

Denní a sezónní dynamika PM_{10} a PM_1 ve spádnici svahu dolu Nástup Tušimice

Mgr. Michal Grégr¹, RNDr. Jan Hovorka, Ph.D.¹, Ing. Jan Brejcha²

¹Ústav pro životní prostředí, Přírodovědecká fakulta UK v Praze, gregr@seznam.cz, hovorka@nbox.cesnet.cz

²Výzkumný ústav pro hnědé uhlí a.s., Most, brejcha@vuhu.cz

Přijato: 25. 7. 2011, recenzováno: 3. 8. a 29. 8. 2011

Abstrakt

Byly měřeny 5minutové koncentrace PM_{10} a PM_1 ve spádnici SV svahu dolu Nástup Tušimice během dvou letních a jedné zimní kampaně. V létě se koncentrace PM_1 ve spádnici nelišily a nevykazovaly (2009) nebo vykazovaly (2010) výraznou denní dynamiku, na rozdíl od PM_{10} , které denní dynamiku vykazovaly vždy a byly vyšší do 60 výškových metrů od uhelné sloje. Přechodné zvýšení koncentrací aerosolu v dole se projevilo v jeho bezprostředním okolí v pěti případech, přičemž odezva představovala 23–39 % koncentrací PM_{10} měřených v dole. Z terénních měření vyplývá, že důlní činnost je zdrojem částic větších než 1 μm . Toto zjištění potvrzují laboratorní resuspenzní měření velikostní distribuce hmotnosti těženého uhlí, kdy 90 % hmoty tvoří částice větší než 1 μm a resuspenzní koeficient homogenizovaného uhlí měl hodnotu 0,0001. S využitím koeficientu byla vypočtena maximální teoretická koncentrace PM_{10} 850 $\mu g \cdot m^{-3}$. Maximální změřená koncentrace byla 288 $\mu g \cdot m^{-3}$. Příčinou rozdílu mezi teoretickou a měřenou koncentrací PM_{10} může být koncentrační nehomogenita aerosolu v objemu dolu a zejména jeho vertikální transport.

Daily and seasonal dynamics of PM_{10} and PM_1 in the fall line of the slope of the Nástup Tušimice Mine

During two summer and one winter sampling campaigns, concentration of PM_{10} and PM_1 were taken every 5 minutes following the fall line of the north-eastern slope of the Nástup Mine. In summer, PM_1 levels did not show any differences throughout the fall line, although the daily dynamics was observed only in 2009, not in 2010. In contrast, PM_{10} levels showed daily dynamics in both years and were higher within 60 metres above the coal seam. Aerosol concentration in the adjacent area of the mine was temporarily elevated in five cases, while the response reached 23 to 39 % of PM_{10} levels measured in the mine. On-site measurements revealed that mining activities produce particles over 1 μm . These findings are in accordance with laboratory resuspension measurements of coal particles size distribution when particles over 1 μm constitute 90 % of matter and the resuspension coefficient of homogenized coal amount to 0.0001. Using the coefficient, a maximum theoretical level of PM_{10} was calculated to be 850 $\mu g \cdot m^{-3}$, while a maximum measured level was only 288 $\mu g \cdot m^{-3}$. The difference between the theoretical and measured level of PM_{10} can be explained by concentration inhomogeneity of aerosol in the area of the mine and, especially, by the vertical transport of aerosol.

Tages- und Saisondynamik von PM_{10} und PM_1 in der Falllinie der Böschung des Tagebaus Nástup Tušimice

Im Zeitraum von zwei Sommer- und einer Winterkampagnen wurden 5-Minuten-Konzentrationen von PM_{10} a PM_1 in der NO Falllinie der Böschung des Tagebaus Tušimice gemessen. Im Sommer haben sich die PM_1 -Konzentrationen in der Falllinie nicht unterschieden und eine deutliche Tagesdynamik nicht aufgewiesen (2009) oder aufgewiesen (2010), im Unterschied von PM_{10} , die die Tagesdynamik immer aufgewiesen haben und die bis 60 Höhenmeter von dem Kohleflöz höher waren. Eine vorübergehende Erhöhung der Aerosolkonzentrationen im Tagebau hat sich in unmittelbarer Nähe in fünf Fällen erwiesen, wobei die Reaktion 23 – 29 % der im Tagebau gemessenen PM_{10} -Konzentrationen darstellte. Aus den Geländemessungen geht hervor, dass die Bergbautätigkeit eine Quelle von Partikeln ist, die größer als 1 μm sind. Diese Ermittlung bestätigen Labormessungen der Resuspension der Größenverteilung des Gewichtes von der geförderten Kohle, wobei 90 % von der Masse Partikel größer als 1 μm bilden und der Resuspensionskoeffizient der gemischten (homogenisierten) Kohle einen Wert von 0,0001 aufgewiesen hat. Unter Nutzung des Koeffizientes wurde die höchste theoretische PM_{10} -Konzentration in der Höhe von 850 $\mu g \cdot m^{-3}$ errechnet. Die höchste gemessene Konzentration betrug 288 $\mu g \cdot m^{-3}$. Ursache des Unterschiedes zwischen der theoretischen und der gemessenen PM_{10} -Konzentration kann in Konzentrationsunhomogenität des Aerosols im Tagebauvolumen und vor allem in seinem Vertikaltransport liegen.

Klíčová slova: povrchový důl, znečištění ovzduší, prach, DustTrak.

Keywords: open pit mine, air pollution, dust, DustTrak.

1 Úvod

Mezi největší světové producenty uhlí se řadí Čína, USA a Indie. Oproti očekávání se u vedoucích dvou velmocí nesetkáváme s množstvím odborných publikací zabývajících se problematikou znečištění ovzduší v důsledku těžby uhlí.

V Indii byla provedena řada studií. Jedna z těchto studií porovnávala 24hodinové průměry PM_{10} naměřené v dolech s PM_{10} v přilehlých obytných oblastech. Měření probíhala 2x do měsíce po dobu 1 roku. V dolech se koncentrace PM_{10} pohybovaly v rozmezí 103–426 $\mu g \cdot m^{-3}$, v obytných oblastech

v rozmezí 41–172 $\mu g \cdot m^{-3}$. Koncentrace PM_{10} překračovaly národní standardy na kvalitu ovzduší [2,3].

Další studie se zabývala měřením emisí s ohledem k použité technologii při povrchové těžbě – vlastní dobývání uhlí, nakládání, transport, skládání. Z naměřených emisí byly stanoveny emisní inventury, které hodnotily množství jednotlivých znečišťujících látek. Hlavním polutantem dle takovýchto měření byl atmosférický aerosol, jeho největším zdrojem bylo vlastní dobývání uhlí [1].

V roce 1988 prezentovala americká EPA tzv. *Fugitive Dust Model – FDM*. Jedná se o model kvality ovzduší, který byl navržen pro výpočet koncentrací a depozice atmosférického aerosolu z jeho zdrojů, ať už bodových, liniových nebo plošných [9].

V roce 2009 byl tento model použit k odhadu skutečného podílu důlních činností na znečištění ovzduší v povrchovém dole v Indii. Výzkum dospěl k závěru, že za normálních meteorologických podmínek vlastní dobývání uhlí, nakládání, transport a skládání neovlivňují kvalitu ovzduší v oblastech vzdálených více než 500 m [8].

K odhadu celkové mohutnosti znečištění z povrchové důlní činnosti pak byla vypracována metoda založená na prognózách rovnicích a emisních faktorech, které jsou však specifické pro jednotlivé lokality a na jiných lokalitách pak nemusí podávat správné výsledky [6].

V Turecku proběhly výzkumy na expozici dělníků pracujících v dole. I v tomto případě byly hodnoceny jednotlivé důlní technologie samostatně a pak vzájemně porovnávány. Jako nejvydatnější zdroj atmosférického aerosolu byl vyhodnocen proces samotného dobývání uhlí, kdy průměrné koncentrace celkového množství aerosolu v blízkém okolí těžby přesahovaly $3\,000\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ [7].

Cílem naší studie bylo odpovědět na dvě otázky:

1. Jaká je ve spádnici dolu dynamika koncentrací aerosolu vznikajícího při procesu dobývání uhlí?

2. Jaká je souvislost mezi maximy koncentrací aerosolu vzniklého při dobývání uhlí a dynamikou koncentrací aerosolu na stanicích v bezprostředním okolí dolu?

Za tímto účelem jsme rozmístili ve spádnici od okraje těžební jámy k uhelné sloji dolu Nástup Tušimice laserové nefelometry, které kontinuálně měřily frakce PM_{10} a PM_{1} . Každá z frakcí byla měřena po dobu jednoho dne během dvou letních a jedné zimní kampaně.

2 Experiment

2.1 Použité přístroje

Koncentrace aerosolu měřily přenosné laserové nefelometry DustTrak – model 8520, TSI (dále jako DT). DT stanoví hmotnostní koncentrace PM_1 a PM_{10} na základě rozptylu koherentního infračerveného záření na proudu aerosolu. Nejmenší aerodynamický průměr efektivně detekované částice DT je dán vlnovou délkou laseru 780 nm a činí $0,2\ \mu\text{m}$. Největší aerodynamický průměr je dán mezním průměrem částic impaktoru osazeným na vstupu DT a má hodnotu 1 nebo $10\ \mu\text{m}$. PM_1 tak představuje soubor částic o velikosti v rozsahu $0,2\text{--}1\ \mu\text{m}$ a PM_{10} $0,2\text{--}10\ \mu\text{m}$. Detekční limit DT je $1\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Obě velikostní frakce

Tab. 1: Časový rozvrh kampaní.

		Léto 2009	Zima 2010	Léto 2010
PM_1	datum	19.8.	14.1.	12.8.
	doba měření (hod)	12	10	12
PM_{10}	datum	20.8.	15.1.	13–14.8.
	doba měření (hod)	12	10	36



Obr. 1: Detail liniového rozmístění DT ve spádnici a celkový pohled na dobývací prostor dolu Nástup Tušimice s vyznačenými měřicími stanicemi v okolí, 19. 8. 2009.

Tab. 2: Měřicí stanice VÚHU a.s. v okolí dolu Nástup Tušimice.

Stanice	Zkratka	Barva křivky	Vzdálenost od místa měření v dole [km]	Geografické souřadnice
Spořice	SSV	červená	1,2	50°26'16"S - 13°23'18"V
Droužkovice	SV	tmavě modrá	3,5	50°25'44"S - 13°25'38"V
Březno	JV	fialová	5,5	50°23'57"S - 13°24'49"V
Výsypka	JZ	černá	5,5	50°23'44"S - 13°19'12"V
Málkov	SZ	zelená	3,9	50°26'36"S - 13°19'41"V
Černovice	SSZ	světle modrá	1,7	50°26'31"S - 13°21'51"V

Tab. 3: Základní statistické parametry PM_{10} a PM_{10} .

	PM_{10} [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]			PM_{10} [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]		
	minimum	medián	maximum	minimum	medián	maximum
Léto 2009	19	31	72	19	46	288
Zima 2010	51	67	117	70	113	239
Léto 2010	16	61	130	3	41	258

byly měřeny s integrační dobou 5 minut. DT byly uloženy v ochranných kufřících na stativech. Vzduch nasávala všesměrová odběrová hlavice s ústím ve výšce 1,5 m nad terénem.

Beta prachoměry (FH - 62 I-R, ESM Andersen Instruments GmbH) měřily na stanicích VÚHU a.s. v okolí dolu (tab. č. 2). Přístroj měří kontinuálně hmotnostní koncentraci PM_{10} na základě absorpce beta záření aerosolem, který se zachytává na papírové filtrační pásce. Při integrační době pět minut činí detekční limit přístroje $4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

2.2 Terénní měření PM_{10} a PM_{10}

Terénní měření byla rozložena do tří kampaní – dvou letních a jedné zimní (tab. č. 1). Obě velikostní frakce byly měřeny po dobu 10 hodin v zimě a po dobu 12 hodin v létě. Výjimkou je poslední měření PM_{10} , které umožnilo získat informace o změně hmotnostních koncentrací i v průběhu noci a následujícího dne.

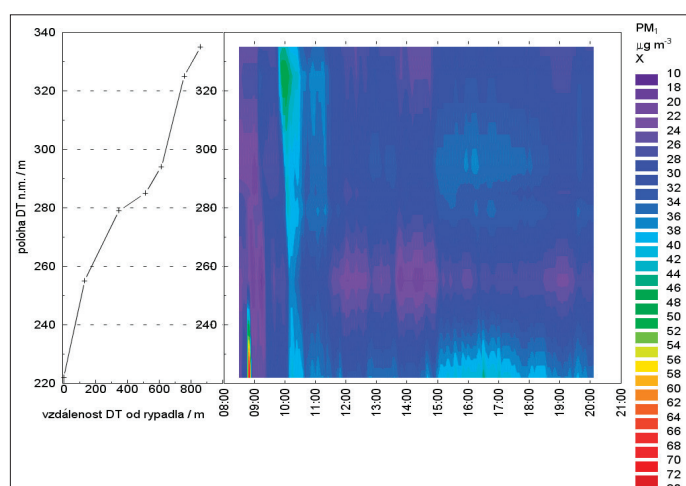
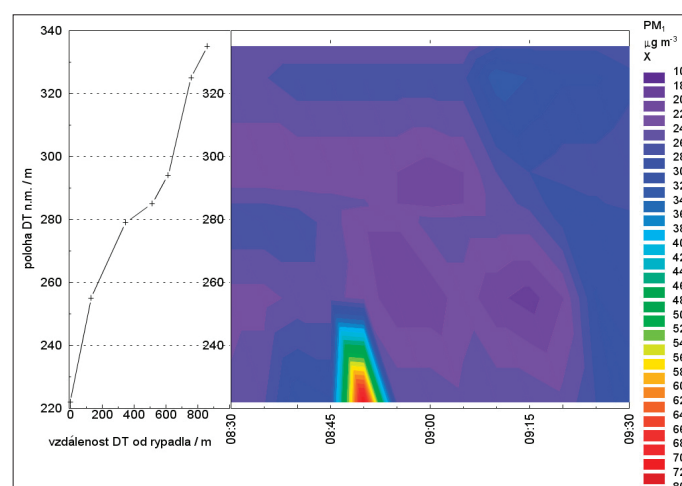
Liniové rozmištění DT ve spádnicí dolu Nástup Tušimice ilustruje obr. č. 1, kde DT č. 1 je umístěn nejbližší uhelné sloji,

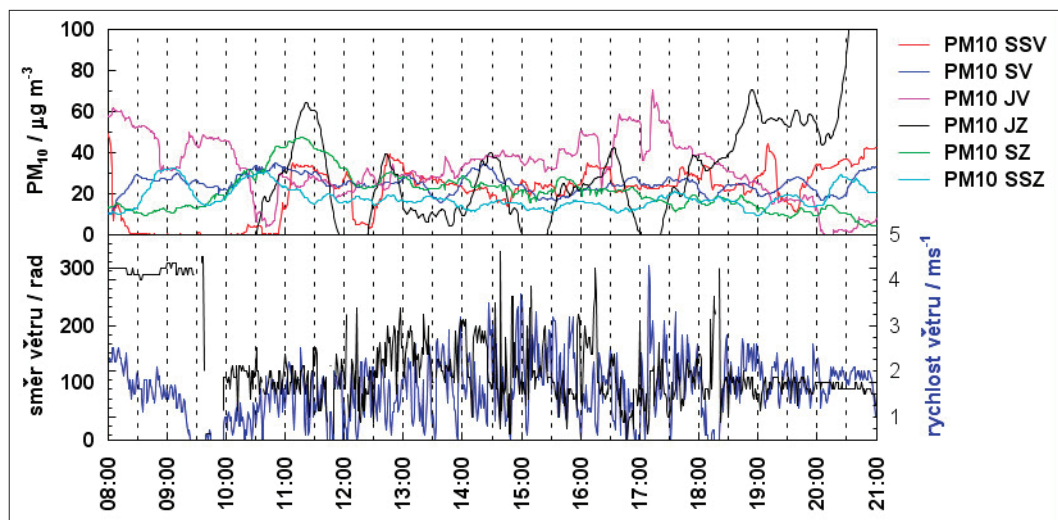
zatímco DT č. 7 se nachází na horním okraji povrchového dolu. Vzdařenost mezi prvním a posledním DT činila 860 m při převýšení 130 m. Přesné umístění DT se mezi kampaněmi lišilo a muselo zohlednit postup těžby.

V bezprostředním okolí dolu Nástup Tušimice měří stanice VÚHU a.s. (tab. č. 2) koncentrace PM_{10} a meteorologii. Tato data jsme využili k porovnání s našimi výsledky měření v dole.

2.3 Resuspenzní měření

Měření proběhla v cylindrické resuspenzní komoře v Laboratoři pro měření kvality ovzduší na Ústavu pro životní prostředí. Komora umožňuje resuspenzi pevných vzorků s následným on-line měřením velikostní distribuce hmoty nebo počtu částic vzniklého aerosolu a odběr velikostně segregovaných frakcí na filtr. Vzorek hnědého uhlí o hmotnosti 10 mg byl pneumaticky rozptýlen v objemu komory ($V = 0,437 \text{ m}^3$) za definovaných teplotně vlhkostních podmínek (20°C a relativní vlhkost 50 %).

Obr. 2: Denní chod koncentrací PM_{10} jednotlivých DT ve spádnicí dolu Nástup Tušimice, 19. 8. 2009.Obr. 3: Průběh koncentrací PM_{10} v ranních hodinách 19. 8. 2009, dokumentování vlivu záparu a jeho likvidace na PM_{10} ve spádnicí dolu Nástup Tušimice.



Obr. 4: Denní chod koncentrací PM_{10} rychlosti a směru větru měřených na stanicích v okolí dolu Nástup Tušimice, 19. 8. 2009.

Ze získaných distribucí byla vytvořena průměrná velikostní distribuce počtu a hmoty částic. Podíl resuspendovatelné hmoty činil 0,01 %. Podrobnosti lze nalézt v časopise Zpravodaj Hnědé uhlí č. 1/2011 a dizertační práci Mgr. Martina Civiše, Ph.D. [4,5].

2.4 Zpracování dat

Výpočty a grafická znázornění byla prováděna pomocí tabulkového editoru Excel (Microsoft Office 2007), programu CoStat a CoPlot (CoHort Software).

Vzhledem k tomu, že jednotlivé DT měří ve stejný čas a na stejném místě rozdílné koncentrace, bylo nezbytné je zkolokovat. Za tímto účelem proběhla 3 kolokační měření – v létě a zimě pro PM_1 i PM_{10} . Při každé kolokaci bylo získáno v průměru 93 hodnot. Jeden DT byl vybrán jako referenční, k jeho naměřeným datům byla vztažena data ostatních přístrojů.

3 Výsledky a diskuse

3.1 Terénní měření

Vzhledem k tomu, že naměřený soubor dat neměl normální rozdělení, jako reprezentativní bodová charakteristika střední hodnoty byl zvolen medián. Medián koncentrací PM_1 naměřených v létě 2009, při stejném těžebním výkonu, byl zhruba poloviční oproti mediánům PM_1 z následujících dvou kampaní. Obdobně medián koncentrací PM_{10} naměřených v zimě 2010 byl o zhruba 60 % vyšší oproti oběma letním kampaním (tab. č. 3). Příčinou vyšších koncentrací mohlo být inverzní zvrstvení mezní vrstvy atmosféry.

Denní chod koncentrací PM znázorňují obrázky č. 2, 5, 7, 9, 11, 12, 15, 16. Levá část obrázku představuje vertikální umístění DT v závislosti na horizontální vzdálenosti od uhelné slaje. Uhlí slaj se nachází v nadmořské výšce 220 m. Pravou část tvoří konturový barevný graf, kdy v lineární škále jsou odlišeny koncentrace PM u jednotlivých DT, přičemž koncentrace mezi DT jsou dopočítávány lineární aproximací. Konturová mapa tak umožňuje přehledně zobrazit dynamiku PM podél celého svahu. Denní chod koncentrací PM_{10} měřených na stanicích

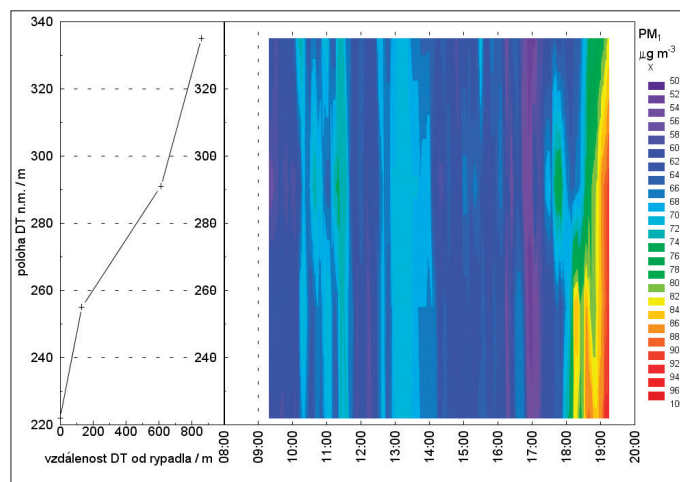
v okolí dolu Nástup Tušimice pak znázorňují obrázky č. 3, 6, 8, 10, 13, 14, 17, 18.

3.1.1 Koncentrace PM_1

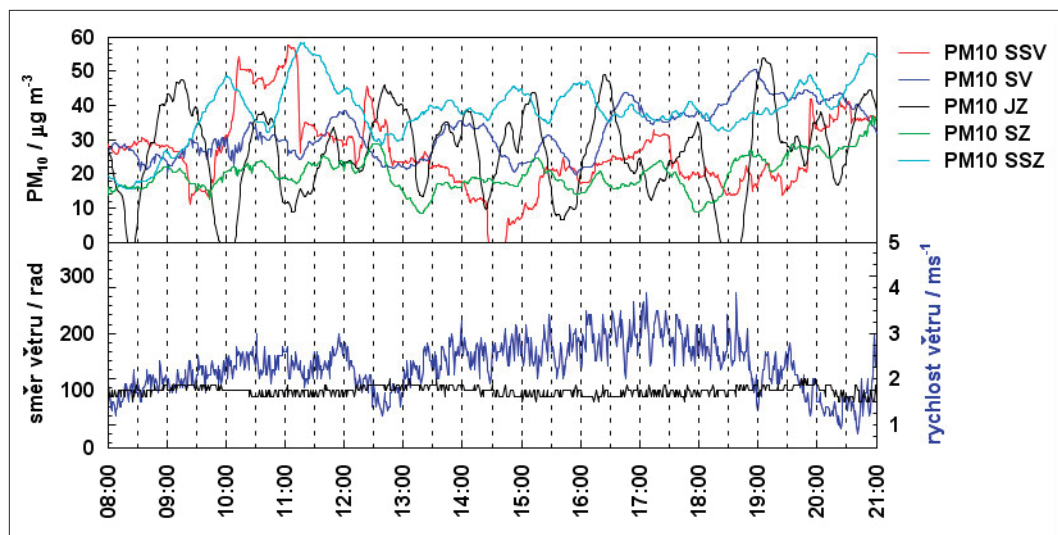
V létě 2009 koncentrace PM_1 nevykazovaly výrazný denní chod a s nadmořskou výškou se výrazně neměnily kromě ranní epizody mezi 8:45 - 8:55 (obr. č. 2 a 3).

Příčinou ranního maxima PM_1 je zápar, který může vzniknout při odkrývání starých těžebních šachet. Průběh koncentrací PM_1 při vzniku a likvidaci záparu je podrobně dokumentován na obrázku č. 4. Se vznikem záparu po 8:45 koncentrace PM_1 prudce rostou, v 8:50 dosahují maxima $72 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ a poté opět klesají na úroveň okolních koncentrací. Vertikálně se šíření PM_1 omezilo na 20 m od zdroje. Vzhledem ke krátkodobosti jevu a omezenému vertikálnímu šíření PM_1 lze uvedený případ hodnotit jako velmi úspěšnou likvidaci záparu s nulovým dopadem na kvalitu ovzduší mimo důl (obr. č. 3).

Maximum $72 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ naměřené v dole v 8:50 by mohlo být teoreticky zaregistrováno při rychlosti větru okolo $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ s přibližně 35minutovým zpožděním, tedy okolo 9:25, na SV



Obr. 5: Denní chod koncentrací PM_1 jednotlivých DT ve spádnicí dolu Nástup Tušimice, 14. 1. 2010.



Obr. 6: Denní chod koncentrací PM_{10} , rychlosti a směru větru měřených na stanicích v okolí dolu Nástup Tušimice, 14. 1. 2010.

stanici (tmavě modrá křivka na obr. č. 4 horního grafu). I když dole byla měřena frakce PM_1 a v jeho okolí PM_{10} , hodnoty PM_{10} měřené na SV stanici se v tuto dobu pohybovaly okolo $25 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ bez náznaku náhlého zvýšení koncentrací.

V zimě 2010 se koncentrace PM_1 s nadmořskou výškou neměnila a nevykazovala výrazný denní chod, kromě večerních hodin, kdy docházelo k růstu koncentrací až na $95 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (obr. č. 5). Příčina zatím není známa.

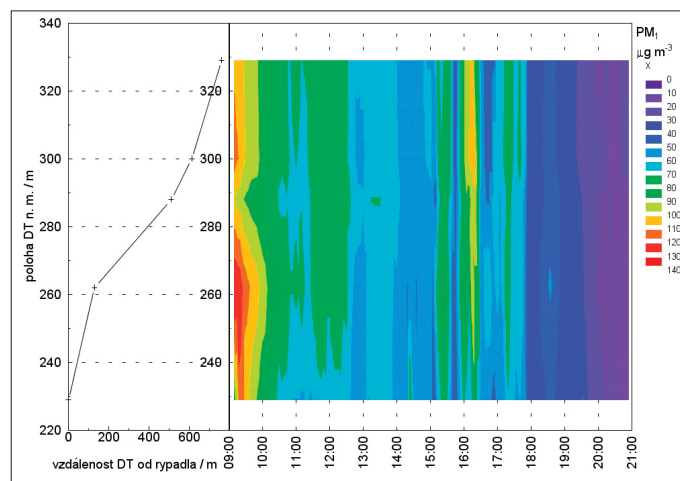
Vzhledem k tomu, že stanice v okolí dolu měří nepřetržitě, máme k dispozici delší řadu dat, která ukazuje, že k postupnému zvyšování koncentrací ve večerních hodinách dochází v celé oblasti.

V létě 2010 koncentrace PM_1 na rozdíl od léta 2009, vykazovaly výrazný denní chod současně u všech DT ve spádnicí (obr. č. 7). Mezi 16:00 - 17:00 byly naměřeny nejvyšší koncentrace PM_1 při horním okraji dolu. To odporuje předpokladu, že zdrojem aerosolu je těžební činnost - časové změny koncentrací PM_1 by měly reflektovat vzdálenost DT od sloje. Vertikálně homogenní koncentrace PM_1 mohou být výsledkem emise PM_1 ze zdroje mimo povrchový důl.

V 15:30 byl na JZ stanici naměřen prudký propad v koncentracích PM_{10} , který se s malým zpožděním projevuje i na měřicích bodech v dole Nástup (obr. č. 8). Náhlý pokles koncentrací byl způsoben prudkým deštěm, jehož intenzita dosahovala $200 \text{ mm}\cdot\text{hod}^{-1}$. Poté koncentrace v dole i na výsypce rostly, až v 16:15 dosáhly svého maxima $104 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Je nepravděpodobné, aby příčinou zvýšení koncentrace byl důl, neboť koncentrace naměřené na stanici vzdálené 5,5 km dosahovaly stejně vysokých hodnot ve stejném čase. Pokud by byl zdrojem důl, zvýšené koncentrace by měly být na výsypce zaznamenány při rychlosti větru $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ se zpožděním přibližně 45 min.

3.1.2 Koncentrace PM_{10}

V létě 2009 i 2010 se hodnota PM_{10} s nadmořskou výškou výrazně měnila (obr. č. 9, 12, 15, 16). Koncentrace do 60 výškových metrů od uhelné sloje byly výrazně vyšší ($288 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ v létě 2009 a $258 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ v létě 2010) nežli koncentrace v místech nad

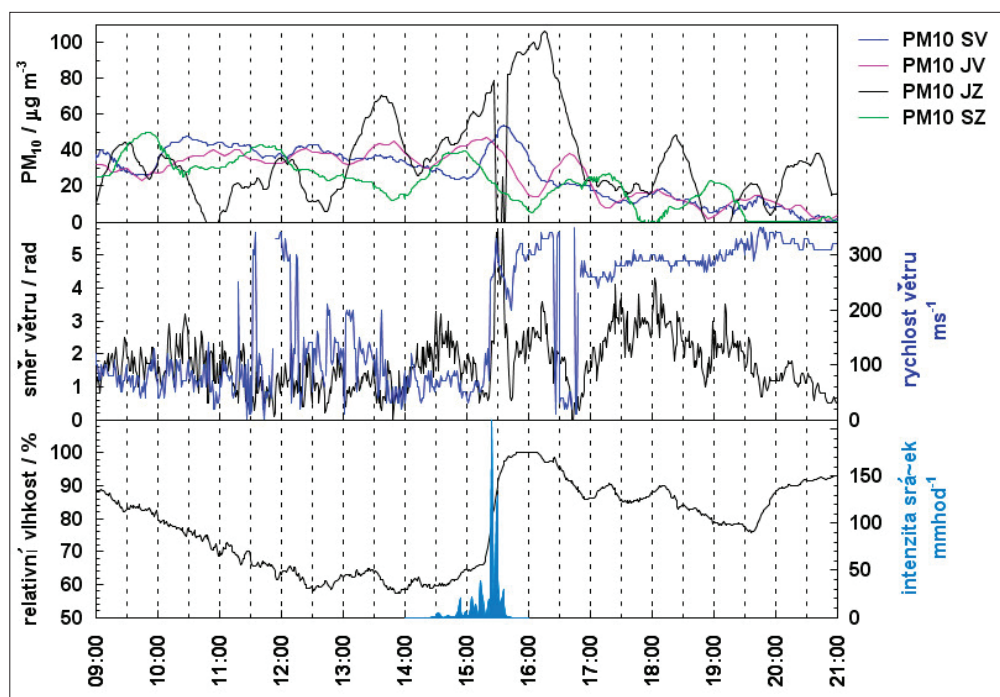


Obr. 7: Denní chod koncentrací PM_1 jednotlivých DT ve spádnicí dolu Nástup Tušimice, 12. 8. 2010.

60 výškových metrů ($103 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ v létě 2009 a $141 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ v létě 2010). Z těchto terénních měření lze vyvodit, že důlní činnost je převážně zdrojem částic větších než $1 \mu\text{m}$, které se šíří podél svahu do 60 výškových metrů.

V dopoledních hodinách pozorujeme u dna dolu hned několik maxim koncentrací PM_{10} (obr. č. 9). V 9:45 dosahuje $178 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, v 10:40 $288 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ a ve 12:25 $148 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Zjednodušeným odhadem šíření PM_{10} z dolu do okolí bylo vypočteno, že by tato maxima mohla reflektovat JZ stanice se zpožděním okolo 45 až 50 minut. To by odpovídalo maximum naměřeným na výše uvedené stanici v 10:35, 11:25 a ve 13:15, kdy koncentrace dosahovaly hodnot 63, 66 a $58 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (obr. č. 10, černá křivka horního grafu).

Ve 20:15 bylo u dna naměřeno maximum $120 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, ale jeho potenciální odezva měřená na JZ stanici dosahovala hodnot vyšších ($313 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), z čehož lze usoudit, že příčinou tohoto maxima byl i jiný zdroj PM_{10} nežli těžební činnost, jako např. blízké výsypky, zemědělská technika nebo skládkování energetického uhlí.



Obr. 8: Denní chod koncentrací PM_{10} , rychlosti a směru větru, relativní vlhkosti a intenzity srážek měřených na JV stanici (Březno), 12. 8. 2010.

V zimě se hodnoty PM_{10} ve spádnicí nelišily kromě krátkodobých epizod ráno 9:20, mezi 14:30 - 15:00 a večer 19:00 - 19:10 (obr. č. 11). Během dne koncentrace PM_{10} postupně rostla a ve večerních hodinách dosahovala více než dvojnásobných hodnot oproti hodnotám z rána (obr. č. 11). Vysoké koncentrace měřené v celé délce svahu nejsou důsledkem teplotního zvrstvení hraniční vrstvy atmosféry.

Ke škodě věci došlo na všech měřicích stanicích mezi 18:30 a 20:00 k dočasnému výpadku měření. V 19:05 totiž bylo u dna dolu naměřeno maximum $239 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, pro jehož odhad odezvy nemáme k dispozici úplná data. Avšak za předpokladu podobných meteorologických podmínek, jaké panovaly před a po výpadku, by byla odezva na okolních stanicích nepravděpodobná vzhledem k velmi nízké rychlosti větru.

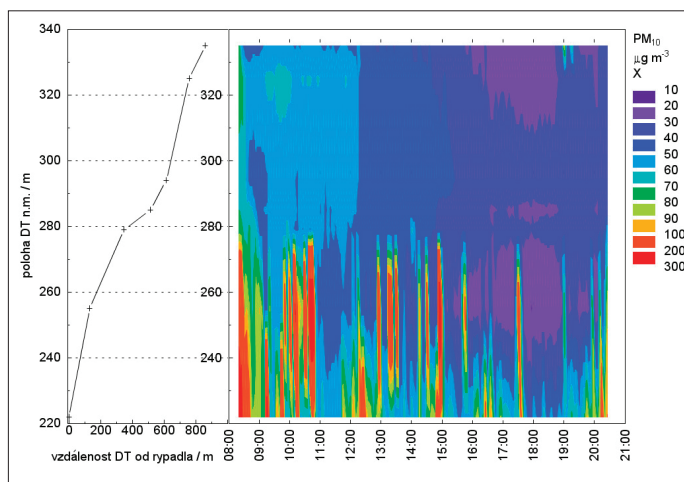
V létě 2010 dne 13. 8. mezi 13. a 17. hodinou byly v dole 3x naměřeny zvýšené koncentrace PM_{10} , které se pohybovaly

mezi 140 a $154 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (obr. č. 12). SSZ a JZ stanice zaznamenaly podobný průběh koncentrací o hodnotách 35-62 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (obr. č. 14). Důl Nástup byl pravděpodobně příčinou pouze prvního maxima. Další dvě maxima by s dolem neměla souviset vzhledem ke vzdálenosti měřicích bodů od dolu, rychlosti a směru větru. V 18:41 bylo v dole Nástup naměřeno další maximum ($150 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), kterému by mohlo odpovídat maximum naměřené na JZ stanici v 19:20 ($55 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$).

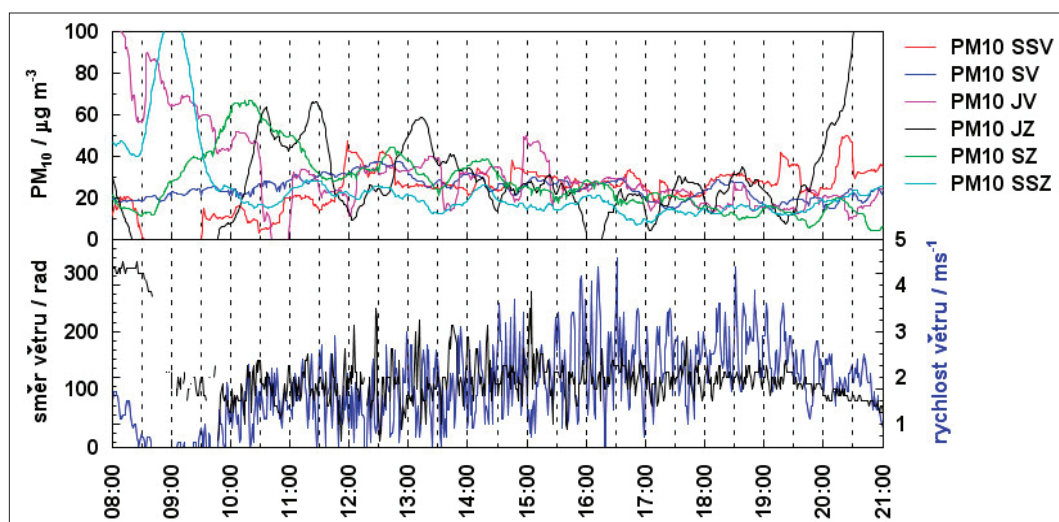
Během nočního měření (obr. č. 15) se zpočátku koncentrace s rostoucí výškou neměnily a dosahovaly vyšších hodnot (přes $100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$). Po půlnoci se zvyšuje rychlost větru až ke $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ což mohlo být příčinou náhlého poklesu koncentrací PM_{10} (obr. č. 17). Od jedné hodiny ranní lze opět sledovat vyšší koncentrace pouze do 60 výškových metrů od sloje. Maximum naměřené v dole ve 23:20 ($258 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) nemá, podle našich zjednodušených výpočtů, odezvu na stanicích v blízkosti dolu.

V létě 2010 dne 14. 8. se hodnota PM_{10} s nadmořskou výškou výrazně měnila (obr. č. 16). Do 60 výškových metrů od uhelné sloje se objevují epizody s výrazně vyššími koncentracemi podobně jako v létě 2009. Od 19. hodin opět pozorujeme nárůst koncentrací v celé délce svahu i na okolních měřicích stanicích. Maxima měřená na dně dolu mezi 19. a 20. hodinou nejspíše nejsou příčinou maximálních hodnot naměřených na okolních stanicích. Na okolních stanicích byla maxima naměřena dříve, než by mohlo být znečištění z dolu, při dané rychlosti větru, transportováno k těmto měřicím bodům.

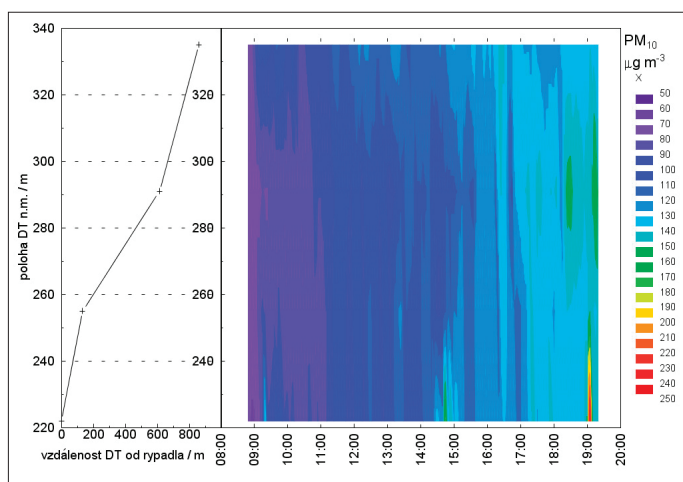
Pro přehlednost jsou souvislosti mezi koncentracemi měřeními v dole a v jeho bezprostředním okolí, kdy byly vzájemně porovnány epizody s maximálními koncentracemi prachu v dole a na okolních stanicích s ohledem na rychlosti a směru větru, uvedeny v tabulce č. 4. Během osmi dvanáctihodinových měření bylo v dole zaznamenáno 16 epizod zvýšených koncentrací PM_{10} , z čehož jen v pěti případech byla zjednodušeným



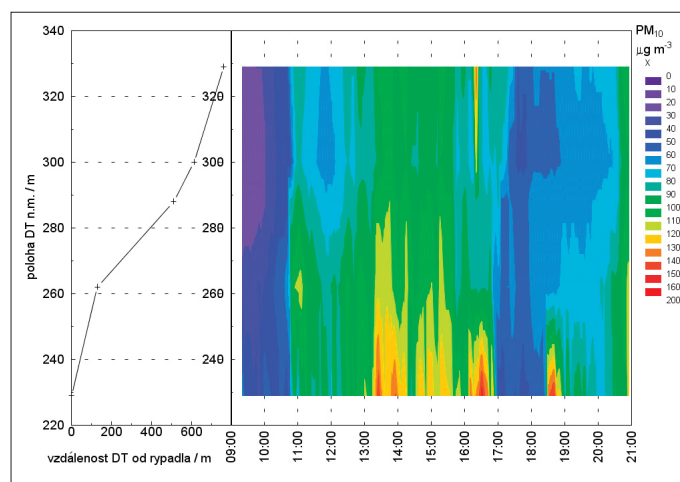
Obr. 9: Denní chod koncentrací PM_{10} jednotlivých DT ve spádnicí dolu Nástup Tušimice, 20. 8. 2009.



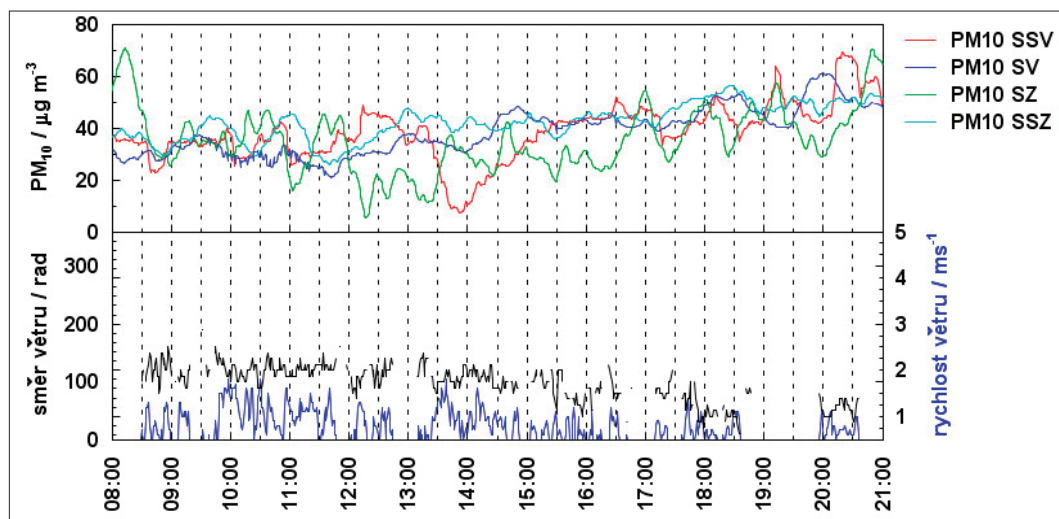
Obr. 10: Denní chod koncentrací PM_{10} , rychlosti a směru větru měřených na stanicích v okolí dolu Nástup Tušimice, 20. 8. 2009.



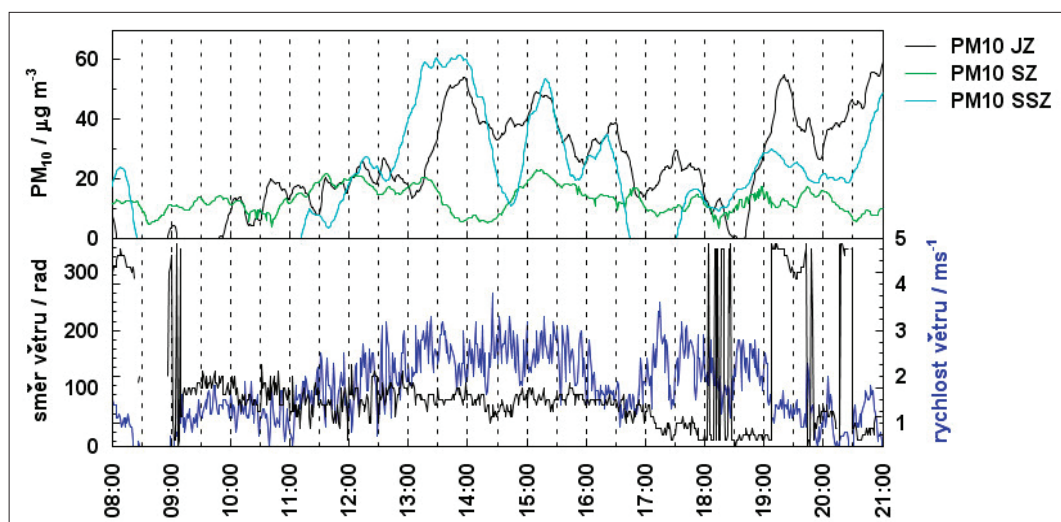
Obr. 11: Denní chod koncentrací PM_{10} jednotlivých DT ve spádnicí dolu Nástup Tušimice, 15. 1. 2010.



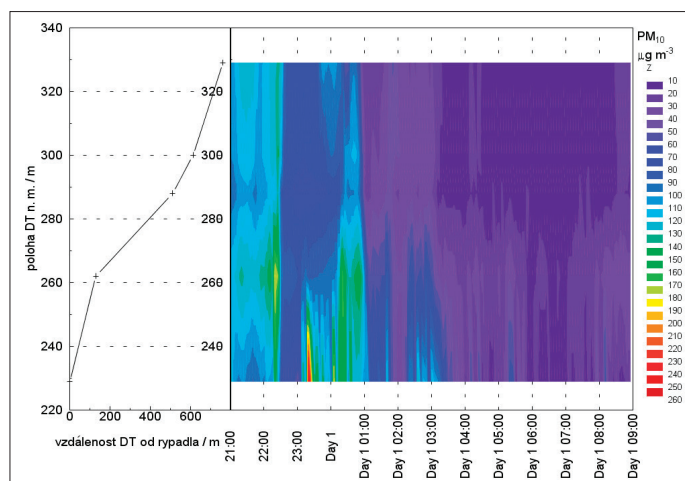
Obr. 12: Denní chod koncentrací PM_{10} jednotlivých DT ve spádnicí dolu Nástup Tušimice, 13. 8. 2010.



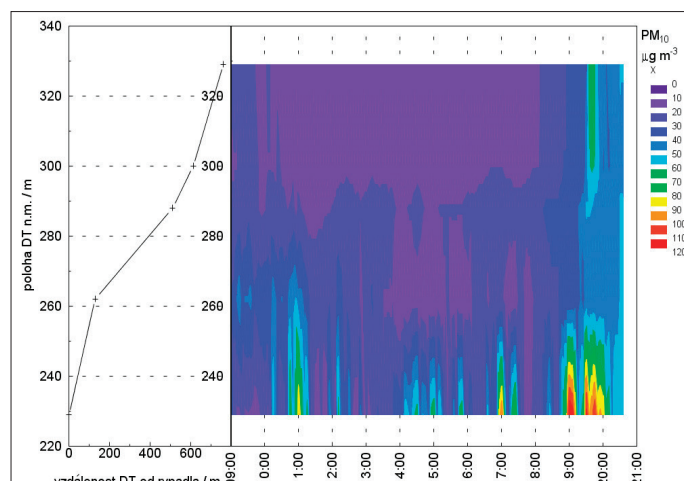
Obr. 13: Denní chod koncentrací PM_{10} , rychlosti a směru větru měřených na stanicích v okolí dolu Nástup Tušimice, 15. 1. 2010.



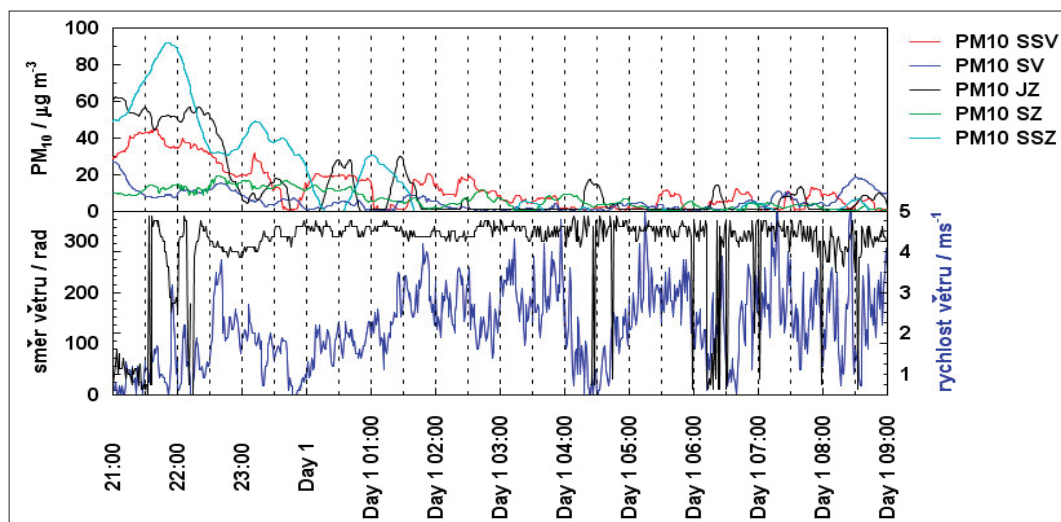
Obr. 14: Denní chod koncentrací PM_{10} , rychlosti a směru větru měřených na stanicích v okolí dolu Nástup Tušimice, 13. 8. 2010.



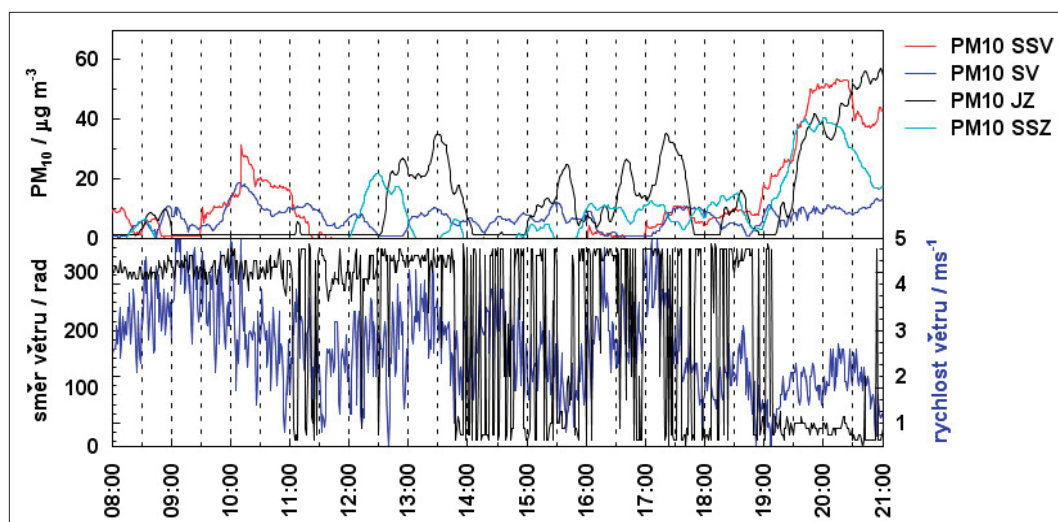
Obr. 15: Noční chod koncentrací PM_{10} jednotlivých DT ve spád-nici dolu Nástup Tušimice, 13.-14. 8. 2010.



Obr. 16: Denní chod koncentrací PM_{10} jednotlivých DT ve spád-nici dolu Nástup Tušimice, 14. 8. 2010.



Obr. 17: Denní chod koncentrací PM_{10} , rychlosti a směru větru měřených na stanicích v okolí dolu Nástup Tušimice, 13.-14. 8. 2010.



Obr. 18: Denní chod koncentrací PM_{10} , rychlosti a směru větru měřených na stanicích v okolí dolu Nástup Tušimice, 14. 8. 2010.

výpočtem nalezena souvislost se zvýšením koncentrací mimo důl. Mimo důl koncentrace PM_{10} vzrostly o 25-57 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ vzhledem ke koncentracím před epizodou a dosahovaly 23-39 % hodnot koncentrací měřených v dole.

3.2 Laboratorní měření v resuspenzní komoře

Účelem měření v komoře bylo zjistit velikostní distribuci hmotnosti aerosolu (přerušovaná křivka na obr. č. 19). Z velikostní distribuce hmotnosti aerosolu vyplývá, že největší podíl na hmotnosti aerosolu mají částice o aerodynamickém průměru okolo 10 μm . Naopak částice o aerodynamickém průměru menším než 1 μm se na celkové hmotnosti aerosolu podílí minimálně, přestože jejich početní zastoupení je mnohonásobně vyšší (plná křivka na obr. č. 19).

Druhý důležitý výstup z těchto experimentů představuje koeficient resuspenze f . Koeficient resuspenze udává, jaký podíl hmoty z celkového množství vzorku podrobeného resuspenzi vytvoří aerosol. Pro homogenizované uhlí byla stanovena hodnota $f = 0,0001$ [4]. Uvažujeme-li těžební výkon při nepřetržité pracovní době v lomu kolem 500 tun za hodinu, pak teoreticky maximální hmotnost aerosolizovaného uhlí za hodinu bude kolem 50 kg. Jestliže je znám efektivní objem vzduchu V , ve kterém se tato hmota rozptýlí, pak lze vypočítat teoretickou maximální koncentraci C dle jednoduché bilanční rovnice uvažující zjednodušeně sedimentaci částic o aerodynamickém průměru právě 10 μm :

$$C = [(m_T f - m_S) 10^9] / V \quad (1)$$

C maximální hodinová koncentrace aerosolu [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]

m_T ... hmota vytěženého uhlí za jednu hodinu [kg]

f koeficient resuspenze

m_S ... hmotnost aerosolu sedimentovaná během 1 hodiny [kg]

V efektivní objem vzduchu [m^3]

kde dosazením za m_S

$$m_S = m_T f (1 - e^{-\frac{V}{V_0}}) \quad (2)$$

v_{TS} terminální rychlost sedimentace [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]

t doba sedimentace [s]

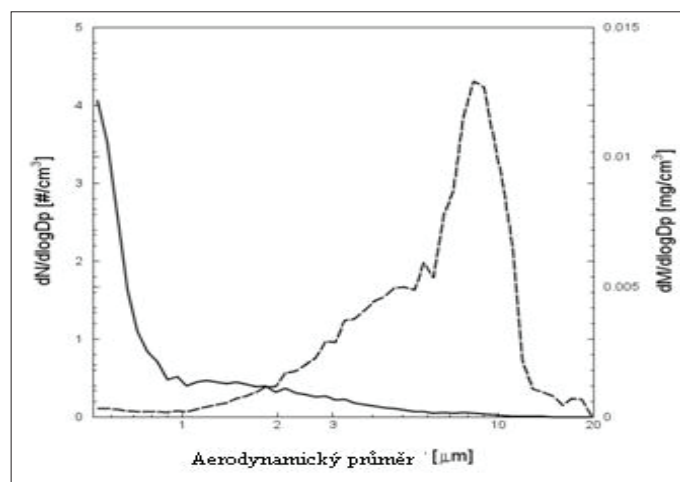
h efektivní výška

pak dostaneme:

$$C = [(m_T f e^{-\frac{V}{V_0}}) 10^9] / V \quad (3)$$

K odhadu efektivního objemu V napomohla zimní kampaň. Na sněhové pokrývce byla zřetelná stopa sedimentujícího uhlího prachu z těžby (obr. č. 20). Z odhadu plochy a výsledků letních měření, kdy se prach z těžby šířil do efektivní výšky $h = 60$ m, byl vypočten efektivní objem $V = 4 \times 10^7 \text{ m}^3$.

Hodnota teoretické maximální hodinové koncentrace tak vychází 850 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, zatímco maximální experimentální koncentrace byla 288 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Příčin rozdílu mezi maximální teoretickou a měřenou koncentrací PM_{10} může být několik. Hodnota koeficientu resuspenze f získaná laboratorním měřením je maximální z důvodů optimálních podmínek pro resuspenzi.



Obr. 19: Velikostní distribuce počtu a hmotnosti částic pro homogenizované uhlí: plná křivka - velikostní distribuce počtu částic, přerušovaná křivka - velikostní distribuce hmoty částic [4].



Obr. 20: Stopa prachu z uhlí na sněhové pokrývce v dole Nástup Tušimice, 14. 1. 2010.

Naopak v terénu nejsou podmínky pro resuspenzi optimální a skutečná hodnota koeficientu resuspenze zde může dosahovat podstatně nižších hodnot. Dalšími důvody mohou být koncentrační nehomogenita PM_{10} , odlišnost od skutečné velikostní distribuce aerosolu od modelového předpokladu a vertikální transport aerosolu.

Příčinou koncentrační nehomogenity je různá rychlost proudění vzduchu v objemu těžební jámy. Ta je dána tvarem, rozměry a tepelným gradientem povrchu těžební jámy a její vzdáleností od svahu Krušných hor, dominantního prvku určujícího regionální proudění vzduchu.

Skutečná velikostní distribuce není monomodální, tj neobsahuje částice výlučně o průměru $10\ \mu m$, jak předpokládá zjednodušená rovnice 2, ale může obsahovat i částice větší, které sedimentují rychleji.

Rozsah vertikálního transportu má zásadní vliv na charakterizaci oblaku prachu vzniklého těžební činností, který by se mohl potenciálně šířit mimo území dolu. Parametry, které určují pohyb oblaku v atmosféře, jsou koncentrace, smáčivost a velikostní distribuce částic aerosolu formující oblak, teplota a rozsah vnitřní cirkulace v oblaku. Časové změny těchto parametrů mohou být velmi rychlé, což podstatným způsobem ovlivňuje skutečný rozsah šíření aerosolu a znemožňuje přesné

Tab. 4: Hodnoty maxim a jejich čas v dole a na okolních stanicích po větru od dolu.

	Datum	Čas maxima v dole	Konc. maxima v dole $[mg.m^{-3}]$	Čas maxima PM_{10} na stanici po větru od dolu	PM_{10} na stanici po větru od dolu $[mg.m^{-3}]$	Spojitosť	Důvod
PM_1	19.8.2009	8:50	72	9:20	25	NE	bez odezvy
	14.1.2010	19:15	93	19:05	54	NE	časový posun neodpovídá
	12.8.2010	16:15	104	16:40	38	ANO	
PM_{10}	20.8.2009	9:45	178	10:35	63	ANO	
	20.8.2009	10:40	288	11:25	66	ANO	
	20.8.2009	12:25	148	13:15	58	ANO	
	20.8.2009	20:15	120	21:15	313	NE	v dole nižší koncentrace
	15.1.2010	19:05	239			NE	nízká rychlost větru
	13.8.2010	13:26	147	14:00	54	NE	maxima na stanici proti větru
	13.8.2010	13:56	140	15:10	49	NE	časový posun neodpovídá
	13.8.2010	16:31	154	16:30	39	NE	časový posun neodpovídá
	13.8.2010	18:41	150	19:20	55	ANO	
	13.8.2010	23:20	258	23:45	11	NE	bez odezvy
	14.8.2010	19:00	120			NE	nízká rychlost větru
	14.8.2010	19:30	113	20:45	56	NE	časový posun neodpovídá
	14.8.2010	19:45	108	21:00	57	NE	časový posun neodpovídá

modelování jeho disperze. Proto experimentální stanovení podmínek dynamiky těchto parametrů umožní přesný odhad disperze aerosolu z těžební činnosti.

4 Závěr

Z terénních měření vyplývá, že důlní činnost je zdrojem zejména hrubé frakce aerosolu, tj. částic o aerodynamickém průměru větším než 1 μm . Jemná frakce PM_{10} byla rozptýlena homogenně podél svahu a její hlavní zdroj se pravděpodobně nacházel mimo povrchový důl.

Hrubá frakce se ve většině případů šíří do 60 výškových metrů ode dna dolu.

Dle zjednodušených předpokladů o rychlosti a směru větru bylo možno v 31 % případů vysledovat odezvy maximálních koncentrací aerosolu měřených v dole na stanicích v okolí dolu. Mimo důl koncentrace PM_{10} vzrostly o 25–57 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ vzhledem ke koncentracím před epizodou a dosahovaly 23–39 % hodnot koncentrací měřených v dole.

Statisticky významnou četnost výskytu těchto rozptylových situací během roku by bylo vhodné zjistit dalším měřením.

Na základě laboratorních měření resuspenzního koeficientu a těžebního výkonu byla spočítána teoretická maximální hodinová koncentrace PM_{10} v objemu těžební jámy, která činila trojnásobek experimentální hodnoty. Příčinami rozdílu mohou být orografie těžební jámy, vertikální šíření a velikostní distribuce hmotnosti aerosolu, která se lišila od distribuce naměřené v laboratoři. Pro kompletní studii látkové bilance aerosolu generované těžební činností by bylo tedy vhodné tyto tři příčiny podrobně charakterizovat.

Orografie jámy způsobuje nehomogenitu proudění vzduchu a disperze vzniklého aerosolu. Proudění lze charakterizovat 3D měřením rychlosti a směru větru spolu s dynamikou teploty povrchu dolu a vlhkosti vzduchu. Nehomogenitu disperze aerosolu lze postihnout zkrácením integrační doby na jednu minutu, přičemž liniové měření na dně dolu povede k přesnému určení efektivního objemu V . Přesné měření efektivního objemu V umožní rigorózní odhad emisních faktorů pro aplikaci FDM.

Vertikální šíření aerosolu lze charakterizovat s pomocí platformy umožňující snadnou změnu vertikální polohy.

Pro skutečnou velikostní distribuci aerosolu je nutné použít přístroj, umožňující terénní měření velikostní distribuce s krátkou integrační dobou.

Poděkování

Tato práce vznikla v rámci projektu SP/1a3/149/08 Ministerstva životního prostředí České republiky.

Literatura

[1] CHAKRABORTY, M. K., AHMAD, L., SINGH, R. S., PAL, D., BANDOPADHYAY, C., CHAULYA, S. K.: *Determination of the emission rate from various opencast mining operations*. Environmental Modelling & Software 17, pp. 467–480, 2002.

[2] CHAULYA, S. K.: *Spatial and temporal variations of SPM, RPM, SO_2 and NO_x concentrations in an opencast mining area*. Journal of Environmental Monitoring 6, pp. 134–142, 2004.

[3] CHAULYA, S. K.: *Assessment and management of air quality for an opencast coal mining area*. Journal of Environmental Management 70, pp. 1–14, 2004.

[4] CIVIŠ, M.: *Stanovení resuspendovatelné frakce ve vzorcích půd a pouličního prachu s využitím resuspenzní komory*, Disertační práce, Ústav pro životní prostředí, Přírodovědecká fakulta UK v Praze, 2010.

[5] CIVIŠ, M., HOVORKA, J., THIMMAIAH, D.: *Stanovení velikostní distribuce částic resuspendovatelné složky vzorků z povrchového hnědouhelného dolu v resuspenzní komoře*. Zpravodaj Hnědé uhlí 1/2011, pp. 34–44, ISSN 1213 – 1660.

[6] GHOSE, M. K.: *Emission factor for quantification of dust in Indian coal mines*. Journal of Scientific & Industrial Research 63, pp. 763–768, 2004.

[7] ONDER, M., YIGIT, E.: *Assessment of respirable dust exposures in an opencast coal mine*. Environmental Monitoring Assessment 152, pp. 393–401, 2009.

[8] TRIVEDI, R., CHAKRABORTY, M. K., TEWARY, B. K.: *Dispersion modeling using fugitive dust model at an opencast coal project of Western Coalfields Limited, India*. Journal of Scientific & Industrial Research 68, pp. 71–78, 2009.

[9] U.S. Environmental Protection Agency, *User's Guide for the Fugitive Dust Model (FDM) (Revised)*. EPA/910/9-88/0202R, 1988.