

Univerzita Karlova v Praze
Přírodovědecká fakulta
Ústav pro životní prostředí

Submikronový aerosol v ovzduší malého sídla
Submicron aerosol particles in a small
settlement

Diplomová práce


Jana Vrbová

Vedoucí DP: RNDr. Jan Hovorka, Ph.D.

Září 2009

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala samostatně s využitím uvedené literatury a informací, na něž odkazuji. Svoluji k jejímu zapůjčení s tím, že veškeré (i přijaté) informace budou řádně citovány.

V Praze dne 31.08.2009

Podpis 

Na tomto místě bych ráda poděkovala vedoucímu diplomové práce panu RNDr. Janu Hovorkovi, Ph.D. za pomoc a odborné konzultace, které mi usnadnily orientaci v problematice studia aerosolů. Dále bych chtěla poděkovat své rodině a přátelům, kteří mě po celou dobu studia podporovali a projevili vždy velkou trpělivost a psychickou podporu. Poděkování patří také panu Hladnému za pomocné práce při realizaci měření.

Abstrakt

Čelmský

Cílem diplomové práce bylo změřit velikostní distribuce submikronových aerosolových částic v malé obci během zimního období a odhadnout jejich možné zdroje. Měřicí kampaň se uskutečnila ve dnech 24.1. – 7.2.2008 v obci Mokré, kde žije 160 obyvatel. Experimentální práce zahrnovala měření koncentrací počtu a hmotnosti submikronového aerosolu v rozsahu velikostí 14.6 – 736.5 nm, doprovodných meteorologických údajů a měření plynných polutantů NO_x a O₃ s integrační dobou pět minut. Současně byla zjišťována i hmotnostní koncentrace částic PM₁ a PM_{2,5}.

Průměr / medián koncentrace počtu částic za celou měřicí kampaň byl 4 242 / 3 472 #/cm³. Průměr / medián hmotnostní koncentrace byl 16,2 / 11,9 μg/m³. Jednotlivé dny zimní kampaně lze rozdělit podle typu velikostní distribuce submikronových částic do 4 skupin: dny, kdy převažuje monomodální distribuce s maximem okolo 100 nm (dominuje lokální vytápění), dny s bimodální distribucí, kdy k původnímu maximu přibýlo maximum okolo 30 nm (dominuje lokální vytápění a doprava), dny s nízkou koncentrací počtu částic (v období srážek), dny ve kterých došlo ke vzniku nových částic.

Vznik nových částic se uskutečnil ve dnech 28.1. – 29.1.2008. Tomu předcházelo vymytí aerosolu deštěm a následný pokles relativní vlhkosti pod 40 %. 28.1. v poledne vznikly nukleací nové částice, které následně rostly kondenzačním růstem do 12:00 hod 29.1. Důsledkem procesu byla nejvyšší koncentrace počtu částic první den, druhý den pak nejvyšší hmotnostní koncentrace částic v obci za celou měřicí kampaň. Ze 40 maximálních hodnot koncentrace počtu částic (cca 1 % z celkového počtu měření) jich bylo naměřeno 29 ve dnech, kdy došlo k nukleaci. 99 % percentil hodnot koncentrací počtu / hmotnosti částic se vyskytl mezi 16:30 – 21:00 hod / 17:30 – 19:30 hod, tzn. v časech zvýšené intenzity lokálního vytápění.

Hmotnostní koncentrace dosahují maxima, pohybuje-li se teplota mezi 0 – 4 °C a při jihovýchodním směru větru do 3 m/s. Koncentrace počtu částic vykazuje maxima do rychlosti větru 3 m/s. Vliv teploty na koncentraci počtu částic není patrný a na 5 % hladině testu jsou veličiny navzájem nezávislé. Změna kontinentálního proudění vzdušných mas se na charakteristice submikronového aerosolu neprojevila.

Z výše uvedených experimentálních dat lze odhadnout tři hlavní zdroje submikronových částic – vznik nových částic, lokální vytápění a dopravu. Překvapivým zjištěním je skutečnost, že v ovzduší malého sídla může vznik nových částic svým významem předčít přímé emise ze zdrojů.

Abstract

The aim for this diploma work was to measure size distribution of submicron aerosol and estimate its possible sources in a small village during winter. The measurement took place in the Mokre village with population of 160 inhabitants, between January 24 and February 7, 2008.

The five minute integrates of number/mass concentration of submicron aerosol in the range of 14.6 – 736.5 nm, PM₁ and PM_{2,5}, wind speed/direction, temperature, humidity and gaseous pollutants NO_x and O₃ were determined during the sampling period.

Average / median of the number concentration was 4 242 / 3 472 #/cm³. Average / median of the mass concentration was 16,2 / 11,9 µg/m³. Four types of diurnal variation of submicron aerosol size distributions were distinguished within the sampling campaign: days with monomodal distribution mostly around 100 nm (caused by local heating,), days with bimodal distribution with maximum about 30 nm and 100 nm (caused by local heating and transportation), days with low number concentrations of submicron aerosol (due to rain) and days with new particle formation.

Formation of new particles occurred between 28-29 January 2008. Before the formation occurred, aerosol was washed out and due to temperature drop humidity decreased under 40 %. Nucleation burst started approximately at noon January 28 followed by condensational growth till near midday of the next day. As results, the highest number concentration of submicron aerosol was recorded within the first day, while the highest mass concentration was recorded during the second day. Of the 40 highest values of number concentrations (about 1 % of total count) 29 was recorded during the new particle formation days. The highest values of number / mass concentration occurred between 16:30 - 21:00 / 17:30 - 19:30. These time periods are also periods of the highest intensity of local heating. Maximum of mass concentration occurred at temperature between 0 – 4 °C and southeast wind of about 3 m/s speed. Maximum of number concentration occurred at wind speed about 3 m/s regardless the direction. Contrary to mass, aerosol number concentrations were found independent on temperature at 5 % level. Changes in continental air mass trajectories had no remarkable influence to submicron aerosol characteristic.

Based on our measurements, three main sources of submicron aerosol particles in the atmosphere of small village in winter were distinguished: new particle formation, local heating and transportation. Surprisingly, formation of new particles overrides sources of direct aerosol emission.

Obsah

Abstrakt.....	4
Abstract.....	5
1. Úvod	7
1.1 Vlastnosti atmosférického aerosolu.....	8
1.2 Vznik aerosolových částic	9
1.3 Zdroje atmosférického aerosolu	10
1.3.1 Mobilní zdroje aerosolových částic.....	11
1.3.2 Stacionární zdroje	12
1.4 Chemické složení.....	13
1.5 Účinek aerosolů na lidské zdraví.....	13
2. Metodika	15
2.1 Popis lokality	15
2.2 Odběr vzorku	16
2.3 Měření velikostní distribuce aerosolu	17
2.4 Měření plynných polutantů.....	19
3. Výsledky.....	20
4. Diskuze.....	40
5. Závěr	51
6. Použitá literatura	53
7. Přílohy.....	57
7.1 Mapová příloha.....	58
7.2 Tabulková příloha.....	60
7.3 Obrazová příloha	64

1. Úvod

Aerosolové částice suspendované v atmosféře patří mezi dlouhodobě sledované škodliviny v ovzduší. Atmosférický aerosol je soubor tuhých, kapalných nebo směsných částic suspendovaných v atmosféře. Velikost částic se pohybuje v rozmezí od 1 nm do 100 μm . Atmosférický aerosol je uvolňován přírodními i antropogenními procesy a liší se svým chemickým složením i chováním v atmosféře.

V současnosti se sledování aerosolových částic (PM – particulate matter) uskutečňuje hned z několika důvodů. Koncentrace atmosférického aerosolu ovlivňuje radiační bilanci Země a s tím související změny klimatu, viditelnost a působí na vegetaci, živočichy a lidské zdraví.

Výsledky dlouhodobých studií, jejichž tématem byl vliv atmosférického aerosolu na lidské zdraví, jasně ukazují důležitost věnovat se částicím menším než 1 μm (částicím submikronovým). Bylo prokázáno, že zvýšené koncentrace těchto částic mohou u slabších jedinců vyvolat ischemickou chorobu srdeční a infarkt myokardu. Zvyšuje se riziko úmrtí z kardiopulmonárních příčin, dále riziko dýchacích potíží a plicních onemocnění, projevů alergií a zánětů. Aerosolové částice mohou mít také vliv na nízkou porodní váhu dítěte a dokonce vyvolat i předčasný porod. Submikronové částice setrvávají v atmosféře dlouhou dobu a mohou být přeneseny i na poměrně velkou vzdálenost. Vlivem uvedených skutečností se zájem vědců i široké veřejnosti upíná právě k těmto částicím.

V souvislosti s aerosolovou problematikou se klade stále větší důraz na porozumění procesu nukleace, neboť v řadě lokalit přispívá k významnému zvýšení koncentrací submikronového aerosolu a může mít zásadní hygienický význam.

Zatímco měření aerosolových částic ve městech je dnes běžné, malá sídla stále unikají větší pozornosti. Vzhledem ke skutečnosti, že v České republice žije téměř polovina lidí v sídlech s méně než 10 tisíci obyvateli (z toho 8 % populace v sídlech s méně než 500 obyvateli) je důležité zjistit, jaké zdroje a procesy ovlivňují množství aerosolových částic v tomto prostředí, kde významným zdrojem znečištění může být i způsob vytápění.

Cílem zadané diplomové práce je zjistit základní vlastnosti a velikostní distribuce submikronových aerosolových částic v malé obci Mokré, která se nachází v Královéhradeckém kraji na úpatí Orlických hor, během zimního období. Budu se snažit odpovědět na otázku, jaké procesy ovlivňují velikostní distribuce

submikronového aerosolu v ovzduší malého sídla a jaké zdroje se na nich mohou podílet s využitím naměřených meteorologických údajů (teplota, směr a rychlost větru, vlhkost, globální sluneční záření) a koncentrací plyných polutantů NO_x (NO , NO_2) a O_3 .

1.1 Vlastnosti atmosférického aerosolu

Velikost, tvar a měrná hustota částic aerosolu jsou nejdůležitější parametry ovlivňující jeho chování v atmosféře. Zatímco malé částice (blízké velikosti průměrné molekuly vzduchu – 0,37 nm) se budou v ovzduší pohybovat převážně Brownovým pohybem daným zejména difuzí, pohyb větších částic bude určen především silami setrvačnosti a gravitace (Hovorka, 2004).

Jednotlivé částice aerosolu mohou být charakterizovány ekvivalentním aerodynamickým průměrem (průměr hypotetické kulové částice o standardní měrné hustotě ($1000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), která sedimentuje stejně rychle jako příslušná částice). Vzhledem k různému počtu a velikosti částic je vhodné určit jejich počet ve vybraných velikostních skupinách, nebo-li stanovit distribuci částic aerosolu. Částice v jednotlivých distribučních modech se od sebe liší způsobem vzniku i chemickým složením (Hovorka, 2004).

Velikostní distribuce částic odhaluje přítomnost hrubých a jemných částic v atmosféře. Liší se mechanismy vzniku, velikostí, zdroji, kterými jsou emitovány, chemickým složením a procesy, které vedou k jejich odstranění z atmosféry. Velikostní distribuce částic aerosolu dle Whitbyho (1978) obsahuje obvykle 3 mody, odtud trimodální distribuce, s dvěma mody v oblasti jemných částic aerosolu (nukleační a akumulární) a s jedním modem v oblasti hrubých částic. Rozlišení hrubých a jemných částic zde ohraničuje hodnota $2,5 \mu\text{m}$. Mod s maximem mezi $5 - 30 \mu\text{m}$, označovaný jako mod hrubých částic, je formován především mechanickými procesy. Jedná se například o prach vytvářený větrem, nebo dopravní či stavební aktivitou. Mod mezi $0,15 - 0,5 \mu\text{m}$ je označovaný jako mod akumulární, leží v oblasti jemných částic a částice tohoto modu jsou formovány především procesy kondenzace a koagulace. Poslední mod nazvaný nukleační s maximem mezi $0,015 - 0,04 \mu\text{m}$ je formován procesy kondenzace par a koagulace, částice tohoto modu vznikají jako důsledek vysokoteplotních procesů (hoření, tavení rud a kovů) (EPA, 2004).

Z výzkumů bylo zjištěno, že v oblasti jemných částic můžeme objevit ještě jeden mod, umístěný mezi nukleačním a akumulacním modem, který je označován jako mod Aitkenův (10 - 100 nm). Je následkem růstu malých částic, je ovlivněn procesy kondenzace a koagulace a vyskytuje se především v oblastech zatížených dopravou (EPA, 2004).

Kulmala et al. (2004) definuje mody velikostní distribuce částic aerosolu následovně: nukleační mod se nachází mezi 3 – 20 nm, Aitkenův mod mezi 10 – 90 nm, akumulacní mod je v rozmezí od 90 nm do 1 μm . Jako hrubý mod se označují částice větší než 1 μm . Rozlišení hrubých a jemných částic zde tedy ohraničuje hodnota 1 μm .

Nejčastěji měřená vlastnost atmosférického aerosolu je hmotnostní koncentrace aerosolu vyjadřovaná nejčastěji v $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Dnes se však stále větší důraz klade na zjišťování koncentrace počtu částic aerosolu (number concentration) vyjadřované jako počet částic na cm^3 objemu vzduchu (Hinds et al., 1999).

Doba setrvání částic v atmosféře se liší podle jejich tvaru a velikosti. Hrubé částice poměrně rychle sedimentují a jsou přeneseny pouze na kratší vzdálenost od zdroje. Doba setrvání v atmosféře se pohybuje v řádu hodin, maximálně dnů. Z atmosféry jsou odstraněny především procesem sedimentace. Naproti tomu jemné částice hlavně akumulacního modu, které mohou vznikat růstem částic z modu nukleačního a Aitkenova, jsou přeneseny na poměrně velkou vzdálenost od zdroje (tisíce km) a doba jejich setrvání v atmosféře trvá řádově dny až týdny. Z atmosféry se odstraňují zejména v mokré depozici a dle svého chemického složení mohou způsobit acidifikaci a s tím související ekologické problémy (EPA, 2004).

1.2 Vznik aerosolových částic

V posledních letech bylo zjištěno, že mnoho procesů probíhajících v atmosféře, vede ke vzniku nových částic nebo li nukleaci. Nukleaci lze definovat jako vznik částic z plynných prekurzorů vlivem fyzikálně-chemických přeměn v atmosféře. Během nukleace dochází ke zvyšování koncentrace počtu aerosolových částic nukleačního modu a posléze i jejich hmotnosti v atmosféře. Tento proces byl pozorován ve všech typech prostředí, jak v zalesněných neobydlených oblastech, tak i ve velkoměstech. Ke vzniku částic dochází zpravidla během dne, kdy působí sluneční záření a mohou probíhat fotochemické reakce. Další z faktorů, které umožňují proces nukleace je nízká

relativní vlhkost vzduchu, nízká koncentrace aerosolových částic akumulčního modu v ovzduší a často také nízká teplota a slabé proudění větru (Kulmala et al., 2004).

Vznik aerosolových částic a jejich následný růst charakterizují dvě veličiny. První z nich je rychlost, s jakou jsou částice uvolňovány do atmosféry (počet částic na cm^3 za 1 s). To znamená rychlost za jakou částice dorostou do 3 nm, kdy mohou být detekovány měřicím přístrojem. Druhou veličinou je pak rychlost růstu částic ($\text{v nm}\cdot\text{h}^{-1}$), která nám říká, jak rychle se částice zvětšují. Většina doposud publikovaných rychlostí leží v rozmezí 1 – 10 $\text{nm}\cdot\text{h}^{-1}$ trvající 0,5 – 3 dny (Kulmala et al., 2008).

Doposud není úplně objasněn mechanismus nukleace v atmosféře. Za nejdůležitější procesy jsou považovány:

1. homogenní binární nukleace vodní páry a kyseliny sírové
2. homogenní ternární nukleace kyseliny sírové a amoniaku
3. iontová nukleace

Růst částic probíhá různými způsoby: kondenzace vodních par, kondenzace částic s nábojem, chemické reakce, heterogenní nukleace (Kulmala et al., 2008).

Nukleace a následný kondenzační růst částic je také ovlivněn celkovou koncentrací počtu částic, jejich velikostí a chemickými, fyzikálními a optickými vlastnostmi aerosolových částic. Plynný oxid siřičitý je považován za hlavní plynný prekurzor nukleace. SO_2 přechází reakcí s vodní párou na kyselinu sírovou, která je rychle přesycena a tvoří zárodečná jádra vzniku aerosolu. Zdrojem SO_2 je kromě přirozených zdrojů i lidská činnost zahrnující především spalování fosilních paliv (Curtius, 2006).

Neznalost kompletního mechanismu nukleace je zapříčiněna skutečností, že přístroje jsou schopny detekovat částice od velikosti 3 – 5 nm. Kulmala et al. (2008) ve své studii zdůrazňuje důležitost existence shluků částic o velikosti menší než 1,5 nm, které jsou běžnou složkou atmosféry i v době, kdy nukleace neprobíhá. Tyto částice mohou vychytávat částice menší a narůstat na jejich úkor až do detekovatelné velikosti (3 nm) aniž by probíhala nukleace. Rozpoznání mechanismu, pomocí kterého částice rostou, tak zůstává jednou z klíčových otázek při studování vzniku nových částic.

1.3 Zdroje atmosférického aerosolu

Existuje velké množství zdrojů aerosolových částic – jednak jsou to zdroje přírodní dále antropogenní. Přírodními zdroji aerosolových částic jsou plyny

uvolňované při vulkanické činnosti nebo při rozkladu organismů, ze kterých se v atmosféře formují sekundární částice (sulfáty z biogenních zdrojů, sulfáty vulkanického původu, dusičnany z NO_x, organická hmota z biogenních těkavých organických látek). A potom již dříve zmíněný vulkanický prach, ^{mořská sůl} a bioaerosol jako přirozené zdroje primárních částic. Dle studie Jonesa a Harrisona (2006), prováděné ve Velké Británii, tvoří příspěvek přírodních zdrojů na produkci PM kolem 25 %. Antropogenním zdrojem je především průmyslová výroba, spalování fosilních paliv, spalování biomasy, ~~organické částice emitované při spalování uhlí,~~ zpracování kovů a rud a samozřejmě stále se zvyšující automobilová doprava (Davidson et al., 2005).

Podle lokalizace zdroje dále můžeme rozlišovat aerosol primární a sekundární. Primární aerosolové částice jsou emitovány do atmosféry přímo ze zdroje, zatímco sekundární aerosol vzniká chemickou reakcí plyných složek atmosféry. Vznik sekundárního aerosolu se často označuje jako konverze plyn-částice. Vznik sekundárního aerosolu v atmosféře ovlivňuje řada faktorů zahrnujících koncentraci prekurzorů, koncentraci dalších reaktivních plyných složek, jako je např. ozon, hydroxylový radikál, peroxidový radikál, atmosférické podmínky (relativní vlhkost, sluneční záření) a interakce mezi prekurzory a aerosolovými částicemi (EPA, 2004).

1.3.1 Mobilní zdroje aerosolových částic

Jak již bylo řečeno, představuje automobilová doprava významný zdroj aerosolových částic v ovzduší. Spalovací procesy v automobilech emitují především jemné částice. Kulmala et al. (2009) zkoumal ve své studii emise pocházející z diesellových motorů. Velikostní distribuce byla nejčastěji bimodální a velikost částic uvolňovaných z těchto motorů se pohybovala v rozmezí 30 – 50 nm. Studie Weimera et al. (2009) potvrdila předešlou studii, neboť zjistila, že dopravní emise produkují především částice o velikosti 30 nm.

Zdrojem velkého množství částic v dopravě jsou vedle vlastního spalování paliva v diesellových a benzínových motorech i emise v podobě vozovkového prachu, emise z otěru pneumatik a brzdových destiček. K dalším uvažovaným zdrojům částic vozovkového prachu lze přiřadit částice chemického (sůl) a inertního materiálu (písek, štěrk, struska) používaného pro posyp silnic v zimním období roku (CDV, 2006).

1.3.2 Stacionární zdroje - částice emitované při spalování

Spalování dřeva a uhlí v domácích topeništích je hlavním zdrojem částic pro většinu vesnic v Evropě během zimního období, neboť patří k tradičním způsobům vytápění.

Spalování je exotermický proces, jehož účelem je uvolnění energie chemicky vázané v palivu. Energie chemicky uložená v palivech je pak převedena na teplo a radiaci a využita různými způsoby. Za palivo se tak pokládají látky, při jejichž oxidaci se uvolňuje teplo. Můžeme je dělit podle skupenství na paliva tuhá, kapalná a plynná. Podle původu se dělí na přírodní a umělá a podle stáří na fosilní (vzniklé v dřívějších geologických dobách – uhlí, rašelina, ropa a zemní plyn) a recentní (vznikající v současnosti – dřevo a biomasa) (Stehlík, 2003).

Malá část paliva je vždy tvořena nehořlavou složkou formující částice. Při spalování uhlí je tato složka tvořena hlavně křemíkem, hliníkem a železem a tvoří částice o velikosti 0,5 – 50 μm . Zbytek vzniklý spalováním biomasy obsahuje prvky jako sodík, dusík, vápník a fosfor. Tyto odlišnosti spolu s dalšími vytvářejí jiné podmínky při spalování dřeva a uhlí. Formování jemných aerosolových částic je obvykle při spalování zahájeno vyprcháváním těkavých popelových látek a následuje proces nukleace (homogenní i heterogenní), kondenzace a koagulace během chlazení kouřových plynů (Boman, 2005).

Spalování dřeva představuje významný zdroj aerosolových částic (anorganického i organického původu), stejně jako je zdrojem nejrůznějšího komplexu směsi plynů, z nichž některé jsou známy jako potenciální karcinogenní látky – např. benzo(a)pyren. Tyto emise, které odrážejí vždy podmínky v dané oblasti, mohou významně ovlivnit kvalitu ovzduší během zimního období, kdy jsou velmi časté stabilní atmosférické podmínky, které zabraňují vertikálnímu rozptylu a dochází tak k jejich hromadění. Emise z domácího spalování dřeva jsou velmi proměnlivé a závisí na řadě faktorů, kterými jsou: typ dřeva, doba spalování, množství a složení dřeva. Samozřejmě množství spáleného dřeva se může měnit v závislosti na denní době a meteorologických podmínkách jako je teplota (Johansson et al., 2004).

1.4 Chemické složení

Většinu hmotnosti atmosférického aerosolu tvoří sulfáty, dusičnany, amonné ionty, organický materiál zemské kůry (částice půd, zvětralých hornin a minerálů), mořská voda, vodíkové ionty a voda. Přejídné kovy, sulfáty, dusičnany, amonné ionty, organický a elementární uhlík najdeme převážně v jemném aerosolu, zatímco materiál zemské kůry včetně křemíku, vápníku, hořčíku, hliníku, železa stejně jako některý bioaerosol (pyl, spory) tvoří většinu hmotnosti hrubého aerosolu. Dusičnany jsou součástí obou, pochází však z jiných zdrojů a nachází se v jiné formě. Dusičnany v jemném aerosolu jsou ve formě dusičnanu amonného, zatímco v hrubých částicích vzniká dusičnan jako produkt kondenzace par kyseliny dusičné na hrubých částicích (Holoubek et al., 2005). Podobně je na tom i draslík. Zatímco v hrubém aerosolu je jeho zdrojem půda, v jemném aerosolu spalování dřeva a vaření pokrmů (EPA, 2004).

V atmosférickém aerosolu najdeme běžně kolem 40 prvků. Jsou uvolňovány z desítek zdrojů – při spalování dřeva, uhlí, sváření kovů atd. Jejich koncentraci v aerosolu výrazně ovlivňují lokální zdroje. Obecně platí, že prvky jako olovo, železo a měď dosahují vyšších koncentrací, zatímco kobalt, rtuť a antimon koncentrací nižších. Prvky, které jsou do atmosféry emitovány při spalování, jsou obvykle v aerosolu obsaženy ve formě oxidů (Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , Al_2O_3), ale jejich chemická forma je nejistá (Pandis, Seinfeld, 2006).

1.5 Účinek aerosolů na lidské zdraví

V posledních několika letech bylo v mnoha epidemiologických a toxikologických studiích prokázáno, že aerosoly mají nesporně prokazatelný vliv na lidské zdraví. Studie se zaměřují především na děti, seniory a citlivé osoby a jsou uskutečňovány v místech s vysokou koncentrací obyvatelstva. Vznik zdravotních problémů závisí na řadě faktorů, kterými jsou koncentrace aerosolových částic v ovzduší, jejich velikost, chemické složení, doba expozice. Důležitou roli také hraje věk a citlivost zkoumaného jedince. Podle lékařů mají aerosolové částice v ovzduší jen v Evropě na svědomí asi 350 000 životů ročně (EEA, 2007).

Z hlediska hodnocení vlivu aerosolových částic na lidské zdraví byly zavedeny imisní limity pro částice PM_{10} a $\text{PM}_{2,5}$ (PM_x představuje soubor částic, kdy částice o aerodynamickém průměru $x\ \mu\text{m}$ jsou předřazeným zařízením separovány s účinností

právě 50 %). Problémem při stanovování imisních limitů je skutečnost, že negativní účinky se mohou projevit již při velmi nízkých koncentracích a přistupuje se tedy k aerosolu jako k látce karcinogenní s bezprahovým účinkem. Doporučené hodnoty světové zdravotnické organizace z roku 2005 jsou pro PM_{2.5}: 10 µg/m³ - roční průměr, 25 µg/m³ - denní průměr a pro PM₁₀: 20 µg/m³ - roční průměr, 50 µg/m³ - denní průměr. Několik studií vyhodnotilo zdravotní účinky spojené s expozicí právě těchto částic a výsledkem byl výskyt chorob dýchacího ústrojí, změny srdečního rytmu, infarkty a srdeční a plicní nemoci způsobující smrt (Davidson et al., 2005). *a další*

Velikost aerosolových částic je rozhodující pro průnik a ukládání v dýchacím traktu. Rozlišujeme tři velikostní frakce částic podle jejich schopnosti vstupovat a usazovat se v dýchacích cestách. Klasifikace rozlišuje částice podle klesající velikosti na: vdechovatelné, thorakální a respirabilní, což zhruba odpovídá záchytu částic v nosohltanu, průduškách a plicních sklípcích.

Zájem vědců se dnes obrací na submikronové částice, které jsou z hlediska jejich počtu velmi významné. Vzhledem k jejich malé velikosti snadno pronikají do alveolárních sklípků plic a způsobují zde řadu závažných zdravotních problémů (Englert, 2004). Studie Godleskiho et al. (2000) zjistila, že jemný aerosol (méně než 1 µm) vstupuje do krve a nepříznivě ovlivňuje srdce iniciací arytmie nebo způsobuje náhlou smrt u citlivých jedinců. Studie v Helsinkách zjistila, že zvýšené koncentrace jemného atmosférického aerosolu zvýší riziko ischemické choroby srdeční dva dny po expozici (Pekkanen et al., 2002).

2. Metodika

Experimentální práce zahrnovala měření koncentrací počtu a hmotnosti submikronového aerosolu, meteorologických údajů (teplota, směr a rychlost větru, relativní vlhkost a globální sluneční záření) a plyných polutantů (oxidů dusíku a ozonu) s integrační dobou pět minut.

Pro měření uvedených látek byly použity následující přístroje:

- NO, NO₂, NO_x byly stanoveny přístrojem APNA 360 (Horiba, Japonsko)
- O₃ byl stanoven přístrojem APOA – 360 (Horiba, Japonsko)
- Velikostní distribuce a koncentrace aerosolu byly stanoveny přístrojem SMPS-3936L25 (TSI) a hmotnostní koncentrace aerosolu velikostních frakcí PM_{2,5} a PM₁ laserovým fotometrem DustTrak 8520 (TSI)
- Meteorologické údaje o směru a rychlosti větru byly měřeny ultrazvukovým anemometrem Ultrasonic, teplota a vlhkost vzduchu byla zaznamenána teploměrem a vlhkoměrem (Commeter) a globální záření pyranometrem (výrobce Thies)

V průběhu měření byl také veden deník, do kterého jsem zaznamenávala všechny události, které by mohly ovlivnit velikostní distribuci submikronového aerosolu v obci. Jednalo se především o zaznamenání kouře pocházejícího z lokálního vytápění, nastartovaná vozidla v okolí, zvýšený průjezd vozidel ve večerních hodinách, sváření apod.

2.1 Popis lokality

Měřicí kampaň se uskutečnila v obci Mokré (50°15'43''s.š., 16°3'56'' v.d.) ve dnech 24.1.2008 – 7.2.2008. Tato obec se nachází v Královéhradeckém kraji na úpatí Orlických hor, 4 km od města Opočno a 2 km od Českého Meziříčí, v nadmořské výšce 262 m n. m a svým katastrálním územím zaujímá rozlohu 589 ha. Na levém břehu obci obklopují pole a lesy a na pravém břehu louky a pole. V obci je postaveno 74 domů, z toho asi 50 trvale obydlených, zbytek je využíván k rekreaci chalupáři (mapová příloha I a II). Žije zde 160 obyvatel (81 mužů, 79 žen). Z šetření prováděného v roce 2007 za účelem zjištění způsobu vytápění byly zjištěny následující údaje:

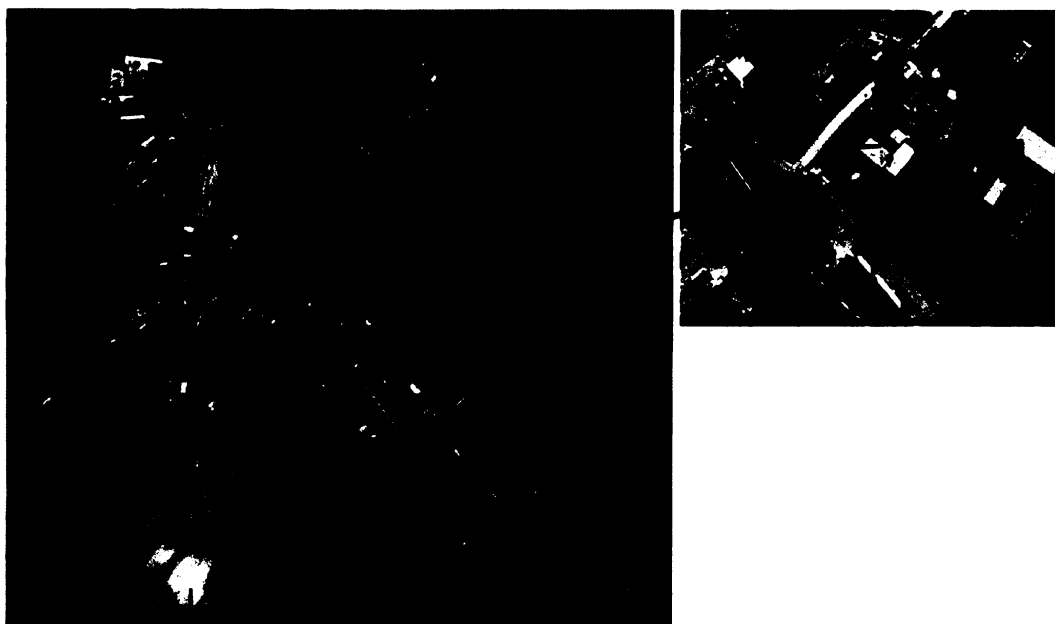
- 31 % obyvatel používá k vytápění dřevo,
- 18 % elektřinu,

- 18 % uhlí
- 17 % topí kombinací dřeva a uhlí,
- 16 % používá plyn.

V blízkosti obce se nenachází žádný významný bodový zdroj znečištění. Obcí prochází místní silnice o délce 2 km, která však není významným liniovým zdrojem znečištění. Z pozorování bylo zjištěno, že maximum aut - 35 aut.hod⁻¹ bylo v době mezi pátou a šestou hodinou večerní, kdy se lidé vrací z práce, jinak se hodnoty pohybovaly kolem 15 aut.hod⁻¹. 6krát denně v týdnu projíždí obcí linkový autobus. Nedaleko obce se nachází železniční trať směrem do Opočna pro osobní a nákladní vlaky. Mezi nejbližší velké zdroje znečištění evidované v REZZO 1 v Královéhradeckém kraji patří velkokapacitní výkrm brojlerů (farma Opočno), Centrální zdroj tepla Dobruška a.s., KBA-Grafitec s.r.o. (Dobruška), Bohemik a.s. (Opočno) a Cukrovar v Českém Meziříčí.

2.2 Odběr vzorku

Přístroje pro měření velikostní distribuce a koncentrace submikronového aerosolu a koncentrace NO, NO₂ a O₃ byly umístěny na půdě rodinného domu a ústí vzorkovací hlavy mělo vstup ve výšce cca 8 m nad zemí a ve vzdálenosti asi 2 m od zdi. Přístroj na měření meteorologických údajů (směr a rychlost větru, teplota, relativní vlhkost) a přístroj DustTrak byly umístěny v nedaleké blízkosti na ploché střeše v přibližně stejné výšce. Nejbližší silnice je vzdálena asi 30 m, ale z důvodů uvedených výše ji nelze považovat za významný liniový zdroj znečištění (obr. 1).



Obr. 1 Mapa obce s vyznačením místa odběru vzorku

(Zdroj: Google Earth)

2.3 Měření velikostní distribuce aerosolu

Měření velikostní distribuce aerosolu bylo prováděno přístrojem SMPS-3936L25, v pětiminutových intervalech pro velikostní frakci 14,6 – 736,5 nm. (128 kanálů)
Přístroj SMPS (obr. 2) – Scanning mobility particle sizer se skládá ze dvou hlavních částí:

1. elektrostatického klasifikátoru (EC)
2. kondenzačního čítače částic (UCPC)

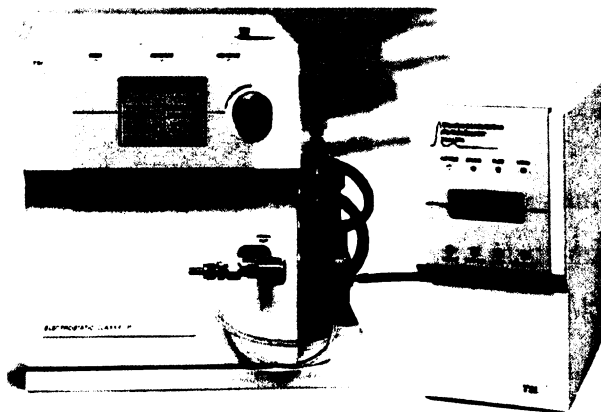
Vzorek aerosolu nejprve prochází jednostupňovým impaktorem, kde dojde k odstranění částic zhruba větších než 1 μm . Poté prochází neutralizátorem (zdroj β -záření), kde dochází k nabití aerosolu do Boltzmanovy rovnováhy. Takto upravený vzorek pak vstupuje do diferenčního analyzátoru pohyblivosti (DMA), kde dochází k separaci na základě velikostně-selektivního průchodu standardně nabitého aerosolu řízeným elektrickým polem. Aerosolové částice jsou zde separovány na základě jejich odlišné pohyblivosti v elektrickém poli. DMA je tvořen dvěma válci: vnitřní a vnější elektrodou. Vnější válec je uzemněný a uprostřed je vnitřní elektroda, na kterou se vkládá elektrické napětí 10 V – 20 kV a uvnitř dochází ke vzniku elektrického pole. Částice s kladným nábojem jsou odpuzovány a usazují se na stěnu vnější elektrody, zatímco záporně nabitě částice jsou přitahovány k vnitřní elektrodě a odchází z přístroje do kondenzačního čítače částic. Aby bylo možno tímto způsobem stanovit velikostní distribuci, je důležité zajistit laminární proudění vzduchu. Během měření byl nastaven



a kontrolován průtok impaktorem na 0,3 l/min, celým přístrojem pak průtok 3 l/min (poměr 1:10 kvůli zachování laminárního proudění). DMA pracoval v průběhu měření při teplotě okolní atmosféry a nedocházelo tak k vysoušení vzorku aerosolu.

Velikostně separované aerosolové částice jsou následně počítány v kondenzačním čítači částic (UCPC). Zde jsou částice bez rozdílu velikosti nejprve zvětšeny kondenzací přesycených par butanolu na velikost cca 10 μm . Poté jsou jednotlivě počítány na základě rozptylu světla z laseru. Zjištěná data byla ukládána v programu Aerosol Instrument Manager. Před exportováním dat z přístroje do ostatních programů byla korigována na difuzní ztráty a na násobný náboj částic.

Data byla následně zpracována pomocí programu CoStat a CoPlot (produkty společnosti Cohort software) a za použití programu MS Excel.



Obr. 2 Přístroj SMPS – elektrostatický klasifikátor a vlevo kondenzační čítač částic

(Zdroj: TSI)

K měření hmotnostní koncentrace frakce PM_{10} a $\text{PM}_{2,5}$ byl použit přístroj DustTrak (Model 8520) firmy TSI. Je to laserový fotometr, ve kterém je hmotnostní koncentrace stanovována na základě rozptylu koherentního infračerveného záření produkovaného laserovou diodou na částicích. Úhel mezi laserovým paprskem a zaznamenávaným rozptýleným světlem je 90 stupňů. Průtok vzduchu byl na základě doporučení výrobce nastaven na 1,7 l/min. Během měření byl přístroj umístěn ve speciálním ochranném pouzdru – obal je vodotěsný a mezi vnější nasávací trubicí a vstupem do přístroje je umístěna nádobka pro zachycení případných dešťových srážek. Při měření frakcí PM_{10} a $\text{PM}_{2,5}$ byla na přístroj umístěna impakční destička, na kterou se nanáší speciální mazivo a dochází zde k záchytu částic, které jsou větší než měřená aerosolová frakce. Naměřené hodnoty byly ukládány do paměti přístroje v intervalu

pěti minut. Následně pak byly zpracovány v programu TrakPro, společnosti TSI, dále byly využity programy CoStat ,CoPlot a MS Excel.

2.4 Měření plynných polutantů

Přístroj APNA – 360, Horiba monitoruje koncentraci NO, NO₂ a NO_x s využitím cross-flow modulace měřeného vzorku, to znamená, že se střídavě měří 0 / vzorek s frekvencí 1 s chemiluminiscenční metodou. Při chemoluminiscenčním principu se využívá reakce NO s ozonem.



V reakci 2 dochází k excitaci molekul dusíku ozonem. Při přechodu molekul z excitovaného do základního energetického stavu (3) dochází k uvolnění záření ve formě chemiluminiscence, které je detekováno fotonásobičem (detekce v rozmezí 600 nm – 3000 nm). Intenzita chemiluminiscence je úměrná koncentraci NO. Pro zjištění koncentrace NO_x je konvektorem redukován NO₂ na NO. Koncentrace NO₂ je pak přístrojem dopočítána z rozdílu NO_x – NO. Během měření byly ukládány pětiminutové koncentrace v μg/m³.

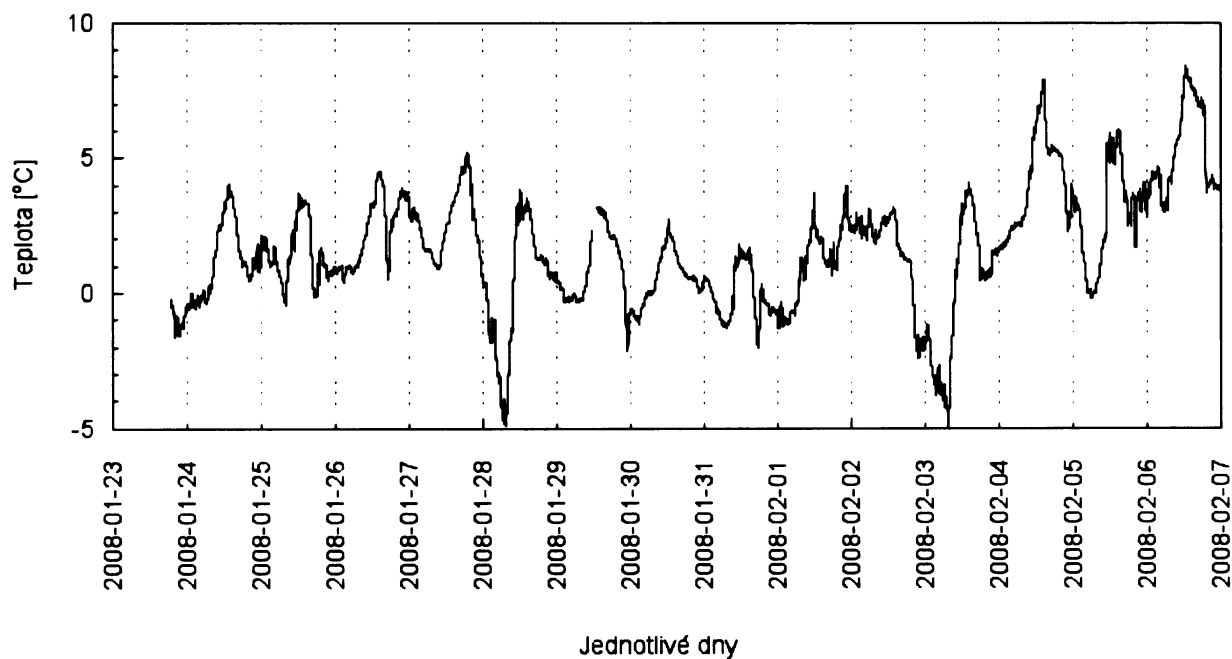
Pro zjištění koncentrace ozonu byl použit přístroj APOA – 360, Horiba. Tento přístroj využívá metodu ultrafialové absorpční spektrofotometrie. Metoda spočívá v absorpci záření o vlnové délce 254 nm ozonem přítomným v analyzovaném vzorku. Opět byly zjišťovány pětiminutové koncentrace v μg/m³.

Kalibrace přístrojů pro měření plynných polutantů je prováděna cca 1x ročně.

3. Výsledky

Cílem zadané práce je zjištění velikostní distribuce submikronového aerosolu v ovzduší malého sídla během zimního období a snaha odhadnout procesy a zdroje, které se na ní podílejí. Během kampaně byly zjišťovány jednak velikostní distribuce četnosti a hmotnosti aerosolových částic, dále meteorologické parametry a zároveň s tím se zaznamenávaly koncentrace oxidů dusíku a ozonu, to vše vždy v pětiminutových intervalech. Účelem nastavení této krátké měřicí periody byla snaha odhalit denní chod. Dne 24.1.2008 se započalo s měřením v 10:30 hod a dne 7.2.2008 bylo měření ukončeno v 9:15 hod. Dne 1.2.2008 došlo k výpadku měření v důsledku vypnutí přídavného počítače u přístroje SMPS v čase 1:25 – 7:25 hod a 19:05 – 19:20 hod, stejně tak pak dne 3.2.2008 v čase 8:30 – 15:30 hod. Měření meteorologických parametrů bylo přerušeno dne 29.1.2008 v čase 11:45 – 13:20 hod. V ideálním případě bylo během dne naměřeno 288 hodnot na 128 kanálech.

Průběh teploty během měření ukazuje graf na obrázku 3. Teplota se nejčastěji pohybovala v rozmezí -1 – +5 °C. Pouze ve dvou dnech (28.1. a 3.2.) klesla teplota až k -5 °C. Naopak maximální teplota (8,4 °C) byla naměřena dne 6.2.2008. Medián teploty byl za sledované období 1,5 °C. Tyto a další popisné charakteristiky jsou uvedeny v tabulce 1.



Obr. 3 Průběh teploty během měřicí kampaně

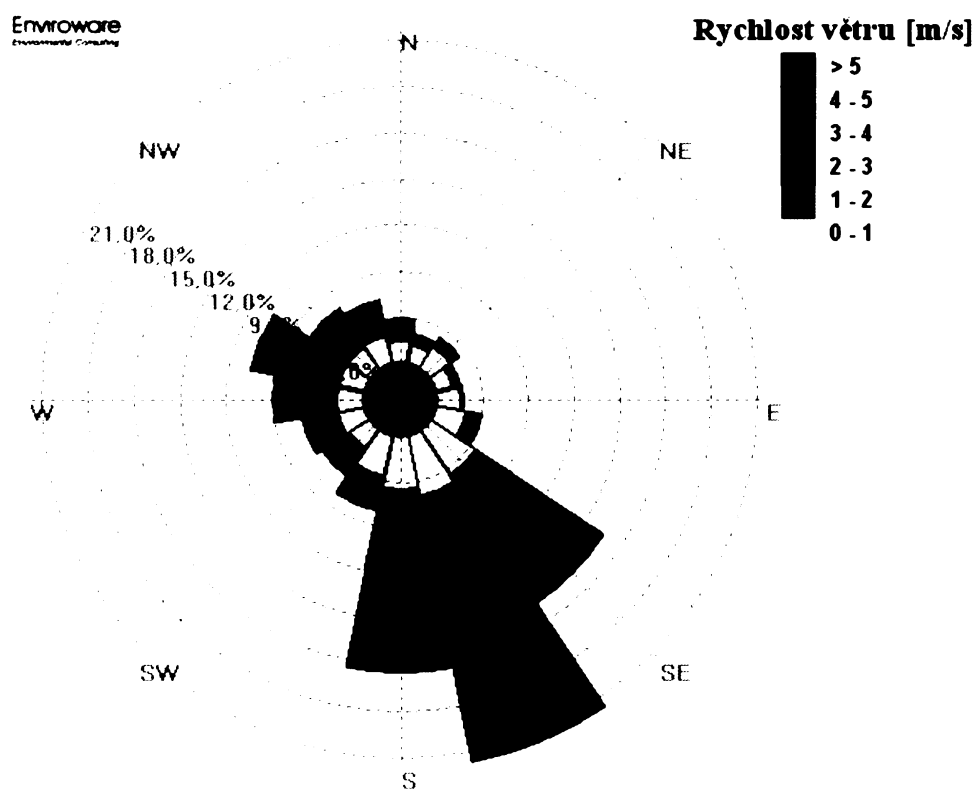
Tabulka 1. Základní statistické charakteristiky teploty

	Ar. průměr	Směr. odchylka	Min	Medián	Max	Mod	Počet hodnot
Teplota [°C]	1,5	1	-5	1,5	8,4	1,2	4174

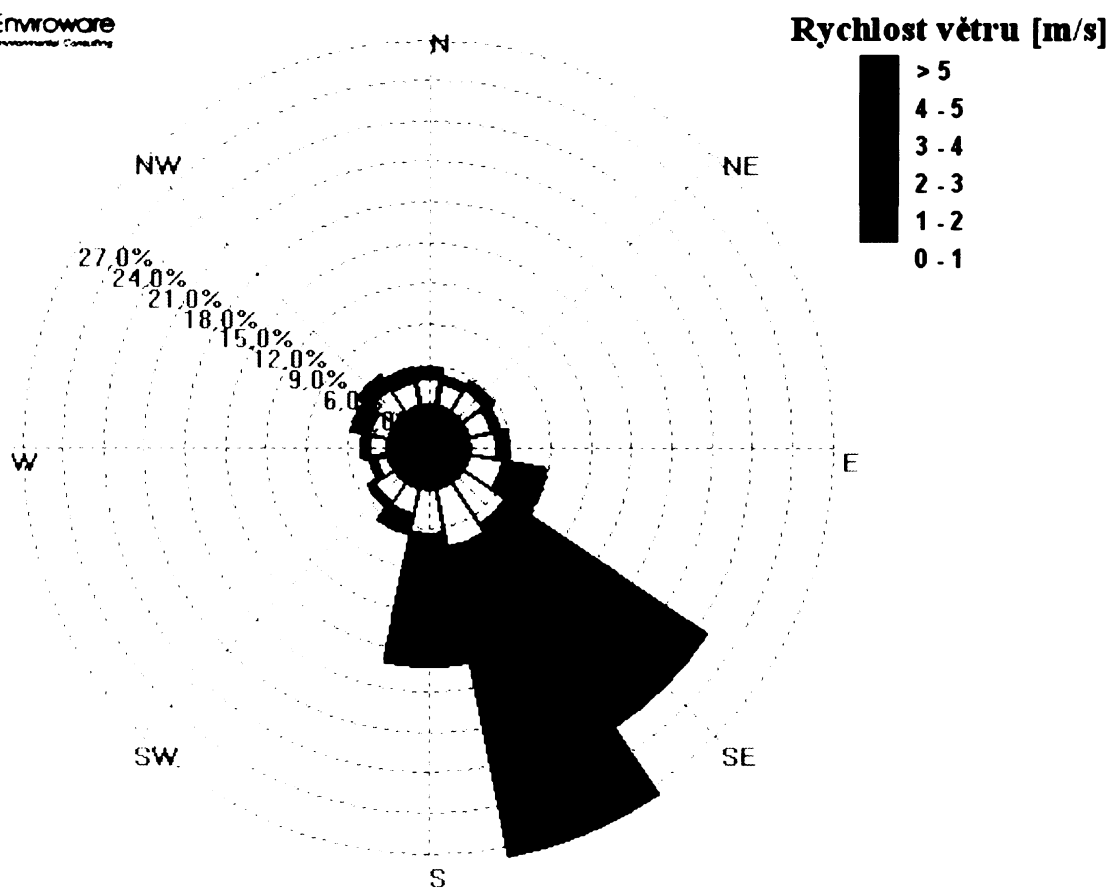
Směr a rychlost větru

Pomocí programu Wind Rose byla vytvořena větrná růžice znázorňující směr a rychlost větru (obr. 4). Během kampaně převládá jihovýchodní až jižní vítr - při směru větru 158° to bylo v 22 % případů, při jižním směru 180° v 15 % a při jihozápadním směru větru 135° ve 14 % případů.

Tyto zjištěné hodnoty lze považovat za charakteristické pro danou oblast neboť měření prováděné od 21.12.2007 až do začátku kampaně mělo podobné rozložení (obr. 5). Před začátkem kampaně převládá jihovýchodní až jižní vítr: směr větru 158° – 28 % případů, směr větru 135° – 22 %, směr větru 180° - 13 % případů. Větrnou růžici, která byla umístěna do místa odběru v obci, ukazuje mapová příloha III.



Obr. 4 Větrná růžice znázorňující směr a rychlost větru (N – sever, NE – severovýchod, E – východ, SE – jihovýchod, S – jih, SW – jihozápad, W – západ, NW – severozápad)

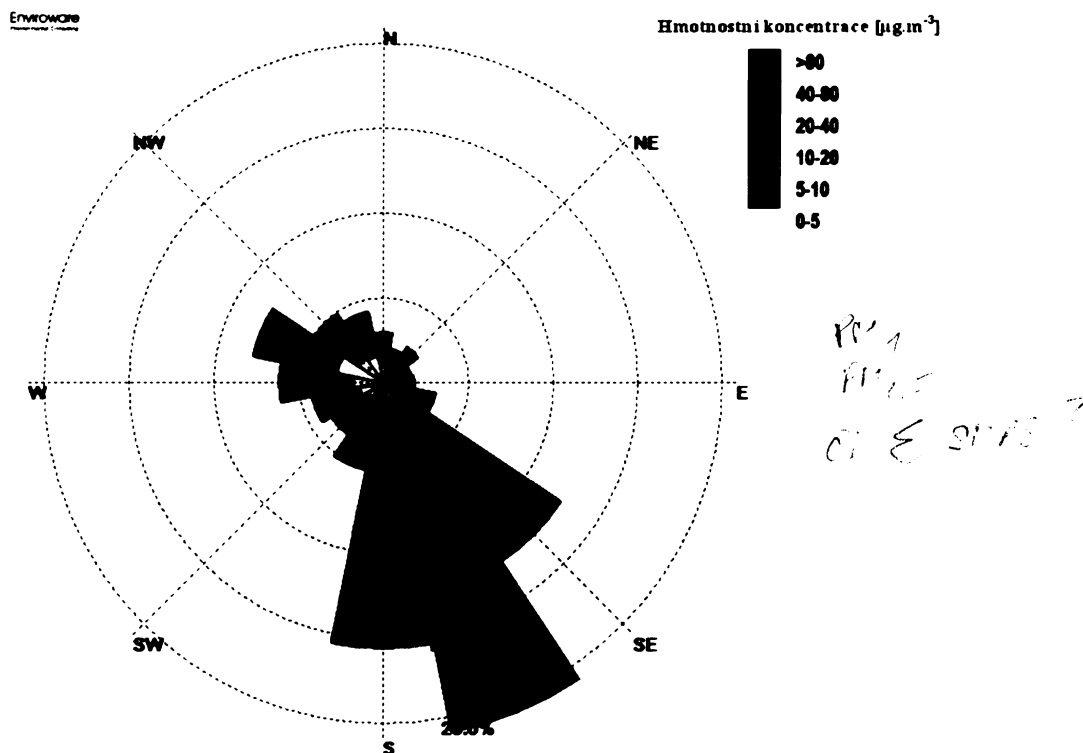


Obr. 5 Větrná růžice znázorňující směr a rychlost větru před kampaní.

Tabulka 2 ukazuje procentuální zastoupení jednotlivých rychlostí.

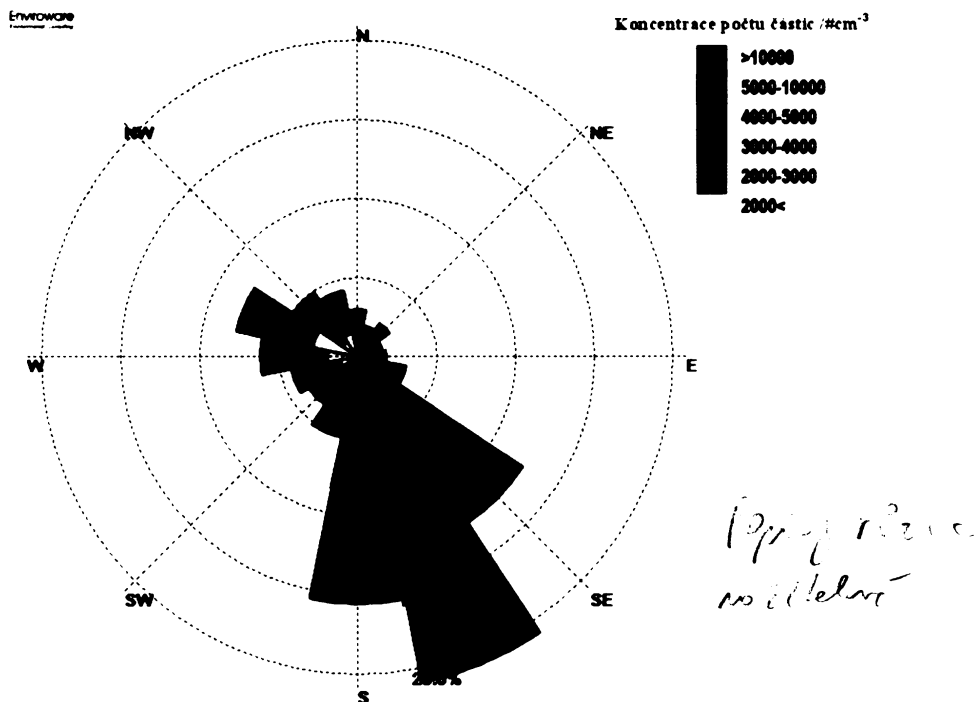
Rychlost větru [m/s]	Procenta výskytu %
0 – 1	33
1 – 2	26
2 – 3	15
3 – 4	11
4 – 5	7
≥ 5	8

Větrná růžice znázorňující hmotnostní koncentraci během celé kampaně v závislosti na směru větru je znázorněna na obr. 6. Je z ní patrné, že největší hmotnostní koncentrace jsou měřeny při jihovýchodním směru větru.



Obr. 6 Růžice znázorňující hmotností koncentraci v závislosti na směru větru

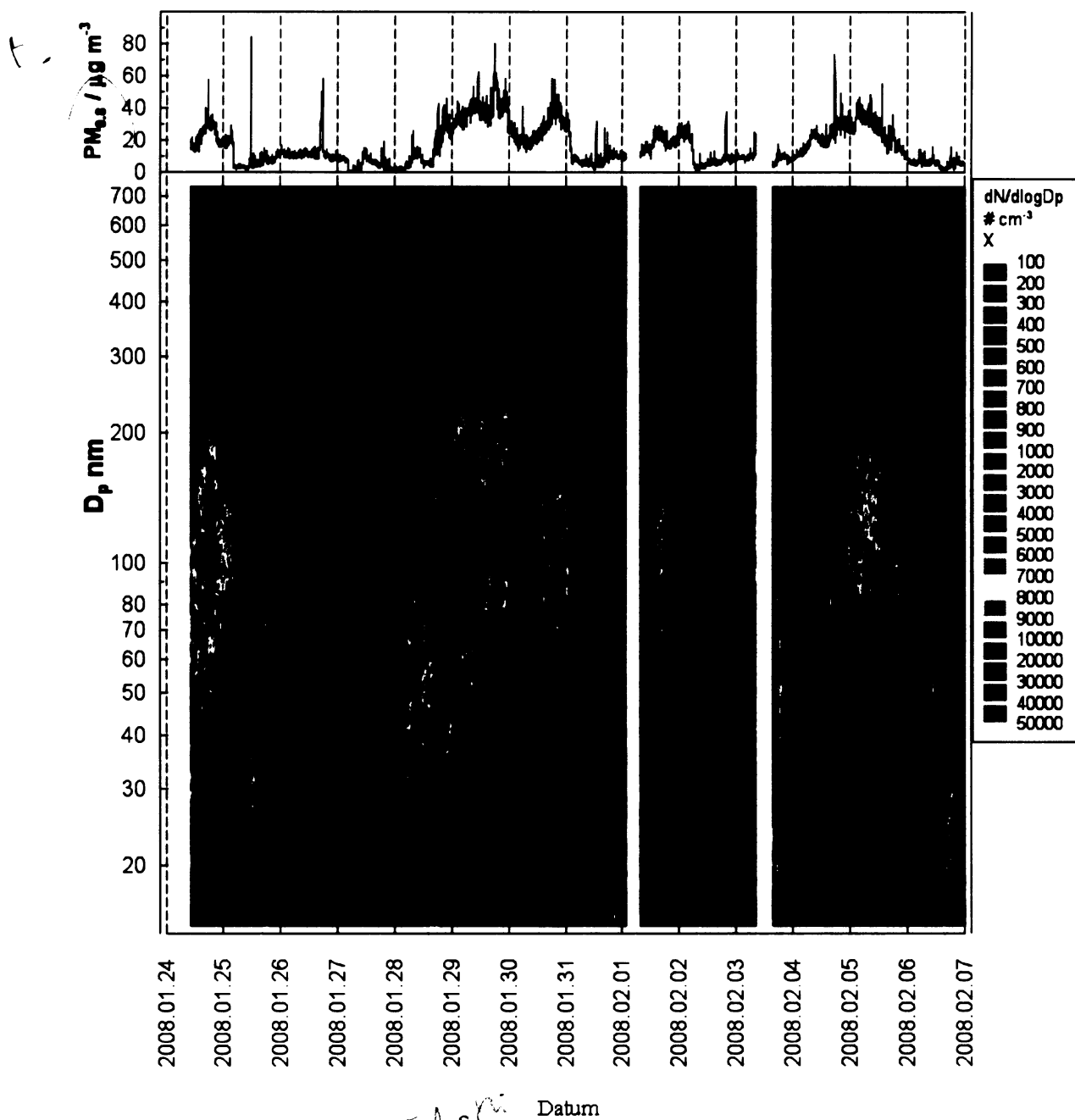
Podobně je tomu u větrné růžice znázorňující celkovou koncentraci počtu submikronového aerosolu v závislosti na směru větru (obr. 7). Ovzduší je z hlediska zdrojů víceméně homogenní.



Obr. 7 Růžice znázorňující koncentraci počtu částic v závislosti na směru větru

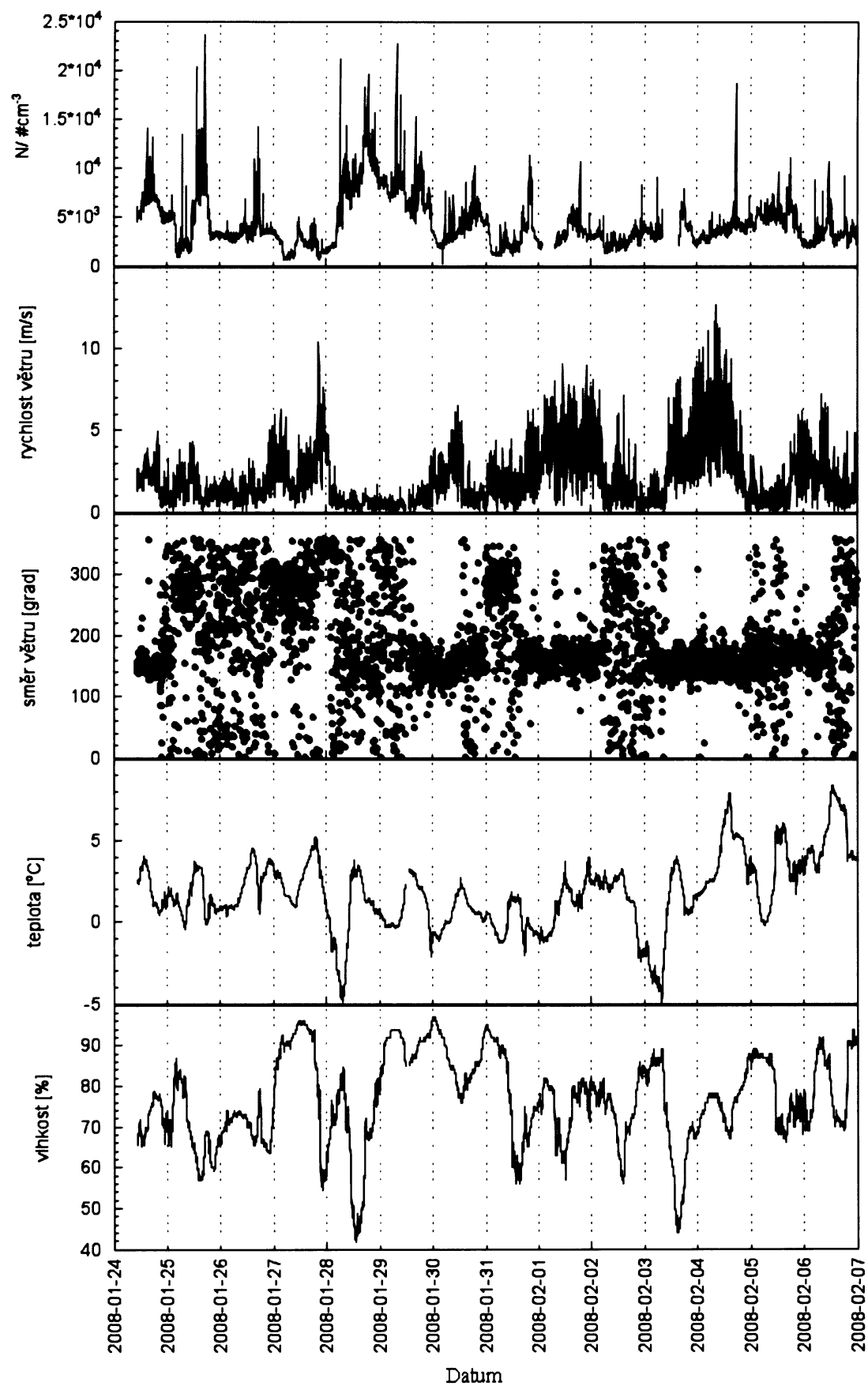
21.01.08

Velikostní distribuci počtu submikronového aerosolu společně s uvedením hmotnostní koncentrace během celé měřicí kampaně znázorňuje obrázek 8.

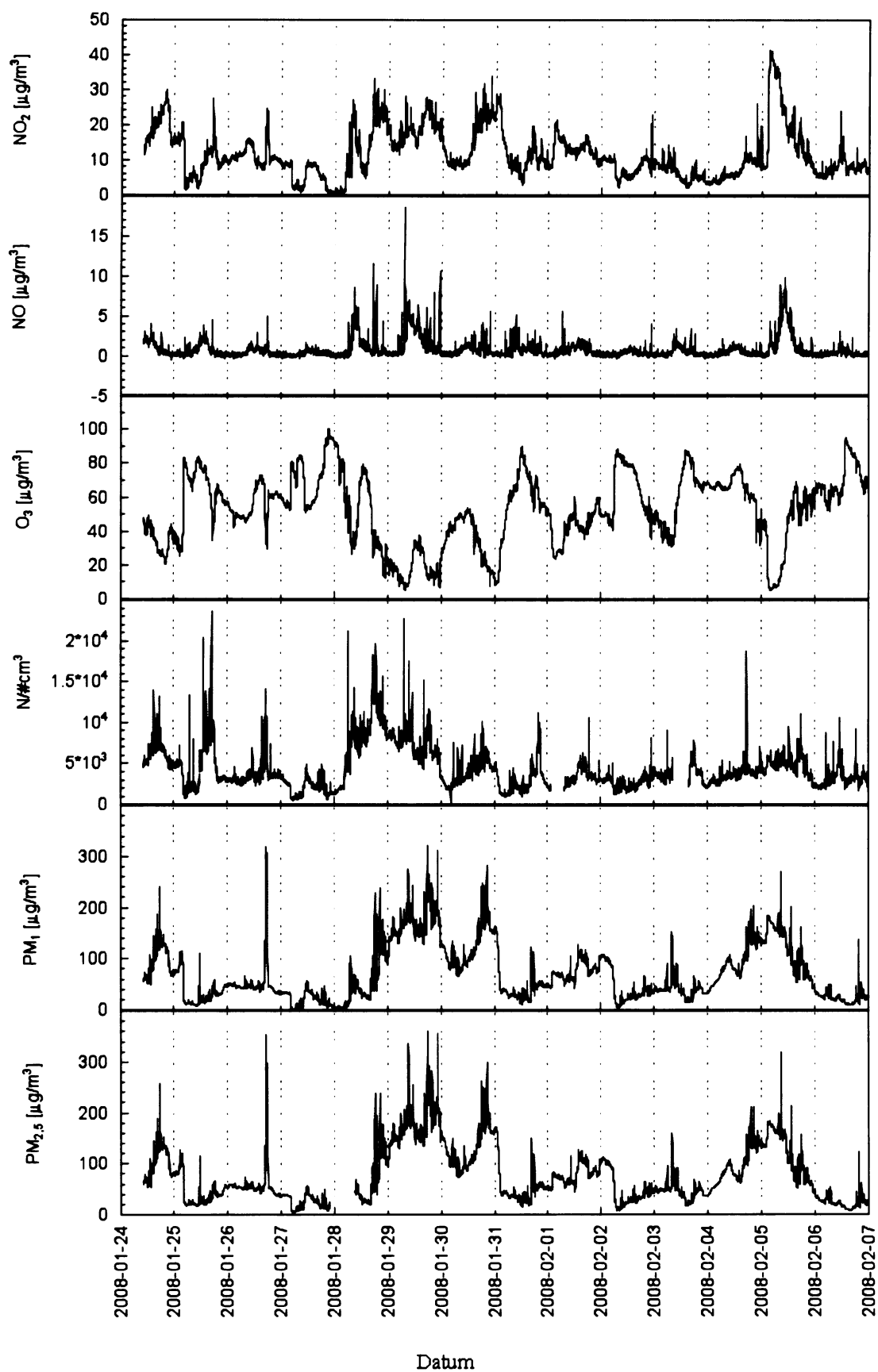


Obr. 8 Mapa velikostní distribuce a graf hmotnostní koncentrace submikronového aerosolu

Celkový průběh jednotlivých meteorologických parametrů za celou měřicí kampaně společně s koncentrací počtu částic ukazuje obrázek 9. Následující obrázek 10 pak ukazuje hmotnostní koncentraci PM_1 a $PM_{2,5}$ společně s koncentrací počtu částic a naměřenými koncentracemi NO , NO_2 a O_3 .



Obr. 9 Graf průběhů meteorologických parametrů a koncentrace počtu částic



Obr. 10 Graf znázorňující průběh plynných polutantů a koncentrace počtu částic a hmotnostních koncentrací PM₁ a PM_{2,5} za celou kampaň

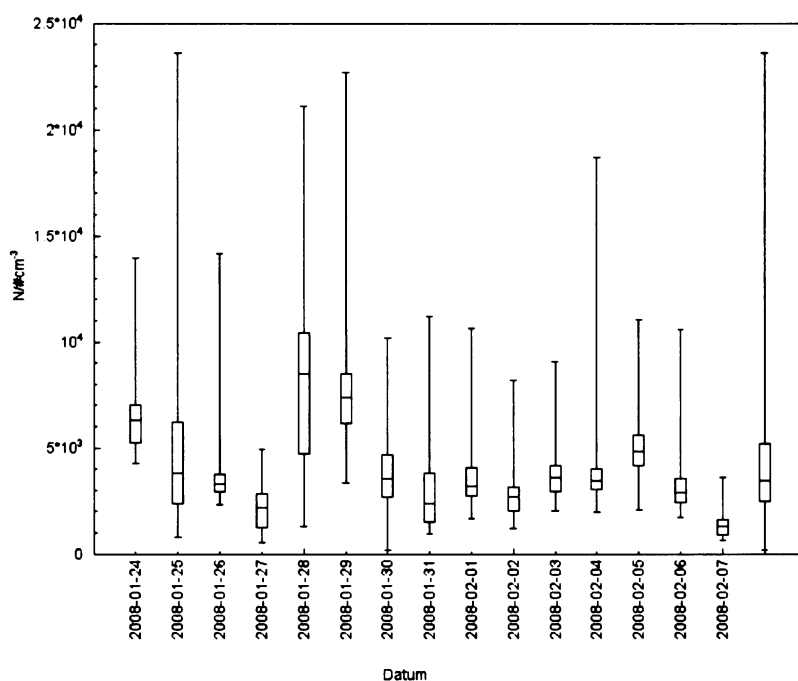
Průměrná koncentrace počtu částic byla $4\,242 \text{ \#/cm}^3$. Medián počtu částic byl $3\,472 \text{ \#/cm}^3$. Průměrná hmotnostní koncentrace za celou měřicí kampaň byla $16,2 \text{ \mu g/m}^3$ a medián byl $11,9 \text{ \mu g/m}^3$. Ostatní statistické popisné charakteristiky za celou měřicí kampaň jsou uvedeny v následující tabulce 3, v tabulkové příloze I a II jsou pak tyto charakteristiky zvlášť pro jednotlivé dny.

Tab. 3 Statistické charakteristiky koncentrace submikronového aerosolu za celou měřicí kampaň

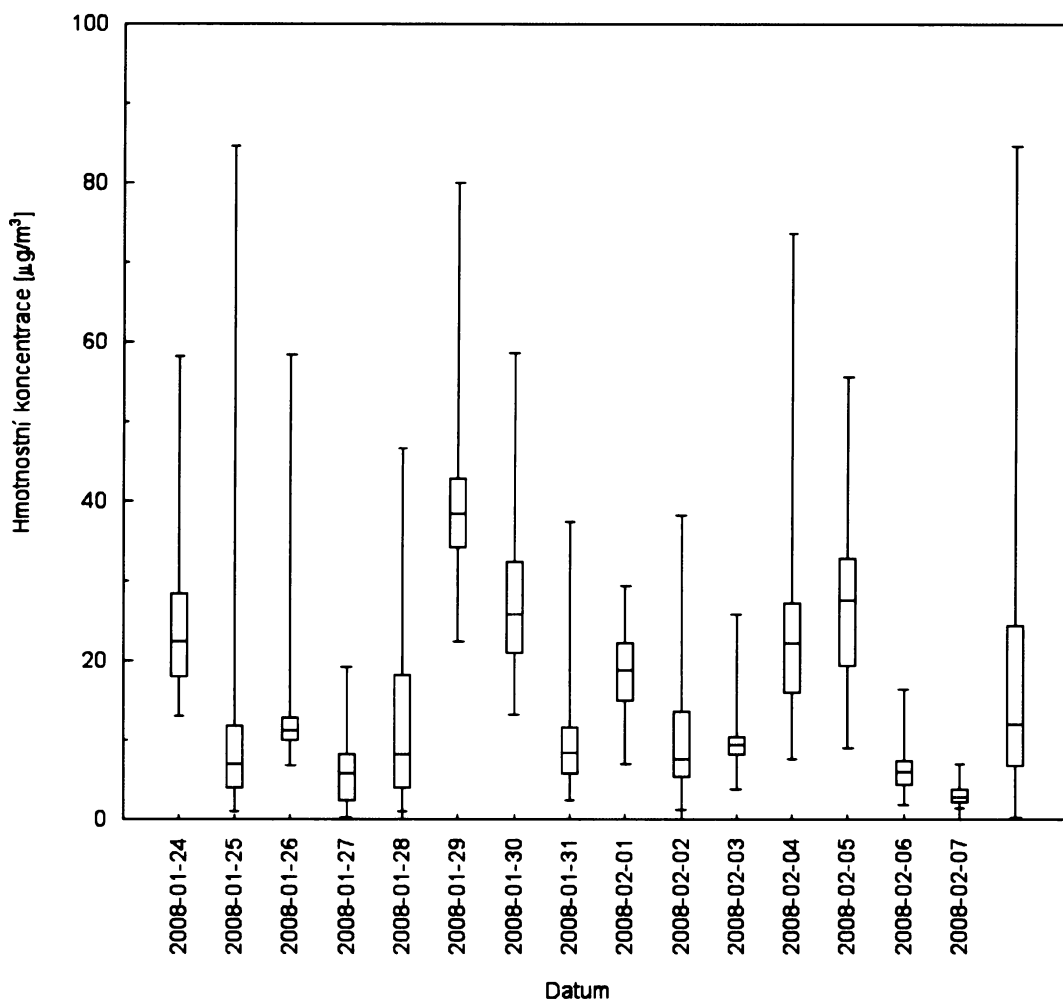
Tabulka 3 - příloha I a II

	Ar. průměr	Směr. odchylka	Medián	Max	Min	Q ₁ (25%)	Q ₃ (75%)	Počet měření
Koncentrace počtu částic \#/cm^3	4242	1009	3472	23598,9	187,7	2490	5194	3854
Hmotnostní koncentrace \mu g/m^3	16,2	12,2	11,9	84,6	0,18	6,7	24,4	3854

Pro názornější vyhodnocení koncentrace hmotnosti a počtu částic byly pro jednotlivé dny vytvořeny krabicové diagramy (obr. 11, 12), kde umístění dvou protilehlých stran je určeno hodnotami kvartilů Q₁ a Q₃, střední příčka je na úrovni mediánu. Vzdálenost stran obdélníku tedy odpovídá kvartilovému rozpětí. Tykadla, která vybíhají ven z obdélníku, sahají k maximum a minimum. Poslední krabicový diagram je průměrný krabicový diagram za celou měřicí kampaň vytvořený z výše uvedené tabulky (tab. 3).



Obr. 11 Krabicové diagramy celkové koncentrace počtu částic v jednotlivých dnech kampaně

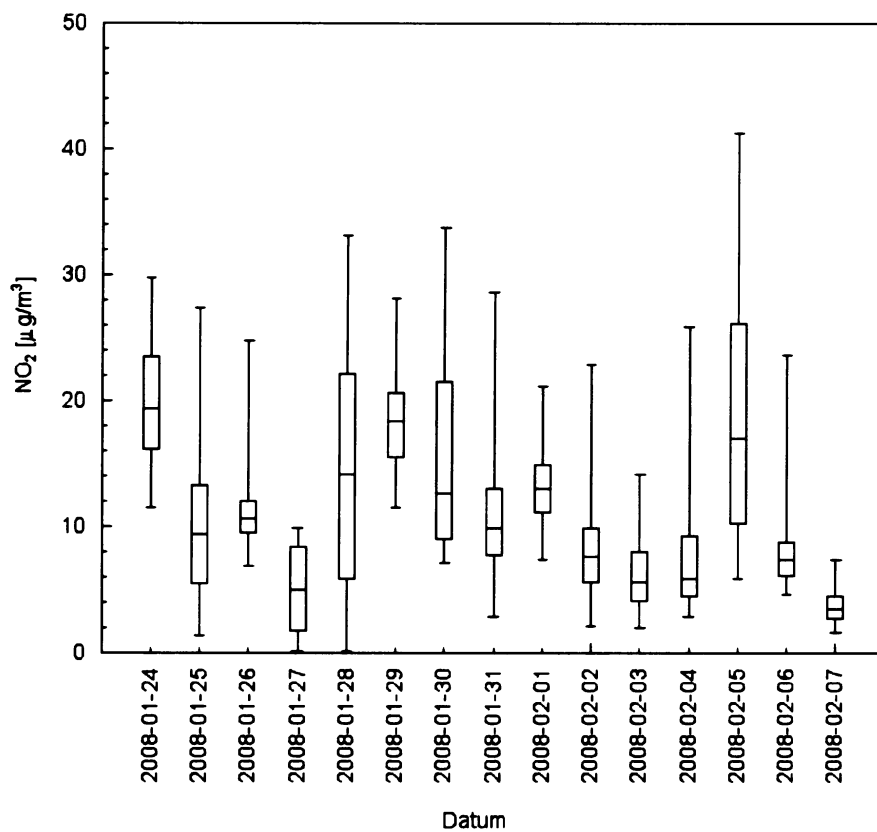


Obr. 12 Krabicové diagramy celkové hmotnostní koncentrace $PM_{0,8}$ v jednotlivých dnech kampaně

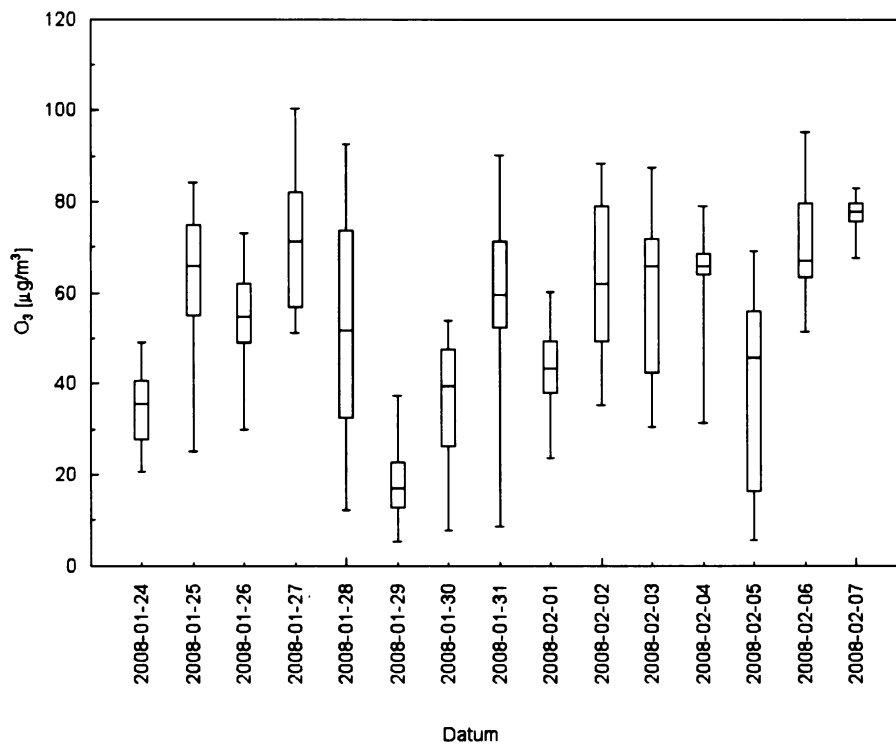
Tabulka 4 ukazuje základní statistické údaje pro koncentraci NO , NO_2 a O_3 během celé měřicí kampaně. Medián koncentrace NO_2 byl $9,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, NO byl $0,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a medián O_3 $54,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Pro názornější představu byly opět vytvořeny krabicové diagramy pro NO_2 a O_3 (obr. 13, 14). Popisné statistické údaje těchto látek v jednotlivých dnech jsou uvedeny v tabulkové příloze III a IV.

Tab. 4 Statistické údaje pro koncentraci NO , NO_2 a O_3 za celou měřicí kampaň

	Ar. průměr	Směr. odchylka	Medián	Min	Max	Q1 (25%)	Q3 (75%)	Počet měření
NO_2 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	11,3	7,2	9,5	0,03	41,2	6,4	15,1	4010
NO [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	0,8	1,3	0,4	0,49	18,6	0,15	0,95	4010
O_3 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	53,1	21,2	54,8	5,38	100,3	39,1	68,5	4010

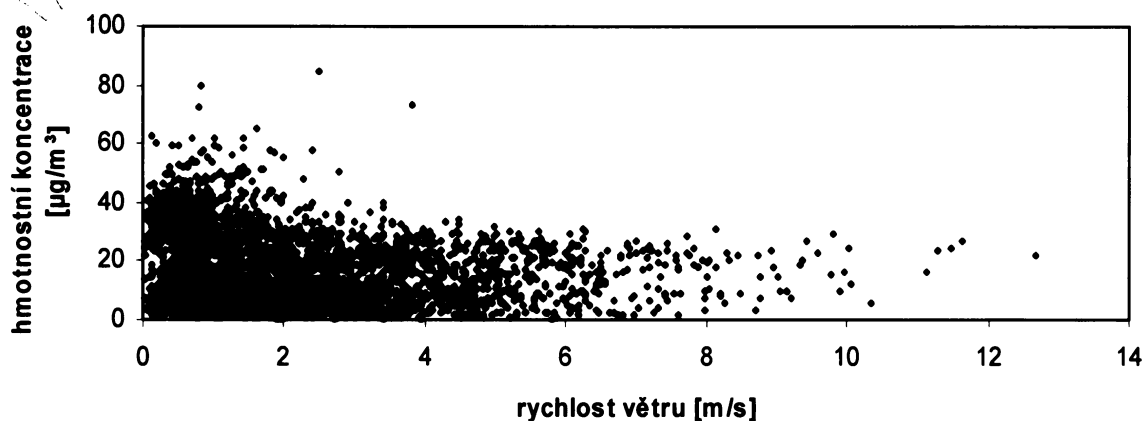
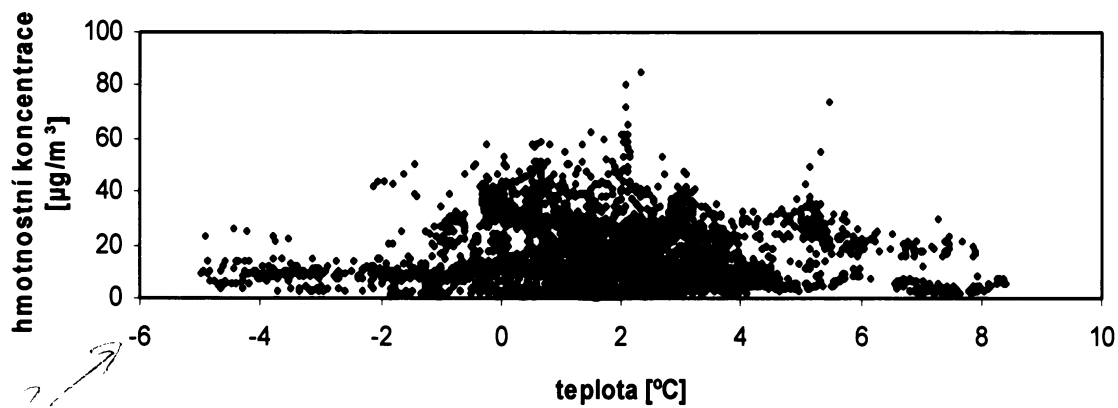


Obr. 13 Krabicové diagramy hmotnostní koncentrace NO₂ v jednotlivých dnech kampaně

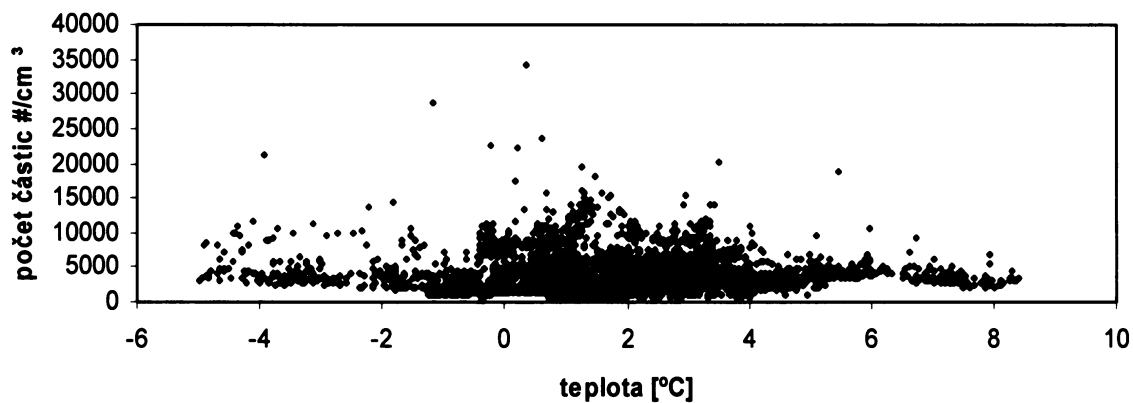


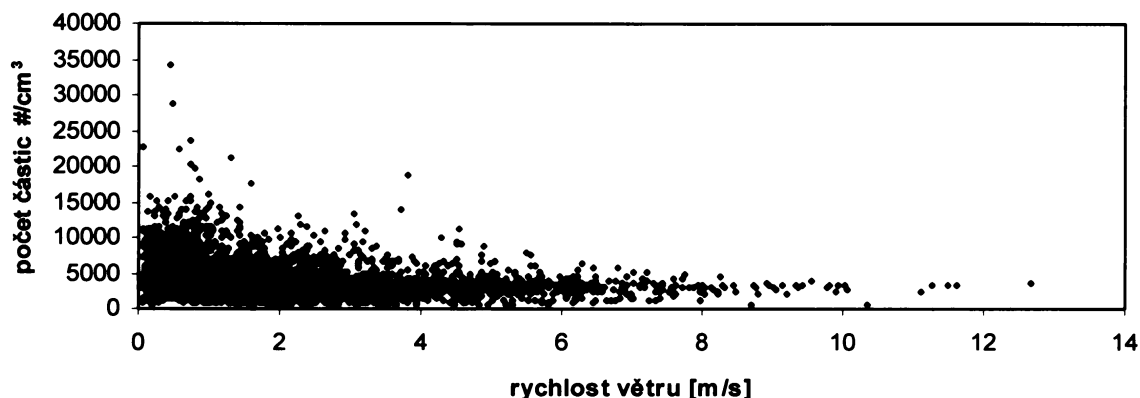
Obr. 14 Krabicové diagramy hmotnostní koncentrace O₃ v jednotlivých dnech kampaně

Pro zjištění možného vlivu meteorologických podmínek (především rychlosti větru a teploty) na hmotnostní koncentraci (obr. 15) a koncentraci počtu částic (obr. 16) byly vytvořeny bodové grafy.



Obr. 15 Vliv meteorologických podmínek na hmotnostní koncentraci submikronových částic





Obr. 16 Vliv meteorologických podmínek na koncentraci počtu submikronových částic

K testování možného vlivu meteorologických podmínek na koncentraci počtu částic a hmotnostní koncentraci byl použit Spearmanův korelační koeficient. Nulová hypotéza tvrdí, že testované veličiny jsou navzájem nezávislé. Nulovou hypotézu (H_0) zamítáme, je-li p-hodnota $\leq \alpha$, kde p-hodnota je nejmenší α , při kterém H_0 z daných dat ještě zamítáme a α je maximální přípustná pravděpodobnost chyby 1. druhu (zpravidla se udává 0,05, tj. 5 %). P-hodnota byla spočítána pomocí programu R a její hodnoty jsou uvedeny v tab. 5.

Tab. 5 Spearmanovy korelační koeficienty

	p-hodnota Koncentrace počtu částic	p-hodnota Hmotnostní koncentrace
Rychlost větru	$2,1 e^{-16}$	$5,34e^{-13}$
Teplota	0,7062	$5,92e^{-9}$

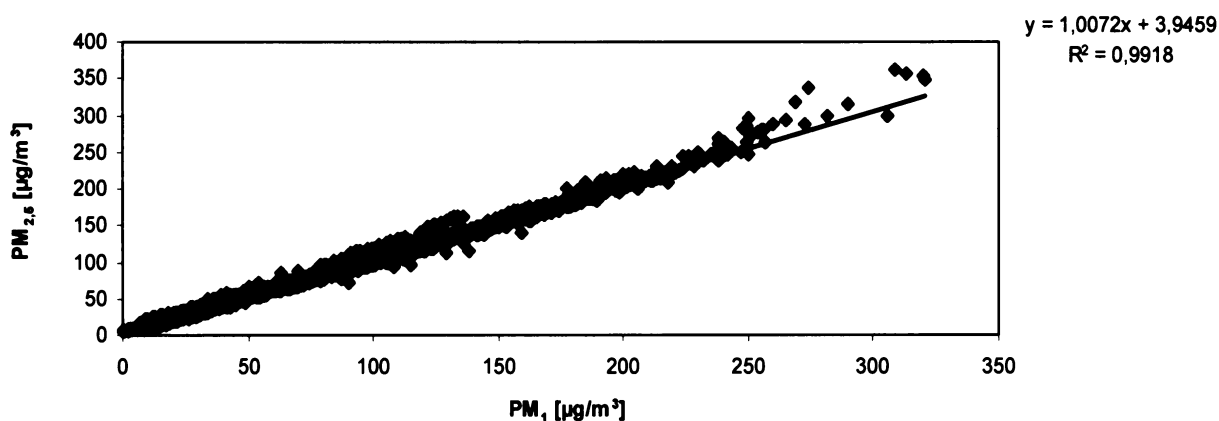
Ze zjištěných hodnot vyplývá, že při zvolení $\alpha = 5 \%$, zamítáme u všech zjišťovaných veličin krom jedné nulovou hypotézu, tudíž sledované veličiny jsou na sobě při 5 % hladině testu závislé. Jedinou výjimku tvoří koncentrace počtu částic v závislosti na teplotě, kde p-hodnota vyšla vyšší než 5 % a z tohoto důvodu nelze zamítnout nulovou hypotézu o nezávislosti studovaných veličin.

Tabulka 6 ukazuje korelační koeficienty mezi meteorologickými podmínkami a koncentracemi počtu částic a jejich hmotností během celé měřicí kampaně. Zatímco meteorologické parametry versus koncentrace vykazují slabou lineární klesající závislost, je zde patrná pozitivní korelace mezi koncentrací počtu částic a hmotnostní koncentrací ($R^2 = 0,63$).

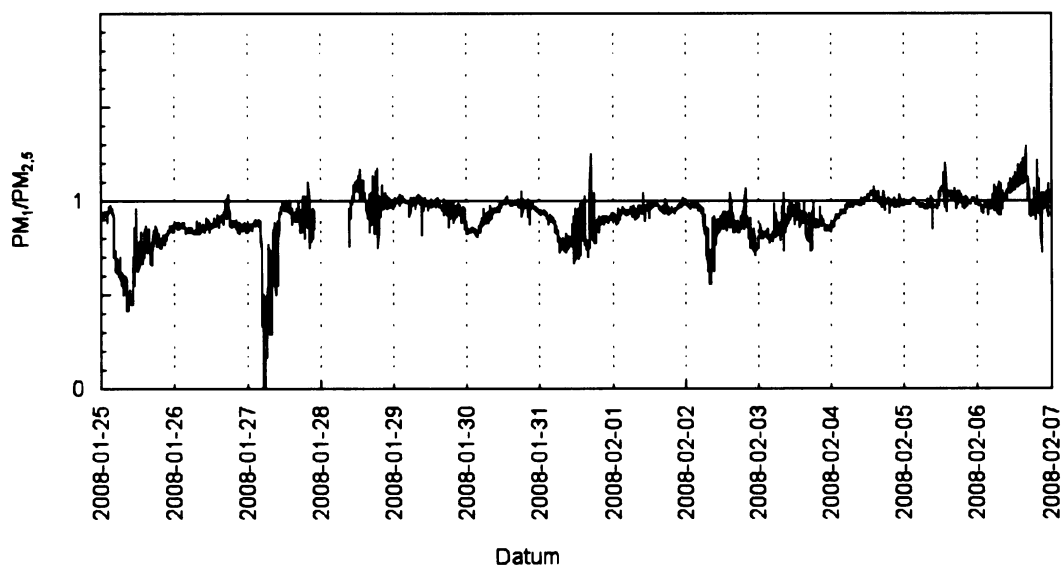
Tab. 6 Korelační koeficienty mezi meteorologickými údaji a koncentracemi částic

	Hmotnostní koncentrace	Koncentrace počtu	Rychlost větru	Teplota
Hmotnostní koncentrace	1			
Koncentrace počtu	0,63	1		
Rychlost větru	-0,12	-0,32	1	
Teplota	-0,09	-0,01	0,256	1

Lineární regrese hmotnostní koncentrace částic PM_1 a $PM_{2,5}$ je znázorněna na obrázku 17. Regresní přímka má tvar $y = 1,0072x + 3,9459$. Koeficient determinace R^2 má hodnotu 0,9918. Hodnoty koncentrací jeví významnou statistickou závislost. Poměr $PM_1/PM_{2,5}$ je v časovém měřítku zaznamenán na obrázku 18.



Obr. 17 Lineární regrese hmotnostní koncentrace částic PM_1 a $PM_{2,5}$



Obr. 18 Poměr $PM_1/PM_{2,5}$ v jednotlivých dnech kampaně.

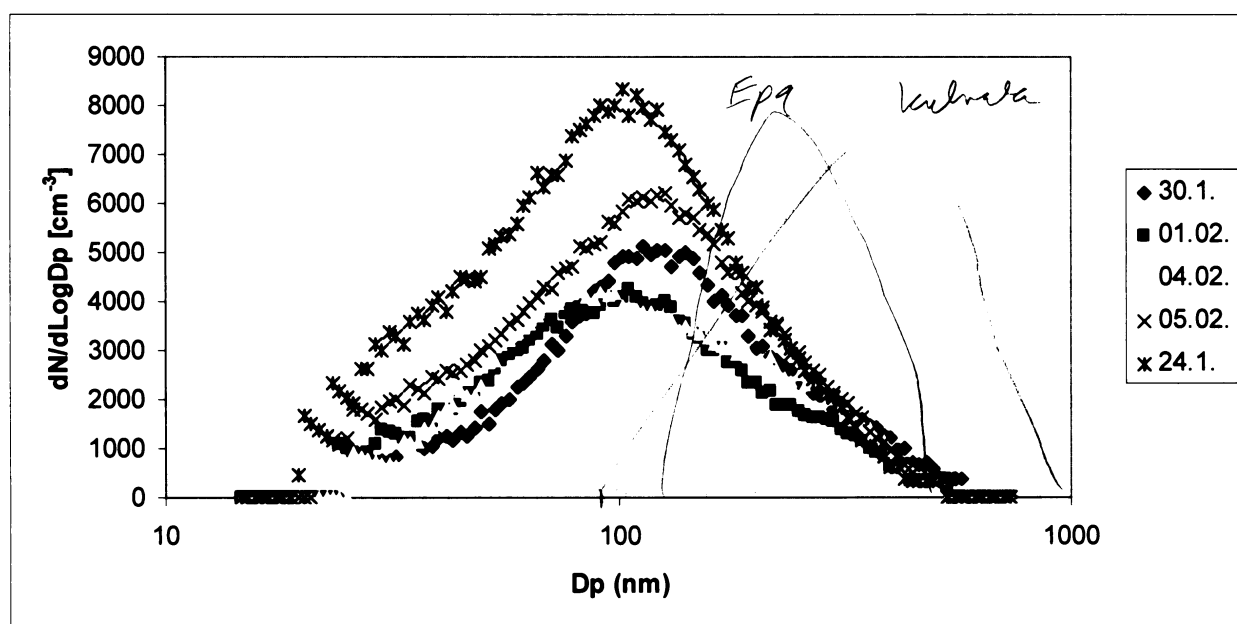
*Proč není vlnová meteor. a DT
vlnová P10,8 a DT P10,8?*

Za účelem zjištění velikostní distribuce aerosolu byly vytvořeny mapy znázorňující koncentraci počtu částic pomocí barevné škály. Jedná se o velikostně sumarizovanou koncentraci počtu částic vztaženou k intervalu velikosti částic v čase. Mapy pro jednotlivé dny jsou uvedeny v obrazové příloze (I – XIV) a komentář k nim je pak umístěn v diskuzi. V této části můžeme shrnout, že jednotlivé dny zimní kampaně lze rozdělit na:

1. dny s převahou lokálního vytápění
2. dny v období srážek (tzn. během a po)
3. dny ovlivněné lokálním vytápěním a dopravou
4. dny, ve kterých došlo ke vzniku nových částic a jejich růstu.

1. Dny s převahou lokálního vytápění

Obrázek 19 ukazuje monomodální distribuci s maximem v akumulacím modu v rozmezí 80 – 100 nm, která se téměř čistě vyskytla během 5 dnů (24.1., 30.1., 1.2., 4.2. a 5.2.). Medián koncentrace počtu částic v těchto dnech byl 4 076 částic.cm⁻³. Dne 1.2. došlo v důsledku nízkých teplot k vypnutí přídavného počítače u přístroje SMPS a výpadku měření, tudíž v tento den není velikostní distribuce za celých 24 hod.

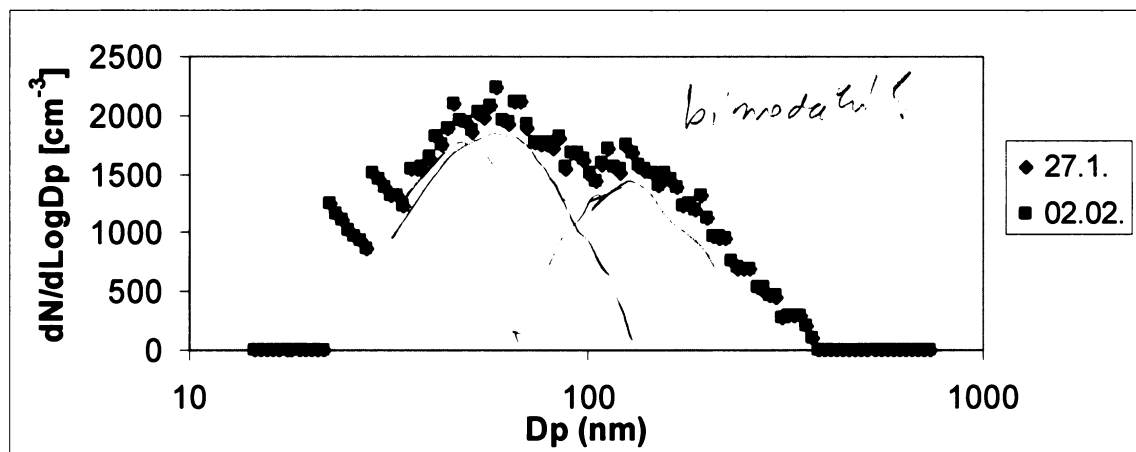


Obr. 19 Monomodální distribuce submikronových částic

*to není ideální ale mod
(viz st.)*

2. Dny v období srážek (tzn. během a po)

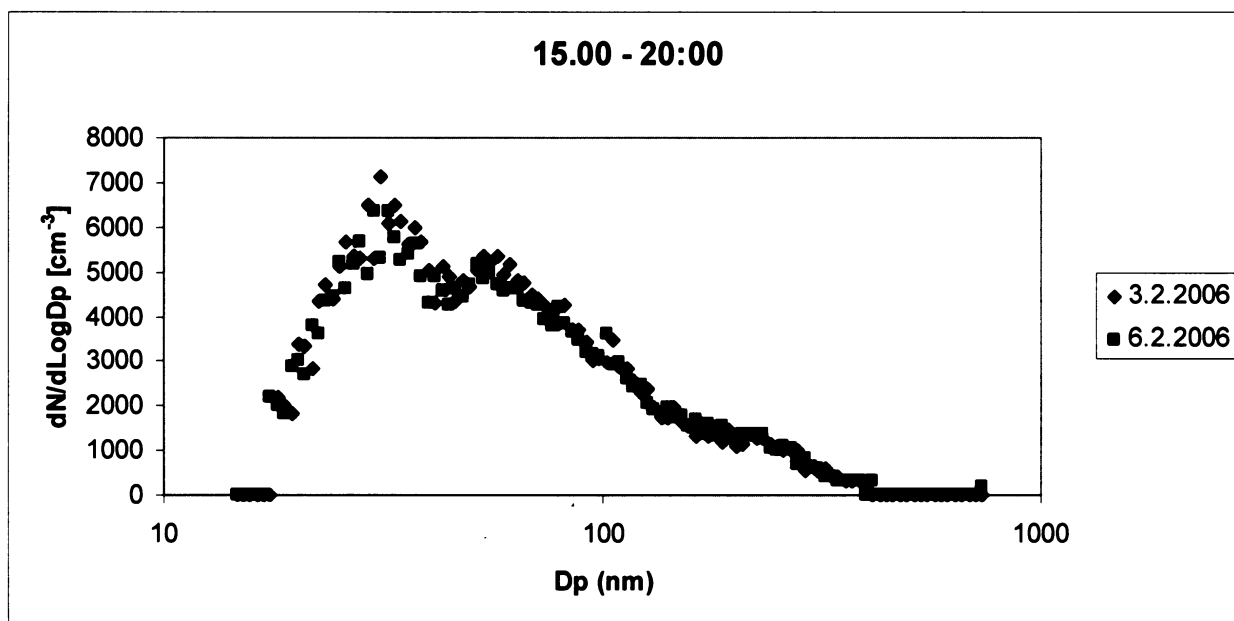
Monomodální distribuce s nízkou koncentrací počtu částic byly naměřeny během 3 dnů (obr. 20), kdy došlo k odstranění částic v ovzduší v důsledku deště – jednalo se o dny 27.1., 2.2. a 7.2. (tento den se měřilo pouze do 9:15 hod). Medián koncentrace počtu částic v těchto třech dnech byl $2\ 201\ \text{částic}\cdot\text{cm}^{-3}$.



Obr. 20 Velikostní distribuce submikronového aerosolu během srážek

3. Dny ovlivněné lokálním vytápěním a dopravou

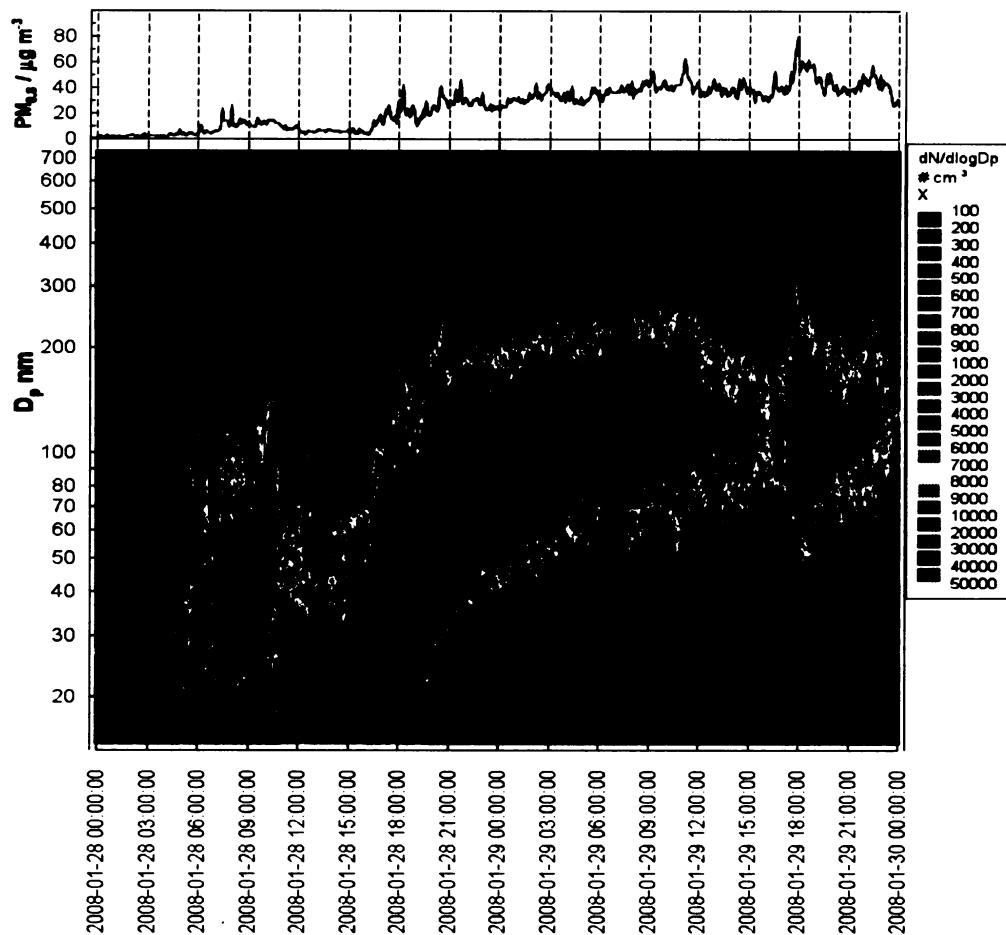
Během 5 dnů (25.1., 26.1., 31.1., 3.2., 6.2.) pak byly zaznamenány epizody, při kterých se objevila bimodální distribuce, kdy k původnímu maximumu přibývalo maximum okolo 30 nm vždy v odpoledních hodinách. Jednalo se celkem o 5 epizod, přičemž jedna byla dle záznamů z deníku způsobena kombinací dopravy a vytápění (maximum kolem 30 nm), která se vyskytla dne 25.1.2008 v čase 12:00 – 19:00 hod a ostatní čtyři se týkaly spíše lokálního vytápění a lišily se dobou trvání – dvě byly intenzivnější a trvaly 3 hodiny (26.1. a 31.1.) a další dvě pak trvaly 5 hodin s nižší koncentrací počtu částic (3.2. a 6.2.) – viz obr. 21. Během těchto dnů byl medián počtu částic $3\ 187\ \text{částic}\cdot\text{cm}^{-3}$.



Obr. 21 Bimodální distribuce submikronového aerosolu

4. Dny, ve kterých došlo ke vzniku nových částic (nukleace) a jejich růstu

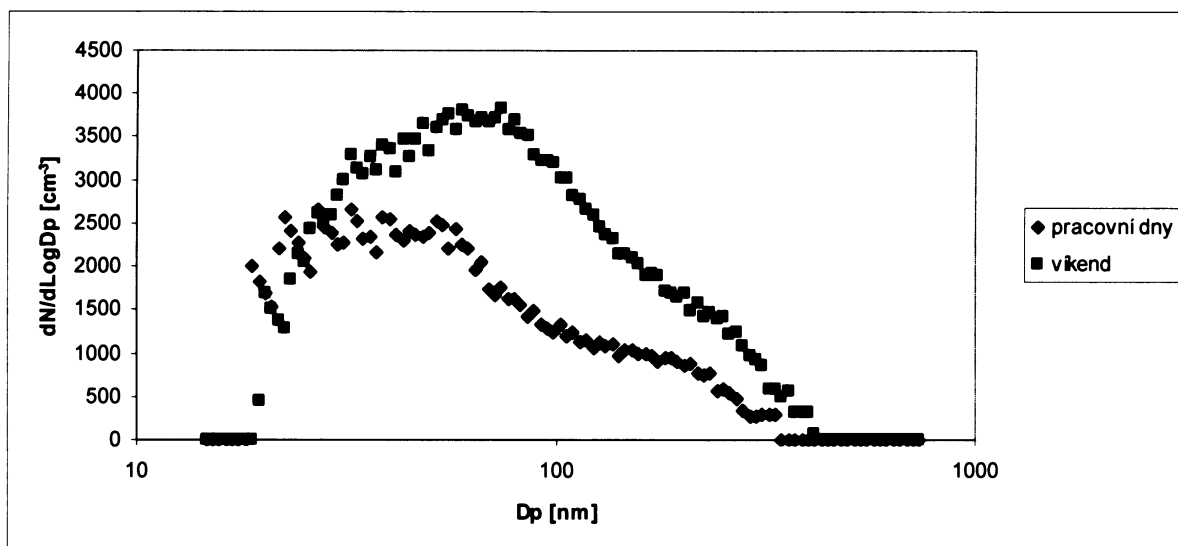
Nejzajímavější epizodou celé kampaně byla bezpochyby zaznamenaná nukleace částic s jejich následným kondenzačním růstem (obr. 22). Tento proces se uskutečnil ve dnech 28.1. - 29.1.2008. Během této epizody byly splněny podmínky, které umožňují proces nukleace - nízký počet částic akumulčního modu v ovzduší (došlo k jejich odstranění v důsledku vymytí srážkami) a relativní vlhkost vzduchu v tomto dni klesla pod 40 %. Vzhledem k nízké rychlosti větru však můžeme předpokládat, že se jedná spíše o lokální záležitost než o ovlivnění velkých vzdušných hmot. Za povšimnutí stojí skutečnost, že během této epizody byla naměřena nejvyšší koncentrace počtu / hmotnosti částic submikronového aerosolu za celou kampaň. Medián koncentrace v těchto dnech je $7\,776 \text{ částic.cm}^{-3}$.



Obr. 22 Mapa velikostní distribuce a hmotnostní koncentrace ve dnech nukleace a jejich následný kondenzační růst

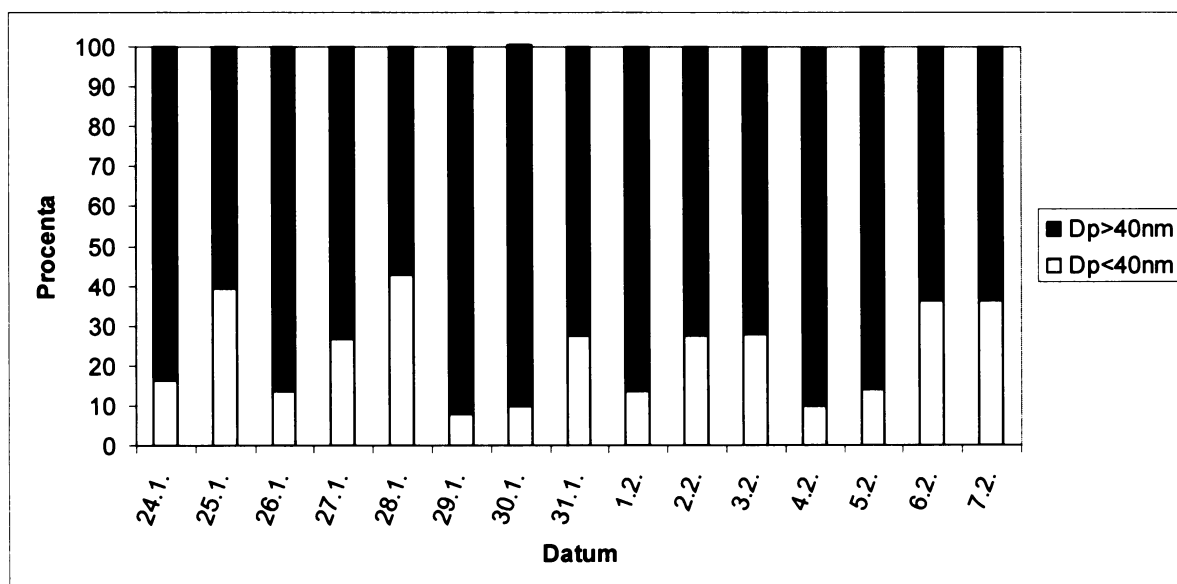
Velikostní distribuce aerosolu se také může měnit v závislosti na tom, zda je pracovní den nebo víkend. Graf na obrázku 23 ukazuje rozdíl mezi těmito faktory, zatímco v týdnu je koncentrace počtu částic menší a objevuje se výraznější mod okolo 20 – 60 nm, o víkendech je koncentrace vyšší s maximem kolem 80 – 90 nm, což lze i s přihlédnutím k záznamům v deníku připsat tomu, že lidé jsou doma a topí. Z tohoto důvodu lze předpokládat, že zvýšené koncentrace o víkendech odpovídají větší intenzitě vytápění.

černé, koncentrace se zvyšuje!



Obr. 23 Velikostní distribuce submikronového aerosolu o víkendech a v pracovních dnech ($N = ?$)

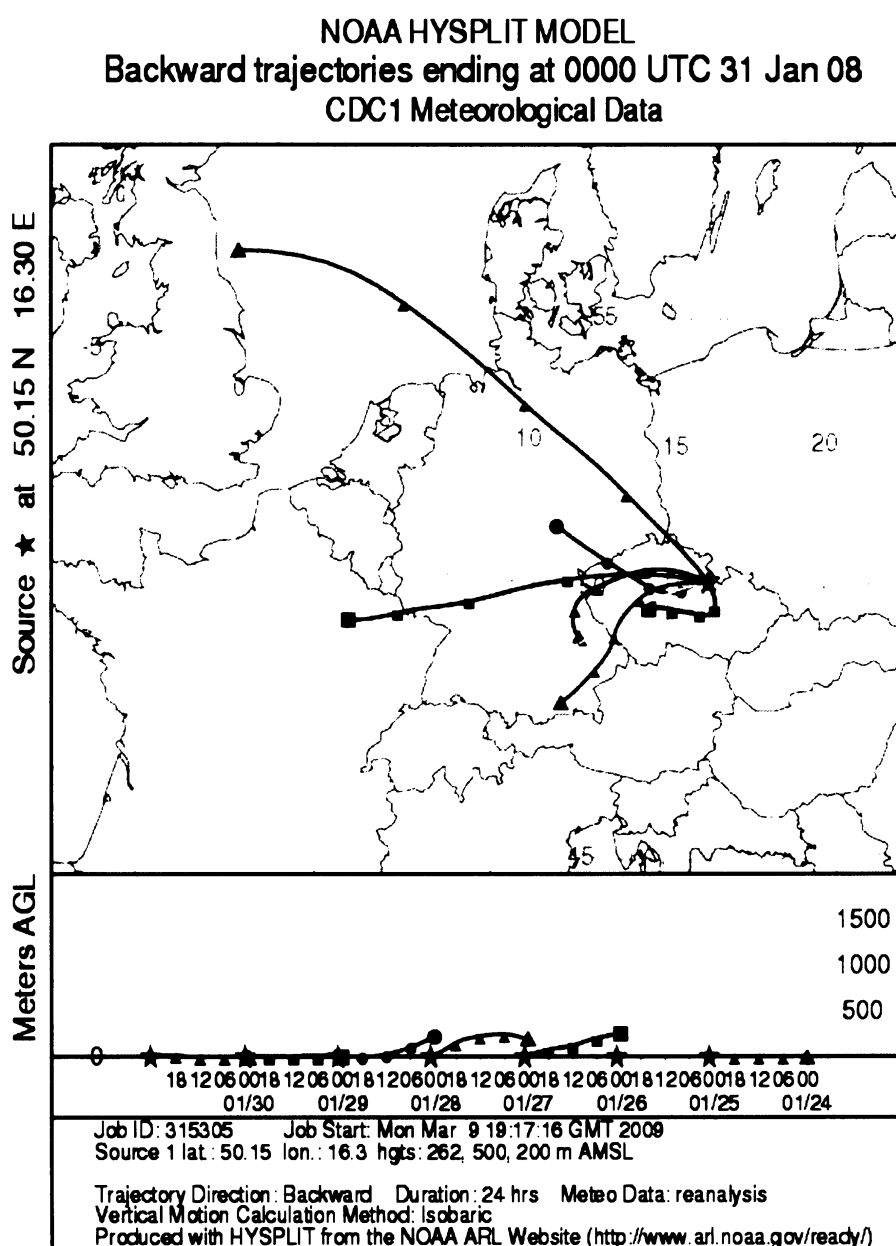
Obrázek 24 ukazuje procentuální zastoupení nukleačního modu ($D_p < 40$ nm) a akumulčního modu ($D_p > 40$ nm) v jednotlivých dnech měřicí kampaně. Hranice 40 nm mezi jednotlivými mody byla zvolena na základě předcházejících zjištění, kdy ve dnech ovlivněných dopravou se objevil mod s maximem kolem 30 nm.



Obr. 24 Procentuální zastoupení nukleačního a akumulčního modu

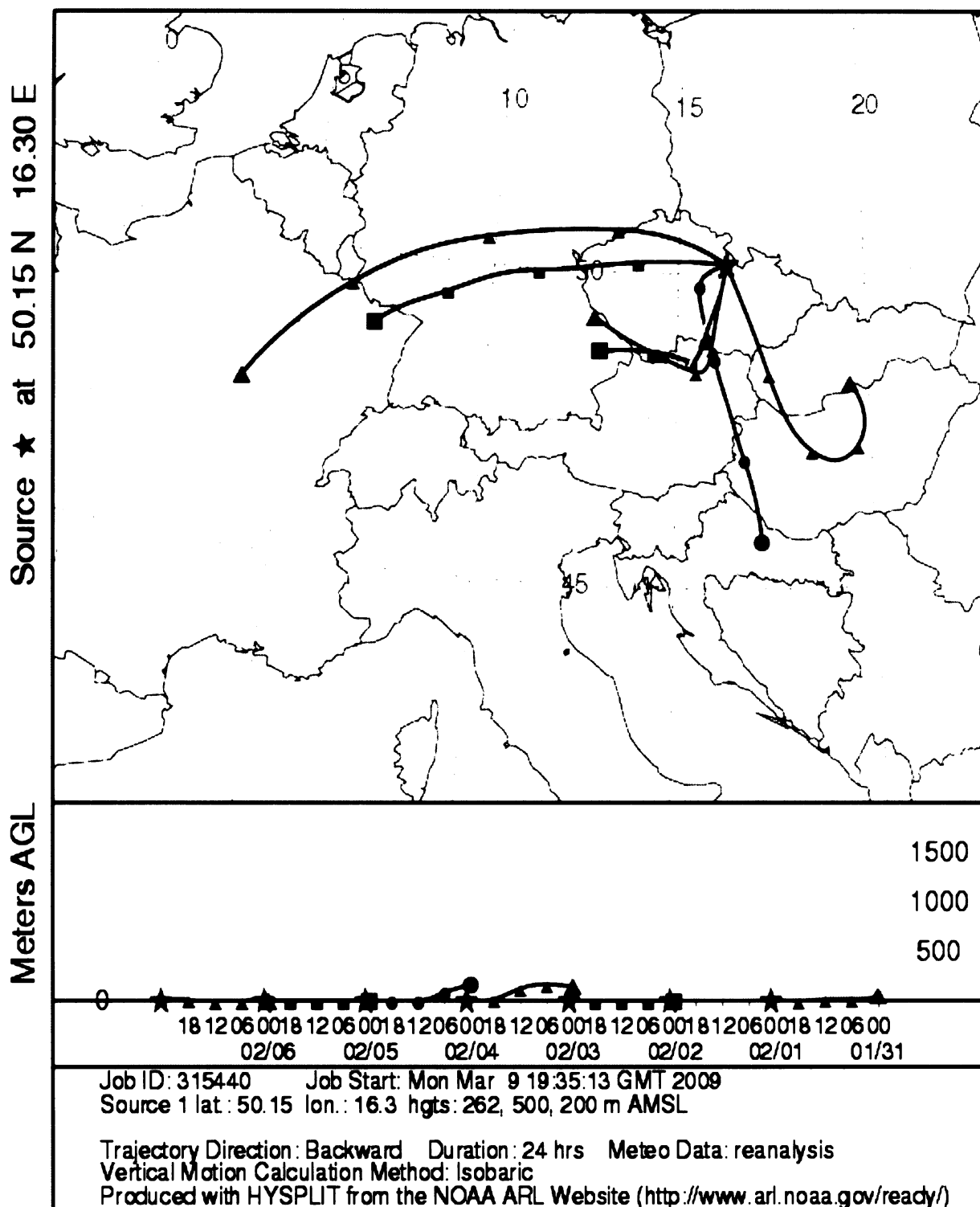
Za účelem zjištění možného vlivu pohybu vzduchových hmot na koncentraci submikronového aerosolu byly vytvořeny mapy znázorňující zpětné trajektorie vzduchových hmot v jednotlivých dnech měřicí kampaně (obr. 25 a 26) pomocí modelu

Hysplit. Z map je patrné, že v první části kampaně (obr. 25) se vzdušné masy pohybovaly nejprve z jihozápadního směru, postupně se stočily k severu a pak došlo k prudké změně proudění zpět na jihozápad. V druhé části kampaně (obr. 26) bylo proudění vzdušných mas velmi proměnlivé. Nejprve převažovalo proudění mas z jihozápadního směru, následně se stočilo k jihu, další den se pak změnilo na západní proudění a v následujícím dnu pak na jihovýchodní proudění. V posledních dnech kampaně se projevilo opět proudění vzduchových hmot ze západu. Možnost ovlivnění velikostní distribuce submikronového aerosolu změnami proudění v jednotlivých dnech je zkoumáno v diskuzi.



Obr. 25 Zpětná trajektorie pohybu vzduchových hmot během kampaně ve dnech 24.1. – 30.1.2008

NOAA HYSPLIT MODEL
Backward trajectories ending at 0000 UTC 07 Feb 08
CDC1 Meteorological Data



Obr. 26 Zpětná trajektorie pohybu vzdušných hmot během kampaně ve dnech 31.1. – 6.2.2008

4. Diskuze

Během kampaně převládalo relativně chladné počasí s maximem teploty 8,4 °C naměřeným v odpoledních hodinách, jihovýchodní směr větru (135°-180°) s pravděpodobností 51 % (zjištěno sečtením procentuálních hodnot tří převládajících směrů větru). Ze stejného směru foukalo i v době od 21.12.2007 až do zahájení měření, kdy také převládal jihovýchodní až jižní vítr (135° – 180°) s pravděpodobností 63 %. Na základě tohoto porovnání lze usuzovat, že měřicí kampaň zastihla podmínky, které se v obci běžně vyskytují a nejedná se tudíž s velkou pravděpodobností o netypickou povětrnostní situaci. Samozřejmě pro úplnou jistotu by bylo vhodné měřit směr a rychlost větru delší dobu, vzhledem k vyřízení přístrojů, to však nebylo možné. Rychlost větru se v 85 % případů pohybovala do 4 m/s, nejčastěji pak do 1 m/s.

Průměrná koncentrace počtu částic za celou měřicí kampaň byla 4 242 #/cm³. Medián byl 3 472 #/cm³. Nejvyšší medián koncentrace počtu částic byl 8 506 #/cm³ (28.1.2008) a nejnižší pak 2 157 #/cm³ (27.1.2008). Rozdíl mezi nejvyšší a nejnižší naměřenou hodnotou byl 6 349 #/cm³. Průměrná hmotnostní koncentrace měla hodnotu 16,2 µg.m⁻³, medián 11,9 µg.m⁻³. Nejvyšší medián hmotnostní koncentrace se vyskytl dne 29.1.2008 a měl hodnotu 38,4 µg.m⁻³, nejnižší pak dne 27.1.2008 s hodnotou 5,7 µg.m⁻³. Mezi nejvýše a nejnižší naměřenou hodnotou byl rozdíl 32,7 µg.m⁻³. Z těchto srovnání byl vynechán poslední den, neboť měření skončilo v ranních hodinách.

Zjištěné hodnoty jsou srovnatelné s měřením Krecla et al. (2008), který sledoval denní chod atmosférického aerosolu v ovzduší města Lycksele v severním Švédsku během zimního období. Průměrná koncentrace počtu částic o velikosti 25 – 606 nm byla 5 144 #/cm³, medián byl 3 257 #/cm³. Naproti tomu dvojnásobná průměrná koncentrace počtu částic submikronového aerosolu (10 300 #/cm³) byla zjištěna ve studii Rodrigueza et al. (2005) ve venkovské lokalitě v severní Itálii. Měřicí stanice byla umístěna v Lombardii, což je oblast v severní Itálii rozkládající se od Alp až k údolí řeky Pád, ve vesnici Ispra. Tato oblast je charakterizována slabým prouděním vzduchu a v zimě jsou zde časté inverzní situace. V této lokalitě byla velikostní distribuce submikronových částic aerosolu ovlivněna hlavně nukleací nových částic a jejich následným kondenzačním růstem, což je situace srovnatelná s naší studií. Dominantní mod se nacházel v 77 nm. Naopak o něco nižší průměrná koncentrace počtu částic aerosolu (3 000 #/cm³) než v naší studii byla zjištěna ve studii Langnera et

al. (2005) na venkovské stanici Aspvreten, která je vzdálená 70 km od Stockholmu. Dominantní mod se nacházel mezi 60 – 90 nm.

Vzhledem k cílům této práce, které zahrnují kromě zjištění velikostní distribuce submikronového aerosolu také odhad možných zdrojů těchto částic, byly měřeny pětiminutové koncentrace NO_2 , NO a O_3 . Hlavními antropogenními zdroji oxidů dusíku je provozování automobilových a leteckých motorů (55 %), spalování fosilních paliv v průmyslových a domácích topeništích (22 %). Při spalování biomasy a fosilních paliv se do atmosféry uvolňuje oxid dusnatý (NO) a oxid dusičitý (NO_2) v poměru zhruba 9 : 1. Roční emise výše uvedených oxidů se odhadují na $52,6 \cdot 10^6$ t, z čehož 24 % připadá na spalování fosilních paliv, 12 % na emise z půdy, 8 % na spalování biomasy a 5 % na blesky (Sucharová J, 2006). *To je to nejdůležitější*

Oxid dusnatý je bezbarvý, ve vodě málo rozpustný, nedráždivý a zdravotně relativně málo rizikový plyn, zatímco oxid dusičitý je hnědavě zbarvený plyn se silnými oxidačními účinky. Koncentrace NO v dolní troposféře závisí na distribuci emisních zdrojů na pevnině a periodicitě jejich činnosti. Ráno, večer a v zimě jsou koncentrace vyšší než během dne a během letních měsíců. V atmosféře je NO spontánně oxidován na NO_2 , proto se chod koncentrací NO_2 o několik hodin opoždíuje proti průběhu koncentrací NO . NO_2 přes den podléhá fotolýze a vzniká NO a kyslíkový radikál, který okamžitě reaguje s molekulárním kyslíkem za vzniku ozonu. Čím je vyšší sluneční intenzita tím je reakce rychlejší. Ozon je pak z ovzduší odstraňován reakcí s oxidem dusnatým. Oxid dusičitý je pro sliznice dráždivý plyn, který proniká do plicních struktur a ve vyšších koncentracích vyvolává astma až rozedmu plic. Oxidační účinky a možná i karcinogenní má také ozon (Hůnová, Janoušková, 2004).

Měření ozonu je účelné i při pozorování nukleace, neboť jak bylo zjištěno, nukleaci doprovází zvýšené koncentrace ozonu. Liu et al. (2008) sledoval velikostní distribuce aerosolových částic ve vesnici Xinken během zimního období. Během 7 měřicích dnů se autorům podařilo zaznamenat proces nukleace, kdy koncentrace počtu částic ráno poklesla a maxima $30\,000 \text{ \#/cm}^3$ dosáhla v poledne. Autoři uvádějí, že tato epizoda byla spojena se slunečním zářením a vysokými koncentracemi ozonu (>100 ppb). V naší studii byla během nukleace zaznamenána třetí nejvyšší koncentrace ozonu během kampaně ($92,6 \text{ \mu g.m}^{-3}$).

Průměrná koncentrace NO_2 za celé sledované období byla $11,3 \text{ \mu g.m}^{-3}$, medián $9,5 \text{ \mu g.m}^{-3}$, pro NO $0,8 \text{ \mu g.m}^{-3}$, medián $0,4 \text{ \mu g.m}^{-3}$ a pro O_3 byla průměrná koncentrace $53,1 \text{ \mu g.m}^{-3}$ a medián $54,8 \text{ \mu g.m}^{-3}$. Ostatní statistické ukazatele lze najít v tabulce 4.

Tabulka 4
Průměr nebo maximum? Číslo raději pozorovat.

V mnoha publikovaných pracích byla řešena otázka možného vlivu meteorologických parametrů na koncentraci počtu částic a jejich hmotnost. Jednalo se především o rychlost větru a teplotu. Pro odhalení této závislosti byl použit Spearmanův korelační koeficient. Bylo zjištěno, že sledované veličiny kromě jedné, kterou byla závislost koncentrace počtu částic na teplotě, jsou na 5 % hladině testu navzájem závislé. Pro názornější představu byly vytvořeny bodové diagramy (obr. 15 a 16).

Hmotnostní koncentrace aerosolových částic dosahuje maxima, pohybují-li se teploty od 0 °C do 4 °C. Nižší i vyšší teploty jsou spojeny s menší hmotnostní koncentrací. Stejně tak se projevuje závislost hmotnostní koncentrace i na rychlosti a směru větru. Nejvyšší koncentrace jsou dosahovány při nižších rychlostech větru tak do 3 m/s a při jihovýchodním směru větru.

Koncentrace počtu částic vykazuje obdobné vlastnosti, co se týče rychlosti a směru větru, kdy nejvyšší koncentrace počtu částic se objevuje při jihovýchodním směru do rychlosti 3 m/s. Vliv teploty na koncentraci počtu částic není patrný a nezávislost byla potvrzena pomocí Spearmanova korelačního koeficientu. Jednotlivé korelační koeficienty mezi všemi testovanými veličinami jsou uvedeny v tabulce 6. Větrné růžice znázorňující koncentrace počtu / hmotnosti v závislosti na směru větru (obr. 6, 7) jsou víceméně totožné s větrnou růžicí s rychlostí větru (obr. 4). Z toho lze předpokládat, že ovzduší je dobře promíchané a z hlediska zdrojů homogenní.

Hering et al. (2007) našel podobnou skutečnost ve městě Fresno v USA, kdy během měření velikostní distribuce submikronového aerosolu zjišťoval vliv meteorologických podmínek (rychlost větru, teplota) na koncentraci počtu částic. Bylo prokázáno, že s klesající teplotou a rychlostí větru menší než 3 m/s dochází k růstu počtu částic.

Ve výsledcích jsou uvedeny základní typy velikostní distribuce, které se během měření vyskytly. Vzhledem ke skutečnosti, že každá epizoda výskytu znečištění měla svoje charakteristiky, rozhodla jsem se nyní uvést velikostní distribuce v jednotlivé měřící dny s uvedením možných zdrojů těchto epizod včetně popsání všech doprovodných údajů. Mapy velikostní distribuce aerosolu, meteorologické podmínky a plynné složky pro jednotlivé dny kampaně jsou uvedeny v obrazové příloze I - XIV. Z tohoto přehledu je vynechán poslední den, neboť měření skončilo v dopoledních hodinách.

Výsledky patří do výsledků!

Dne 24.1.2008 (čtvrtek, obr. příloha I) se během dne vyskytovala zvýšená koncentrace částic akumulárního modu kolem velikosti 80 - 100 nm. Vítr foukal rychlostí kolem 3 m/s převážně z jihovýchodního směru. Kolem třetí hodiny odpoledne lze zaznamenat i částice menší v rozmezí 20 - 60 nm, které lze s velkou pravděpodobností připsat zvýšené dopravě v obci a sváření v nedaleké blízkosti měřícího zařízení zaznamenané v deníku. Medián koncentrace počtu částic v tento den byl 6 320,5 #/cm³. Koncentrace NO₂ se během celého dne pohybovala kolem 20 µg/m³, což je nejvyšší zaznamenaná hodnota během celé kampaně. Mezi sedmou a osmou hodinou večerní došlo ke zvýšení koncentrace na 29,7 µg/m³. Medián koncentrace ozonu v tento den byl 35,6 µg/m³ s maximem 49 µg/m³ mezi desátou a jedenáctou hodinou večerní. Tento den se začalo měřit v 10:30 hod, proto je za tento den k dispozici 162 měření místo 288.

Byl vedle deníku!

V pátek 25.1.2008 (obr. příloha II) můžeme během dopoledne pozorovat mnoho drobných epizod o velikosti částic v rozmezí 20 - 40 nm, které lze dle záznamů v deníku připsat zvýšené automobilové dopravě (zvýšený průjezd nákladních automobilů). Epizoda, která se vyskytla v čase 11:25 hod a výrazně přispěla ke zvýšení hmotnostní koncentrace, je s velkou pravděpodobností způsobena zatápěním nejbližších sousedů, které se projevilo výraznou tmavostí kouřové vlečky. V čase 12:00 - 19:00 hod se pak vyskytla epizoda vyšší koncentrace počtu částic o velikosti v rozmezí 20 - 60 nm způsobená dle záznamů z deníku epizodami vytápění a zvýšené automobilové dopravy. *20-60* V tento den se rychlost větru pohybovala kolem 2 m/s. V době trvání epizody převažoval jihozápadní vítr vanoucí směrem od silnice a přinášející kouřové vlečky z nedalekých zdrojů lokálního vytápění. Medián počtu částic v tento den byl 3 809 #/cm³. Medián koncentrace NO₂ byl 9 µg/m³, s maximem kolem páté hodiny večerní (27 µg/m³). V souladu s tím byly v tuto dobu naměřeny nejnižší koncentrace ozonu (25 µg/m³), medián koncentrace během dne pak byl 66 µg/m³.

V sobotu 26.1.2008 (obr. příloha III) byla průměrná koncentrace počtu částic v ovzduší relativně nízká - 3 862 #/cm³. Tento den je ukázkovým příkladem emise ze zdrojů. Objevila se bimodální distribuce, kdy nejprve převažovaly částice o velikosti 20 - 60 nm pocházející především z dopravy, v pozdějších hodinách se pak vyskytla epizoda zvýšených koncentrací částic akumulárního modu kolem 100 nm pocházející především z lokálního vytápění. *100 nm* Vítr foukal podobně jako předcházející den převážně od silnice a od obydlí a jeho rychlost se pohybovala průměrně kolem 1,1 m/s s maximem kolem 4 m/s ve večerních hodinách, kdy také došlo ke snížení koncentrace

počtu / hmotnosti částic. Medián koncentrace NO_2 byl $10,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ s maximem $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ mezi pátou a šestou hodinou večerní, což lze s velkou pravděpodobností dle záznamů z deníku připsat lokálnímu vytápění. Medián koncentrace ozonu byl $55 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Neděle 27.1.2008 (obr. příloha IV) stejně jako sobota 2.2.2008 a poslední den měření čtvrtek 7.2.2008 byla ve znamení nízkého počtu aerosolových částic v ovzduší v důsledku jejich odstranění dešťovými srážkami. Medián koncentrace počtu částic v tento den byl $2\,127 \text{ #}/\text{cm}^3$. V tento den se vyskytl nejnižší medián koncentrace NO_2 ($5 \mu\text{g}/\text{m}^3$) a s tím související poměrně vysoké koncentrace O_3 s mediánem $71 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a maximem $100,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, který se objevil po deváté hodině večerní. Vítr foukal převážně od západního až severozápadního směru průměrnou rychlostí 3 m/s a ve večerních hodinách s maximem rychlosti 10 m/s . Podobně tomu bylo i 2.2.2008 (obr. příloha X), kdy medián koncentrace počtu částic byl $2\,677 \text{ #}/\text{cm}^3$, opět s poměrně velkou rychlostí větru přesahující 5 m/s v ranních hodinách, ale přicházející hlavně z jižního, během dne pak i západního směru. Medián koncentrace NO_2 byl v tento den $7,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, O_3 pak $62 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Před jedenáctou hodinou večerní jsou zaznamenány zvýšené koncentrace částic o velikosti $20 - 50 \text{ nm}$, které lze s největší pravděpodobností vzhledem k zvýšeným koncentracím NO připsat vytápění nejbližších sousedů. Dne 7.2.2008 se ukončila měřicí kampaň v dopoledních hodinách, velikostní distribuce proto není za celý den a vypovídací schopnost naměřených dat je velmi malá. Vzhledem k podmínkám, které v tento den panovaly, lze předpokládat, že by velikostní distribuce byla velmi podobná jako ve výše popsanych dvou dnech.

Pondělí 28.1.2008 (obr. příloha V) se vyznačovalo jasnou oblohou s teplotou od mínus pěti až do plus pěti stupňů a s proměnlivým prouděním větru od jihu až k severozápadu s průměrnou rychlostí $0,54 \text{ m/s}$. Medián koncentrace počtu částic v tento den byl $8\,506 \text{ #}/\text{cm}^3$. Medián hmotnostní koncentrace byl $8,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. V tento den byla zaznamenána nukleace. Před vlastní nukleací se však objevila epizoda, která dle záznamů z deníku pravděpodobně úzce souvisí s lokálním vytápěním. Tato epizoda trvala od 5:00 do 10:00 hod. Během této epizody vzrostla koncentrace NO_2 až na $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Velikost částic se pohybovala mezi $20 - 100 \text{ nm}$. Od 11:00 hod se začal projevovat proces nukleace. V tento den byl nejvyšší medián koncentrace počtu částic za celou měřicí kampaň, dosahující $8\,506 \text{ #}/\text{cm}^3$. Kondenzační růst částic pokračoval až do následujícího dne (29.1.2008 – obr. příloha VI), kdy medián počtu částic trochu klesl ($7\,357 \text{ #}/\text{cm}^3$), ale stále je druhý nejvyšší. V tomto dni dosáhla maxima

hmotnostní koncentrace, na jejímž vzrůstu se podílel kondenzační růst částic a medián měl hodnotu $38,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Rychlost růstu částic byla $8 \text{ nm}\cdot\text{h}^{-1}$ a proces vzniku částic a jejich následný kondenzační růst trval 2 dny.

Monomodální distribuce s částicemi akumulčního modu s maximem kolem 100 nm se vyskytla ve středu dne 30.1.2008 (obr. příloha VII). V ranních hodinách byla naměřena epizoda zvýšených koncentrací částic o velikosti 50 – 110 nm, jejichž původem je s největší pravděpodobností ranní zatápnění v obci. Medián koncentrace počtu částic v tento den byl $3\,558 \text{ \#/cm}^3$. Převažoval vítr jihovýchodního směru, vanoucí od obydlené části vesnice a přinášející hlavně ve večerních hodinách znečištění pocházející z lokálního vytápnění (potvrzeno záznamy v deníku). To ostatně odráží i zvýšené koncentrace NO_2 v tuto dobu s maximem $34 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a mediánem $12,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Čtvrtek 31.1.2008 (obr. příloha VIII) byl charakteristický krásným slunečným počasím s teplotou pohybující se kolem $0 \text{ }^\circ\text{C}$, s převahou severozápadního a během dne pak jihovýchodního směru větru s průměrnou rychlostí kolem 2 m/s. Medián koncentrace počtu částic v tento den byl relativně malý $2\,366 \text{ \#/cm}^3$. Menší epizoda, kdy byly naměřeny zvýšené koncentrace částic nukleačního modu v rozmezí 15 – 40 nm, se objevila kolem 8:00 hod a souvisí s intenzivnější dopravou. Významnější je epizoda mezi sedmou a devátou hodinou večerní, kdy se objevily zvýšené koncentrace částic v rozmezí 20 – 70 nm. Vzhledem ke směru větru (jihovýchod) a záznamům v deníku, lze tuto epizodu připsat vytápnění nejbližších sousedů.

Monomodální distribuce s maximem částic akumulčního modu se vyskytla v pátek 1.2.2008 (obr. příloha IX). Medián koncentrace počtu částic v tento den byl $3\,190 \text{ \#/cm}^3$, s jihovýchodním až jižním prouděním větru. Medián koncentrace NO_2 dosahoval $13 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Velikostní distribuce zde není za celých 24 hodin, neboť v důsledku nízkých nočních teplot došlo k samovolnému vypnutí přídatného počítače u přístroje SMPS v čase od 1:25 – 7:25 hod a 19:05 – 19:20 hod. Za tento den je tedy k dispozici 213 měření místo běžných 288.

Pondělí 4.2.2008 (obr. příloha XII) lze také popsat monomodální distribucí s maximem kolem 100 nm. V tento den foukal vítr s rychlostí průměrně 5 m/s z jižního směru. Před 6 hodinou večerní byla zaznamenána epizoda zvýšených koncentrací počtu / hmotnosti submikronového aerosolu o velikosti 50 – 300 nm. Vzhledem ke snížení rychlosti větru v tuto dobu a s přihlédnutím na směr větru vanoucí od obydlené části vesnice a k záznamům v deníku, lze tuto epizodu připsat vytápnění obydlí. Medián

koncentrace počtu částic v tento den byl 3 466 #/cm³. Medián koncentrace NO₂ byl 5,8 µg/m³.

Dne 3.2.2008 (neděle, obr. příloha XI) panovalo pěkné počasí s převahou jihovýchodního směru větru a s průměrnou rychlostí 3 m/s, ve večerních hodinách rychlost dosáhla až 8,5 m/s. Vyskytla se i nejnižší naměřená teplota během kampaně to jest – 5 °C. Medián koncentrace počtu částic v tento den byl 3 625 #/cm³. Kolem 6:00 hod byla zaznamenána epizoda zvýšených koncentrací počtu částic o velikosti 50 – 110 nm. Vzhledem k nízké rychlosti větru lze usuzovat, že se nejspíše jedná o lokální vytápění. V čase mezi 8:30-15:30 hod došlo k samovolnému vypnutí přídatného počítače u přístroje SMPS a zastavení měření velikostní distribuce aerosolových částic, z tohoto důvodu máme v tento den k dispozici 203 měření. Po opětovném zapnutí byla naměřena epizoda zvýšených koncentrací částic nukleačního modu kolem 20 – 60 nm, kterou nelze jednoznačně určit a která se vyskytla mezi třetí a osmou hodinou večerní. Koncentrace NO₂ je relativně nízká – medián je 5,6 µg/m³. Mohlo by se jednat o znečištění pocházející ze zvýšené automobilové dopravy z důvodu nedělních návštěv. Medián koncentrace ozonu je v tento den poměrně vysoký 66 µg/m³.

Podobná pětihodinová epizoda se vyskytla i ve středu 6.2.2008 (obr. příloha XIV) ve stejném čase. Rychlost větru však byla podstatně nižší (průměrně 1,3 m/s) a během epizody vanul vítr ze severozápadního směru od silnice. Medián koncentrace počtu částic byl 2 906 #/cm³, koncentrace NO₂ 7,3 µg/m³. V tento den byl zaznamenán největší medián koncentrace ozonu – 67 µg/m³ a zároveň teplota dosáhla maximální hodnoty celé měřící kampaně, to jest na 8,4 °C. V tento den se také v ranních hodinách vyskytla epizoda zvýšených koncentrací částic o velikosti 50 – 110 nm, které lze připsat zatápění ve vesnici, neboť vítr fouká od obydlené části vesnice, používající k vytápění především uhlí. Zvýšení koncentrace počtu částic o velikosti 20 – 50 nm okolo osmé hodiny ranní souvisí nejspíše s intenzivnější dopravou v obci, zaznamenanou v deníku.

5.2.2008 (úterý, obr. příloha XIII) byla naměřena opět monomodální distribuce s převahou částic o aerodynamickém průměru kolem 100 nm. Převažovalo proudění jižních směrů. Záznamy v deníku poukazují na významný kouř z komínů v okolí. Medián koncentrace počtu částic byl 4 801 #/cm³, koncentrace NO₂ 17 µg/m³ a koncentrace O₃ 45,6 µg/m³.

Po vyřídění nejvyšších dosažených hodnot koncentrací počtu částic bylo zjištěno, že 99 % percentil hodnot se vyskytl v čase 16:30 – 21:00 hod, což

koresponduje i s pozorovaným zatápěním v obci. Zřetelně se zde však uplatňuje proces nukleace, neboť z 40 maximálních hodnot jich je 29 ve dnech, kdy proběhla nukleace a tento přirozený proces se tedy významnou mírou podílí na množství aerosolových částic v ovzduší. Při zhodnocení nejvyšších dosažených hmotnostních koncentrací aerosolových částic bylo zjištěno, že 99 % percentil hodnot se vyskytuje v čase 17:30 – 19:30 hod, přičemž opět je zde pozorovatelný vliv nukleace. Tato skutečnost odpovídá i záznamům v deníku, kdy většina obyvatel zatápí v podvečerních hodinách po příchodu z práce. Zatímco o víkendu obyvatelstvo zpravidla topí již od ranních hodin.

Rozdíl mezi víkendy a pracovními dny je dobře patrný z obrázku 23. Zatímco v týdnu je koncentrace počtu částic menší a objevuje se výraznější mod okolo 20 – 60 nm, o víkendech je koncentrace vyšší s maximem kolem 80 – 90 nm. Krecl et al. (2008) zjistil podobné rozložení, kdy v týdnu je koncentrace nižší s maximem kolem 28 nm vyskytující se hlavně v ranních hodinách a o víkendu je koncentrace vyšší s maximem v 80 nm.

5120 10000, 10000 - 5000

Obrázek 24 znázorňuje procentuální zastoupení nukleačního modu ≤ 40 nm (související především s dopravou) a akumulačního modu > 40 nm (odrážející vytápění v obci) v jednotlivých dnech kampaně. Hranice 40 nm byla zvolena s přihlédnutím k naměřeným velikostním distribucím submikronového aerosolu v obci. Nukleační mod ($D_p < 40$ nm) přispíval k celkové koncentraci počtu částic ve vesnici v zimním období z 23,4 %.

Podobné rozdělení nukleačního a akumulačního modu lze také nalézt ve studii Weimera et al. (2009), která zjišťovala, jak rozdílné zdroje ovlivňují koncentraci počtu částic v oblasti jižního Švýcarska zvané Bellinzona. Měření bylo prováděno mobilní laboratoří umístěné v dodávce s přístojem FMPS (Fast Mobility Particle Sizer) a kondenzačním čítačem částic. Mobilní laboratoř se pohybovala v pravidelných cestách od dálnice směrem k vesnicím (Biasca, Osogna, Lodrino, Prosito). Koncentrace počtu částic byla v průměru dvakrát větší u dálnice než v okolí vesnic. Ve vesnicích bylo za hlavní zdroj částic považováno spalování dřeva v domácích topeništích, které je v této oblasti typickým způsobem vytápění. Spalování dřeva produkuje větší částice v oblasti akumulačního modu než doprava. Během spalování částice rostou ze 70 až do 300 nm v aerodynamickém průměru a mohou pak významně přispívat k celkové hmotnostní koncentraci. Nukleační mod ($D_p < 30$ nm) přispíval k celkové koncentraci počtu částic ve vesnici v zimním období ze 40 % u dálnice pak z 80 %. Dominantní mod se ve

vesnicích nacházel ve 140 nm. Toto zjištění se příliš neliší od naší studie, ve které se dominantní mod nacházel kolem 100 nm.

Vliv spalování dřeva v domácích topeništích na množství aerosolových částic v ovzduší zkoumal také Glausius et al. (2006) v malém městě Gundsomagle, které je vzdáleno 30 km od města Copenhagen během dvou zimních období (2002 a 2003/04). Ve večerních hodinách byla zjištěna velikostní distribuce s maximem ve 100 – 200 nm, což je srovnatelné s podmínkami, které se vyskytly u nás. Jako jedno z možných vysvětlení vyšší velikosti částic pocházejících z vytápění než z dopravy spatřují autoři v možnosti, že spalování dřeva je méně dokonalý proces spalování s vyššími koncentracemi semivolatilních organických látek a anorganických složek schopné kondenzace oproti dobrému procesu spalování ve spalovacích motorech.

Pro zjištění možného vlivu pohybu vzdušných hmot na velikostní distribuci submikronového aerosolu v obci byl použit model Hysplit (obr. 25 a 26). Během měřicí kampaně se vzduchové hmoty pohybovaly převážně od západního směru, pouze ve dnech 1.2., 3.2. a 4.2. 2008 vanuly z jižního až jihozápadního směru. V tyto dny se však velikostní distribuce aerosolu v obci nijak výrazně nezměnila a vzhledem k záznamům v deníku odpovídá situaci v obci související především s lokálním vytápěním. S velkou pravděpodobností lze tedy předpokládat, že tato změna směru se na koncentraci submikronového aerosolu nepodílela.

Zajímavé je jistě také výrazné snížení koncentrace počtu / hmotnosti částic vždy v brzkých ranních hodinách, které se projevilo ve dnech 25.1. (mezi 4:00 – 6:00 hod), 27.1. (4:00 – 10:00 hod), 31.1. (2:00 – 6:00 hod) a 2.2. (6:00 – 8:00 hod). Zkoumala jsem, zda tyto epizody nemohou souviset se subsidenčními pohyby vzduchových hmot, které by mohly objasnit náhlé snížení koncentrací. Dne 25.1.2008 dle zpětné trajektorie k subsidenčním pochodům nedošlo, tudíž snížení koncentrací s tímto jevem nelze spojit. Rychlost větru byla kolem 3 m/s, vítr se točil, ale převažoval západní směr. Vzhledem ke skutečnosti, že předtím převažoval jižní směr větru (vanoucí od obydlené oblasti) a po jeho otočení došlo i k výraznému snížení NO₂ (z 15 μg/m³ na 2 μg/m³), lze předpokládat, že důvodem náhlého snížení koncentrací je změna proudění větru z obydlené části, využívající k vytápění uhlí k méně obydlené a neobydlené části vesnice. Stejná situace byla i dne 2.2.2008. Nejdříve převažoval jižní směr větru s rychlostí větru kolem 5 m/s. Pak se rychlost větru významně snížila (pod 1 m/s), změnil se směr a současně s tím došlo i k poklesu koncentrací. Dne 27.1.2008 je situace poněkud odlišná. Frontální systém přinesl intenzivní srážky a z tohoto důvodu

je i koncentrace submikronového aerosolu po celý den velmi nízká. Zpětné trajektorie pohybu vzdušných hmot pro tento den vykazují subsidenční pohyby. Z tohoto zjištění lze předpokládat, že na náhlém snížení koncentrace počtu / hmotnosti submikronového aerosolu v obci se mohly podílet pohyby vzduchových hmot. Samozřejmě svou roli zde sehrály i dešťové srážky, které se podílejí na odstranění aerosolových částic v ovzduší. Dne 31.1.2008 byly brzy po půlnoci znatelné koncentrace počtu / hmotnosti částic aerosolu pocházející dle záznamů z deníku z předcházejícího dne z lokálního vytápění. Po půlnoci došlo ke zvýšení rychlosti větru až na 4 m/s, který je s velkou pravděpodobností důvodem snížení koncentrací v tomto dnu.

Vzhledem k uvedeným skutečnostem lze předpokládat, že pohyb vzduchových hmot s velkou pravděpodobností nezapříčinil zvýšení koncentrací počtu / hmotnosti submikronových částic v obci. Subsidenční pohyby ve vzduchových hmotách se mohly v jednom případě podílet na snížení koncentrací počtu / hmotnosti submikronového aerosolu, vzhledem k přítomnosti srážek však zůstává otázkou, do jaké míry lze toto snížení připsat klesajícím pohybům ve vzduchových hmotách.

Studii zabývající se měřením velikostní distribuce submikronového aerosolu v ovzduší malého sídla je v České republice velmi málo. Jako jedna z prvních prací je studie Mikušky et al. (2005), která se snažila prověřit dynamiku velikostní distribuce atmosférického aerosolu na ekologickém experimentálním pracovišti Bílý Kříž ve dnech 20.6. - 30.6.2001. Pracoviště se nachází v oblasti Moravsko-Slezské Beskydy mimo dosah přímých zdrojů znečištění. Z meteorologického hlediska měla kampaň dvě části. V první polovině převládalo chladnější počasí a celkové koncentrace počtu částic klesly na přibližně $1\ 000\ \#/cm^3$ a rozdělení částic bylo bimodální s prvním maximem kolem Aitkenova modu okolo 60 nm a druhým maximem v akumulacním modu kolem 250 nm. Koncentrace počtu částic v akumulacním modu byly okolo $50\ \#/cm^3$. V druhé části kampaně se začalo projevovat letní počasí. Maxima celkových koncentrací počtu částic dosahovala $30\ 000\ \#/cm^3$ s rozhodujícím podílem částic v nukleačním modu. Vzhledem k umístění této stanice (mimo zdroje, sídla) není srovnání s touto prací účelné.

V současnosti je tak v České republice pouze jedna práce porovnatelná s našimi výsledky zabývající se měřením koncentrací submikronového aerosolu v ovzduší malého sídla v blízkosti dálnice (Staňková, 2008). Tato studie se uskutečnila v obci Koberovice ($49^\circ\ 35'\ 15''$ z.š., $15^\circ\ 15'\ 25''$ z.d., 470 m.n m.) ve dnech 8.2. – 23.2.2008. Obec Koberovice leží v kraji Vysočina severozápadně od města Humpolec. Žije zde

150 stálých obyvatel. Měřicí zařízení bylo umístěno v buňce na poli 340 m od dálnice D1. Za hodinu zde v průměru projelo 500 – 3 000 aut. 60 % obyvatelstva využívá k vytápění uhlí, zbylých 40 % dřevo. Během kampaně byly měřeny koncentrace počtu / hmotnosti submikronového aerosolu, doprovodné meteorologické údaje (směr a rychlost větru, sluneční záření, vlhkost, teplota) a koncentrace plynných polutantů (NO_x a O₃) s integrační dobou pět minut. Medián koncentrace počtu částic za celou měřicí kampaň byl 7 800 #/cm³, medián hmotnostní koncentrace pak 23,4 μg.m⁻³. Ve dnech 16.2. – 17.2.2008 byl zaznamenán vznik částic s jejich následným kondenzačním růstem. Rychlost růstu byla 3 nm.h⁻¹. 5 % percentil maximálních hodnot hmotnostních koncentrací se vyskytuje v pozdních odpoledních hodinách (15:30 – 21:30 hod). Důsledkem je dle autorky vytápění obydlí. Autorka definuje dva mody měřeného submikronového aerosolu. Mod částic o velikosti < než 40 nm pochází pravděpodobně z automobilové dopravy na dálnici. Mod částic větších než 70 nm pak pravděpodobně ze spalování fosilních paliv v domácích topeništích.

Uvedená studie je velmi zajímavá pro srovnání s touto prací. Vesnice jsou si podobné počtem obyvatel i způsobem vytápění. Jediným významným rozdílem je přítomnost nedaleké dálnice, která je významným zdrojem částic menších než 40 nm. Koncentrace počtu / hmotnosti submikronového aerosolu je díky tomuto zdroji v obci téměř dvojnásobná. Zajímavý je také pohled na vlastní nukleaci, zatímco v Koberovicích, ve kterých je významné množství částic emitováno dopravou, nepůsobí jako hlavní činitel ovlivňující stav ovzduší v obci, v Mokřém má tento proces zásadní hygienický význam, neboť uvolňuje větší množství částic než přímá emise. Podobnost je zjevná i v definici dvou modů, kdy na prvním z nich se uplatňuje především doprava a druhý je pak způsoben především lokálním vytápěním.

↓
Jsou nukleace
produkované
domácí topeniště?

Měření submikronového aerosolu v malých sídlech je v České republice stále spíše výjimkou. Pozornost se věnuje velkým městům, zatímco malá sídla unikají větší pozornosti. Přitom řada těchto sídel je umístěna ve špatně provětrávaných údolích s vyšší četností výskytu inverzí, což spolu s lokálními topeništi, ve kterých je mnohdy spalován i domácí odpad, může vést k výskytům vysokých koncentrací znečišťujících látek (Kotlík et al., 2005). Proto cílem této práce bylo v ovzduší obce Mokrý stanovit velikostní distribuce submikronového aerosolu a odhadnout jeho zdroje v zimním období, kdy je vysoká pravděpodobnost vytváření inverzního zvrstvení atmosféry.

Průměrná koncentrace počtu částic za celou měřicí kampaň byla $4\,242 \text{ \#/cm}^3$, medián byl $3\,472 \text{ \#/cm}^3$. Průměrná hmotnostní koncentrace byla $16,2 \text{ \mu g/m}^3$, medián $11,9 \text{ \mu g/m}^3$. Tyto hodnoty jsou velmi podobné hodnotám, které byly zjištěny v pracích zahraničních autorů a leží spíše u dolní hranice rozmezí koncentrací.

Jednotlivé dny kampaně můžeme rozdělit podle typu velikostní distribuce submikronových částic do 4 skupin: dny, kdy převažuje monomodální distribuce s maximem okolo 100 nm, dny s bimodální distribucí, kdy k původnímu maximu přibýlo maximum okolo 30 nm, dny v období srážek (monomodální distribuce s nízkou koncentrací počtu částic) a dny, ve kterých došlo ke vzniku nových částic.

Vznik nových částic se uskutečnil ve dnech 28.1. – 29.1.2008. Tomu předcházelo vymytí aerosolu deštěm a následný pokles relativní vlhkosti pod 40 %. Důsledkem procesu byla nejvyšší koncentrace počtu částic první den, druhý den pak nejvyšší hmotnostní koncentrace částic v obci za celou měřicí kampaň. Ze 40 maximálních hodnot koncentrace počtu částic jich bylo naměřeno 29 ve dnech, kdy došlo k nukleaci. 99 % percentil hodnot koncentrací počtu / hmotnosti částic se vyskytl mezi 16:30 – 21:00 hod / 17:30 – 19:30 hod, tzn. v časech zvýšené intenzity lokálního vytápění.

Hmotnostní koncentrace dosahují maxima, pohybuje-li se teplota mezi 0 – 4 °C a při rychlosti větru do 3 m/s. Koncentrace počtu částic vykazuje maxima do rychlosti větru 3 m/s. Vliv teploty na koncentraci počtu částic není patrný a na 5 % hladině testu jsou veličiny navzájem nezávislé. Změna kontinentálního proudění vzdušných mas se na charakteristice submikronového aerosolu neprojevila.

Obdobně jako typizace velikostních distribucí vede ke třem typům i odhad zdroje submikronových částic v obci Mokrý vede ke třem hlavním zdrojům. Jsou to – vznik nových částic, lokální vytápění a doprava.

Lokální vytápění nejvyšší měrou přispívalo k jednomodální distribuci atmosférického aerosolu s maximem kolem 100 nm. Doprava (mobilní zdroje) přispívala částicemi o aerodynamickém průměru pod 40 nm, společně s vytápěním tak v několika málo dnech byla zaznamenána bimodální distribuce, kdy k maximu 100 nm přibylo další okolo 30 nm.

Velmi zajímavé je zjištění, že důsledkem nukleace a následného kondenzačního růstu částic jsou největší koncentrace počtu / hmotnosti submikronového aerosolu v obci za sledované období. Na základě toho lze předpokládat, že snížení dopravního zatížení ani usměrnění lokálního vytápění např. přechodem k ekologičtějších způsobům nemusí vždy vést ke snížení koncentrací počtu / hmotnosti submikronového aerosolu. Na druhou stranu lokální topeniště mohou zapříčinit nukleaci aerosolu emisí těkavých organických látek, které se mohou za vhodných podmínek velmi rychle oxidovat na sloučeniny s nízkou tenzí a fungovat jako prekurzory nukleace. Podrobné vyšetření příčin nukleace v atmosféře je velmi komplikovaný úkol, ale zároveň klíč k dalšímu poznání procesů ovlivňující koncentraci submikronového aerosolu v ovzduší.



6. Použitá literatura

Boman C. (2005): Particulate and gaseous emissions from residential biomass combustion, Ph.D. Thesis, Energy Technology and Thermal Process Chemistry, Sweden. Dostupné na: <http://www.diva-portal.org/umu/theses/index.xsql?lang=en>

Centrum dopravního výzkumu (CDV), Ministerstvo dopravy a spojů ČR (2006): Prašnost z dopravy a její vlivy na imisní zatížení ovzduší suspendovanými částicemi, Výroční zpráva za rok 2005

Curtius J. (2006): Nucleation of atmospheric aerosol particles, C. R. Physique 7, 1027–1045

Davidson I.C., Phalen F.R., Solomon A.P. (2005): Airborne particulate matter and Human health: A review, Aerosol Science and Technology 39, 737-749

EEA Report (2007): Air pollution in Europe 1990 – 2004, dostupné na www.eea.europa.eu

Englert N. (2004): Fine particles and human health – a review of epidemiological studies, Toxicology Letters 149, 235-242

Glasius M., Ketzel M., Wahlin P., Jensen B., Monster J., Berkowicz R., Palmgren F. (2006): Impact of wood combustion on particle levels in a residential area in Denmark, Atmospheric Environment 40 (2006), 7115 – 7124

Godleski J. J., Verrier R. L., Koutrakis P., Catalano P., Coull B., Reinisch U. (2000): Mechanisms of morbidity and mortality from exposure to ambient air particles. Res Rep Health Eff Inst 91, 5–88

Hering S.V., Kreisberg N.M., Stolzenburg M.R., Lewis G.S. (2007): Comparison of particle size distributions an urban and agricultural sites in California's San Joaquin Valley, Aerosol Science and Technology 41, 86 – 96

Hinds C. W. (1999): Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles, Wiley, New York, 1-50

Holoubek I., Bednář J., Fara M., Fiala J., Hovorka J., Hůnová I., Klán P., Kohoutek J., Komprda J., Leníček J., Skybová M., Vokounová Š., Závodský D. (2005): Troposférická chemie, Masarykova univerzita, Brno, 76-87

Hovorka J., Holoubek I., Hůnová I., Kalvová J., Moldan B., Přibil R. (2004): Aktuální otázky znečištění ovzduší, Karolinum, Praha, 65-75

Hůnová I., Janoušková S. (2004): Úvod do problematiky znečištění venkovního ovzduší, Karolinum, 48 – 57

Johansson L.S., Leckner B., Gustavsson L., Cooper D., Tullin C., Potter A. (2004): Emission characteristics of modern and old-type residential boilers fired with wood logs and wood pellets, Atmospheric Environment 38, 4183 – 4195

Jones M. A., Harrison M. R. (2006): Assessment of natural component of PM₁₀ at UK urban and rural sites, Atmospheric Environment 40 (2006), 7733-7741

Kotlík B., Kazmarová H., Kvasničková S., Keder J. (2005): Kvalita ovzduší na českých vesnicích – stav v roce 2003 (malá sídla), Ochrana ovzduší 1/2005, 26-28

Krecl P., Strom J., Johansson Ch. (2008): Diurnal variation of atmospheric aerosol during the wood combustion season in Northern Sweden, Atmospheric Environment 42 (2008), 4113 – 4125

Kulmala M., Kerminen M-V. (2008): On the formation and growth of atmospheric nanoparticles, Atmospheric Research, 132–150

Kulmala M., Vehkamäki H., Petäjä T., Maso Dal M., Lauri A., Kerminen M-V., Birmili W., McMurry H. P. (2004): Formation and growth rates of ultrafine atmospheric particles: a review of observations, Aerosol Science 35, 143–176

Kulmala M., Lahde T., Ronkko T., Virtanen A., Schuck J. T., Pirjola L., Hameri K., Arnold F., Rothe D., Keskinen J. (2009): Heavy duty diesel engine exhaust aerosol particle and ion measurements, *Environmental Science Technology* 43, 163 - 168

Langner J., Foltescu V.L., Johansson C., Gidhagen L. (2005): Urban scale modeling of particle number concentration in Stockholm, *Atmospheric Environment* 39 (2005), 1711-1725

Liu S., Hu M., Wu Z., Wehner B., Wiedensohler A., Cheng Y. (2008): Aerosol number size distribution and new particle formation at rural/coastal site in Pearl River Delta (PRD) of China, *Atmospheric Environment* 42 (2008), 6275 – 6283

Manuály k přístroji APNA 360, APOA 360, Horiba

Manuály k přístroji SMPS, TSI

Mikuška M., Moravec P., Pokorný R., Smolík J., Večeřa Z., Ždímal V. (2005): Dynamika početních rozdělení velikostí aerosolových částic při experimentální kampani na stanici Bílý Kříž, *Ovzduší* 2005, 182-185

Pandis N.S., Seinfeld H.J. (2006): *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change*, J.Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey

Pekkanen J. et al. (2002): Particulate air pollution and risk of ST-segment depression during repeated submaximal exercise tests among subjects with coronary heart disease: the Exposure and Risk Assessment for Fine and Ultrafine Particles in Ambient Air (ULTRA) study, *Circulation* 106 (8), 933 – 938

Rodriguez S., Van Dingenen R., Putaud P.-J., Santos D.-M. S., Roselli D. (2005): Nucleation and growth of new particles in the rural atmosphere of Northern Italy: relationship to air quality monitoring, *Atmospheric Environment* 39 (2005), 6734 - 6746

Staňková Z. (2008): Submikronový aerosol v ovzduší malého sídla blízko dálnice, diplomová práce, Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy, Ústav pro životní prostředí

Stehlík J. (2003): Spalovací procesy – dominantní příčiny znečišťování ovzduší, Kompendium ochrany kvality ovzduší 3, Ochrana ovzduší 5 - 6

Sucharová J., Suchara I. (2006): Sloučeniny dusíku v atmosféře, jejich zdroje depozice, účinky a bioindikace atmosférického spadu, Ochrana ovzduší 1/2006, 20 - 24

U. S. Environmental Protection Agency (2004): Air Quality criteria for particulate matter, Volume I, dostupné na <http://cfpub.epa.gov/ncea/cfm/partmatt.cfm> EPA ?

Weimer S., Mohr C., Richter R., Keller J., Mohr M., Prévot H.S.A., Baltensperger U. (2009): Mobile measurement of aerosol number and volume size distributions in an Alpine ~~Halley~~ ^{halley}: Influence of traffic versus wood burning, Atmospheric Environment 43, 624 – 630

WHO (2005): Air Quality Guidelines, Global Update 2005, dostupné na www.euro.who.int

Internetové zdroje:

www.horiba.com

www.epa.gov

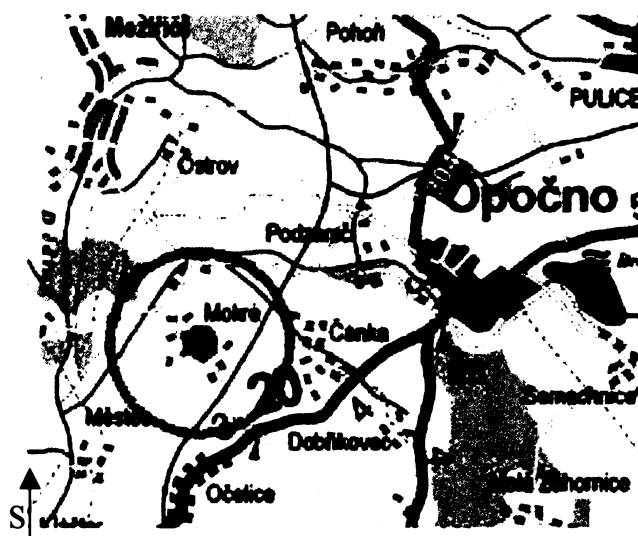
www.obecmokre.cz

www.who.int

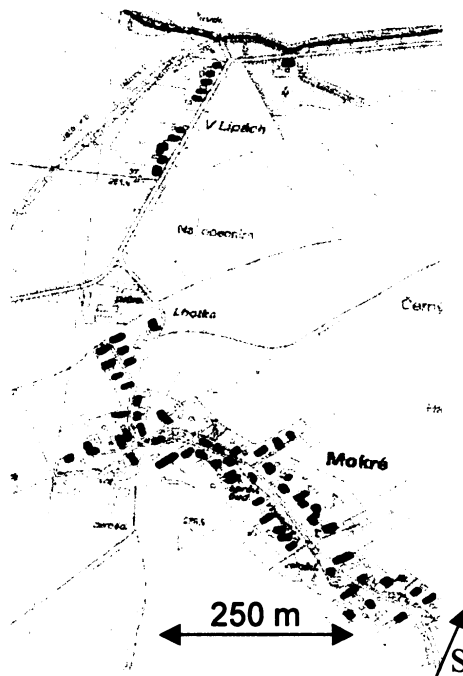
www.tsi.com

7. Přílohy

7.1 Mapová příloha

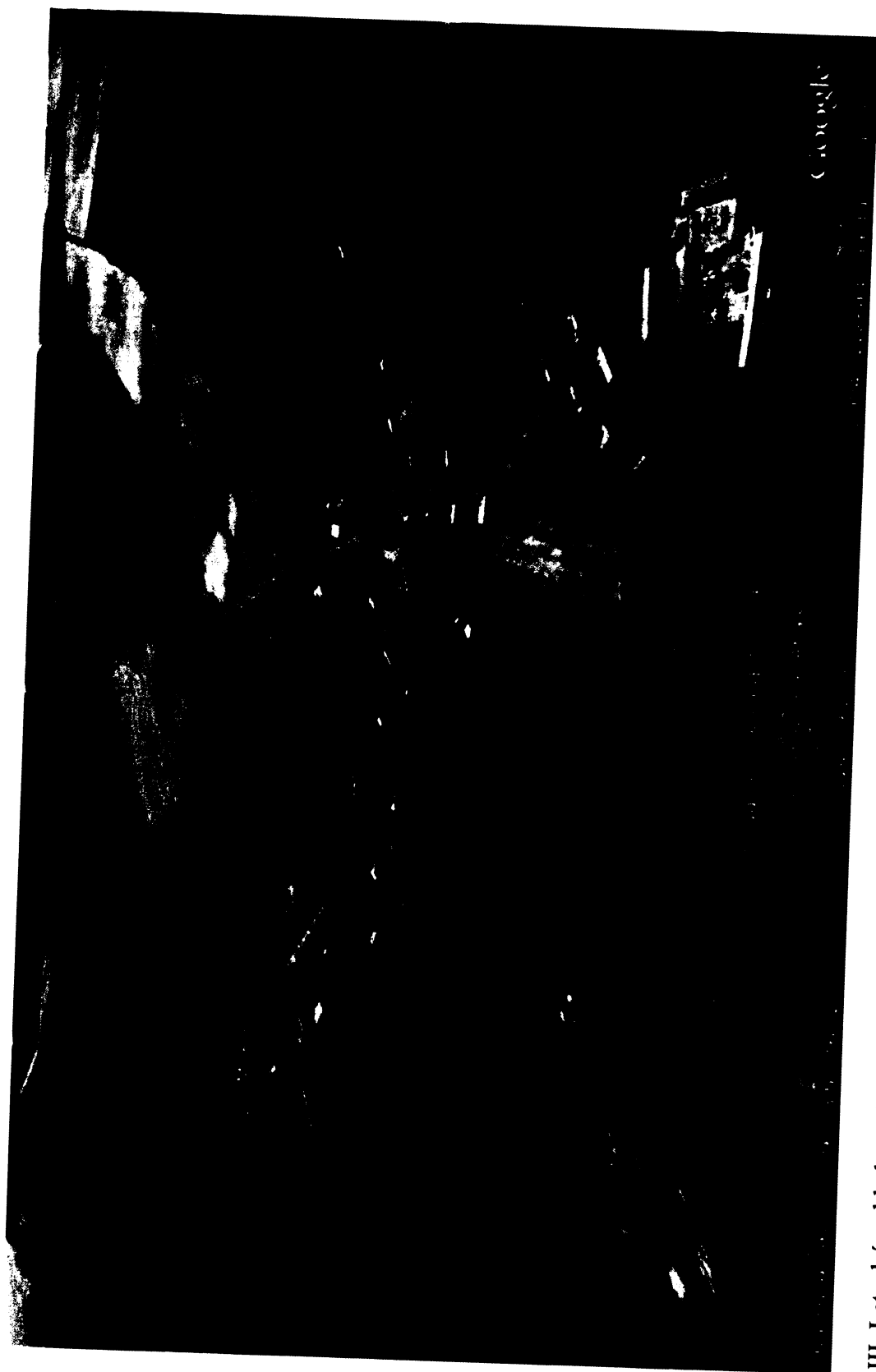


I. Umístění Mokrého na mapě
($50^{\circ}15'43''$ s.š., $16^{\circ}3'56''$ v.d., 262 m. n m.)



II. Letecký pohled znázorňující poměry v obci a okolní krajinu a vedle vlastní zpracování mapy Mokrého, zeleně jsou vyznačeny trvale obydlené domy, černě neobydlené domy nebo chaty sloužící k rekreaci, a červeně jsou vyznačena veřejná místa (obchod a obecní úřad).

(Zdroj: www.obecmokre.cz)



III. Letecký pohled na obec společně s větrnou růžicí umístěnou do místa odběru.

7.2 Tabulková příloha

I. Koncentrace počtu částic submikronového aerosolu v jednotlivých dnech kampaně [# / cm³]

Datum	Aritmetický průměr	Směrodatná odchylka	Sum	Minimum	Q1 (25%)	Median	Q3 (75%)	Maximum	Počet měření
24.1.2008	6377,6	1568,1	1033176,5	4239	5252,8	6320,5	7024,8	13977,2	162
25.1.2008	4792,1	3790,6	1380124,3	815	2382,9	3808,8	6199,6	23598,9	288
26.1.2008	3862	1892,6	1112277,7	2332	2949,5	3278,8	3747	14137,1	288
27.1.2008	2126,8	1022,3	604001,3	534,6	1229,1	2156,6	2848	4911,1	284
28.1.2008	7958,7	4024,2	2292092,2	1302,6	4729,3	8505,6	10461,3	21116,7	288
29.1.2008	7489,6	2020,8	2156990,2	3362,1	6130,7	7357,2	8480,5	22687,5	288
30.1.2008	3898,2	1650,3	1122673,2	187,7	2693,8	3558,2	4655,5	10170,3	288
31.1.2008	2993,1	2408,1	862022,1	964,9	1518,7	2365,5	3820,9	11215,9	288
1.2.2008	3428,2	1163,2	730197,9	1651,8	2709	3190,6	4048,5	10661,8	213
2.2.2008	2669,2	822,8	768723,5	1204	2037	2677,1	3151,2	8189,5	288
3.2.2008	3766	1156,4	764487,5	2033	2924,5	3624,8	4162,3	9073	203
4.2.2008	3581,5	1185,2	1031466,6	1968,4	3016	3466,4	4026,2	1869	288
5.2.2008	4919,7	1294,6	1416881,5	2060	4185,4	4801,1	5610,1	11026,9	288
6.2.2008	3191	1208,2	919021,5	1724,5	2414,6	2906,3	3543,4	10606,3	288
7.2.2008	1362	547,3	152546,6	658,2	901,5	1324,8	1618,6	3625,5	112

II. Hmotnostní koncentrace submikronového aerosolu v jednotlivých dnech kampaně [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

Datum	Aritmetický průměr	Směrodatná odchylka	Sum	Minimum	Q1 (25%)	Median	Q3 (75%)	Maximum	Počet měření
24.1.2008	23,6	7	3821,2	12,9	17,9	22,3	28,4	58	162
25.1.2008	9,1	7,6	2616	0,9	3,9	6,9	11,8	84,6	288
26.1.2008	12,6	7	3637,5	6,7	9,1	11,1	12,7	58,3	288
27.1.2008	5,8	3,6	1632,9	0,2	2,4	5,7	8,2	19,1	284
28.1.2008	11,9	10	3444,8	0,9	3,9	8,1	18	46,4	288
29.1.2008	39,3	8	11303	22,4	34,2	38,4	42,8	80	288
30.1.2008	27,6	8,8	7957,8	13,1	21	25,8	32,2	58,6	288
31.1.2008	10,3	7,2	2977,5	2,3	5,8	8,4	11,4	37,2	288
1.2.2008	18,4	5,4	3923	6,9	14,8	18,7	22,1	29,3	213
2.2.2008	11	8,5	3171,2	1,1	5,4	7,6	13,5	38,1	288
3.2.2008	9,5	2,9	1928,4	3,7	8,1	9,3	10,4	25,7	203
4.2.2008	22	8,2	6341,9	7,4	15,9	22,1	27,1	73,6	288
5.2.2008	26,6	9,2	7671,1	8,8	19,3	27,6	32,6	55,4	288
6.2.2008	6	2,6	1731,2	1,7	4,3	5,9	7,4	16,4	288
7.2.2008	3	1,2	343,4	1,3	2,1	2,8	3,8	6,9	112

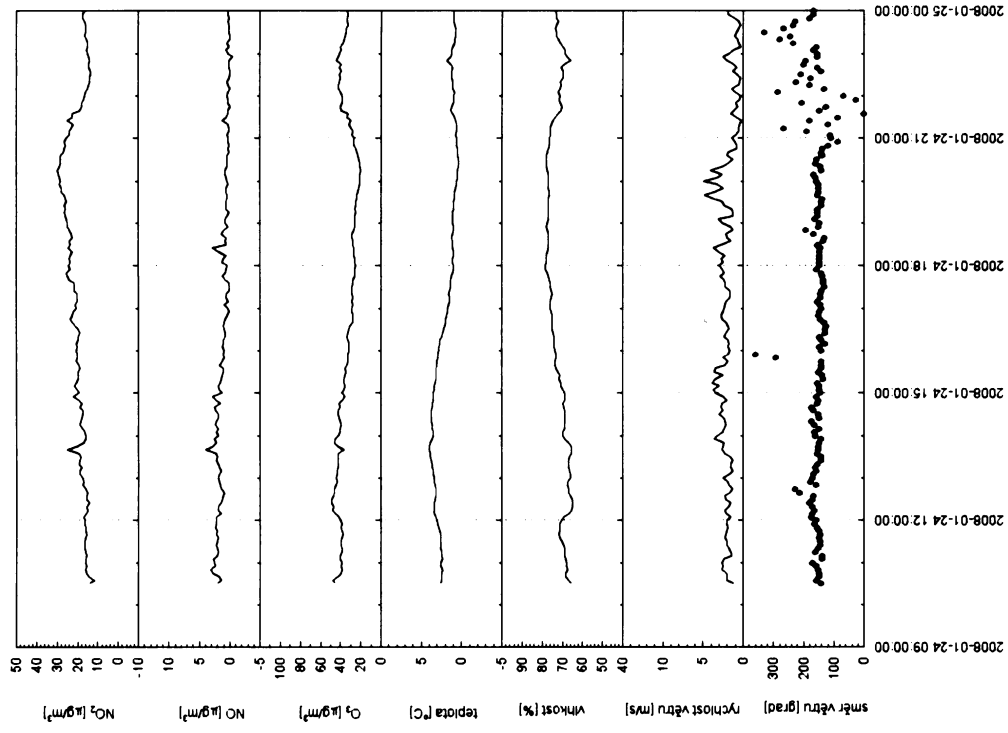
III. Koncentrace NO₂ v jednotlivých dnech kampaně [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

Datum	Aritmetický průměr	Směrodatná odchylka	Sum	Minimum	Q1 (25%)	Median	Q3 (75%)	Maximum	Počet měření
24.1.2008	20	4,4	3239,7	11,4	16,1	19,4	23,5	29,7	162
25.1.2008	9,8	5,1	2810,7	1,3	5,5	9,3	13,2	27,3	288
26.1.2008	11,3	3,1	3261,6	6,9	9,4	10,5	12	24,7	288
27.1.2008	5	3,3	1444,6	0,01	1,7	5	8,3	9,8	288
28.1.2008	13,3	9,0	3831,9	0,07	5,8	14	22,1	33,1	288
29.1.2008	18,6	3,9	5347,6	11,4	15,5	18,3	20,6	28,1	288
30.1.2008	15,2	7,0	4387,4	7	8,9	12,5	21,4	33,7	288
31.1.2008	11,5	6,2	3316,1	2,8	7,7	9,8	13	28,6	288
1.2.2008	13	2,9	3739,1	7,4	11,1	12,9	14,8	21,1	288
2.2.2008	7,8	2,8	2244,4	2,1	5,6	7,6	9,8	22,8	288
3.2.2008	6,2	2,6	1770,5	1,9	4,1	5,6	7,9	14,1	288
4.2.2008	6,9	3,2	1972,6	2,9	4,4	5,8	9,2	25,8	288
5.2.2008	19,6	10,6	5650,2	5,8	10,2	17,1	26,1	41,2	288
6.2.2008	7,6	2,2	2191,1	4,6	6,1	7,3	8,7	23,6	288
7.2.2008	3,6	1,3	377,6	1,6	2,6	3,4	4,4	7,3	104

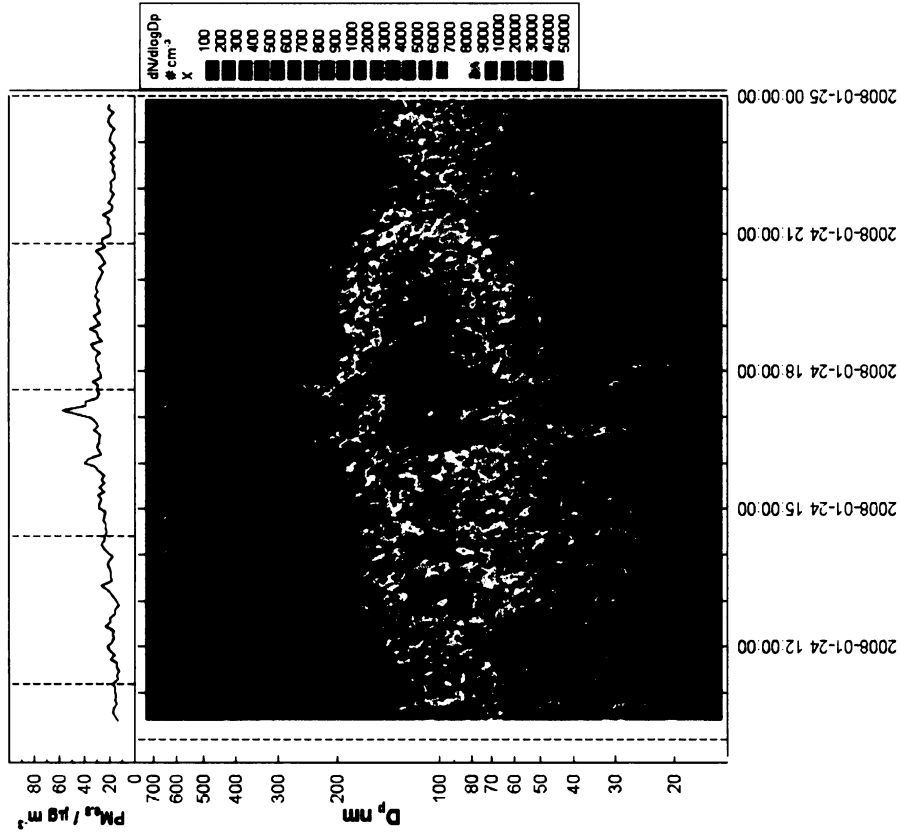
Příloha IV. Koncentrace O₃ v jednotlivých dnech kampaně [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

Datum	Aritmetický průměr	Směrodatná odchylka	Sum	Minimum	Q1 (25%)	Median	Q3 (75%)	Maximum	Počet měření
24.1.2008	34,6	7,4	5604,1	20,7	27,8	35,6	40,6	49,1	162
25.1.2008	61,6	16,4	17746,7	25	55,2	65,7	74,9	84	288
26.1.2008	55,9	8,9	16098,7	29,7	49	54,7	62	73	288
27.1.2008	70,8	14,8	20396,9	51,1	56,7	71,2	82,2	100,3	288
28.1.2008	52,9	22,6	15244,2	12,3	32,4	51,7	73,6	92,6	288
29.1.2008	18,3	7,6	5258,3	5,4	12,7	17,1	22,5	37,3	288
30.1.2008	36,4	12,3	10478,9	7,7	26,3	39,6	47,5	53,8	288
31.1.2008	56,9	20,4	16385,9	8,5	52,3	59,4	71,2	90,1	288
1.2.2008	42,3	9,5	12181,9	23,5	37,9	43,5	49,5	60,1	288
2.2.2008	64,1	15,3	18448,9	35,4	49,4	61,9	79,1	88,3	288
3.2.2008	59,5	17,4	17147,5	30,6	42,3	65,8	71,9	87,4	288
4.2.2008	64,9	8,9	18692,8	31,5	63,9	65,8	68,7	79,2	288
5.2.2008	38,6	20,9	11109,7	5,4	16,4	45,6	55,8	69,3	288
6.2.2008	70,3	11,0	20250,2	51,5	63,6	66,9	79,6	95,2	288
7.2.2008	77,2	3,5	8024,7	67,6	75,9	77,8	79,5	83,1	104

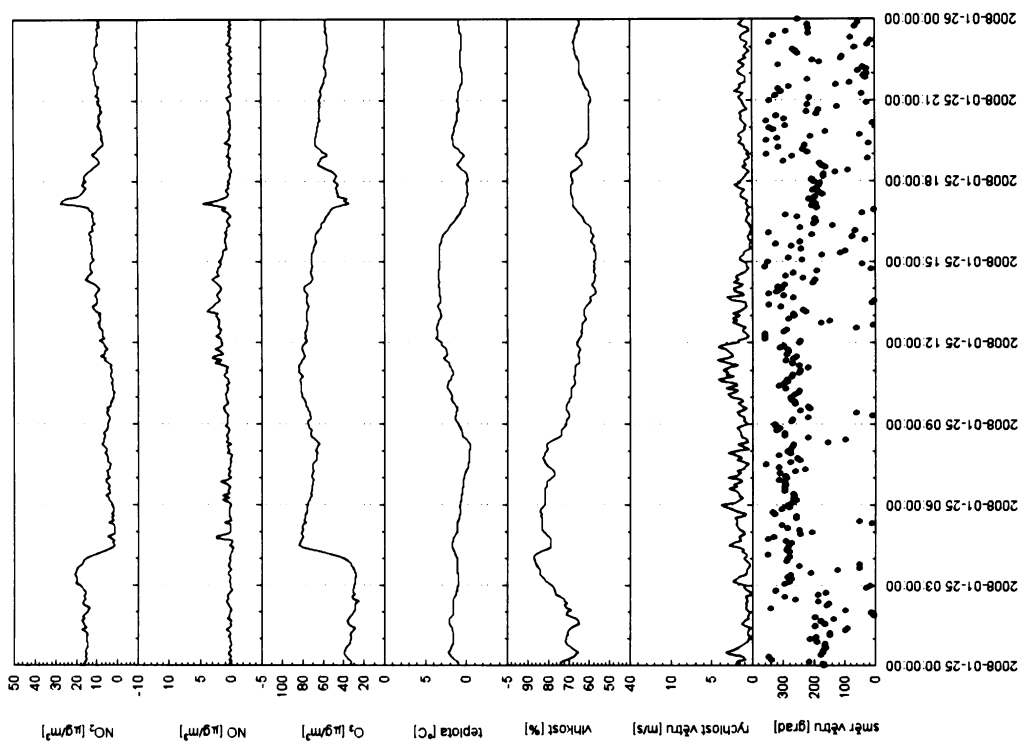
7.3 Obrazová příloha



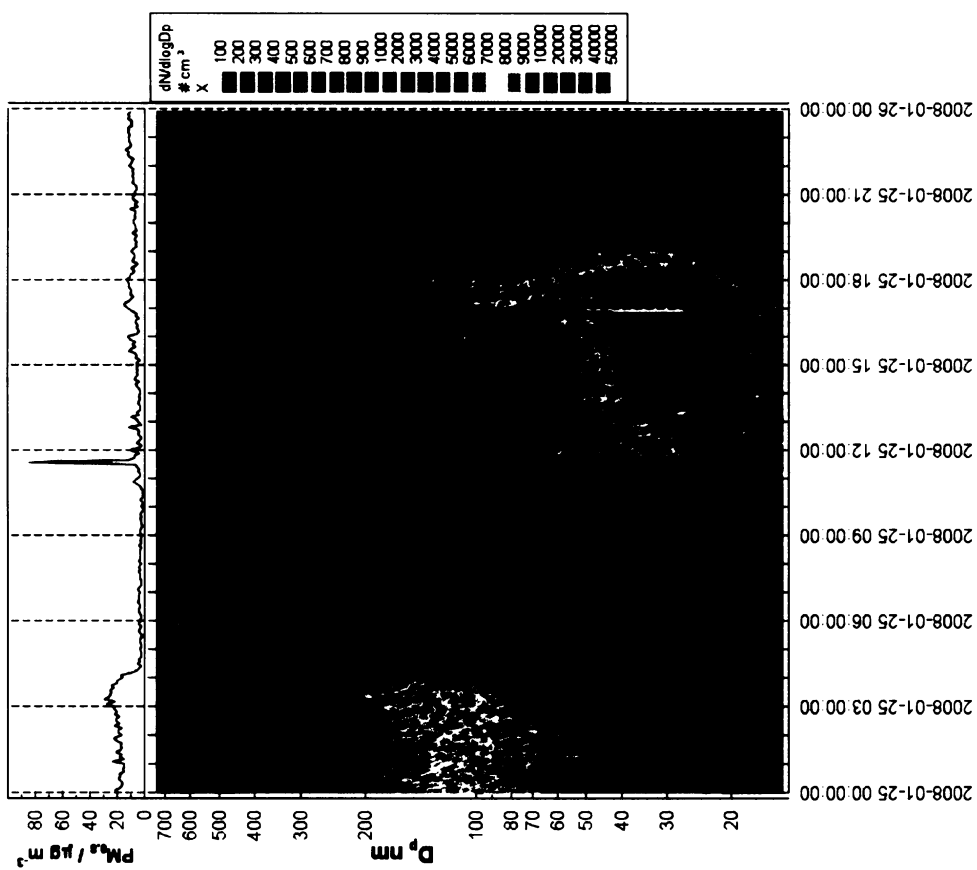
Meteorologické podmínky a plynné složky ze dne 24.1. 2008



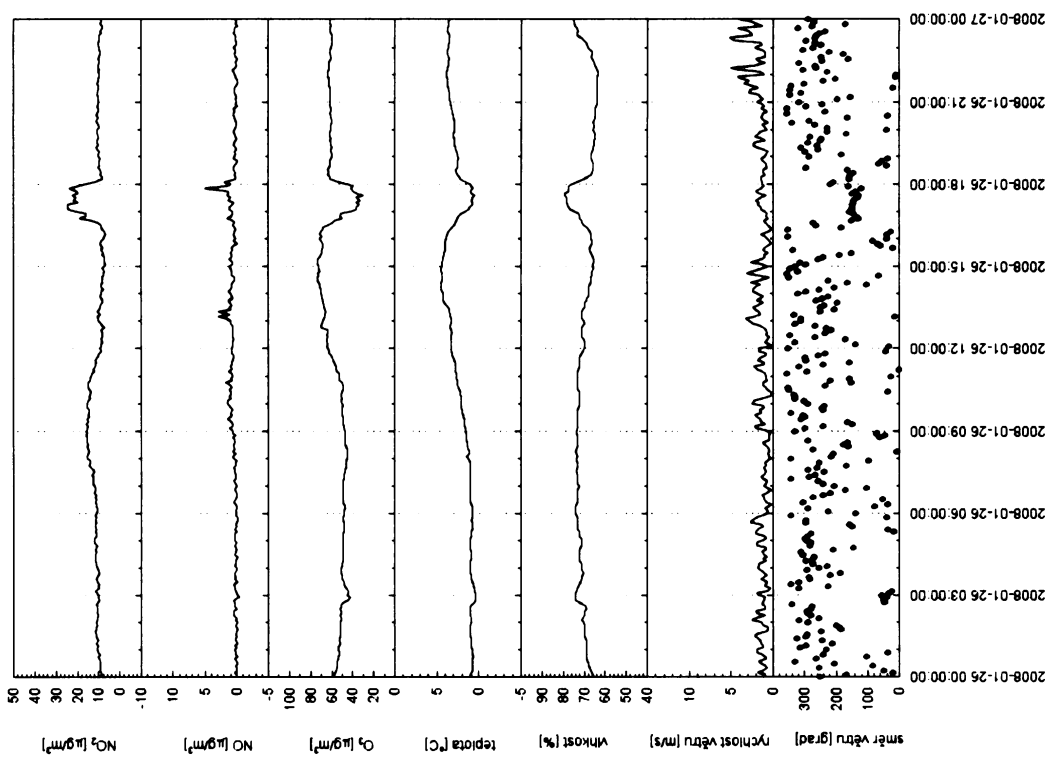
I. Velikostní distribuce aerosolu ze dne 24.1.2008



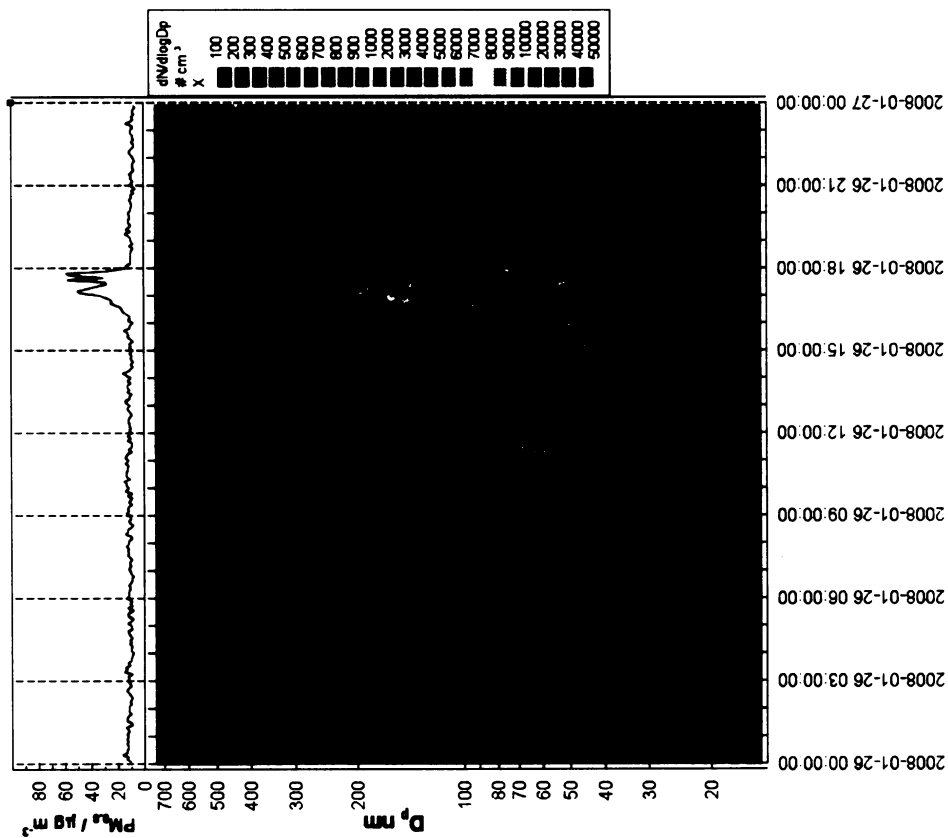
Meteorologické podmínky a plynné složky ze dne 25.1.2008



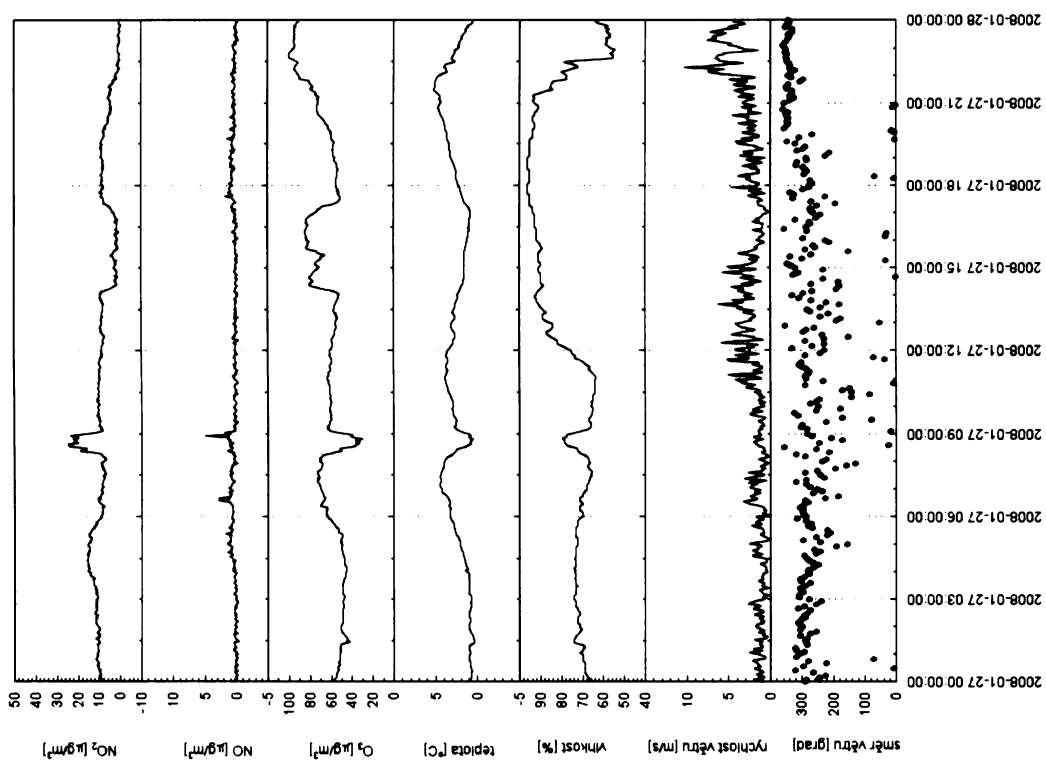
II. Velikostní distribuce aerosolu ze dne 25.1.2008



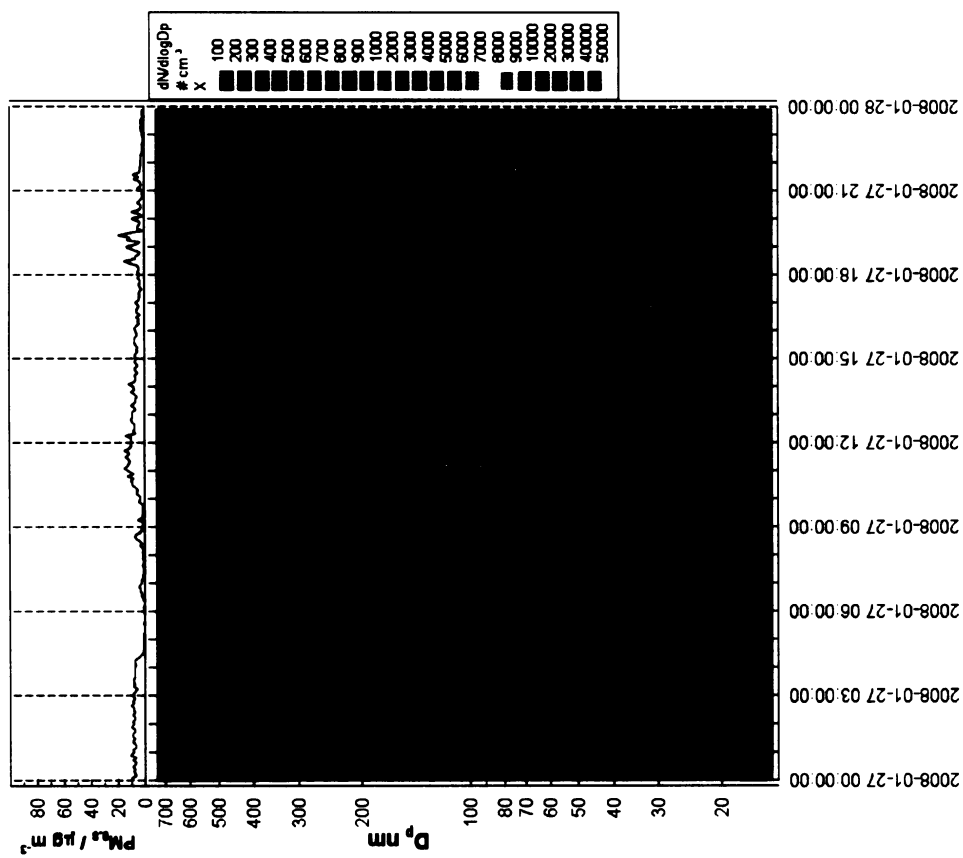
Meteorologické podmínky a plynné složky ze dne 26.1.2008



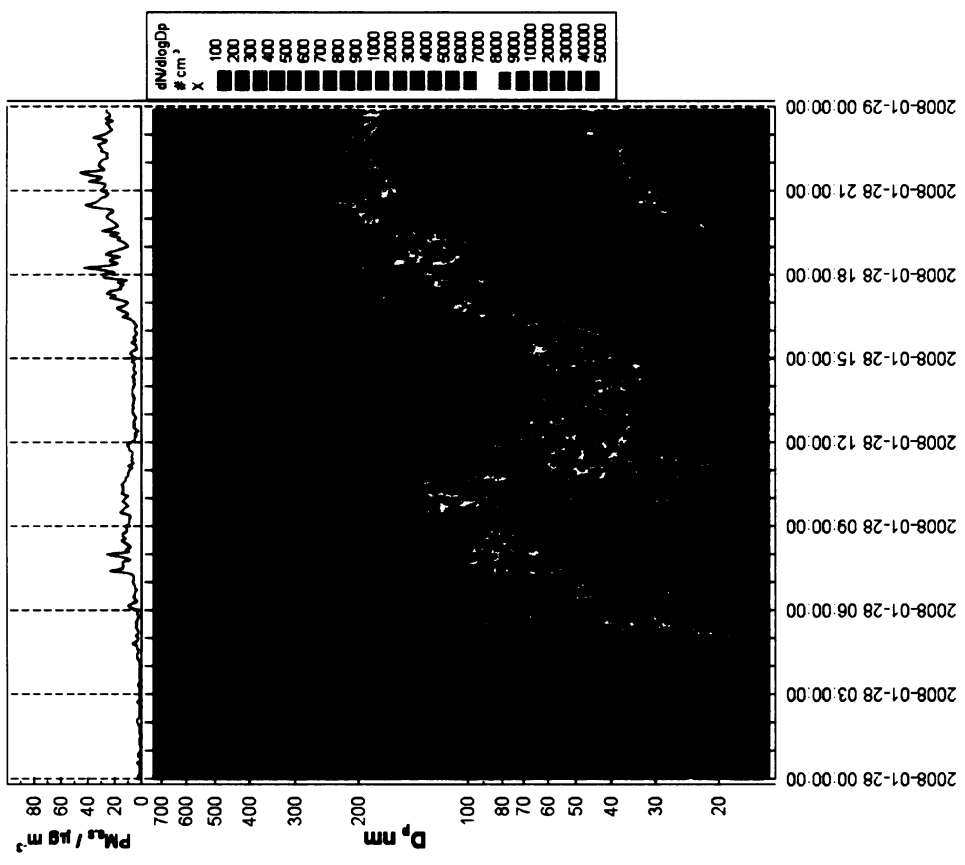
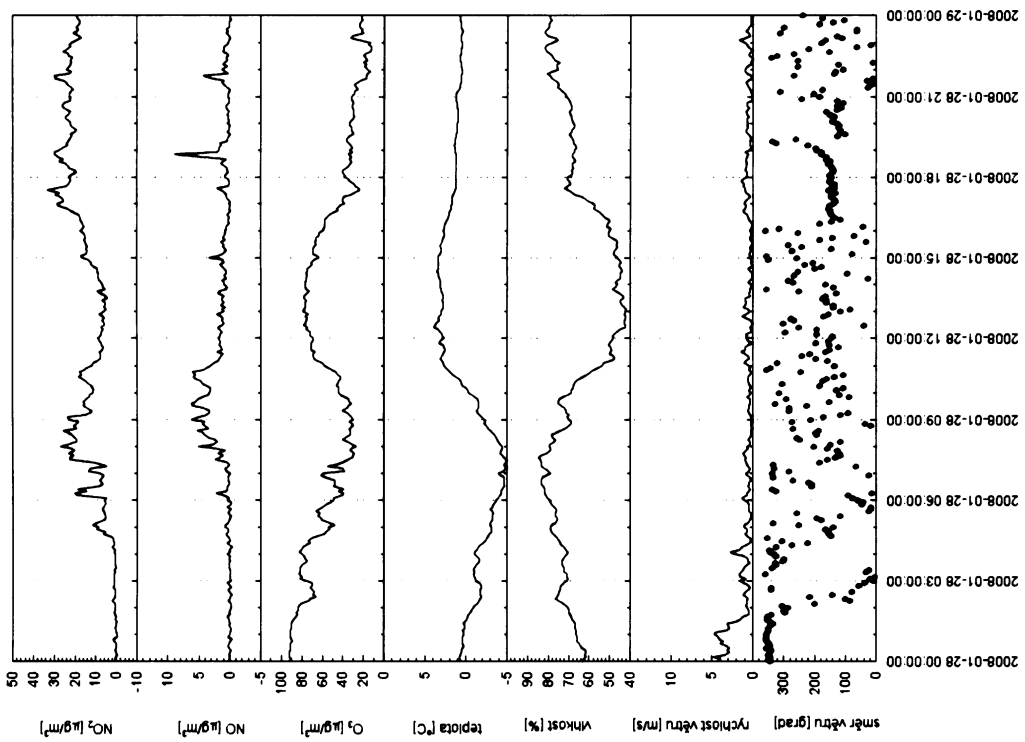
III. Velikostní distribuce aerosolu ze dne 26.1.2008



Meteorologické podmínky, plynné složky ze dne 27.1.2008



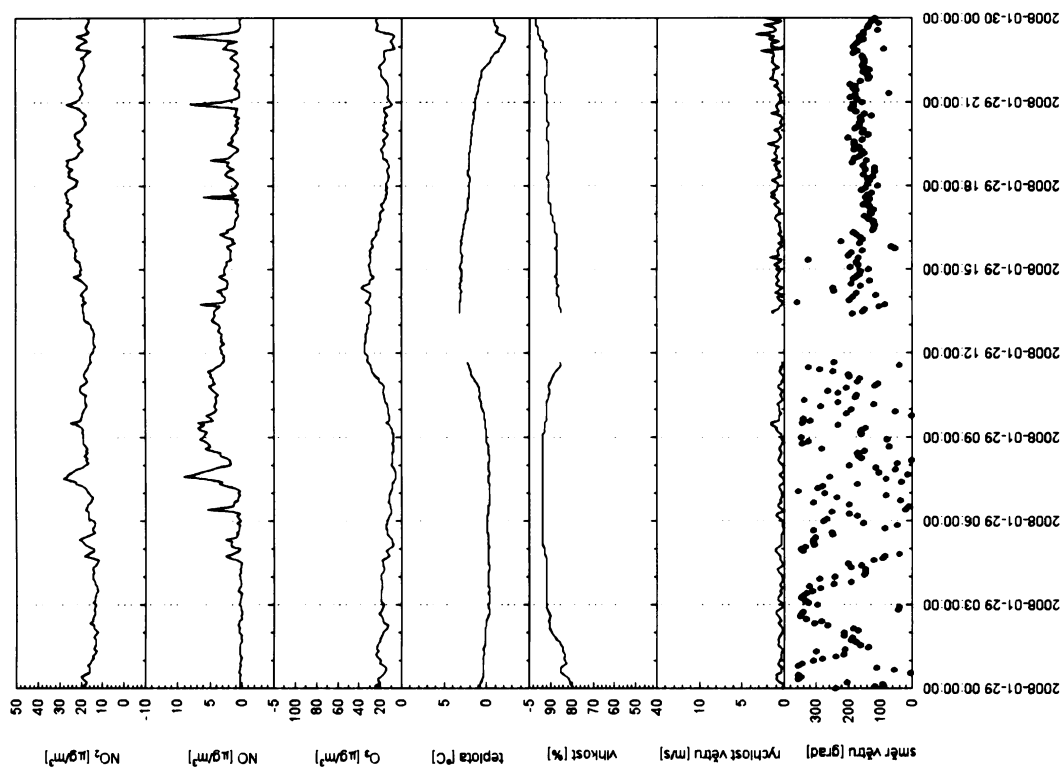
IV. Velikostní distribuce aerosolu ze dne 27.1.2008



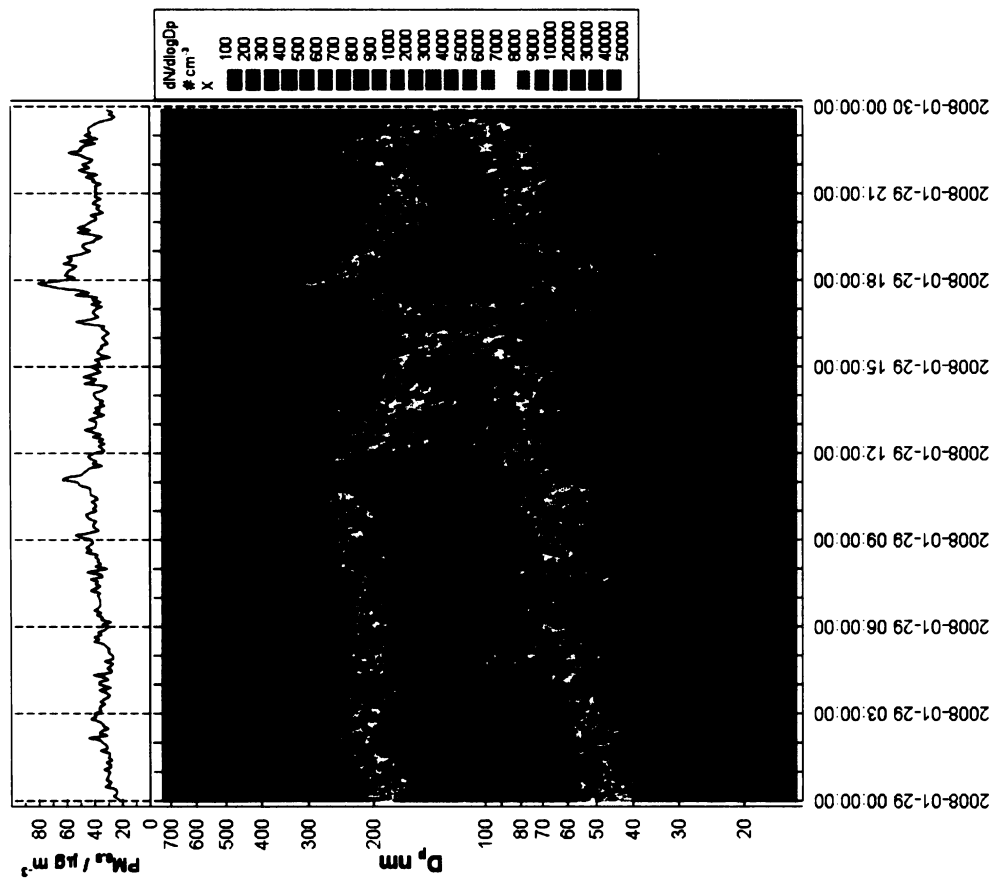
Meteorologické podmínky a plynné složky ze dne 28.1.2008

V. Velikostní distribuce aerosolu ze dne 28.1.2008

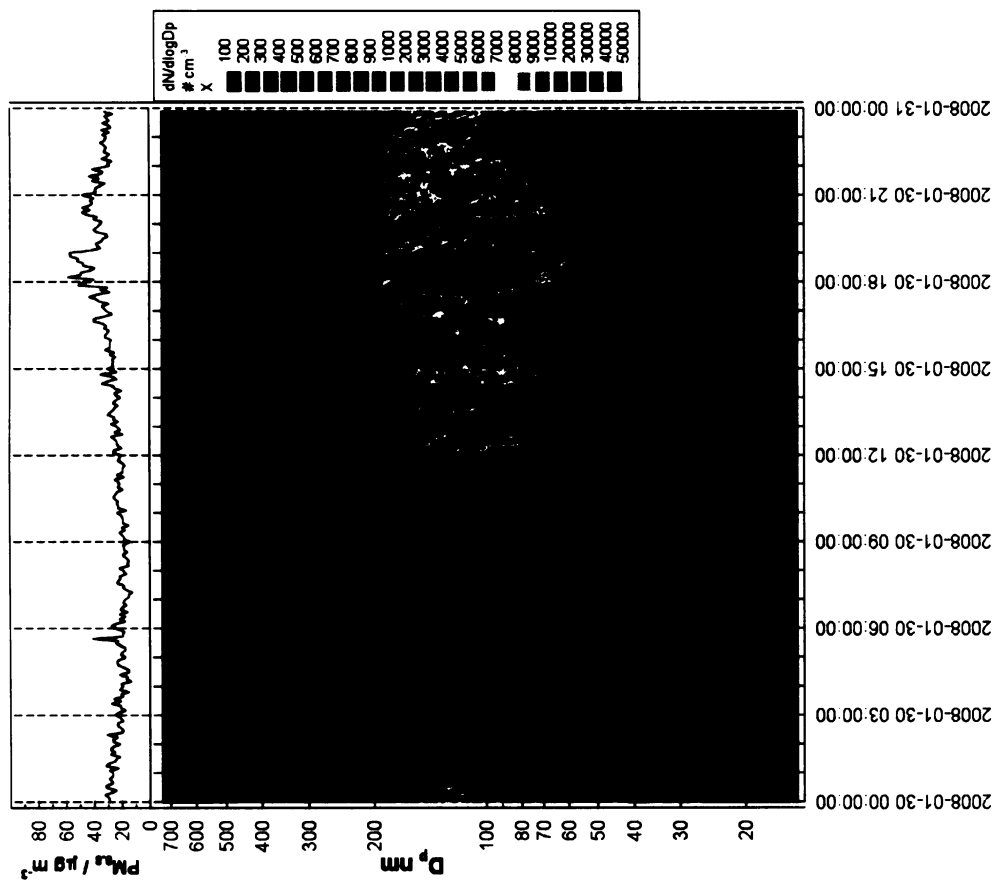
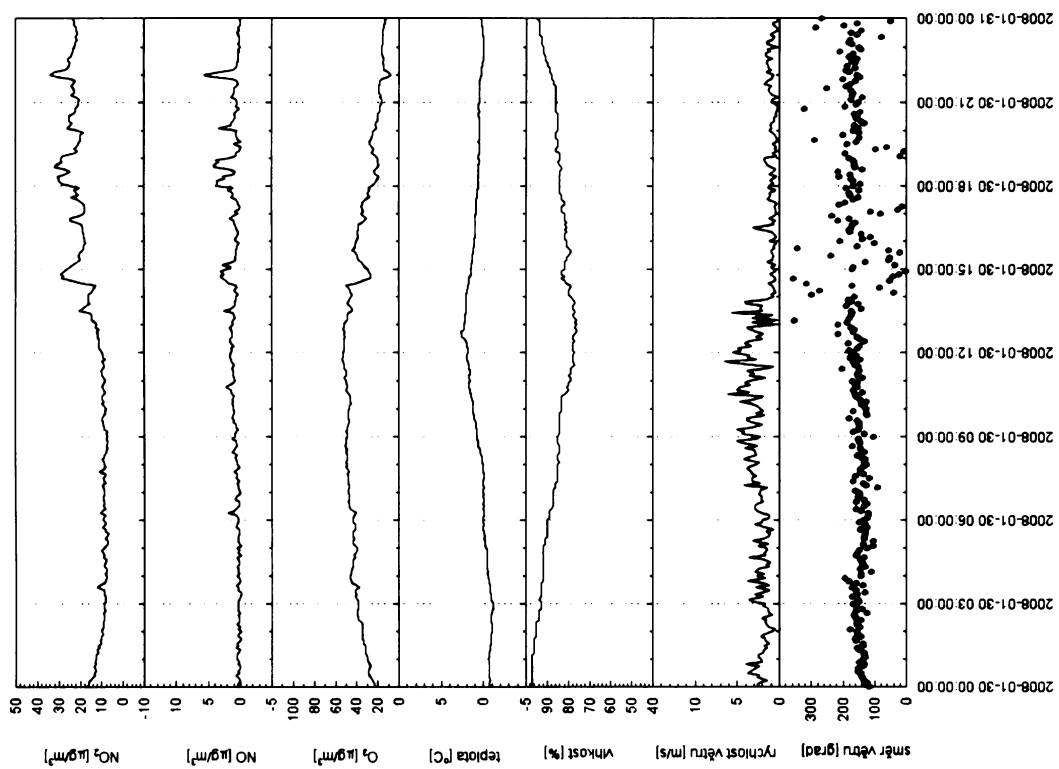
Proč to není na výšce?



Meteorologické podmínky a plynné složky ze dne 29.1.2008

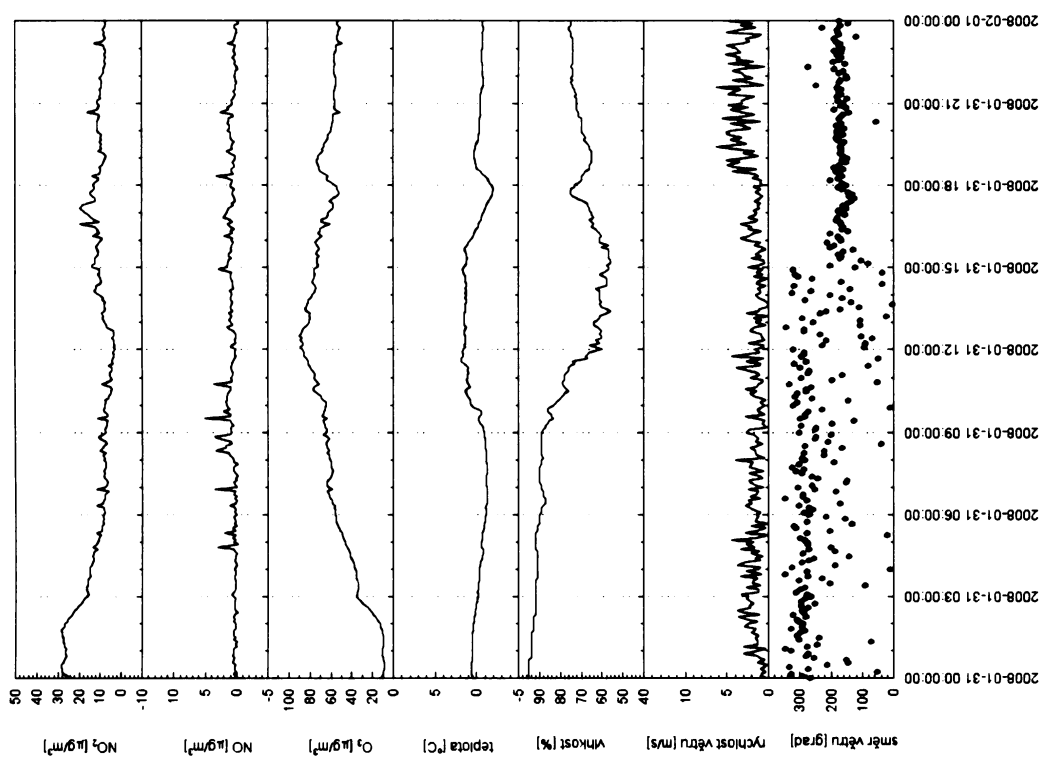


VI. Velikostní distribuce aerosolu ze dne 29.1.2008

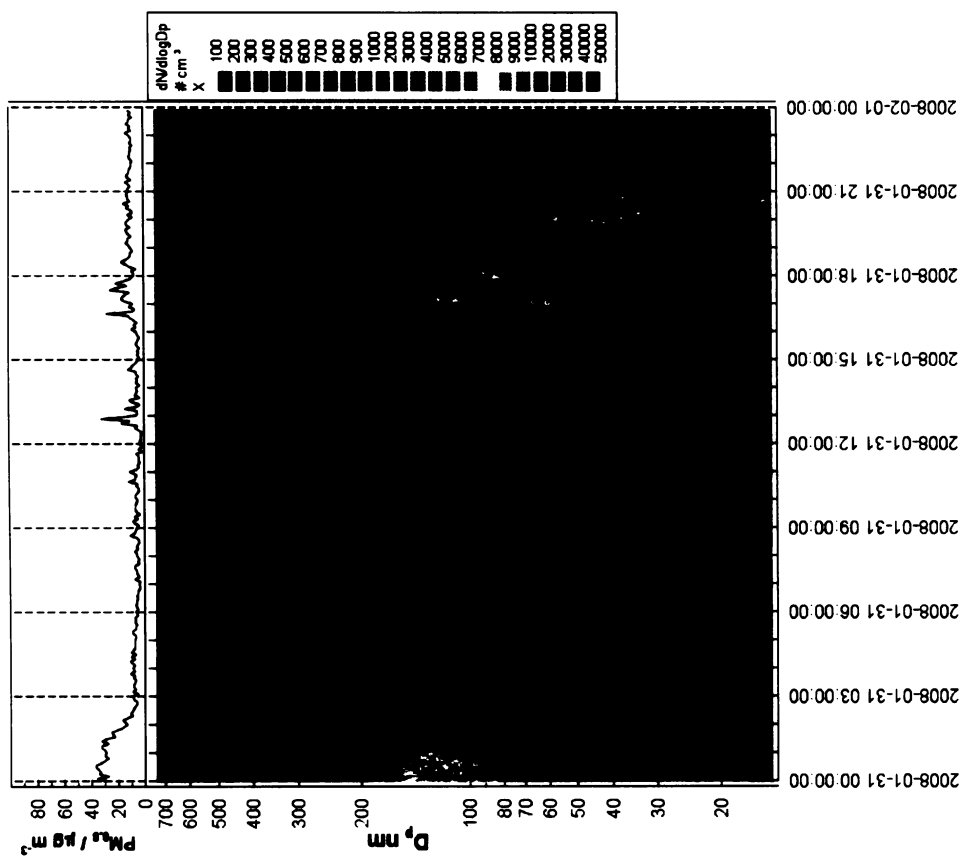


Meteorologické podmínky a plynné složky ze dne 30.1.2008

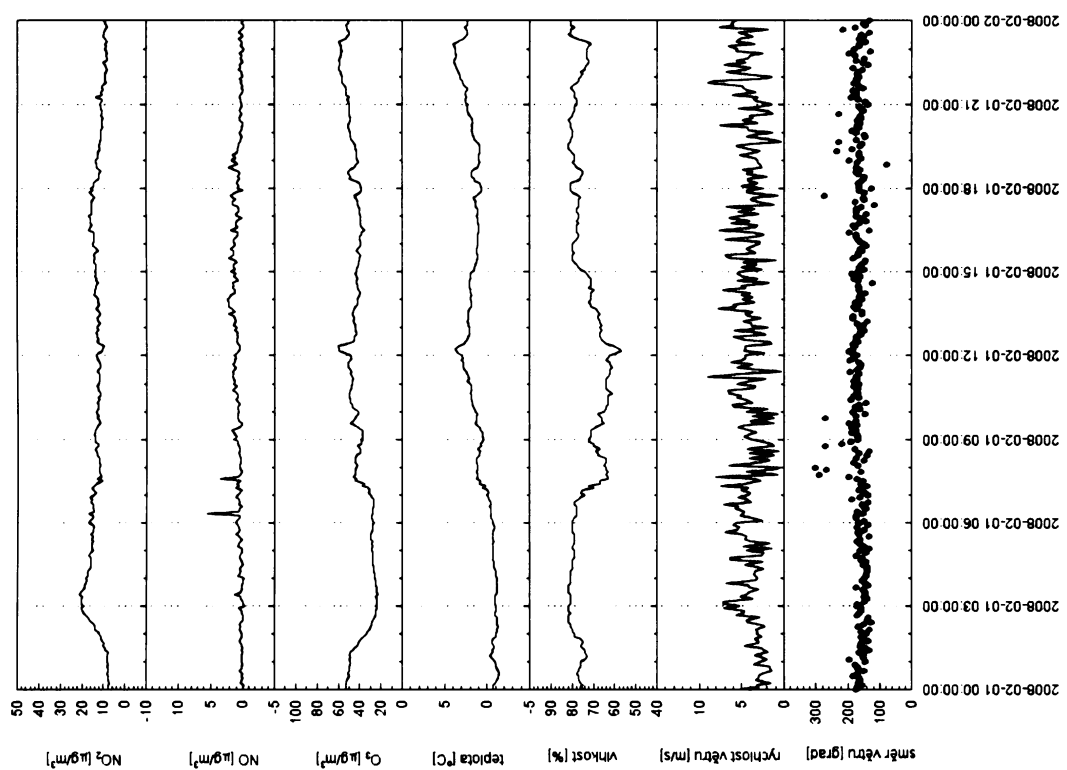
VII. Velikostní distribuce aerosolu ze dne 30.1.2008



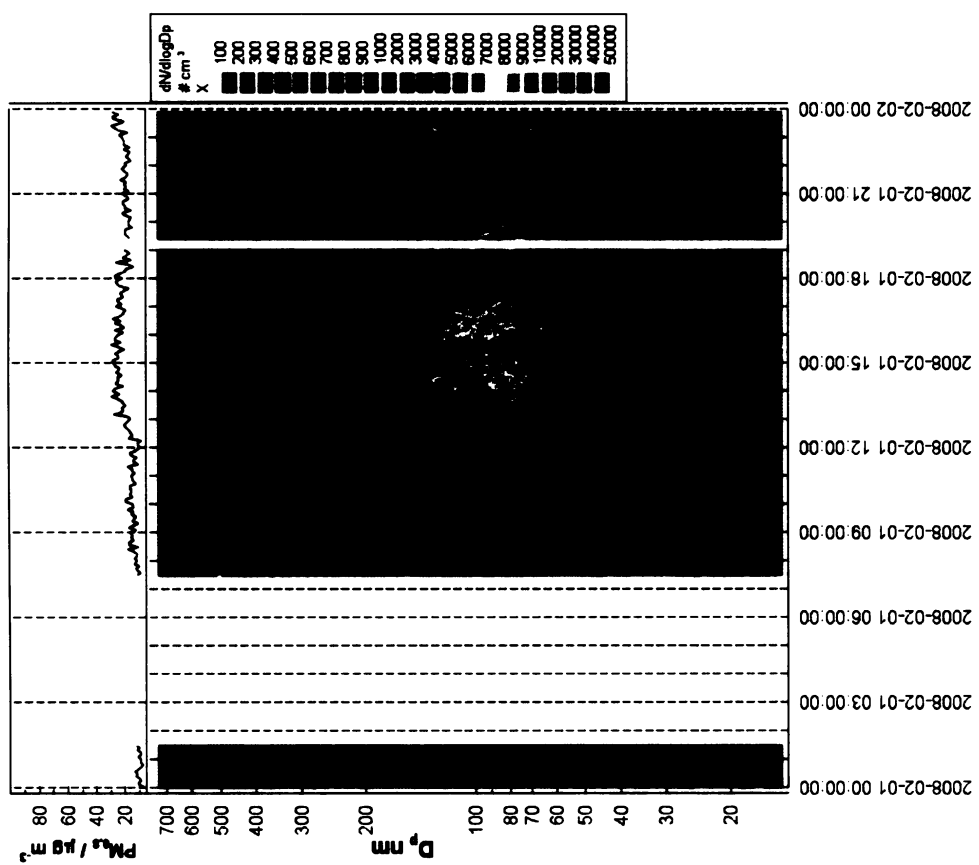
Meteorologické podmínky a plynné složky ze dne 31.1.2008



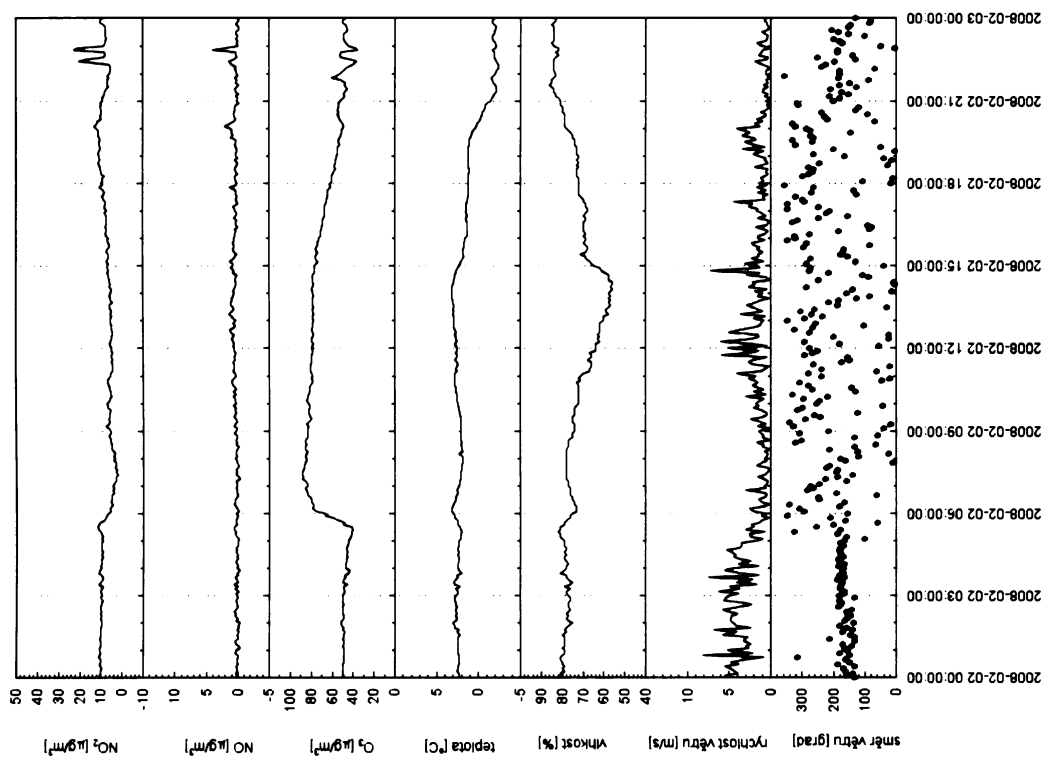
VIII. Velikostní distribuce aerosolu ze dne 31.1.2008



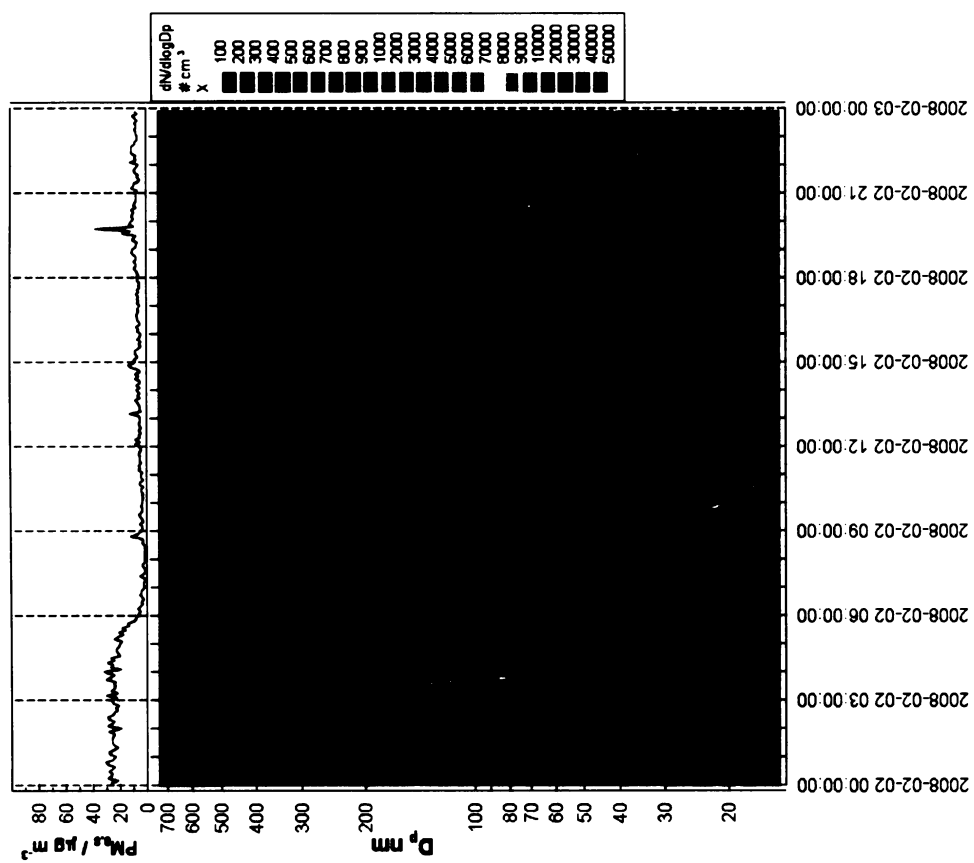
Meteorologické podmínky a plynné složky ze dne 1.2.2008



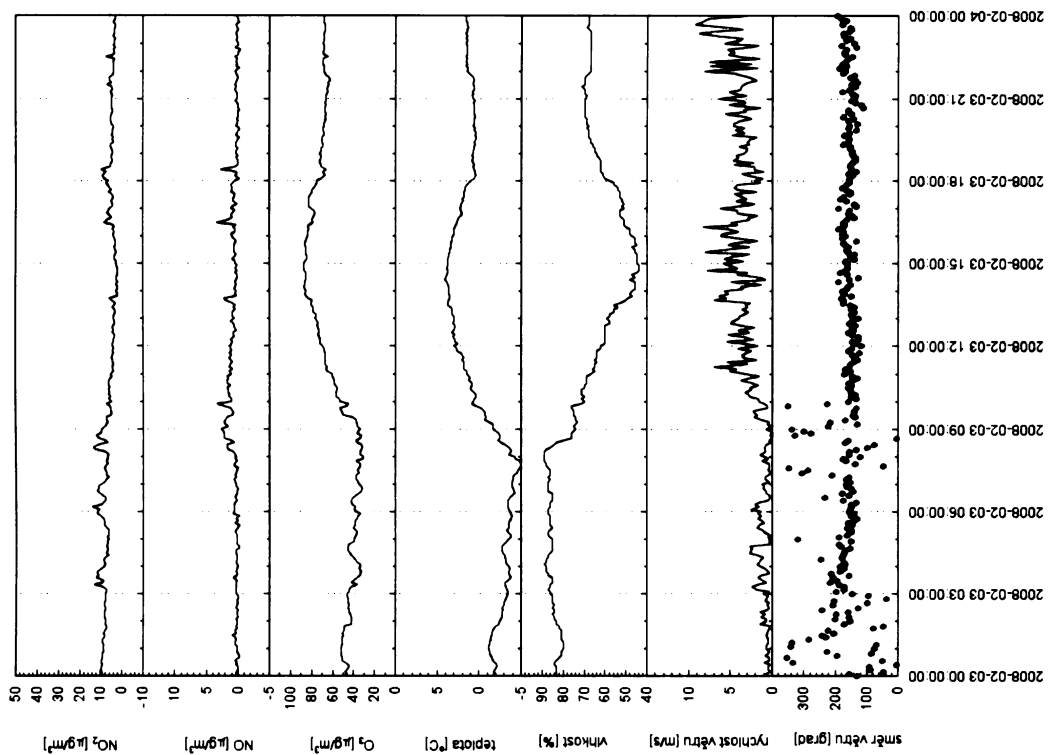
IX. Velikostní distribuce aerosolu ze dne 1.2.2008



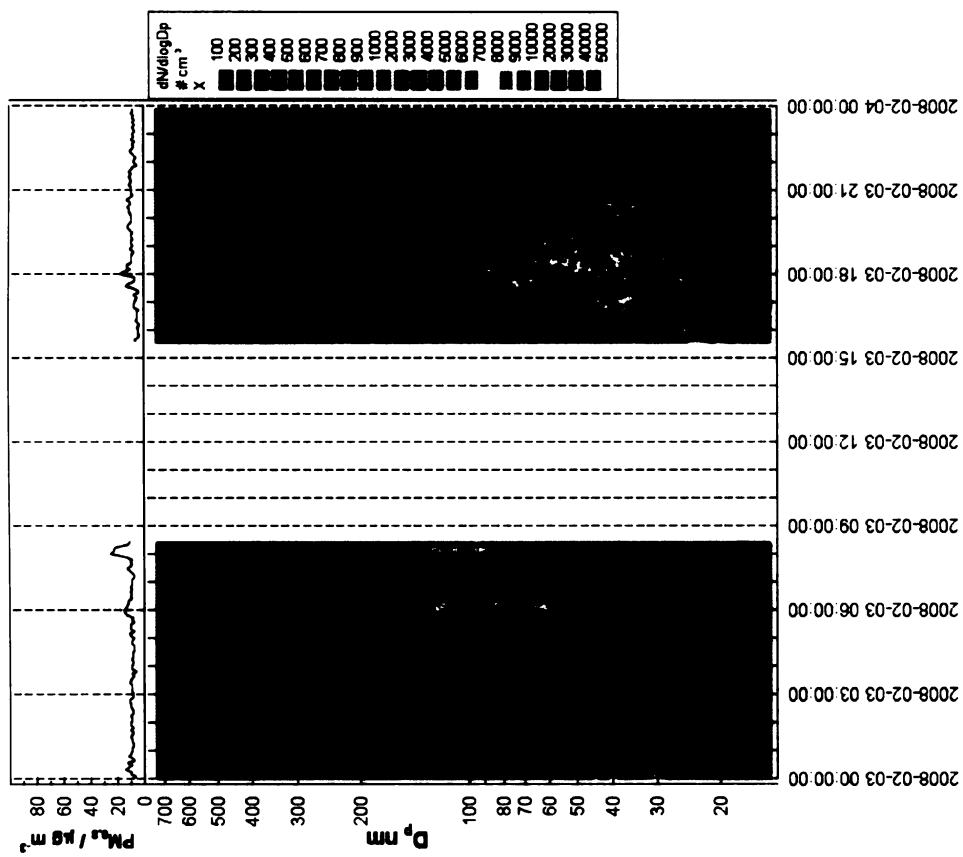
Meteorologické podmínky a plynné složky ze dne 2.2.2008



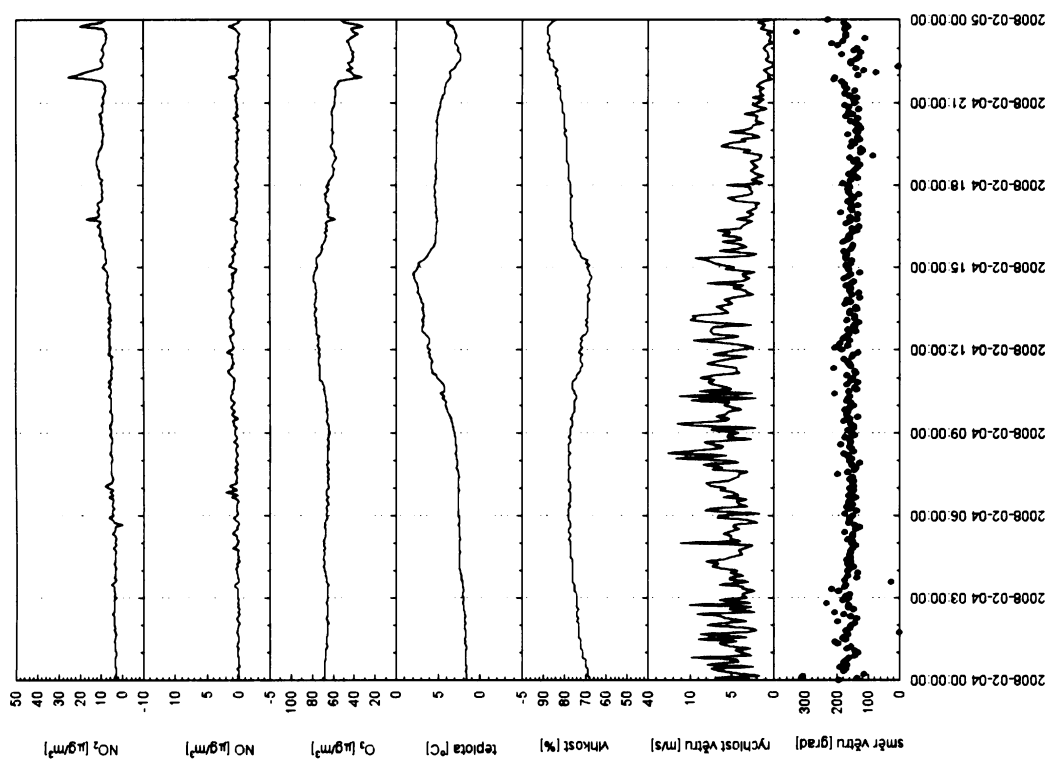
X. Velikostní distribuce aerosolu ze dne 2.2.2008



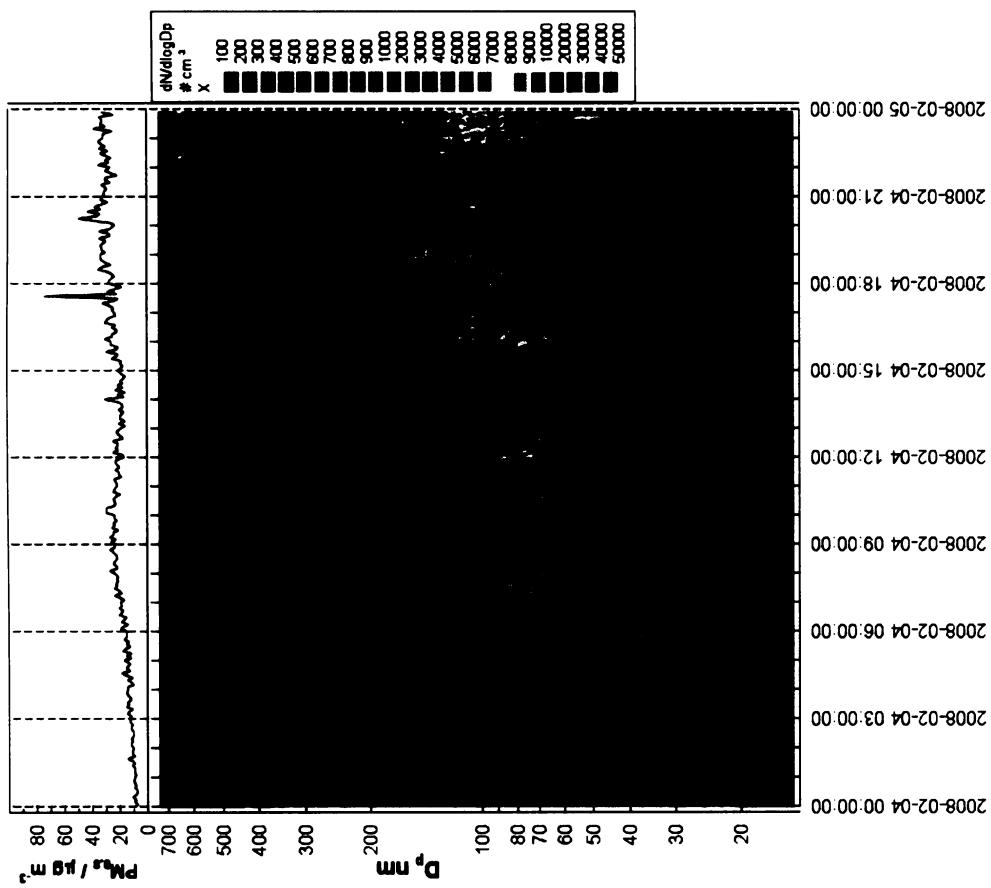
Meteorologické podmínky a plynné složky ze dne 3.2.2008



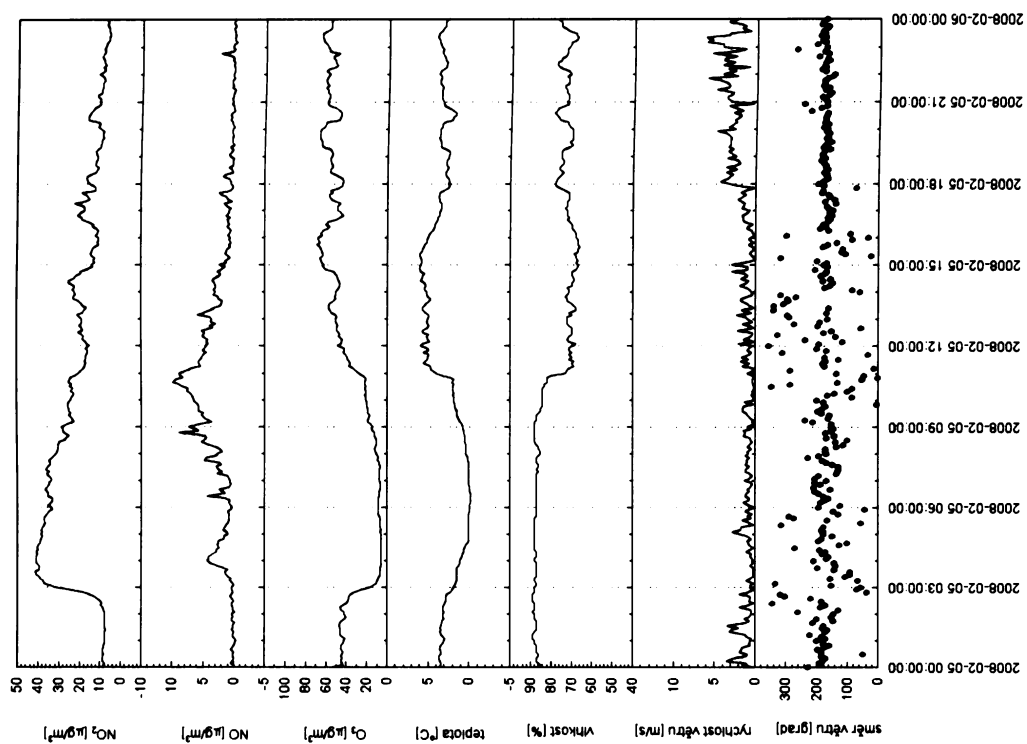
XI. Velikostní distribuce aerosolu ze dne 3.2.2008



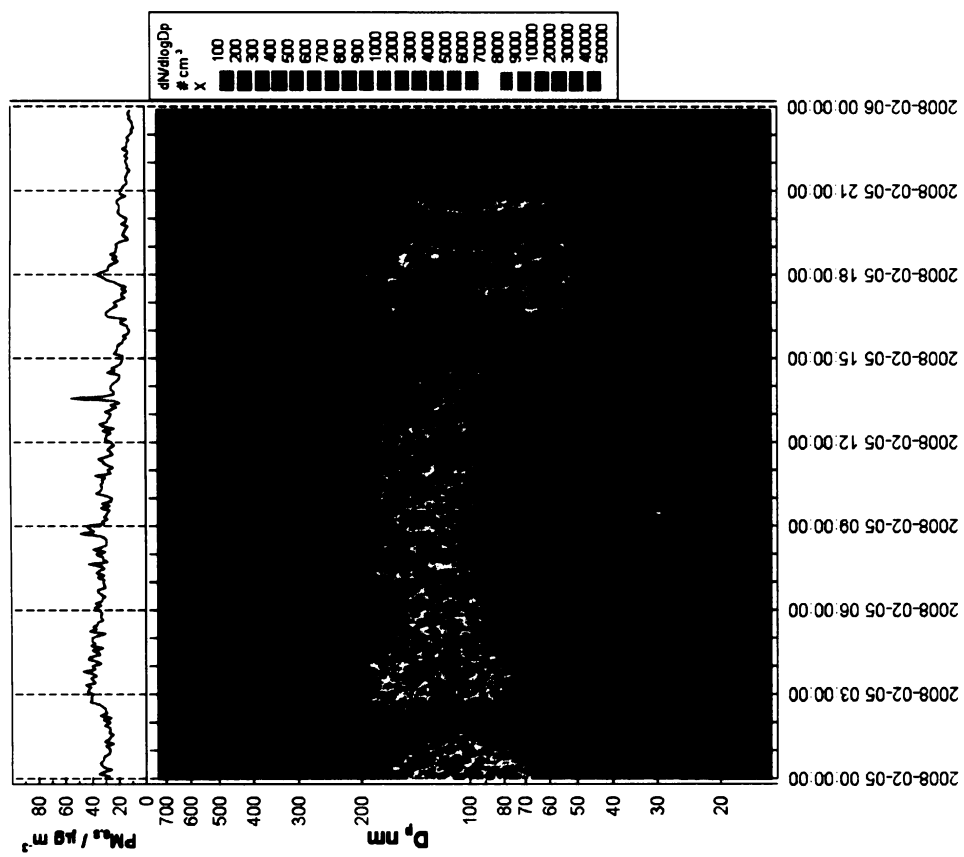
Meteorologické podmínky a plynné složky ze dne 4.2.2008



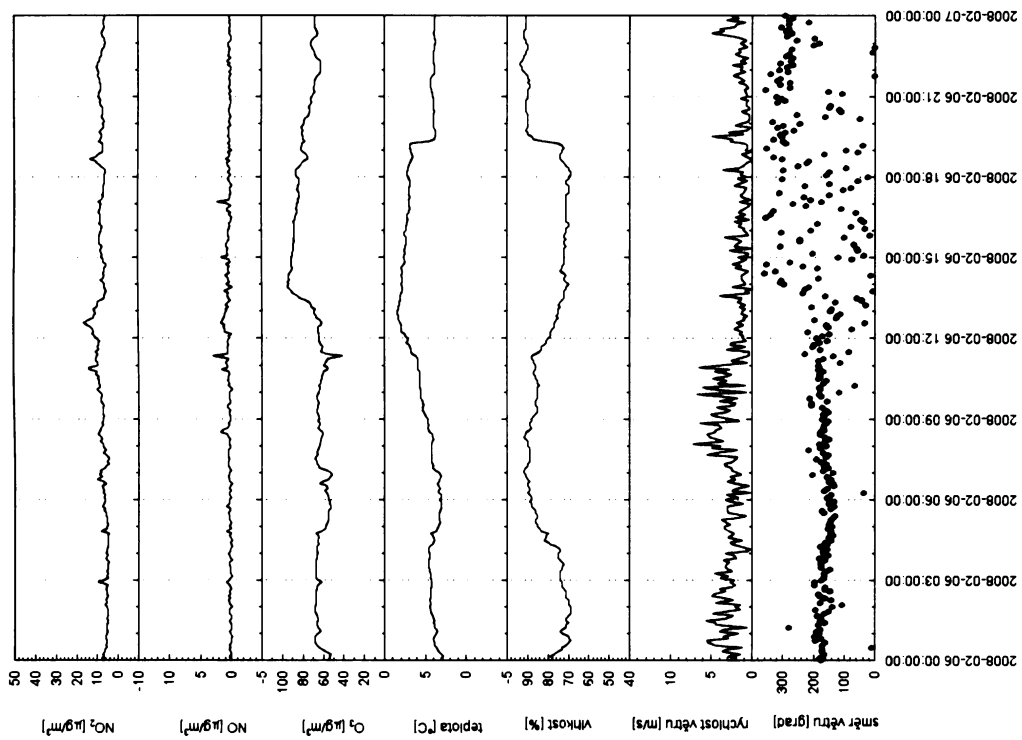
XII. Velikostní distribuce aerosolu ze dne 4.2.2008



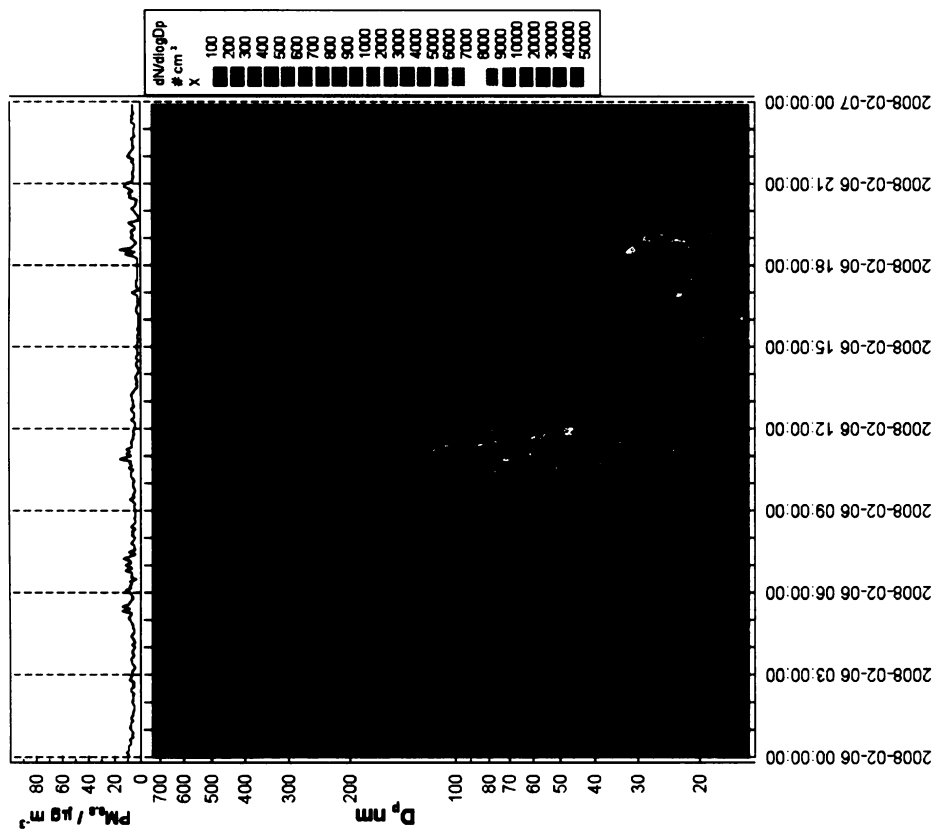
Meteorologické podmínky a plynné složky ze dne 5.2.2008



XIII. Velikostní distribuce aerosolu ze dne 5.2.2008



Meteorologické podmínky a plynné složky ze dne 6.2.2008



XIV. Velikostní distribuce aerosolu ze dne 6.2.2008

