graf naměřených dat – teplota vzduchu. Zdroj autor.....	76
Obrázek 26 Graf průběhu teploty během vyučování. Zdroj autor .....	78
Obrázek 27 Grafické porovnání venkovní a vnitřní teploty ve třídě. Zdroj autor .....	78
Obrázek 28 Graf naměřených dat – relativní vlhkost vzduchu. Zdroj autor .....	79
Obrázek 29 Relativní vlhkost vnitřního vzduchu během vyučování. Zdroj autor.....	80
Obrázek 30 Graf naměřených dat – relativní vlhkost vzduchu (20.-22. 3. 2023). Zdroj autor .....	81
Obrázek 31 Teplota vzduchu a koncentrace CO <sub>2</sub> během vyučování 15. 3. 2023. Zdroj autor .....	82
Obrázek 32 Koncentrace CO <sub>2</sub> během vyučování. Zdroj autor .....	83

Obrázek 33 Teplota vnějšího a vnitřního vzduchu během vyučování 15. 3. 2023.....	83
Obrázek 34 Relativní vlhkost vnitřního a venkovního vzduchu 15. 3. 2023. Zdroj autor ..	84
Obrázek 35 Relativní vlhkost vnitřního vzduchu a koncentrace CO <sub>2</sub> během vyučování. Zdroj autor .....	84
Obrázek 36 Koncentrace CO <sub>2</sub> v budově školy mimo vyučování. Zdroj autor .....	85
Obrázek 37 Koncentrace TVOC ve třídě. Zdroj autor.....	86
Obrázek 38 Koncentrace TVOC během vyučování. Zdroj autor .....	87
Obrázek 39 Imise PM <sub>10</sub> ve třídě. Zdroj autor .....	87
Obrázek 40 Imise PM <sub>2,5</sub> ve třídě. Zdroj autor .....	88
Obrázek 41 Imise PM <sub>10</sub> ve třídě během vyučování. Zdroj autor.....	90
Obrázek 42 Imise PM <sub>2,5</sub> ve třídě během vyučování. Zdroj autor.....	90
Obrázek 43 Úroveň IAQ indexu ve třídě. Zdroj autor.....	92
Obrázek 44 Úroveň IAQ indexu ve třídě během vyučování. Zdroj autor .....	93
Obrázek 45 Závislost IAQ indexu na jednotlivých veličinách pro den 15. 3. 2023. Zdroj autor .....	93
Obrázek 46 Koncentrace TVOC na začátku a konci 1.-3. přestávky. Zdroj autor .....	96
Obrázek 47 Snímek obrazovky webového rozhraní měřící jednotky se zobrazením času větrání. Zdroj autor .....	97

**SEZNAM TABULEK**

Tabulka 1 Základní charakteristiky NO. Zdroj NCBI. (vlastní zpracování) .....	13
Tabulka 2 Základní charakteristiky NO <sub>2</sub> . Zdroj NCBI. (vlastní zpracování).....	14
Tabulka 3 Základní charakteristiky CO. Zdroj NCBI. (vlastní zpracování) .....	15
Tabulka 4 Základní charakteristiky CO <sub>2</sub> . Zdroj NCBI. (vlastní zpracování) .....	17
Tabulka 5 Koncentrace CO <sub>2</sub> ve vzduchu a potenciální zdravotní problémy. Zdroj Enectiva. (vlastní zpracování).....	17
Tabulka 6 Množství přiváděného čerstvého vzduchu ve školních zařízeních. Zdroj Vyhláška č. 343/2009 Sb. (vlastní zpracování) .....	18
Tabulka 7 Základní charakteristiky SO <sub>2</sub> . Zdroj NCBI. (vlastní zpracování).....	19
Tabulka 8 Základní charakteristiky ozonu. Zdroj NCBI. (vlastní zpracování) .....	20
Tabulka 9 Základní charakteristiky B[a]P. Zdroj NCBI. (vlastní zpracování) .....	23
Tabulka 10 Základní charakteristiky benzenu. Zdroj NCBI. (vlastní zpracování).....	26
Tabulka 11 Koncentrace VOC a hodnocení kvality vzduchu. Zdroj automatizace.hw.cz ..	27
Tabulka 12 Základní charakteristiky formaldehydu. Zdroj NCBI. (vlastní zpracování)....	28
Tabulka 13 Základní charakteristiky naftalenu. Zdroj NCBI. (vlastní zpracování) .....	29
Tabulka 14 Základní charakteristiky PCE. Zdroj NCBI. (vlastní zpracování).....	30
Tabulka 15 Základní charakteristiky TCE. Zdroj NCBI. (vlastní zpracování) .....	32
Tabulka 16 Roční imisní limity pro PM <sub>10</sub> – znečišťující látky. Zdroj Zákon č. 201/2012 (vlastní zpracování).....	33
Tabulka 17 Typy senzorů pro vybrané plyny. Zdroj NCBI. (vlastní zpracování).....	39
Tabulka 18 Interpretace TVOC. Zdroj Vojáček. (vlastní zpracování) .....	43
Tabulka 19 Účinky vybraných polutantů na lidské zdraví. Zdroj autor .....	45
Tabulka 20 Přehled limitů dle právních předpisů ČR a doporučení WHO. (vlastní zpracování).....	46
Tabulka 21 Rozpočet konstrukce zařízení. Zdroj autor .....	49
Tabulka 22 Typ, rozsah a přesnost veličin měřených měřicí jednotkou. Zdroj autor .....	50
Tabulka 23 Komponenty použité pro konstrukci měřicí jednotky. Zdroj autor .....	51
Tabulka 24 Základní parametry WeMos D1 mini. Zdroj wemos.cc (vlastní zpracování) ..	52
Tabulka 25 Základní parametry BME680. Zdroj Bosch Sensortec (vlastní zpracování) ....	52
Tabulka 26 Základní parametry SCD41. Zdroj Sensirion (vlastní zpracování) .....	53
Tabulka 27 Základní parametry SPS30. Zdroj Sensirion (vlastní zpracování) .....	53
Tabulka 28 Základní parametry DS3231. Zdroj Analog Devices (vlastní zpracování) .....	54
Tabulka 29 Základní parametry TP4056. Zdroj TPOWER (vlastní zpracování).....	54
Tabulka 30 Kalkulace konstrukce zařízení. Zdroj autor .....	59
Tabulka 31 Formát pojmenování souboru CSV. Zdroj autor .....	60

Tabulka 32	Struktura datového souboru CSV. Zdroj autor .....	60
Tabulka 33	Příkazy pro základní HTTP komunikaci se zařízením. Zdroj autor .....	62
Tabulka 34	Struktura souboru JSON – aktuálně naměřené hodnoty. Zdroj autor.....	62
Tabulka 35	Formát objektu záznamu veličiny. Zdroj autor.....	63
Tabulka 36	Struktura souboru JSON – systémové informace. Zdroj autor.....	64
Tabulka 37	Požadavky pro běh ovládacího programu. Zdroj autor.....	65
Tabulka 38	Struktura programového souboru EAC. Zdroj autor .....	67
Tabulka 39	Spotřeba měřící jednotky dle provozního režimu. Zdroj autor.....	72
Tabulka 40	Základní údaje o ZŠ a MŠ VÚ. Zdroj: ZŠ a MŠ VÚ (vlastní zpracování).....	74
Tabulka 41	Časový rozvrh provozu školy. Zdroj: ZŠ a MŠ VÚ (vlastní zpracování) .....	74
Tabulka 42	Hodnocení minimální teploty vnitřního vzduchu. Zdroj autor .....	76
Tabulka 43	Hodnocení maximální teploty vnitřního vzduchu. Zdroj autor .....	77
Tabulka 44	Hodnocení minimální relativní vlhkosti vnitřního vzduchu. Zdroj autor .....	79
Tabulka 45	Hodnocení maximální relativní vlhkosti vnitřního vzduchu. Zdroj autor .....	80
Tabulka 46	Hodnocení koncentrace CO <sub>2</sub> ve třídě. Zdroj autor .....	82
Tabulka 47	Hodnocení koncentrace TVOC ve třídě. Zdroj autor .....	85
Tabulka 48	Hodnocení imisí PM <sub>10</sub> ve třídě. Zdroj autor.....	88
Tabulka 49	Hodnocení imisí PM <sub>2,5</sub> ve třídě. Zdroj autor.....	89
Tabulka 50	Vyhodnocení IAQ indexu a zdravotní rizika. Zdroj Green Econometrics (vlastní zpracování).....	91
Tabulka 51	Hodnocení IAQ indexu ve třídě. Zdroj autor.....	92
Tabulka 52	Hodnocení kvality vnitřního vzduchu ve třídě. Zdroj autor .....	94



## SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: DFMEA ZAŘÍZENÍ

Příloha P II: VÝVOJOVÝ DIAGRAM FW MĚŘÍCÍHO ZAŘÍZENÍ

# PŘÍLOHA P I: DFMEA ZAŘÍZENÍ

Prvek	Možné selhání	Možné následky	Význam	Možné příčiny	Výskyt	Stávající opatření	Odhalit	RPN	Provedená opatření	Význam	Výskyt	Odhalit	RPN
Pouzdro měřicí jednotky	Použitý materiál uvolňuje VOC	Zkreslení měření VOC	10	Špatně zvolený materiál	5	Nejsou	10	500	Zvolen PETG materiál	3	1	3	9
	DPS se nevejdou do pouzdra	Nutný nový design	7	Špatný návrh	3	Nejsou	3	63	Prototyp zapojení před finálním	3	1	1	3
	Nedostatečné proudění vzduchu	Nesprávná data	10	Nedostatek ventilačních otvorů	5	Ventilační otvory dle odhadu	3	150	Aplikace doporučení výrobce	3	1	1	3
Senzor T, RH, P a VOC	Ohřev čidla během provozu	Nesprávná data	5	Špatné umístění	5	Umístění dle odhadu	10	250	Snížení vzorkování na 60 sekund	5	1	1	5
	Nedostatečné proudění vzduchu	Nesprávná data	10	Nedostatek ventilačních otvorů	5	Ventilační otvory dle odhadu	3	150	Aplikace doporučení výrobce	3	1	3	9
	Nizká přesnost	Nerelevantní data	7	Špatně zvolený senzor	7	Nejsou	10	490	Výběr senzoru dle datasheetu	1	1	1	1
Senzor CO <sub>2</sub>	Nedostatečné proudění vzduchu	Nesprávná data	10	Nedostatek ventilačních otvorů	5	Ventilační otvory dle odhadu	10	500	Aplikace doporučení výrobce	3	1	3	9
	Nizká přesnost	Nerelevantní data	7	Špatně zvolený senzor	7	Nejsou	10	490	Výběr senzoru dle datasheetu	1	1	1	1
Senzor PM	Nedostatečné proudění vzduchu	Nesprávná data	10	Nedostatek ventilačních otvorů	5	Ventilační otvory dle odhadu	3	150	Aplikace doporučení výrobce	3	1	3	9
	Nizká přesnost	Nerelevantní data	7	Špatně zvolený senzor	7	Nejsou	10	490	Výběr senzoru dle datasheetu	1	1	1	1
Akumulátor	Nedostatečná kapacita	Krátká doba měření	10	Nevhodný typ	5	Nejsou	10	500	Akumulátor o velké kapacitě	3	1	1	3
	Ohřev během nabíjení	Nesprávná data	10	Velký nabíjecí proud	5	Nejsou	10	500	Omezení nabíjecího proudu	3	1	1	3
Mikroprocesor	Nedostatečný výkon	Nefunkčnost zařízení	7	Chybně zvolený MCU	3	Nejsou	1	21	Výběr správného MCU	1	1	1	1
	Chybějící WiFi	Nelze se připojit k zařízení	7	Chybně zvolený MCU	7	Nejsou	1	49	Výběr správného MCU	1	1	1	1
Hodiny reálného času	Nizká přesnost	Časový drift	7	Není tepelná kompenzace	10	Nejsou	10	700	Výběr obvodu dle datasheetu	1	1	1	1
	Není zálohovaný	Nutnost nastavovat pro každé měření	10	Nepodporuje zálohovací baterii	5	Nejsou	1	50	Výběr obvodu dle datasheetu	3	1	1	3
Program	Nelze spustit	Nelze ovládat měřicí jednotku	10	Nekompatibilní HW	3	Multiplatformní SW	1	30	Multiplatformní programovací jazyk	1	1	1	1
	Nelze připojit k měřicí jednotce	Nelze ovládat měřicí jednotku	10	Nepřipojený AP	3	Informace uživateli programem	1	30	Informace uživateli programem	5	1	1	5

## PŘÍLOHA P II: VÝVOJOVÝ DIAGRAM FW MĚŘÍCIHO ZAŘÍZENÍ

