

IGNIS BRUNENSIS 2018

měření kvality ovzduší během přehlídky ohňostrojů v Brně

ODBORNÁ ZPRÁVA



Mgr. Jáchym Brzezina, Mgr. Šárka Antošová



ČESKÝ HYDROMETEOROLOGICKÝ ÚSTAV
ODDĚLENÍ KVALITY OVZDUŠÍ, POBOČKA BRNO



IGNIS BRUNENSIS 2018

měření kvality ovzduší během přehlídky ohňostrojů v Brně

ODBORNÁ ZPRÁVA

ZHOTOVITEL

ČESKÝ HYDROMETEOROLOGICKÝ ÚSTAV

zastoupen Mgr. Markem Riederem, ředitelem ČHMÚ

Na Šabatce 17, 143 06 Praha 4

IČ: 00020699

DIČ: CZ00020699, není plátce DPH

POBOČKA BRNO

Kroftova 43, 616 67 Brno

ve věcech smluvních je oprávněn jednat:

Ing. Petr Janál, Ph.D., ředitel pobočky Brno

ve věcech technických je oprávněn jednat:

Mgr. Jáchym Brzezina, vedoucí oddělení kvality ovzduší

tel: 737 387 741, email: jachym.brzezina@chmi.cz

OBJEDNATEL

STATUTÁRNÍ MĚSTO BRNO

zastoupen Ing. Martinem Vaněčkem, vedoucím odboru životního prostředí

Dominikánského náměstí 1, 601 67 Brno

IČ: 44992785

DIČ: CZ44992785

kontaktní osoba: Bc. Radek Kronovet

ZPRACOVATELÉ

Mgr. Jáchym Brzezina

Mgr. Šárka Antošová

DATUM PŘEDÁNÍ

10. 9. 2018

POČET STRAN

159



OBSAH

1. ÚVOD	1
2. METODIKA.....	2
2.1 LOKALITA MĚŘENÍ	2
2.2 MĚŘÍCÍ TECHNIKA.....	4
2.3 MĚŘENÉ CHARAKTERISTIKY	4
2.3.1 Leckel SEQ 47/50 PM _{2,5}	4
2.3.2 Leckel MVS6 + PM ₁₀	4
2.3.3 Měřicí vůz	5
2.4 PLÁN MĚŘENÍ.....	5
2.5 DOSTUPNOST DAT	6
2.6 POUŽITÝ SOFTWARE/TECHNOLOGIE	7
3. METEOROLOGICKÉ PODMÍNKY.....	8
3.1 TEPLOTA VZDUCHU.....	9
3.2 RELATIVNÍ VLHKOST VZDUCHU	11
3.3 RYCHLOST VĚTRU	13
3.4 SMĚR VĚTRU	15
3.5 SRÁŽKY	17
3.6 CELKOVÝ RÁZ POČASÍ	20
4. PYROTECHNICKÉ SLOŽE A CHEMIE OHŇOSTROJŮ.....	21
4.1 ZÁKLADNÍ INFORMACE	21
4.2 OKYSLIČOVADLA	21
4.3 HOŘLAVINY (PALIVA)	22
4.4 POJIDLA	23
4.5 ZMĚKČOVADLA	24
4.6 STABILIZÁTORY	24
4.7 KATALYZÁTORY	24
4.8 PROTISPĚKAVÉ (ANTISPĚKAVÉ) LÁTKY	24
4.9 FLEGMATIZÁTORY	25
4.10 LÁTKY BARVÍCÍ PLAMEN	25
4.10.1 Základní rozdělení.....	25
4.10.2 Prvky používané pro zbarvení plamene	25
4.10.3 Barevný dým.....	27
5. KVALITA OVZDUŠÍ – PLYNY	29
5.1 OXID DUSIČITÝ (NO ₂)	30
5.2 OXID DUSNATÝ (NO).....	34
5.3 OXIDY DUSÍKU (NO _x).....	36
5.4 OXID SIŘIČITÝ (SO ₂)	38
5.5 OXID UHELNATÝ (CO).....	41
6. KVALITA OVZDUŠÍ – SUSPENDOVANÉ ČÁSTICE (PM)	43
6.1 ZÁKLADNÍ POPIS.....	43
6.2 MĚŘENÍ SUSPENDOVANÝCH ČÁSTIC.....	44
6.3 PM ₁₀ – RADIOMETRICKY	46
6.4 PM _{2,5} – GRAVIMETRICKY	53

7. KOVY	54
7.1 ZÁKLADNÍ INFORMACE	54
7.2 ARSEN	56
7.3 KADMIUM	59
7.4 NIKL	62
7.5 OLOVO	65
7.6 SHRNUÍ	68
7.7 DALŠÍ KOVY.....	70
7.7.1 Draslík.....	70
7.7.2 Hořčík.....	72
7.7.3 Stroncium	74
7.7.4 Titan.....	76
7.7.5 Baryum	78
7.7.6 Hliník.....	80
7.7.7 Mangan	82
7.7.8 Rubidium.....	84
7.7.9 Železo.....	86
7.7.10 Bor	88
7.7.11 Zinek	90
7.7.12 Měď	92
7.7.13 Chrom	94
7.7.14 Bismut.....	96
7.7.15 Vápník.....	98
7.7.16 Antimon	100
7.8 SHRNUÍ KOVŮ	102
8. SEM ANALÝZA	106
8.1 TECHNICKÉ VYBAVENÍ.....	106
8.2 ZÁKLADNÍ INFORMACE	106
8.3 KLASIFIKACE	108
8.4 OHŇOSTROJ 2. 6. 2018	111
8.5 OHŇOSTROJ 6. 6. 2018	115
8.6 OHŇOSTROJ 13. 6. 2018	118
8.7 DEN BEZ OHŇOSTROJE 7. 6. 2018	121
8.8 SOUHRN.....	123
9. OHŇOSTROJE – ANALÝZA	126
9.1 ZÁKLADNÍ POPIS.....	126
9.2 OHŇOSTROJ 2. 6. 2018	127
9.2.1 Meteorologie	127
9.2.2 Kvalita ovzduší.....	128
9.3 OHŇOSTROJ 6. 6. 2018	130
9.3.1 Meteorologie	130
9.3.2 Kvalita ovzduší.....	131
9.4 OHŇOSTROJ 9. 6. 2018	133
9.4.1 Meteorologie	133
9.4.2 Kvalita ovzduší.....	134
9.5 OHŇOSTROJ 13. 6. 2018	136
9.5.1 Meteorologie	136
9.5.2 Kvalita ovzduší.....	137
9.6. OHŇOSTROJ 16. 6. 2018 – ŠPILBERK.....	139
9.6.1 Základní informace	139

9.6.2 Meteorologické podmínky.....	139
9.6.3 Kvalita ovzduší.....	142
10. SOUHRN	145
10.1 METEOROLOGICKÉ PODMÍNKY	145
10.2 PLYNNÉ ZNEČIŠŤUJÍCÍ LÁTKY	146
10.3 SUSPENDOVANÉ ČÁSTICE	147
10.4 KOVY	148
10.5 ČÁSTICOVÁ ANALÝZA	150
10.6 SROVNÁNÍ	151
10.7 ZÁVĚR.....	151
11. LITERATURA	152
PODĚKOVÁNÍ

SEZNAM ZKRATEK

CO	<i>oxid uhelnatý</i>
ČHMÚ	<i>Český hydrometeorologický ústav</i>
ČIA	<i>Český institut pro akreditaci</i>
EPA	<i>Agentura pro ochranu životního prostředí (Environment Protection Agency)</i>
ICP-MS	<i>hmotnostní spektrometrie s indukčně vázanou plazmou</i>
max	<i>maximum</i>
min	<i>minimum</i>
MMB	<i>magistrát města Brna</i>
MS	<i>hmotnostní spektrometrie (mass spectrometry)</i>
MŽP	<i>Ministerstvo životního prostředí</i>
NO	<i>oxid dusnatý</i>
NO ₂	<i>oxid dusičitý</i>
NO _x	<i>oxidy dusíku</i>
PM	<i>suspendované částice (particulate matter)</i>
PM ₁₀	<i>suspendované částice s aerodynamickým průměrem do a včetně 10 μm</i>
PM _{2,5}	<i>suspendované částice s aerodynamickým průměrem do a včetně 2,5 μm</i>
RH	<i>relativní vlhkost</i>
SEM	<i>skenovací elektronový mikroskop</i>
SEM/EDX	<i>energiově-disperzní rentgenová spektroskopie skenovacím elektronovým mikroskopem</i>
SO ₂	<i>oxid siřičitý</i>
SOP	<i>standardní operační postup</i>
T	<i>teplota vzduchu</i>
TK	<i>těžké kovy</i>
TSP	<i>celkový polétavý prach (total suspended particles)</i>
VOC	<i>těkavé organické látky (volatile organic compounds)</i>
WD	<i>směr větru (wind direction)</i>
WHO	<i>Světová zdravotnická organizace (World Health Organization)</i>
WS	<i>rychlost větru (wind speed)</i>
SZÚ	<i>Státní zdravotní ústav</i>
Wt %	<i>hmotnostní procenta</i>

1. ÚVOD

Měření kvality ovzduší během brněnské ohňostrojevé přehlídky Ignis Brunensis 2018 probíhalo v období od 2. do 14. června 2018. Pro odběr vzorků byly použity vzorkovače suspendovaných částic frakcí $PM_{2,5}$ (pro gravimetrii a analýzu kovů) a PM_{10} (pro částicovou analýzu). Navíc byl využit měřicí vůz Statutárního města Brna, monitorující v 10minutových intervalech jak koncentrace vybraných znečišťujících látek v ovzduší, tak aktuální meteorologické podmínky.

Ohňostroje byly odpalovány z pontonu umístěného přímo na hladině brněnské přehrady, v její jižní části. Měřicí technika byla situována hned u pobřeží jihovýchodně od odpalovací rampy s ohledem na to, že na přehradě statisticky převažuje vítr ze západního a severozápadního směru a byla tedy vyšší pravděpodobnost, že bude kouřová vlečka směřovat jihovýchodně směrem k měřicím zařízením.

Kromě čtyř soutěžních ohňostrojů na brněnské přehradě byl součástí přehlídky Ignis Brunensis také tradiční závěrečný ohňostroj odpalovaný z brněnského hradu Špilberk v centru města. Za účelem měření případného vlivu tohoto ohňostroje na kvalitu ovzduší v Brně nebylo naplánováno žádné účelové měření, součástí této zprávy však je vyhodnocení dat z automatických stanic imisního monitoringu ČHMÚ, které se nalézají v blízkosti hradu Špilberk a centra města.

Soubor měřených škodlivin zahrnoval znečišťující látky, pro které je stanoven imisní limit podle Zákona 201/2012 Sb. o ochraně ovzduší (dále jen Zákon o ochraně ovzduší). Navíc byla provedena i analýza koncentrací kovů, které jsou součástí pyrotechnických složí.

2. METODIKA

2.1 LOKALITA MĚŘENÍ

Ohňostroje jsou během přehlídky odpalovány z pontonu umístěného přímo na hladině brněnské přehrady, SSZ od přístaviště. Tomu byl přizpůsoben i výběr lokality měření - bylo vybráno místo v prostorech Jachtklubu, přímo u pobřeží asi 500 m jihovýchodně od odpalovací rampy (měřicí místo se nachází přibližně ve směru 270° k odpalovací rampě, viz Obrázek 3). Tato lokalita byla vybrána, jelikož na brněnské přehradě statisticky převládá vítr ze západu a severozápadu a je proto vyšší pravděpodobnost, že budou vzorkovače přímo vystaveny kouřové vlečce z ohňostrojů. V areálu přístaviště a jeho okolí se pohybuje velké množství osob (v řádu statisíc). Bylo zajištěno, aby v bezprostřední blízkosti vzorkovačů (cca 20 m) nebyl možný přístup osob, což by mohlo vést k lokálnímu ovlivnění a zkreslení výsledků. Při výběru lokality bylo také dbáno na to, aby senzor větru, umístěný na měřicím voze, byl nad okolním terénem tak, aby nebyla v jeho bezprostřední blízkosti v žádném směru překážka, neboť získané informace o četnostech a rychlostech větru by byly zkreslené.

Místo měření – GPS souřadnice:

49° 13' 51.350" s. š.

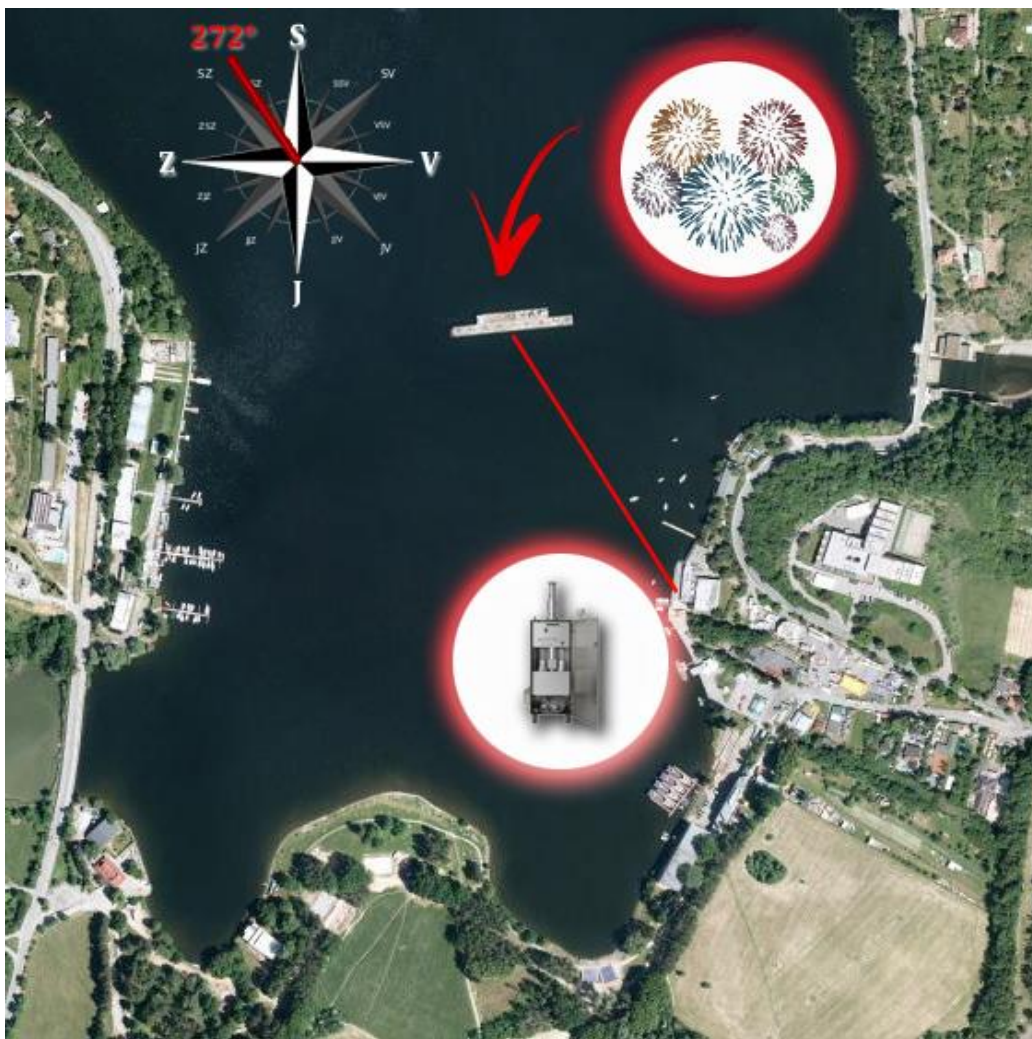
16° 30' 58.929" v. d.



Obrázek 1 - Oblast jižní části brněnské přehrady s vyznačením umístění měřicí techniky a oblast odpalovací rampy na hladině brněnské přehrady. Zdroj: mapy.cz



Obrázek 2 - 3D pohled na místo měření a odpalovou rampu. Žlutě jsou zvýrazněny lokality hlavního pohybu osob v blízkosti měřicího místa. Zdroj: mapy.cz



Obrázek 3 - satelitní snímek lokality s vyznačením umístění vzorkovačů a odpalovací rampy. Zdroj: mapy.cz

2.2 MĚŘÍCÍ TECHNIKA

- sekvenční vzorkovač Leckel SEQ 47/50 + hlavice Digitel PM_{2,5}
- nízkoobjemový vzorkovač Leckel LVS MVS6 + hlava PM₁₀
- měřící vůz

Data použitá pro analýzu a vyhodnocení pochází z přístrojů ČHMÚ (vzorkovače) a z měřícího vozu provozovaného Statutárním městem Brno. Podmínku autorizace pro měření podle MŽP splňují obě organizace. ČHMÚ je navíc akreditován podle ČSN EN ISO/IEC 17025:2005 jako zkušební laboratoř č. 1460. Některé z odběrů byly provedeny akreditovanými metodami. Konkrétně se jedná o 24h odběry pro gravimetrii a analýzy kovů s platným imisním limitem (As, Cd, Ni, Pb). Akreditace metod mj. zaručuje návaznost na certifikovaný referenční materiál v průběhu laboratorních analýz. Více informací o rozsahu a podmínkách akreditace lze najít na stránkách Českého institutu pro akreditaci (ČIA), Národního akreditačního orgánu na <http://www.cia.cz>.

2.3 MĚŘENÉ CHARAKTERISTIKY

2.3.1 LECKEL SEQ 47/50 PM_{2,5}

- PM_{2,5} – gravimetrická metoda
- stanovení kovů s platným imisním limitem (As, Cd, Ni, Pb) metodou hmotnostní spektrometrie s indukčně vázanou plazmou (ICP-MS)
- stanovení dalších kovů (ICP-MS)

Odběry byly v první části přehlídky prováděny ve 4h intervalu, a to vždy třikrát za sebou. První čtyřhodinový úsek byl měřen v den konání ohňostroje od 18:00 do 22:00 SELČ. Tento úsek zahrnoval část dne těsně před ohňostrojem. Další čtyřhodinový úsek v době od 22:00 do 02:00 SELČ byl intervalem, ve kterém probíhal samotný ohňostroj (začátek vždy ve 22:30, trvání 17 minut). Třetí čtyřhodinový úsek byl měřen od 02:00 do 06:00, tedy noc po konání ohňostroje.

2.3.2 LECKEL MVS6 + PM₁₀

- odběr na polykarbonátové filtry pro analýzu SEM

Nízkoobjemový vzorkovač Leckel MVS6 nemá zásobník filtrů, proto byly prováděny 4h odběry vždy v den konání ohňostroje od 22:00 do 02:00 (ohňostroje probíhaly od 22:30 přibližně do 22:50). Takto byly navzorkovány tři ohňostroje a také jeden den bez ohňostroje, jako referenční pozadí pro srovnání.

2.3.3 MĚŘÍCÍ VŮZ

- PM₁₀ – radiometrická metoda [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
- NO, NO₂, NO_x – chemiluminiscence [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
- SO₂ – UV fluorescence [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
- CO – IR absorpční spektrometrie [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
- teplota vzduchu [$^{\circ}\text{C}$]
- relativní vlhkost vzduchu [%]
- rychlost větru [m/s]
- směr větru [$^{\circ}$]

Měření měřícím vozem probíhalo v 10minutovém intervalu a data byla v reálném čase přenášena do centrálního počítače a ukládána.



Obrázek 4 - vzorkovače Leckel. Vlevo vzorkovače Leckel SEQ 47/50 (PM_{2,5}, jeden záložní), vpravo vzorkovač Leckel MVS6 (částicová analýza)



Obrázek 5 - Měřící vůz (během instalace, zatím zasunutý senzory)

2.4 PLÁN MĚŘENÍ

Začátek přehlídky: 2. 6. 2018

Konec přehlídky: 14. 6. 2018

Ohňostroje: 2. 6., 6. 6., 9. 6. a 13. 6. vždy od 22:30 do 22:47

+ finální ohňostroj 16. 6. ve 22:30 na hradě Špilberk

Tabulka 1 - plán měření. Ve sloupci datum jsou oranžově vyznačeny dny konání ohňostroje. Žlutě vyznačená měření jsou tři po sobě jdoucí čtyřhodinové odběry na filtry pro analýzu TK. Zeleně vyznačená měření jsou 4h odběry na polykarbonátové filtry pro analýzu SEM.

Datum	Leckel SEQ 47/50 + PM _{2,5}	Leckel MVS6 + PM ₁₀	Měřící vůz
čt 31.5.	přistavení na místo		
pá 1.6.			kalibrace
so 2.6.			kontinuální měření
ne 3.6.			
po 4.6.			
út 5.6.			
st 6.6.			
čt 7.6.			
pá 8.6.			
so 9.6.			
ne 10.6.			
po 11.6.			
út 12.6.			
st 13.6.			
čt 14.6.	odstavení		

2.5 DOSTUPNOST DAT

Požadavky na kvalitu dat ČHMÚ stanovují minimální dostupnost dat 90 %, aby bylo možné provádět analýzy. V tabulce níže jsou uvedeny dostupnosti dat pro jednotlivé parametry. Měření byla zahájena 2. června a ukončena 14. června v ranních hodinách. Během celé doby měření nedošlo k žádnému výpadku dat. Retrospektivně však byly některé na první pohled neplatné hodnoty vyřazeny.

Měřící vůz

2.6.2018 00:00 až 14.6.2018 05:50, 10minutový interval

Tabulka 2 - Dostupnost dat z měřícího vozu

Látka	SO ₂	NO	NO ₂	NO _x	PM ₁₀	CO	T	RH	WS	WD
Platných dat	1762	1762	1764	1763	1764	1764	1764	1764	1764	1764
Teoretický počet dat	1764	1764	1764	1764	1764	1764	1764	1764	1764	1764
Dostupných dat	99,9%	99,9%	100%	99,9%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Z tabulky je vidět, že dostupnost dat z měřícího vozu je pro všechny měřené veličiny 100 % nebo téměř 100 % a může tedy být počítáno se všemi měřenými prvky.

Vzorkovače

V případě obou vzorkovačů (SEQ 47/50 a MVS6) byla realizována všechna plánovaná měření, dostupnost dat byla u obou 100 %.

2.6 POUŽITÝ SOFTWARE/TECHNOLOGIE

Během analýz a vyhodnocení byl použit následující software/technologie:

- R software x64 3.4.4
- RStudio + modul Openair
- Statistica 13.0
- Microsoft Visual Studio Code
- MIRA3 Control Software 4.2.26.0
- AZtec 3.3 SP1
- Airity 5.0
- Highcharts 6.1.1
- Highstock 6.1.1
- Microsoft Excel 2016
- SQL + PHP 7.1 + Javascript + jQuery
- Adobe Photoshop CS5
- GIMP 2

3. METEOROLOGICKÉ PODMÍNKY

Meteorologické podmínky byly sledovány v 10minutovém intervalu měřícím vozem. Měřena byla teplota vzduchu, relativní vlhkost vzduchu a rychlost a směr větru. Pro vyhodnocování kvality ovzduší jsou důležité především parametry týkající se větru. Rychlost a směr větru udávají směr respektive rychlost šíření kouřové vlečky od místa odpalu.

Kromě měřených meteorologických parametrů má na kvalitu ovzduší vliv i srážkový úhrn. Měřící vůz množství srážek neměří a přímo na přehradě nemá ČHMÚ žádný srážkoměr. Vzhledem k charakteru počasí během konání přehlídky a obecně v létě (lokální srážky a bouřky) je nejpřesnější metodou pro odhad množství srážek analýza radarového snímku. Vzhledem k přítomnosti pracovníka ČHMÚ v místě ohňostrojů v době jejich konání však lze konstatovat, že během ani jedné noční přehlídky nepršelo.

Pro hodnocení počasí během konání akce Ignis Brunensis 2018 byla použita z 10minutová data z měřícího vozu. Data ze 14. června nelze brát v potaz pro průměrování, protože bylo měření ukončeno během dopoledních hodin, proto jsou veškeré statistiky založeny na datech od 2. 6. 2018 0:00 do 13. 6. 2018 23:50. Data jsou dále doplněna o srážkové úhrny z blízkých stanic ČHMÚ a o radarové snímky.

3.1 TEPLOTA VZDUCHU

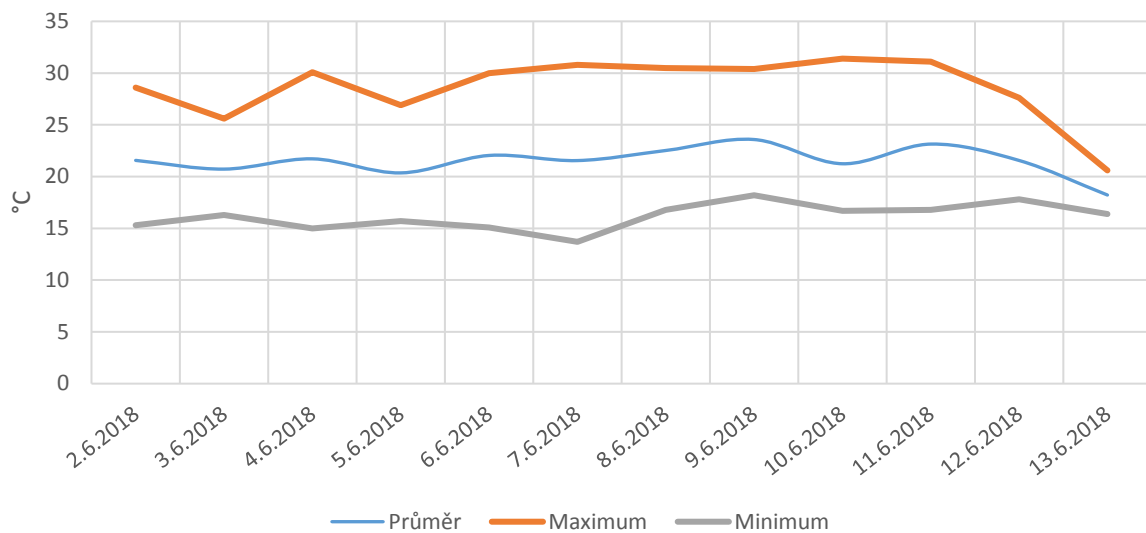
Průměrná denní teplota se v průběhu přehlídky pohybovala po celou dobu kolem 20 °C (celkový průměr 21,52 °C). Nejvyšší průměrná denní teplota vzduchu byla naměřena v den konání třetího ohňostroje, tedy 9. června, a to 23,58 °C. Naopak nejnižší průměrná denní teplota byla naměřena poslední měřený den 13. června a měla hodnotu 18,22 °C.

Absolutní maximum 31,4 °C bylo pozorováno 10. června přesně v poledne. Naopak absolutní minimum 13,7 °C bylo naměřeno 7. června ve 3:10 ráno. Nejvyšší denní rozsah teplot byl pozorován 7. června (17,1 °C; max 30,8 °C; min 13,7 °C), nejnižší 13. června (4,2 °C; max 20,6 °C; min 16,4 °C).

Z průběhu teplot (Obrázek 7) je patrné standardní denní a noční kolísání teplot. Ohňostroje, ani zvýšený pohyb osob v místě konání na teplotu vzduchu nemělo žádný vliv.

Tabulka 3 - Denní průměrné, maximální a minimální teploty vzduchu a teplotní rozsah [°C]. Oranžově zvýrazněné dny jsou dny konání ohňostroje.

Den	Průměr	Max	Min	Rozsah
2. 6. 2018	21,57	28,6	15,3	13,3
3. 6. 2018	20,73	25,6	16,3	9,3
4. 6. 2018	21,72	30,1	15	15,1
5. 6. 2018	20,36	26,9	15,7	11,2
6. 6. 2018	22,05	30	15,1	14,9
7. 6. 2018	21,55	30,8	13,7	17,1
8. 6. 2018	22,52	30,5	16,8	13,7
9. 6. 2018	23,58	30,4	18,2	12,2
10. 6. 2018	21,24	31,4	16,7	14,7
11. 6. 2018	23,14	31,1	16,8	14,3
12. 6. 2018	21,56	27,6	17,8	9,8
13. 6. 2018	18,22	20,6	16,4	4,2



Obrázek 6 - Denní průměrné, maximální a minimální teploty vzduchu



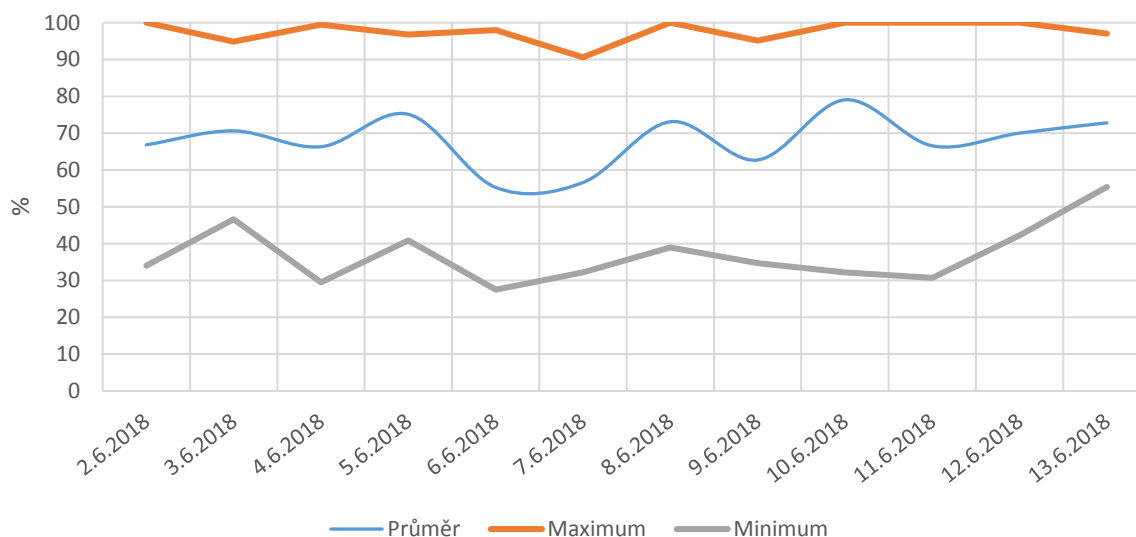
Obrázek 7 - Průběh teploty vzduchu během přehlídky. Růžově jsou vyšrafovaná období ohňostroje (22:00-02:00)

3.2 RELATIVNÍ VLHKOST VZDUCHU

Průměrná relativní vlhkost od 2. června do 13. června včetně byla 67,9 %. Nejvyšší denní průměr byl naměřen 10. června (79,1 %). Naopak nejnižší denní průměr činil 53,3 % 6. června. Absolutně nejvyšší hodnota odpovídala teoretickému maximu 100 % a byla naměřena vícekrát. Absolutně nejnižší naměřenou hodnotou bylo 27,5 %, 6. června v 17:10.

Tabulka 4 - Denní průměrné, maximální a minimální relativní vlhkosti vzduchu a rozsah [%]. Oranžově zvýrazněné dny jsou dny konání ohňostroje.

Den	Průměr	Max	Min	Rozsah
2. 6. 2018	66,8	100	34	66
3. 6. 2018	70,6	94,9	46,6	48,3
4. 6. 2018	66,3	99,5	29,5	70
5. 6. 2018	75,1	96,8	40,9	55,9
6. 6. 2018	55,3	98	27,5	70,5
7. 6. 2018	56,6	90,6	32,2	58,4
8. 6. 2018	73,1	100	39	61
9. 6. 2018	62,7	95,1	34,7	60,4
10. 6. 2018	79,1	100	32,2	67,8
11. 6. 2018	66,6	100	30,7	69,3
12. 6. 2018	70,0	100	42,3	57,7
13. 6. 2018	72,8	97	55,4	41,6



Obrázek 8 - Denní průměrné, maximální a minimální relativní vlhkosti vzduchu



Obrázek 9 - Průběh relativní vlhkosti vzduchu během přehlídky. Růžově jsou vyšrafovaná období ohňostroje (22:00-02:00)

3.3 RYCHLOST VĚTRU

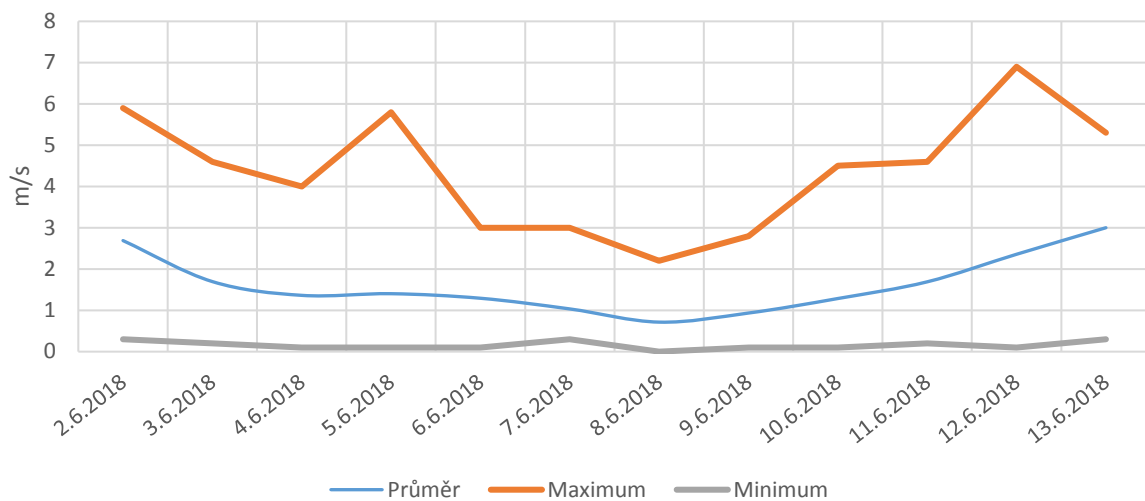
Jak již bylo zmíněno výše, je rychlost větru velmi důležitým parametrem při hodnocení kvality ovzduší. Proudění vzduchu udává rychlost a směr rozptylu v atmosféře. Obecně lze říci, že nízké rychlosti větru podporují nepříznivé rozptylové podmínky spojené s vyššími koncentracemi znečišťujících látek. Naopak vyšší rychlosti větru zajišťují rychlejší a intenzivnější rozptyl.

Celková denní průměrná rychlost větru v době měření byla 1,6 m/s (5,8 km/h). Nejvyšší denní průměr byl zaznamenán poslední den měření, rovné 3 m/s (10,8 km/h).

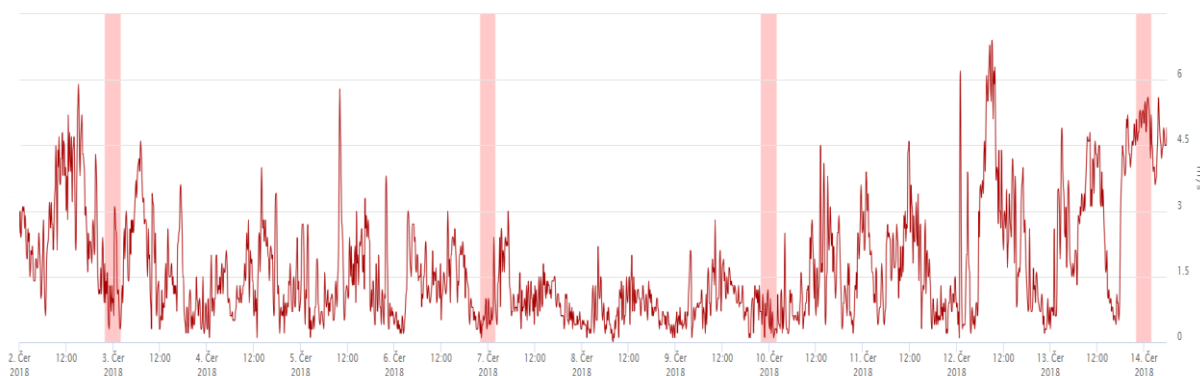
Absolutní maximum rychlosti větru bylo naměřeno 12. června v 9:00 a 9:10, a to 6,9 m/s (24,8 km/h). Lze tedy říci, že po celou dobu konání přehlídky byly rychlosti větru relativně nízké. Úplné bezvětří (0 m/s) bylo naměřeno 8. června v 8:00. Rychlosti pod 1 m/s (3,6 km/h) byly naměřeny ve 36,7 % doby měření.

Tabulka 5 - Denní průměrné, maximální a minimální rychlosti větru a rozsah [m/s]. Oranžově zvýrazněné dny jsou dny konání ohňostroje.

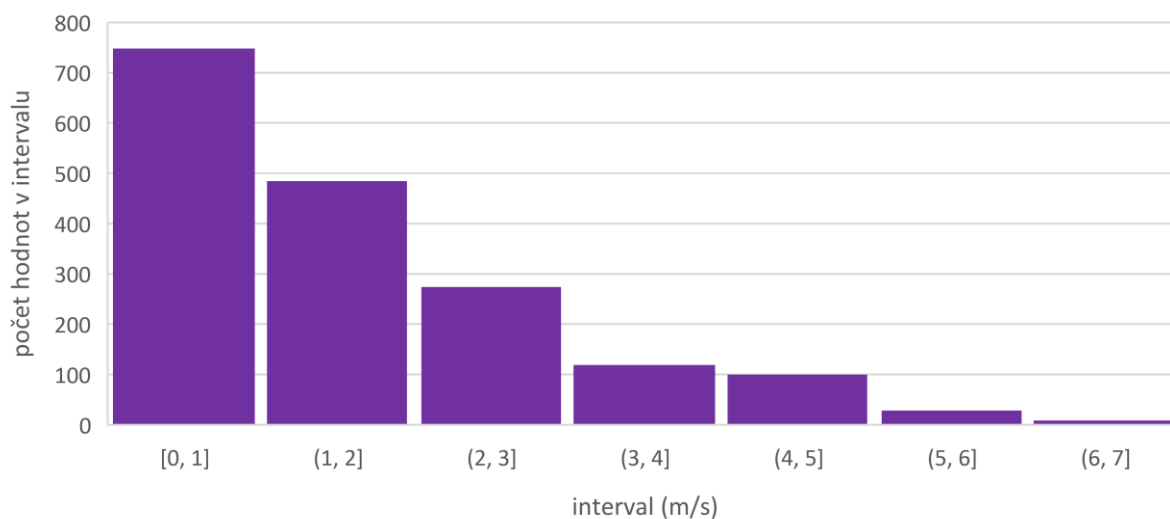
Den	Průměr	Max	Min	Rozsah
2. 6. 2018	2,69	5,9	0,3	5,6
3. 6. 2018	1,70	4,6	0,2	4,4
4. 6. 2018	1,36	4	0,1	3,9
5. 6. 2018	1,40	5,8	0,1	5,7
6. 6. 2018	1,29	3	0,1	2,9
7. 6. 2018	1,03	3	0,3	2,7
8. 6. 2018	0,71	2,2	0	2,2
9. 6. 2018	0,93	2,8	0,1	2,7
10. 6. 2018	1,29	4,5	0,1	4,4
11. 6. 2018	1,69	4,6	0,2	4,4
12. 6. 2018	2,36	6,9	0,1	6,8
13. 6. 2018	3,00	5,3	0,3	5



Obrázek 10 - Denní průměrné, maximální a minimální rychlosti větru



Obrázek 11 - Průběh rychlosti větru. Růžově jsou vyšrafovaná období ohňostroje (22:00-02:00)



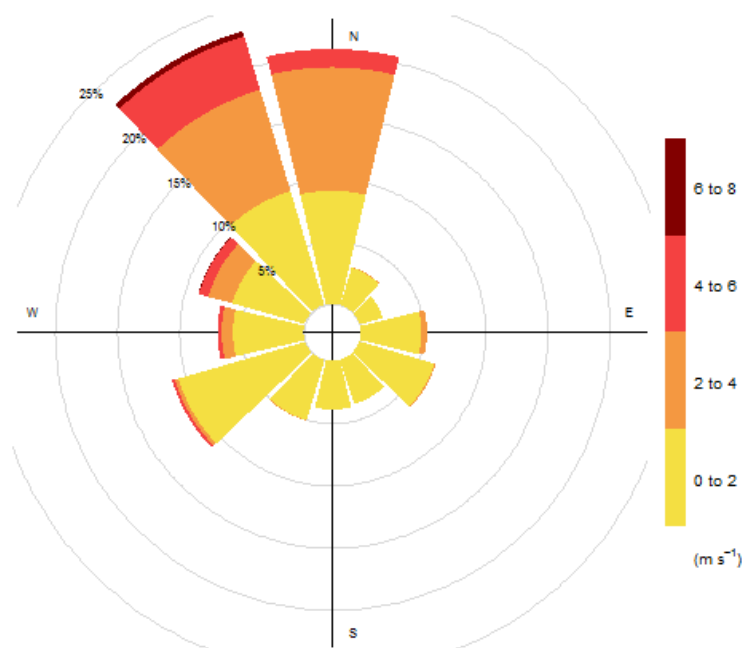
Obrázek 12 - Histogram rychlostí větru s krokem 1 m/s

3.4 SMĚR VĚTRU

Stejně jako rychlost větru je také směr větru klíčový při hodnocení kvality ovzduší. Tento parametr udává hlavní směr šíření látek v ovzduší od místa zdroje. Ze statistického hlediska vyplynulo, že v oblasti brněnské přehrady převažuje západní a severozápadní vítr. S ohledem na to byla vybrána i lokalita měření tak, aby existovala co nejvyšší pravděpodobnost, že bude vítr foukat od odpalovacího pontonu směrem k měřícím zařízením.

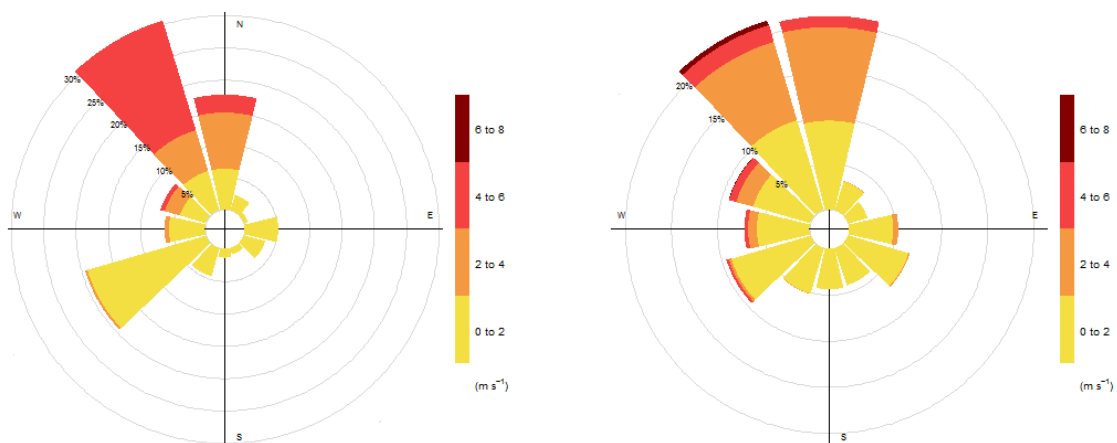
Na základě analýzy z období 2. až 14. června lze říci, že se potvrdil předpoklad a směr větru byl v této době převážně S a SZ. Z tohoto směru také dosahoval nejvyšších rychlostí (které však byly vysoké pouze relativně v kontextu dat z tohoto období, během celé akce jinak nepřesáhly 7 m/s).

Obrázek 13 ukazuje převažující směr a příslušný podíl rychlostí větru v daném směru prostřednictvím větrné růžice v kroku 2 m/s.



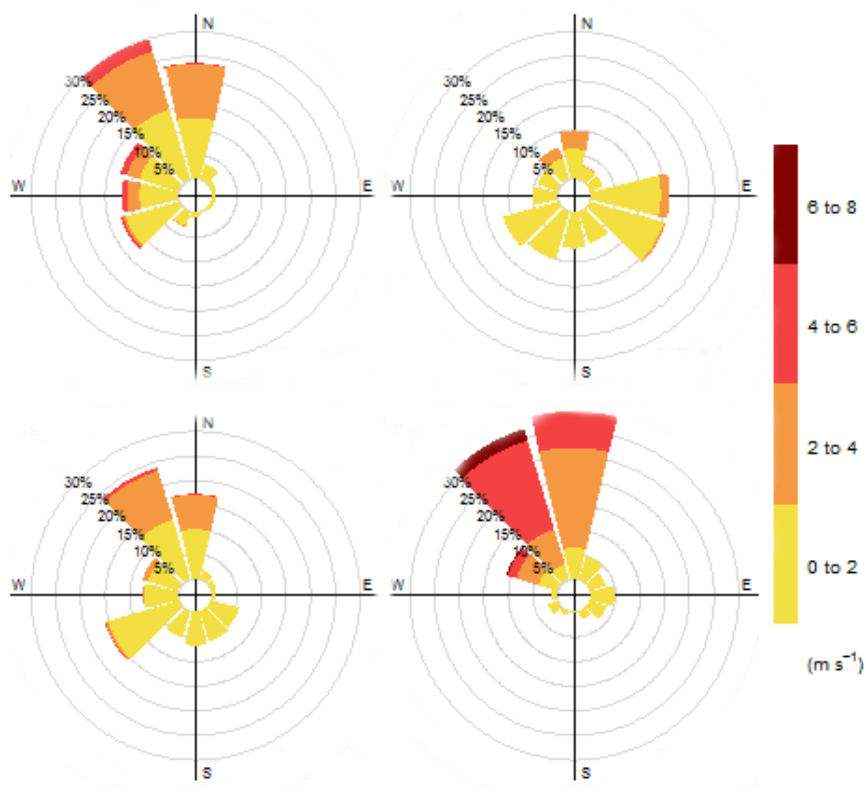
Obrázek 13 - Větrná růžice za celé období měření

Pro srovnání byly vytvořeny také větrné růžice z období ohňostrojí a z období mimo ohňostroje. Za období ohňostroje byla považována agregace 12h intervalů od 18:00 v den ohňostroje do 06:00 následujícího dne ráno. Ze srovnání je patrné, že se směr větru v době ohňostrojí nijak zvláště neodlišoval od směru v době mimo ohňostroje, v době mimo ohňostrojí jsou patrné i vyšší rychlosti větru, což ale vyplývá z faktu, že se jedná o delší období a tedy statisticky vyšší pravděpodobnost výskytu těchto vyšších rychlostí.



Obrázek 14 - Větrné růžice z období ohňostroju (vlevo) a období mimo ohňostroje (vpravo) s rozložením rychlostí větru v intervalu 2 m/s

Následující větrné růžice jsou agregací pro vždy 3 dny. Je vidět, že vyšší rychlosti větru byly naměřeny na začátku a na konci měřícího období, kdy převládal severní a severozápadní vítr. V mezidobí byly rychlosti nižší a byla pozorována vyšší variabilita směru větru.

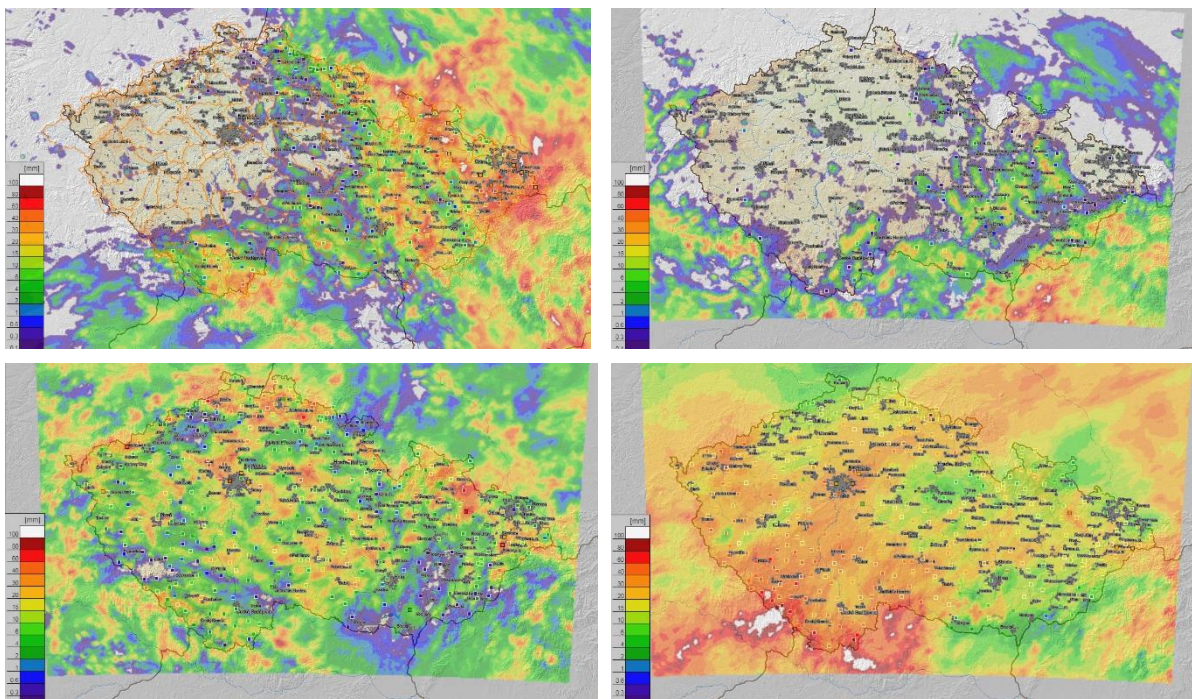


Obrázek 15 - Větrné růžice pro třídní období (2. 6. - 4. 6. vlevo nahoře, 5. 6. - 7. 6. vpravo nahoře, 8. 6. - 10. 6. vlevo dole, 11. 6. - 13. 6. vpravo dole), s podíly rychlosti větru v intervalu 2 m/s.

3.5 SRÁŽKY

Přímo v místě konání přehlídky v lokalitě přehrady nemá ČHMÚ srážkoměr a množství srážek neměří ani měřící vůz. Lze však vycházet z radarových snímků a také z objektivního posouzení na základě přítomnosti zaměstnance ČHMÚ přímo v místě a době konání ohňostrojų.

Následující čtyři radarové snímky představují kombinovaný radarovo-srážkoměrný odhad srážek v 72h období pro území ČR. Je vidět, že srážkově bohatší byla druhá část sledovaného období.

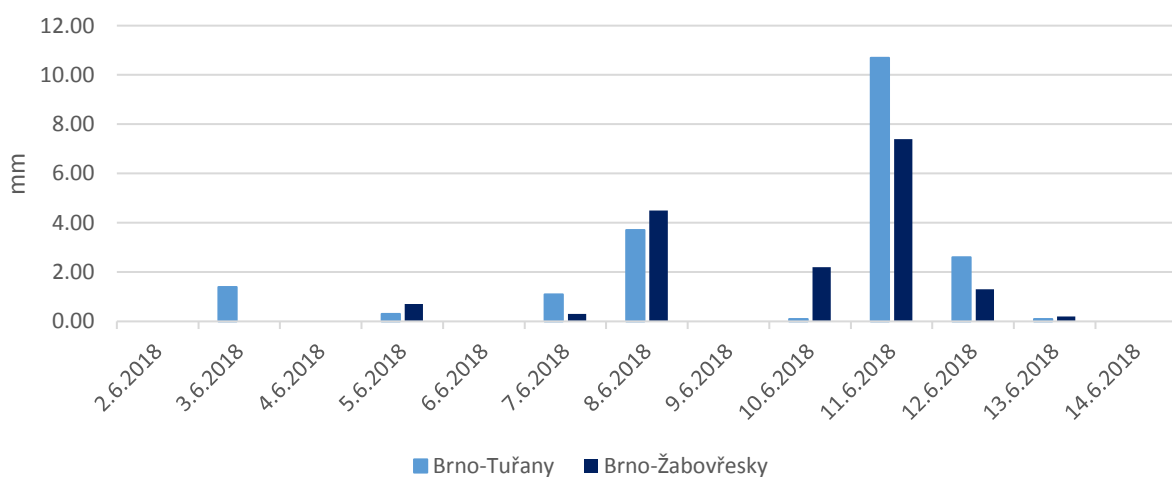


Obrázek 16 - Kombinovaný radarovo-srážkoměrný odhad srážek za 72h pro území ČR. Vlevo nahoře 2. .6 .-4. 6., vpravo nahoře 5.6.-7. 6., vlevo dole 8.6.-10. 6. a vpravo dole 11. 6.-13. 6.

Následující tabulka udává srážkové úhrny v daném období ze stanice ČHMÚ Brno-Žabovřesky, vzdálené 4,04 km od místa měření a profesionální automatické meteorologické stanice ČHMÚ na letišti Brno-Tuřany, která je však již vzdálená 15,68 km. Výhodou této stanice je, že se jedná o automatickou stanici, která měří srážky nikoliv v denním, ale 10minutovém kroku. Denní srážkové úhrny jsou standardně měřeny od 6:00 do 6:00 UTC (08:00-08:00 SELČ). Úhrny pro kalendářní den lze vypočítat z desetiminutových dat ze stanice Brno-Tuřany.

Tabulka 6 - Denní srážkové úhrny [mm]. Oranžově zvýrazněné dny jsou dny konání ohňostroje.

	Brno - Tuřany	Brno – Žabovřesky
2. 6. 2018	0,0	0,0
3. 6. 2018	1,4	0,0
4. 6. 2018	0,0	0,0
5. 6. 2018	0,3	0,7
6. 6. 2018	0,0	0,0
7. 6. 2018	1,1	0,3
8. 6. 2018	3,7	4,5
9. 6. 2018	0,0	0,0
10. 6. 2018	0,1	2,2
11. 6. 2018	10,7	7,4
12. 6. 2018	2,6	1,3
13. 6. 2018	0,1	0,2
14. 6. 2018	0,0	0,0
Celkem	20,0	16,6



Obrázek 17 - denní srážkové úhrny na stanicích Brno-Tuřany a Brno-Žabovřesky

V oblasti Brna bylo od 2. 6. do 14. 6. naměřeno 16,6 mm (Brno-Žabovřesky) a 20,0 mm (Brno-Tuřany) srážek. Z toho převážná část spadla během intenzivnější bouřky v brzkých ranních hodinách 12. 6., tedy v mezidobí mezi předposledním a posledním ohňostrojem.

Na základě desetiminutových dat ze stanice Brno-Tuřany byly spočítány úhrny v době konání ohňostroje a krátce před a po něm, které jsou zaznamenány v následující tabulce v hodinovém kroku.

Tabulka 7 - Hodinové srážkové úhrny ze stanice Brno-Tuřany [mm]

	2. 6. – 3.6.	6. 6. – 7.6.	9. 6. – 10.6.	13. 6. – 14.6.
20:00 – 21:00	0,0	0,0	0,0	0,0
21:00 – 22:00	0,0	0,0	0,0	0,0
22:00 – 23:00	0,1	0,0	0,0	0,0
23:00 – 00:00	0,0	0,0	0,0	0,0
00:00 – 01:00	0,0	0,0	0,0	0,0
01:00 – 02:00	0,0	0,0	0,0	0,0

Z výše uvedeného je patrné, že v době ohňostrojů, ani bezprostředně před nimi či po nich, nepršelo. Zcela nepatrný úhrn během doby konání prvního ohňostroje souvisí s intenzivnější bouřkou, která prošla na východ od Brna, mimo lokalitu brněnské přehrady a velmi nevýrazně se projevila i na jihovýchodně ležící stanici v Tuřanech.

3.6 CELKOVÝ RÁZ POČASÍ

Tabulka 8 - Souhrn počasí v lokalitě Brno-přehrada v době od 2. do 14. 6. 2018. Oranžově jsou zvýrazněny dny ohňostrojí.

	Východ Slunce	Západ Slunce	Teploty °C	Rychlost větru		Směr větru
				m/s	km/h	
2. 6. 2018	04:53	20:51	15 až 29	2,7	9,7	SZ
3. 6. 2018	04:52	20:52	16 až 26	1,7	6,1	SZ/S
4. 6. 2018	04:51	20:53	15 až 30	1,4	5,0	SZ
5. 6. 2018	04:51	20:54	16 až 27	1,4	5,0	SZ/S
6. 6. 2018	04:50	20:55	15 až 30	1,3	4,7	V
7. 6. 2018	04:50	20:55	14 až 31	1	3,6	JZ/JV
8. 6. 2018	04:49	20:56	17 až 31	0,7	2,5	JV
9. 6. 2018	04:49	20:57	18 až 30	0,9	3,2	JZ/JV
10. 6. 2018	04:49	20:58	17 až 31	1,3	4,7	SZ
11. 6. 2018	04:48	20:58	17 až 31	1,7	6,1	SZ/S
12. 6. 2018	04:48	20:59	18 až 28	2,4	8,6	S/SZ
13. 6. 2018	04:48	21:00	16 až 21	3	10,8	S/SZ

4. PYROTECHNICKÉ SLOŽE A CHEMIE OHŇOSTROJŮ

4.1 ZÁKLADNÍ INFORMACE

Pyrotechnické slože jsou základem ohňostrojů, jedná se o velmi rozsáhlou řadu výrobků tvořených směsí několika základních složek a dalších příměsí pro dosažení konkrétního efektu. V podstatě se jedná o směs:

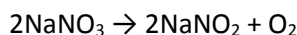
- hořlaviny (paliva)
- okysličovadla
- pojidla
- solí různých kovů, které vyvolávají různé zbarvení plamene
- jiných specifických přísad podle požadovaného výsledného efektu

Díky různým příměsím a jejich specifickým poměrům lze dosáhnout různých světelných, tepelných, zvukových, tlakových, dýmových a pohybových účinků (Válek, 2009).

4.2 OKYSLIČOVADLA

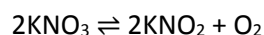
Okysličovadla v pyrotechnických složích jsou látky s vysokým obsahem kyslíku. Tyto sloučeniny jsou schopny při svém rozkladu uvolňovat kyslík potřebný pro hoření. Jedná se o pevné látky, které musí být chemicky stálé a co nejméně vázat vzdušnou vlhkost. Nejčastěji používané jsou dusičnany, chlorečnany, chloristany, peroxidy a oxidy (Posson, 2002).

- **dusičnany (NO₃)**
 - **dusičnan sodný (NaNO₃)** – někdy označovaný také jako chilský ledek. Bíle zbarvená látka velmi snadno rozpustná ve vodě. Kromě pyrotechnických složí se využívá také do hnojiv nebo jako potravinový konzervant (Gellings, 2016; Silva, 2016). Při vyšších teplotách dochází k jeho rozkladu na dusitan sodný a kyslík podle



Používání této látky jako okysličovadla v pyrotechnických složích je na ústupu, protože na sebe ve větší míře váže vzdušnou vlhkost.

- **dusičnan draselný (KNO₃)** – někdy také označovaný jako ledek draselný nebo salnytr. Používá se mj. jako dusíkaté hnojivo (Sharma, 2016), ale je také nedílnou součástí střelného prachu a dýmovnic (Conkling, 2010). Při teplotách mezi 550 a 790 °C dochází k rovnovážnému stavu



- **dusičnan barnatý ($\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$)** – bezbarvá anorganická látka, dobře rozpustná ve vodě. Při hoření se barví do zelena. V kombinaci s některými látkami jako například hliníkovým práškem je silně výbušný (Akhavan, 2011). Je velmi jedovatý a polknutí může být smrtelné (Bahlmann, 2005).
- **dusičnan strontnatý ($\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$)** – bílá, krystalická látka barvící plamen do ruda.
- **chlореčnany (ClO_3)**
 - **chlореčnan draselný (KClO_3)** – tzv. Bertholetova sůl, bílá krystalická látka s velmi explozivními účinky. Často se používá k vytvoření kouře a využívá se například při výrobě zápalek.
 - **chlореčnan barnatý ($\text{Ba}(\text{ClO}_3)_2$)** – bílá, krystalická látka vytvářející zeleně zbarvený plamen. Za tepla se rozkládá a uvolňuje kyslík
$$\text{Ba}(\text{ClO}_3)_2 \rightarrow \text{BaCl}_2 + 3\text{O}_2$$
- **chloristany (ClO_4)**
 - **chloristan draselný (KClO_4)** – silné oxidační činidlo, patří mezi nejpoužívanější okysličovadla v pyrotechnice.
 - **chloristan amonný (NH_4ClO_4)** – bílý prášek rozpustný ve vodě.

4.3 HOŘLAVINY (PALIVA)

Hořlaviny jsou organické i anorganické látky hořící s kyslíkem, který poskytuje okysličovadlo. Během hoření musí uvolňovat dostatečné množství tepla a ohřát celou slož na zápalnou teplotu. Může se jednat o látky velmi jednoduché (cukr, plasty, pryskyřice), ale i velmi speciální.

Hořlaviny uvolňující větší množství tepla se používají pro explozivní, světelné a zábleskové efekty, naopak látky uvolňující menší množství tepla se používají k tvorbě dýmu.

Většinou jsou hořlaviny založené na práškovém kovu. Některé z hořlavin fungují zároveň jako pojiva. Obecně se může jednat o kovy, polokovy, nekovové anorganické látky, organické látky a organické polymery a pryskyřice.

Příklady hořlavin:

- **hliník** – velmi často používaná hořlavina. Během hoření poskytuje méně energie na jednotku hmotnosti než uhlík, ale netvoří tolik plynu. Vločkovitá forma je snadněji zápalná než kulovité částičky. Velikost částic se volí podle požadované rychlosti hoření (Beckstead, 2005).

- **hořčík** – hořlavější než hliník, zároveň tak ale hrozí vyšší riziko spontánního vznícení při nevhodném skladování. V pyrotechnických složích se používá mj. ke zvýšení teploty hoření (Zhu, 2014).
- **magnalium** – slitina hliníku, obsahující 5 až 50 % hořčíku. Vyznačuje se vysokou pevností a zároveň nízkou hustotou a hmotností. V práškovém stavu se jedná o velmi reaktivní látku. Kombinuje v sobě reaktivitu hořčíku a stabilitu hliníku.
- **železo** – používáný v práškové formě například k vytváření jisker

Existuje rovněž velké množství možných organických hořlavin. Při výběru se hledí na několik aspektů:

- míra oxidace – nejdůležitější parametr, udává množství tepla produkovaného na jednotku hmotnosti
- bod tání – nižší bod tání představuje výhodu při vzněcování a reaktivitě. Na druhou stranu příliš nízký bod tání zvyšuje riziko při výrobě a skladování. Ideálním minimem je přibližně 100 °C.
- bod varu – pokud hořlavina snadno sublimuje nebo se vypařuje, výrazně se snižuje doba možného skladování
- chemická stabilita – ideální hořlavina by měla být snadno komerčně dostupná ve vysoké čistotě a tuto čistotu by si měla zachovat i během skladování. Z tohoto důvodu jsou nevhodné látky, které snadno oxidují na vzduchu (např. aldehydy).
- rozpustnost – organické hořlaviny často fungují zároveň jako pojiva. Pro účely dobré pojivosti je žádoucí určitá míra rozpustnosti ve vodě, acetonu nebo alkoholu.

Mezi často používané organické hořlaviny patří například **škrob**, **cukr**, **šelak**, **nitrocelulóza** nebo práškové plastové hmoty (**PVC**).

4.4 POJIDLA

Pojidla představují hořlavé látky s pojivým účinkem. Některé látky působící primárně jako hořlavina mají i funkci pojidla. Může se jednat jak o organické, tak anorganické látky. Pojivo slouží také jako ochrana, která na povrchu složky vytvoří ochranný film. Látky jsou buď v práškové formě, nebo ve formě roztoku. Některé (například nitrocelulóza, novolak nebo kalafuna) zároveň chrání před zvlhnutím.

Nejčastěji používanou anorganickou látkou je **síra**. Ta je také součástí střelného prachu a funguje zde jako hořlavina. Ve směsích zvyšuje míru hoření (Russel, 2009). V pyrotechnice se tento

prvek používá již více než tisíc let. Má relativně nízký bod tání (119 °C) a jako hořlavina neprodukuje příliš velké množství tepla. Za relativně nízkých teplot však reaguje exotermicky s řadou oxidačních činidel a právě toto uvolněné teplo může odstartovat energičtější reakce.

Z organických látek se používá například **šelak**, **škrob** (rýžový, kukuřičný), **dextrin**, **nitrocelulóza**, řada **gum** (arabská guma, červená guma, guarová guma), **polyetylen**, **antracen**.

4.5 ZMĚKČOVADLA

Změkčovadla jsou látky, sloužící ke zlepšení mechanických vlastností pyrotechnických složí. Ovlivňují ohebnost, pružnost a plastičnost celé směsi. Používá se například **dioktyladipád** (DOA), organická látka s chemickým vzorcem $(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CO}_2\text{C}_8\text{H}_{17})_2$. Jedná se o bezbarvou, olejovitou kapalinu. Jiným používaným změkčovadlem je **dioktylfalát** (DOP), **dinitrotoluen** (DNT), **nitroglycerin** (NG) používaný i jako aktivní složka při výrobě výbušnin, nebo například **nitropentaglycerin** (MTN, TMETN), vysoce výbušná organická látka s chemickým vzorcem $\text{C}_5\text{H}_9\text{N}_3\text{O}_9$.

4.6 STABILIZÁTORY

Stabilizátory jsou obecně látky zvyšující a udržující fyzikálně-chemické vlastnosti směsí. Použit lze některé kovy, například **baryum** nebo **stroncium** (Rose, 2003). Další používané stabilizátory jsou různé **uhlíčitany**, **vazelína**, **lněný nebo ricinový olej**.

4.7 KATALYZÁTORY

Látky obecně označované jako katalyzátory jsou látky vstupující do chemických reakcí, které reakci urychlují (nebo zpomalují). S reaktanty tvoří málo stabilní komplex, který se následně rozpadá na požadované produkty a nezměněný katalyzátor.

V případě pyrotechniky se používají katalyzátory pro urychlení a stabilnější hoření. Často používanými látkami jsou například oxid železitý, oxid manganičitý, salicylát olova, salicylát mědi, fluorid lithný, dichroman amonný nebo dichroman draselný (Wang, 2007; Chen, 2012).

4.8 PROTISPÉKAVÉ (ANTISPÉKAVÉ) LÁTKY

Protispékavé látky jsou sloučeniny, které se využívají ke snížení spojování jednotlivých částic k sobě. Využívají se například také v potravinovém průmyslu. V případě pyrotechniky se přidávají například do střelného prachu v podobě grafitu, který slouží k rozptýlení statického náboje, obalení částic a jejich lubrikaci. Používá se také anorganická sůl uhlíčitan hořečnatý (MgCO_3), bílá práškovitá

látka, nerozpustná ve vodě. Dalšími protispékavými látkami používanými v pyrotechnickém průmyslu jsou například parafín nebo dřevěná moučka (Hall, 1983).

4.9 FLEGMATIZÁTORY

Jako flegmatizátory se označují látky snižující citlivost celé slože na mechanické vlivy (náraz, tření apod.). Z toho vyplývá i jejich charakter – jedná se většinou o měkké a pružné látky. Jsou to ve skutečnosti hořlaviny, ale pro hoření vyžadují velké množství kyslíku. Typickými flegmatizátory v pyrotechnice jsou vosky, parafín, grafitový prášek nebo minerální olej (Cannavo, 1982).

4.10 LÁTKY BARVÍCÍ PLAMEN

Jedny z nejdůležitějších látek v pyrotechnických složích jsou látky barvící plamen, jsou to právě tyto látky, které určují, jakou barvu bude mít výsledný efekt. Nejčastěji se jedná o různé soli kovů, či přímo kovy samotné (Steinhauser, 2008).

4.10.1 ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ

Tabulka 9 - Hlavní látky používané pro zbarvení plamene specifickou barvou

červená	soli stroncia (Sr) a lithia (Li)
zelená	soli barya (Ba)
žlutá	soli sodíku (Na)
bílá/stříbrná	hliník (Al), hořčík (Mg), titan (Ti)
oranžová	soli vápníku (Ca)
modrá	soli mědi (Cu)
fialová	sloučeniny cesia (Cs), rubidia (Rb), soli draslíku (K)
zlatá	železo (Fe)

4.10.2 PRVKY POUŽÍVANÉ PRO ZBARVENÍ PLAMENE

- **stroncium** – soli stroncia dodávají plameni červenou barvu a stroncium jako takové slouží i jako stabilizátor v ohňostrojevých směsích (Steinhauser, 2008b). Jasně rudý plamen produkuje chlorid strontnatý (SrCl_2), stejně jako chlorečnan strontnatý ($\text{Sr}(\text{ClO}_3)_2$). Nejčastěji používaný je dusičnan strontnatý ($\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$). Dále se používá také šťavelan strontnatý (SrC_2O_4).
- **lithium** – lithium se, stejně jako stroncium, používá pro vytváření červeně zbarvených efektů (Koch, 2004). Konkrétní používané látky jsou například chlorid lithný (karmínová barva, LiCl), dusičnan lithný (LiNO_3) nebo uhličitan lithný (Li_2CO_3).

- **baryum** – soli barya se používají pro vytvoření zeleně zbarvených efektů (Loke, 1992). Baryum také slouží ke stabilizaci jiných těžkých prvků. Jasně zelené barvy lze docílit například pomocí chloridu barnatého (BaCl_2), chlorečnanu barnatého ($\text{Ba}(\text{ClO}_3)_2$), uhličitanu barnatého (BaCO_3) nebo chromanu barnatého (BaCrO_4).
- **vápník** – vápník se obecně používá ke zvýraznění barev ostatních. Vápníkové soli pak vytváří oranžově zbarvený plamen (Sekar, 2004). Používá se například chlorid vápenatý (CaCl_2), uhličitan vápenatý (CaCO_3) nebo síran vápenatý (CaSO_4).
- **sodík** – sodík dodává ohňostrojným efektům žlutou barvu (Loke, 1992), zbarvení je často tak jasné, že přibíjí ostatní méně výrazné barvy (Drewnick, 2006). Krásně žlutého plamene lze dosáhnout i obyčejnou kuchyňskou solí (chlorid sodný, NaCl). Dalšími příklady jsou uhličitan sodný (Na_2CO_3), hydrogenuhličitan sodný (NaHCO_3), dusičnan sodný (NaNO_3), kryolit (hexafluorohlinitan, Na_3AlF_6) nebo šťavelan sodný ($\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$).
- **hliník** – v pyrotechnice dodává hliník stříbrné a bílé zbarvení (Grima, 2012). Používá se ve formě velmi jemného prášku do světlic a pro vytvoření efektivních stříbrných a bílých jisker.
- **hořčík** – hoření hořčíku způsobuje velmi jasně bílé zbarvené jiskry a celkově podporuje barevnost efektů (Brain, 2001). Je vysoce hořlavý.
- **titan** – jemný titanový prášek funguje jako zdroj jasně hořících bílých a stříbřitých jisker (Woodford, 2003).
- **měď** – díky mědi mají efekty modrozelenou barvu. Pro modré zbarvení se používají halogenidy mědi. Modrá barva obecně představuje nejsložitější zbarvení pro ohňostrůjce (Dolata, 2005; Cobb, 2006). Většina efektů má spíše modrozelené či modrofialové zbarvení. Jasně modré efekty byly velmi dlouho nedosažitelné. Při vysokých teplotách již barva není patrná, stejně jako při nízkých. Je tedy nutné dosáhnout naprosto přesného rozmezí teplot. U jiných prvků se se zvyšující se teplotou barva zvýrazňuje, u modré dosahované mědi, tomu tak není. V současnosti je nejlepšími výsledky dosahováno použitím chloridu měďnatého (CuCl), dále se používá například uhličitan měďnatý (CuCO_3), síran měďnatý (CuSO_4), oxid měďnatý (CuO), oxid měďný (Cu_2O), toxický arsenit měďnatý (CuHAsO_3) nebo vysoce toxický acetoarsenitan měďnatý (Pařížská zeleň, $\text{Cu}(\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)_2 \cdot 3\text{Cu}(\text{AsO}_2)_2$).
- **cesium** – cesium napomáhá procesu oxidace. Sloučeniny obsahující cesium vytváří modrofialově a fialově zbarvené efekty (Palaneeswarria, 2012). Jedná se o nestálý a silně reaktivní alkalický kov. Používá se například dusičnan cesný (CsNO_3).

- **draslík** – draslík obsahující sloučeniny napomáhají oxidačním procesům. Dodává efektům fialovorůžový nádech (Sanger, 2004). Barevný efekt ale není příliš výrazný.
- **rubidium** – sloučeniny rubidia napomáhají oxidaci a produkují fialovočervenou barvu (Jefferson, 2001). Do ohňostrojových směsí se přidávají málokdy, protože se jedná o lehce radioaktivní prvek.
- **železo** – železo se používá především pro vytváření jisker. Teplota kovu pak určuje jejich barevný nádech (Meyerriecks, 2003). Výsledné efekty mají zlatavé zbarvení, především při kombinaci s uhlíkem.
- **bor** – bor a jeho sloučeniny zbarvují plamen do intenzivní zelené. Jeho výhodou oproti baryu je netoxičita (Sabatini, 2011). Zatím se příliš nepoužívá, jako vhodná alternativa k baryu se jeví karbid boru (B_4C), černá a velmi tvrdá chemicky odolná látka.
- **fosfor** – fosfor sám o sobě se ke zbarvení nepoužívá, ale slouží pro dodání větší záře tmavším efektům. Bývá také někdy součástí palivových směsí.
- **antimon** – dodává výsledným efektům větší třpyt a záři
- **zinek** – používá se k vytváření kouřových efektů

H																	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba		Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra		Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Uub	Uut	Uuq	Uup	Uuh	Uus	Uuo

La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

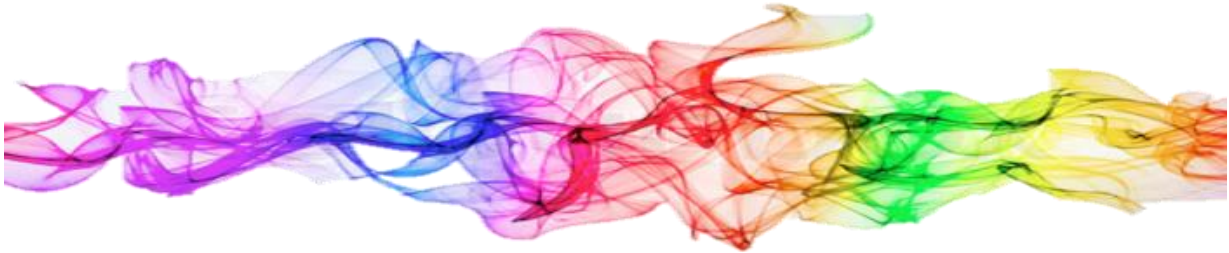
4.10.3 BAREVNÝ DÝM

U dýmu je žádoucí spíše pomalá rychlost hoření a nedokonalé hoření, vedoucí ke vzniku velkého množství kouře. Pro barvení dýmu se používají různá barviva.

Příklady barviv používaných pro barvení dýmu:

- **bílý dým** – antracen, chlorid amonný, umělý bílý dým (speciální pyrotechnická netoxická směs používaná například pro filmové efekty nebo na koncertech)

- **černý dým** – antracen s chloristanem draselným a sírou, naftalen, asfalt
- **červený dým** – rhodamin, paračerveň, Versálová červeň
- **modrý dým** – Versálová modř, Methylenová modř, barvivo Indigo
- **žlutý dým** – Auramin, Versálová žluť
- **oranžový dým** – Versálová oranž
- **fialový dým** – dimethylaminoantrachinon
- **zelený dým** – Malachitová zeleň, Auramin + Indigo



5. KVALITA OVZDUŠÍ – PLYNY

Koncentrace plynných znečišťujících látek byly sledovány automatickými analyzátory v měřícím voze v 10minutovém intervalu po celou dobu konání akce, tedy od 2. června do dopoledních hodin 14. června. Výběr sledovaných plynů odpovídá plynům, pro které je dán platný imisní limit v Zákoně o ochraně ovzduší.

Měřené plyny:

- NO₂ oxid dusičitý
- NO oxid dusnatý
- NO_x oxidy dusíku
- CO oxid uhelnatý
- SO₂ oxid siřičitý

Imisní limity pro ochranu zdraví

Znečišťující látka	Doba průměrování	Imisní limit μg/m ³
NO ₂	1 hodina	200 maximálně 18x za rok
	kalendářní rok	40
SO ₂	1 hodina	350 maximálně 24x za rok
	24 hodin	125 maximálně 3x za rok
PM ₁₀	24 hodin	50 maximálně 35x za rok
	kalendářní rok	40
PM _{2,5}	kalendářní rok	25
CO	maximální denní 8h klouzavý průměr	10 000

Imisní limity pro ochranu ekosystémů a vegetace

Znečišťující látka	Doba průměrování	Imisní limit μg/m ³
NO _x	kalendářní rok	30
SO ₂	rok a zimní období (říjen – březen)	20

5.1 OXID DUSIČITÝ (NO₂)

Oxid dusičitý je v čisté plynné formě červenohnědý a silně agresivní a jedovatý.

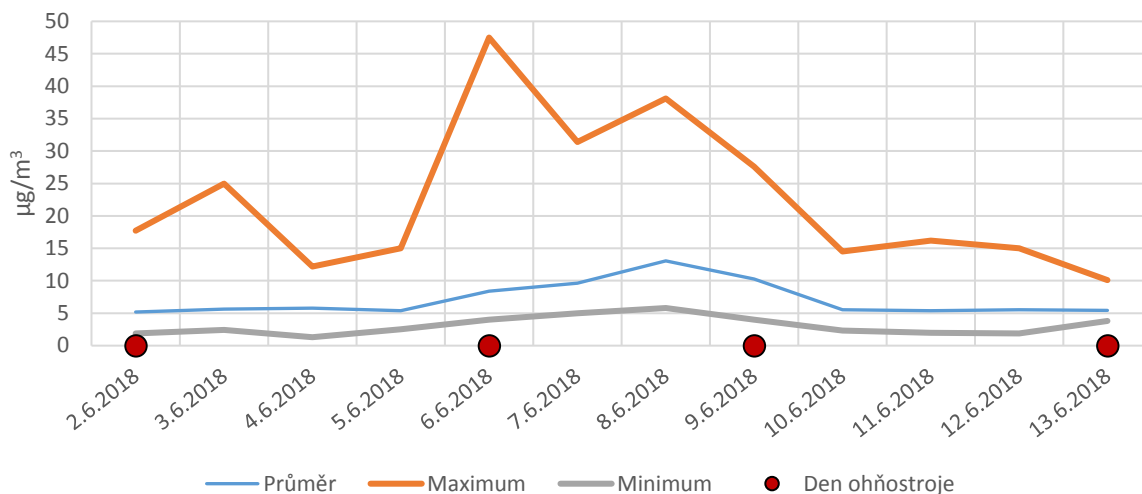
Měření oxidu dusičitého je založeno na chemiluminiscenci. Koncentrace tohoto plynu jsou zjišťovány sekundárně z rozdílu mezi koncentracemi oxidu dusnatého (NO) a oxidů dusíku (NO_x, = NO + NO₂). Hodinový imisní limit pro NO₂ je 200 µg/m³ a může být překročen maximálně 18x za rok. Roční imisní limit NO₂ je 40 µg/m³.

Nejvýznamnějším zdrojem oxidu dusičitého je doprava a v menší míře průmysl a domácnosti (WHO, 2006). Vzniká oxidací vzdušného dusíku za vysokých teplot ve spalovacích motorech. Patří na seznam plynů podílejících se na tvorbě nežádoucích kyselých dešťů (Kumar, S., 2017). Navíc spolu s kyslíkem a těkavými organickými látkami (VOC) reaguje za vzniku přízemního ozonu, polutantu, který může ve vysokých koncentracích vyvolat fotochemický smog. Působení NO₂ bývá spojováno se zvýšením celkové, kardiovaskulární a respirační úmrtnosti (SZÚ, 2016).

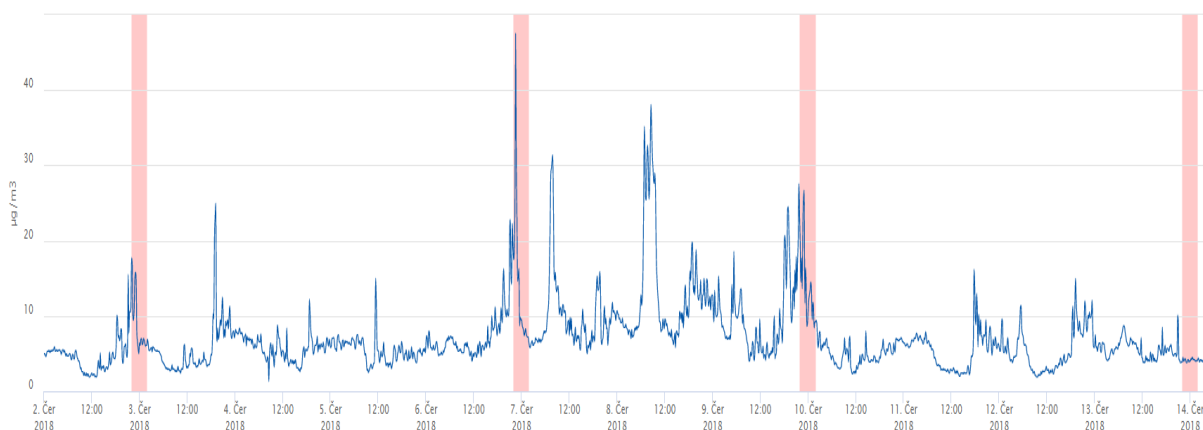
Za emisemi NO₂ v souvislosti s konáním ohňostrojevé přehídky Ignis Brunensis stálo jak hoření pyrotechnických složí, tak i výrazně vyšší dopravní zatížení celé oblasti a přilehlých částí. To narůstalo především ve dnech konání ohňostrojů. Je však nutné poznamenat, že přímo do areálu přístaviště nebyl povolen vjezd (pouze s povolením), parkoviště byla obsazena pouťovými atrakcemi a parkoviště vyhrazená pro parkování osob přijíždějících na ohňostroje byla několik set metrů a více vzdálená od místa měření. Navíc leží Brno jihovýchodně od přehrady a místa měření, tedy přesně v opačném směru, než kudy převážně na přehradě fouká.

Tabulka 10 - Denní průměrné, maximální a minimální koncentrace NO₂ [µg/m³]. Dny s ohňostrojem jsou zvýrazněny oranžově.

Datum	Průměr	Max	Min
2. 6. 2018	5,18	17,7	1,9
3. 6. 2018	5,63	25	2,4
4. 6. 2018	5,77	12,2	1,3
5. 6. 2018	5,4	15	2,5
6. 6. 2018	8,37	47,5	4
7. 6. 2018	9,61	31,4	5
8. 6. 2018	13,07	38,1	5,8
9. 6. 2018	10,26	27,6	4
10. 6. 2018	5,55	14,5	2,3
11. 6. 2018	5,4	16,2	2
12. 6. 2018	5,53	15	1,9
13. 6. 2018	5,42	10,1	3,8



Obrázek 18 - Denní průměrné, maximální a minimální koncentrace NO₂ [µg/m³]. Dny s ohňostrojem jsou zvýrazněny červeným bodem pod osou.

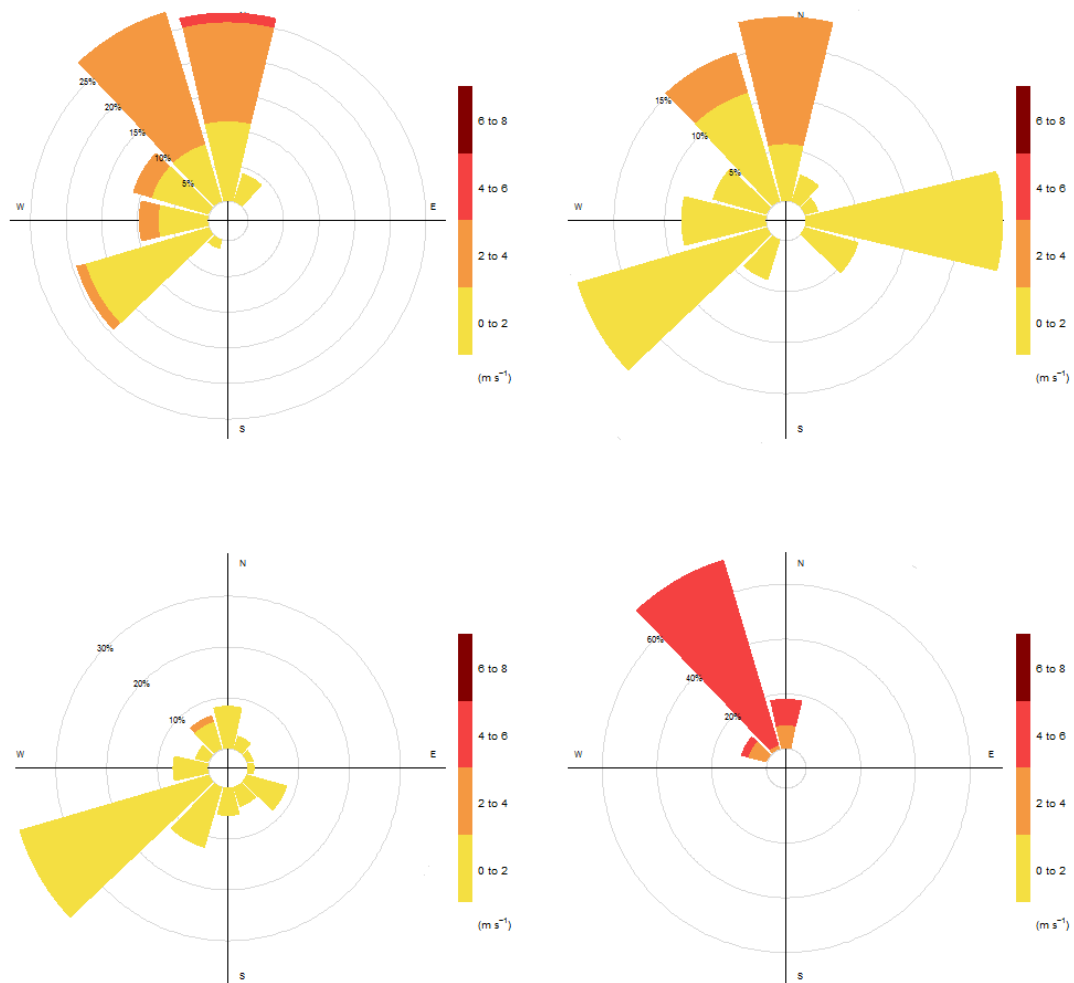


Obrázek 19 - Průběh koncentrací NO₂ za celé období měření z 10minutových hodnot. Růžově jsou vyšrafována období konání ohňostroje (22:00-02:00).

Nejvyšší denní průměrná koncentrace NO₂ byla naměřena 8. června, tedy v den, kdy se žádný ohňostroj nekonal. Je však nutné podívat se na kratší období. Ohňostrojevá show trvá jen přibližně 20 minut, proto se dočasné zvýšené koncentrace můžou ve 24h průměru ztratit, roli zde totiž samozřejmě hrají i meteorologické podmínky – především směr a rychlost větru.

Více vypovídající hodnotou jsou denní maxima. Absolutně nejvyšší hodnota naměřená během měřicího období byla 47,5 µg/m³. Toto maximum bylo naměřeno 6. června ve 22:30 – tedy přesně v momentě začátku druhého soutěžního ohňostroje. To odpovídá hypotéze, že jsou vyšší koncentrace NO₂ dány zvýšenou dopravou v okolí místa konání a právě na začátku ohňostroje lze očekávat vyvrcholení postupného navyšování koncentrací s příjezdem návštěvníků do místa konání. Proč byly takto vysoké koncentrace naměřeny pouze u druhého ohňostroje? Možnou logickou příčinou tohoto faktu je opět hypotéza zvýšené dopravy. Jak je vidět z níže uvedené větrné růžice, byl tento ohňostroj jediný, kdy foukalo i od JV, právě v tomto směru leží parkoviště a výjezd z přehrady. Během prvního a

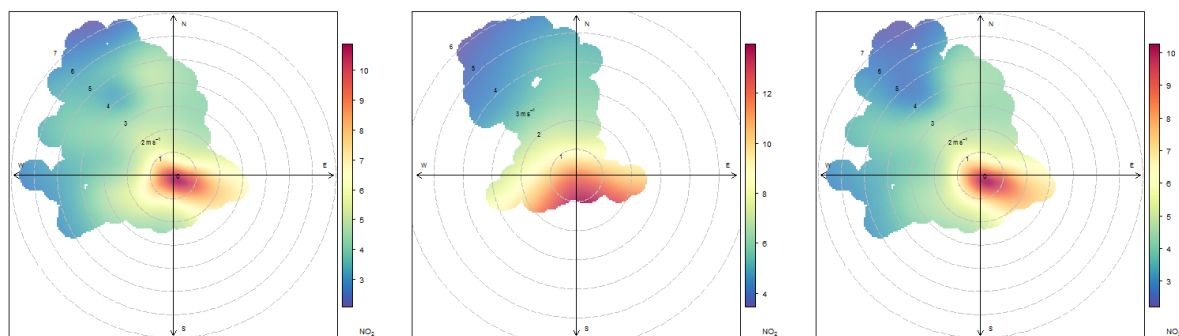
čtvrtého ohňostroje foukalo ze SZ, tedy od místa odpaliště a přehrady, kde nelze předpokládat zdroj emisí NO₂.



Obrázek 20 - větrné růžice z doby konání jednotlivých ohňostrojů (22:00-02:00). Ohňostroj 2. 6. (vlevo nahoře), ohňostroj 6. 6. (vpravo nahoře), ohňostroj 9. 6. (vlevo dole), ohňostroj 13. 6. (vpravo dole).

Určitý nárůst koncentrací NO₂ je vidět na celkovém grafu vývoje (Obrázek 15) i těsně před prvním a třetím ohňostrojem. U čtvrtého ohňostroje jsou z grafu patrné velmi nízké koncentrace NO₂. Tento fakt vysvětluje větrná růžice z daného období. Vítr ten večer foukal téměř výhradně ze SZ, tedy přesně opačně, než byl směr měřícího vozu od oblasti zvýšené intenzity dopravy, navíc na rozdíl od dalších ohňostrojů byly na první pohled vyšší rychlosti větru. Kombinace těchto dvou faktorů pak znamená, že nárůst emisí NO₂ z dopravy patrný u ostatních ohňostrojů zde není patrný, protože byly tyto látky rychle přenášeny směrem od měřící techniky.

Potvrzením výše uvedených hypotéz je i pohled na koncentrační růžice NO₂.



Obrázek 21 - Koncentrační růžice pro NO_2 . Zcela vlevo růžice za celou dobu měření. Uprostřed agregovaná růžice z období konání ohňostrojí (vždy 22:00 před začátkem ohňostroje do 02:00 následujícího dne). Vpravo je pak období mimo ohňostroje, tedy rozdíl mezi první a druhou koncentrační růžicí.

Všechny koncentrační růžice jasně ukazují na primární směr nejvyššího znečištění od JV, tedy směru, kudy proudí hlavní proud dopravy na přehradu. Z místa odpaliště a přehrady (SZ) jsou koncentrace velmi nízké. Z prostřední koncentrační růžice jsou vidět vyšší koncentrace v období ohňostroje. Nejvyšší koncentrace jsou pak při nižších rychlostech větru, kdy jsou emise NO_2 pomaleji rozptylovány do okolí.

Závěrem tedy lze říci, že z výsledků vyplývá, že jsou před konáním ohňostroje pozorovány nárůsty NO_2 , související téměř jistě se zvýšenou dopravní intenzitou v okolí, především jihovýchodně od místa měření v lokalitě parkovišť a silnic. Nelze však říci, že by se jednalo o nějak alarmující koncentrace NO_2 . Absolutně nejvyšší hodnota naměřená za celou dobu měření v jednom z 10minutových intervalů od 2. do 14. června byla $47,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, tedy jen mírně nad ročním imisním limitem. Navíc se jednalo jen o velmi dočasný nárůst. Vůbec nejvyšší hodinová koncentrace za celé období měření byla $31,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Imisní limit pro hodinovou koncentraci NO_2 je více než šestinásobný.

5.2 OXID DUSNATÝ (NO)

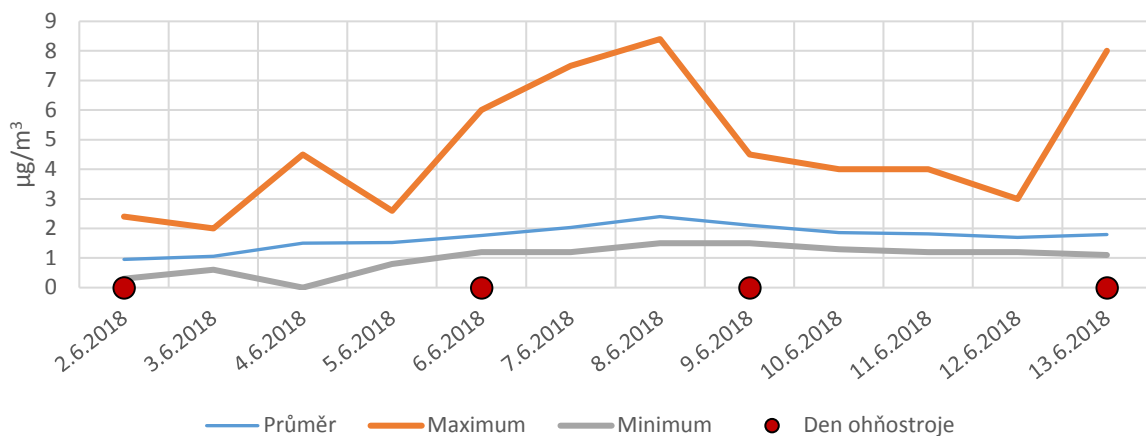
Oxid dusnatý je za normálních podmínek bezbarvý až nahnědlý plyn s velmi výrazným a specifickým zápachem. Jedná se o velmi reaktivní molekulu, která rychle reaguje na NO₂, tedy představuje dočasný intermediát v řadě chemických reakcí probíhajících jak v troposféře, tak ve stratosféře.

Měření oxidu dusnatého je založeno na chemiluminiscenci. Přímo pro NO není specifikován imisní limit, je však platný imisní limit pro NO_x pro ochranu ekosystémů a vegetace, tedy součet koncentrací oxidů dusičitého a právě dusnatého.

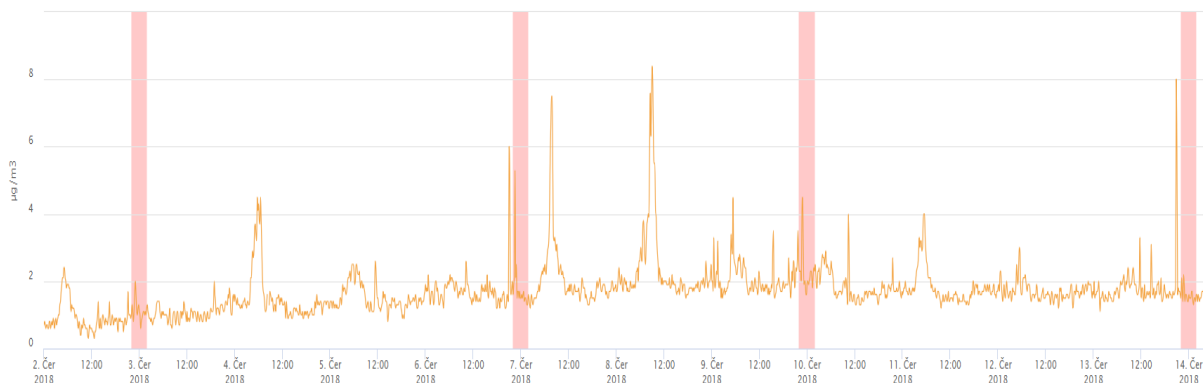
Stejně jako v případě NO₂, samotné pyrotechnické efekty oxid dusnatý neprodukují. Jak již bylo popsáno v sekci o NO₂, je zdrojem oxidů dusíku především spalování ve spalovacích motorech. Byl tedy předpokládán stejný trend, jako v případě NO₂.

Tabulka 11 - Denní průměrné, maximální a minimální koncentrace NO [μg/m³]. Dny s ohňostrojem jsou zvýrazněny oranžově.

Datum	Průměr	Max	Min
2. 6. 2018	0,953	2,4	0,3
3. 6. 2018	1,06	2	0,6
4. 6. 2018	1,50	4,5	0
5. 6. 2018	1,52	2,6	0,8
6. 6. 2018	1,76	6	1,2
7. 6. 2018	2,03	7,5	1,2
8. 6. 2018	2,40	8,4	1,5
9. 6. 2018	2,10	4,5	1,5
10. 6. 2018	1,85	4	1,3
11. 6. 2018	1,81	4	1,2
12. 6. 2018	1,70	3	1,2
13. 6. 2018	1,80	8	1,1

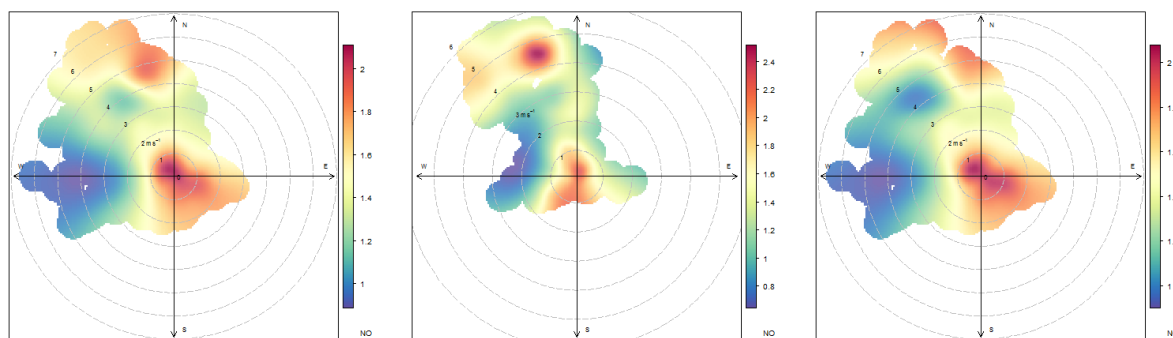


Obrázek 22 - Denní průměrné, maximální a minimální koncentrace NO [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]. Dny s ohňostrojem jsou zvýrazněny červeným bodem pod osou.



Obrázek 23 - Průběh koncentrací NO za celé období měření z 10minutových hodnot. Růžově jsou vyšrafována období konání ohňostroje (22:00-02:00).

Z výše uvedené tabulky a grafů je patrné, že koncentrace NO příliš nekorelují s konáním ohňostroje. Koncentrace NO jsou nižší než NO_2 , jelikož se jedná o dočasný meziprodukt. Velmi tedy záleží na meteorologických podmínkách a podmínkách pro oxidaci NO na NO_2 . NO jako takový nebezpečný pro zdraví není, na rozdíl od produktů, které může pomoci vytvářet.



Obrázek 24 - Koncentrační růžice pro NO. Zcela vlevo růžice za celou dobu měření. Uprostřed agregovaná růžice z období konání ohňostroju (vždy 22:00 před začátkem ohňostroje do 02:00 následujícího dne). Vpravo je pak období mimo ohňostroje, tedy rozdíl mezi první a druhou koncentrační růžicí.

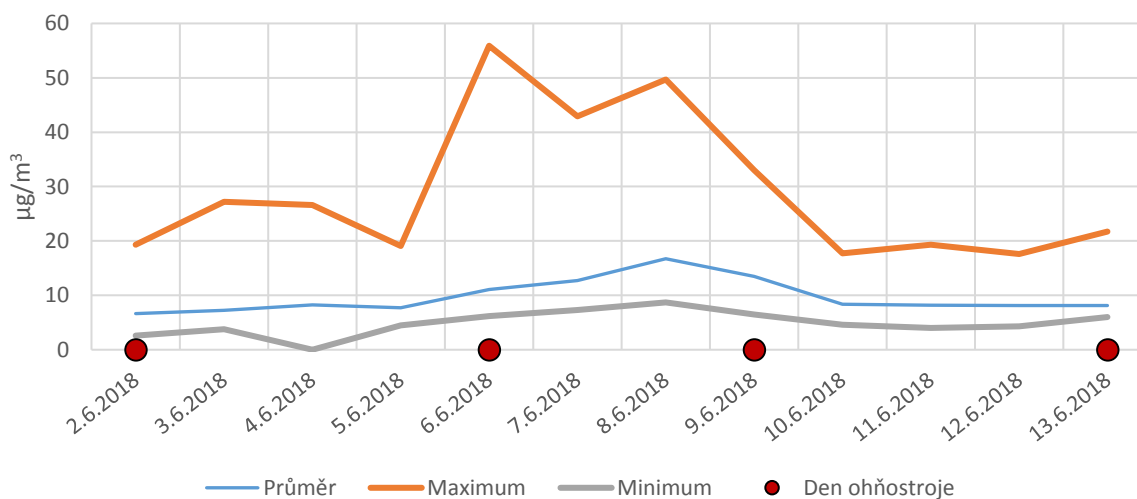
5.3 OXIDY DUSÍKU (NO_x)

Jako oxidy dusíku je v oblasti kvality ovzduší považován součet koncentrací oxidu dusičitého a oxidu dusnatého. Vzhledem k faktu, že NO je přechodný meziprodukt a rychle oxiduje mj. na NO₂, jsou koncentrace NO_x závislé především na koncentracích NO₂.

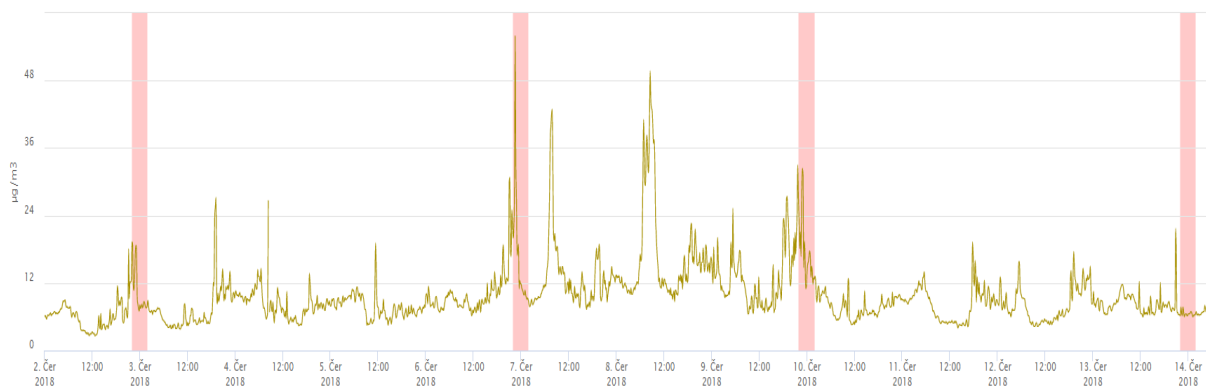
Mechanismy vzniku a působení těchto dvou plynů jsou popsány v předchozích podkapitolách tohoto textu. Následuje tedy pouze výčet statistických hodnot a grafů pro úplnost.

Tabulka 12 - Denní průměrné, maximální a minimální koncentrace NO_x [μg/m³]. Dny s ohňostrojem jsou zvýrazněny oranžově.

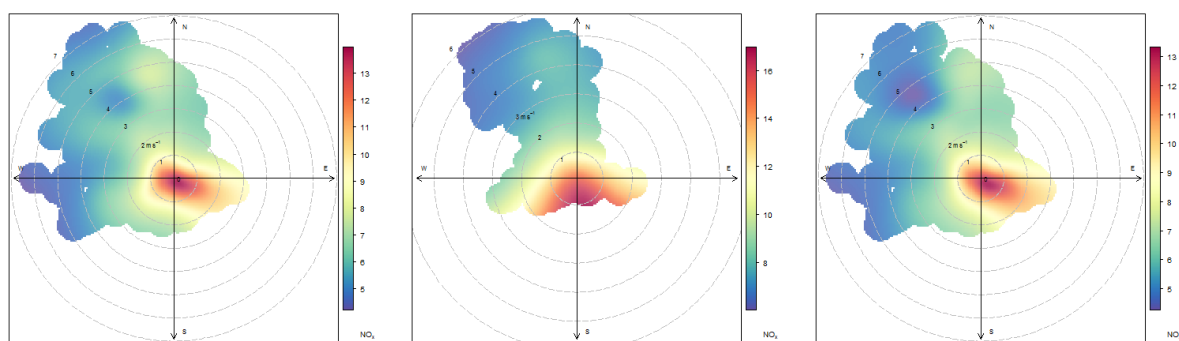
Datum	Průměr	Max	Min
2. 6. 2018	6,64	19,3	2,6
3. 6. 2018	7,25	27,2	3,8
4. 6. 2018	8,23	26,6	0
5. 6. 2018	7,73	19,1	4,5
6. 6. 2018	11,06	55,9	6,2
7. 6. 2018	12,72	42,9	7,3
8. 6. 2018	16,73	49,7	8,7
9. 6. 2018	13,48	33	6,5
10. 6. 2018	8,39	17,7	4,6
11. 6. 2018	8,17	19,3	4
12. 6. 2018	8,12	17,6	4,3
13. 6. 2018	8,15	21,7	6



Obrázek 25 - Denní průměrné, maximální a minimální koncentrace NO_x [μg/m³]. Dny s ohňostrojem jsou zvýrazněny červeným bodem pod osou.



Obrázek 26 - Průběh koncentrací NO_x za celé období měření z 10minutových hodnot. Růžově jsou vyšrafována období konání ohňostroje (22:00-02:00).



Obrázek 27 - Koncentrační růžice pro NO_x . Zcela vlevo růžice za celou dobu měření. Uprostřed agregovaná růžice z období konání ohňostrojí (vždy 22:00 před začátkem ohňostroje do 02:00 následujícího dne). Vpravo je pak období mimo ohňostroje, tedy rozdíl mezi první.

Pro NO_x nebyl stanoven imisní limit pro ochranu zdraví, je však dán imisní limit pro ochranu ekosystémů a vegetace. Hodnota tohoto ročního imisního limitu je $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Z výše uvedených dat vyplývá, že celková průměrná koncentrace NO_x za celou dobu měření je pod $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Pouze jediný den byla průměrná koncentrace vyšší než je $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$, tedy polovina ročního imisního limitu. Závěrem tedy lze říct, že koncentrace oxidů dusíku během akce Ignis Brunensis nepřekračují ani imisní limit pro ekosystémy a vegetace. Průměrné koncentrace po dobu konání přehlídky byly v průměru více než třikrát nižší, než je hodnota ročního imisního limitu.

5.4 OXID SIŘIČITÝ (SO₂)

Oxid siřičitý je bezbarvý štiplavě zapáchající jedovatý plyn. V minulosti se jednalo o jeden z nejproblematictějších polutantů, co se týče kvality ovzduší. Přírodním zdrojem oxidu siřičitého v ovzduší je vulkanická činnost (Wallace, 1994), hlavním zdrojem je však lidská činnost (Smith, 2011). Do ovzduší se dostává spalováním fosilních paliv během průmyslových procesů i v domácnostech z lokálních topenišť. Vzniká jako vedlejší produkt spalování hnědého uhlí. Díky využívání kvalitnějších paliv a technologických procesů včetně odsiřování kouře z elektráren již dnes v drtivé většině případů¹ nepřekračují koncentrace SO₂ platné imisní limity.

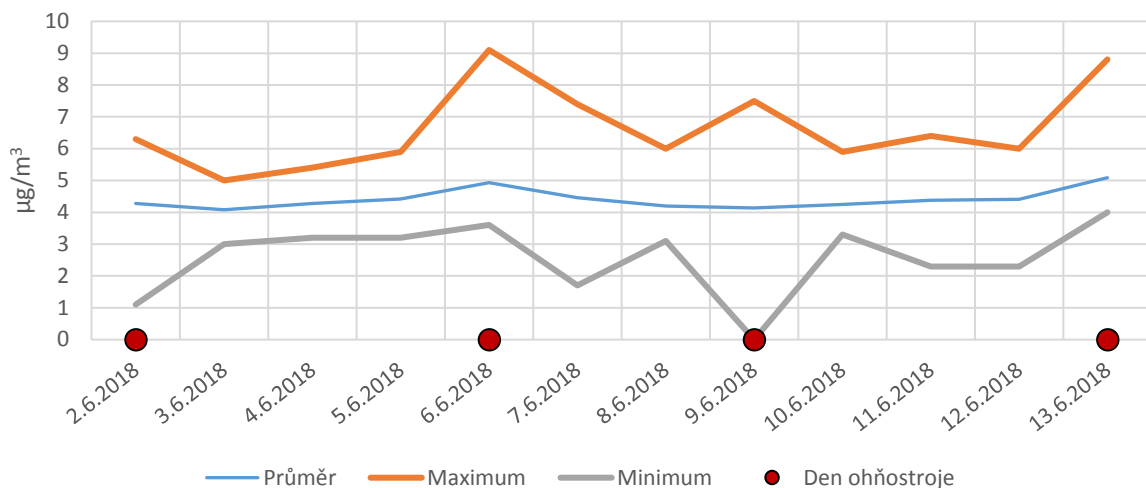
Pro oxid siřičitý jsou platné imisní limity jak pro ochranu zdraví, tak pro ochranu ekosystémů a vegetace. Hodinový imisní limit pro ochranu zdraví je rovný 350 µg/m³ a může být překročen maximálně 24x za rok. 24h imisní limit pro ochranu zdraví byl stanoven na 125 µg/m³ a může být překročen maximálně 3x za rok. Imisní limit pro ochranu ekosystému a vegetace je platný pro rok a zimní období (říjen-březen) a má hodnotu 20 µg/m³.

Oxid siřičitý je značně toxický plyn, který představuje velké riziko zejména pro rostliny, protože reakcí s chlorofylem narušuje fotosyntézu (Choi, 2014). U lidí působí dráždivě zejména na horní cesty dýchací, může podporovat vznik astmatu a dlouhodobá expozice vysokým koncentracím může narušovat krevní oběh a poškozovat srdeční sval (Kermani, 2016; Geravandi, 2015; Lewis, 2016).

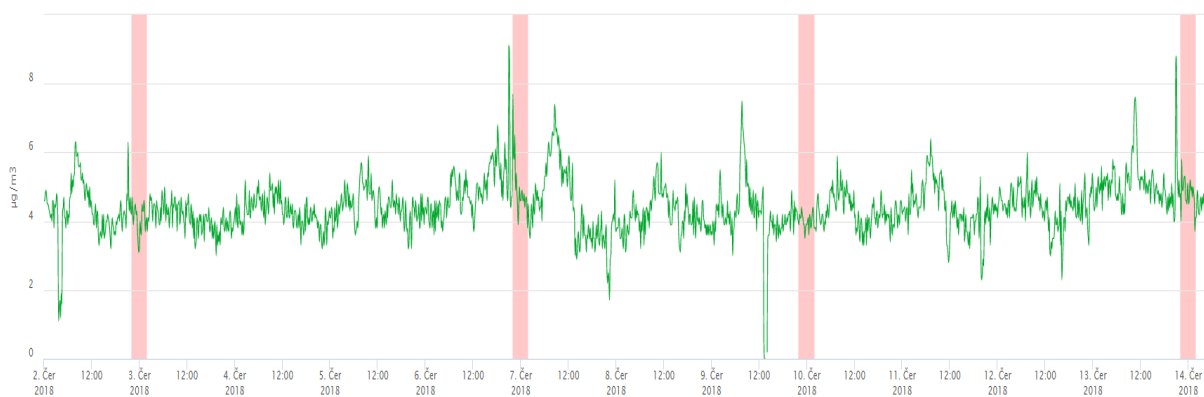
Tabulka 13 - Denní průměrné, maximální a minimální koncentrace SO₂ [µg/m³]. Dny s ohňostrojem jsou zvýrazněny oranžově.

Datum	Průměr	Max	Min
2. 6. 2018	4,277	6,3	1,1
3. 6. 2018	4,08	5	3
4. 6. 2018	4,27	5,4	3,2
5. 6. 2018	4,42	5,9	3,2
6. 6. 2018	4,93	9,1	3,6
7. 6. 2018	4,46	7,4	1,7
8. 6. 2018	4,20	6	3,1
9. 6. 2018	4,14	7,5	0
10. 6. 2018	4,25	5,9	3,3
11. 6. 2018	4,38	6,4	2,3
12. 6. 2018	4,41	6	2,3
13. 6. 2018	5,09	8,8	4

¹ v roce 2017 nebyl 24h imisní limit překročen ani jednou na žádné ze stanic Státní sítě imisního monitoringu. Hodinová maximální koncentrace 350 µg/m³ byla v roce 2017 překročena na celkem 4 stanicích (Ostrava-Přívoz, Plzeň-Lochotín, Pardubice-Rosice a Ostrava-Mariánské Hory), za překročení limitu se však považuje, až pokud dojde k překročení 24x za rok, k čemuž na žádné ze čtyř stanic nedošlo (Ostrava-Přívoz 2x, zbylé jednou).

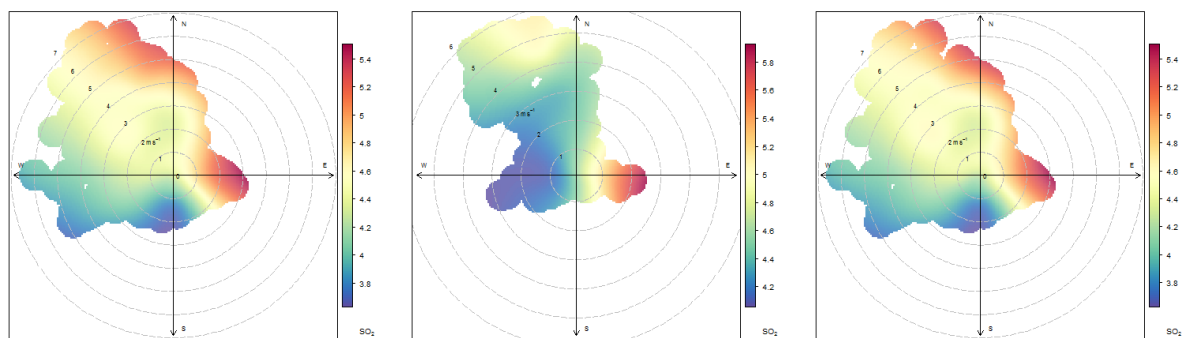


Obrázek 28 - Denní průměrné, maximální a minimální koncentrace SO₂ [µg/m³]. Dny s ohňostrojem jsou zvýrazněny červeným bodem pod osou.



Obrázek 29 - Průběh koncentrací SO₂ za celé období měření z 10minutových hodnot. Růžově jsou vyšrafována období konání ohňostroje (22:00-02:00).

Během celé délky trvání měření nepřekročila koncentrace SO₂ ani jednou hranici 10 µg/m³. Z grafu průměrných koncentrací je vidět, že se během celé show prakticky neměnila. Absolutní naměřené maximum mělo hodnotu pouhých 9,1 µg/m³, pokud tuto hodnotu srovnáme s hodinovým imisním limitem (350 µg/m³), jedná se o hodnotu necelých 3 % limitu. Denní průměry jsou také hluboko pod 24h imisním limitem. Pohybovaly se pod, či nepatrně nad 5 µg/m³, což představuje hladinu 4 % 24h imisního limitu.



Obrázek 30 - Koncentrační růžice pro SO_2 . Zcela vlevo růžice za celou dobu měření. Uprostřed agregovaná růžice z období konání ohňostrojů (vždy 22:00 před začátkem ohňostroje do 02:00 následujícího dne). Vpravo je pak období mimo ohňostroje, tedy rozdíl mezi první a druhou koncentrační růžicí.

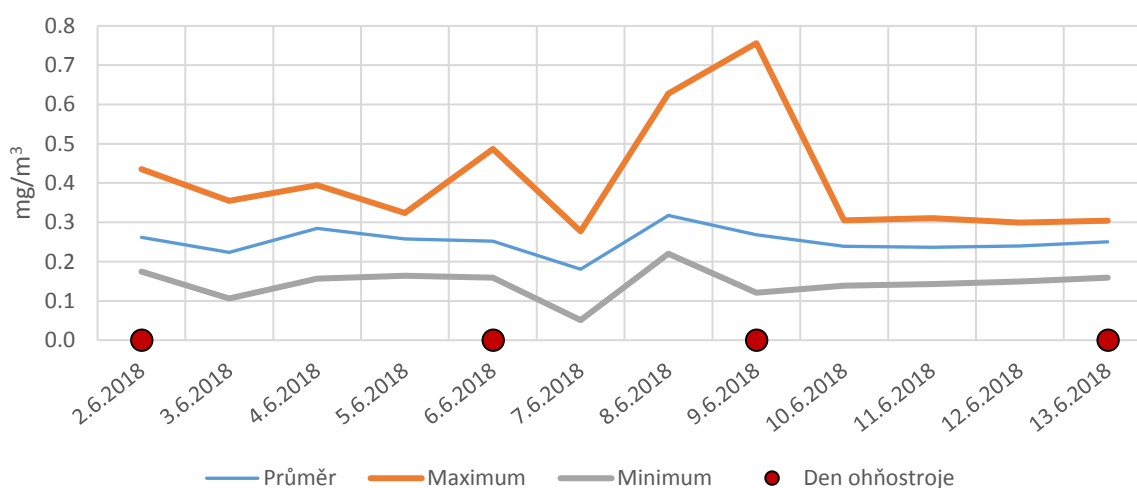
5.5 OXID UHELNATÝ (CO)

Oxid uhelnatý je bezbarvý jedovatý plyn, bez zápachu. Vzhledem ke své toxicitě se jedná o jednu ze sledovaných látek znečišťujících ovzduší. Hlavním antropogenním zdrojem CO je především nedokonalé spalování fosilních paliv, kdy je teplota příliš nízká, není k dispozici dostatečné množství kyslíku nebo není čas hoření dostatečný, a namísto úplné oxidace na CO₂ se uvolňuje právě oxid uhelnatý (Ergin, 2016). Toxicita tohoto plynu spočívá v jeho vazbě na krevní barvivo hemoglobin a následný vznik karboxyhemoglobinu (Rose, 2017). Tato reakce značně omezí přenos kyslíku do buněk.

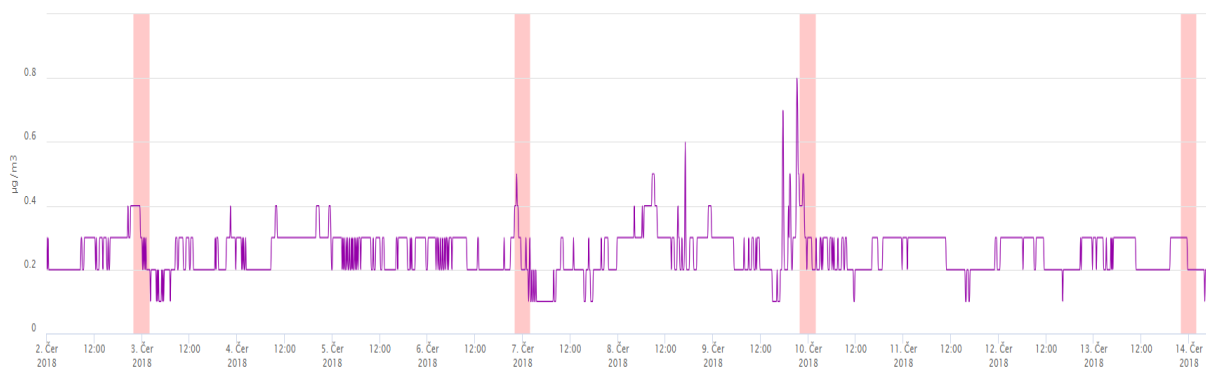
Imisní limit pro oxid uhelnatý je 10 mg/m³ jako maximální denní 8h klouzavý průměr.

Tabulka 14 - Denní průměrné, maximální a minimální koncentrace CO [mg/m³]. Dny s ohňostrojem jsou zvýrazněny oranžově.

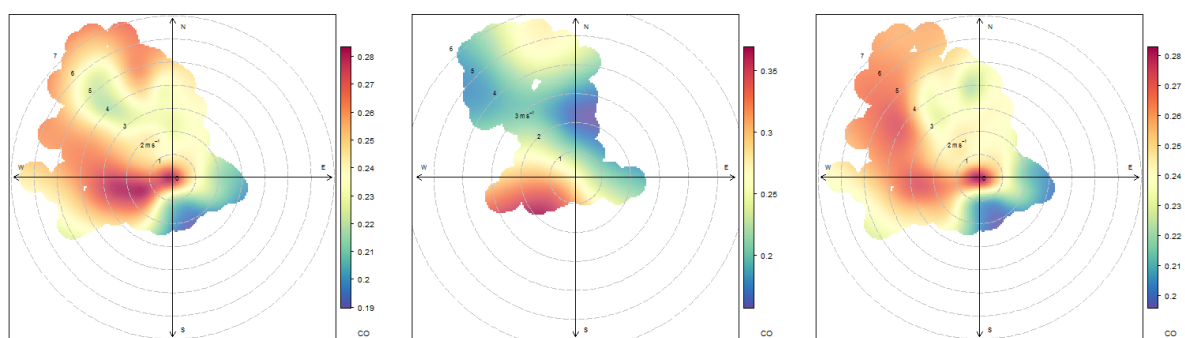
Datum	Průměr	Max	Min
2. 6. 2018	0,262	0,435	0,175
3. 6. 2018	0,22	0,355	0,106
4. 6. 2018	0,28	0,395	0,157
5. 6. 2018	0,26	0,324	0,164
6. 6. 2018	0,25	0,487	0,159
7. 6. 2018	0,18	0,277	0,051
8. 6. 2018	0,32	0,628	0,22
9. 6. 2018	0,27	0,756	0,121
10. 6. 2018	0,24	0,305	0,139
11. 6. 2018	0,24	0,311	0,143
12. 6. 2018	0,24	0,299	0,149
13. 6. 2018	0,25	0,304	0,159



Obrázek 31 - Denní průměrné, maximální a minimální koncentrace CO [mg/m³]. Dny s ohňostrojem jsou zvýrazněny červeným bodem pod osou.



Obrázek 32 - Průběh koncentrací CO za celé období měření z 10minutových hodnot. Růžově jsou vyšrafována období konání ohňostroje (22:00-02:00).



Obrázek 33 - Koncentrační růžice pro CO. Zcela vlevo růžice za celou dobu měření. Uprostřed agregovaná růžice z období konání ohňostrojí (vždy 22:00 před začátkem ohňostroje do 02:00 následujícího dne). Vpravo je pak období mimo ohňostroje, tedy rozdíl mezi první a druhou koncentrační růžicí.

Absolutně maximální naměřená hodnota CO byla pouhých $0,756 \text{ mg/m}^3$. To neodpovídá ani 10 % imisního limitu. Průměrné denní koncentrace pak byly ještě přibližně třikrát nižší. Lze tedy říci, že ohňostrojevá přehlídka nemá na koncentrace CO dle předpokladů žádný vliv a naměřené koncentrace jsou hluboko pod imisním limitem pro ochranu zdraví.

6. KVALITA OVZDUŠÍ – SUSPENDOVANÉ ČÁSTICE (PM)

6.1 ZÁKLADNÍ POPIS

Suspendované částice (particulate matter, PM) představují komplexní směs extrémně malých pevných částic a kapiček v ovzduší. Základní dělení PM je založeno na jejich aerodynamickém průměru. Právě jejich velikost je totiž klíčová pro dopady na zdraví (Kim, 2015). Čím menší je velikost částic, tím hlouběji pronikají do dýchacího systému a ultrajemné částice (< 0,1 μm) se můžou dostávat až do krevního oběhu.

Částice PM samy o sobě můžou působit dráždivě. Zároveň však na ně můžou být přichyceny různé další zdraví škodlivé látky, jako například těžké kovy. Kromě velikosti hraje roli také jejich morfologie a chemické složení. Neexistuje bezpečná spodní hranice a negativní zdravotní účinky můžou být zaznamenány i při velmi nízkých koncentracích (Trasande, 2016).

Zdrojem suspendovaných částic v ovzduší jsou jak přírodní procesy, tak antropogenní činnost. Z přirozených procesů je to například větrná eroze nebo vulkanická činnost. Z lidských zdrojů je to celá řada technologických procesů, spalování odpadu, doprava, vytápění atd. (Vierkötter, 2017). Nezanedbatelným zdrojem suspendovaných částic je i víření prachu, tzv. resuspenze (Hetem, 2016). To se týká nejen dopravy, ale například i chodců.

Během ohňostrojevé přehlídky Ignis Brunensis lze předpokládat zvýšené koncentrace PM, a to jak v důsledku pyrotechnických efektů, tak velmi vysokého počtu osob na malém prostoru.

6.2 MĚŘENÍ SUSPENDOVANÝCH ČÁSTIC

V rámci tohoto měření byly měřeny koncentrace dvou frakcí suspendovaných částic – částic označovaných jako PM_{10} (aerodynamický průměr do $10\ \mu m$) a jemnější frakce $PM_{2,5}$ (částice s aerodynamickým průměrem do $2,5\ \mu m$). S ohledem na lidské zdraví jsou potenciálně nebezpečnější částice $PM_{2,5}$, protože vzhledem ke své menší velikosti pronikají po vdechnutí hlouběji do dýchacího systému (Kim JY, 2015). Suspendované částice jsou v současnosti jedním z hlavních problémů znečištění ovzduší v České republice, protože v některých místech bývají překračovány imisní limity, v topné sezóně mohou být kvůli PM vyhlášovány smogové situace.

Existuje více možných způsobů, jak koncentrace suspendované částic měřit. Za referenční metodu je považována gravimetrie. Ta spočívá v navzorkování na filtr a následném zvážení exponovaného filtru a porovnání s váhou filtru čistého. Rozdíl hmotnosti odpovídá množství PM, což lze při znalosti průtoku a délky měření převést na koncentraci v $\mu g/m^3$ v ovzduší. Další možností měření PM je využití radiometrie, s použitím automatických β -prachoměrů. Částice jsou v tomto případě zachycovány na filtrační pásku a ta se odvíjí mezi β -zářičem a Geiger-Müllerovým počítačem. Rozdíl mezi radiací před a po zachycení částic představuje množství prašných aerosolových částic zachycených na filtru. Výhodou gravimetrie je fakt, že se jedná o referenční metodu a proto je považována za nejpřesnější, navíc lze exponované filtry využít následně k dalším analýzám a stanovit například koncentrace kovů. Naopak výhodou automatických prachoměrů je, že poskytují data v reálném čase v mnohem kratším intervalu.

Během akce Ignis Brunensis byly měřeny koncentrace částic PM_{10} radiometricky měřicím vozem v 10minutovém intervalu. Tato měření tak umožňují monitorovat dynamiku koncentrací PM_{10} v průběhu dne.

Kromě PM_{10} částic byly sledovány i částice $PM_{2,5}$. Jak již bylo zmíněno, na zvýšených koncentracích se podílí nejen pyrotechnické efekty, ale i další lidské vlivy jako obecně pohyb vysokého počtu lidí na malém prostoru (resuspenze) či jejich činnost (kouření, grilování apod.). Mechanické vlivy produkují ve větší míře hrubší frakci. Chemické reakce a spalování produkuje ve větší míře jemnější frakci, proto data o koncentracích $PM_{2,5}$ mohou lépe odhalit vliv samotných pyrotechnických efektů (Tian, 2014). Částice $PM_{2,5}$ byly měřeny gravimetricky sekvenčním vzorkovačem. Ohňostroje samotné trvaly vždy jen přibližně 17 až 18 minut každý, proto pohled na 24h průměr může být zkreslující a zahrnoval by celou řadu dalších vlivů. Z tohoto důvodu bylo zvoleno vzorkování ve 4h intervalech, vždy tak, aby první čtyřhodinový interval zahrnoval dobu těsně před ohňostrojem, druhý interval dobu ohňostroje a čas bezprostředně po něm a třetí interval následnou noc. Ohňostroje začínaly vždy ve

22:30, první interval byl zvolen od 18 do 22 h, druhý od 22 do 2 h následujícího dne a poslední navazující interval od 2 do 6 h v noci.

Některé z filtrů ze sekvenčních vzorkovačů byly určeny pro následnou analýzu koncentrací kovů (viz dále). V ideálním případě by mohla být tato analýza provedena na všech vzorcích, z finančních důvodů však bylo vybráno jen několik měření a to vždy tak, aby byly kovy analyzovány vícekrát z ohňostroje i z dne mimo ohňostroj.

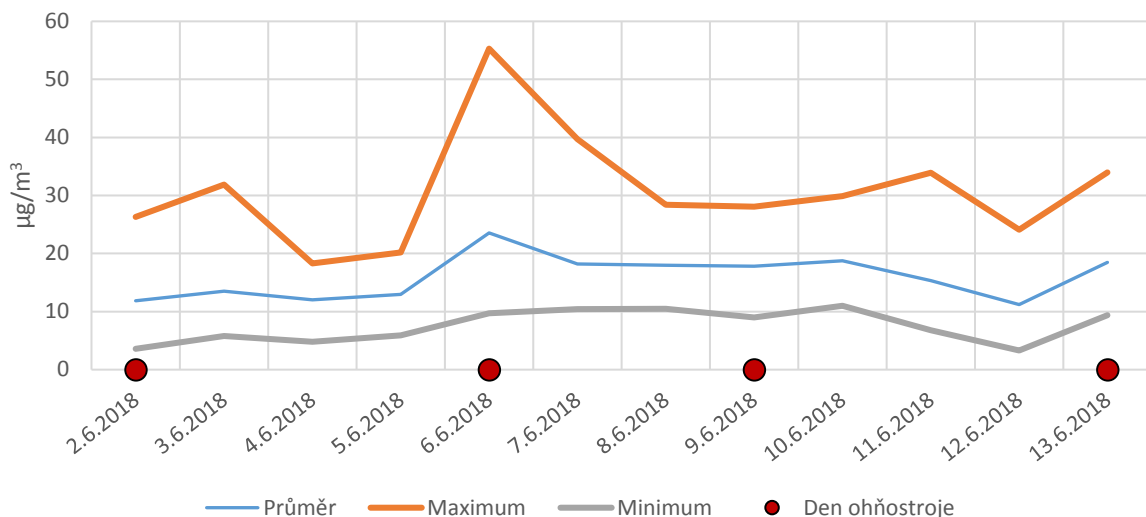
6.3 PM₁₀ – RADIOMETRICKY

Koncentrace suspendovaných částic PM₁₀ byla měřena v 10minutových intervalech měřícím vozem. Legislativa udává pro PM₁₀ dva imisní limity. 24h limit má hodnotu 50 µg/m³ a smí být překročen maximálně 35x za rok. Roční imisní limit PM₁₀ je 40 µg/m³.

PM₁₀ jsou znečišťující látkou, jejíž koncentrace je ovlivňována přehlídkou a to hned kvůli několika faktorům. Prvním z nich jsou samotné pyrotechnické efekty. Exploze pyrotechnických složí ve vzduchu produkuje a šíří do okolí větší množství částic. Stejně tak jsou koncentrace PM₁₀ zvyšovány vysokou intenzitou pohybu lidí. Statisíce návštěvníků, které každoročně ohňostroj navštíví, se podílí na zvýšené prašnosti – mechanickým vířením prachu chůzí, cigaretovým kouřem, zvýšenou intenzitou dopravy, emisemi ze stánků s občerstvením (grily) atd. Vzorkovače byly umístěny tak, aby nedocházelo k hyperlokálnímu zkreslení – tzn. tak, aby v jejich bezprostřední blízkosti nebyly žádné osoby. Stačilo by totiž, aby si jedna osoba zapálila cigaretu přímo vedle vzorkovače a došlo by k výraznému zkreslení výsledků. Na druhou stranu však bylo měřící místo umístěno stále dostatečně blízko davům lidí na to, aby tento faktor byl zaznamenán. Znalost koncentrace sama o sobě neumožňuje zjistit podíl, jakým se tyto faktory na výsledné koncentraci podílí.

Tabulka 15 - Denní průměrné, maximální a minimální koncentrace PM₁₀ [µg/m³]. Dny s ohňostrojem jsou zvýrazněny oranžově.

Datum	Průměr	Max	Min
2. 6. 2018	11,88	26,3	3,6
3. 6. 2018	13,53	31,9	5,8
4. 6. 2018	12,01	18,3	4,8
5. 6. 2018	12,97	20,2	5,9
6. 6. 2018	23,55	55,3	9,7
7. 6. 2018	18,23	39,7	10,4
8. 6. 2018	18,00	28,4	10,5
9. 6. 2018	17,83	28,1	9
10. 6. 2018	18,74	29,9	11
11. 6. 2018	15,35	33,9	6,8
12. 6. 2018	11,21	24,1	3,3
13. 6. 2018	18,46	34	9,4

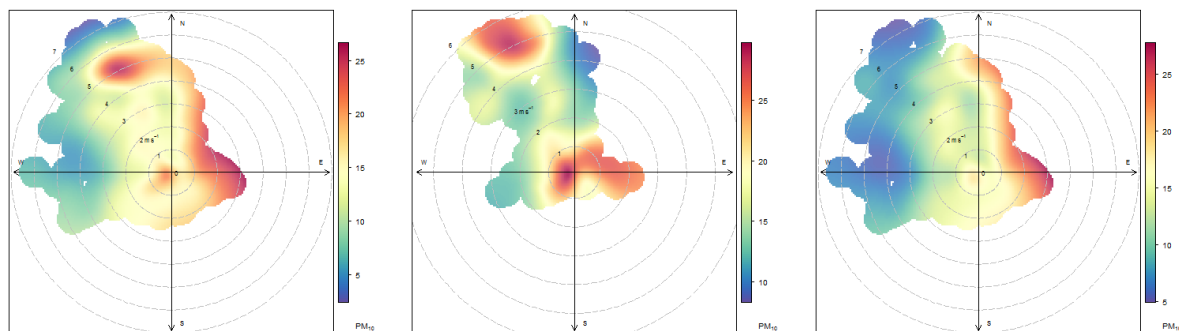


Obrázek 34 - Denní průměrné, maximální a minimální koncentrace PM_{10} [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]. Dny s ohňostrojem jsou zvýrazněny červeným bodem pod osou.



Obrázek 35 - Průběh koncentrací PM_{10} za celé období měření z 10minutových hodnot. Růžově jsou vyznačována období konání ohňostroje (22:00-02:00).

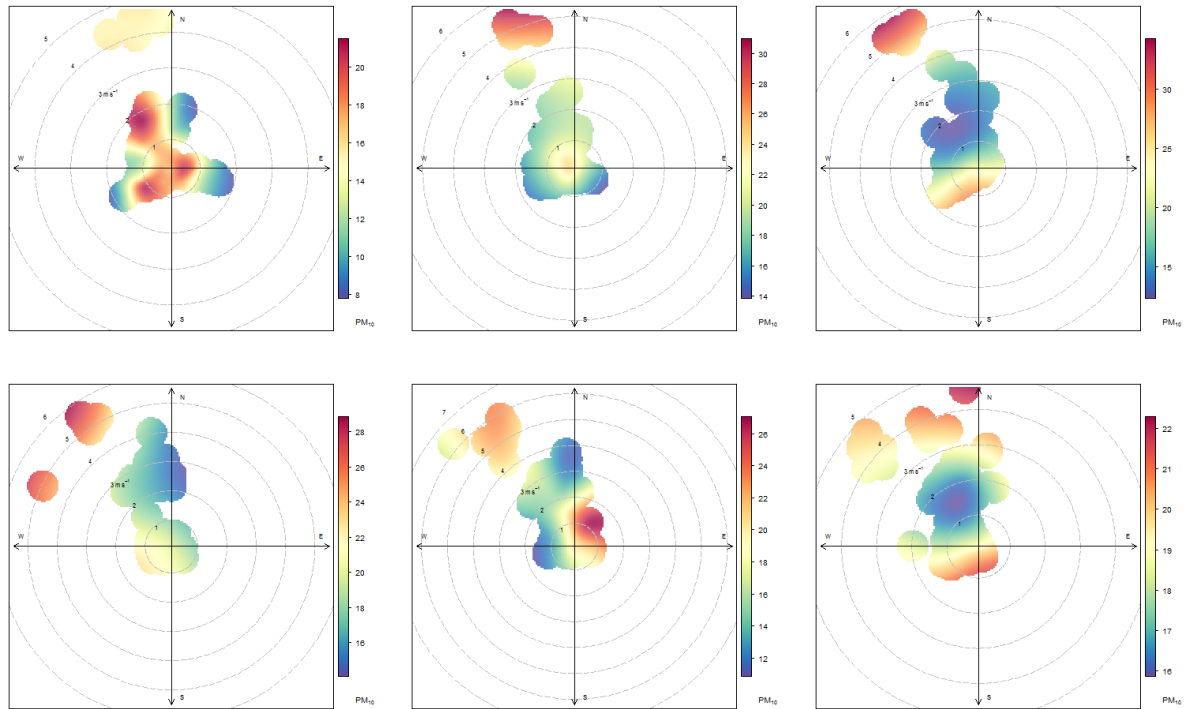
Tabulka průměrných denních koncentrací ukazuje, že nejvyšší denní průměr a zároveň absolutní maximum, byly naměřeny 6. června, v den konání druhého ohňostroje. Výrazný nárůst je vidět na grafu celkového průběhu, kde je jasně patrné, že koncentrace prudce vzrostly těsně před 22 h, což by odpovídalo nejprve vlivu pohybu osob, ke kterému se následně přidala kouřová vlečka z ohňostrojů. Nárůsty v době ohňostroje jsou patrné i během prvního a čtvrtého ohňostroje. U třetího ohňostroje koncentrace nijak zvlášť nevyrostly. Možné vysvětlení můžeme opět nalézt ve větrných směrech z jednotlivých ohňostrojů (viz Obrázek 20). Byl to právě třetí ohňostroj, kdy byl směr větru odlišný od ostatních ohňostrojů a foukalo z JZ, tedy nikoliv od pontonu směrem ke vzorkovačům, jako tomu bylo v případě ostatních ohňostrojů. Kouřová vlečka z pyrotechnických efektů se tedy pohybovala jiným směrem a nebyla zachycena měřením. Takto naměřená data jsou velmi užitečná, protože ještě více potvrzují hypotézu, že nárůsty pozorované při ostatních ohňostrojích opravdu byly dány především pyrotechnickými efekty.



Obrázek 36 - Koncentrační růžice pro PM_{10} . Zcela vlevo růžice za celou dobu měření. Uprostřed agregovaná růžice z období konání ohňostrojů (vždy 22:00 před začátkem ohňostroje do 02:00 následujícího dne). Vpravo je pak období mimo ohňostroje, tedy rozdíl mezi první a druhou koncentrační růžicí.

Koncentrační růžice (viz Obrázek 36) potvrzují hypotézu dvou zdrojů. Růžice zcela vlevo je zkonstruována z dat za celé období. Vidíme dvě ohniska největšího znečištění, jedno směrem na V, případně VSV, druhé pak na SSZ. Směrem na východ od měřícího vozu byla velmi frekventovaná cesta, po které chodil vysoký počet osob a východně ležela i cesta příchodová a řada pouťových atrakcí. Naopak směrem na SSZ od měřícího vozu se nacházela odpalovací rampa ohňostrojů, tedy místo, odkud se šířila kouřová vlečka z pyrotechnických efektů za vhodného směru větru. Na růžici uprostřed jsou vyobrazena data pouze z období několika hodin před a několika hodin po ohňostroji (agregováno pro všechny čtyři ohňostroje). Tady vidíme víceméně stejný vzorec jako u celkové růžice vlevo, pouze je místo vozu a místo rampy koncentrovanější (souvisí s menším počtem dat, kde více vyniknou tyto dva extrémy). Poslední růžice odpovídá agregaci období bez ohňostroje, tedy rozdíl od růžice uprostřed. Tady názorně vidíme absenci zdroje na SSZ – primární znečištění PM_{10} zde pochází z V směru, protože i v době mimo ohňostroje se zde pohybovali lidé, fungovaly atrakce atd.

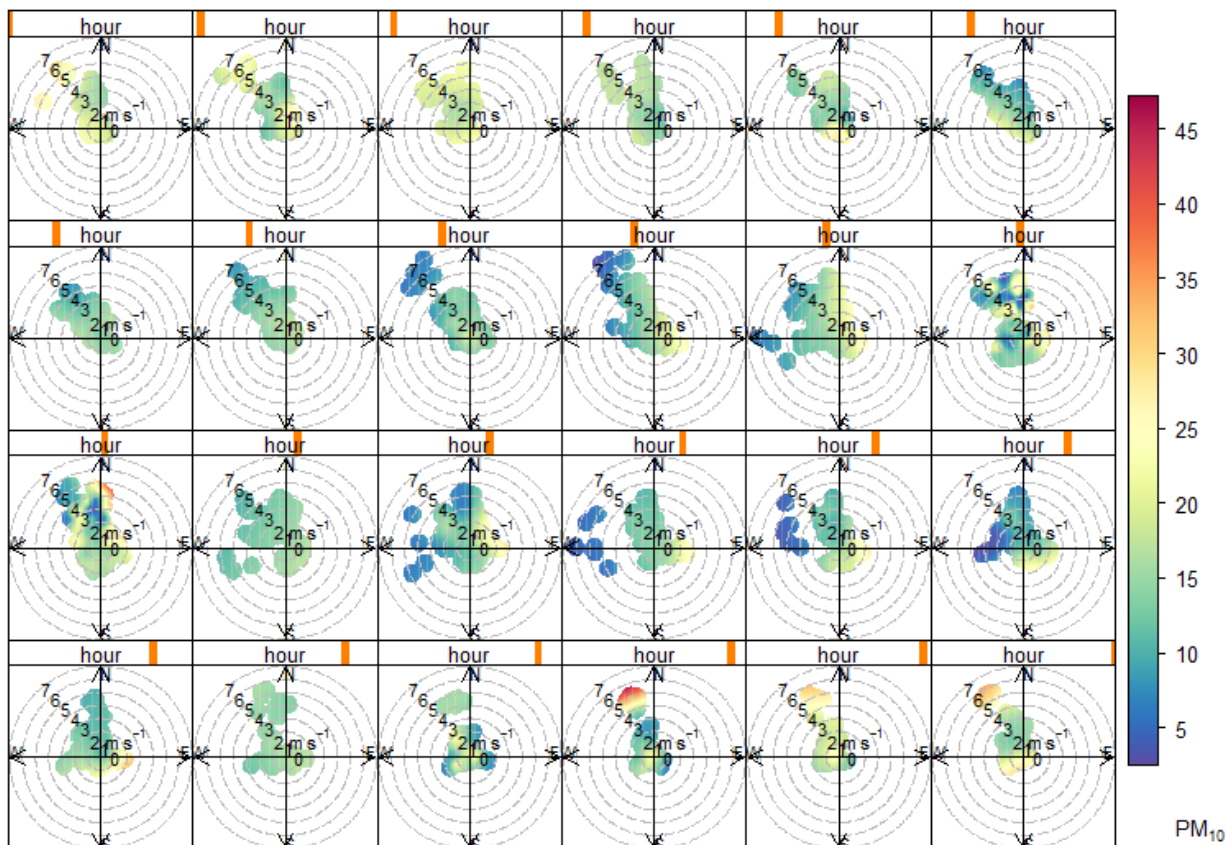
Další možností, jak si zobrazit naměřená data, je konstrukce koncentračních růžic z agregovaných dat pro jednotlivé hodiny.



Obrázek 37 - Koncentrační růžice pro PM_{10} ve dny ohňostrojí, případně následující brzké ranní hodiny. V horním řádku jsou zleva agregovaná data pro interval 20-21 h, uprostřed 22-23 h, vpravo 23-00 h. V dolním řádku vlevo pak 00-01 h, uprostřed 01-02 h a zcela vpravo 02-03 h.

První koncentrační růžice (vlevo nahoře) zobrazuje situaci dvě hodiny před ohňostrojem. Je zde vidět, že není patrné žádný konkrétní směr výraznějšího znečištění. Vyšší koncentrace jsou zaznamenávány hlavně při nízkých rychlostech větru. To naznačuje, že se jedná o znečištění pocházející z pohybu osob, kdy při nízké rychlosti větru nedochází k rychlému rozptýlu. Druhá růžice (nahore uprostřed) už je růžice popisující stav půl hodiny před a přímo po dobu trvání ohňostroje. Zde vidíme jasně patrný přesun nejvyšší koncentrací na SSZ, tedy přesně do směru odpalové rampy. Na růžici v horním řádku vpravo je pak stav od 23 h do půlnoci. Zde přetrvává nejvýznamnější zdroj na SSZ, tedy že se ještě zcela nepřesunula kouřová vlečka z pyrotechnických efektů. Na spodním řádku jsou pak růžice odpovídající následným hodinám od půlnoci až do 3 h ranní. Je vidět, že pomalu mizí zdroj na SSZ – vlečka se rozptýlila do okolí.

Následující obrázek pak ukazuje koncentrační růžice pro PM_{10} za celou dobu měření (nikoliv pouze za dny ohňostrojí). Je vidět, že nejvyšších hodnot bylo dosaženo mezi 22 a 23 hodinou – tedy přesně v době ohňostrojí, které trvaly vždy od 22:30 do přibližně 22:50. Následně vidíme posupné snižování koncentrací až do přibližně 3 h ranní.



Obrázek 38 - Hodinové koncentrační růžice pro PM_{10} za celou dobu měření. Jedná se o časové intervaly 0 h až 23 h, kdy 0 h je vyznačeno zcela vlevo nahoře, naopak 23 h je zcela dole vpravo.

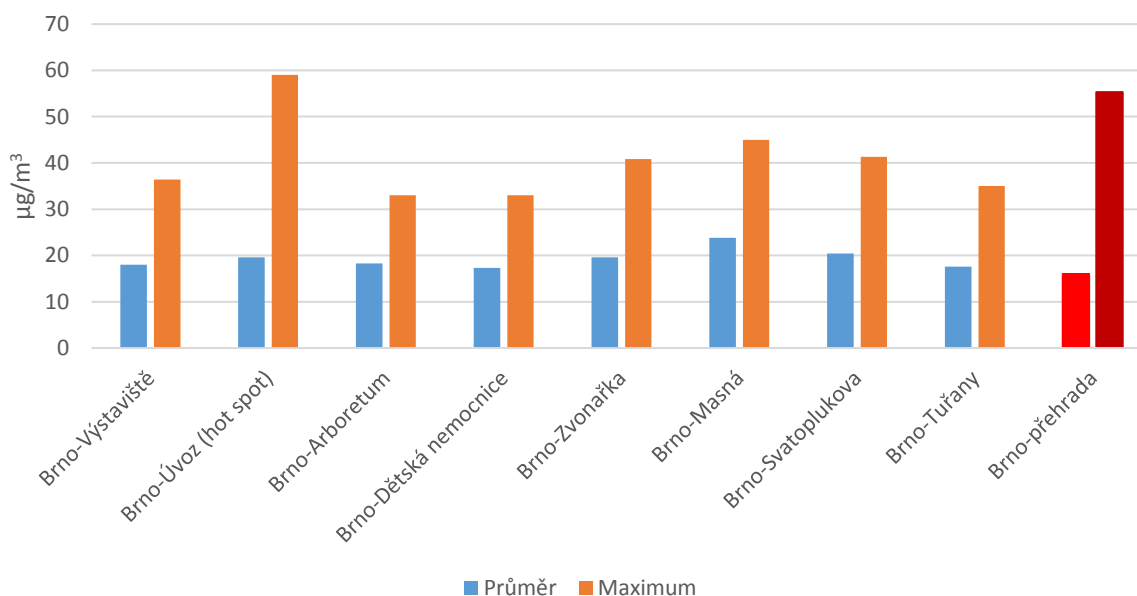
Výše uvedené obrázky a tabulky poukazují na zvýšené koncentrace PM_{10} v době konání ohňostrojí, s předpokládaným vlivem jak velkého množství osob a jejich činností, tak vlivu pyrotechnických efektů odpalovaných v rámci samotných ohňostrojí. Otázkou je, jak významný je tento nárůst.

Celkově nejvyšší naměřená koncentrace během celé akce byla $55,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (6. 6.). Kromě jednoho dne se denní průměry pohybovaly mezi 10 a $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Výjimkou byl 6. červen, kdy byla průměrná denní koncentrace PM_{10} $23,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Imisní limit pro 24h průměrnou koncentraci představuje $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Nebyl tedy překročen ani jednou. Pro srovnání je také možné uvést průměrné a maximální koncentrace z okolních automatických brněnských stanic za stejné období, tedy 2. 6. 2018 až 13. 6. 2018.

Tabulka 16 - Průměrné a maximální koncentrace PM₁₀ v červnu 2016, červnu 2017 a oba červny dohromady na několika brněnských stanic. Červeně zvýrazněny jsou městské dopravní stanice, zeleně městské pozadové a modře předměstská pozadová.

Stanice	vzdálenost od přehrady ² [km]	PM ₁₀ [µg/m ³]	
		Průměr	Max
Brno-Výstaviště	5,86	18,0	36,4
Brno-Úvoz (hot spot)	6,70	19,6	59,0
Brno-Arboretum	7,27	18,3	33,0
Brno-Dětská nemocnice	7,90	17,3	33,0
Brno-Zvonařka	8,65	19,6	40,8
Brno-Masná	9,27	23,8	45,0
Brno-Svatoplukova	9,54	20,4	41,3
Brno-Tuřany	15,85	17,6	35,0

Celková průměrná koncentrace PM₁₀ na brněnské přehradě od 2. 6. do dopoledních hodin 14. 6. byla 16,0 µg/m³. Maximální pak 55,3 µg/m³ (6. 6.).



Obrázek 39 - Průměrné a absolutní koncentrace PM₁₀ na stanicích v Brně a srovnání s daty z brněnské přehrady za období 2. až 6. června 2018.

Při srovnání s okolními stanicemi v Brně je vidět, že celkový průměr za měřené období je na bystrčské stanici nejnižší z porovnávaných stanic. Je nižší než průměr naměřený na stanici Brno-Tuřany, která je příměstskou pozadovou stanicí, situovanou téměř na okraji města. Celkové absolutní maximum je sice druhé nejvyšší po dopravní stanici Brno-Úvoz (hot spot), přesto se ale nedá hodnota 55,3 µg/m³ považovat za vysokou, protože se jednalo o hodnotu naměřenou v jeden desetiminutový

² vzdušnou čarou

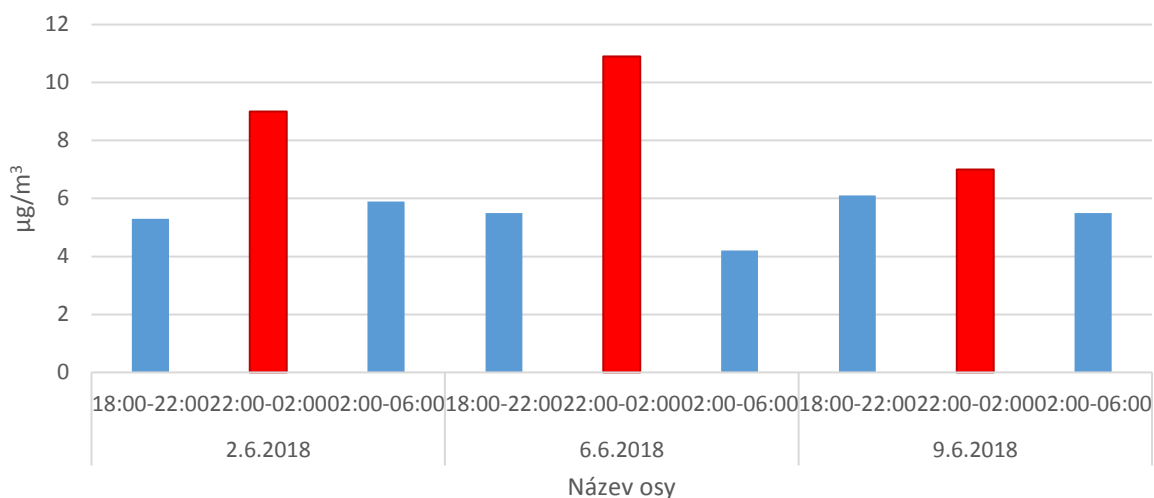
interval, nikoliv hodinový nebo denní průměr. Při špatných rozptylových podmínkách můžou koncentrace PM_{10} v zimě dosahovat hodnot nad $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a to po mnohem delší dobu. Lze tedy říci, že ač dochází v důsledku faktorů spojených s ohňostrojevou show k dočasným zvýšením koncentrací částic PM_{10} , nejsou tyto koncentrace celkově odlišné od ostatních stanic po Brně.

6.4 PM_{2,5} – GRAVIMETRICKY

Koncentrace PM_{2,5} ze 4h intervalů byly stanoveny gravimetrickou analýzou. Níže uvedená tabulka udává průměrné hodinové koncentrace suspendovaných částic PM_{2,5} v jednotlivých čtyřhodinových intervalech během tří ohňostrojů.

Tabulka 17 – průměrné hodinové koncentrace suspendovaných částic PM_{2,5} v jednotlivých 4h intervalech. Intervaly zahrnující ohňostroj jsou zvýrazněny.

Datum	Čas	Koncentrace
2. 6. 2018	18:00-22:00	5,3
	22:00-02:00	9,0
	02:00-06:00	5,9
6. 6. 2018	18:00-22:00	5,5
	22:00-02:00	10,9
	02:00-06:00	4,2
9. 6. 2018	18:00-22:00	6,1
	22:00-02:00	7,0
	02:00-06:00	5,5



Obrázek 40 - průměrné hodinové koncentrace suspendovaných částic PM_{2,5} v jednotlivých 4h intervalech. Intervaly zahrnující ohňostroj jsou zvýrazněny.

Z výše uvedených dat je patrné, že během pořádání ohňostrojů docházelo ke zvýšení koncentrací PM_{2,5}.

7. Kovy

7.1 ZÁKLADNÍ INFORMACE

Těžké kovy obecně představují skupinu kovů a polokovů s relativně vysokou hustotou a atomovou hmotností (většinou se uvádí $> 4 \text{ g/cm}^3$, ale přesná definice není jednotná). Některé z těžkých kovů jsou pro lidské tělo esenciální a je potřeba je v malých nebo stopových množstvích přijímat. Na druhou stranu jejich vysoké koncentrace mohou být vysoce toxické, a proto jsou sledovány nejen v ovzduší, ale i ve vodních a suchozemských ekosystémech a potravinách (Jaishankar, 2014).

Expozice některým kovům může mít řadu negativních zdravotních účinků – mohou být karcinogenní, způsobovat poruchy nervové soustavy nebo poškozovat oběhovou soustavu apod. (Kim H.S., 2015; Zeng, 2016; Lamas, 2016). Koncentrace vybraných kovů jsou proto pravidelně monitorovány a jsou pro ně dané imisní limity.

V současnosti jsou v Zákoně o ochraně ovzduší definovány imisní limity pro celkem čtyři těžké kovy (Tabulka 18). Tyto limity jsou platné pro roční průměrné koncentrace v suspendovaných částicích frakce PM_{10} .

Tabulka 18 - Imisní limity pro ochranu zdraví pro těžké kovy v částicích PM_{10} (roční průměr)

Těžký kov	Doba průměrování	Imisní limit
As arsen	kalendářní rok	6 ng/m^3
Cd kadmium	kalendářní rok	5 ng/m^3
Ni nikl	kalendářní rok	20 ng/m^3
Pb olovo	kalendářní rok	500 ng/m^3

Těžké kovy, s výjimkou olova, nejsou v pyrotechnických složích používány.

Kromě těžkých kovů s imisním limitem byly během ohňostrojové přehlídky stanoveny koncentrace také dalších kovů, pro které není dán imisní limit, a běžně se jejich koncentrace nesledují. Je tomu tak mj. proto, že nemají žádný významný zdroj, nejsou toxické či jsou jejich koncentrace v ovzduší běžně zanedbatelné (Tian, 2014). Během odpalování ohňostrojů je však v pyrotechnických efektech celá řada dalších kovů, které se během výbuchu dostávají do ovzduší. Cílem této analýzy tedy bylo tyto prvky v ovzduší detekovat a kvantifikovat.

V níže uvedených tabulkách koncentrací je v případě koncentrací pod mez detekce uvedena polovina této hodnoty (pokud je tedy mez detekce například $1,0 \text{ ng/m}^3$, v případě koncentrace pod

mezi detekce bylo počítáno s hodnotou 0,5 ng/m³). Tyto hodnoty jsou v tabulkách označeny hvězdičkou. Rovněž průměry počítají v takovém případě s polovinou meze detekce. V následující kapitole jsou pak uvedeny intervaly těchto průměrů, kde minimální hodnota průměru počítá hodnoty pod mezí detekce jako 0,001 ng/m³ a naopak maximální hodnota průměru při počítání hodnot pod mezí detekce jako rovných mezi detekce.

Jelikož je imisní limit stanoven pro koncentrace na částicích PM₁₀ bylo nutné provést převod koncentrací PM_{2,5} na PM₁₀. Pro stanovení koeficientu byla použita data ze stanic Brno-Tuřany, Brno-Lány a Křižanov. Všechny tyto stanice měří jak PM₁₀, tak PM_{2,5} (Brno-Tuřany a Brno-Lány v 10minutovém intervalu, Křižanov gravimetricky v denním kroku). Poměr PM₁₀ a PM_{2,5} byl vypočten pro období 1. až 14. 6. 2018.

Tabulka 19 – Průměrný poměr koncentrací PM₁₀ a PM_{2,5} v období od 1. do 14. června 2018

průměrný poměr PM ₁₀ /PM _{2,5}	
Brno-Tuřany	1,55
Brno-Lány	1,53
Křižanov	1,54

Na základě výše uvedených průměrů byl stanoven koeficient přepočtu jako 1,54 a vynásobením koncentrací PM_{2,5} tímto koeficientem lze získat odhad koncentrace PM₁₀ v daný okamžik na daném místě.

7.2 ARSEN

33
As
Arsen
74,92160

Atomové číslo:	33
Hustota:	5,727 g/cm ³
Teplota tání:	614 °C
Teplota varu:	817 °C



Arsen představuje toxický kov přítomný v řadě organických i anorganických látkách. Přírodní zdroje arsenu jsou vulkanický popel, vymývání hornin nebo mineralizovaná podzemní voda (Keshavarzi, 2011). Pokud se vyskytuje v půdě, dostává se do rostlinných těl a jejich konzumace pak může být velmi nebezpečná (Zhao, 2010). Stejně tak byly zaznamenány případy, kdy byly koncentrace arsenu vysoké ve vodě (atmosférickým spadem), a došlo k otravě osob (Uddin, 2011). Toxicita závisí do velké míry na způsobu, jakým je arsen ve sloučenině navázán. Sloučeniny As³⁺ jsou asi 60x jedovatější než As⁵⁺ (Ratnaik, 2003). Na lidský organismus působí arsen jako karcinogen, vyvolává rakoviny plic a kůže a může zvyšovat pravděpodobnost vzniku nádorů jater, ledvin a močového měchýře (Tokar, 2010; Hosseini, 2013, Letašiová, 2012).

Do ovzduší se arsen dostává spalováním fosilních paliv nebo dřeva konzervovaného přípravky obsahujícími arsen. Vyšší koncentrace se můžou vyskytovat i v okolí metalurgických závodů, které zpracovávají například měď nebo olovo (Yang, 2015).

Imisní limit pro arsen má hodnotu 6 ng/m³ v průměru za kalendářní rok. Hodnoty imisního limitu nejsou v současnosti v Jihomoravském kraji běžně překračovány. V Brně je tento prvek měřen na dvou lokalitách – v Brně-Líšni a na stanici Brno-Masná. Roční průměr v roce 2017 byl 0,7 ng/m³ (Brno-Líšeň) a 0,5 (Brno-Masná). Vyšší koncentrace bývají měřeny v zimním období, v roce 2017 byla nejvyšší průměrná měsíční koncentrace v Brně-Líšni 1,8 ng/m³ (leden) a 1,1 ng/m³ na stanici Brno-Masná (únor).

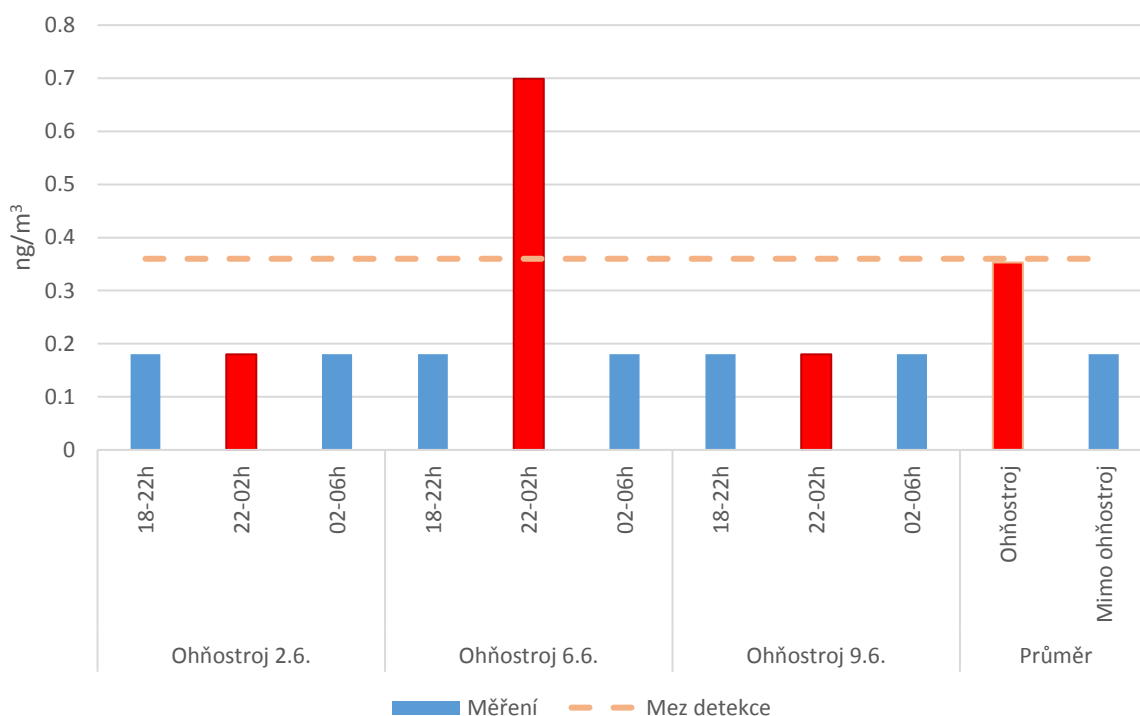
V rámci celé České republiky byla v roce 2017 nejvyšší průměrná roční koncentrace naměřena v lokalitě Kladno-Švermov a to 6,0 ng/m³, tedy přesně hodnota imisního limitu. Druhá nejvyšší hodnota byla 4,2 ng/m³ (Tanvald-školka). V roce 2016 nebyl imisní limit překročen nikde v České republice.

V níže uvedené tabulce jsou naměřené koncentrace arsenu v PM_{2,5} v ng/m³ ve 3 dny, kdy probíhaly ohňostroje – vždy 4 h před ohňostrojem (18-22 h), 4h intervalu zahrnujícím ohňostroj (interval 22-02 h, samotný ohňostroj 22:30-22:50) a následně 4h interval po intervalu s ohňostrojem (02-06 h). Z níže uvedené tabulky je jasně patrné, že se po většinu času pohybovaly koncentrace pod mezí detekce. Maximální koncentrace byla naměřena v intervalu konání ohňostroje 6. 6., 0,70 ng/m³.

Další tabulka pak ukazuje koncentrace arsenu v PM_{10} vypočtené vynásobením $PM_{2,5}$ koncentrací koeficientem 1,54 (viz výše).

Tabulka 20 – Koncentrace arsenu v ovzduší [ng/m^3] v jednotlivých čtyřhodinových intervalech v $PM_{2,5}$ během konání tří ohňostrojů Ignis Brunensis 2018. Oranžově podbarvené jsou intervaly konání samotného ohňostroje. Poslední dva sloupce představují průměr všech 4h intervalu s ohňostrojem (O) a všech šesti 4h intervalů bez ohňostroje (BO). Mez detekce představuje $0,36 ng/m^3$.

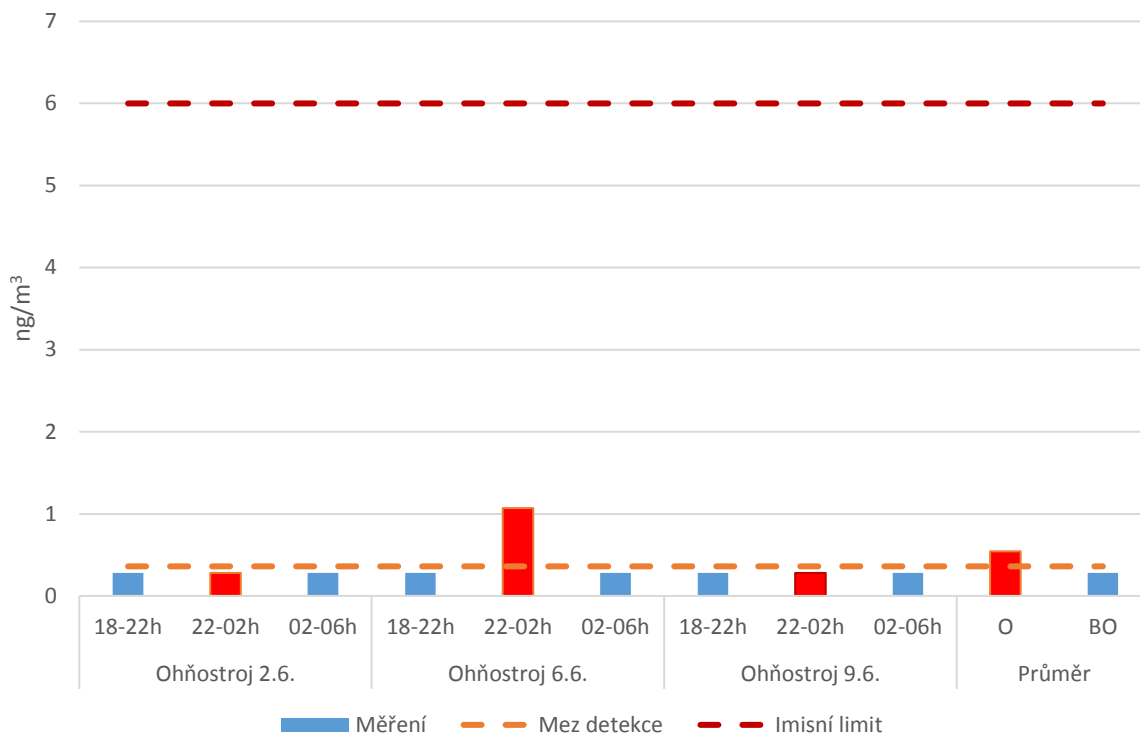
Ohňostroj 2.6.			Ohňostroj 6.6.			Ohňostroj 9.6.			Průměr	
18-22 h	22-02 h	02-06 h	18-22 h	22-02 h	02-06 h	18-22 h	22-02 h	02-06 h	O	BO
0.18*	0.18*	0.18*	0.18*	0.699	0.18*	0.18*	0.18*	0.18*	0.353	0.18*



Obrázek 41 - Koncentrace arsenu v ovzduší [ng/m^3] v jednotlivých čtyřhodinových intervalech v $PM_{2,5}$ během konání tří ohňostrojů Ignis Brunensis 2018. Červeně jsou vyznačeny sloupce intervalu konání ohňostroje a celkový průměr z 4h intervalů ohňostrojů. Oranžová přerušovaná čára značí mez detekce.

Tabulka 21 - Koncentrace arsenu v ovzduší [ng/m^3] v jednotlivých 4h intervalech v PM_{10} během konání tří ohňostrojů Ignis Brunensis 2018. Oranžově podbarvené jsou dny konání samotného ohňostroje. Poslední dva sloupce představují průměr všech měřených intervalů s ohňostrojem (O) a intervalů bez ohňostroje (BO).

Ohňostroj 2.6.			Ohňostroj 6.6.			Ohňostroj 9.6.			Průměr	
18-22 h	22-02 h	02-06 h	18-22 h	22-02 h	02-06 h	18-22 h	22-02 h	02-06 h	O	BO
0.28	0.28	0.28	0.28	1,07	0.28	0.28	0.28	0.28	0.54	0.28



Obrázek 42 – Vypočítané koncentrace arsenu v PM_{10} pro jednotlivé 4h intervaly. V posledním sloupci je průměr ze všech ohňostrojových (O) a bez ohňostrojových (BO) intervalů. Oranžová přerušovaná čára značí mez detekce, červená imisní limit pro roční průměr.

Z výsledků je patrné, že koncentrace arsenu se pohybovaly hluboko pod imisním limitem, který je navíc stanoven pro roční průměr. Vůbec nejvyšší naměřená koncentrace byla během druhého ohňostroje mezi 22 a 2 h a to 0.7 ng/m^3 . Při přepočtu na PM_{10} tedy 1.07 ng/m^3 . Imisní limit má hodnotu 5 ng/m^3 , navíc se jednalo o velmi krátký interval. Lze tedy říci, že z hlediska ochrany zdraví byly koncentrace arsenu během Ignis Brunensis pod imisním limitem.

7.3 KADMIUM

48
Cd
Kadmium
112,41

Atomové číslo:	48
Hustota:	8,65 g/cm ³
Teplota tání:	321 °C
Teplota varu:	767 °C



Kadmium je měkký modrobílý kov nepodléhající korozi. Běžně se používá jako součást baterií, pigmentů nebo například při výrobě televizorů (Linden, 1984; Nordberg, 2015). V lidském těle nemá kadmium žádnou známou funkci (Takeuchi, 2011). Jeho inhalace však může být velmi nebezpečná.

Přírodními zdroji kadmia v ovzduší je především vulkanická činnost, avšak přibližně 90 % tvoří zdroje antropogenní (Lane, 2015). Hlavními zdroji kadmia v ovzduší je těžba, metalurgie, spalování fosilních paliv a odpadů nebo například využívání hnojiv na fosfátové bázi (Grant, 2010). Kadmium se váže na částice v ovzduší a dálkovým přenosem se může přenášet na velké vzdálenosti, kde se následně vyskytuje nejen v ovzduší, ale depozicí se dostává i do vody a půdy.

Jedná se o velmi toxický prvek, který v největší míře poškozuje ledviny, kde dochází k jeho nejvýraznější akumulaci. Podle EPA se jedná o pravděpodobný lidský karcinogen a teratogen. Kromě ledvin vede i k poškození jater, kostí, plic, kardiovaskulárního systému a gastrointestinálního traktu (Friberg, 2017).

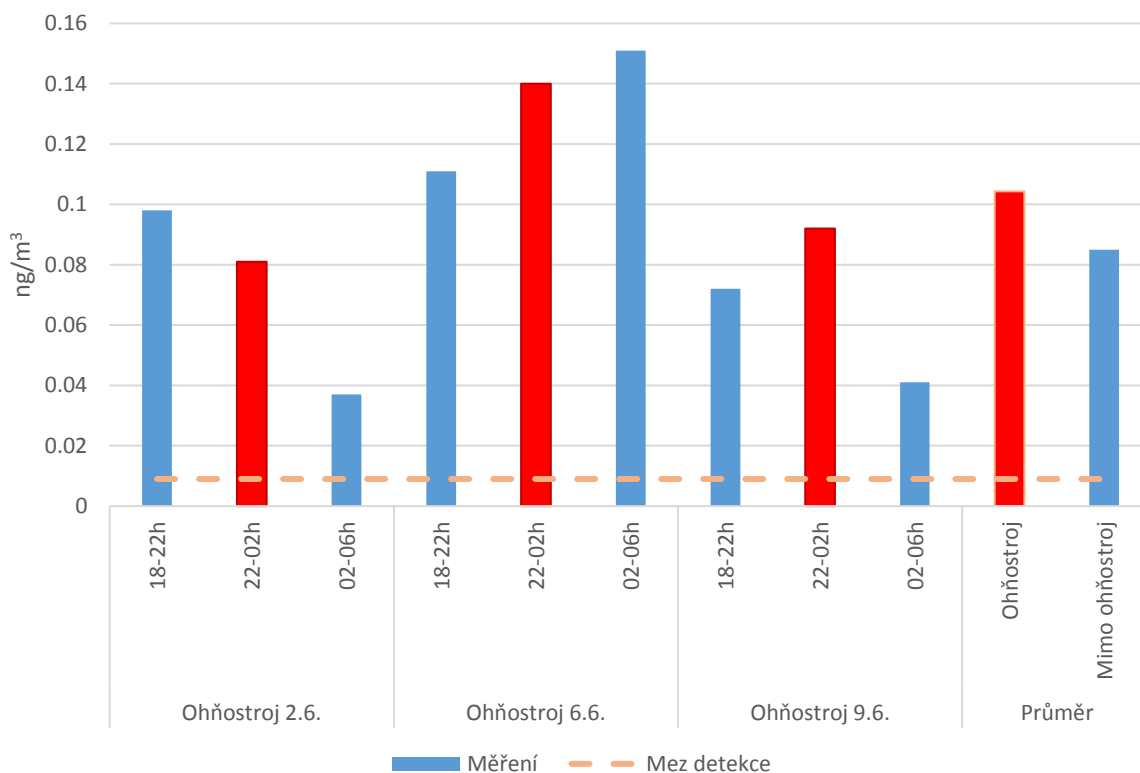
Imisní limit pro roční průměrnou koncentraci kadmia v ovzduší je 5 ng/m³. V Brně jsou koncentrace kadmia sledovány na stanicích Brno-Líšeň a Brno-Masná, průměrné roční koncentrace v roce 2017 zde byly 0,1, respektive 0,2 ng/m³, tedy hluboko pod imisním limitem. Ani v rámci ČR nebyl v roce 2017 imisní limit nikde překročen a s výjimkou stanice Tanvald-školka (3,0 ng/m³), Ostrava-Radvanice ZÚ (1,1 ng/m³) a Souš (1,0 ng/m³) se koncentrace pohybovaly do 0,5 ng/m³.

V níže uvedené tabulce jsou naměřené koncentrace kadmia v PM_{2,5} v ng/m³ ve 3 dny, kdy probíhaly ohňostroje – vždy 4 h před ohňostrojem (18-22 h), 4h intervalu zahrnujícím ohňostroj (interval 22-02 h, samotný ohňostroj 22:30-22:50) a následně 4h interval po intervalu s ohňostrojem (02-06 h). Z níže uvedené tabulky a grafu je vidět, že se koncentrace kadmia po celou dobu akce Ignis Brunensis, včetně dní s ohňostrojem, pohybovaly velmi nízko. Intervaly zahrnující přímo konání ohňostroje vykazují pouze naprosto zanedbatelně vyšší koncentrace kadmia.

V další tabulce jsou pak uvedena vypočítaná data pro frakci PM₁₀.

Tabulka 22 – Koncentrace kadmia v ovzduší [ng/m^3] v jednotlivých čtyřhodinových intervalech v $\text{PM}_{2,5}$ během konání tří ohňostrojů Ignis Brunensis 2018. Oranžově podbarvené jsou intervaly konání samotného ohňostroje. Poslední dva sloupce představují průměr všech 4h intervalů s ohňostrojem (O) a všech šesti 4h intervalů bez ohňostroje (BO). Mez detekce představuje $0,009 \text{ ng}/\text{m}^3$.

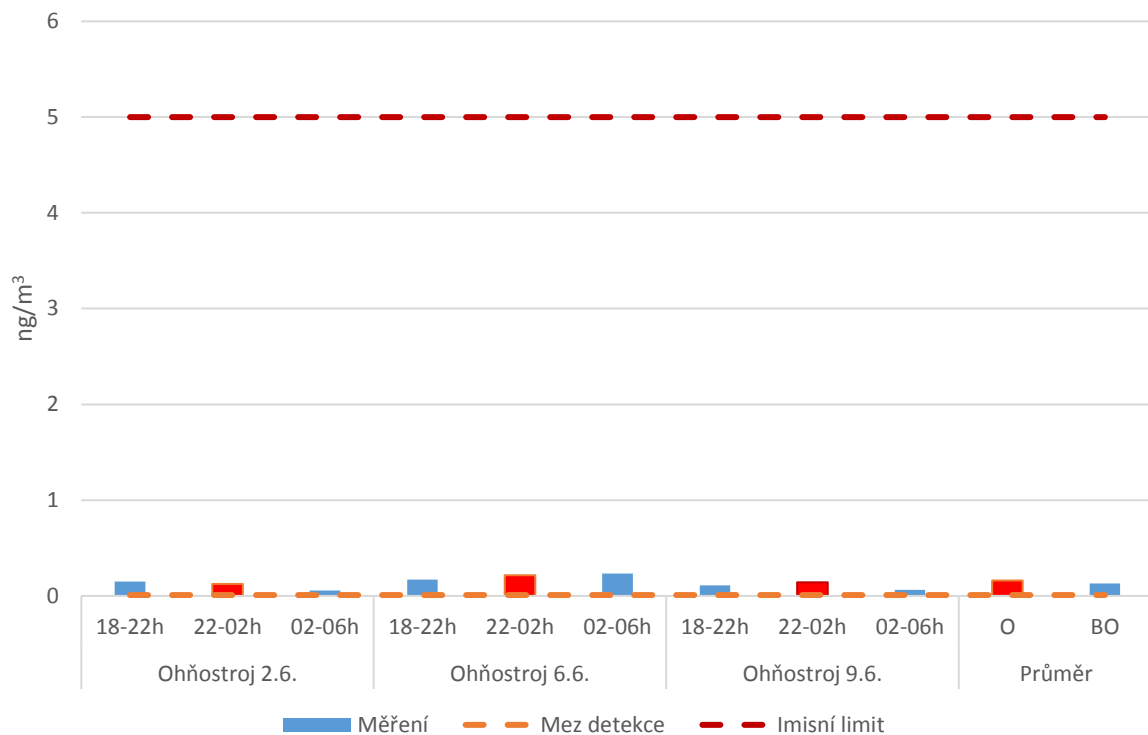
Ohňostroj 2.6.			Ohňostroj 6.6.			Ohňostroj 9.6.			Průměr	
18-22 h	22-02 h	02-06 h	18-22 h	22-02 h	02-06 h	18-22 h	22-02 h	02-06 h	O	BO
0.098	0.081	0.037	0.111	0.140	0.151	0.072	0.092	0.041	0.104	0.085



Obrázek 43 - Koncentrace kadmia v ovzduší [ng/m^3] v jednotlivých čtyřhodinových intervalech v $\text{PM}_{2,5}$ během konání tří ohňostrojů Ignis Brunensis 2018. Červeně jsou vyznačeny sloupce intervalu konání ohňostroje a celkový průměr z 4h intervalů ohňostrojů. Oranžová přerušovaná čára značí mez detekce a červená přerušovaná čára roční imisní limit pro průměrnou koncentraci kadmia v ovzduší.

Tabulka 23 - Koncentrace kadmia v ovzduší [ng/m^3] v jednotlivých 4h intervalech v PM_{10} během konání tří ohňostrojů Ignis Brunensis 2018. Oranžově podbarvené jsou dny konání samotného ohňostroje. Poslední dva sloupce představují průměr všech měřených intervalů s ohňostrojem (O) a intervalů bez ohňostroje (BO).

Ohňostroj 2.6.			Ohňostroj 6.6.			Ohňostroj 9.6.			Průměr	
18-22 h	22-02 h	02-06 h	18-22 h	22-02 h	02-06 h	18-22 h	22-02 h	02-06 h	O	BO
0.151	0.125	0.057	0.171	0.216	0.233	0.111	0.142	0.063	0.160	0.131



Obrázek 44 - Vypočítané koncentrace kadmia v PM_{10} pro jednotlivé 4h intervaly. V posledním sloupci je průměr ze všech ohňostrojových (O) a bez ohňostrojových (BO) intervalů. Oranžová přerušovaná čára značí mez detekce, červená imisní limit pro roční průměr.

7.4 NIKL

28
Ni
Nikl 58,693

Atomové číslo:	28
Hustota:	8,908 g/cm ³
Teplota tání:	1455 °C
Teplota varu:	2730 °C



Nikl je stříbrobílý lesklý kov patřící do přechodných kovů, pátý nejhojněji zastoupený prvek na Zemi (po železu, kyslíku, silikonu a hořčíku). Téměř 70 % se používá do nerezové oceli a ocelářský průmysl je jeho největším odběratelem (Reck, 2012). Je odolný vůči korozi, proto se často v jemné vrstvičce nanáší na méně odolné kovy, jako je například železo.

V lidském těle je nikl součástí několika metaloenzymů, včetně ureázy, je důležitou součástí metabolismu lidského těla i rostlin (Yusuf, 2011). Ve vyšších koncentracích je však toxický jak pro lidi, tak pro ostatní organizmy a jedná se o karcinogen (Chervona, 2012). Do prostředí se dostává jak z přírodních, tak antropogenních zdrojů – jedná se například o dopravu, průmysl, fosilní paliva či odpady (Harasim, 2015).

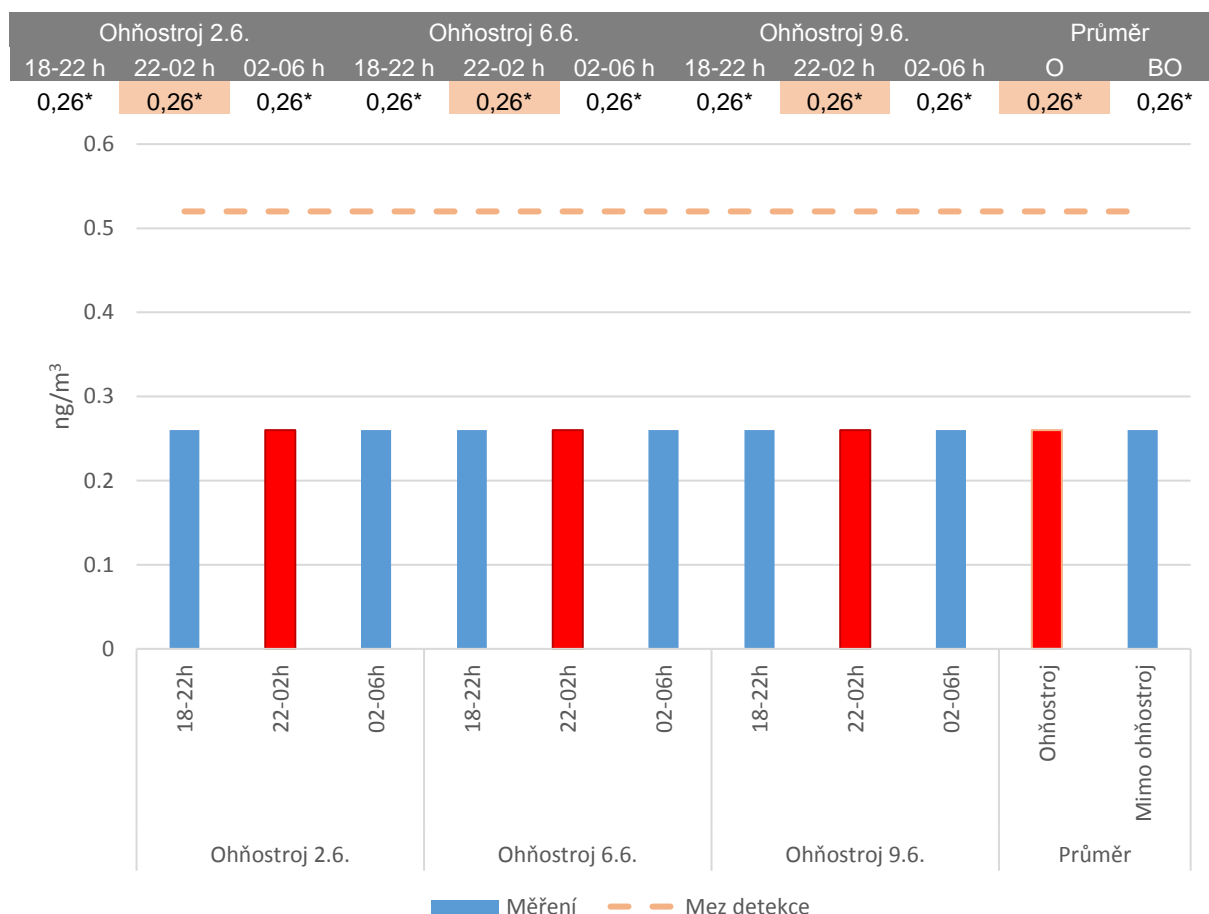
Imisní limit pro průměrnou roční koncentraci niklu je 20 ng/m³. V lokalitě Brna jsou koncentrace niklu měřeny na stanici Brno-Líšeň a Brno-Masná. V roce 2017 byly průměrné koncentrace 0,6 ng/m³ (Brno-Líšeň) a 1,4 ng/m³ (Brno-Masná), tedy více než desetinásobně nižší, než kolik činí imisní limit. Nejvyšší koncentrace za rok 2017 v rámci celé České republiky byla 2,7 ng/m³ v lokalitě Ostrava-Mariánské Hory. Vysoké koncentrace niklu tedy v České republice nejsou zaznamenávány.

V níže uvedené tabulce jsou naměřené koncentrace niklu v PM_{2,5} v ng/m³ ve 3 dny, kdy probíhaly ohňostroje – vždy 4 h před ohňostrojem (18-22 h), 4h intervalu zahrnujícím ohňostroj (interval 22-02 h, samotný ohňostroj 22:30-22:50) a následně 4h interval po intervalu s ohňostrojem (02-06 h). Z níže uvedené tabulky a grafu vyplývá, že byly koncentrace po celou dobu měření – jak v periodě s ohňostrojem, tak mimo ohňostroj – pod mezí detekce (= 0,52 ng/m³).

V případě PM₁₀ ani po vynásobení koeficientem 1,54 nebylo dosaženo meze detekce. Samotná mez detekce je navíc více než 38x nižší, než kolik činí imisní limit pro roční průměrnou koncentraci niklu. Nikl není prvkem, který by se používal pro ohňostrojové efekty a předpoklad neměnné koncentrace během ohňostrojů se potvrdil. I v případě, že bychom místo poloviny meze detekce uvažovali, že byly koncentrace PM_{2,5} rovny mezi detekce, pak by koncentrace PM₁₀ po vynásobení koeficientem 1,54 dosáhly maximálně 0,8 ng/m³, což představuje přesně 25násobně méně, než kolik

činí imisní limit pro roční průměr. Lze tedy říci, že koncentrace niklu během ohňostroje nejsou zvýšené, navíc jsou hluboko pod imisním limitem.

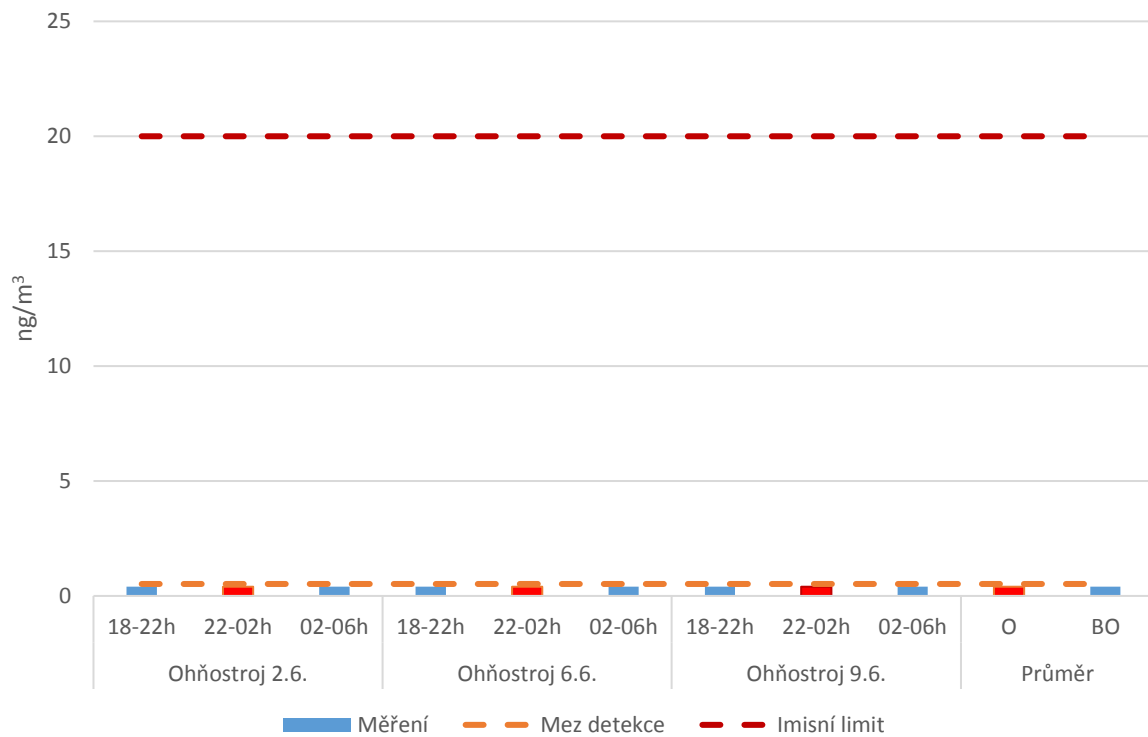
Tabulka 24 - Koncentrace niklu v ovzduší [ng/m³] v jednotlivých čtyřhodinových intervalech v PM_{2,5} během konání tří ohňostrojů Ignis Brunensis 2018. Oranžově podbarvené jsou intervaly konání samotného ohňostroje. Poslední dva sloupce představují průměr všech 4h intervalu s ohňostrojem (O) a všech šesti 4h intervalů bez ohňostroje (BO). Mez detekce představuje 0,52 ng/m³.



Obrázek 45 - Koncentrace niklu v ovzduší [ng/m³] v jednotlivých čtyřhodinových intervalech v PM_{2,5} během konání tří ohňostrojů Ignis Brunensis 2018. Červeně jsou vyznačeny sloupce intervalu konání ohňostroje a celkový průměr z 4h intervalů ohňostrojů. Oranžová přerušovaná čára značí mez detekce a červená přerušovaná čára roční imisní limit pro průměrnou koncentraci niklu v ovzduší.

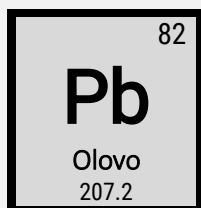
Tabulka 25 - Koncentrace niklu v ovzduší [ng/m³] v jednotlivých 4h intervalech v PM₁₀ během konání tří ohňostrojů Ignis Brunensis 2018. Oranžově podbarvené jsou dny konání samotného ohňostroje. Poslední dva sloupce představují průměr všech měřených intervalů s ohňostrojem (O) a intervalů bez ohňostroje (BO).

Ohňostroj 2.6.			Ohňostroj 6.6.			Ohňostroj 9.6.			Průměr	
18-22 h	22-02 h	02-06 h	18-22 h	22-02 h	02-06 h	18-22 h	22-02 h	02-06 h	O	BO
0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4



Obrázek 46 - Vypočítané koncentrace niklu v PM_{10} pro jednotlivé 4h intervaly. V posledním sloupci je průměr ze všech ohňostrojových (O) a bez ohňostrojových (BO) intervalů. Oranžová přerušovaná čára značí mez detekce, červená imisní limit pro roční průměr.

7.5 OLOVO



Atomové číslo:	82
Hustota:	11,34 g/cm ³
Teplota tání:	327,5 °C
Teplota varu:	1749 °C



Olovo je dobře kujný, měkký a velmi těžký kov. Díky svým mechanickým vlastnostem (nízký bod tání, duktilita, vysoká hustota, vysoká stálost) má olovo široké využití. Používá se ve stavebním průmyslu, je součástí řady slitin, v protihlukových stěnách a ve 21. století především při výrobě akumulátorů (Pavlov, 2011).

Není známo, že by plnilo olovo nějakou biologickou funkci, naopak se jedná o toxický prvek (Alizadeh, 2011). Pro lidský organizmus je jedovatý jak při inhalaci, tak při pozření a nežádoucí účinky se můžou projevit téměř na všech orgánech – způsobuje mj. poruchy nervové soustavy, reprodukční soustavy, vývoje, imunitního systému, kardiovaskulárního systému, poruchy ledvin (US Food and Drug Administration, 2015).

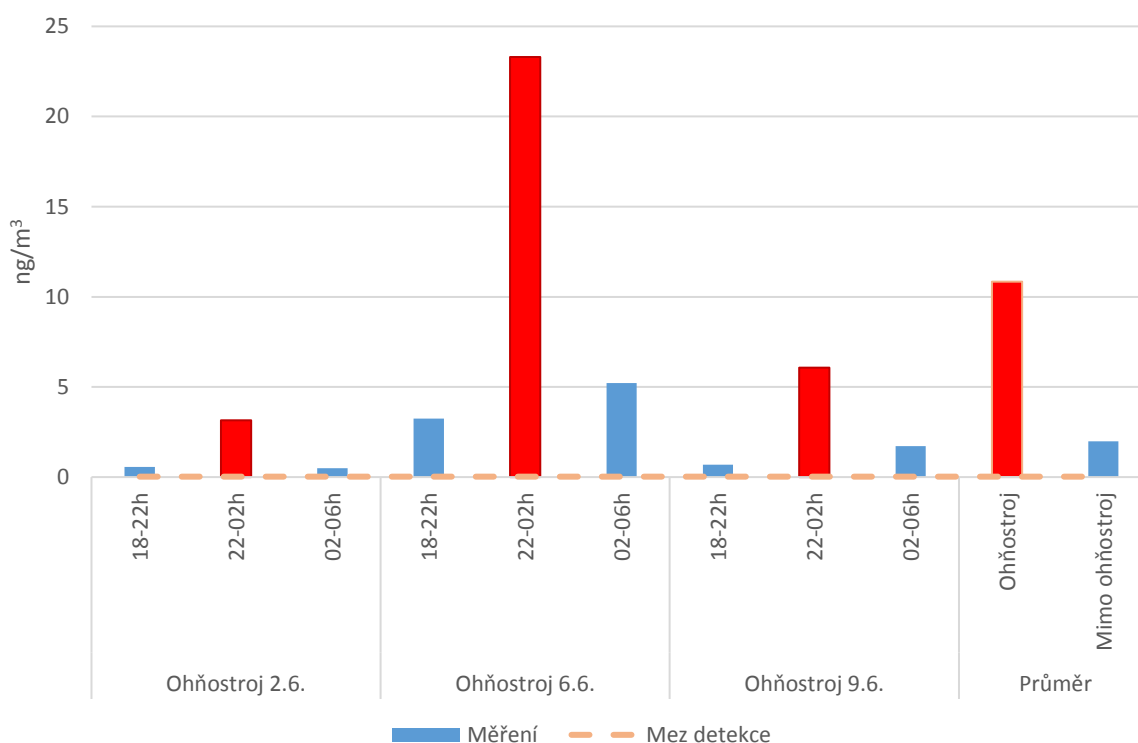
Na přelomu tisíciletí došlo k výraznému zlepšení a snížení koncentrací olova v ovzduší, mj. díky zákazu používání olovnatého benzínu (v EU od roku 2000) (O'Brien, 2011). Imisní limit pro ochranu zdraví pro roční průměrnou koncentraci olova byl stanoven na 500 ng/m³ (0,5 µg/m³). Na stanici Brno-Líšeň byla v roce 2017 naměřena průměrná koncentrace pouhých 4,4 ng/m³, na stanici Brno-Masná 5,1 ng/m³, tedy jedna setina imisního limitu. V České republice pak byla nejvyšší průměrná koncentrace za rok 2017 naměřena v lokalitě Ostrava-Radvanice ZÚ (52 ng/m³). V dnešní době tak lze říct, že jsou koncentrace olova o řád nebo dva nižší, než je imisní limit.

Na rozdíl od předchozích těžkých kovů s imisním limitem, je olovo prvkem, který se používá při odpalování ohňostrojů. V níže uvedené tabulce jsou naměřené koncentrace niklu v PM_{2,5} v ng/m³ ve 3 dny, kdy probíhaly ohňostroje – vždy 4 h před ohňostrojem (18-22 h), 4h intervalu zahrnujícím ohňostroj (interval 22-02 h, samotný ohňostroj 22:30-22:50) a následně 4h interval po intervalu s ohňostrojem (02-06 h). Z naměřených dat je vidět, že se koncentrace během konání ohňostroje zvyšovaly. V průměru byly více než pětinasobné (v průměru 10,8 ng/m³ během ohňostrojů vs. 2,0 ng/m³ mimo ohňostroje). Nejvyšší koncentrace ze všech 4h intervalů byla naměřena během ohňostroje 6. 6., kdy v intervalu 22-2 h byla průměrná koncentrace Pb v PM_{2,5} 23,3 ng/m³. Avšak již v následujícím čtyřhodinovém intervalu byla koncentrace pouze 5,2 ng/m³, jednalo se tedy o velmi krátkodobé zvýšení a ani to nepředstavovalo žádné nebezpečí.

Při přepočtu na PM₁₀ vychází nejvyšší koncentrace během konání druhého ohňostroje na 35,88 ng/m³. Imisní limit pro roční průměr koncentrace olova má hodnotu 500 ng/m³. I tato krátkodobě zvýšená hodnota tedy představuje pouze přibližně 1/14 imisního limitu a ač jsou tedy koncentrace olova krátce zvýšené, nepředstavují žádné riziko, protože jsou více než desetinásobně nižší, než kolik činí imisní limit pro roční průměr pro ochranu zdraví.

Tabulka 26 - Koncentrace olova v ovzduší [ng/m³] v jednotlivých čtyřhodinových intervalech v PM_{2,5} během konání tří ohňostrojů Ignis Brunensis 2018. Oranžově podbarvené jsou intervaly konání samotného ohňostroje. Poslední dva sloupce představují průměr všech 4h intervalů s ohňostrojem (O) a všech šesti 4h intervalů bez ohňostroje (BO). Mez detekce představuje 0,025 ng/m³.

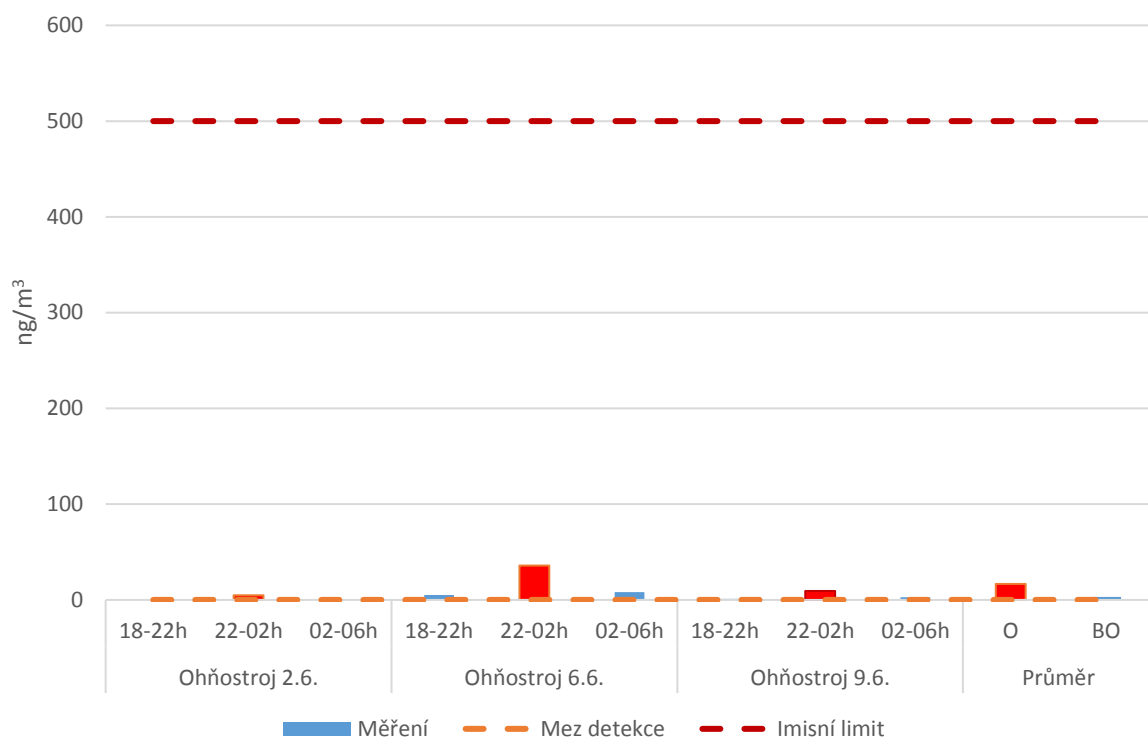
Ohňostroj 2.6.			Ohňostroj 6.6.			Ohňostroj 9.6.			Průměr	
18-22 h	22-02 h	02-06 h	18-22 h	22-02 h	02-06 h	18-22 h	22-02 h	02-06 h	O	BO
0,60	3,15	0,49	3,24	23,30	5,22	0,70	6,07	1,72	10,84	1,99



Obrázek 47 - Koncentrace olova v ovzduší [ng/m³] v jednotlivých čtyřhodinových intervalech v PM_{2,5} během konání tří ohňostrojů Ignis Brunensis 2018. Červeně jsou vyznačeny sloupce intervalu konání ohňostroje a celkový průměr z 4h intervalů ohňostrojů. Oranžová přerušovaná čára značí mez detekce a červená přerušovaná čára roční imisní limit pro průměrnou koncentraci olova v ovzduší.

Tabulka 27 - Koncentrace olova v ovzduší [ng/m³] v jednotlivých 4h intervalech v PM₁₀ během konání tří ohňostrojů Ignis Brunensis 2018. Oranžově podbarvené jsou dny konání samotného ohňostroje. Poslední dva sloupce představují průměr všech měřených intervalů s ohňostrojem (O) a intervalů bez ohňostroje (BO).

Ohňostroj 2.6.			Ohňostroj 6.6.			Ohňostroj 9.6.			Průměr	
18-22 h	22-02 h	02-06 h	18-22 h	22-02 h	02-06 h	18-22 h	22-02 h	02-06 h	O	BO
0,92	4,85	0,75	4,99	35,88	8,04	1,08	9,35	2,65	16,69	3,06



Obrázek 48 - Vypočítané koncentrace olova v PM_{10} pro jednotlivé 4h intervaly. V posledním sloupci je průměr ze všech ohňostrojových (O) a bez ohňostrojových (BO) intervalů. Oranžová přerušovaná čára značí mez detekce, červená imisní limit pro roční průměr.

7.6 SHRnutí

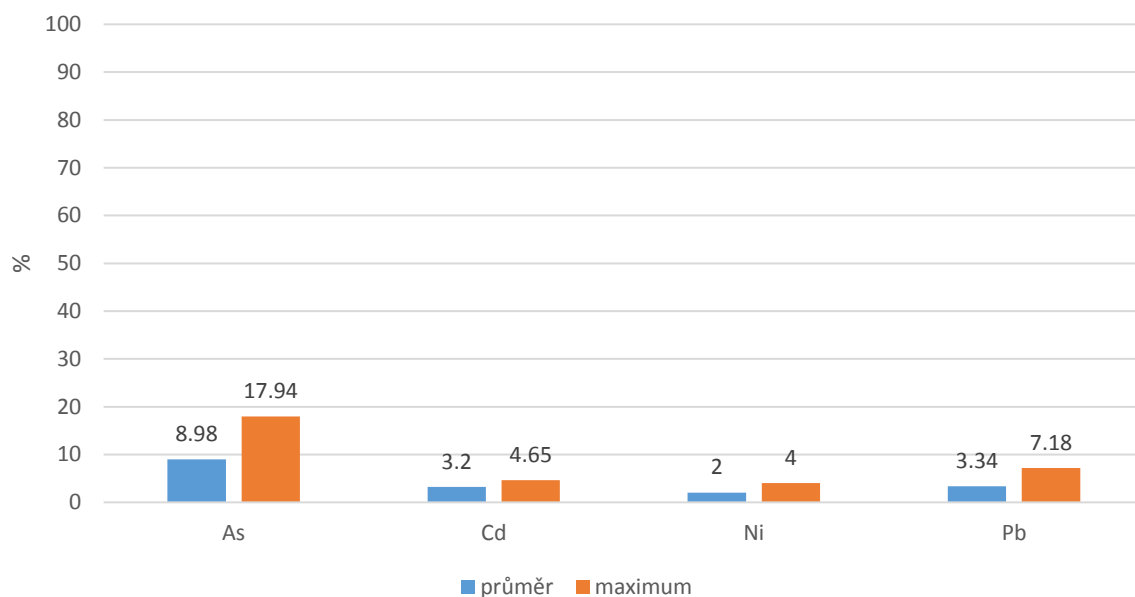
Z naměřených dat vyplývá, že v důsledku odpalování ohňostrojí v rámci ohňostrojové přehlídky Ignis Brunensis 2018 nedošlo k žádnému překročení imisního limitu pro těžké kovy (arsen, kadmium, nikl a olovo – těžko kovy s platným imisním limitem podle Zákonu o ochraně ovzduší).

V níže uvedené tabulce je souhrn koncentrací jednotlivých prvků. V tabulce je vždy uvedena průměrná koncentrace ze všech tří 4h intervalů konání ohňostroje (22-02 h) a dále maximální naměřená hodnota ze všech 4h intervalů. V případě, kde byla maximální hodnota pod mezí detekce je uvedena právě mez detekce, namísto poloviny meze detekce – toto číslo tedy představuje teoreticky nejvyšší možnou hodnotu, ač je možné, že byla koncentrace nižší. U PM_{10} se vychází z násobícího koeficientu 1,54, opět v případě čísla pod mezí detekce je vynásobena teoreticky maximální hodnota $PM_{2,5}$ na mezi detekce.

Tabulka 28 – průměrné koncentrace $PM_{2,5}$ během 4h intervalu s konáním ohňostroje, maximum ze všech 4h intervalů pro $PM_{2,5}$ (v případě hodnot pod mezí detekce brána právě mez detekce, tedy maximální teoreticky možná koncentrace, další dva sloupce představují převod na PM_{10} vynásobením koeficientem 1,54, v dalším sloupci imisní limit pro roční průměr, v posledních dvou sloupcích procentuální poměr PM_{10} koncentrace k imisnímu limitu (průměr + maximální hodnota). Všechny koncentrace v ng/m^3 . Poslední dva sloupce v %.

	$PM_{2,5}$		PM_{10}		imisní limit	% z imisního limitu	
	průměr	maximum	průměr	maximum		průměr	maximum
Arsen	0,35	0,699	0,539	1,08	6	8,98	17,94
Kadmium	0,10	0,15	0,16	0,23	5	3,20	4,65
Nikl	0,26	0,52	0,40	0,80	20	2,00	4,00
Olovo	10,84	23,3	16,69	35,88	500	3,34	7,18

Z tabulky plyne, že nejbliže imisnímu limitu byl arsen, kde maximální naměřená hodnota 0,699 odpovídá koncentraci přibližně $1,08 ng/m^3$ v PM_{10} . Toto zvýšení bylo velmi dočasné a i přesto nepředstavuje ani 20 % imisního limitu pro roční průměr. Koncentrace kadmia se i v maximu 4h intervalu pohybovaly pod 5 % z imisního limitu. U niklu byly koncentrace ve všech případech pod mez detekce a v případě započítání koncentrace jak teoreticky maximální možnou (= mez detekce) a po vynásobení koeficientem pro PM_{10} byla maximální hodnota odhadnuta na $0,80 ng/m^3$. To však je pouze 4 % imisního limitu pro průměr z roku. Poslední prvek – olovo – i v maximální odhadnuté hodnotě dosahuje jen málo přes 7 % imisního limitu.



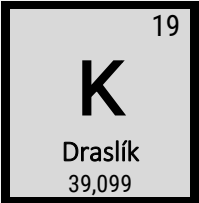

Obrázek 49 – procento z imisního limitu pro roční průměr pro jednotlivé prvky v PM_{10} . Modrý sloupec představuje průměr ze všech 4h intervalů konání ohňostrojů, oranžový sloupec představuje maximální naměřenou průměrnou koncentraci ze 4h intervalu. V případě meze detekce byla pro maximum brána teoreticky maximální hodnota rovna právě mezi detekce.

Z výše uvedeného grafu je vidět, že koncentrace těžkých kovů s imisním limitem se v době konání i mimo konání ohňostrojů Ignis Brunensis pohybovaly pod příslušným imisním limitem pro roční průměr. Jedná se o limit pro ochranu zdraví a lze tedy říci, že nedochází k žádnému potenciálnímu ohrožení zdraví v důsledku vysokých koncentrací těžkých kovů arsen, nikl, kadmium a olovo – těžkých kovů, které jsou ve vysokých koncentracích toxické.

7.7 DALŠÍ KOVY

Jelikož lze předpokládat, že potenciální částice produkované odpalováním ohňostrojí budou spíše menšího charakteru, byla zbývající analýza provedena pouze na částicích frakce $PM_{2,5}$, které navíc byly vzorkovány ve 4h intervalech, které mohou lépe ukázat dynamiku koncentrací kovů během samotného ohňostroje a bezprostředně před a po něm.

7.7.1 DRASLÍK

	Atomové číslo: 19 Hustota: 0,862 g/cm ³ Teplota tání: 63,5 °C Teplota varu: 759 °C	
---	--	---

Draslík je lesklý, stříbřitě bílý a velmi měkký kov, který řadíme mezi alkalické kovy. V přírodě se volný draslík nevyskytuje a je vždy vázaný ve sloučeninách jako jednomocný kation K^+ . Jedná se o esenciální prvek pro lidské tělo. Podílí se na přenosu nervových vzruchů a regulaci vody v buňkách. Má ale vliv i na svalovou činnost.

Draslík v ovzduší může mít pozitivní vliv, jelikož zvyšuje alkalitu a tím tlumí a neutralizuje účinky kyselého prostředí vyvolávaného sírou a dusíkem, často v důsledku například kyselých dešťů. Uvádí se, že největším zdrojem draslíku v ovzduší jsou právě ohňostroje (Wang, 2007), z dalších zdrojů můžeme jmenovat lokální topeniště nebo ocelárny.

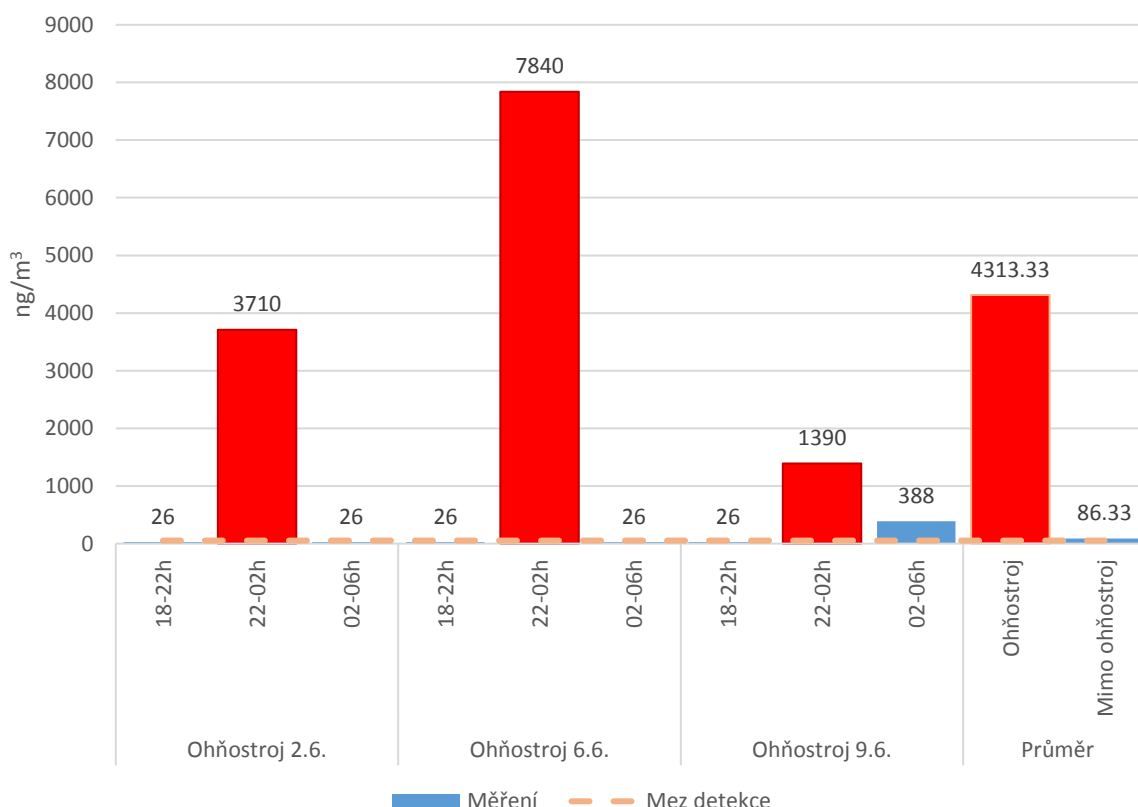
Stejně jako v případě studie Do (Do, 2012) byl v případě draslíku naměřen vysoký relativní nárůst koncentrací v periodě během konání ohňostrojí. Všechny tři měřené 4h intervaly zahrnující odpalování ohňostroje měly velmi významný nárůst koncentrací tohoto prvku. Vůbec nejmarkantnější nárůst byl naměřen při ohňostroji 6. 6. Během 4h intervalu před ohňostrojem (18-22 h) byly koncentrace draslíku pod mezí detekce (= 51,9 ng/m³). Stejně tak tomu bylo i ve 4h intervalu po ohňostroji (02-06 h). Avšak během 4h intervalu při konání ohňostroje (22-02 h) byla koncentrace draslíku 7840 ng/m³. Pokud tedy budeme považovat koncentrace před a po ohňostroji za polovinu meze detekce (= 26 ng/m³), pak byly během odpalování ohňostroje koncentrace v 4h průměru více než 300x vyšší v porovnání s průměrem před a po ohňostroji. Během ohňostroje 2. 6. byly koncentrace před a po ohňostroji rovněž pod mezí detekce, během ohňostroje pak 3710 ng/m³ (143x vyšší). V případě ohňostroje 9. 6. byla koncentrace před ohňostrojem pod mezí detekce. Během ohňostroje bylo naměřeno 1390 ng/m³ a následně ve 4h intervalu po ohňostroji 388 ng/m³. Pokud se podíváme

na rychlosti větru, zjistíme, že právě během ohňostroje 9. 6. byla rychlost větru nejnižší ze všech čtyř ohňostrojů, proto je pravděpodobné, že v důsledku nízké rychlosti větru a tudíž pomalého rozptylu ohňostroje vlečky, zůstala koncentrace zvýšená delší dobu.

V celkovém průměru ze všech 4h intervalů během a 4h intervalů mimo ohňostroje byly koncentrace v intervalu během ohňostroje téměř přesně 50x vyšší než v intervalu mimo (vzhledem k tomu, že bylo mnoho koncentrací pod mezí detekce, mohly být koncentrace mimo konání ohňostroje vyšší než polovina meze detekce, i v takovém případě by však byly koncentrace během ohňostroje minimálně 40x vyšší).

Tabulka 29 - Koncentrace draslíku v ovzduší [ng/m^3] v jednotlivých čtyřhodinových intervalech v $\text{PM}_{2,5}$ během konání tří ohňostrojů Ignis Brunensis 2018. Oranžově podbarvené jsou intervaly konání samotného ohňostroje. Poslední dva sloupce představují průměr všech 4h intervalu s ohňostrojem (O) a všech šesti 4h intervalů bez ohňostroje (BO). Mez detekce představuje $51,9 \text{ ng}/\text{m}^3$.

Ohňostroj 2.6.			Ohňostroj 6.6.			Ohňostroj 9.6.			Průměr	
18-22 h	22-02 h	02-06 h	18-22 h	22-02 h	02-06 h	18-22 h	22-02 h	02-06 h	O	BO
26*	3710	26*	26*	7840	26*	26*	1390	388	4313,3	86,3



Obrázek 50 - Koncentrace draslíku v ovzduší [ng/m^3] v jednotlivých čtyřhodinových intervalech v $\text{PM}_{2,5}$ během konání tří ohňostrojů Ignis Brunensis 2018. Červeně jsou vyznačeny sloupce intervalu konání ohňostroje a celkový průměr z 4h intervalů ohňostrojů. Oranžová přerušovaná čára značí mez detekce.

7.7.2 Hořčík

12
Mg
Hořčík
24,30

Atomové číslo: 12
Hustota: 1,738 g/cm³
Teplota tání: 650 °C
Teplota varu: 1091 °C



Hořčík je středně tvrdý a lehký kov, který za normální teploty reaguje s kyslíkem a s vodou. Svými vlastnostmi je podobný hliníku a právě sloučeniny hořčíku s hliníkem mají velmi rozmanitá využití pro svoji pevnost, nízkou hmotnost například v automobilovém, leteckém nebo vojenském průmyslu.

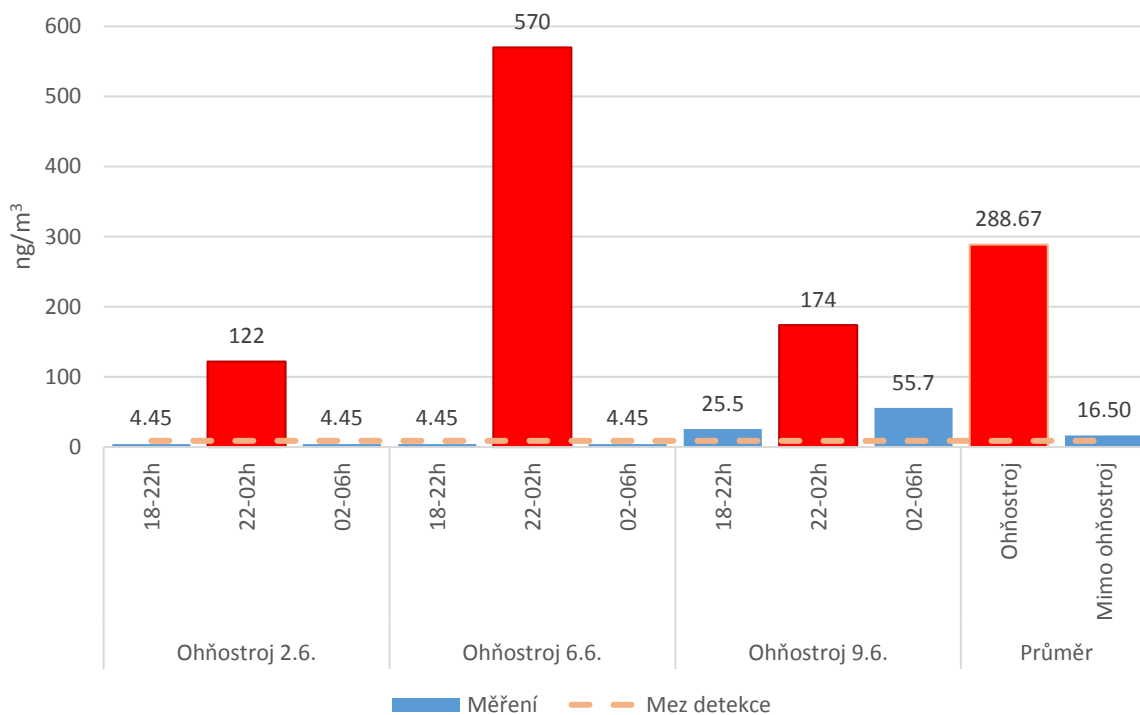
Jemný prášek hořčíku je relativně reaktivní. V přírodě se vždy vyskytuje ve sloučeninách, například ve formě magnezitu, dolomitu nebo jiných minerálů.

Podobně jako v případě draslíku napomáhají ionty hořčíku neutralizovat kyselé prostředí, zvyšují pH a přispívají tak k mírnění nežádoucích projevů vysoké kyselosti prostředí. Podle britské National Atmospheric Emissions Inventory byl nejvýznamnějším zdrojem hořčíku v ovzduší ve Spojeném království v roce 2016 stavební průmysl (24 %) a právě ohňostroje (18 %) (http://naei.beis.gov.uk/overview/pollutants?pollutant_id=117).

Data naměřená během přehlídky Ignis Brunensis 2018 tento poznatek potvrzují – během odpalování ohňostrojů docházelo k významnému nárůstu koncentrací hořčíku v ovzduší. Nejvýraznější byl tento nárůst během druhého sledovaného ohňostroje 6. 6. Před i po ohňostroji byly koncentrace pod mezí detekce (= 8,9 ng/m³). Ve 4h intervalu konání ohňostroje však byly naměřeny koncentrace 570 ng/m³. Stejně jako v případě draslíku však je vidět velmi rychlé rozptýlení a už v následujícím 4h intervalu návrat pod mez detekce. Třetí měřený ohňostroj 9. 6. měl opět ze tří měřených ohňostrojů nejvyšší koncentrace ve 4h intervalu po konání ohňostroje (pravděpodobně opět důsledek nízké rychlosti větru). V celkovém průměru byly koncentrace ve 4h intervalech konání ohňostroje 17,5x vyšší než celkový průměr ze 4h intervalů mimo ohňostroj.

Tabulka 30 - Koncentrace hořčíku v ovzduší [ng/m³] v jednotlivých čtyřhodinových intervalech v PM_{2,5} během konání tří ohňostrojů Ignis Brunensis 2018. Oranžově podbarvené jsou intervaly konání samotného ohňostroje. Poslední dva sloupce představují průměr všech 4h intervalů s ohňostrojem (O) a všech šesti 4h intervalů bez ohňostroje (BO). Mez detekce představuje 8,9 ng/m³.

Ohňostroj 2.6.			Ohňostroj 6.6.			Ohňostroj 9.6.			Průměr	
18-22 h	22-02 h	02-06 h	18-22 h	22-02 h	02-06 h	18-22 h	22-02 h	02-06 h	O	BO
4,45*	122	4,45*	4,45*	570	4,45*	25,5	174	55,7	288,7	16,5



Obrázek 51 - Koncentrace hořčiku v ovzduší [ng/m³] v jednotlivých čtyřhodinových intervalech v PM_{2,5} během konání tří ohňostrojů Ignis Brunensis 2018. Červeně jsou vyznačeny sloupce intervalu konání ohňostroje a celkový průměr z 4h intervalů ohňostrojů. Oranžová přerušovaná čára značí mez detekce.

7.7.3 STRONCIUM

38 Sr Stroncium 87,62

Atomové číslo: 38
Hustota: 2,64 g/cm³
Teplota tání: 777 °C
Teplota varu: 1377 °C



Stroncium představuje velmi reaktivní měkký stříbřitý kov. Na vzduchu oxiduje a na povrchu se tvoří tmavá vrstva oxidu. Fyzikální a chemické vlastnosti jsou blízké vápníku a baryu. V přírodě se nejčastěji vyskytuje v minerálech celestin a stroncianit.

Tento vysoce reaktivní kov prudce reaguje se vzduchem i vodou. Na vzduchu hoří jasně červeným plamenem, při reakci s vodou je vylučován vodík a hydroxid stroncia (silně dráždivá látka). Jeden z izotopů stroncia, ⁹⁰Sr, je radioaktivní a tedy potenciálně velmi nebezpečný. Jeho koncentrace můžou být zvýšené například během jaderných nehod či při použití jaderných zbraní (Steinhauser, 2013). Níže uvedené koncentrace se však týkají izotopu ⁸⁸Sr, tedy izotopu neradioaktivního.

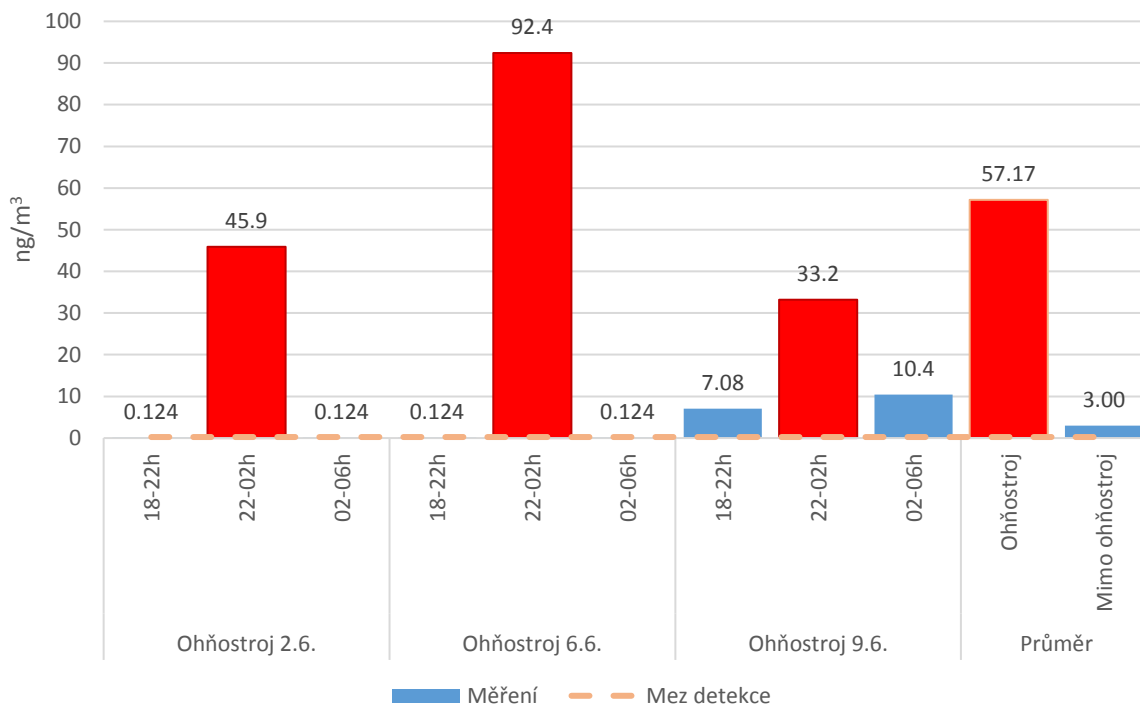
Stroncium je hojně využívaným kovem při odpalování ohňostrojmů a používá se k dosažení červeně zbarvených efektů. Jedná se tedy o jeden z typických „ohňostrojových markerů“ v ovzduší (Licudine, 2012).

Předpoklad zvýšených koncentrací stroncia v intervalu konání ohňostroje se potvrdil. Během prvního i druhého měřeného ohňostroje (2. 6. a 6. 6.) byly koncentrace ve 4h periodě před i 4h periodě po odpalování ohňostroje pod mezí detekce (= 0,248 mg/m³). V periodě odpalování těchto dvou ohňostrojů byly koncentrace stroncia řádově vyšší (370x, respektive 745x). Během ohňostroje 9. 6. nebyly sice koncentrace před a po odpálení ohňostroje pod mezí detekce, přesto byly výrazně nižší, než koncentrace ve 4h intervalu konání ohňostroje.

V průměru byly během 4h intervalů konání ohňostroje naměřeny více než 19x vyšší koncentrace stroncia v porovnání s 4h intervaly před a po odpálení.

Tabulka 31 - Koncentrace stroncia v ovzduší [ng/m³] v jednotlivých čtyřhodinových intervalech v PM_{2,5} během konání tří ohňostrojů Ignis Brunensis 2018. Oranžově podbarvené jsou intervaly konání samotného ohňostroje. Poslední dva sloupce představují průměr všech 4h intervalů s ohňostrojem (O) a všech šesti 4h intervalů bez ohňostroje (BO). Mez detekce představuje 0,248 ng/m³.

Ohňostroj 2.6.			Ohňostroj 6.6.			Ohňostroj 9.6.			Průměr	
18-22 h	22-02 h	02-06 h	18-22 h	22-02 h	02-06 h	18-22 h	22-02 h	02-06 h	O	BO
0,124*	45,9	0,124*	0,124*	92,4	0,124*	7,08	33,2	10,4	57,17	3,00



Obrázek 52 - Koncentrace stroncia v ovzduší [ng/m³] v jednotlivých čtyřhodinových intervalech v PM_{2,5} během konání tří ohňostrojů Ignis Brunensis 2018. Červeně jsou vyznačeny sloupce intervalu konání ohňostroje a celkový průměr z 4h intervalů ohňostrojů. Oranžová přerušovaná čára značí mez detekce.

7.7.4 TITAN

<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> Ti 22 </div> <p style="text-align: center;">Titan 47,867</p>
--

Atomové číslo: 22
 Hustota: 4,506 g/cm³
 Teplota tání: 1668 °C
 Teplota varu: 3287 °C



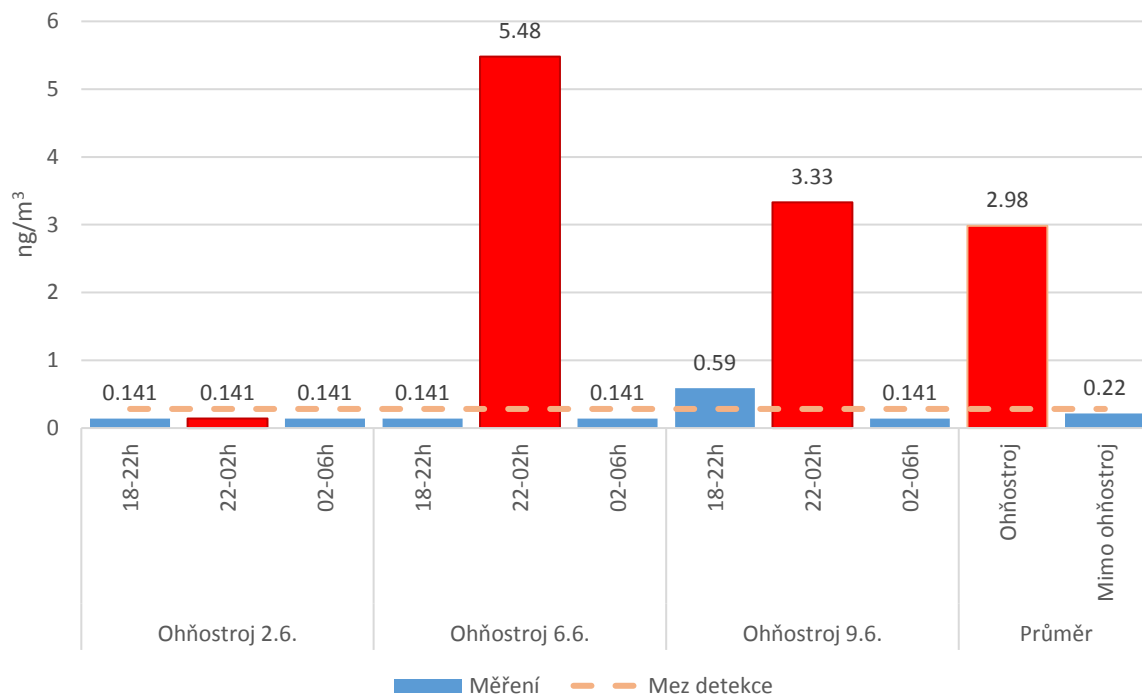
Titan je nízkohustotní, stříbrný a velmi pevný kov rezistentní proti korozi. Patří mezi neušlechtilé kovy a tvoří hojně komplexní sloučeniny, kde se nejčastěji vyskytuje jako čtyřmocný.

V přírodě se vyskytuje v půdách téměř výhradně ve formě minerálů (např. osbornit) (Czyrska-Filemonowicz, 2005). Nejčastěji se využívá jako přísada do slitin, což těmto slitinám dává některé žádoucí vlastnosti (chemická odolnost, nízká hmotnost).

Pyrotechnické efekty titan často využívají pro dosažení jasných a bílých zářivých efektů (Woodford, 2003). Jedná se tedy opět o jeden z prvků, o kterém lze předpokládat, že jeho koncentrace budou v průběhu ohňostrojů vyšší. Měření provedená v rámci této studie toto prokázala částečně. Během prvního ohňostroje byly koncentrace titanu ve všech třech měřených 4h intervalech pod mezí detekce (= 282 ng/m³). Lze se domnívat, že tedy čeští ohňostrůjci zodpovědní za první ohňostrojovou show tento prvek ve svých efektech nepoužili, nebo jej použili ve velmi omezené míře. Během druhého ohňostroje byly koncentrace pod mezí detekce pouze ve 4h intervalu před a 4h intervalu po konání ohňostroje. V době jeho konání byly koncentrace výrazně vyšší (5,48 ng/m³). Výrazný nárůst byl pozorován i během třetího měřeného ohňostroje 9. 6. Celkově pak byl průměr z periody konání ohňostroje přibližně 13,5x vyšší než průměr ze 4h intervalů před a po ohňostroji.



Tabulka 32 - Koncentrace titanu v ovzduší [ng/m³] v jednotlivých čtyřhodinových intervalech v PM_{2,5} během konání tří ohňostrojů Ignis Brunensis 2018. Oranžově podbarvené jsou intervaly konání samotného ohňostroje. Poslední dva sloupce představují průměr všech 4h intervalu s ohňostrojem (O) a všech šesti 4h intervalů bez ohňostroje (BO). Mez detekce představuje 0,282 ng/m³.

Ohňostroj 2.6.			Ohňostroj 6.6.			Ohňostroj 9.6.			Průměr	
18-22 h	22-02 h	02-06 h	18-22 h	22-02 h	02-06 h	18-22 h	22-02 h	02-06 h	O	BO
0,141*	0,141*	0,141*	0,141*	5,48	0,141*	0,59	3,33	0,141*	2,98	0,22



Obrázek 53 - Koncentrace titanu v ovzduší [ng/m³] v jednotlivých čtyřhodinových intervalech v PM_{2,5} během konání tří ohňostrojů Ignis Brunensis 2018. Červeně jsou vyznačeny sloupce intervalu konání ohňostroje a celkový průměr z 4h intervalů ohňostrojů. Oranžová přerušovaná čára značí mez detekce.

7.7.5 BARYUM

	Atomové číslo: 56 Hustota: 3,51 g/cm ³ Teplota tání: 727 °C Teplota varu: 1845 °C	
---	---	---

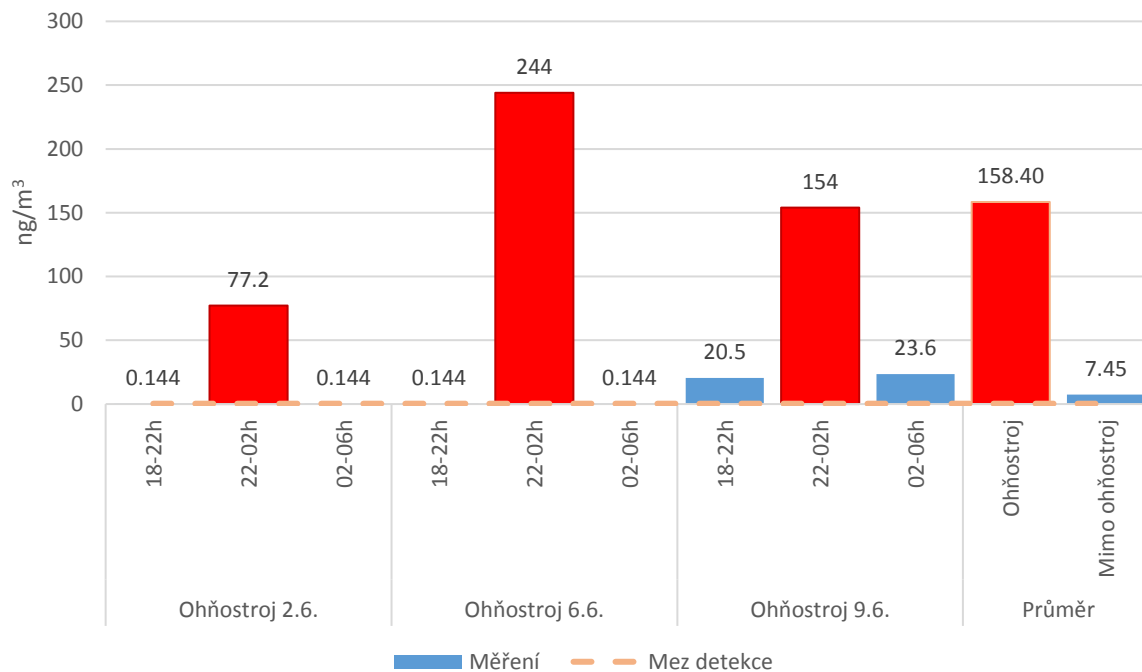
Šedobílý, lesklý baryum je měkký kov, značně reaktivní, který se v elementární podobě v přírodě nevyskytuje – pouze ve sloučeninách ve formě Ba²⁺. Nejznámějším minerálem je baryt (BaSO₄) V přírodě se slučuje s prvky jako síra nebo uhlík a kyslík.

V pyrotechnice se využívá pro vytváření zeleně zbarvených efektů (barví plamen zeleně). Dalo se tedy předpokládat, že budou koncentrace tohoto kovu, které jsou za normálních okolností velmi nízké, zvýšené. Steinhauser (Steinhauser, 2008b) ve své studii naměřil 11násobné zvýšení koncentrací barya při ohňostroji.

Během akce Ignis Brunensis bylo zvýšení barya velmi výrazné. U prvního ohňostroje byly hodnoty koncentrace barya před i po ohňostroji pod mezí detekce (= 0,289). Naopak během 4h intervalu ohňostroje byla koncentrace barya v průměru 77,2 ng/m³. Během druhého ohňostroje byl nárůst ještě výraznější – před i po ohňostroji byly koncentrace rovněž pod mezí detekce, během ohňostroje 244 ng/m³. V průběhu třetího měřeného ohňostroje 9. 6. byly koncentrace před i po ohňostroji vyšší, avšak v jeho průběhu byl opět zřetelný přibližně sedminásobný nárůst. V průměru byla tedy koncentrace barya ve 4h intervalech konání ohňostroje více než 21x vyšší. Steinhauser (Steinhauser, 2008b) sice naměřil „pouze“ 11násobný nárůst, v absolutních číslech však byly jím naměřené koncentrace výrazně vyšší, navíc se jednalo o koncentrace jako průměr z 24h období. Při prvním měřeném ohňostroji naměřil průměrnou denní koncentraci 321,7 ng/m³, při druhém 261,1 ng/m³.

Tabulka 33 - Koncentrace barya v ovzduší [ng/m³] v jednotlivých čtyřhodinových intervalech v PM_{2,5} během konání tří ohňostrojů Ignis Brunensis 2018. Oranžově podbarvené jsou intervaly konání samotného ohňostroje. Poslední dva sloupce představují průměr všech 4h intervalu s ohňostrojem (O) a všech šesti 4h intervalů bez ohňostroje (BO). Mez detekce představuje 0,289 ng/m³.

Ohňostroj 2.6.			Ohňostroj 6.6.			Ohňostroj 9.6.			Průměr	
18-22 h	22-02 h	02-06 h	18-22 h	22-02 h	02-06 h	18-22 h	22-02 h	02-06 h	O	BO
0,144*	77,2	0,144*	0,144*	244	0,144*	20,5	154	23,6	158,4	7,45

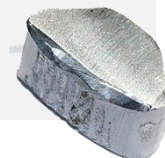


Obrázek 54 - Koncentrace barya v ovzduší [ng/m³] v jednotlivých čtyřhodinových intervalech v PM_{2,5} během konání tří ohňostrojů Ignis Brunensis 2018. Červeně jsou vyznačeny sloupce intervalu konání ohňostroje a celkový průměr z 4h intervalů ohňostrojů. Oranžová přerušovaná čára značí mez detekce.

7.7.6 HLINÍK

13
Al
Hliník
26,981

Atomové číslo:	13
Hustota:	2,70 g/cm ³
Teplota tání:	660,3 °C
Teplota varu:	2470 °C



Hliník, stříbřitě-bílý měkký kov je velmi reaktivní a v přírodě se vyskytuje ve sloučeninách, často s kyslíkem, křemíkem či fluorem. Je třetím nejzastoupenějším prvkem v zemské kůře (cca 8 %). Z významných minerálů obsahujících vápník lze jmenovat bauxit a kryolit. Používá se například k výrobě plechovek, folií, nádobí, v leteckém průmyslu a často se používají jeho sloučeniny, které kombinují žádané vlastnosti vícero kovů dohromady.

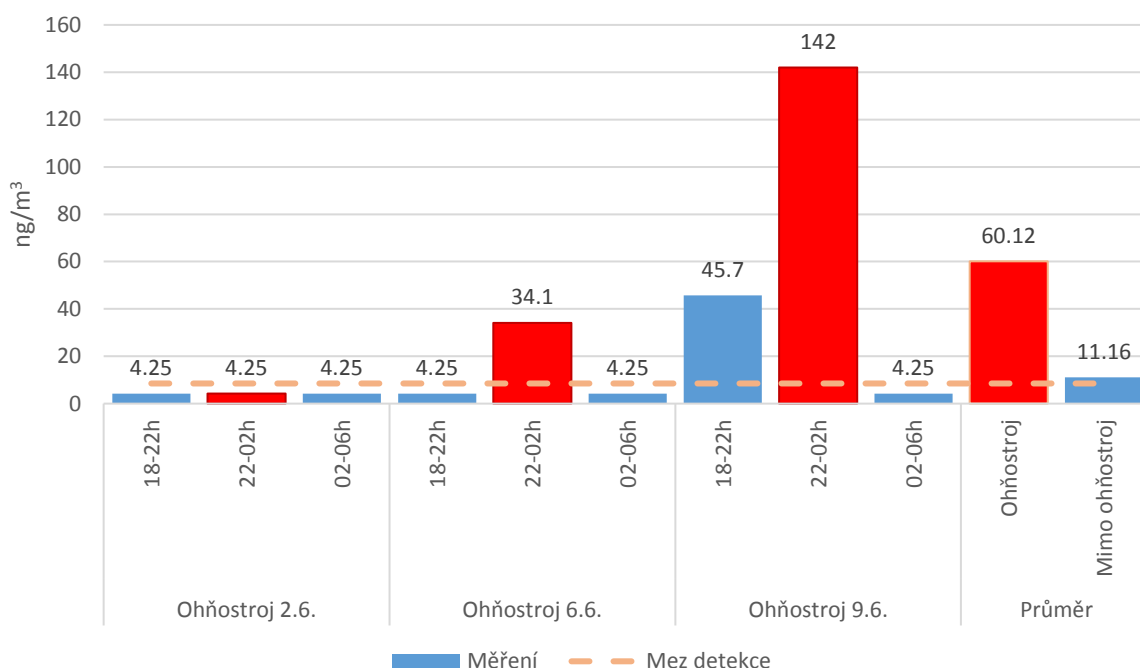
Do ovzduší se hliník dostává například prostřednictvím některých průmyslových procesů (Dolara, 2014), ale také půdní erozí. Hliníkový prášek je jedním z nejčastěji používaných paliv v pyrotechnice. Jemnější prášek se používá pro dosažení zábleskových efektů, hrubší prášek pro vytváření jiskřivých efektů.

Zvýšené koncentrace hliníku v ovzduší byly naměřeny při konání druhého a třetího ohňostroje. Během prvního ohňostroje byly koncentrace po celou dobu měření (18-06 h) pod mezí detekce (= 8,51 ng/m³). U druhého ohňostroje již byl znám nárůst, v době konání ohňostroje byl průměr ze 4h intervalu měření 34,1 ng/m³. Během posledního měřeného ohňostroje 9. 6. byla koncentrace zvýšená již v intervalu před začátkem ohňostroje a v následujícím 4h intervalu zahrnujícím samotný ohňostroj narostla přibližně trojnásobně na 142 ng/m³. Lze tedy předpokládat, že byla ten den koncentrace zvýšená v důsledku jiného zdroje a nárůst daný odpálením ohňostroje tuto již vyšší koncentraci markantně zvýšil. Již v následujícím 4h intervalu však byla koncentrace opět pod mezí detekce. Během třetího ohňostroje vál vítr převážně jihozápadní. Jihozápadně od umístění vzorkovače byla tribuna, kde lidé sledovali ohňostroje. Tribuna byla umístěna na nezpevněném povrchu a je tedy možné, že koncentrace narostly právě v důsledku výrazně zvýšeného pohybu osob v této oblasti. Lidé na ohňostroje přichází často s předstihem, většina však ihned po ohňostroji oblast opouští. To by mohlo vysvětlit, proč byly koncentrace vyšší pouze před a nikoliv po a proč tomu také takto bylo pouze během třetího ohňostroje. Během prvního a druhého vál vítr převážně ze severu či severozápadu a severně a severozápadně od vzorkovače byla vodní hladina přehrady, tudíž se odtud nemohl hliník dostávat do ovzduší z půdy působením větru či pohybu lidí.

Celkově došlo v průměru během intervalu zahrnujícím odpalování ohňostroje k přibližně šestinásobnému nárůstu koncentrací vápníku v ovzduší v porovnání se 4h intervaly před a po konání ohňostroje.

Tabulka 34 - Koncentrace hliníku v ovzduší [ng/m³] v jednotlivých čtyřhodinových intervalech v PM_{2,5} během konání tří ohňostrojů Ignis Brunensis 2018. Oranžově podbarvené jsou intervaly konání samotného ohňostroje. Poslední dva sloupce představují průměr všech 4h intervalu s ohňostrojem (O) a všech šesti 4h intervalů bez ohňostroje (BO). Mez detekce představuje 8,51 ng/m³.

Ohňostroj 2.6.			Ohňostroj 6.6.			Ohňostroj 9.6.			Průměr	
18-22 h	22-02 h	02-06 h	18-22 h	22-02 h	02-06 h	18-22 h	22-02 h	02-06 h	O	BO
4,25*	4,25*	4,25*	4,25*	34,1	4,25*	45,7	142	4,25*	60,12	11,16



Obrázek 55 - Koncentrace hliníku v ovzduší [ng/m³] v jednotlivých čtyřhodinových intervalech v PM_{2,5} během konání tří ohňostrojů Ignis Brunensis 2018. Červeně jsou vyznačeny sloupce intervalu konání ohňostroje a celkový průměr z 4h intervalů ohňostrojů. Oranžová přerušovaná čára značí mez detekce.

7.7.7 MANGAN

25
Mn
Mangan
54,938

Atomové číslo:	25
Hustota:	7,21 g/cm ³
Teplota tání:	1246 °C
Teplota varu:	2061 °C



Světle šedý, křehký a tvrdý mangan se v přírodě vyskytuje takřka výhradně spolu s rudami železa. Má významné průmyslové využití jako součást řady slitin, především v nerezové oceli. Dále se používá do různých pigmentů, jako katoda v zinko-uhlíkových článcích, ale jedná se také o důležitý prvek pro lidský organismus, esenciální pro správný vývoj a správnou funkci metabolismu.

Požítí manganu nepředstavuje velké riziko, avšak jeho inhalace ve vysokých koncentracích může být značně toxická a způsobovat různé psychiatrické a pohybové poruchy (Air Quality Guidelines, WHO). Důkazy o jeho karcinogenitě nejsou dostatečné. WHO dále uvádí jako bezpečnou dlouhodobou koncentraci v ovzduší 150 ng/m³.

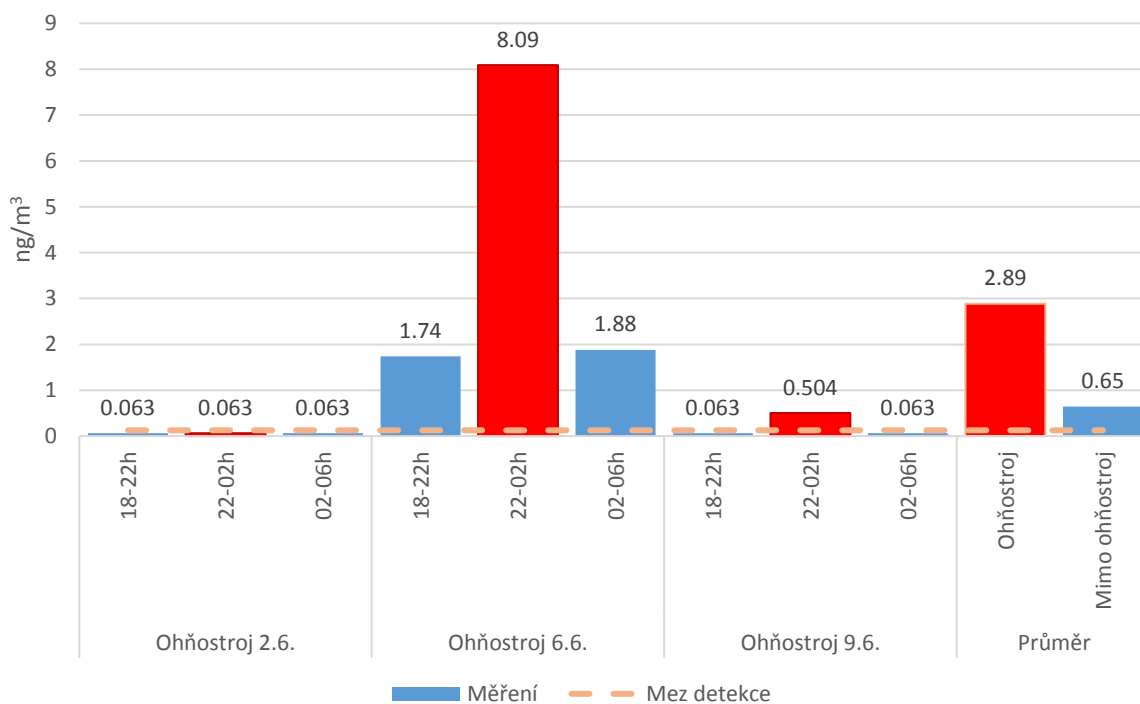
Přestože mangan nepatří k nejpoužívanějším chemickým prvkům v pyrotechnice, některé jeho sloučeniny se používají. Patří sem především oxid manganičitý (MnO₂).

Během měření tří ohňostrojí byly zvýšené koncentrace manganu naměřeny pouze během druhého ohňostroje. Jelikož se však nejedná o často používaný prvek v pyrotechnice, je možné, že jej zbylí ohňostrůjci nepoužili. Nejvyšší koncentrace naměřená během 4h intervalu byla tedy změřena v intervalu 22-02 h během odpalování druhého ohňostroje. Konkrétně bylo v tuto periodu naměřeno 8,09 ng/m³ manganu v ovzduší. I tato nejvyšší naměřená hodnota je však více než 18násobně nižší, než jakou uvádí WHO hranici dlouhodobě bezpečné koncentrace (150 ng/m³). Během prvního ohňostroje byly koncentrace ve všech třech měřených intervalech pod mezí detekce (= 0,126 ng/m³). Během třetího ohňostroje byl opět patrný nárůst během intervalu ohňostroje, ale koncentrace se zvýšily pouze na 0,5 ng/m³. Celkově pak byla průměrná koncentrace v intervalu ohňostroje přibližně 4,5x vyšší, než činí průměr z intervalů před a po konání ohňostroje.

Podle doporučení WHO (Air Quality Guidelines, WHO, 2000) a SZÚ se za neškodnou považuje hodnota 0,15 µg/m³, tedy 150 ng/m³. Zvýšené hodnoty, navíc velmi krátce, během ohňostrojí tedy nepředstavují žádné zdravotní riziko.

Tabulka 35 - Koncentrace manganu v ovzduší [ng/m^3] v jednotlivých čtyřhodinových intervalech v $\text{PM}_{2,5}$ během konání tří ohňostrojů Ignis Brunensis 2018. Oranžově podbarvené jsou intervaly konání samotného ohňostroje. Poslední dva sloupce představují průměr všech 4h intervalu s ohňostrojem (O) a všech šesti 4h intervalů bez ohňostroje (BO). Mez detekce představuje $0,126 \text{ ng}/\text{m}^3$.

Ohňostroj 2.6.			Ohňostroj 6.6.			Ohňostroj 9.6.			Průměr	
18-22 h	22-02 h	02-06 h	18-22 h	22-02 h	02-06 h	18-22 h	22-02 h	02-06 h	O	BO
0,063*	0,063*	0,063*	1,74	8,09	1,88	0,063*	0,504	0,063*	2,89	0,65



Obrázek 56 - Koncentrace manganu v ovzduší [ng/m^3] v jednotlivých čtyřhodinových intervalech v $\text{PM}_{2,5}$ během konání tří ohňostrojů Ignis Brunensis 2018. Červeně jsou vyznačeny sloupce intervalu konání ohňostroje a celkový průměr z 4h intervalů ohňostrojů. Oranžová přerušovaná čára značí mez detekce.

7.7.8 RUBIDIUM

37
Rb
Rubidium
85,468

Atomové číslo: 37
Hustota: 1,532 g/cm³
Teplota tání: 39,3 °C
Teplota varu: 688 °C



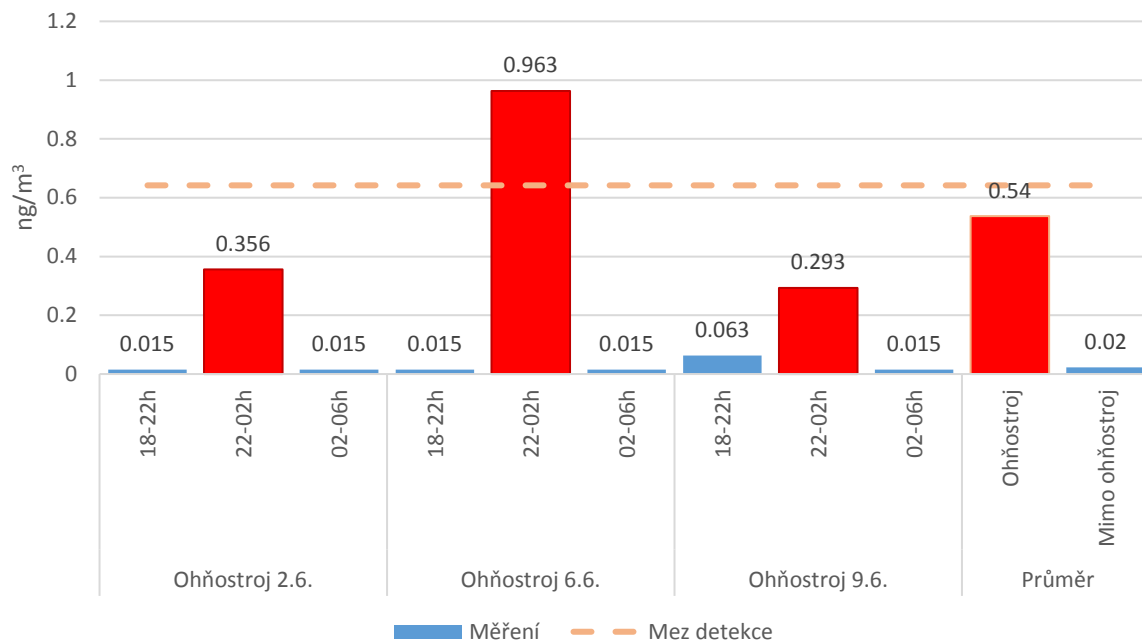
Rubidium je stříbrný, měkký a lehký kov patřící do skupiny alkalických kovů. Jedná se o velmi reaktivní prvek, na vzduchu nestálý (pokrývá se vrstvou hydroxidu). Rubidium má dva přirozeně se vyskytující izotopy – ⁸⁵Rb a radioaktivní ⁸⁷Rb. Ve stopových množstvích se rubidium vyskytuje v minerálech, ale žádný z nich nemá rubidium jako nejvíce zastoupený prvek.

Sloučeniny rubidia hoří jasným fialovým plamenem a bývají proto využívány při ohňostrojích. Toto je vidět i z výsledků naměřených koncentrací Rb v částicích PM_{2,5}. Během prvního ohňostroje byly koncentrace ve 4h intervalu před i po ohňostroji pod mezí detekce a stejně tomu tak bylo i při druhém ohňostroji. Při třetím ohňostroji byly koncentrace mírně zvýšené již před ohňostrojem, po něm opět pod mezí detekce. Maximální koncentrace byla naměřena během druhého ohňostroje, přesto se však nejednalo ani o 1 ng/m³.

Pro rubidium nejsou platné žádné imisní limity, ani není udávána konkrétní potenciálně nebezpečná hodnota. V koncentracích, v jakých se běžně pohybuje, není nebezpečný, a proto slouží spíše jako potvrzení, že exponované filtry opravdu obsahovaly částice z ohňostrojové vlečky.

Tabulka 36 - Koncentrace rubidia v ovzduší [ng/m³] v jednotlivých čtyřhodinových intervalech v PM_{2,5} během konání tří ohňostrojů Ignis Brunensis 2018. Oranžově podbarvené jsou intervaly konání samotného ohňostroje. Poslední dva sloupce představují průměr všech 4h intervalu s ohňostrojem (O) a všech šesti 4h intervalů bez ohňostroje (BO). Mez detekce představuje 0,031 ng/m³

Ohňostroj 2.6.			Ohňostroj 6.6.			Ohňostroj 9.6.			Průměr	
18-22 h	22-02 h	02-06 h	18-22 h	22-02 h	02-06 h	18-22 h	22-02 h	02-06 h	O	BO
0,015*	0,356	0,015*	0,015*	0,963	0,015*	0,063	0,293	0,015*	0,54	0,02



Obrázek 57 - Koncentrace rubidia v ovzduší [ng/m³] v jednotlivých čtyřhodinových intervalech v PM_{2,5} během konání tří ohňostrojů Ignis Brunensis 2018. Červeně jsou vyznačeny sloupce intervalu konání ohňostroje a celkový průměr z 4h intervalů ohňostrojů. Oranžová přerušovaná čára značí mez detekce.

7.7.9 ŽELEZO

26
Fe
Železo
55,845

Atomové číslo: 26
Hustota: 7,874 g/cm³
Teplota tání: 1538 °C
Teplota varu: 2862 °C

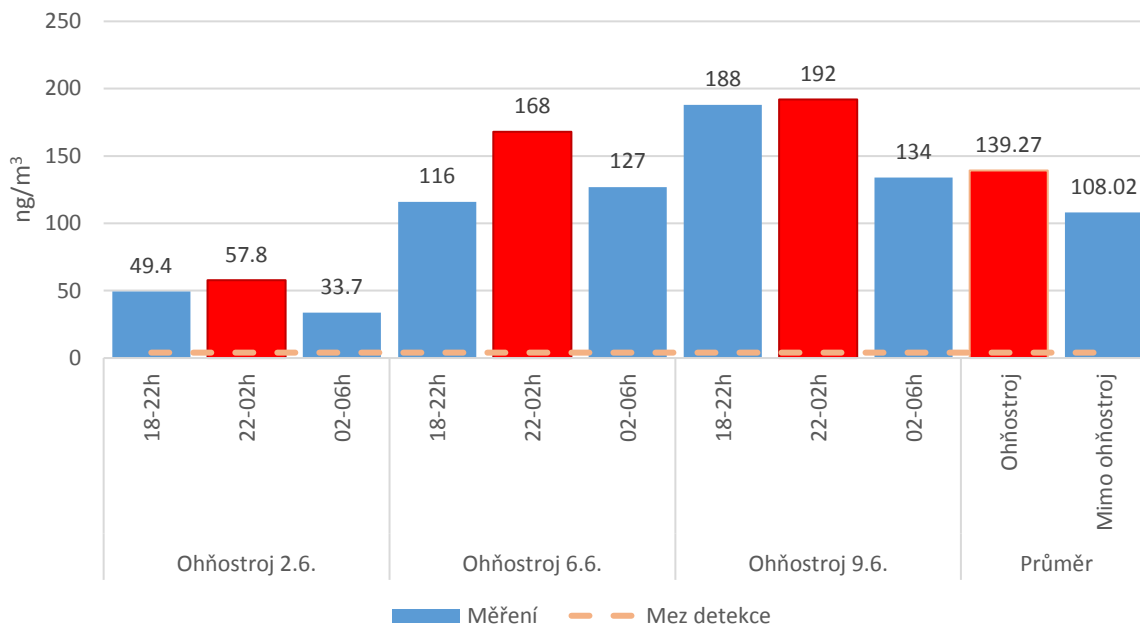


Železo je šedobílý, lesklý a středně tvrdý kov. Ve vlhkém vzduchu se pokrývá vrstvou hydroxidu. Jedná se o druhý nejrozšířenější kov na Zemi a přirozeně se vyskytuje ve čtyřech izotopech. Rudy s nejvyšším podílem železa jsou magnetit a hematit. V čisté formě se téměř nepoužívá, avšak tzv. technické železo (slitina Fe s C, P, Si a dalšími prvky) patří k nejdůležitějším materiálům ve stavebním průmyslu. Jedná se také o esenciální prvek pro lidský organismus – je nezbytnou součástí hemoglobinu (krevní barvivo) a celé řady enzymů.

V ohňostrojových složích se železo používá pro vytvoření jasných jisker (Brain, 2001). Z měření v rámci této studie však není vidět výrazný nárůst železa v ovzduší. Koncentrace nejsou v průměru během ohňostrojů ani o 30 % vyšší, než jsou koncentrace mimo ohňostroje.

Tabulka 37 - Koncentrace železa v ovzduší [ng/m³] v jednotlivých čtyřhodinových intervalech v PM_{2,5} během konání tří ohňostrojů Ignis Brunensis 2018. Oranžově podbarvené jsou intervaly konání samotného ohňostroje. Poslední dva sloupce představují průměr všech 4h intervalu s ohňostrojem (O) a všech šesti 4h intervalů bez ohňostroje (BO). Mez detekce představuje 4,01 ng/m³

Ohňostroj 2.6.			Ohňostroj 6.6.			Ohňostroj 9.6.			Průměr	
18-22 h	22-02 h	02-06 h	18-22 h	22-02 h	02-06 h	18-22 h	22-02 h	02-06 h	O	BO
49,4	57,8	33,7	116	168	127	188	192	134	139,3	108,0



Obrázek 58 - Koncentrace železa v ovzduší [ng/m³] v jednotlivých čtyřhodinových intervalech v PM_{2.5} během konání tří ohňostrojů Ignis Brunensis 2018. Červeně jsou vyznačeny sloupce intervalu konání ohňostroje a celkový průměr z 4h intervalů ohňostrojů. Oranžová přerušovaná čára značí mez detekce.

7.7.10 BOR

5
B
Bor 10,81

Atomové číslo: 5
 Hustota: 2,08 g/cm³
 Teplota tání: 2076 °C
 Teplota varu: 3927 °C

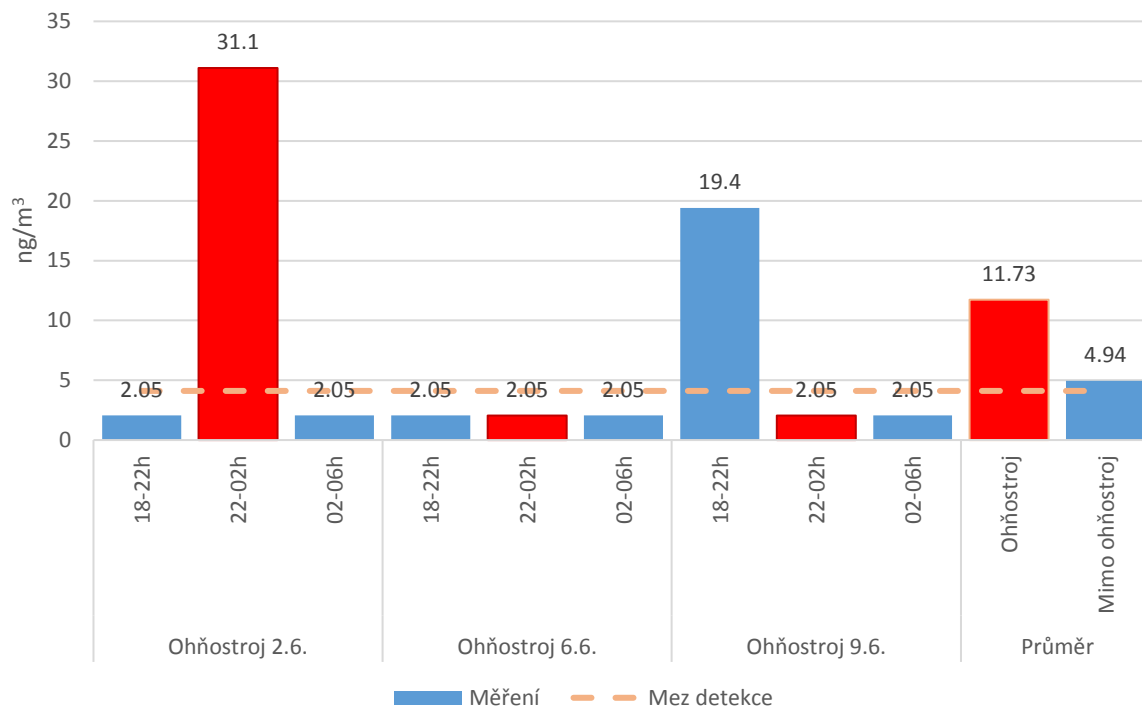


Bor řadíme mezi polokovy a svými vlastnostmi je někde na pomezí kovu a nekovu. Je v přírodě zastoupen téměř výhradně ve sloučeninách, z nichž řada je rozpuštěná v mořské vodě. V lidském těle má bor podíl na několika fyziologických procesech. Využívá se například ve sklářském průmyslu, keramice, metalurgii, jako insekticid a je například také součástí neodymových magnetů.

Hoří zeleným plamenem, a proto se v současnosti začíná používat čím dál víc a nahrazuje tradičně používané baryum. Hlavní výhodou je jeho velmi nízká toxicita i při zvýšených koncentracích (Sabatini, 2011). Výsledky měření jsou zajímavé v tom, že při prvním ohňostroji došlo k výraznému nárůstu koncentrací boru, během druhého byl i v době ohňostroje bor v ovzduší pod mezí detekce a během třetího ohňostroje opět k žádnému nárůstu nedošlo. Potenciální vysvětlení je, že pouze první tým ohňostrůjců používal progresivnější slože založené na boru.

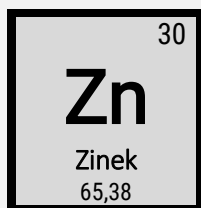
Tabulka 38 - Koncentrace boru v ovzduší [ng/m³] v jednotlivých čtyřhodinových intervalech v PM_{2,5} během konání tří ohňostrojů Ignis Brunensis 2018. Oranžově podbarvené jsou intervaly konání samotného ohňostroje. Poslední dva sloupce představují průměr všech 4h intervalu s ohňostrojem (O) a všech šesti 4h intervalů bez ohňostroje (BO). Mez detekce představuje 4,11 ng/m³

Ohňostroj 2.6.			Ohňostroj 6.6.			Ohňostroj 9.6.			Průměr	
18-22 h	22-02 h	02-06 h	18-22 h	22-02 h	02-06 h	18-22 h	22-02 h	02-06 h	O	BO
2,05*	31,1	2,05*	2,05*	2,05*	2,05*	19,4	2,05*	2,05*	11,73	4,94



Obrázek 59 - Koncentrace boru v ovzduší [ng/m³] v jednotlivých čtyřhodinových intervalech v PM_{2,5} během konání tří ohňostrojů Ignis Brunensis 2018. Červeně jsou vyznačeny sloupce intervalu konání ohňostroje a celkový průměr z 4h intervalů ohňostrojů. Oranžová přerušovaná čára značí mez detekce.

7.7.11 ZINEK



Atomové číslo: 30
Hustota: 7,14 g/cm³
Teplota tání: 419,5 °C
Teplota varu: 907 °C



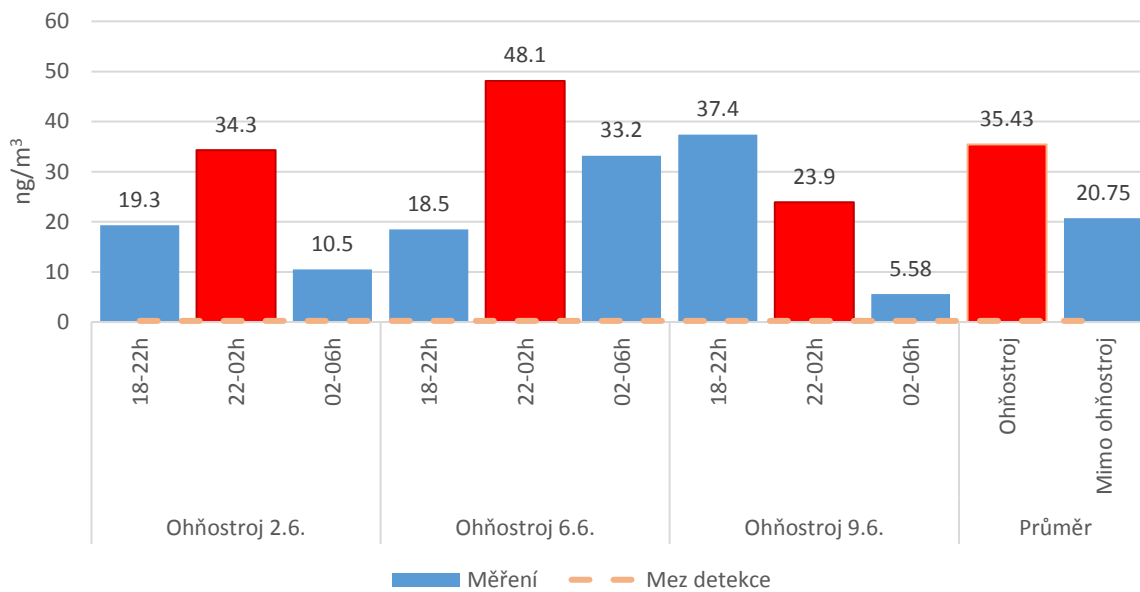
Zinek je modrobílý, měkký kov využívaný v řadě slitin. Ve sloučeninách se vyskytuje výhradně ve formě Zn²⁺. Jedná se o středně reaktivní prvek a silné redukční činidlo. Na vzduchu hoří modrozeleným plamenem. Jedná se o čtvrtý nejvyužívanější kov (po železe, hliníku a mědi) (Tolcin, 2015).

Používá se velmi často jako anti-korozivní agens a pro galvanizaci. Ze slitin je pravděpodobně nejvýznamnější mosaz (slitina Zn a Cu), používaná již od středověku. Zinek jako takový se používá i jako součást barev, pigmentů nebo jako protektant gumy a plastů před UV zářením. Jedná se také o velmi důležitý prvek pro správné fungování lidského organismu. Považuje se obecně za antioxidant (Powell, 2000) a podílí se na řadě enzymatických reakcí.

Zinek v ovzduší nemá žádné známé zdravotní rizika (http://naei.beis.gov.uk/overview/pollutants?pollutant_id=20). Ohňostrůjci používají zinek k vytvoření jasných, zářících jisker (Brain, 2001) a v dýmových efektech (Sekar, 2004). Z naměřených koncentrací během Ignis Brunensis vyplývá, že u prvních dvou ohňostrojů došlo k nárůstu koncentrací zinku v ovzduší, avšak v porovnání s některými jinými prvky se jednalo o relativně malý nárůst. Během třetího ohňostroje 9. 6. byly koncentrace během ohňostroje dokonce mírně nižší, než ve 4h intervalu před ohňostrojem. Tento rozdíl může být opět dán typem složí a efektů použitých během konkrétního ohňostroje. Celkově pak byl průměr ze 4h intervalů s ohňostrojem o 70% vyšší, než průměr ze 4h intervalů mimo ohňostroje.

Tabulka 39 - Koncentrace zinku v ovzduší [ng/m³] v jednotlivých čtyřhodinových intervalech v PM_{2,5} během konání tří ohňostrojů Ignis Brunensis 2018. Oranžově podbarvené jsou intervaly konání samotného ohňostroje. Poslední dva sloupce představují průměr všech 4h intervalu s ohňostrojem (O) a všech šesti 4h intervalů bez ohňostroje (BO). Mez detekce představuje 0,23 ng/m³

Ohňostroj 2.6.			Ohňostroj 6.6.			Ohňostroj 9.6.			Průměr	
18-22 h	22-02 h	02-06 h	18-22 h	22-02 h	02-06 h	18-22 h	22-02 h	02-06 h	O	BO
19,3	34,3	10,5	18,5	48,1	33,2	37,4	23,9	5,58	35,4	20,7



Obrázek 60 - Koncentrace zinku v ovzduší [ng/m³] v jednotlivých čtyřhodinových intervalech v PM_{2,5} během konání tří ohňostrojů Ignis Brunensis 2018. Červeně jsou vyznačeny sloupce intervalu konání ohňostroje a celkový průměr z 4h intervalů ohňostrojů. Oranžová přerušovaná čára značí mez detekce.

7.7.12 MĚĎ

29
Cu
Měď
53,546

Atomové číslo:	29
Hustota:	8,96 g/cm ³
Teplota tání:	1084,6 °C
Teplota varu:	2562 °C



Měď je měkký kov s velmi dobrou tepelnou a elektrickou vodivostí a červenooranžovým zbarvením. Je součástí řady slitin, používá se ve stavebním průmyslu, jako vodič, vyrábí se z něj často například mince či termočlánky.

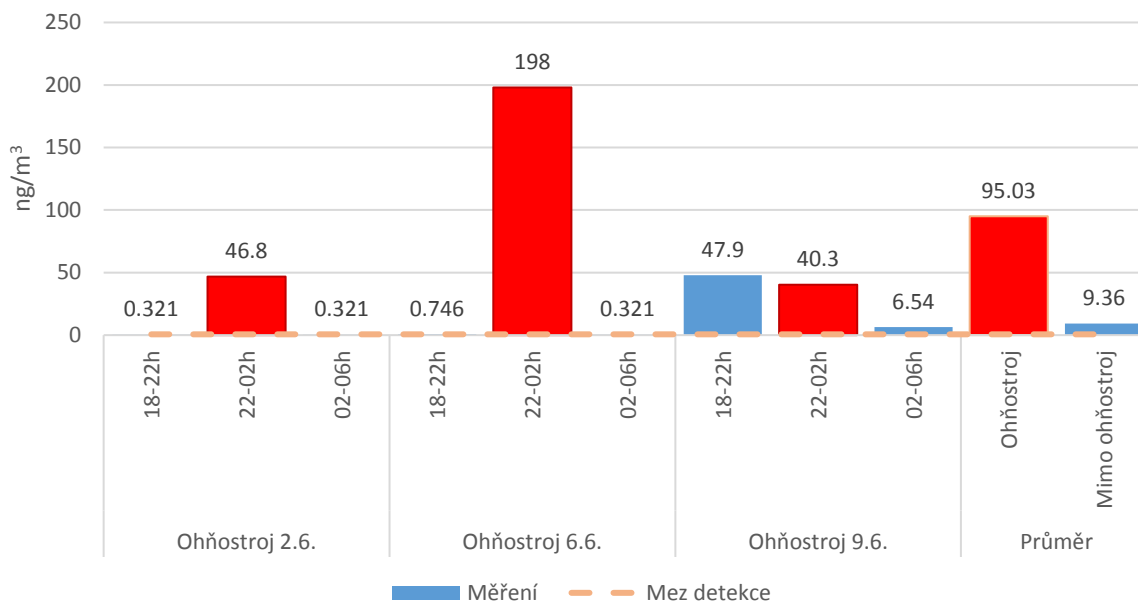
Pro lidské tělo se jedná o esenciální prvek. Napomáhá správné funkci metabolismu především prostřednictvím řady enzymů, které právě měď obsahují. Podílí se na tvorbě hemoglobinu, myelinu, melaninu a umožňuje správnou funkci štítné žlázy (Osredkar, 2011).

Krátkodobé zvýšené koncentrace mědi v ovzduší mohou vést k podráždění očí, nosu a krku a vést ke kašly, krvácení z nosu a kýčání. Chronická expozice může vést ke snížené plodnosti u mužů i žen (http://naei.beis.gov.uk/overview/pollutants?pollutant_id=13). Právě ohňostroje jsou jedním z nejvýznamnějších zdrojů mědi v ovzduší. V ohňostrojových složích se používá k docílení modrozelené barvy a některé sloučeniny umožňují dosáhnout i nejsložitější barvy pro ohňostrůjce – modré (například CuCl).

Z měření vyplývá, že koncentrace mědi se opravdu výrazně zvyšovaly během ohňostrojů. Při prvním ohňostroji byly koncentrace ve 4h intervalu před a po ohňostroji pod mezí detekce, během ohňostroje výrazně narostly na více než 50násobek meze detekce. U druhého ohňostroje byl nárůst ještě přibližně čtyřnásobně vyšší, než u prvního ohňostroje. Během třetího ohňostroje byly koncentrace paradoxně nejvyšší ve 4h intervalu před samotným ohňostrojem. Říci, co způsobilo vyšší koncentrace mědi v ovzduší ještě před ohňostrojem je složité, dalšími zdroji mědi v ovzduší může být například otěr z brzdových destiček nebo pálení dřeva a fosilních paliv. Jak již bylo zmíněno, tento třetí ohňostroj 9. 6. byl jiný směr větru, než u prvního a druhého, kdy foukalo od hladiny přehrady. Během třetího ohňostroje však foukalo z místa, kde se nacházela tribuna s diváky a stánky s občerstvením. Nelze tedy vyloučit, že právě například stánky s občerstvením byly zdrojem vyšších koncentrací, navíc byla v ten večer velmi nízká rychlost větru, takže nedocházelo k rychlému rozptylu. Celkový průměr koncentrací z intervalu s ohňostrojem byl více než desetnásobný ve srovnání s průměrem z intervalů mimo ohňostroj. Tento průměr byl navíc výrazně snížen právě třetím ohňostrojem.

Tabulka 40 - Koncentrace mědi v ovzduší [ng/m³] v jednotlivých čtyřhodinových intervalech v PM_{2,5} během konání tří ohňostrojů Ignis Brunensis 2018. Oranžově podbarvené jsou intervaly konání samotného ohňostroje. Poslední dva sloupce představují průměr všech 4h intervalu s ohňostrojem (O) a všech šesti 4h intervalů bez ohňostroje (BO). Mez detekce představuje 0,642 ng/m³

Ohňostroj 2.6.			Ohňostroj 6.6.			Ohňostroj 9.6.			Průměr	
18-22 h	22-02 h	02-06 h	18-22 h	22-02 h	02-06 h	18-22 h	22-02 h	02-06 h	O	BO
0,321*	46,8	0,321*	0,746	198	0,321*	47,9	40,3	6,54	95,0	9,4



Obrázek 61 - Koncentrace mědi v ovzduší [ng/m³] v jednotlivých čtyřhodinových intervalech v PM_{2,5} během konání tří ohňostrojů Ignis Brunensis 2018. Červeně jsou vyznačeny sloupce intervalu konání ohňostroje a celkový průměr z 4h intervalů ohňostrojů. Oranžová přerušovaná čára značí mez detekce.

7.7.13 CHROM

24
Cr
Chrom
52,00

Atomové číslo: 24
Hustota: 7,19 g/cm³
Teplota tání: 1907 °C
Teplota varu: 2671 °C



Chrom je lesklý, bílý a křehký kov, který vyniká zejména svojí neobvykle vysokou tvrdostí – jedná se o vůbec nejtvrďší kov (Singh, 2005). Jedná se o relativně nereaktivní kov, který za vyšších teplot reaguje s halogeny.

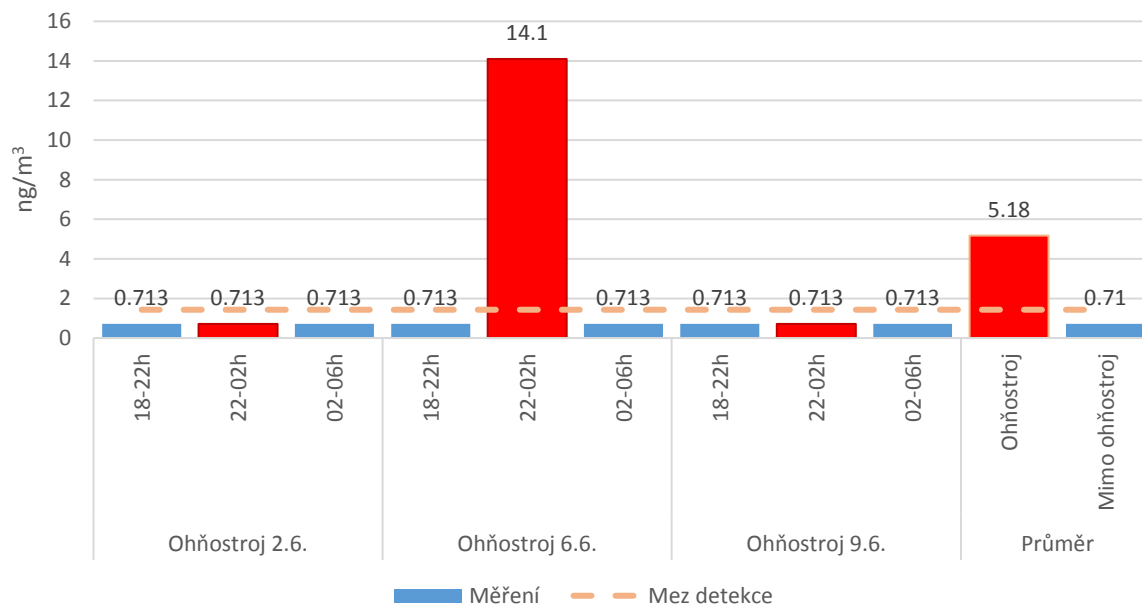
V přírodě se chrom nejčastěji vyskytuje v rudách chromit a krokoit. Má celou řadu využití, je jednou ze součástí nerezové oceli, používá se především v metalurgickém průmyslu, chrání kovové povrchy před korozí a je využíván i pro svůj atraktivní vzhled (matný stříbrný leštěný povrch). Ion Cr(III) patří mezi esenciální prvky pro lidský organismus. Má nezastupitelnou roli v metabolismu tuků a sacharidů (Vincent, 2000), umožňuje správné fungování insulínu (Park, 2004). Naopak Cr(VI) je vysoce karcinogenní (Air Quality Guidelines. WHO, 2000).

Jedním z nejvýznamnějších zdrojů chromu v ovzduší je pálení dřeva a dále lokální topeniště. V pyrotechnických efektech se používá jako oxidační činidlo (Niragu, 1988), ale od jeho používání se upouští. K nárůstu koncentrací chromu nad mez detekce došlo pouze během 4h intervalu konání druhého ohňostroje, kdy bylo naměřeno 14,1 ng/m³.

Imisní limit pro chrom není stanoven, jako referenční koncentrace je SZÚ stanovena hodnota 0,025 ng/m³. Avšak tato hodnota se vztahuje pouze na Cr(VI), nikoliv na celkový chrom. Průměrně tvoří Cr(VI) přibližně 0,001 až 10% z celkového chromu.

Tabulka 41 - Koncentrace chromu v ovzduší [ng/m³] v jednotlivých čtyřhodinových intervalech v PM_{2,5} během konání tří ohňostrojů Ignis Brunensis 2018. Oranžově podbarvené jsou intervaly konání samotného ohňostroje. Poslední dva sloupce představují průměr všech 4h intervalu s ohňostrojem (O) a všech šesti 4h intervalů bez ohňostroje (BO). Mez detekce představuje 1,43 ng/m³

Ohňostroj 2.6.			Ohňostroj 6.6.			Ohňostroj 9.6.			Průměr	
18-22 h	22-02 h	02-06 h	18-22 h	22-02 h	02-06 h	18-22 h	22-02 h	02-06 h	O	BO
0,713*	0,713*	0,713*	0,713*	14,1	0,713*	0,713*	0,713*	0,713*	5,18	0,71



Obrázek 62 - Koncentrace chromu v ovzduší [ng/m^3] v jednotlivých čtyřhodinových intervalech v $\text{PM}_{2,5}$ během konání tří ohňostrojů Ignis Brunensis 2018. Červeně jsou vyznačeny sloupce intervalu konání ohňostroje a celkový průměr z 4h intervalů ohňostrojů. Oranžová přerušovaná čára značí mez detekce.

7.7.14 BISMUT

83	Bi
Bismut 208,98	

Atomové číslo: 83
 Hustota: 9,78 g/cm³
 Teplota tání: 271,5 °C
 Teplota varu: 1564 °C

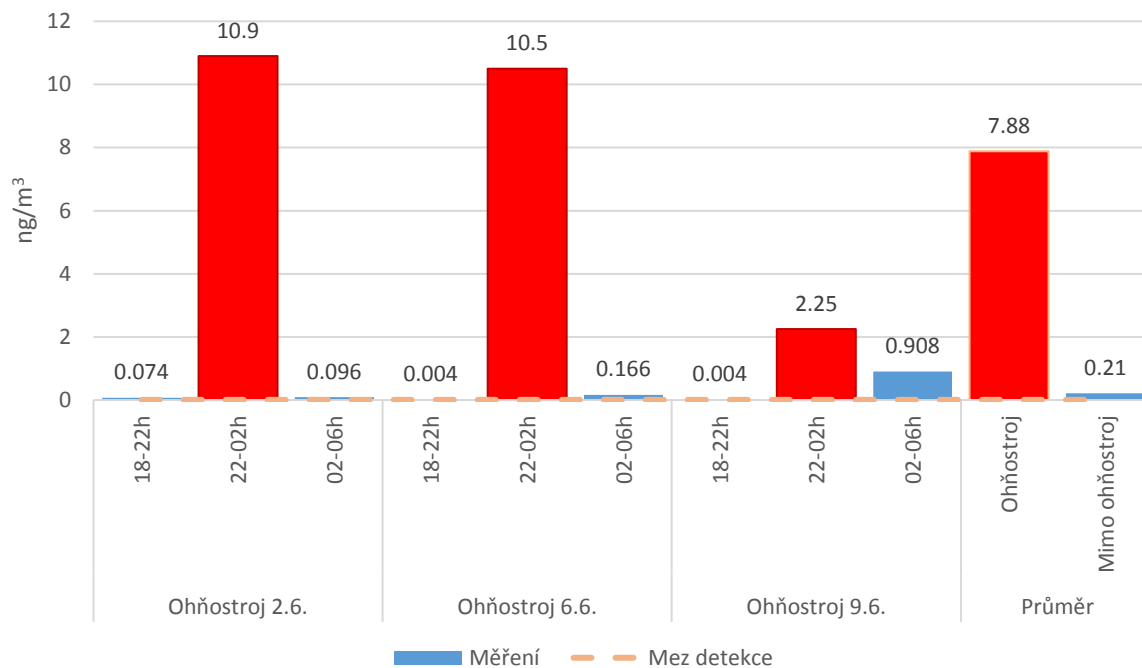


Bismut je křehký kov s bílým až stříbřitorůžovým nádechem a krystalickou strukturou. V přírodě se vyskytuje jak v čisté formě, tak ve sloučeninách, ale jedná se o relativně vzácný prvek. Nejdůležitějším minerálem obsahujícím bismut je bismutin (Bi₂S₃).

Sloučeniny bismutu se používají ve sklářském průmyslu, k výrobě pigmentů, ve farmacii, kosmetickém průmyslu nebo jako částečná náhrada olova ve střelivu (kvůli toxicitě olova). Právě jeho nízká toxicita z něj dělá atraktivní kov pro řadu využití. V ohňostrojových složích se bismut používá k vytvoření praskajícího efektu (Bi₂O₃) a zastupuje tak dříve používaný Pb₃O₄.

Tabulka 42 - Koncentrace bismutu v ovzduší [ng/m³] v jednotlivých čtyřhodinových intervalech v PM_{2,5} během konání tří ohňostrojů Ignis Brunensis 2018. Oranžově podbarvené jsou intervaly konání samotného ohňostroje. Poslední dva sloupce představují průměr všech 4h intervalu s ohňostrojem (O) a všech šesti 4h intervalů bez ohňostroje (BO). Mez detekce představuje 0,007 ng/m³

Ohňostroj 2.6.			Ohňostroj 6.6.			Ohňostroj 9.6.			Průměr	
18-22 h	22-02 h	02-06 h	18-22 h	22-02 h	02-06 h	18-22 h	22-02 h	02-06 h	O	BO
0,074	10,9	0,096	0,004*	10,5	0,166	0,004*	2,25	0,908	7,88	0,21



Obrázek 63 - Koncentrace bismutu v ovzduší [ng/m^3] v jednotlivých čtyřhodinových intervalech v $\text{PM}_{2,5}$ během konání tří ohňostrojů Ignis Brunensis 2018. Červeně jsou vyznačeny sloupce intervalu konání ohňostroje a celkový průměr z 4h intervalů ohňostrojů. Oranžová přerušovaná čára značí mez detekce.

7.7.15 VÁPNIK

20
Ca
Vápník 40,078

Atomové číslo: 20
Hustota: 1,55 g/cm³
Teplota tání: 842 °C
Teplota varu: 1484 °C



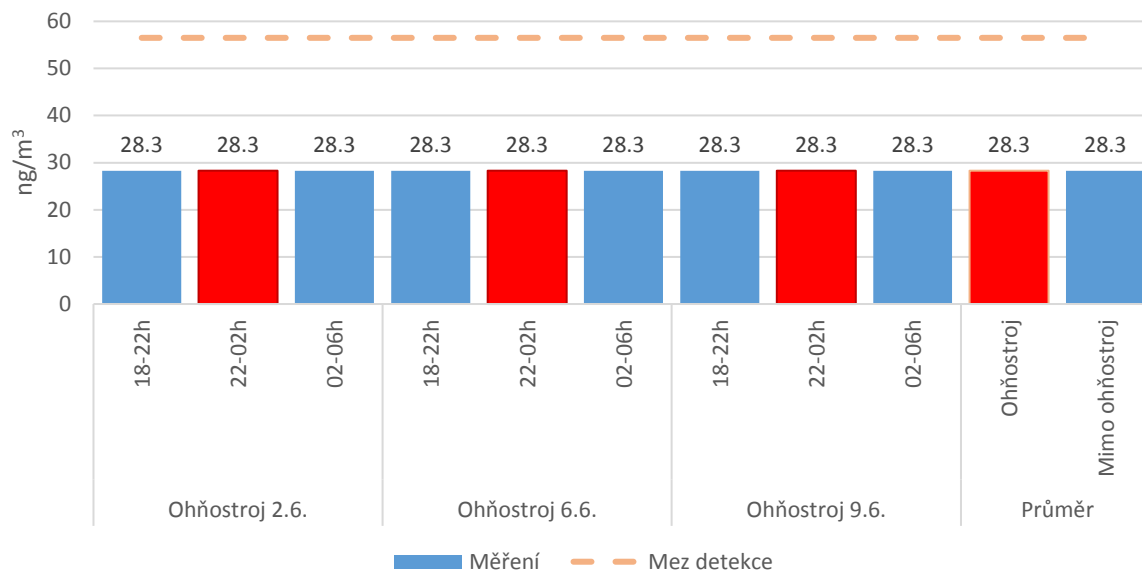
Vápník je zástupce ze skupiny kovů alkalických zemin. Jedná se o lehký a zároveň velmi reaktivní prvek, svými vlastnostmi velmi podobný hořčíku. V přírodě se vyskytuje pouze ve sloučeninách a to vždy jako Ca²⁺. Pro lidské tělo představuje naprosto esenciální prvek, který je naprosto nezbytný například pro tvorbu kostí, zubů apod. Nejzastoupenější formou vápníku v přírodě je vápenec (uhličitan vápenatý, CaCO₃).

V životním prostředí vyvolává vápník zvýšení pH, tedy alkality a to napomáhá neutralizaci nežádoucích účinků kyselého prostředí. Významným zdrojem vápníku v ovzduší jsou jak přírodní zdroje (např. půdní eroze), tak antropogenní zdroje (těžba, spalovací procesy).

V pyrotechnice se vápník využívá k dosažení oranžově zbarvených efektů. Nejčastěji se používá CaCl₂ nebo CaSO₄·xH₂O. Během měření v rámci akce Ignis Brunensis se však zvýšené koncentrace vápníku v ovzduší během odpalování ohňostroje nepotvrdily. Nelze zcela vyloučit, že nedošlo k jejich nárůstu, avšak ve všech devíti měřených 4h intervalech během 3 ohňostrojů byly koncentrace vždy pod mezí detekce (= 56,5 ng/m³).

Tabulka 43 - Koncentrace vápníku v ovzduší [ng/m³] v jednotlivých čtyřhodinových intervalech v PM_{2,5} během konání tří ohňostrojů Ignis Brunensis 2018. Oranžově podbarvené jsou intervaly konání samotného ohňostroje. Poslední dva sloupce představují průměr všech 4h intervalu s ohňostrojem (O) a všech šesti 4h intervalů bez ohňostroje (BO). Mez detekce představuje 56,5 ng/m³

Ohňostroj 2.6.			Ohňostroj 6.6.			Ohňostroj 9.6.			Průměr	
18-22 h	22-02 h	02-06 h	18-22 h	22-02 h	02-06 h	18-22 h	22-02 h	02-06 h	O	BO
28,3*	28,3*	28,3*	28,3*	28,3*	28,3*	28,3*	28,3*	28,3*	28,3*	28,3*



Obrázek 64 - Koncentrace vápníku v ovzduší [ng/m³] v jednotlivých čtyřhodinových intervalech v PM_{2,5} během konání tří ohňostrojů Ignis Brunensis 2018. Červeně jsou vyznačeny sloupce intervalu konání ohňostroje a celkový průměr z 4h intervalů ohňostrojů. Oranžová přerušovaná čára značí mez detekce.

7.7.16 ANTIMON

51
Sb
Antimon
121,76

Atomové číslo: 51
Hustota: 6,697 g/cm³
Teplota tání: 630,6 °C
Teplota varu: 1635 °C



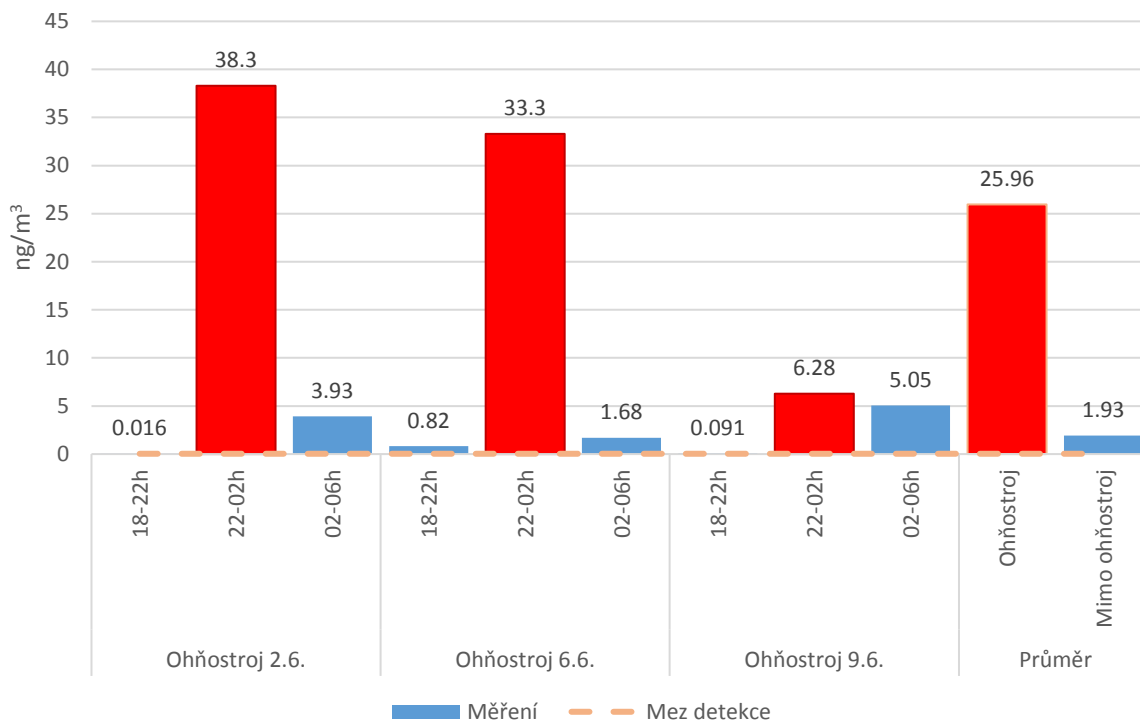
Antimon je stříbrný, lesklý, vysoce křehký kov až polokov krystalické struktury. V přírodě se vyskytuje i ryzí, většinou však v rudách spolu s olovem, mědí nebo stříbrem. Využívá se ke zlepšení vlastností některých slitin nebo při výrobě kaučuku. Dále se používá například v akumulátorech, jako aditivum do textilií a plastů, kde snižuje jejich hořlavost.

Jedním z významných zdrojů antimonu v ovzduší je otěr brzdových destiček (Iijima, 2008). Z dalších zdrojů lze jmenovat právě ohňostroje. Antimon se používá v řadě pyrotechnických efektů ke zvýraznění třpytu a záře (Russel, 2009).

Měření potvrdila, že se koncentrace antimonu během odpalování ohňostroje zvyšují. Vůbec nejvyšší koncentrace naměřená ve 4h intervalu byla 38,3 ng/m³ a to během 4h intervalu odpálení prvního ohňostroje.

Tabulka 44 - Koncentrace antimonu v ovzduší [ng/m³] v jednotlivých čtyřhodinových intervalech v PM_{2,5} během konání tří ohňostrojů Ignis Brunensis 2018. Oranžově podbarvené jsou intervaly konání samotného ohňostroje. Poslední dva sloupce představují průměr všech 4h intervalu s ohňostrojem (O) a všech šesti 4h intervalů bez ohňostroje (BO). Mez detekce představuje 0,032 ng/m³

Ohňostroj 2.6.			Ohňostroj 6.6.			Ohňostroj 9.6.			Průměr	
18-22 h	22-02 h	02-06 h	18-22 h	22-02 h	02-06 h	18-22 h	22-02 h	02-06 h	O	BO
0,016*	38,3	3,93	0,82	33,3	1,68	0,091	6,28	5,05	25,96	1,93



Obrázek 65 - Koncentrace antimonu v ovzduší [ng/m³] v jednotlivých čtyřhodinových intervalech v PM_{2,5} během konání tří ohňostrojů Ignis Brunensis 2018. Červeně jsou vyznačeny sloupce intervalu konání ohňostroje a celkový průměr z 4h intervalů ohňostrojů. Oranžová přerušovaná čára značí mez detekce.

7.8 SHRNU TÍ KOVŮ

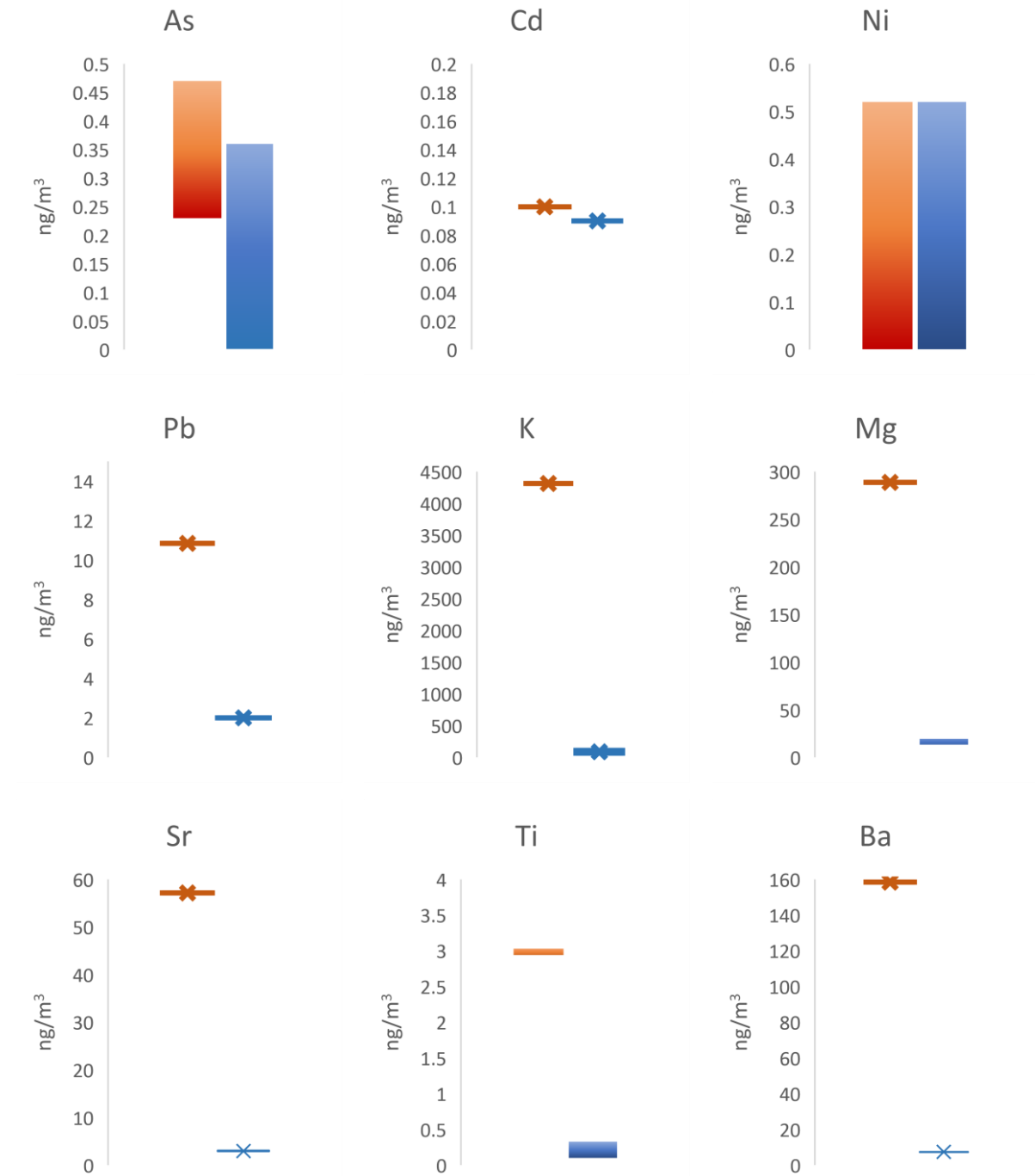
V následující tabulce jsou uvedeny průměry z intervalů konání ohňostroje (O) a intervalů bez ohňostroje – tedy před a po ohňostroji (BO).

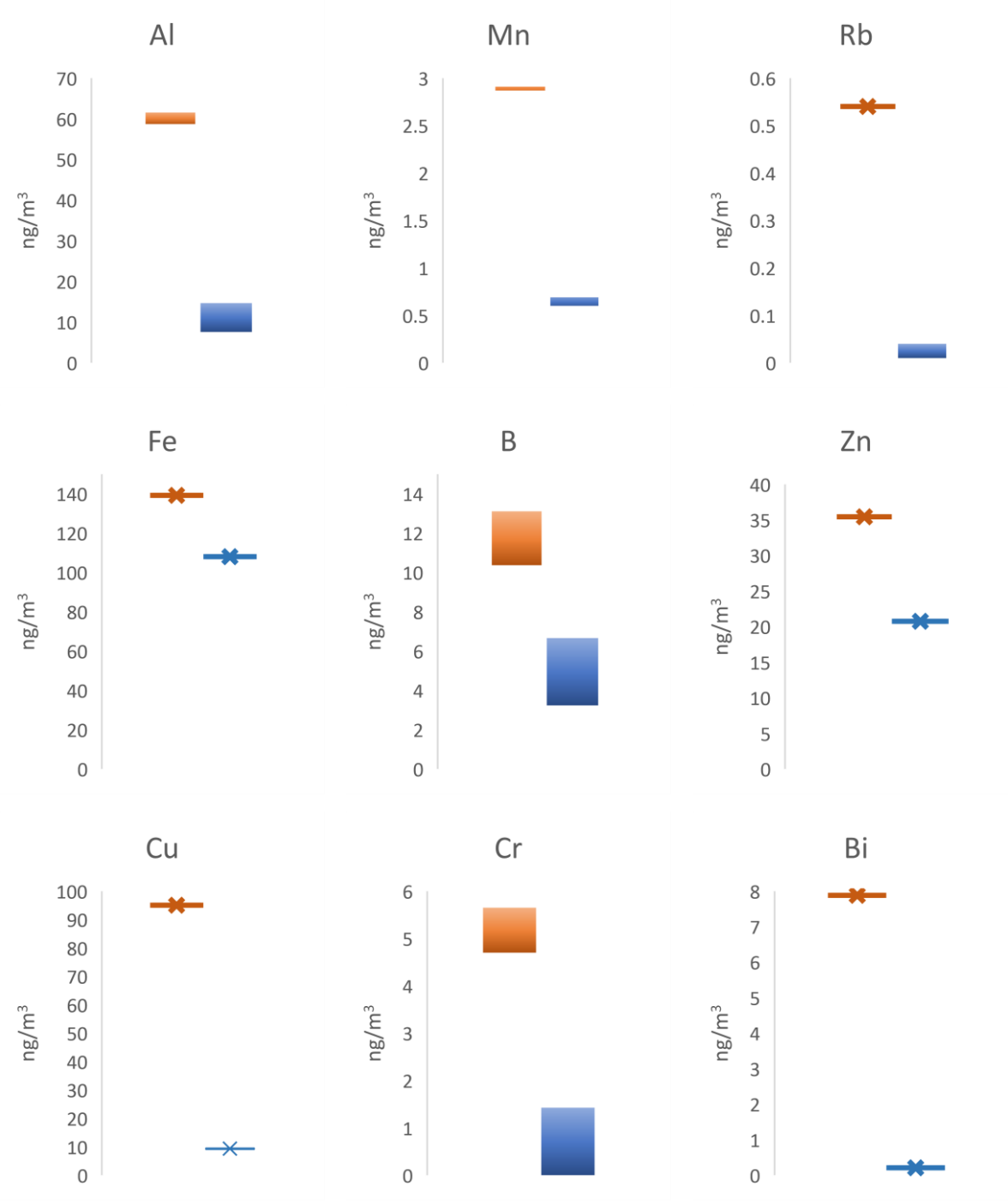
Jelikož byly koncentrace často pod mezí detekce, byly v tabulkách uváděny poloviny těchto detekčních mezí. V následující tabulce je vypočítán interval průměru, kde nejnižší hodnota bere v potaz všechny hodnoty pod mezí detekce jako 0,001 ng/m³ a naopak nejvyšší hodnota situaci, kdy všechna měření byla právě rovna mezi detekce. V případě, že byly všechny hodnoty v daném souboru dat nad mezí detekce, je minimum a maximum rovno.

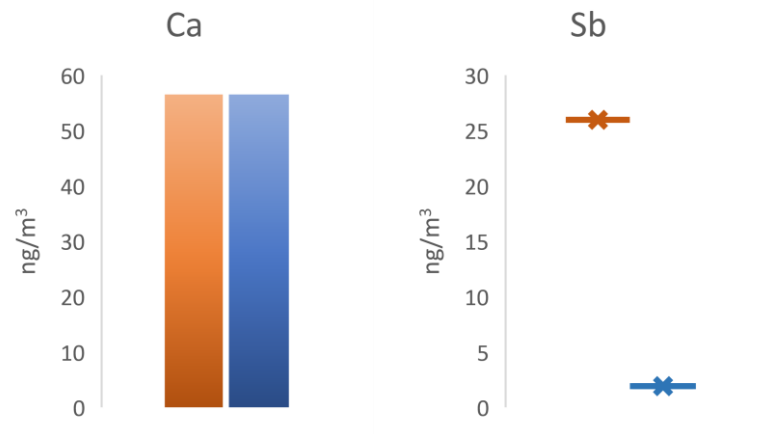
Tabulka 45 – Intervaly průměrných hodnot koncentrací v PM_{2,5} pro jednotlivé prvky. Průměr O představuje průměr z 4h period konání ohňostroje. Průměr BO značí průměr z 4h období před a po ohňostroji. Minimální hodnota průměru počítá hodnoty pod mezí detekce jako 0,001, naopak maximální hodnota počítá hodnoty pod mezí detekce jako rovnu mezi detekce.

Prvek	Průměr (O)		Průměr (BO)	
	min	max	min	max
As	0,23	0,47	0,001	0,36
Cd	0,10		0,09	
Ni	0,001	0,52	0,001	0,52
Pb	10,84		2,00	
K	4313,33		64,67	108
Mg	288,67		13,53	19,47
Sr	57,17		2,91	3,08
Ti	2,94	3,03	0,10	0,33
Ba	158,40		7,35	7,54
Al	58,70	61,54	7,62	14,71
Mn	2,87	2,91	0,60	0,69
Rb	0,54		0,01	0,04
Fe	139,27		108,02	
B	10,37	13,11	3,23	6,66
Zn	35,43		20,75	
Cu	95,03		9,20	9,52
Cr	4,70	5,65	0,001	1,43
Bi	7,88		0,208	0,210
Ca	0,001	56,5	0,001	56,5
Sb	25,96	25,96	1,929	1,934

Obrázek 66 – Srovnání intervalů průměrných koncentrací z PM_{2,5} pro jednotlivé prvky. Oranžový sloupec/linie je průměr z intervalů během konání ohňostroje. Tmavě modrý sloupec/linie představuje interval průměru z 4h period před a po ohňostroji.







8. SEM ANALÝZA

8.1 TECHNICKÉ VYBAVENÍ

- autoemisní rastrovací elektronový mikroskop TESCAN Mira3
- EDX detektor X-Max^N 20 od Oxford Instruments (AZtec Energy)
- Airity 5.0 – vlastní software pro částicovou analýzu



Obrázek 67 - SEM TESCAN Mira3 v laboratoři ČHMÚ na pobočce Brno

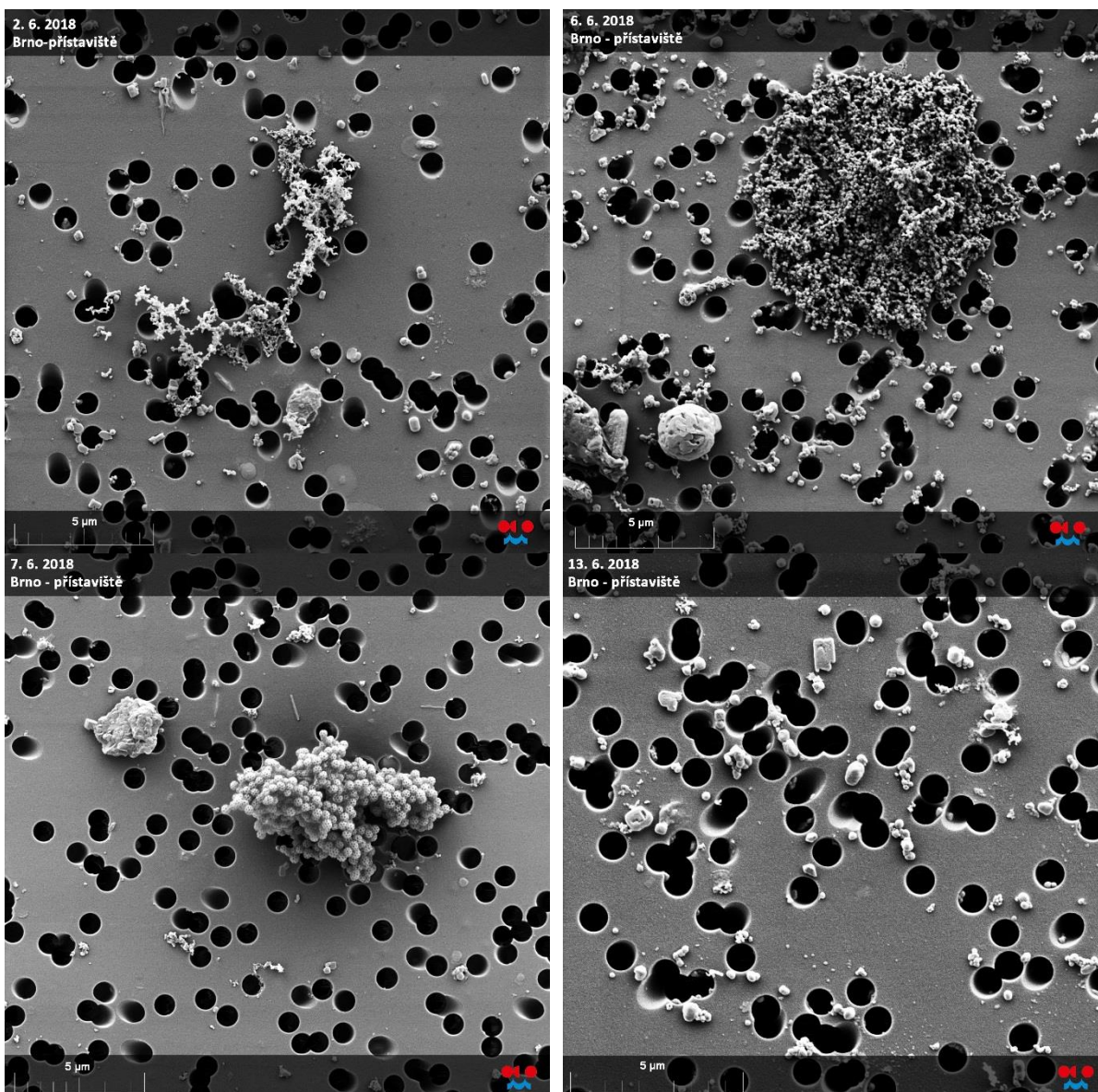
8.2 ZÁKLADNÍ INFORMACE

Skenovací elektronová mikroskopie v kombinaci s energiově-disperzivní rentgenovou spektroskopií (SEM/EDX) představuje velmi efektivní nástroj pro charakterizaci suspendovaných částic v ovzduší (Willis et al., 2002). Umožňuje odhalit nejen jejich chemické respektive prvkové složení, ale i morfologii a to i u částic velkých jen několik desetin mikrometru. Speciální software pak umožňuje provádět automatickou analýzu jednotlivých částic, což vzhledem k velkému počtu částic, které je potřeba analyzovat, z důvodu reprezentativnosti vzorku jinak nebylo možné kvůli extrémní časové náročnosti.

K odběru vzorků bylo použito nízkoobjemového vzorkovače Leckel MVS6 v kombinaci s polykarbonátovými filtry (IsoporeTM, velikost pórů 0,8 μm). Odběry byly prováděny po dobu 4 h při průtoku $1\text{m}^3/\text{h}$, vždy od 22 h do 2 h ráno. Průtok během odběru vzorků kolísal, nejedná se tedy čistě o frakci částic PM_{10} . Tři ze čtyř odběrů byly provedeny v den konání ohňostroje (22:30-22:50). Jeden z odběrů byl proveden ve stejnou denní dobu, ale v den bez ohňostroje a sloužil jako referenční srovnání.



Obrázek 68 - Nízkoobjemový vzorkovač Leckel MVS6, vpravo jeho umístění s ostatními vzorkovači Leckel na brněnské přehradě (zcela vpravo)



Obrázek 69 - Fotografie částic na polykarbonátovém filtru exponovaném během Ignis Brunensis 2018 pořízená skenovacím elektronovým mikroskopem

8.3 KLASIFIKACE

Za účelem roztřídění částic do tříd byla vytvořena klasifikační kritéria, díky kterým bylo možné částice na základě obsahu konkrétních prvků, popřípadě ve spojení s jejich tvarem zařadit. Pokud konkrétní částice nespĺnila kritéria ani jedné ze tříd klasifikačního schématu, byla zařazena do třídy „Nezařazená“. V případě, že částice splnila klasifikační kritéria více než jedné třídy, byla přiřazena do více tříd. Z toho také plyne, že součet procentuálního zastoupení jednotlivých tříd z celku je v součtu vyšší než 100 %.

Níže uvedená klasifikace je založena na klasifikačním systému EPA (Willis, 2002), je však mírně modifikována s ohledem na účel hodnocení. Byly přidány některé třídy obsahující prvky používané v ohňostrojevých složích a byla vytvořena třída „Ohňostroje“, která zahrnuje právě částice obsahující částice pro ohňostroje typické, navíc bere v potaz i jejich tvar.

Tabulka 46 – tabulka klasifikačních tříd a definice jejich kritérií. Hodnoty představují hmotnostní procenta (Wt %).

Al bohatá	Al ≥ 50	částice bohatá na hliník
Al-Zr-Cl	Al ≥ 30 Zr ≥ 20 Cl ≥ 3	částice obsahující hliník, zirkon a chlor
Ba	Ba ≥ 10 Ba > Fe	částice obsahující baryum
Bi bohatá	Bi ≥ 10	částice bohatá na bismut
Ca	20 ≤ Ca < 50	částice obsahující vápník
Ca a Mg bohatá	Mg ≥ 10 Ca ≥ 25 Mg > S Mg > Si Ca > Si	částice bohatá na vápník a hořčík
Ca a S bohatá	Ca + S ≥ 50 Ca ≥ 20 S ≥ 20 Ca > Si	částice bohatá na vápník a síru
Ca bohatá	50 ≤ Ca < 70	částice bohatá na vápník
Ca bohatý hlinitokřemičitan	Al ≥ 10 Si ≥ 20 Ca ≥ 10 Si ≥ Ca	hlinitokřemičitan bohatý na vápník
Ca vysoká	Ca ≥ 70	částice s vysokým obsahem vápníku
Cr bohatá	Cr ≥ 50	částice bohatá na chrom
Cu	20 ≤ Cu < 50	částice obsahující měď
Cu bohatá	Cu ≥ 50	částice bohatá na měď
Fe	20 ≤ Fe < 70	částice obsahující železo

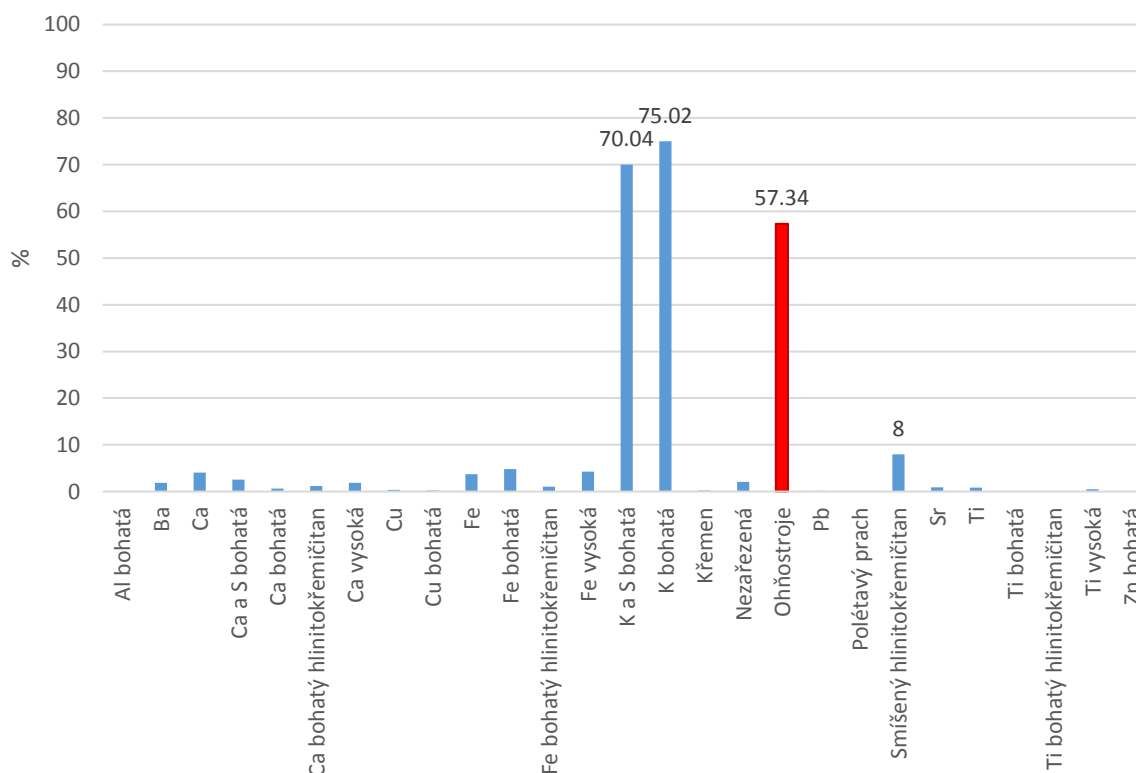
Fe bohatá	Fe ≥ 50 Ca < 25 S < 25 Cl < 25 Si < 10 Al < 10 Ba < 10	částice bohatá na železo
Fe bohatý hlinitokřemičitan	Al ≥ 10 Si ≥ 20 Fe ≥ 10 Si > Fe Fe > Ca	hlinitokřemičitan bohatý na železo
Fe vysoká	Fe ≥ 70	částice obsahující vysoký obsah železa
K a P bohatá	P ≥ 40 K ≥ 10 P + K ≥ 60	částice bohatá na draslík a fosfor
K a S bohatá	S ≥ 10 S > P K + S ≥ 40 K ≥ 20	částice bohatá na draslík a síru
K bohatá	K ≥ 20	částice bohatá na draslík
křemen	Si ≥ 75 Al < 10	
mastek	Mg ≥ 10 Al < 10 Si ≥ 40 Ca < 10 Fe < 10	
Mn	20 ≤ Mn < 50	částice obsahující mangan
Mn bohatá	Mn ≥ 50	částice bohatá na mangan
Ni a/nebo V	Ni + V ≥ 20	částice obsahující nikl nebo/a vanad
ohňostroje	tvár < 1.6 dále splňuje některou z podmínek: <ul style="list-style-type: none"> • Ba > 10 • Sr > 10 • K + S > 40 • Mg > 20 a Al < 10 • Ti > 10 • K + Cl > 40 • Bi > 10 	
Pb	Pb ≥ 20	částice obsahující olovo
polétavý prach	20 < Al < 50 40 < Si < 60 2 ≤ K < 8 Mg ≤ 5 Na < 3 Cl < 3 Fe ≥ 1,15	
smíšený hlinitokřemičitan	Al ≥ 10 Si ≥ 20	
Sr	Sr ≥ 10	částice obsahující stroncium

sůl	$\text{Na} + \text{Cl} \geq 40$	
Ti	$\text{Ti} \geq 20$ $\text{Ti} > \text{Ca}$ $\text{Ti} > \text{Fe}$	částice obsahující titan
Ti bohatá	$50 \leq \text{Ti} < 70$	částice bohatá na titan
Ti bohatý hlinitokřemičitan	$\text{Al} \geq 10$ $\text{Si} \geq 20$ $\text{Ti} \geq 10$ $\text{Si} \geq \text{Ti}$	hlinitokřemičitan bohatý na titan
Ti vysoká	$\text{Ti} \geq 70$	částice s vysokým obsahem titanu
Zn bohatá	$\text{Zn} \geq 50$	částice bohatá na zinek

8.4 OHŇOSTROJ 2. 6. 2018

Vzorkování probíhalo ve 4h intervalu zahrnujícím 30 minut před začátkem ohňostroje, samotný ohňostroj a přibližně 3 následující hodiny (interval vzorkování 22:00-02:00). Celkem bylo mikroskopem analyzováno 7127 částic. Do vyhodnocení však byly započítány pouze částice, u kterých měl alespoň jeden prvek významné zastoupení (na základě chyby měření dané koeficientem sigma), takových částic bylo 6161.

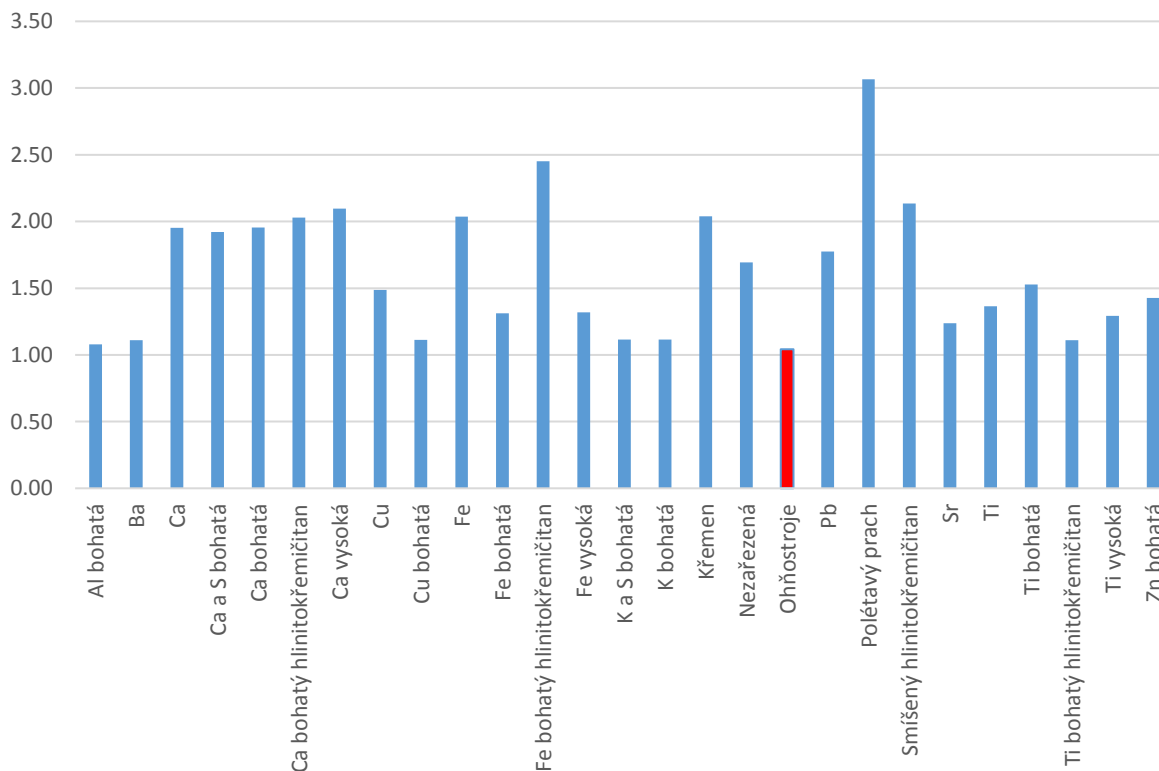
Na základě stanovených kritérií pro jednotlivé třídy částic se podařilo zařadit do alespoň jedné ze tříd 6035 částic – 126 zůstalo nezařazených. Nejzastoupenější třídou byla třída částic bohatých na draslík (Wt% K \geq 20%), jejíž definici splňovalo celkem 4622 částic (75,0 %). 4315 částic (70,0 %) navíc spadalo i do třídy částic bohatých na draslík a síru. Do speciálně vytvořené třídy „Ohňostroje“ bylo klasifikováno 3533 částic (57,3 %). 493 částic (8,0 %) bylo zařazeno do třídy smíšených hlinitokřemičitanů. Všechny ostatní třídy měly poměr částic nižší než 5 %.



Obrázek 70 – procentuální zastoupení jednotlivých tříd. Třída ohňostrojů je zvýrazněna červeně.

Kromě samotného počtu částic v jednotlivých třídách byl sledován i jejich tvar. Ten je udáván koeficientem, kde čím blíže je hodnota hodnotě 1, tím je částice kulatější. S narůstajícím koeficientem je částice nepravidelnější. Obecně platí, že jsou částice produkované spalovacími procesy pravidelnější, naopak částice vzniklé mechanickými vlivy mívají nepravidelný tvar.

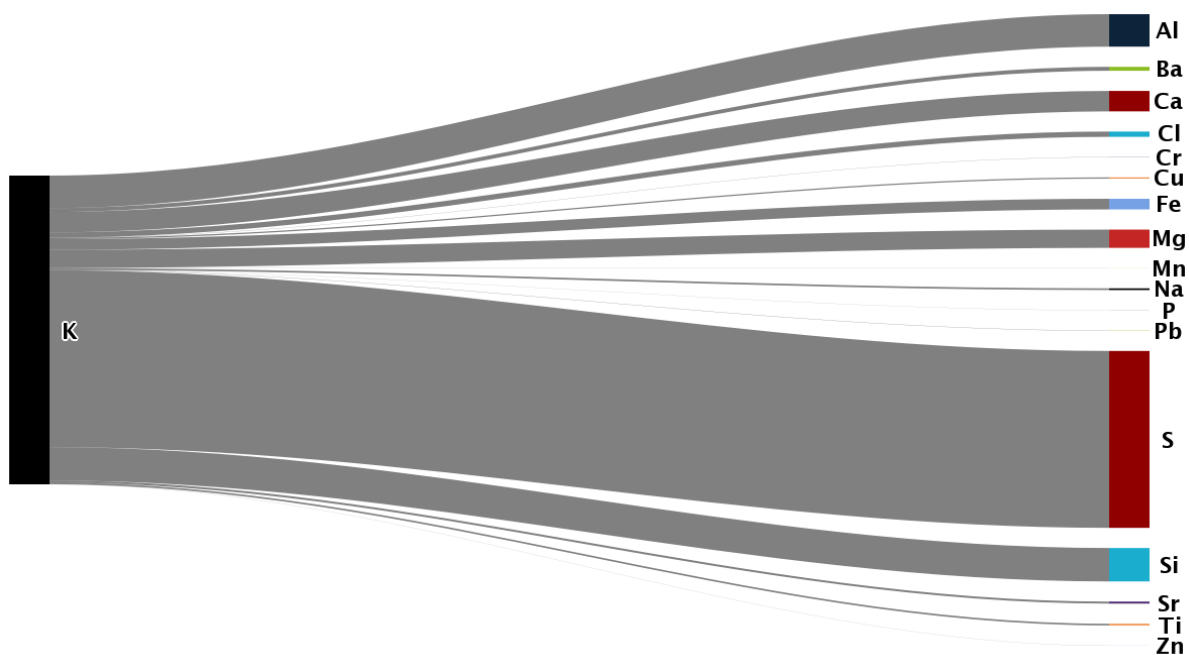
Za účelem eliminace potenciálního zkreslujícího vlivu extrémních hodnot byl místo průměru použit medián tvaru. Třídou s nejpravidelnějšími částicemi (nejnižší medián) byla právě třída ohňostroju, což by potvrdovalo vznik těchto částí během ohňostroje hořením. Naopak nejvyšší medián a tedy nejnepravidelnější částice zahrnovala třída poléťavého prachu, hlinitokřemičitanu bohaté na železo, smíšené hlinitokřemičitanu, třída s částicemi s vysokým obsahem vápníku a třída křemen.



Obrázek 71 – medián tvaru částic pro jednotlivé třídy. Čím blíže je číslo 1, tím jsou částice pravidelnějšího tvaru. Třída ohňostroju je zvýrazněna červeně.

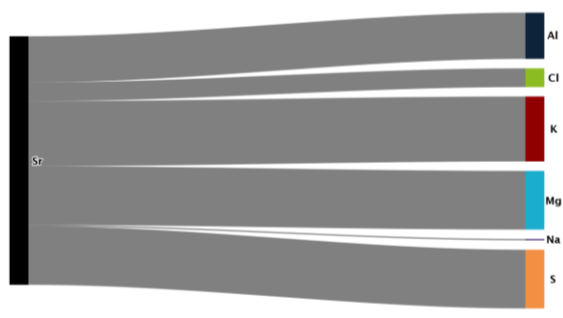
Poléťavý prach vzniká především spalováním uhlí (Ahmaruzzaman, 2011), proto by se dal předpokládat spíše pravidelný tvar. Celkově však byly do této skupiny zařazeny pouze 2 částice, což nelze brát jako významný vzorek. Hlinitokřemičitanu jsou často částice půdní a v ovzduší se vyskytují zcela běžně, proto není překvapením, že byly identifikovány. 298 částic (4,8 %) bylo zařazeno do třídy na železo bohatých částic. Vzhledem k jejich relativně pravidelnému tvaru (medián 1,31) se lze domnívat, že se přinejmenším z části jednalo o částice z ohňostrojevých emisí. Na vzorku bylo dále identifikováno 54 částic (0,9 %) obsahujících více než 10 váhových procent stroncia. Běžně se stroncium v ovzduší téměř nevyskytuje, důkazem toho je i pouze jediná identifikovaná částice třídy stroncia ve dni bez ohňostroje. Medián tvaru částic třídy Sr byl 1,24, tedy se jednalo o částice velmi pravidelného tvaru. Prvkem typickým pro ohňostroje je také baryum. Do skupiny Ba bylo během ohňostroje 2. 6. zařazeno 115 částic (1,9 %), které navíc měly téměř kulový tvar (medián tvaru 1,11).

V dalším kroku analýzy byly hledány vztahy mezi jednotlivými prvky, tedy v jaké kombinaci se v částicích prvky vyskytují. Níže uvedený graf ukazuje nejvíce zastoupený prvek (draslík) a prvky, se kterými se nejčastěji vyskytoval v částicích. Z grafu je patrné, že nejčastěji se draslík vyskytoval se sírou, což odpovídá hypotéze, že se jednalo o částice z ohňostrokové vlečky – právě K a S jsou prvky velmi často používané v ohňostrokových efektech.

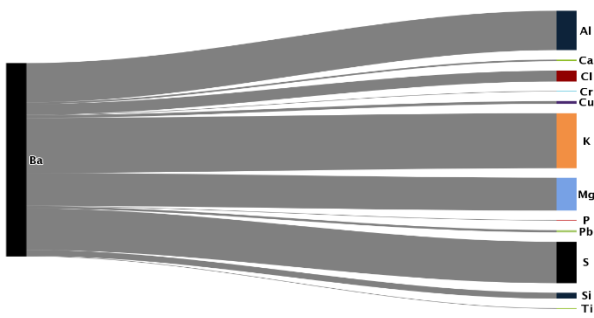


Obrázek 72 – podíl kombinací prvků v částicích s draslíkem

Rovněž pohled na některé další vztahy částic jasně ukazují na původ v ohňostrokových emisích. Například již zmíněné stroncium bylo v částicích identifikováno velmi často s draslíkem, hořčíkem, chlorem, sírou, sodíkem či hliníkem – vše prvky používané v ohňostrokových efektech. Baryum bylo nejčastěji s draslíkem, sírou nebo hliníkem.



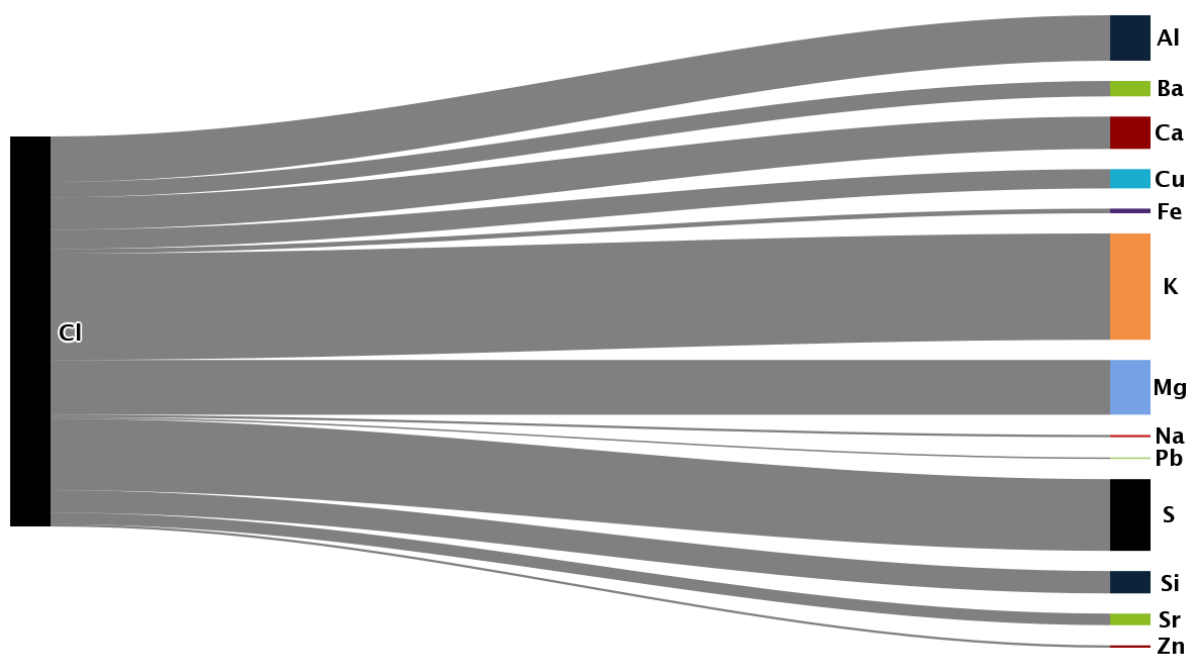
Obrázek 73 - podíl kombinací prvků v částicích se stronciem



Obrázek 74 - podíl kombinací prvků v částicích s baryem

V ohňostrokových složích často používanou látku představuje KCl (Li, 2013). Z podílu kombinací prvků s draslíkem se jeví Cl jako relativně nevýznamný, avšak je třeba brát v potaz velké množství částic

s draslíkem identifikovaných ve vzorku. V grafu kombinací prvků s chlorem už je vidět významný podíl částic právě s kombinací prvků K a Cl, právě s draslíkem se částice chloru vyskytovaly nejčastěji.

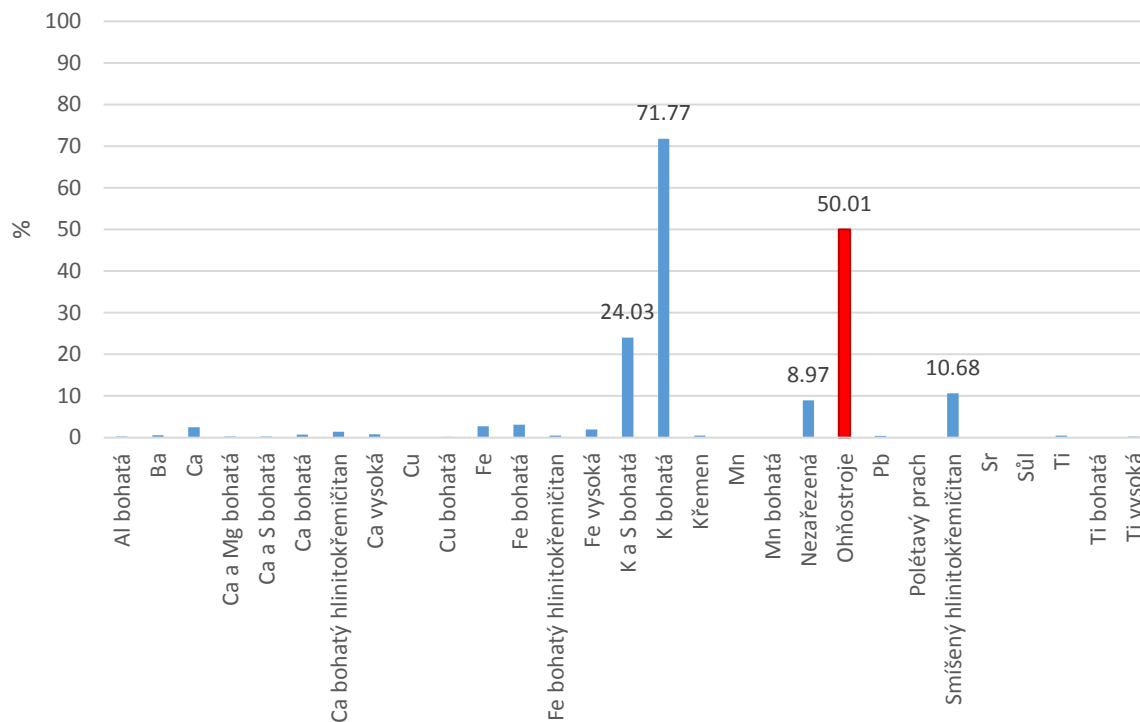


Obrázek 75 - podíl kombinací prvků v částicích s chlorem

8.5 OHŇOSTROJ 6. 6. 2018

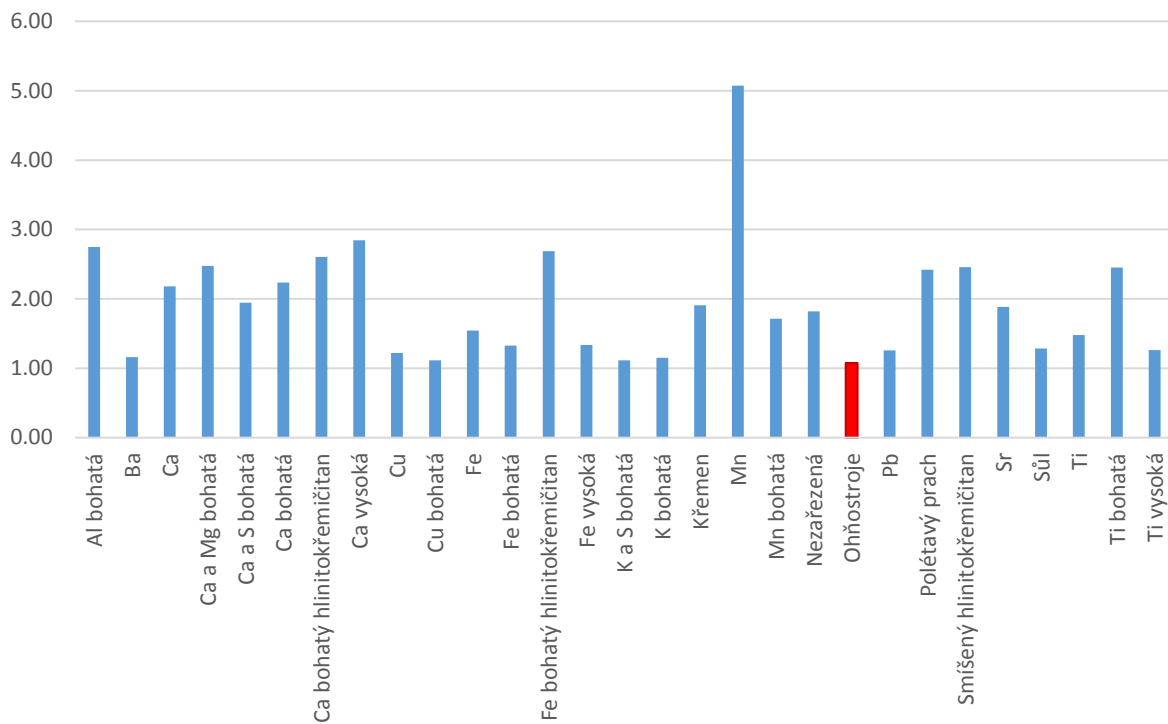
Z druhého ohňostroje mezi 22 a 2 h ranní bylo analyzováno celkem 4760 částic. Do hodnocení bylo zařazeno 3379 z nich, u kterých měl alespoň jeden prvek významné zastoupení (na základě chyby měření dané koeficientem sigma). Z toho bylo na základě stanovených tříd zařazeno 3076 částic, jako „nezařazená“ bylo vyhodnoceno 303 částic (8,97 % z hodnocených).

Shodně s prvním ohňostrojem byla jako nejpočetnější třída vyhodnocena třída částic bohatých na draslík, do které bylo zařazeno 2425 částic (71,8 %). Druhou třídou s nejvíce částicemi byla třída „ohňostroje“, do které bylo zařazeno 1690 částic (50,0 %). Další třídou s větším počtem částic představuje třída částic bohatých na draslík a síru, kam bylo klasifikováno 812 částic (24,0 %). Tři nejzastoupenější třídy jsou tedy shodné s prvním ohňostrojem. Jedinou další třídou, jejíž zastoupení částic přesáhlo 10 %, byla třída smíšených hlinitokřemičitanů (361 částic; 10,7 %). Nad 5% zastoupení měla dále už jen třída nezařazených částic. Výsledky analýzy jsou tedy velmi podobné ohňostroji 2. 6., čtyři nejvíce zastoupené třídy jsou shodné, pouze bylo u tohoto ohňostroje vyhodnoceno větší procento částic jako „ohňostroje“ a až na třetím místě byla třída částic bohatých na draslík a síru. Výše uvedené výsledky navíc korespondují s předpokladem, že budou ve vzorcích ve vyšší míře zastoupeny částice typické pro ohňostroje (draslík, síra), ale i částice běžně se nacházející v ovzduší (hlinitokřemičitany). Podíl stroncia je nižší, než u prvního ohňostroje, to však může být dáno konkrétními použitými efekty během ohňostroje.



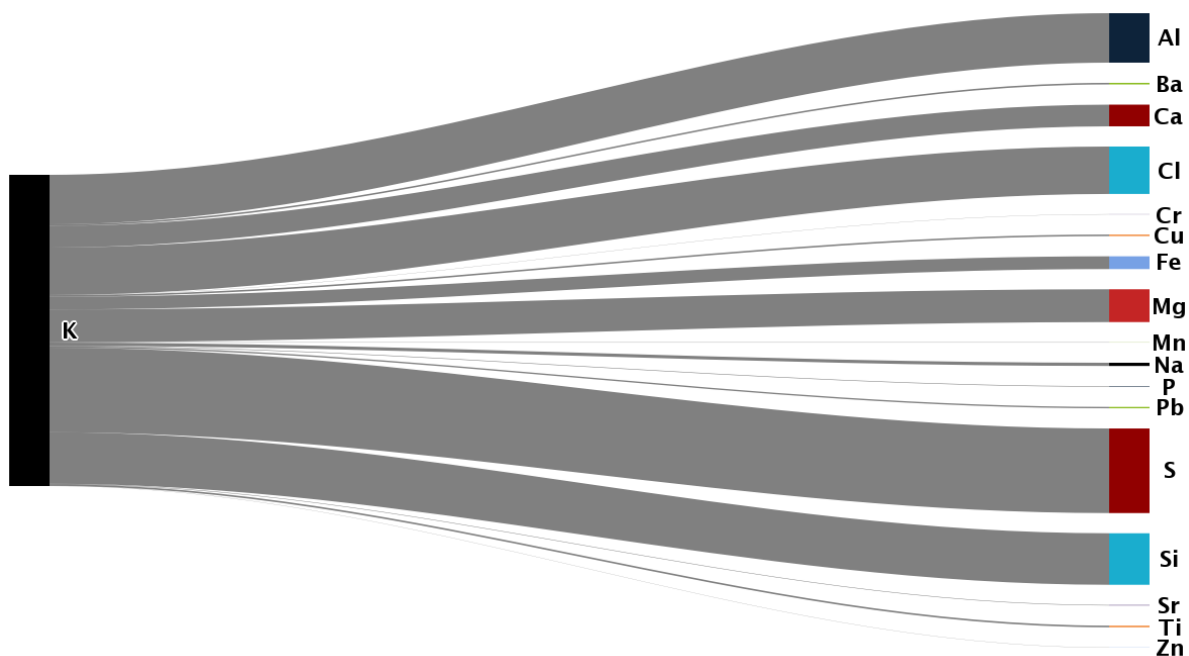
Obrázek 76 - procentuální zastoupení jednotlivých tříd. Třída ohňostroje je zvýrazněna červeně.

Rovněž ve shodě s předpokladem a ve shodě s prvním ohňostrojem, byly nejpravidelnějšího tvaru částice ve třídě „ohňostroje“, které měly nejnižší medián tvaru (1,08). Velmi pravidelného tvaru byly i částice bohaté na draslík, draslík a síru, měď a baryum. Naopak nejnepravidelnější byly třídy hlinitokřemičitanů, částice bohaté na vápník a hliník – obecně částice hojně se vyskytující v půdě, nepravidelného tvaru.



Obrázek 77 - medián tvaru částic pro jednotlivé třídy. Čím blíže je číslo 1, tím jsou částice pravidelnějšího tvaru. Třída ohňostrojí je zvýrazněna červeně.

Nejčastěji se vyskytující draslík byl shodně s prvním ohňostrojem v částicích v kombinaci se sírou a také chlorem, což opět naznačuje původ částic z ohňostrojevé vlečky.

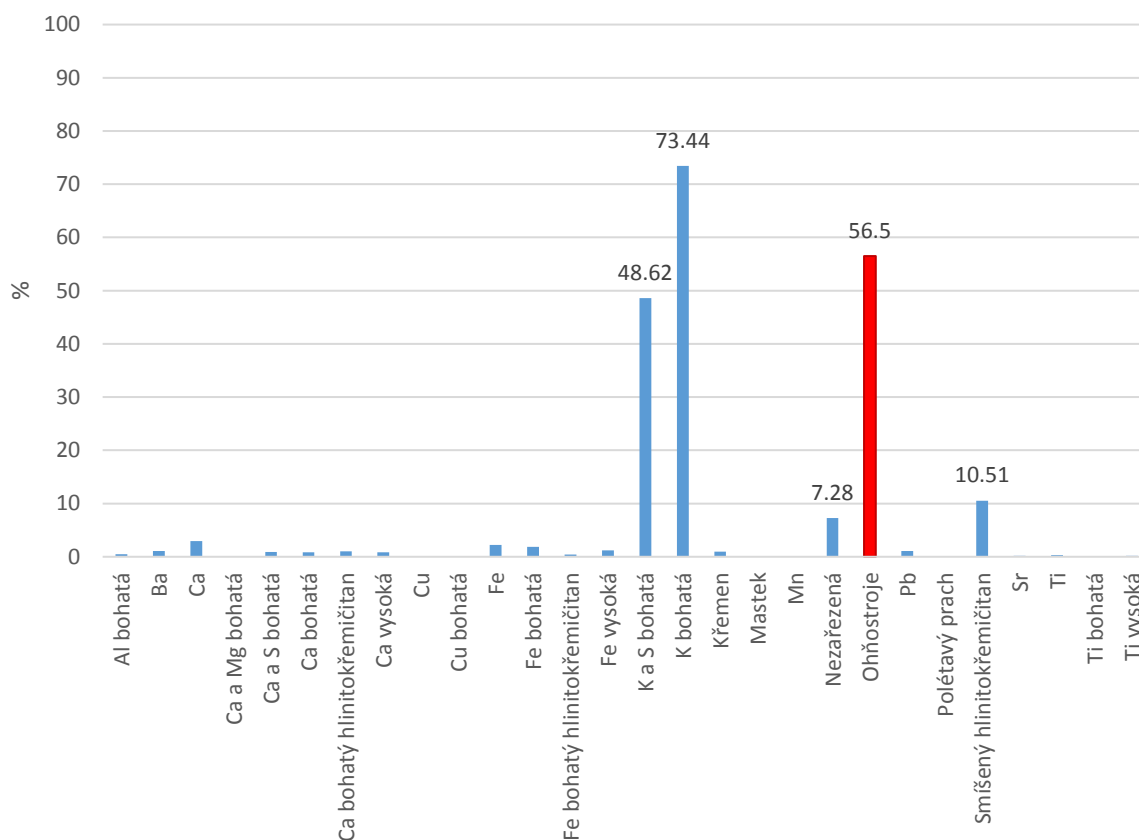


Obrázek 78 - podíl kombinací prvků v částicích s draslíkem

8.6 OHŇOSTROJ 13. 6. 2018

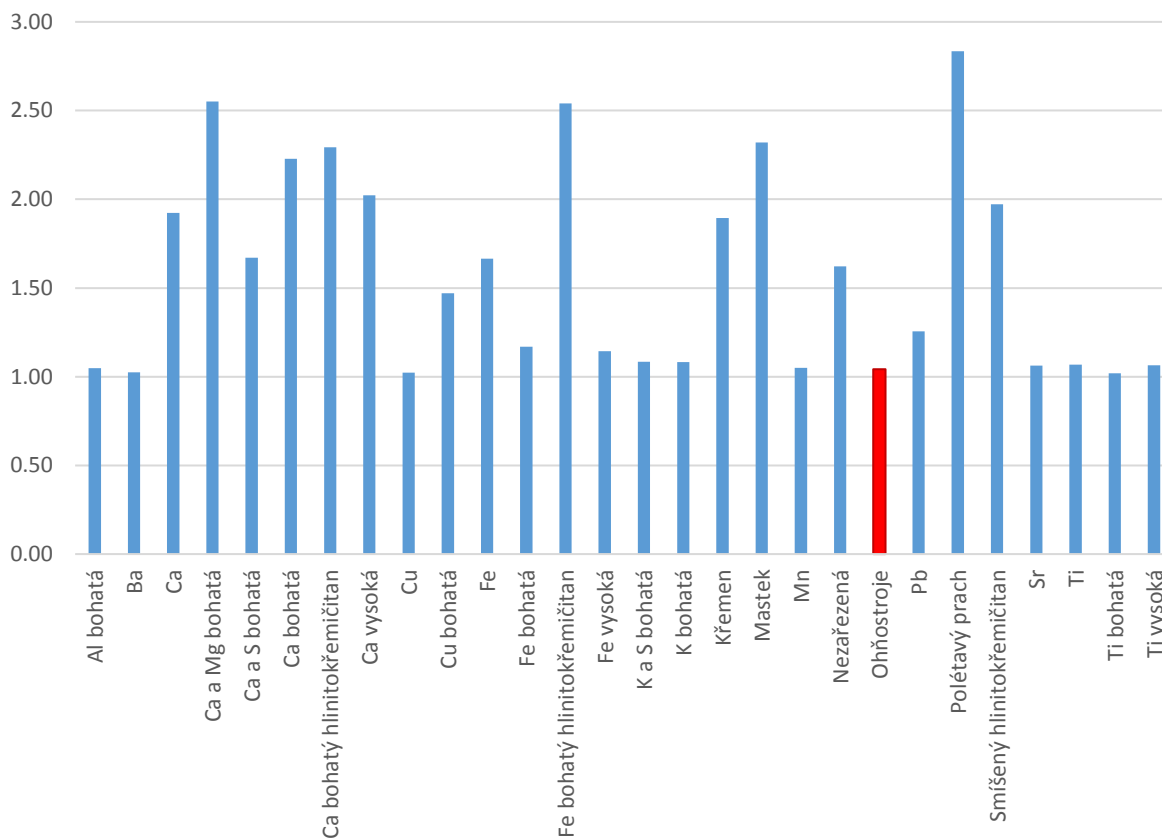
Během třetího analyzovaného ohňostroje 13. 6. bylo na polykarbonátovém filtru mikroskopem analyzováno 9230 částic. Z tohoto počtu bylo použito pro analýzu 6981 částic, u kterých alespoň jeden prvek měl významné zastoupení (na základě chyby měření dané koeficientem sigma). Z 6981 částic bylo do jedné nebo více tříd klasifikováno 6473, u 508 částic (7,3 %) byla přiřazena třída „nezařazená“.

Ve shodě s oběma zbylými ohňostroji měla největší poměr zastoupení tříd částic bohatých na draslík (5127 částic; 73,4 %). Druhou nejvíce zastoupenou třídou byla třída ohňostrojů, kam bylo zařazeno 3944 částic (56,5 %). Třetí třídou s nejvíce částicemi byla třída částic bohatých na draslík a síru (3394 částic; 48,6 %). Ve shodě s ostatními ohňostroji byla čtvrtou nejzastoupenější třídou třída smíšených hlinítokřemičitanů (734 částic; 10,5 %), následována třídou nezařazených částic (508 částic; 7,28 %). U žádné další třídy nepřesál podíl částic 5 %. Zvýšený počet částic byl identifikován také ve třídě barya, jejich celkový podíl byl vyšší než 1 %.



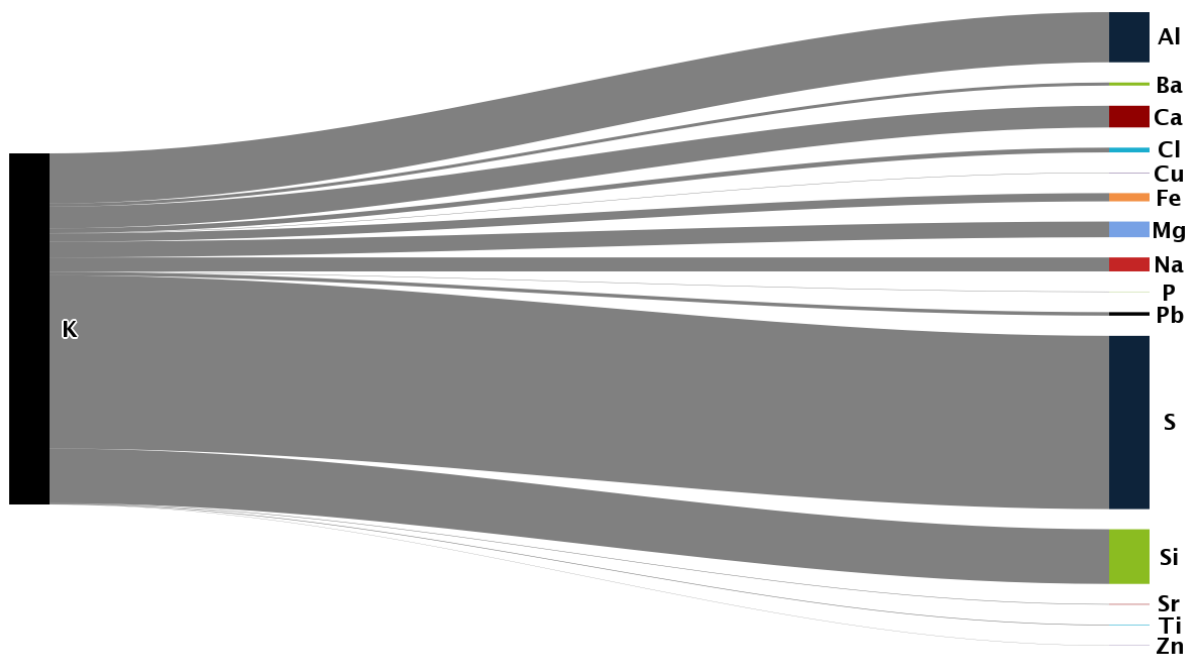
Obrázek 79 - procentuální zastoupení jednotlivých tříd. Třída ohňostrojů je zvýrazněna červeně.

Nejnižší medián tvaru měly částice bohaté na titan (1,02) a měď (1,02). V obou případech ale tyto třídy obsahovaly méně než 10 částic. Třída ohňostrojů měla rovněž velmi nízký medián tvaru (1,04) a výrazně více částic (3944). V celkovém souboru částic se tedy jednalo o jedny z nejpravidelnějších.



Obrázek 80 - medián tvaru částic pro jednotlivé třídy. Čím blíže je číslo 1, tím jsou částice pravidelnějšího tvaru. Třída ohňostrojů je zvýrazněna červeně.

Z celkového počtu 6981 částic obsahovalo alespoň 5 % draslíku 6670 (95,5 %). Pro klasifikaci potenciálního zdroje částic je dále důležitá kombinace prvků v dané částici. Jak je vidět na níže uvedeném grafu, nejčastěji se částice draslíku vyskytovaly spolu s částicemi síry.

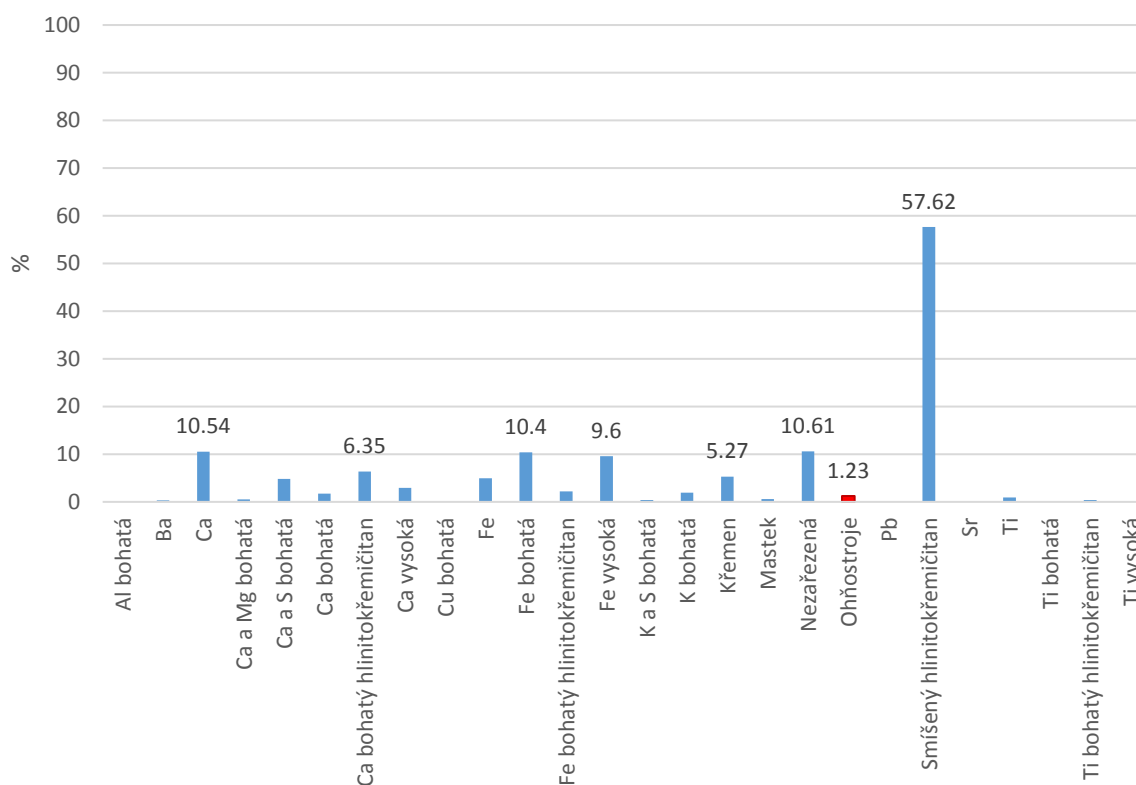


Obrázek 81 - podíl kombinací prvků v částicích s draslíkem

8.7 DEN BEZ OHŇOSTROJE 7. 6. 2018

Za účelem srovnání se dnem bez ohňostroje byl proveden 4h odběr 7. 6. 2018. Celkově bylo mikroskopem analyzováno 2072 částic, z nichž kritérium, aby alespoň jeden prvek měl významné zastoupení (na základě chyby měření dané koeficientem sigma) splnilo 1385, které byly použity pro další klasifikaci.

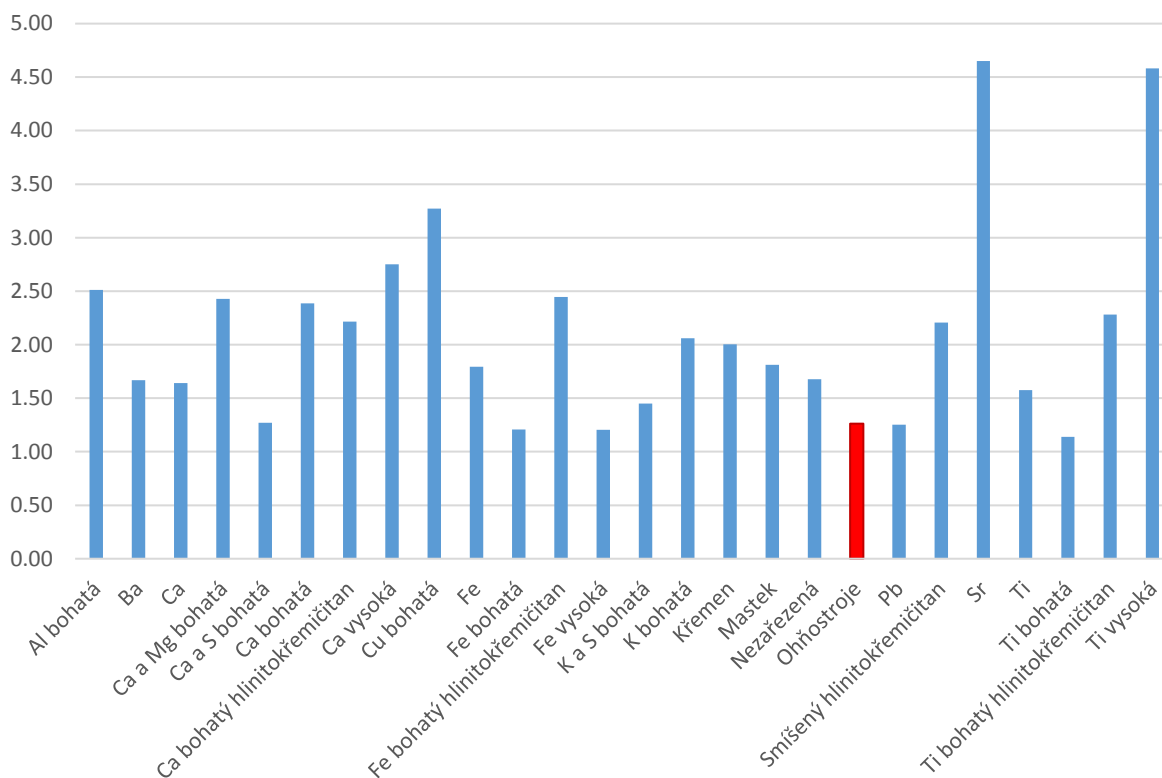
Nejvíce zastoupenou třídou byla v případě dne bez ohňostroje třída smíšených hlinitokřemičitanů, kam bylo zařazeno 798 částic (57,6 %). Téměř shodný podíl pak měly třídy částic bohatých na vápník (146 částic; 10,5 %), třída částic bohatých na železo (144 částic; 10,4 %) a třída nezařazených částic (147 částic; 10,6 %). Do třídy ohňostrojů bylo zařazeno pouze 17 částic (1,2 %). Je možné, že část těchto částic mohla být ještě z předchozího dne, kdy byl odpalován ohňostroj, ale část z nich může představovat i částice z jiných zdrojů, protože prvky často spojené s ohňostroji, na základě kterých byla navržena kritéria této třídy, nejsou zcela unikátní. Je však dobře patrný výrazně nižší podíl částic bohatých na draslík (27 částic; 2,0 %) a hlavně pak u částic bohatých na draslík a síru, které jsou typické pro ohňostroje (5 částic, 0,4 %).



Obrázek 82 - procentuální zastoupení jednotlivých tříd. Třída ohňostrojů je zvýrazněna červeně.

Medián tvaru částic zařazených jako ohňostroje je v případě všech ohňostrojových vzorků do 1,08. V případě tohoto měření to bylo 1,26, což naznačuje, že byly do této třídy zařazeny jiné typy

částic, nebo alespoň větší podíl jiných částic, nelze vyloučit, že některé částice opravdu byly z ohňostrojí předchozího dne. Nejnižší medián tvaru měly částice bohaté na titan (1,14), avšak tyto částice byly identifikovány pouze dvě, proto není toto číslo významné. Pravidelný tvar měly ještě částice bohaté na železo a částice s vysokým obsahem železa (obě shodně 1,21).



Obrázek 83 - medián tvaru částic pro jednotlivé třídy. Čím blíže je číslo 1, tím jsou částice pravidelnějšího tvaru. Třída ohňostrojí je zvýrazněna červeně.

8.8 SOUHRN

Celkově byly analyzovány čtyři 4h vzorky (tři vzorky odebrané ve dnech konání ohňostroje a jeden vzorek odebraný v den bez ohňostroje). Celkem bylo mikroskopem analyzováno 23 189 částic (21 117 během ohňostrojů, 2072 mimo ohňostroj). Do dalšího hodnocení byly použity pouze ty částice, které měly významný podíl alespoň jednoho prvku (na základě chyby dané koeficientem sigma), tedy celkem 17 906 částic (16 524 z ohňostrojových vzorků a 1385 ze vzorku mimo ohňostroje).

Každá částice byla zařazena do jedné nebo více tříd, daných stanovenými kritérii, pokud částici nebylo možné zařadit do žádné ze tříd, byla klasifikována jako „nezařazená“. Z analýzy vyplývá, že všechny tři vzorky navzorkované během ohňostrojů mají jako tři nejzastoupenější třídy třídu částic bohatých na draslík, třídu částic bohatých na draslík a síru a částic zařazených do třídy „ohňostroje“ (definované prvky typickými pro ohňostroje a beroucí v potaz i jejich tvar). Třída částic bohatých na draslík měla zastoupení vždy nejvyšší (75,0; 71,8 a 73,4 %). Právě draslík a síra jsou prvky typické pro ohňostrojové emise, jelikož jsou oba součástí střelného prachu a tedy využívané v mnoha různých ohňostrojových efektech nehledě na jimi poskytované zbarvení ohňostroje a další vlastnosti. Třída „ohňostroje“ měla poměr zastoupení 57,3; 50,0 a 56,5 %. Zdrojem přibližně poloviny částic tedy mohly být na základě analýzy emise z ohňostrojů. S odstupem pak ve všech třech případech následovala třída smíšených hlinitokřemičitanů nepravidelného tvaru, které jsou typickými částicemi dostávajícími se do ovzduší z půdy. Toto potvrdil i čtvrtý vzorek ze 4h intervalu bez ohňostroje, kdy právě smíšené hlinitokřemičitany měly jasně nejvyšší podíl (57,6 %). Jsou to tedy pravděpodobně nejčtenější typy částic běžně se v této lokalitě v tomto ročním období vyskytující. V tomto vzorku byl počet částic bohatých na draslík řádově nižší (< 2 %) a částic zařazených jako „ohňostroje“ bylo pouze 1,2 %.

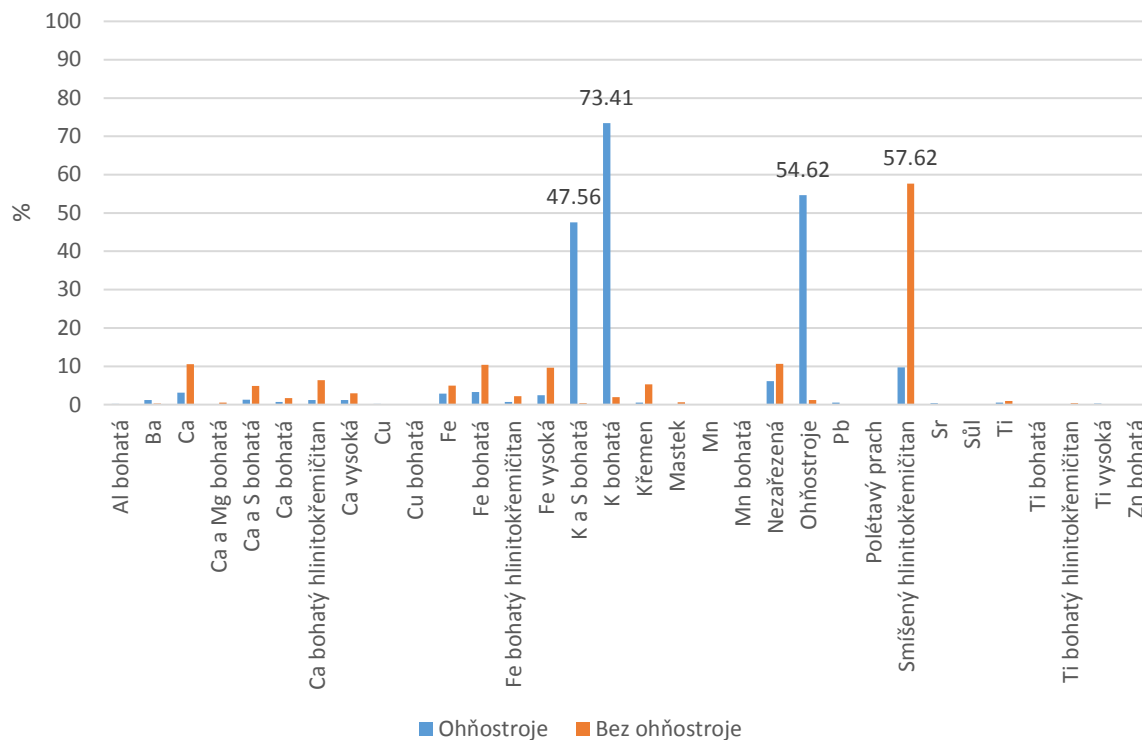
U dalších prvků typických pro ohňostroje, avšak používaných v menší míře pouze pro konkrétní efekty byl tedy celkový podíl nižší, než v případě výše uvedených tříd, avšak byl rovněž pozorován nárůst. V níže uvedené tabulce je uvedeno srovnání průměru ze všech tří ohňostrojů s měřením mimo ohňostroj u vybraných tříd.

Tabulka 47 – Procento částic v konkrétní třídě v intervalu s ohňostrojem (průměr ze tří měření) a bez ohňostroje. Červeně jsou zvýrazněny třídy, kde bylo procento částic vyšší při ohňostrojích, modře jsou zvýrazněny třídy, kde bylo procento částic vyšší v období bez ohňostroje.

Třída	Ohňostroje (průměr)	Bez ohňostroje
Ba	1,17	0,29
Ca	3,14	10,54
Ca bohatý hlinitokřemičitan	1,21	6,35
Cu	0,19	0,00

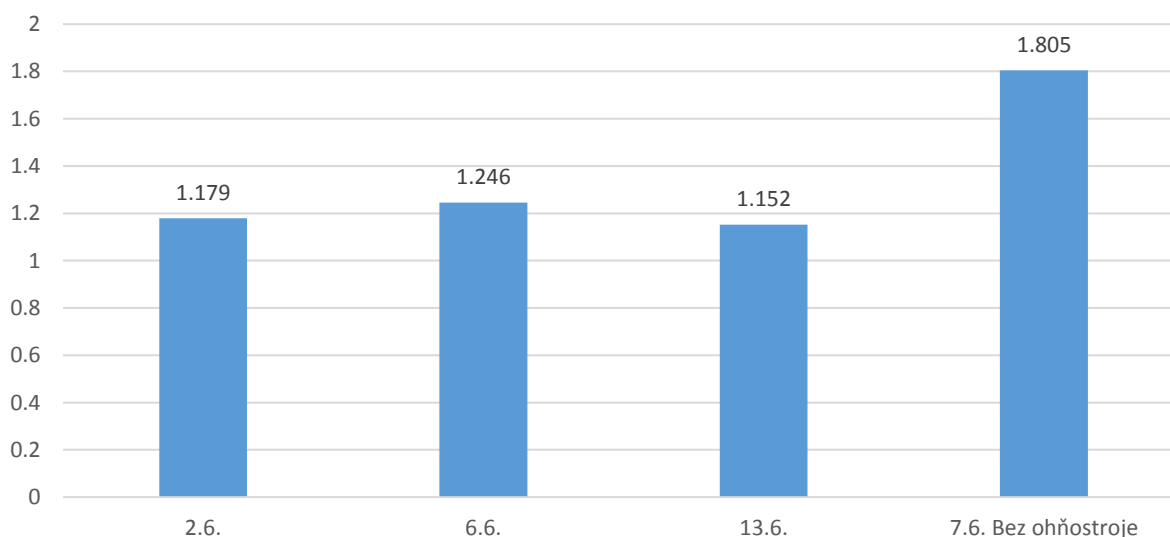
Třída	Ohňostroje (průměr)	Bez ohňostroje
Fe	2,98	4,98
Fe bohatá	3,29	10,40
Fe bohatý hlinitokřemičitan	0,66	2,17
Fe vysoká	2,49	9,60
K a S bohatá	47,56	0,36
K bohatá	73,41	1,92
křemen	0,56	5,27
nezařazená	6,10	10,61
Ohňostroje	54,62	1,23
Pb	0,56	0,07
smíšený hlinitokřemičitan	9,73	57,62
Sr	0,39	0,07
Ti bohatý hlinitokřemičitan	0,03	0,36

Tabulka 47 ukazuje, že třídy charakteristické pro ohňostroje – částice bohaté na draslík, síru, stroncium a baryum mají výrazně vyšší podíl těchto částic právě z vzorků naměřených během odpalování ohňostroje. Naopak u vzorku mimo ohňostroje je výrazně vyšší podíl hlinitokřemičitanů, křemene a železa. Potenciální riziko by mohla představovat zvýšená koncentrace olova během ohňostrojů, avšak jak vyplývá z měření koncentrací kovů, byla absolutní koncentrace olova v ovzduší velmi nízká a mnohonásobně nižší, než kolik činí imisní limit pro roční průměr.



Obrázek 84 – zastoupení tříd částic v době ohňostrojí (průměr ze tří měření) a mimo ohňostroje.

Celkový medián tvaru částic byl u měření během ohňostrojí 1,18 (2. 6.), 1,25 (6. 6.) a 1,15 (13. 6.). Během měření mimo ohňostroje to bylo 1,81. Toto vyšší číslo ukazuje na vyšší nepravidelnost částic mimo ohňostroje. Sférickější částice jsou indikací jejich vzniku za vyšších teplot, včetně hoření (Willis, 2002).



Obrázek 85 – medián tvaru všech částic z jednotlivých měření


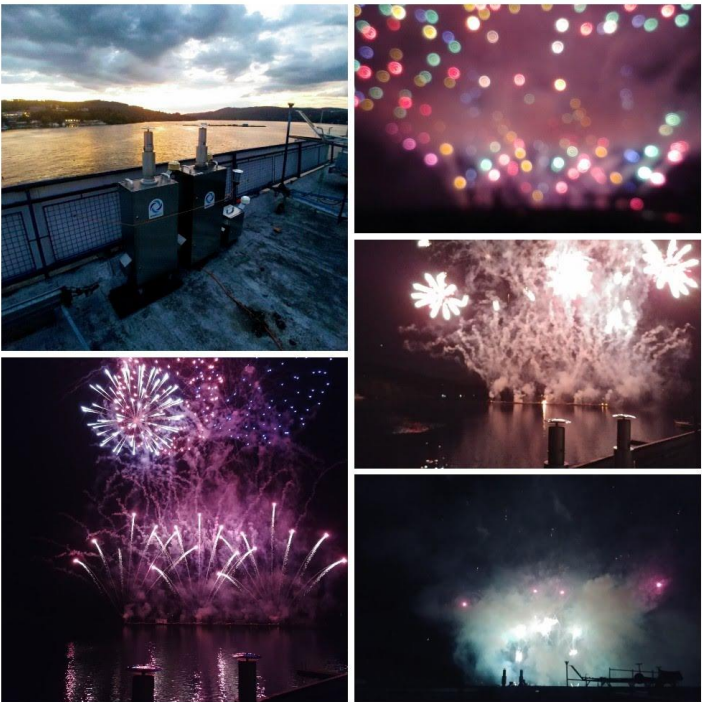
9. OHŇOSTROJE – ANALÝZA

9.1 ZÁKLADNÍ POPIS

Během již 21. ročníku ohňostrojoyé přehlídky Ignis Brunensis byly odpáleny čtyři soutěžní ohňostroje nad hladinou brněnské přehrady a závěrem celé akce byl nesoutěžní ohňostroj odpáleny z hradu Špilberk v centru města. Všechny ohňostroje začínaly ve 22:30, trvaly přibližně 20 minut a během každého z nich bylo odpáleno i více než 600 kg výbušnin³. Čtyři soutěžní ohňostroje byly sledovány měřicí technikou umístěnou přímo v přístavišti, protože zde v blízkosti není žádná stálá stanice. Ohňostroj na brněnském Špilberku byl zhodnocen na základě dat ze stanic, které jsou součástí Státní sítě imisního monitoringu spravovanou ČHMÚ.

³ PYRO EVENTS Rumunsko

9.2 OHŇOSTROJ 2. 6. 2018



2. 6. 2018

22:30

17 min 33 s

180 000

9.2.1 METEOROLOGIE

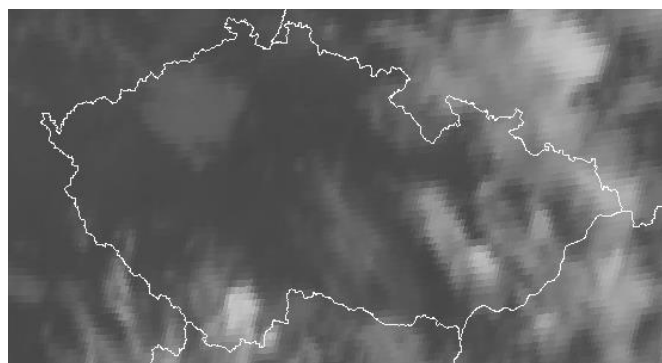
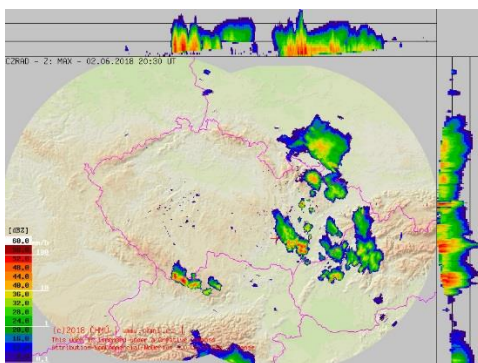

Tep lota
18,0 °C

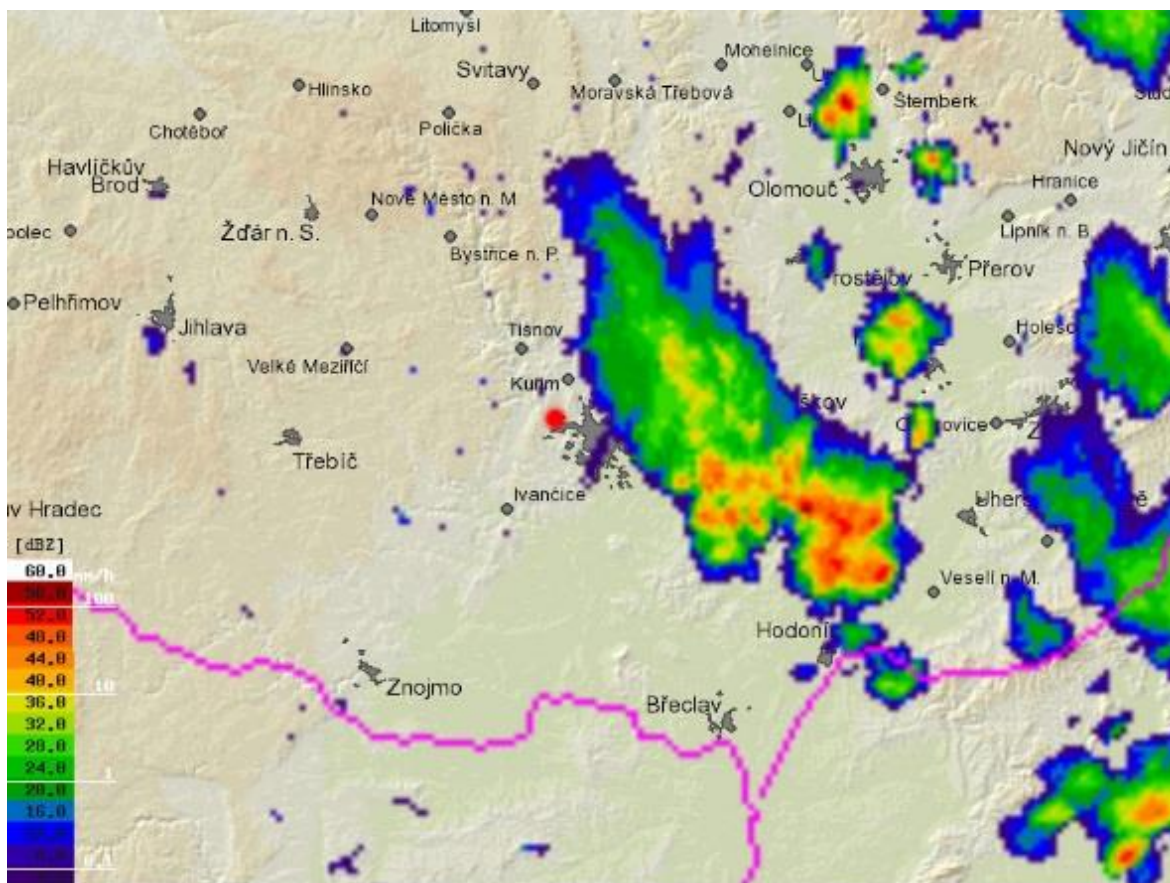

Relativní vlhkost
86,5 %


Srážky
0,0 mm

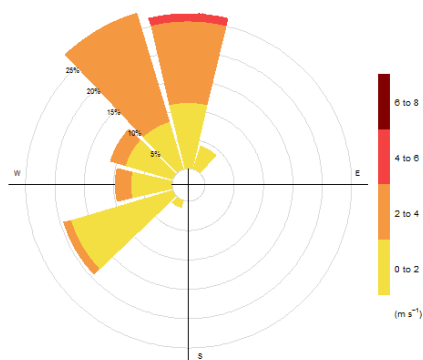

Rychlost větru
1,0 m/s


Směr větru
SSZ





Obrázek 86 - Radarové a satelitní snímky ČR/Brna 2. 6. 2018 ve 22:30 SELČ



Obrázek 87 - 4h větrná růžice od 22:00 2.6.2018

Během prvního ohňostroje bylo nad přehradou 18 °C a foukal severoseverozápadní vítr. Krátce před začátkem ohňostroje prošla na východ od Brna bouřka, oblast přehrady však nezasáhla. S pokračující nocí se vítr stáčil více na sever až severoseverovýchod. Teplota zůstala po celou noc kolem 17 až 18 °C.

9.2.2 KVALITA OVZDUŠÍ

Od 22:00 začaly stoupat koncentrace PM₁₀. Ze začátku lze přisoudit nárůst zejména neustále zvyšujícímu se pohybu osob v oblasti. Nejvyšší koncentrace tuto noc dosáhla 31,9 µg/m³, nad hodnotou 20 µg/m³ se koncentrace pohybovala až do 3 h ranní následujícího dne. Lze předpokládat,

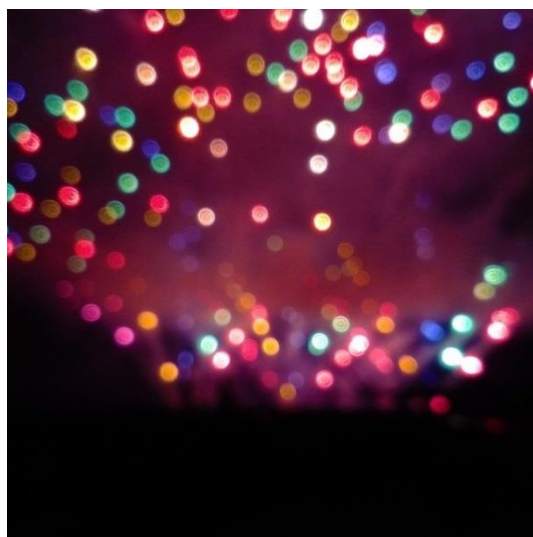
že vyšší koncentrace byly dány i šířením kouřové vlečky z ohňostroje, je však vidět, že i nejvyšší hodnota PM₁₀ je pod 24h imisním limitem (50 µg/m³).

Koncentrace NO_x, primárně pocházející z dopravy, byly zvýšené přibližně od 21:10 do 23:10, tedy v době příjezdu a odjezdu většiny návštěvníků. Nejvyšší koncentrace 19,3 µg/m³ byla naměřena ve 22:00, kdy se dá předpokládat vyvrcholení příjezdu lidí tak, aby stihli ohňostrojevou show. Během samotné show jsou koncentrace mírně nižší, nárůst na 18,7 µg/m³ je opět vidět ve 23:00, tedy 10 minut po skončení ohňostroje, kdy lidé opět odjíždějí z přístaviště a okolních oblastí.


Na hodnoty SO₂ neměl ohňostroj žádný vliv, u CO došlo k mírnému nárůstu, hodnoty jsou však hluboko pod imisním limitem.


Tabulka 48 - Hodinové průměry hodnot naměřených měřicím vozem mezi 18 a 6 h ráno 2. až 3. června 2018.


Hodina	SO ₂ µg/m ³	NO µg/m ³	NO ₂ µg/m ³	NO _x µg/m ³	CO µg/m ³	PM ₁₀ µg/m ³	WS m/s	T °C	RH %
18	3,98	0,77	7,55	8,78	0,31	13,42	2,28	23,65	52,07
19	4,15	0,82	6,37	7,60	0,28	10,03	3,08	21,58	60,77
20	4,23	0,75	5,38	6,53	0,32	8,67	1,38	20,82	64,87
21	4,82	1,10	10,23	11,95	0,37	8,22	1,65	19,23	77,87
22	4,28	1,15	13,33	15,10	0,42	25,30	1,07	18,20	84,62
23	3,88	1,37	9,22	11,30	0,34	25,53	0,92	17,42	89,05
0	3,88	0,90	6,48	7,85	0,25	23,90	2,13	17,68	88,82
1	4,17	1,08	6,40	8,05	0,20	31,45	0,87	17,70	85,78
2	4,23	1,00	5,90	7,45	0,18	24,35	1,40	17,27	90,75
3	4,43	0,83	5,65	6,92	0,18	18,90	2,30	17,08	90,52
4	4,27	1,27	5,35	7,32	0,14	14,17	2,18	16,98	87,25
5	4,30	1,08	4,58	6,23	0,15	10,22	3,00	18,48	80,22





9.3 OHŇOSTROJ 6. 6. 2018






 6. 6. 2018

 22:30

 17 min 24 s

 120 000

9.3.1 METEOROLOGIE

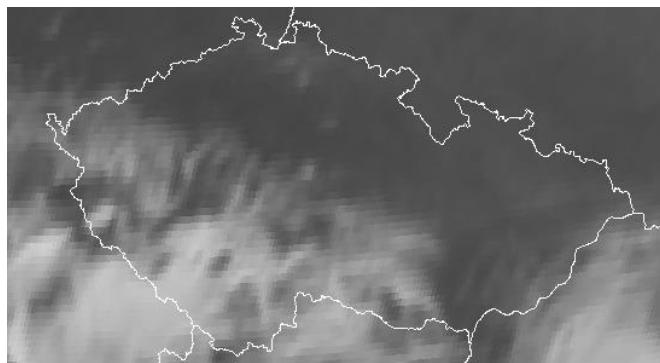
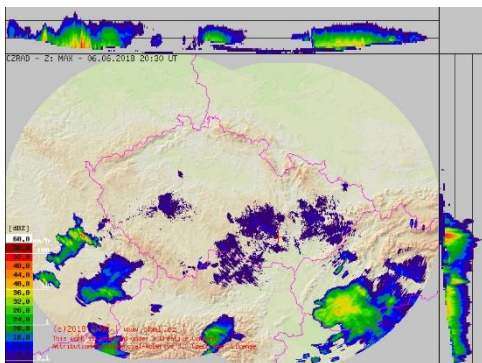

Teplota
16,8 °C

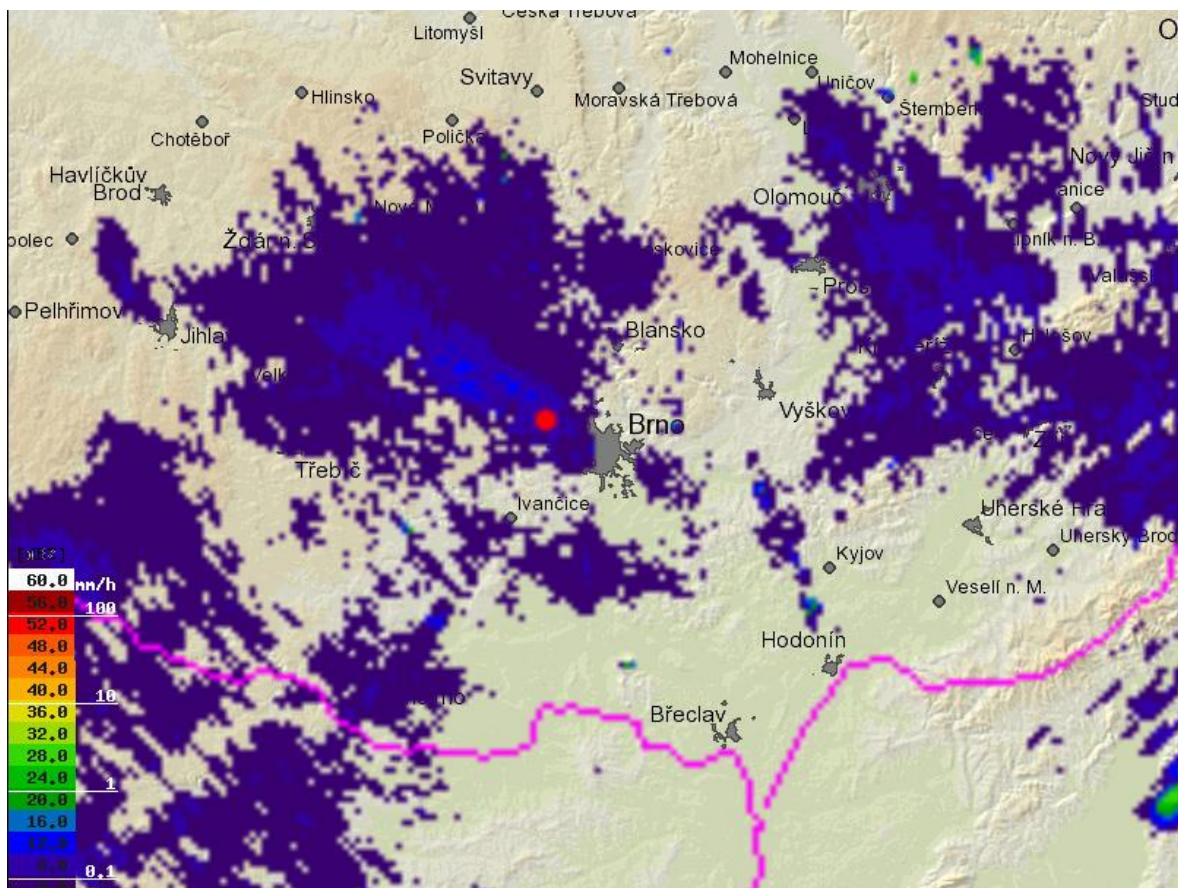

Relativní vlhkost
65,0 %


Srážky
0,0 mm

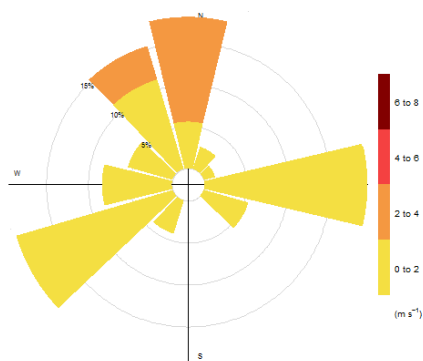

Rychlost větru
0,5 m/s


Směr větru
ZJZ





Obrázek 88 - Radarové a satelitní snímky ČR/Brno 6. 6. 2018 ve 22:30 SELČ



Obrázek 89 - 4h větrná růžice od 22:00 6.6.2018

Během druhého ohňostroje se teplota pohybovala kolem 17 °C, v noci pak postupně klesla na 14 °C. Vítr během samotného ohňostroje váł ze ZJZ, postupně pak během noci ze SZ a následně S. Rychlost větru byla velmi nízká, v době samotného ohňostroje bylo téměř bezvětří. Až do 1 h ranní nepřekročila rychlost větru 1 m/s.

9.3.2 KVALITA OVZDUŠÍ

Koncentrace PM₁₀ se večer pohybovaly kolem 25 µg/m³. Výrazný nárůst nastal mezi 22 a 23 h. Během ohňostroje byly koncentrace 55,3 µg/m³, od 22:50 pak docházelo k postupnému mírnému poklesu. Na hodnoty kolem 25 µg/m³ se koncentrace PM₁₀ dostaly po 1 h ranní. Hodnota 24h imisního limitu PM₁₀ je 50 µg/m³. Tato hodnota sice překročena byla, ale pouze na 50 minut a následně opět

klesala. Na dočasném vzestupu se podílel jak zvýšený pohyb osob a jejich činnost (kouření, grilování, víření prachu), tak kouřová vlečka z ohňostroje, která se v důsledku velmi nízké rychlosti větru pohybovala pomalu ve směru větru, který byl před, během a po ohňostroji JZ, Z, SZ a S.

V případě NO_x vidíme nárůst koncentrací před začátkem ohňostroje, s maximem přesně v době jeho začátku a to $55,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Avšak ve 22:20 a 22:40 už byly koncentrace opět výrazně nižší ($28,9$, respektive $34,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$), je tedy pravděpodobné, že byla tato krátkodobá vyšší hodnota dána nějakým dočasným lokálním ovlivněním.


Na hodnoty SO_2 neměl ohňostroj žádný vliv, u CO došlo k mírnému nárůstu, hodnoty jsou však hluboko pod imisním limitem.


Tabulka 49 - Hodinové průměry hodnot naměřených měřicím vozem mezi 18 a 6 h ráno 6. až 7. června 2018.


Hodina	SO_2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	NO $\mu\text{g}/\text{m}^3$	NO_2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	NO_x $\mu\text{g}/\text{m}^3$	CO $\mu\text{g}/\text{m}^3$	PM_{10} $\mu\text{g}/\text{m}^3$	WS m/s	T °C	RH %
18	5,90	1,37	8,82	10,88	0,21	26,50	1,50	23,83	33,20
19	5,18	1,52	12,30	14,60	0,22	26,62	0,82	21,37	39,25
20	5,40	1,37	10,42	12,52	0,22	23,28	0,65	20,15	42,75
21	6,03	3,07	19,10	23,80	0,31	26,88	0,43	18,53	57,37
22	6,03	2,60	27,23	31,28	0,40	53,82	0,37	17,05	63,70
23	4,55	1,60	12,35	14,83	0,29	45,73	0,60	16,02	63,88
0	4,72	1,55	8,30	10,65	0,22	37,62	0,67	14,85	66,63
1	4,43	1,43	7,35	9,53	0,19	27,17	1,13	14,63	71,65
2	3,98	1,42	6,20	8,33	0,14	23,48	1,02	14,02	72,82
3	4,52	1,45	6,62	8,83	0,11	17,33	1,98	14,08	73,75
4	4,58	1,75	6,68	9,38	0,09	14,92	2,13	14,60	66,68
5	4,63	2,25	7,35	10,77	0,08	11,28	1,85	15,37	63,38





9.4 OHŇOSTROJ 9. 6. 2018






 9. 6. 2018

 22:30

 17 min 35 s

 200 000

8.4.1 METEOROLOGIE

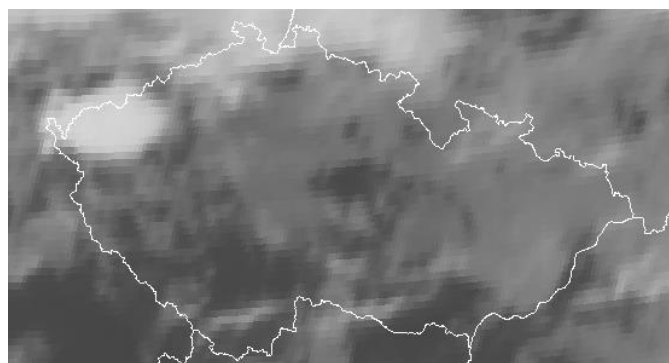
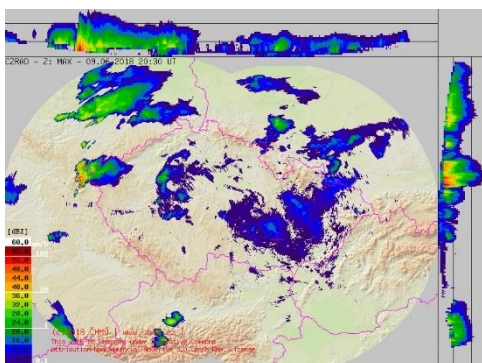

Teplota
19,5 °C

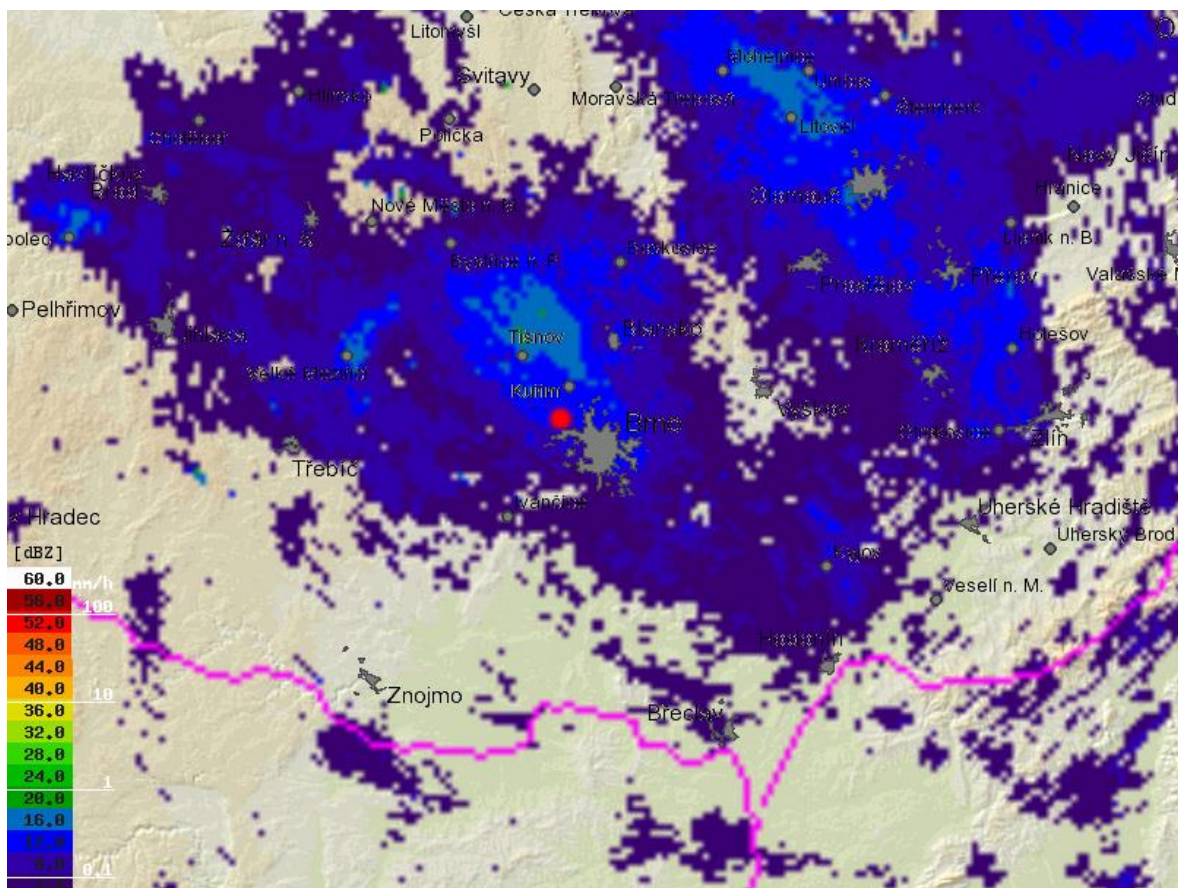

Relativní vlhkost
78,7 %


Srážky
0,0 mm

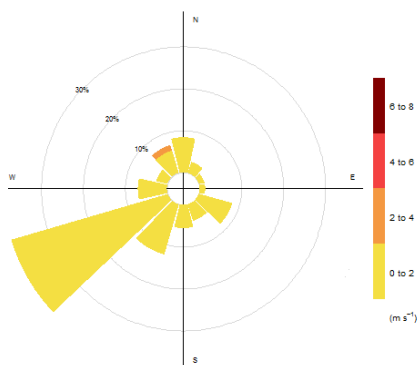

Rychlost větru
0,5 m/s


Směr větru
JJZ





Obrázek 90 - Radarové a satelitní snímky ČR/Brna 9. 6. 2018 ve 22:30 SELČ



Obrázek 91 - 4h větrná růžice od 22:00 9.6.2018

Teplota během třetího ohňostroje se pohybovala kolem 19 až 20 °C. V noci pak klesla na 17 °C. Vítr váł převážně JZ o rychlosti kolem 1 m/s.

9.4.2 KVALITA OVZDUŠÍ

Koncentrace PM₁₀ setrvaly v době několika hodin před a po ohňostroji pod hranicí 30 µg/m³. Nejvyšší koncentrace v periodě kolem ohňostroje byla 29,9 µg/m³ a to od 0:10 do 0:50. Mezi 22:10 a 22:50 byly na hodnotě 28,1 µg/m³, následně se snížily na 21,3 µg/m³. Mohlo tomu být v důsledku velmi

nízké rychlosti větru a změnám jeho směru, takže se mohla krátkodobě dostávat část kouřové vlečky z ohňostrojí. Koncentrace jsou však celkově nízké a nepřekračují imisní limit pro PM₁₀ ani krátkodobě.

Imise NO_x krátkodobě stoupy ve 22:40 na asi 30 minut. Následně po 23 h opět začaly klesat. Mohlo se jednat o krátkobý mírný vzestup v důsledku zvýšené dopravy v okolí před ohňostrojem.



Na hodnoty SO₂ ani CO neměl ohňostroj žádný vliv, hodnoty jsou však hluboko pod imisním limitem.


Tabulka 50 - Hodinové průměry hodnot naměřených měřicím vozem mezi 18 a 6 h ráno 9. až 10. června 2018.


Hodina	SO ₂ μg/m ³	NO μg/m ³	NO ₂ μg/m ³	NO _x μg/m ³	CO μg/m ³	PM ₁₀ μg/m ³	WS m/s	T °C	RH %
18	3,92	1,88	18,88	21,75	0,21	11,35	0,60	26,05	46,47
19	4,08	1,98	16,50	19,57	0,36	14,80	0,60	23,47	59,58
20	4,33	2,18	12,87	16,23	0,28	26,85	0,93	21,12	68,90
21	4,18	2,57	19,97	23,90	0,55	21,53	0,88	20,22	75,43
22	4,15	2,90	18,80	23,23	0,42	27,75	0,60	19,88	78,10
23	3,85	2,03	14,43	17,50	0,32	21,63	0,85	18,63	85,30
0	3,98	2,05	12,88	16,03	0,27	29,45	0,50	18,13	88,40
1	4,07	2,18	9,90	13,25	0,24	25,92	0,27	17,38	92,22
2	4,20	2,15	7,65	10,95	0,24	20,08	0,50	16,90	94,88
3	4,12	2,37	6,17	9,80	0,25	19,70	0,77	17,02	95,62
4	4,00	2,65	6,43	10,48	0,26	25,10	0,85	17,97	89,95
5	4,40	2,32	5,08	8,60	0,25	21,80	0,85	18,98	84,18





9.5 OHŇOSTROJ 13. 6. 2018



 13. 6. 2018

 22:30

 17 min 02 s

 100 000

9.5.1 METEOROLOGIE

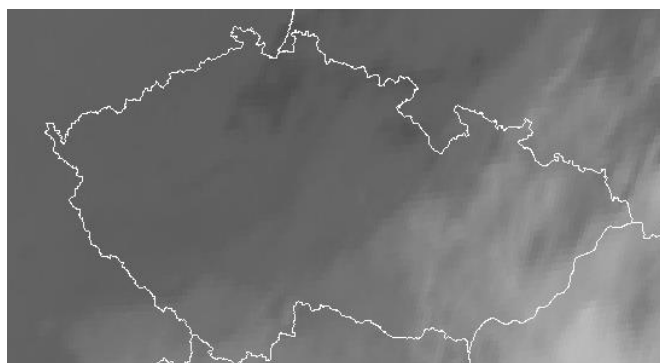
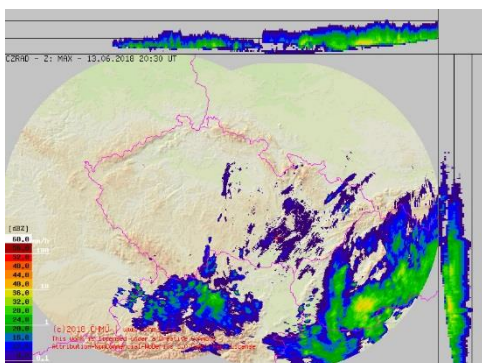

Teplota
16,6 °C

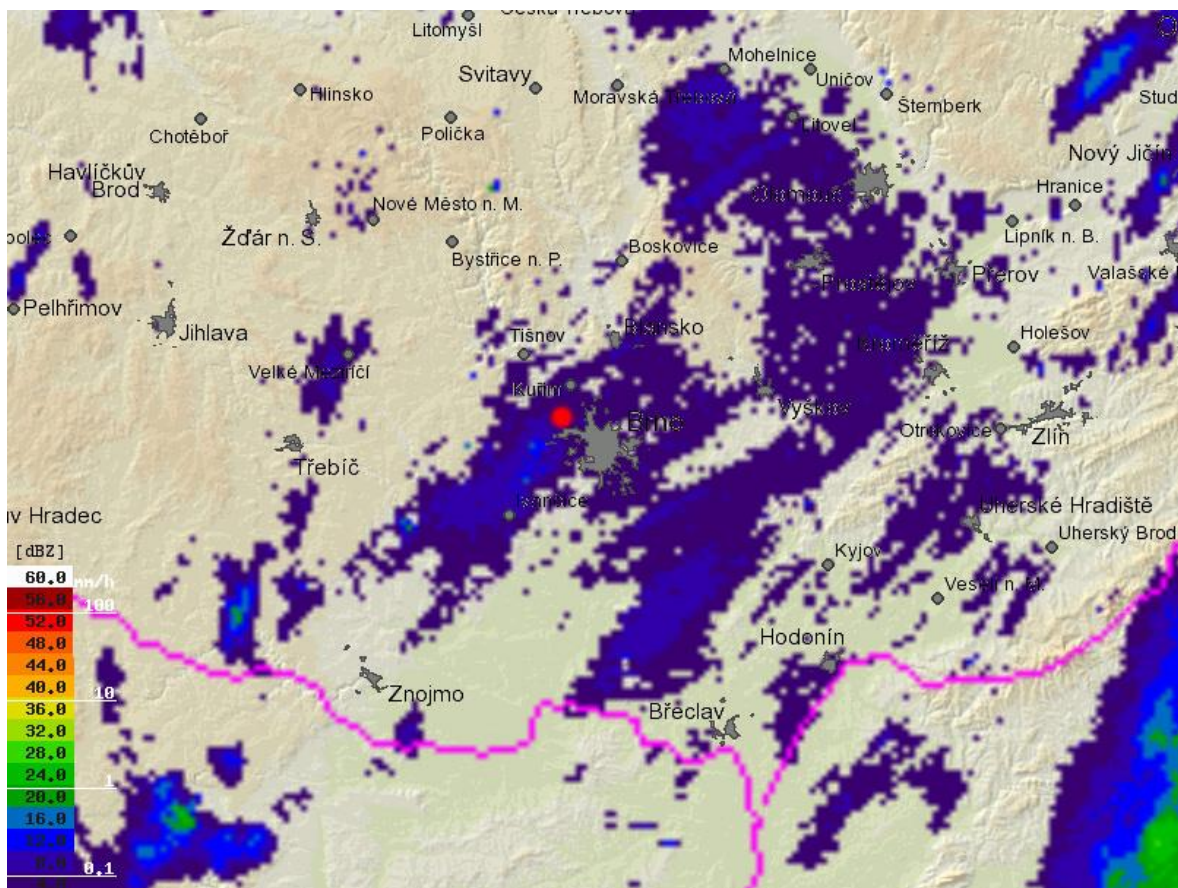

Relativní vlhkost
70,1 %


Srážky
0,0 mm

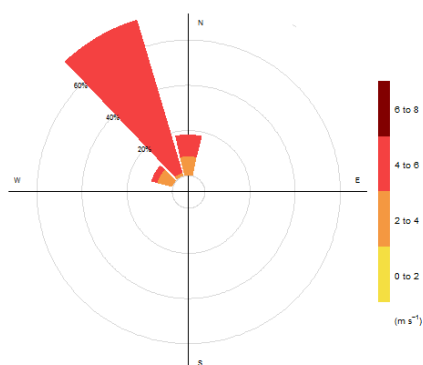

Rychlost větru
4,9 m/s


Směr větru
SZ





Obrázek 92 - Radarové a satelitní snímky ČR/Brna 13. 6. 2018 ve 22:30 SELČ



Teplota během čtvrtého ohňostroje se pohybovala kolem 16 až 17 °C. Rychlost větru byla nejvyšší ze všech ohňostrojů, v průměru přibližně 5 m/s ze SZ až SSZ.

Obrázek 93 - 4h větrná růžice od 22:00 13.6.2018

9.5.2 KVALITA OVZDUŠÍ

Koncentrace PM_{10} se před 18 h pohybovaly kolem $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Následně kolem 19 h začaly pomalu stoupat a vyšší nárůst byl zaznamenán od 21 h. Těsně před 22 h byly $34 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Během ohňostroje dočasně mírně klesly, následně opět vzrostly na $31,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a od 0:00 opět mírně klesaly a na hodnotu kolem $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ se vrátily před 6 h ranní.

Imise NO_x během tohoto ohňostroje nijak nenarostly. Lze se domnívat, že to bylo právě v důsledku vyšší rychlosti větru a SZ směru, kde není žádná doprava. S výjimkou 20min periody okolo 21 h se pohybovaly pod 8 μg/m³ těsně před, během i po ohňostroji. Stejně tak se nijak neprojevila tato akce ani na koncentracích SO₂ a CO.

Tabulka 51 - Hodinové průměry hodnot naměřených měřícím vozem mezi 18 a 6 h ráno 9. až 10. června 2018.

Hodina	SO ₂ μg/m ³	NO μg/m ³	NO ₂ μg/m ³	NO _x μg/m ³	CO μg/m ³	PM ₁₀ μg/m ³	WS m/s	T °C	RH %
18	4,65	1,58	5,53	7,95	0,23	10,27	3,92	18,65	60,58
19	4,63	1,58	5,38	7,78	0,25	16,50	4,50	18,00	66,20
20	5,02	2,75	5,75	9,83	0,27	15,28	4,30	17,37	68,12
21	5,73	2,38	4,82	8,33	0,28	33,08	4,67	17,07	68,77
22	4,92	1,80	4,17	6,90	0,28	28,08	4,88	16,68	69,02
23	4,90	1,48	3,97	6,28	0,26	31,42	5,17	16,47	72,00
0	4,88	1,58	4,25	6,65	0,20	28,75	5,20	16,20	72,13
1	4,48	1,45	4,08	6,28	0,19	22,88	5,10	15,85	69,78
2	4,42	1,50	4,13	6,45	0,18	19,37	4,08	15,12	70,52
3	4,60	1,65	4,10	6,65	0,20	16,82	4,57	14,70	73,42
4	4,38	1,85	4,38	7,22	0,17	13,47	4,52	14,75	73,18
5	4,90	1,97	4,18	7,18	0,17	10,25	4,68	15,20	69,67



9.6. OHŇOSTROJ 16. 6. 2018 – ŠPILBERK

9.6.1 ZÁKLADNÍ INFORMACE

Poslední z pěti ohňostrojů přehlídky Ignis Brunensis byl atypický tím, že se nekonal nad hladinou brněnské přehrady nýbrž v samotném historickém centru Brna nad hradem Špilberk. Nejbližší okolí kolem hradu je v době konání ohňostroje z bezpečnostních důvodů uzavřené, ohňostroj samotný je pak možné sledovat z řady míst v Brně díky vhodné lokalitě hradu na kopci.

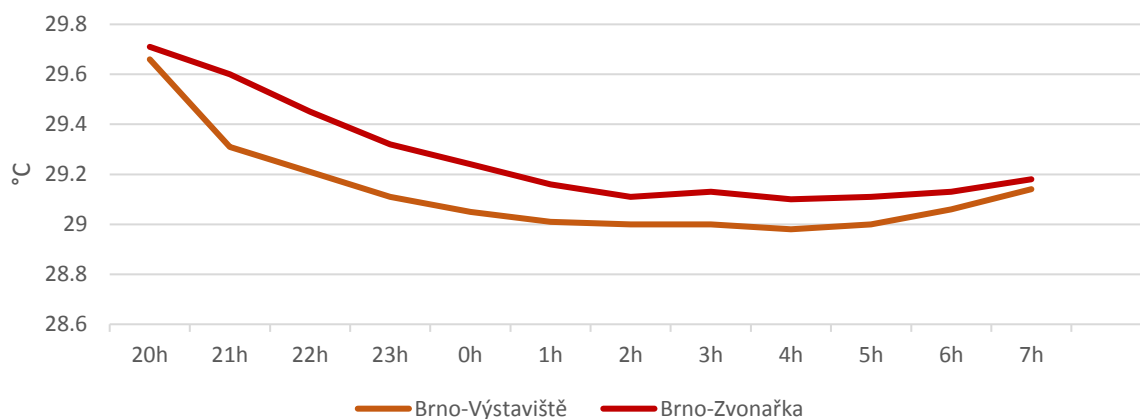
Ačkoliv nebyla za účelem tohoto ohňostroje provedena žádná účelová měření, lze vycházet z dat ze stanic v okolí, spadajících do Státní sítě imisního monitoringu spravované ČHMÚ. Výhodou těchto stanic je mnohem delší řada měření, nevýhodou je větší vzdálenost od odpaliště. Z tohoto důvodu lze předpokládat, že spíše než zachycení kouřové vlečky z ohňostroje, by se mohla projevit zvýšená koncentrace osob a dopravy v centru města, ve srovnání s jinou sobotou pozdě večer. Účelem této části zprávy tedy bylo zjistit, zda se projevuje pořádání ohňostroje v centru Brna na koncentracích znečišťujících látek ve městě a pokud ano, do jaké míry.

Stanicemi nejbližší centru Brna a místu odpalu jsou 500 m severozápadně vzdálená dopravní stanice Brno-Úvoz (hot spot) a 1,4 km vzdálená dopravní stanice jižně od centra v blízkosti hlavního nádraží a centrálního autobusového nádraží, Brno-Zvonařka. Na severovýchod leží ve vzdálenosti přibližně 1,5 km městská pozadřová stanice Brno-Dětská nemocnice. Směrem na západ je to pak 2,1 km vzdálená dopravní stanice Brno-Výstaviště.

9.6.2 METEOROLOGICKÉ PODMÍNKY

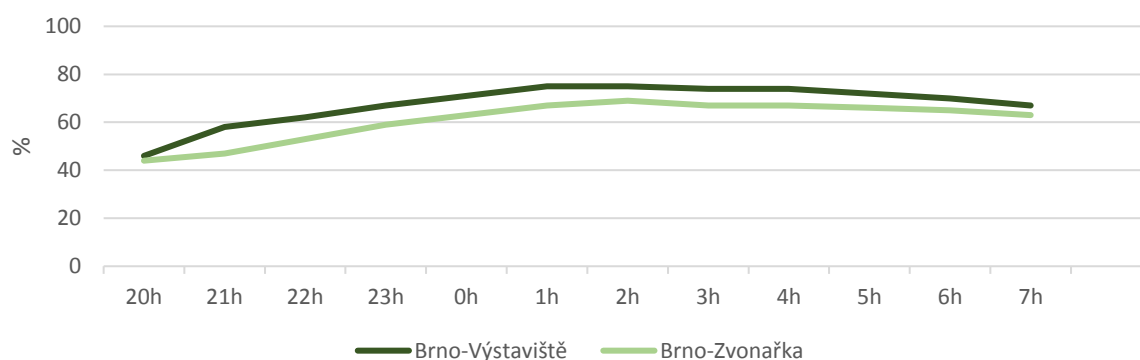
Z výše uvedených čtyř stanic jsou meteorologické podmínky měřeny na dvou – na stanici Brno-Zvonařka a na stanici Brno-Výstaviště.

Teplota vzduchu se na stanici Brno-Výstaviště v době od 16.6.2018 18:00 do 17.6.2018 06:00 pohybovala těsně kolem 29 °C. Teplota na stanici Brno-Zvonařka byla v průměru o 0,1 °C vyšší.



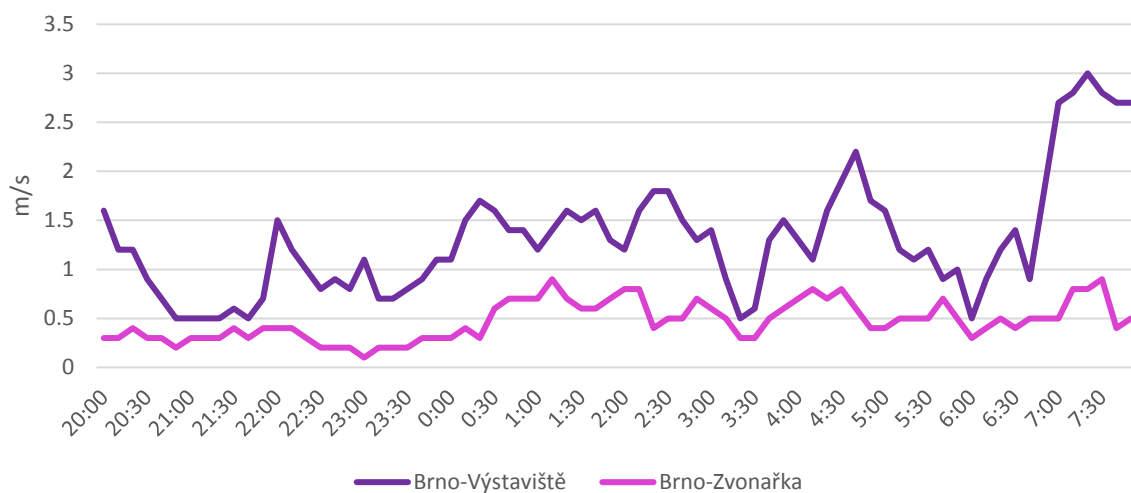
Obrázek 94 - Hodinové teploty vzduchu na stanicích Brno-Zvonařka a Brno-Výstaviště v době od 16.6.2018 18 h do 17.6.2018 6 h.

Relativní vlhkost vzduchu na stanici Brno-Výstaviště v době od 20 h 16. 6. 2018 do 8 h následujícího rána byla v průměru 67,6 %. Na stanici Brno-Zvonařka to bylo 60,8 %. Přímo v hodině odpalování ohňostroje byla na stanici Brno-Zvonařka relativní vlhkost vzduchu 63 %, Brno-Výstaviště naměřilo 71 %.

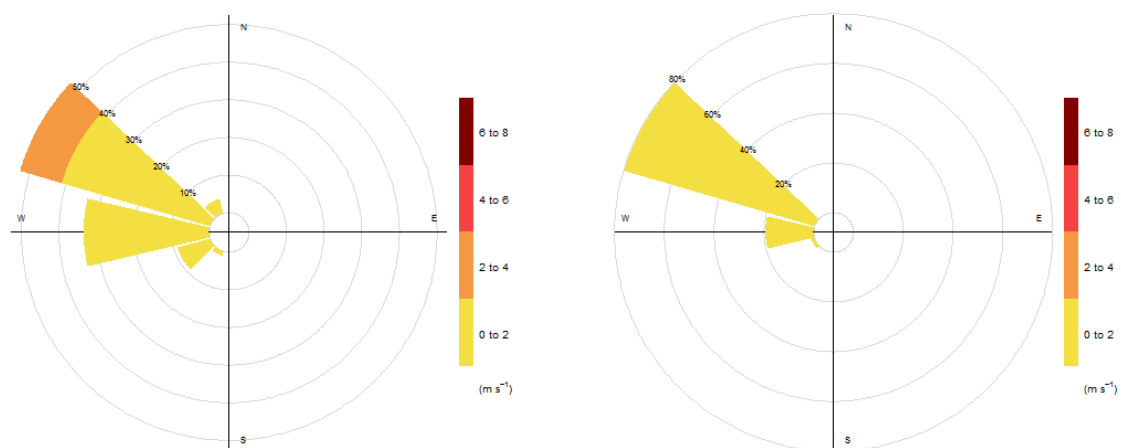


Obrázek 95 - Hodinové relativní vlhkosti vzduchu na stanicích Brno-Zvonařka a Brno-Výstaviště v době od 16.6.2018 20 h do 17.6.2018 8 h.,

Průměrná rychlost větru byla od 20 h do 8 h ráno následujícího dne na stanici Brno-Výstaviště 1,4 m/s, na stanici Brno-Zvonařka přibližně 0,5 m/s. Rozdíl je dán umístěním stanic, stanice Brno-Výstaviště je více otevřená, stanice Brno-Zvonařka je umístěna více v zástavbě. Rychlost větru přímo v době odpalu ohňostroje odpovídaly výše uvedeným průměrům. Z větrných růžic vyplývá, že v době od 20 h 16. 6. 2018 do 8 h 17. 6. 2018 převládal jasně SZ vítr.

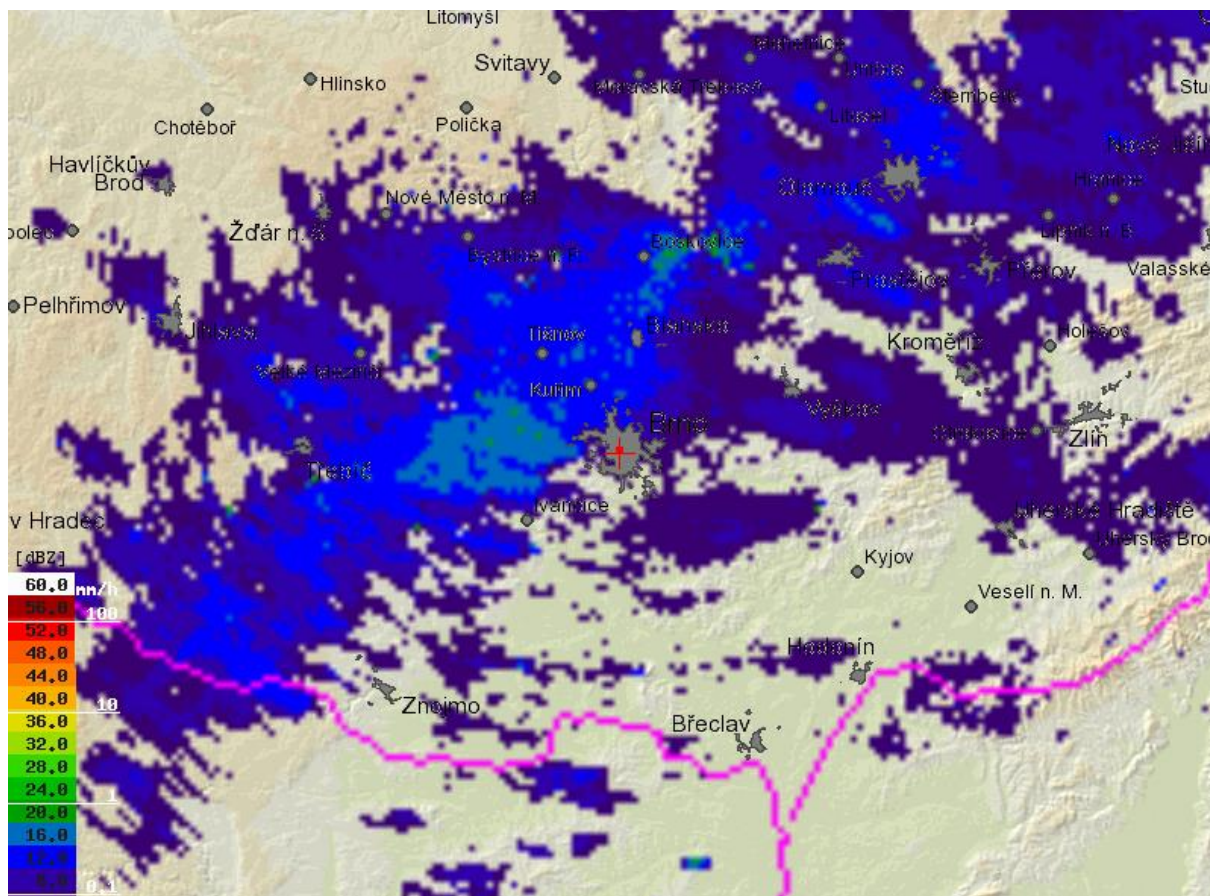


Obrázek 96 - Desetiminutové rychlosti větru na stanicích Brno-Zvonařka a Brno-Výstaviště v době od 20:00 16.6.2018 do 08:00 17.6.2018



Obrázek 97 - Větrné růžice pro stanice Brno-Výstaviště (vlevo) a Brno-Zvonařka (vpravo) za období od 20:00 16.6.2018 do 08:00 17.6.2018

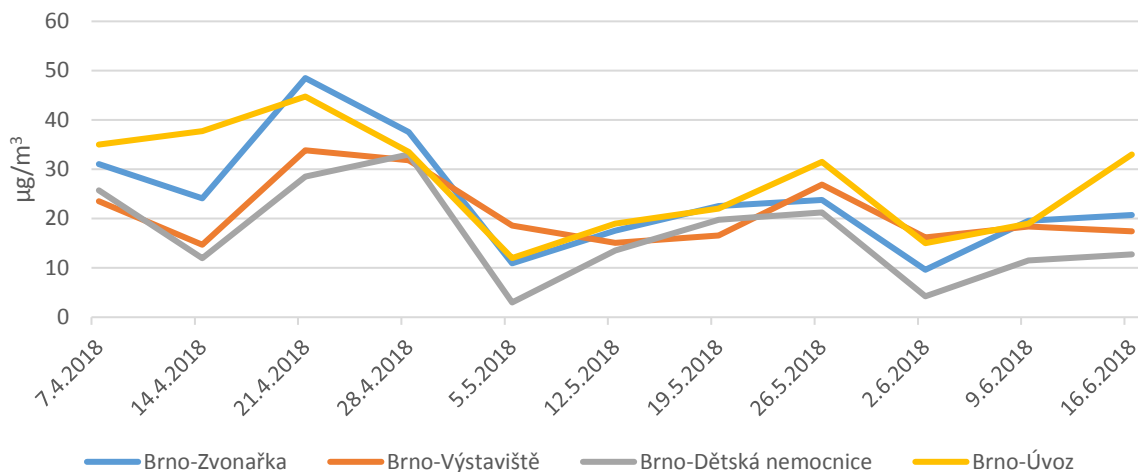
Srážkoměr není umístěn na žádné z výše uvedených čtyř stanic. Na základě pozorování přímo z místa odpalu a na základě radarového snímku však lze říci, že v době odpalu ohňostroje v Brně nepršelo.



Obrázek 98 - Radarový snímek Brna a okolí z 16.6.2018 22:30 SELČ

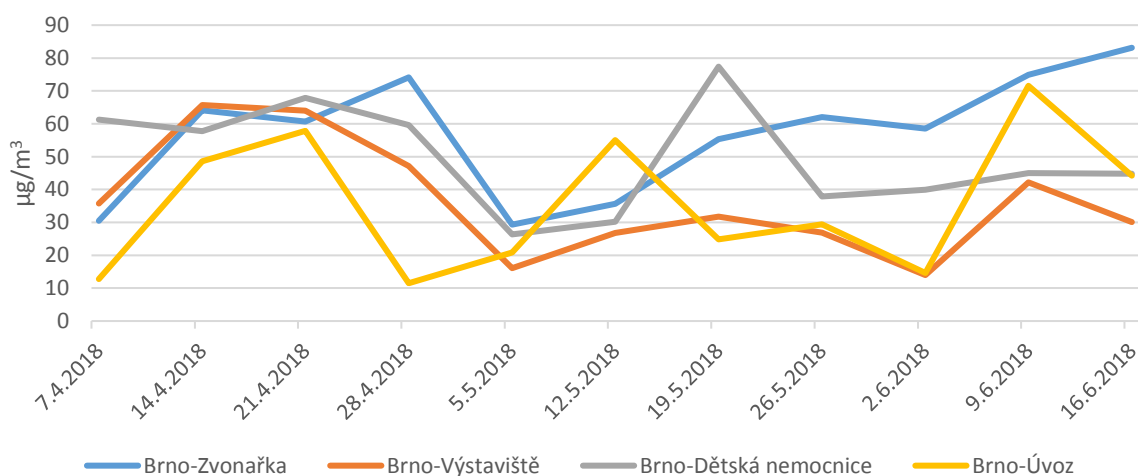
9.6.3 KVALITA OVZDUŠÍ

Za účelem zjištění, zda měl ohňostroj vliv na kvalitu ovzduší, byly srovnány koncentrace na stejných stanicích dlouhodoběji. Byly srovnány data ze sobot od 1. 4. 2018 do 16. 6. 2018 (den ohňostroje). Celkem tedy 10 sobot před ohňostrojem + sobota v den ohňostroje. Srovnán byl vždy interval od 20 h do půlnoci.



Obrázek 99 - Průměrná koncentrace PM₁₀ [µg/m³] v danou sobotu od 20 do 0 h na stanicích Brno-Zvonařka, Brno-Výstaviště, Brno-Dětská nemocnice a Brno-Úvoz (hot spot).

Jak je vidět na grafu (Obrázek 99), nebyly koncentrace ve večerních hodinách konání ohňostroje 16. 6. 2018 nijak nadnormální. Jediná ze čtyř stanic, kde je vidět velmi mírný nárůst je stanice Brno-Úvoz, která je i nejbližší místa konání. Ono zvýšení by tedy mohlo souviset se zvýšeným pohybem lidí a dopravou v okolí, které vede mj. k resuspenzi. Nejedná se však o nijak vysokou hodnotu (33 µg/m³), která nepřekračuje ani 24h imisní limit.



Obrázek 100 - Průměrná koncentrace NO_x [µg/m³] v danou sobotu od 20 do 0 h na stanicích Brno-Zvonařka, Brno-Výstaviště, Brno-Dětská nemocnice a Brno-Úvoz (hot spot).

Koncentrace NO_x byly nejvyšší na stanici Brno-Zvonařka. Jedná se o dopravní stanici poblíž centra města, je tedy možné, že zde byla v době před a po ohňostroji vyšší intenzita dopravy, než je obvyklé. Absolutně nejvyšší byla koncentrace NO_x mezi 21 a 22 h na stanici Brno-Zvonařka, kde dosáhla hodnoty 113,8 µg/m³. V kontextu daného dne v týdnu a denní doby je tato hodnota vyšší, než je obvyklé, avšak během dopravní špičky dosahují koncentrace NO_x na stanici Brno-Zvonařka i mnohem

vyšších hodnot (v této roční době $>200 \mu\text{g}/\text{m}^3$, v zimě za špatných rozptylových podmínek i několikanásobně více).

Obecně tedy lze říci, že pořádání ohňostroje v centru Brna, nijak negativně neovlivňuje kvalitu ovzduší. Je to pravděpodobně dáno několika faktory – první je fakt, že hrad Špilberk je na vyvýšeném místě a pyrotechnické efekty je tak možné sledovat z relativně velké vzdálenosti a prakticky ze všech směrů, proto je koncentrace osob výrazně nižší, než na přehradě. Dále je to fakt, že většina lidí se do centra dopravuje buď přímo pěšky, či městskou hromadnou dopravou. V přímém okolí hradu Špilberk je velmi obtížné zaparkovat a je proto jednodušší využít alternativní způsob dopravy.

10. SOUHRN

V rámci ohňostrojevé přehlídky Ignis Brunensis 2018, konané mezi 2. až 14. červnem 2018 v areálu brněnské přehrady, bylo provedeno měření kvality ovzduší za účelem ověření, zda nejsou překračovány imisní limity stanovené Zákonem o ochraně ovzduší.

Poblíž odpalovacího pontonu na hladině přehrady byl instalován vzorkovač pro odběr suspendovaných částic PM_{2,5} pro následnou analýzu koncentrací kovů, vzorkovač pro odběr suspendovaných částic frakce PM₁₀ pro následnou částicovou analýzu elektronovým mikroskopem a měřící vůz pro kontinuální měření koncentrací znečišťujících látek v ovzduší (PM₁₀, NO₂, NO, NO_x, SO₂) a meteorologických parametrů v 10minutových intervalech.

10.1 METEOROLOGICKÉ PODMÍNKY

Průměrná denní teplota vzduchu se během celé doby konání přehlídky pohybovala kolem 20 °C. Absolutní rozsah teplot byl 17,7 °C (13,7 °C až 31,4 °C).

Důležitým meteorologickým parametrem pro kvalitu ovzduší je směr a rychlost větru. Obecně lze říci, že byly rychlosti větru po celou dobu konání akce relativně nízké. V některé dny nepřesahovala denní maximální rychlost větru 3 m/s (11 km/h). Absolutní maximum rychlosti větru bylo 6,9 m/s (24,8 km/h). Více než třetina 10minutových intervalů vykazovala rychlost větru pod 1 m/s (3,6 km/h). Během doby konání samotných ohňostrojů byly rychlosti velmi nízké, mírně zvýšené (kolem 5 m/s) byly pouze během čtvrtého, posledního soutěžního ohňostroje 13. 6.

Během první a poslední třetiny měřicího období převládal SZ až S směr větru (dlouhodobě nejčastější směr větru v této lokalitě), v prostřední části měření převažovalo proudění JZ až JV.

Během žádného ohňostroje, ani několik hodin před či po něm, nebyly zaznamenány žádné srážky (stanoveno na základě přítomnosti pracovníka ČHMÚ v místě a době konání a radarových snímků).

10.2 PLYNNÉ ZNEČIŠŤUJÍCÍ LÁTKY

Měření koncentrací plynů probíhalo v 10minutových intervalech měřícím vozem. Konkrétně se jednalo o plyny, pro které je stanoven imisní limit v Zákoně o ochraně ovzduší⁴.

Oxid dusičitý (NO_2) může být částečně produktem odpalování pyrotechnických efektů, jeho koncentrace jsou však v největší míře ovlivňovány silniční dopravou. Na grafu průběhu koncentrací NO_2 během období měření (Obrázek 19) jsou dle předpokladu vidět nárůsty koncentrací NO_2 vždy krátce před zahájením ohňostroje, s výjimkou posledního ohňostroje, kdy byla výrazně vyšší rychlost větru a foukalo pouze ze SZ, tedy z hlavních odstavných ploch pro automobily směrem od vzorkovačů. Imisní limit pro hodinovou koncentraci NO_2 má hodnotu $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Vůbec nejvyšší naměřená koncentrace NO_2 během celé délky měření byla $47,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, tedy více než čtyřnásobně méně, než kolik činí imisní limit, navíc se jednalo jen o velmi krátkodobé zvýšení (jeden desetiminutový interval). Koncentrační růžice NO_2 (Obrázek 21) jsou v souladu s předpokladem, že nejvyšší koncentrace NO_2 pochází ze silniční dopravy (na růžicích jsou patrné nejvyšší koncentrace JV od měřícího vozu, tedy v místě příjezdové cesty k areálu přehrady a odstavného parkoviště). Obecně tedy lze říci, že dochází k pouze nevýznamnému a velmi krátkodobému zvýšení koncentrací NO_2 , které nepředstavují zdravotní riziko, nepřekračují imisní limity a jsou nižší, než hodnoty běžně měřené na některých brněnských dopravních stanicích.

Oxidy dusíku (NO_x) mají stanoven limit pro ochranu ekosystémů pro roční průměr. Ten má hodnotu $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Během celé doby měření kromě jednoho dne, nepřesáhly koncentrace NO_x v denním průměru $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Pouze 8. června (v den mimo odpalování ohňostrojů) byla průměrná denní koncentrace NO_x $16,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$, tedy přibližně polovina imisního limitu pro roční průměr. Lze tedy říci, že konání akce Ignis Brunensis nevedlo k překročení ani zvýšení koncentrací NO_x .

Imisní limit pro ochranu zdraví pro průměrnou roční koncentraci SO_2 má hodnotu $125 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 24h imisní limit pro ochranu zdraví pak $350 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Denní průměrné koncentrace SO_2 v době konání přehlídky se pohybovaly mezi $4,08$ a $5,09 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (absolutní maximum $9,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Nejvyšší denní průměr tedy představuje jen téměř jednu sedmdesátinu 24h imisního limitu. Ač je síra jednou z hlavních součástí střešního prachu používaného téměř ve všech pyrotechnických efektech, na koncentracích SO_2 v ovzduší se toto nijak neprojevalo a nedošlo k překročení ani k významnému zvýšení koncentrací SO_2 v ovzduší.

⁴ s výjimkou přízemního ozonu, který měřící vůz neměří. Přízemní ozon je sekundární polutant bez přímých (primárních) zdrojů. Jeho vznik v ovzduší probíhá za přítomnosti slunečního záření, proto obecně platí, že v noci jeho koncentrace klesají. Odpalování ohňostrojů probíhalo za naprosté tmy a není tedy důvod se domnívat, že by byl překročen imisní limit pro koncentrace přízemního ozonu v ovzduší.

Posledním sledovaným plynem byl oxid uhelnatý (CO). Zákonem o ochraně ovzduší stanovený imisní limit pro maximální 8h klouzavou průměrnou koncentraci CO pro ochranu zdraví má hodnotu 10 mg/m^3 . Průměrná denní koncentrace CO se během měření pohybovala od $0,18$ do $0,32 \text{ mg/m}^3$, tedy hluboko pod hranici imisního limitu. Absolutně nejvyšší koncentrace CO byla naměřena v den konání třetího ohňostroje a to krátce před jeho začátkem. Z koncentrační růžice CO (Obrázek 33) v době konání ohňostrojů je vidět, že nejvyšší koncentrace CO byly naměřeny při JZ proudění. V této oblasti se nacházely mj. stánky s občerstvením a je tedy možné, že jsou mírně zvýšené koncentrace dány nedokonalým spalováním z grilování apod. Hodnota absolutně nejvyšší naměřené koncentrace ($0,756 \text{ mg/m}^3$) však není ani desetina imisního limitu. Lze tedy říci, že v důsledku ohňostrojové přehlídky nedošlo k překračování ani významnému zvýšení koncentrací CO v ovzduší.

10.3 SUSPENDOVANÉ ČÁSTICE

V rámci měření kvality ovzduší byly sledovány dvě frakce suspendovaných částic – hrubá frakce PM_{10} a jemná frakce $\text{PM}_{2,5}$.

Hrubší frakce byla měřena kontinuálně radiometricky měřicím vozem v 10minutovém intervalu po celou dobu konání přehlídky. Potenciálním zdrojem zvýšených koncentrací PM_{10} v době konání ohňostrojů mohou být jak samotné pyrotechnické efekty, tak víření prachu z důvodu pohybu velkého množství osob a další s akcí spojené činnosti (grilování apod.). Vzorkovače a měřicí vůz byly během měření umístěny tak, aby nedocházelo k hyperlokálnímu ovlivnění z okolních zdrojů, které by mohly výrazně zkreslit měření (prostor přibližně v okruhu 20 m kolem měřících zařízení nebyl přístupný veřejnosti). Z grafu časového průběhu koncentrací suspendovaných částic PM_{10} (Obrázek 35) je vidět, že v době odpalování všech čtyř ohňostrojů došlo ke zvýšení koncentrací PM_{10} v ovzduší. Nejvyšší nárůst byl zaznamenán během druhého ohňostroje 6. června. Zároveň je však na grafu vidět, že se jednalo jen o velmi krátkodobý nárůst. Imisní limit pro 24h průměrnou koncentraci suspendovaných částic PM_{10} je roven $50 \text{ } \mu\text{g/m}^3$. Nejvyšší naměřený denní průměr byl $23,6 \text{ } \mu\text{g/m}^3$, tedy necelá polovina imisního limitu. Koncentrační růžice (Obrázek 36) ukazují na dva hlavní zdroje PM_{10} – jeden směrem na SZ, druhý na JV. Na SZ se nacházel na hladině ponton, odkud byly odpalovány ohňostroje, a na JV vedla hlavní přístupová cesta k tribuně, byly zde pouťové atrakce, stánky s občerstvením, parkoviště, a proto se zde pohybovalo větší množství lidí. Ohňostrojová přehlídka tedy má vliv na koncentrace suspendovaných částic PM_{10} v blízkém okolí, tyto však nebyly tak vysoké, aby došlo k překročení imisního limitu a absolutně nejvyšší naměřená koncentrace během celé délky měření ($55,3 \text{ } \mu\text{g/m}^3$) je hodnotou, která sice je nad 24h imisním limitem, avšak byla pozorována jen velmi krátkodobě během jednoho z 10minutových intervalů, zatímco imisní limit se vztahuje k dennímu průměru. Pro srovnání můžeme uvést, že v roce 2017 bylo na dopravní stanici Brno-Zvonařka pozorováno 127 dní, kdy byly

maximální denní koncentrace vyšší než $55,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, na předměstské pozadové stanici Brno-Tuřany v areálu letiště to bylo 94 dní. Zároveň, jak je vidět z tabulky (Tabulka 16), byly koncentrace v lokalitě Brno-přístaviště během konání přehlídky celkově nižší, než na většině jiných brněnských stanic.

Jemnější frakce $\text{PM}_{2,5}$ byla odebírána ve 4h intervalech a to vždy 4 h před začátkem ohňostroje (18:00 – 22:00), následně ve 4h intervalu zahrnujícím samotný ohňostroj (22:00 – 02:00) a dále ve 4h intervalu po ohňostroji (02:00 – 06:00). Celkově byly provedeny tři takovéto třífázové odběry ve dnech konání prvního, druhého a třetího ohňostroje (2., 6., a 9. 6. 2018). Z těchto vzorků byla gravimetricky stanovena koncentrace $\text{PM}_{2,5}$ částic a zároveň provedena analýza koncentrací kovů (viz níže). Zákon o ochraně ovzduší stanovuje imisní limit pro $\text{PM}_{2,5}$ pouze pro průměrnou roční koncentraci. Ten má hodnotu $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Během všech tří měřených ohňostrojů byla v prostředním 4h intervalu, zahrnujícím samotný ohňostroj, koncentrace $\text{PM}_{2,5}$ vyšší než v předchozím a následujícím 4h intervalu (Tabulka 17 a Obrázek 40). Absolutně nejvyšší koncentrace naměřená v jednom ze 4h intervalů má hodnotu $10,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (6. 6. 2018, 22:00-02:00), tedy méně než polovinu aktuálního imisního limitu, který je navíc stanoven pro roční průměr. Ve 4h intervaly mimo ohňostroj se koncentrace suspendovaných částic $\text{PM}_{2,5}$ pohybovaly kolem $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Během 4h intervalů zahrnujících ohňostroj od $7,0$ do $10,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Lze tedy říci, že koncentrace $\text{PM}_{2,5}$ těsně po odpálení ohňostroje mírně narůstaly, stále to však byly hodnoty hluboko pod imisními limitem pro ochranu zdraví pro roční průměrnou koncentraci suspendovaných částic $\text{PM}_{2,5}$ v ovzduší.

10.4 Kovy

Zákon o ochraně ovzduší stanovuje imisní limity pro celkem čtyři těžké kovy – arsen, kadmium, nikl a olovo. Koncentrace kovů byly stanoveny metodou hmotnostní spektrometrie s indukčně vázanou plazmou ze 4h odběrů suspendovaných částic $\text{PM}_{2,5}$. Je třeba říci, že imisní limity pro zmíněné čtyři kovy jsou stanoveny pro roční průměr v suspendovaných částicích PM_{10} . Byl proto na základě dlouhodobých statistik stanoven koeficient přepočtu koncentrací v suspendovaných částicích $\text{PM}_{2,5}$ na suspendované částice PM_{10} .

Imisní limit pro průměrnou roční koncentraci arsenu v ovzduší má hodnotu $6 \text{ ng}/\text{m}^3$. Během všech 4h intervalů, s výjimkou 4h intervalu odpalování druhého ohňostroje, byly koncentrace arsenu pod mezí detekce. Během 4h intervalu zahrnujícího druhý ohňostroj (6. 6. 2018, 22:00-02:00) byla naměřena koncentrace $0,7 \text{ ng}/\text{m}^3$, po přepočtu na PM_{10} přibližně $1,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Tato hodnota je více než 5x nižší, než je imisní limit pro průměrnou roční koncentraci arsenu v ovzduší. Arsen jako takový se navíc v pyrotechnických efektech nepoužívá a není proto důvod domnívat se, že by ohňostrojová přehlídka vedla k jeho zvýšeným koncentracím (což se potvrdilo).

Imisní limit pro průměrnou roční koncentraci kadmia v ovzduší má hodnotu 5 ng/m³. Stejně jako v případě arsenu se kadmium v pyrotechnických složích nepoužívá a to je vidět i na grafu naměřených koncentrací kadmia v jednotlivých 4h intervalech (Obrázek 43), kde koncentrace nekorelují s konáním ohňostrojí. Vůbec nejvyšší naměřená koncentrace byla ve 4h intervalu po druhém ohňostroji – 0,14 ng/m³ v PM_{2,5}, po přepočtu na PM₁₀ přibližně 0,23 ng/m³. Lze tedy říci, že nedocházelo k překročení imisního limitu pro průměrnou roční koncentraci kadmia v ovzduší.

Pro průměrnou roční koncentraci niklu je v Zákoně o ochraně ovzduší stanoven imisní limit 20 ng/m³. Stejně jako v případě arsenu a kadmia se nikl v pyrotechnických složích nepoužívá. Během všech devíti analyzovaných 4h intervalů byly koncentrace niklu ve vzorku pod mezí detekce 0,52 ng/m³. Teoreticky nejvyšší možnou hodnotou tedy je právě mez detekce a jejím přepočtem na PM₁₀ dostáváme hodnotu 0,8 ng/m³ (teoretická maximální koncentrace). Ta je jen necelou dvacetinou imisního limitu, který je stanoven pro průměrnou roční koncentraci. Koncentrace niklu tedy nepředstavovaly během konání přehlídky žádné riziko.

Imisní limit pro průměrnou roční koncentraci olova v ovzduší je stanoven na 500 ng/m³. Na rozdíl od předchozích tří těžkých kovů je olovo kovem, který se používá do některých pyrotechnických efektů. To se během měření potvrdilo. Jak je vidět z tabulky a grafu (Tabulka 26 a Obrázek 47) došlo během všech tří měřených dní k výraznějšímu nárůstu koncentrací olova v ovzduší. Během prvního ohňostroje se koncentrace před a po konání ohňostroje pohybovaly kolem 0,5 ng/m³. Při samotném ohňostroji to bylo asi 6x více, tedy 3 ng/m³. U druhého ohňostroje byly koncentrace před a po ohňostroji přibližně mezi 3 až 5 ng/m³, během ohňostroje 23,3 ng/m³. U posledního ohňostroje byly koncentrace před a po ohňostroji mezi 0,7 a 1,7 ng/m³, ve 4h intervalu s ohňostrojem 6,1 ng/m³. Koncentrace přepočítané na PM₁₀ pro tři 4h intervaly konání ohňostrojí byly 4,9; 35,9 a 9,4 ng/m³. I v případě nejvyšší přepočítané koncentrace se však jedná o hodnotu více než 10x nižší, než kolik činí imisní limit pro roční průměrnou koncentraci. Obecně tedy lze říci, že ač je vidět vliv ohňostrojevé přehlídky na koncentrace olova v ovzduší, jsou nárůsty koncentrací jen velmi krátkodobé a navíc stále hluboko pod imisním limitem pro ochranu zdraví.

Analýza koncentrací těžkých kovů nezahrnovala pouze čtyři těžké kovy s platným imisním limitem, ale i celou řadu dalších kovů. K nejvýraznějším nárůstům během odpalování ohňostrojí došlo u draslíku, kde byly koncentrace ve 4h intervalu v průměru 50x vyšší než byl průměr pro 4h intervaly mimo ohňostroje (viz Tabulka 29 a Obrázek 50). Konkrétně u draslíku však nejsou vyšší koncentrace rizikem, podle některých zdrojů (Wang, 2007) jsou dokonce zvýšené koncentrace draslíku v ovzduší prospěšné, protože napomáhají neutralizaci nežádoucích účinků kyselých dešťů a právě ohňostroje jsou jedním z nejvýznamnějších zdrojů draslíku v ovzduší. Výraznější nárůst byl dále pozorován

například také u hořčíku (v průměru přibližně 17,5násobný nárůst), i zde však nelze hovořit o problému, protože podobně jako v případě iontů draslíku, napomáhá draslík neutralizovat kyselé prostředí, zvyšuje pH a přispívá tak k mírnění nežádoucí vysoké kyselosti prostředí. Zvýšené koncentrace byly pozorovány i u dalších kovů, které jsou typické pro pyrotechnické efekty, například kovy, jejichž soli barví plamen konkrétní barvou (stroncium, baryum, titan, bor atd.) či kovy, které dodávají efektům jas, vyvolávají zábleskové efekty apod. Pro tyto kovy však není platný žádný imisní limit a nelze proto hovořit o jakémkoliv překročení.

10.5 ČÁSTICOVÁ ANALÝZA

Během tří ohňostrojů a jednoho odběru mimo dny konání ohňostrojů byly ve 4h intervalu odebrány také vzorky PM₁₀ na polykarbonátové filtry pro následnou částicovou analýzu skenovacím elektronovým mikroskopem. Právě skenovací elektronová mikroskopie v kombinaci s energiově-disperzní rentgenovou spektroskopií (SEM/EDX) představuje velmi efektivní nástroj pro charakterizaci suspendovaných částic v ovzduší po stránce jejich prvkového složení a morfologie. Automatizovaná analýza umožňuje analyzovat tisíce částic a následným statistickým vyhodnocením lze získat představu o charakteru vzorku. Na základě klasifikačních kritérií lze částice zařadit a určovat jejich potenciální původ.

Pro klasifikaci vzorků odebraných během ohňostrojové přehlídky bylo použito modifikované klasifikační schéma vycházející z doporučení EPA (Willis, 2002). S ohledem na účel analýzy byla navržena mj. speciální kategorie „ohňostroje“, jejíž kritéria vycházejí z poznatků získaných literární rešerší chemie pyrotechnických efektů.

Výsledky částicové analýzy a klasifikace potvrdily pravděpodobnou přítomnost částic pocházejících z pyrotechnických efektů v ovzduší. Procentuální podíl částic zařazených do kategorie „Ohňostroje“ byl během tří měřených ohňostrojů 57,3 %, 50,0 % a 56,5 %. Naproti tomu vzorek odebraný ve 4h intervalu v den mimo konání ohňostroje má podíl kategorie „Ohňostroje“ pouze 1,2 %. Obecně nejvíce zastoupenou třídou částic byla během ohňostrojů třída částic bohatých na draslík (někdy i 75 % částic), popř. částic bohatých na draslík a síru, což je v souladu s výsledky analýzy koncentrací kovů. V den bez ohňostroje byla třídou s nejvyšším podílem částic (57,6 %) třída smíšených hlinitokřemičitanů – částic typicky se vyskytujících v ovzduší v důsledku půdní eroze a resuspenze. U ohňostrojových vzorků byl dále pozorován vyšší podíl tříd částic bohatých na baryum, měď, olovo či stroncium. Naopak menší byl podíl částic bohatých na vápník, hlinitokřemičitanů či křemene. Na základě částicové analýzy tedy lze říci, že docházelo ke krátkodobému nárůstu PM₁₀ částic v ovzduší v důsledku odpalování ohňostrojů, přibližný podíl v několika hodinách po odpalování dosahoval

přibližně 50 %. Toto číslo koreluje i s výsledky měření měřícím vozem, jehož kvantitativní výsledky však potvrdily, že absolutní hodnoty samotných koncentrací nepřekročily imisní limit.

10.6 SROVNÁNÍ

Pro upřesnění výsledků byla provedena i analýza koncentrací znečišťujících látek během konání závěrečného nesoutěžního ohňostroje odpalovaného z brněnského hradu Špilberk v samotném centru města. Koncentrace v tomto případě nevycházely z účelových měření, ale z koncentrací naměřených stanicemi v okolí, patřících do Státní sítě imisního monitoringu spravované ČHMÚ (500 m vzdálené dopravní stanice Brno - Úvoz (hot spot), 1,4 km vzdálené dopravní stanice Brno - Zvonařka, 1,5 km vzdálené požadovné stanice Brno - Dětská nemocnice a 2,1 km vzdálené dopravní stanici Brno - Výstaviště). Z výsledné analýzy vyplynulo, že ani tento ohňostroj odpalovaný v centru města nijak negativně neovlivnil kvalitu ovzduší v okolí.

10.7 ZÁVĚR

V rámci měření kvality ovzduší byly sledovány především znečišťující látky, pro které je v Zákoně o ochraně ovzduší stanoven imisní limit (plyny a těžké kovy). Z výsledků kontinuálního měření plyných znečišťujících látek, analýzy koncentrací těžkých kovů a suspendovaných částic a částicové analýzy pomocí metody SEM/EDX vyplynulo, že **ač v některých případech dochází k prokazatelnému zvýšení koncentrací konkrétní látky, nedošlo k překročení žádného imisního limitu.**

11. LITERATURA

Akhavan J. *The chemistry of explosives*. Royal Society of Chemistry; 2011.

Alizadeh T, Amjadi S. *Preparation of nano-sized Pb²⁺ imprinted polymer and its application as the chemical interface of an electrochemical sensor for toxic lead determination in different real samples*. Journal of hazardous materials. 2011 Jun 15;190(1-3):451-9.

Bahlmann H, Lindwall R, Persson H. *Acute barium nitrate intoxication treated by hemodialysis*. Acta anaesthesiologica scandinavica. 2005 Jan;49(1):110-2.

Beckstead MW. *Correlating aluminum burning times*. Combustion, Explosion and Shock Waves. 2005 Sep 1;41(5):533-46.

Brain, Marshall. *"How fireworks work."* (2001).

Cannavo CG, Riffault ML, inventors; *Direction General pour l'Armement (DGA), assignee. Hot-wire ignition initiator for propellant charges*. United States patent US 4,354,432. 1982 Oct 19.

Cobb V. *Fireworks*. LernerClassroom; 2006.

Conkling JA, Mocella C. *Chemistry of pyrotechnics: basic principles and theory*. CRC press; 2010 Dec 23.

Czyska-Filemonowicz A, Buffat PA, Łucki M, Moskalewicz T, Rakowski W, Lekki J, Wierzchoń T. *Transmission electron microscopy and atomic force microscopy characterisation of titanium-base alloys nitrated under glow discharge*. Acta Materialia. 2005 Sep 1;53(16):4367-77.

Do TM, Wang CF, Hsieh YK, Hsieh HF. *Metals present in ambient air before and after a firework festival in Yanshui, Tainan, Taiwan*. Aerosol Air Qual. Res. 2012 Oct 1;12(5):981-93.

Dolara P. *Occurrence, exposure, effects, recommended intake and possible dietary use of selected trace compounds (aluminium, bismuth, cobalt, gold, lithium, nickel, silver)*. International journal of food sciences and nutrition. 2014 Dec 1;65(8):911-24.

Dolata DP. *Reassessment of the Identity of the Blue Light Emitter in Copper-Containing Pyrotechnic Flames – Is it really CuCl?*. Propellants, Explosives, Pyrotechnics: An International Journal Dealing with Scientific and Technological Aspects of Energetic Materials. 2005 Feb;30(1):63-6.

Drewnick F, Hings SS, Curtius J, Eerdeken G, Williams J. *Measurement of fine particulate and gas-phase species during the New Year's fireworks 2005 in Mainz, Germany*. Atmospheric Environment. 2006 Jul 1;40(23):4316-27.

Ergin M, Caliskanturk M, Senat A, Akturk O, Erel O. *Disulfide stress in carbon monoxide poisoning*. Clinical biochemistry. 2016 Nov 1;49(16-17):1243-7.

Friberg L. *Cadmium in the Environment*: 0. CRC press; 2017 Dec 22.

Gellings, C.W. and Parmenter, K.E., 2016. *Energy efficiency in fertilizer production and use*.

Geravandi S, Goudarzi G, Babaei AA, Akbar A, Takdastan A, Mohammadi MJ, Vosoughi Niri M, Salmanzadeh S, Shirbeigi E. *Health endpoint attributed to sulfur dioxide air pollutants*. Jundishapur Journal of Health Sciences.. 2015;7(3).

Grant CA. *Influence of phosphate fertilizer on cadmium in agricultural soils and crops*. Pedologist. 2010;54(3 Special Issue):143-55.

Grima M, Butler M, Hanson R, Mohameden A. *Firework displays as sources of particles similar to gunshot residue*. Science & Justice. 2012 Mar 1;52(1):49-57.

Hall Jr HH, Bouchard AC, Shaffer JW, Gavenonis TL, inventors; Ledvance LLC, assignee. *Method of making a heat-sealed pyrotechnic cap*. United States patent US 4,374,073. 1983 Feb 15.

Harasim P, Filipek T. *Nickel in the environment*. Journal of Elementology. 2015;20(2).

Hetem IG, Andrade MD. *Characterization of fine particulate matter emitted from the resuspension of road and pavement dust in the metropolitan area of São Paulo, Brazil*. Atmosphere. 2016 Feb 23;7(3):31.

Hosseini MJ, Shaki F, Ghazi-Khansari M, Pourahmad J. *Toxicity of arsenic (III) on isolated liver mitochondria: a new mechanistic approach*. Iranian journal of pharmaceutical research: IJPR. 2013;12(Suppl):121.

Chen X, Zhang X, Feng MH, Pang GP, Lv HP. *The influences of catalysts in the thermal decomposition of barium nitrate as pyrotechnic oxidants*. In Applied Mechanics and Materials 2012 (Vol. 217, pp. 766-769). Trans Tech Publications.

Chervona Y, Arita A, Costa M. *Carcinogenic metals and the epigenome: understanding the effect of nickel, arsenic, and chromium*. Metallomics. 2012;4(7):619-27.

Choi D, Toda H, Kim Y. *Effect of sulfur dioxide (SO₂) on growth and physiological activity in Alnus sieboldiana at Miyakejima Island in Japan*. Ecological research. 2014 Jan 1;29(1):103-10.

Iijima A, Sato K, Yano K, Kato M, Kozawa K, Furuta N. *Emission factor for antimony in brake abrasion dusts as one of the major atmospheric antimony sources*. Environmental science & technology. 2008 Mar 12;42(8):2937-42.

Jaishankar M, Tseten T, Anbalagan N, Mathew BB, Beeregowda KN. *Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals*. Interdisciplinary toxicology. 2014 Jun 1;7(2):60-72.

Jefferson R. *Alkaline Materials: Sodium, Potassium, Cesium, Rubidium, Francium, and Lithium*. Patty's Toxicology. 2001 Apr 16:935-48.

Kermani M, Jokandan SF, Aghaei M, Asl FB, Karimzadeh S, Dowlati M. *Estimation of the number of excess hospitalizations attributed to sulfur dioxide in six major cities of Iran*. Health Scope. 2016;5(4).

Keshavarzi B, Moore F, Mosaferi M, Rahmani F. *The source of natural arsenic contamination in groundwater, west of Iran*. Water Quality, Exposure and Health. 2011 Dec 1;3(3-4):135-47.

Kim HS, Kim YJ, Seo YR. *An Overview of Carcinogenic Heavy Metal: Molecular Toxicity Mechanism and Prevention*. Journal of Cancer Prevention. 2015;20(4):232-240. doi:10.15430/JCP.2015.20.4.232.

Kim JY, Lee EY, Choi I, Kim J, Cho KH. *Effects of the particulate matter 2.5 (PM_{2.5}) on lipoprotein metabolism, uptake and degradation, and embryo toxicity*. Molecules and cells. 2015 Dec 31;38(12):1096.

Kim KH, Kabir E, Kabir S. *A review on the human health impact of airborne particulate matter*. Environment international. 2015 Jan 1;74:136-43.

Koch EC. *Special Materials in Pyrotechnics: III. Application of Lithium and its Compounds in Energetic Systems. Propellants, Explosives*, Pyrotechnics: An International Journal Dealing with Scientific and Technological Aspects of Energetic Materials. 2004 Apr;29(2):67-80.

Kumar S. *Acid Rain-The Major Cause of Pollution: Its Causes, Effects*. International Journal of Applied Chemistry. 2017;13(1):53-8.

Lamas GA, Navas-Acien A, Mark DB, Lee KL. *Heavy metals, cardiovascular disease, and the unexpected benefits of chelation therapy*. Journal of the American College of Cardiology. 2016 May 24;67(20):2411-8.

Lane EA, Canty MJ, More SJ. *Cadmium exposure and consequence for the health and productivity of farmed ruminants*. Research in veterinary science. 2015 Aug 1;101:132-9.

- Letašiová S, Medveďová A, Šovčíková A, Dušinská M, Volkovová K, Mosoiu C, Bartonová A. *Bladder cancer, a review of the environmental risk factors*. Environmental Health. 2012 Jun;11(1):S11.
- Lewis TC, Robins TG, Batterman SA, Mukherjee B, Mentz GB, Parker EA, Israel BA. *Daily 1-hour peak levels of sulfur dioxide are associated with increased respiratory symptoms in detroit children with asthma*. In A16. EPIDEMIOLOGY AND HEALTH CARE COSTS OF PEDIATRIC AND ADULT ASTHMA 2016 May (pp. A1030-A1030). American Thoracic Society.
- Licudine JA, Yee H, Chang WL, Whelen AC. Hazardous metals in ambient air due to New Year fireworks during 2004–2011 celebrations in Pearl City, Hawaii. Public Health Reports. 2012 Jul;127(4):440-50.
- Linden D. *Handbook of batteries and fuel cells*. New York, McGraw-Hill Book Co., 1984, 1075 p.
- Loke TS, Tan D, Seah HS, Er MH. *Rendering fireworks displays*. IEEE Computer Graphics and Applications. 1992 May 1(3):33-43.
- Meyerriecks W, Kosanke KL. *Color values and spectra of the principal emitters in colored flames*. J. Pyrotechnics. 2003;18:1-22.
- Nordberg GF, Nogawa K, Nordberg M. Cadmium. In *Handbook on the Toxicology of Metals* (Fourth Edition) 2015 (pp. 667-716).
- Nriagu JO. *Production and uses of chromium. Chromium in the natural and human environments*. 1988 Mar 31;20:81-104.
- O'Brien E, Partner UN. *Chronology of leaded gasoline/leaded petrol history*. Lead Education and Abatement Design Group. 2011 Dec 23.
- Osredkar J, Sustar N. *Copper and zinc, biological role and significance of copper/zinc imbalance*. J. Clinic. Toxicol. S. 2011;3:2161-0495.
- Palaneeswarria T. *A study on attitude of fireworks manufacturers in Sivakasi towards eco-friendly fireworks*. International Journal of Trade and Commerce. 2012 Jul.
- Park HS, Kang YH. *The Role of trivalent chromium as a supplement*. Journal of The Korean Society of Food Science and Nutrition. 2004.
- Pavlov D. *Lead-acid batteries: science and technology*. Elsevier; 2011 May 31.

Posson PL, Baggett Jr AJ, inventors; *BAE Systems Integrated Defense Solutions Inc, assignee. Pyrotechnic compositions and uses therefore.* United States patent US 6,427,599. 2002 Aug 6.

Powell SR. *The antioxidant properties of zinc.* The Journal of nutrition. 2000 May 1;130(5):1447S-54S.

Ratnaike RN *Acute and chronic arsenic toxicity* Postgraduate Medical Journal 2003;79:391-396.

Reck BK, Rotter VS. *Comparing growth rates of nickel and stainless steel use in the early 2000s.* Journal of Industrial Ecology. 2012 Aug 1;16(4):518-28.

Rose JE, Elstrodt D, Puszynski JA, inventors; *US Secretary of Navy, assignee. Lead-free pyrotechnic composition.* United States patent US 6,663,731. 2003 Dec 16.

Rose JJ, Wang L, Azarov I, Xu Q, Huang XN, Corey CG, Guimaraes D, McTiernan CF, O'Donnell CP, Tejero J, Shiva S. *Reversal Of The Toxic Effects Of Carbon Monoxide (CO) Poisoning On Tissue Respiration Through A Co Scavenging Molecule.* InB80-A. MECHANISMS AND MODELS OF ACUTE LUNG INJURY 2017 May (pp. A4394-A4394). American Thoracic Society.

Russell MS. *The chemistry of fireworks.* Royal Society of Chemistry; 2009.

Sabatini JJ, Poret JC, Broad RN. *Boron Carbide as a Barium-Free Green Light Emitter and Burn-Rate Modifier in Pyrotechnics.* Angewandte Chemie International Edition. 2011 May 9;50(20):4624-6.

Sanger MJ. *Flame Tests: Which Ion Causes the Color?.* Journal of Chemical Education. 2004 Dec;81(12):1776A.

Sekar, T. and Ramaswamy, S.N., 2004. *Explosion Resistant Buildings for Fireworks and Match Works Industries—Issues and Challenges Ahead.*

Sharma PP, Gahlot S, Rajput A, Patidar R, Kulshrestha V. *Efficient and cost effective way for the conversion of potassium nitrate from potassium chloride using electrodialysis.* ACS Sustainable Chemistry & Engineering. 2016 May 3;4(6):3220-7.

Silva MM, Lidon F. *Food preservatives—An overview on applications and side effects.* Emirates Journal of Food and Agriculture. 2016 Jan 7:366-73.

Singh VP. *Toxic metals and environmental issues.* Sarup & Sons; 2005.

Smith SJ, Aardenne JV, Klimont Z, Andres RJ, Volke A, Delgado Arias S. *Anthropogenic sulfur dioxide emissions: 1850–2005.* Atmospheric Chemistry and Physics. 2011 Feb 9;11(3):1101-16.

Steinhauser G, Klapötke TM. "Green" pyrotechnics: a chemists' challenge. *Angewandte Chemie International Edition*. 2008 Apr 21;47(18):3330-47.

Steinhauser G, Schauer V, Shozugawa K. *Concentration of strontium-90 at selected hot spots in Japan*. *PLoS one*. 2013 Mar 7;8(3):e57760.

Steinhauser G, Sterba JH, Foster M, Grass F, Bichler M. *Heavy metals from pyrotechnics in New Years Eve snow*. *Atmospheric Environment*. 2008b Dec 1;42(37):8616-22.

SZÚ; *Zdravotní důsledky a rizika znečištění, Odborná zpráva za rok 2015*, Státní zdravotní ústav, Praha, září 2016

Takeuchi CY, Corrêa-Afonso AM, Pedrazzi H, Dinelli W, Palma-Dibb RG. *Deposition of lead and cadmium released by cigarette smoke in dental structures and resin composite*. *Microscopy Research and Technique*. 2011 Mar 1;74(3):287-91.

Tian YZ, Wang J, Peng X, Shi GL, Feng YC. *Estimation of the direct and indirect impacts of fireworks on the physicochemical characteristics of atmospheric PM 10 and PM 2.5*. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2014 Sep 16;14(18):9469-79.

Tokar EJ, Diwan BA, Ward JM, Delker DA, Waalkes MP. *Carcinogenic effects of "whole-life" exposure to inorganic arsenic in CD1 mice*. *Toxicological sciences*. 2010 Oct 11;119(1):73-83.

Tolcin, A. C. (2015). *Mineral Commodity Summaries 2015: Zinc*. United States Geological Survey. Archived (PDF) from the original on May 25, 2015. Retrieved May 27, 2015.

Trasande L, Malecha P, Attina TM. *Particulate matter exposure and preterm birth: estimates of US attributable burden and economic costs*. *Environmental health perspectives*. 2016 Dec;124(12):1913.

Uddin R, Huda NH. *Arsenic poisoning in Bangladesh*. *Oman medical journal*. 2011 May;26(3):207.

US Food and Drug Administration. *Q3D Elemental Impurities Guidance for Industry*. US Department of Health and Human Services. 2015:41.

Válek L., *Pyrotechnika tajemství zbavená*, 2009, Válek Leo-vlastní náklad, ISBN 978-80-254-6106-8, 128s.

Vierkötter A, Krutmann J, Schikowski T. 9.1 *Ambient Particulate Matter and Its Health Effects*. *Environment and Skin*. 2017 Nov 20:105.

Vincent JB. *Elucidating a biological role for chromium at a molecular level*. Accounts of chemical research. 2000 Jul 18;33(7):503-10.

Wallace PJ, Gerlach TM. *Magmatic vapor source for sulfur dioxide released during volcanic eruptions: evidence from Mount Pinatubo*. Science. 1994 Jul 22;265(5171):497-9.

Wang Y, Zhuang G, Xu C, An Z. *The air pollution caused by the burning of fireworks during the lantern festival in Beijing*. Atmospheric Environment. 2007 Jan 1;41(2):417-31.

WHO, 2016; *Air Quality Guidelines, Global Update 2005*; World Health Organization, 2006

Willis, R., Blanchard, F., Conner, T., 2002. *Guidelines for the application of SEM/EDX analytical techniques to particulate matter samples*. EPA Report No. 600/R-02/070.

Woodford C. *Titanium*. Marshall Cavendish; 2003.

Yang H, He M, Wang X. *Concentration and speciation of antimony and arsenic in soil profiles around the world's largest antimony metallurgical area in China*. Environmental geochemistry and health. 2015 Feb 1;37(1):21-33.

Yusuf M, Fariduddin Q, Hayat S, Ahmad A. *Nickel: an overview of uptake, essentiality and toxicity in plants*. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology. 2011 Jan 1;86(1):1-7.

Zeng X, Xu X, Boezen HM, Huo X. *Children with health impairments by heavy metals in an e-waste recycling area*. Chemosphere. 2016 Apr 1;148:408-15.

Zhao FJ, McGrath SP, Meharg AA. *Arsenic as a food chain contaminant: mechanisms of plant uptake and metabolism and mitigation strategies*. Annual review of plant biology. 2010 Jun 2;61:535-59.

Zhu CG, Wang HZ, Min L. *Ignition temperature of magnesium powder and pyrotechnic composition*. Journal of Energetic Materials. 2014 Jul 3;32(3):219-26.

Ahmaruzzaman M. *A review on the utilization of fly ash*. Progress in energy and combustion science. 2010 Jun 1;36(3):327-63.

Li W, Shi Z, Yan C, Yang L, Dong C, Wang W. *Individual metal-bearing particles in a regional haze caused by firecracker and firework emissions*. Science of the Total Environment. 2013 Jan 15;443:464-9.

PODĚKOVÁNÍ

Autoři zprávy by rádi poděkovali laborantce ČHMÚ Ivě Bajerkové za přípravu vzorků, technikům ČHMÚ Miroslavu Komárkovi a Radku Krymlákovi za technické zajištění vzorkovačů ČHMÚ, Mgr. Elišce Žabkové za provedení ICP-MS analýzy, Mgr. Lucii Sedlákové za gravimetrické stanovení, dále Bc. Radku Kronovetovi z MMB za pomoc s organizací měření a technikům Jaroslavu Appeltauerovi a Radku Jordanovi za technické zajištění měřicího vozu. Dík patří také Ing. Ivu Slámovi a Aleši Kaloudovi z Jachtklubu za vstřícnost a spolupráci s umístěním měřicí techniky.