

Vliv meteorologických faktorů na koncentrace vybraných látek znečišťujících ovzduší

Influence of meteorological factors on concentrations of selected air pollutants

Hana Škáchová

Český hydrometeorologický ústav
Na Šabatce 17
143 06 Praha 4-Komořany
✉ hana.skachova@chmi.cz

The article deals with the influence of air temperature, precipitation, wind speed and ventilation index on the concentrations of particulate matter PM_{10} and $PM_{2.5}$, and nitrogen dioxide NO_2 by multivariate regression analysis in the period 2011–2020 with respect to the cold and warm seasons. The concentrations of PM_{10} , $PM_{2.5}$, and NO_2 show a close relationship with meteorological and dispersion conditions. The greatest influence on PM_{10} and $PM_{2.5}$ concentrations is the ventilation index, less so air temperature and wind speed. In both cold and warm seasons, concentrations decrease with increasing values of ventilation index and wind speed. The effect of air temperature varies with the season. In the cold season, concentrations decrease with increasing air temperature, while they increase during the warm season. NO_2 concentrations in both cold and warm seasons depend most on wind speed and ventilation index, less on air temperature, while concentrations decrease with the increasing values of both of the meteorological factors. Episodes with high PM_{10} concentrations are more frequently observed during anticyclonic large-scale weather situations. Long-lasting episodes, in which Smog Warning and Regulation System alerts have been issued, correspond to situations where the centre of the anticyclone or its rear part is located over the Czech Republic and massive temperature inversions are formed.

KLÍČOVÁ SLOVA: kvalita ovzduší – podmínky rozptylové – index ventilační – částice suspendované – oxid dusičitý – situace synoptická

KEYWORDS: air quality – dispersion conditions – ventilation index – particulate matter – nitrogen dioxide – synoptic situation

1. Úvod

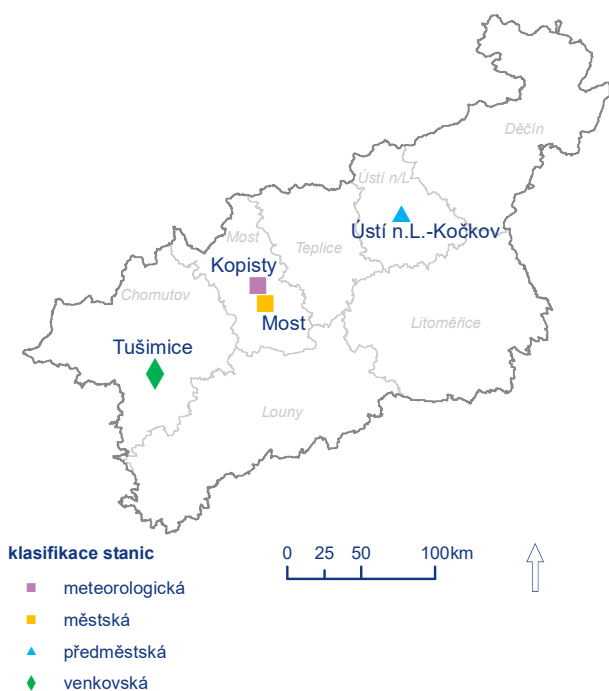
Znečištění venkovního prostředí představuje jeden ze závažných problémů současného světa. Mezi významné látky znečišťující venkovní ovzduší sledované v České republice patří suspendované částice frakce PM_{10} a $PM_{2.5}$, benzo[*a*]pyren, oxid dusičitý NO_2 , přízemní ozon O_3 , oxid siřičitý SO_2 , těžké kovy (arsen, kadmium, nikl, olovo) a benzen. Pro tyto látky jsou definovány imisní limity pro ochranu zdraví obyvatelstva. Pro lepší hodnocení stavu kvality ovzduší je nutné znát a pochopit vztahy mezi úrovní imisní zátěže a faktorů, které úroveň znečištění ovlivňují, ať již v pozitivním nebo negativním smyslu. Těchto faktorů je celá řada a patří mezi ně zejména množství emisí a meteorologické a rozptylové podmínky. Významný vliv má geografie místa, využití krajiny a také probíhají opatření pro zlepšení kvality ovzduší, jako je výměna kotlů, obnova vozového parku či opatření na velkých zdrojích (ČHMÚ 2023a; ČHMÚ 2023b).

Vztah kvality ovzduší a meteorologických faktorů lze hodnotit jako celek v průběhu celého roku (např. Pearce 2011), nebo v jednotlivých ročních obdobích, příp. sezónách (např. Blažek 2013; Cichowicz 2017; Kalbarczyk 2020; Trivedi 2014; Whiteman 2014). Rozdělení na chladnou (říjen–březen) a teplou (duben–září) sezonu lépe reflektuje rozdílný podíl emisních zdrojů v jednotlivých ročních obdobích. Období říjen–březen odpovídá topné sezoně, kdy je hladina znečištění venkovního ovzduší výrazně ovlivněna domácími topeništi. Období duben–září pak zahrnuje zemědělské práce, jako je orba či sklizeň a přejezdy obyvatel na víkendová obydli a na dovolenou. Kromě teploty vzduchu, srážek či rychlosti a směru větru, má na úroveň znečištění významný vliv i synoptická situace a stabilita zvrstvení atmosféry (Blažek 2013; Černý, Keder 2007; Whiteman 2014; Chemel 2016; Hassan 2020). Meteorologické faktory jsou vzájemně závislé a jejich působení je tedy nutné hodnotit celkově. Dosavadní studie proto využívají pro hodnocení vztahu mezi koncentracemi znečišťujících látek a meteorologických faktorů různé metody vícerozměrných analýz, jejichž základní typy jsou ordinační metody a shluková analýza. Nejčastěji se setkáváme s vícenásobnou lineární regresí (např. Juneng 2011; Kalisa 2018; Tai 2010), vícerozměrný regresní model (Laňa 2016; Pearce 2011), clusterovou analýzu (Kalbarczyk 2020) a umělou neuronovou síť kombinovanou s vlnkovou transformací (He 2017).

Článek vychází z diplomové práce (Škáchová 2021). Jsou v něm hodnoceny vzájemné vztahy meteorologických faktorů a vybraných znečišťujících látek v období 2011–2020 na lokalitách Ústí n.L.-Kočkov, Tušimice a Most, všechny v Ústeckém kraji.

2. Vstupní data

Pro účely této práce byly zvoleny tři lokality v Ústeckém kraji, kde se měří znečištění ovzduší a současně meteorologické veličiny, a to Ústí nad Labem, Tušimice a Most (obr. 1). První dvě lokality požadavek na souběh měření splňují, k lokalitě Most byla přiřazena meteorologická data z blízké meteorologické stanice Kopisty. Stanice Ústí n.L.-Kočkov (UULK) je klasifikována jako pozadová předměstská a nachází se v areálu pobočky ČHMÚ Ústí nad Labem v severní části města na západním svahu kopce Velký Brand. Stanice Tušimice (UTUS) je umístěna v areálu Observatoře Tušimice ČHMÚ v těsné blízkosti uhelných tepelných Elektráren Tušimice (ETU I a ETU II), nedaleko města Kadaň a vodní nádrže Nechanice, a je klasifikována jako pozadová venkovská stanice. Pozadová městská stanice Most (UMOM) se nachází v severní části města Most v blízkosti fotbalového stadionu. Všechny tři stanice mají oblastní reprezentativnost, tj. 4–50 km, jsou součástí Státní sítě imisního monitoringu (SSIM) a jsou využívány pro účely Smogového varovného a regulačního systému (SVRS).



Obr. 1 Zájmové lokality, Ústecký kraj.

Fig. 1. Locations of interest, Ústí nad Labem Region.

Základní soubor dat obsahuje průměrné hodinové koncentrace suspendovaných částic PM_{10} a $PM_{2,5}$ a oxidu dusičitého NO_2 , meteorologická data z přízemního pozorování (teplota vzduchu, rychlost větru a hodinové úhrny srážek měřené v dané hodině) a vypočítané hodnoty ventilačního indexu (VI). Ventilační index je definován jako součin výšky směšovací vrstvy a průměrné rychlosti větru uvnitř této vrstvy, přičemž platí, že čím vyšší hodnota VI, tím lepší rozptylové podmínky. Je nutno zdůraznit, že nízké hodnoty VI nemusí nutně indikovat vysoké koncentrace znečišťujících látek, neboť zde hraje roli i délka trvání dané situace, výchozí úroveň znečištění či rozložení zdrojů a jejich emisí do vrstvy pod inverzí (Ferguson 2001; Keder, Škáchová 2011; Škáchová 2019) v dané hodině za období 2011–2020. Všechny termíny pozorování a data jsou v SEČ.

3. Metodika

Současný vliv ventilačního indexu, rychlosti větru, teploty vzduchu a úhrnů srážek na jednotlivé látky znečišťující ovzduší byl analyzován metodou vícerozměrné vzestupné lineární krokové regrese. Při této metodě jsou na základě výchozí korelační matice postupně vybírány meteorologické faktory (prediktory). Počínaje nejvyšším parciálním korelačním koeficientem jsou jednotlivé prediktory postupně přidávány do regresní rovnice tak dlouho, dokud se přidáním dalšího prediktoru významně zvyšuje věcná významnost charakterizovaná koeficientem determinace R^2 . Hodnotí se jednak míra a směr vlivu jednotlivých meteorologických parametrů, jednak celkový vliv komplexu meteorologických parametrů dle statistické významnosti (sig. (p)) a po věcné stránce pomocí koeficientů determinace R^2 , vyjadřujících míru rozptylu, který lze vysvětlit příslušnou regresí. Jedná se o explorační metodu, jejímž cílem je co nejlepší predikce, resp. vysvětlení hodnot analyzované proměnné pomocí co nejmenšího počtu prediktorů.

Pro výpočet regresních vztahů metodou lineární regrese se předpokládá lineární závislost predikované proměnné (zde koncentrací dané znečišťující látky) na zvolených nezávisle proměnných (prediktorech, zde meteorologické proměnné). V případě silné nelinearity se zpravidla provádí transformace buď závislé, nebo nezávislé proměnné. Ideální výsledek regrese je takový, aby residuum lineární regrese mělo normální rozložení (Kubánková 1987; Zvára 1989). Ventilační index má exponenciální rozložení a silný nelineární vztah ke koncentracím (Škáchová 2019), proto byla použita jeho logaritmická transformace. Ta má, ve srovnání s netransformovaným VI, vyšší hodnotu korelačního koeficientu a lépe tedy odpovídá požadavku linearity mezi závisle a nezávisle proměnnou. Logaritmická transformace byla použita ve tvaru dekadického logaritmu $\log(VI+1)$, dále označovaného jen jako $\log VI$. Matematická úprava $VI+1$ byla zvolena z důvodu nulových hodnot VI. Ty po logaritmické transformaci nabývají hodnot mínus nekonečno a hodnoty VI mezi nulou a jedničkou jsou z matematického hlediska považovány za silně rozdílné, avšak z věcného hlediska rozptylových podmínek je rozdíl mezi nimi velmi malý.

Analyzováno bylo období 2011–2020, a to zvláště pro chladnou (říjen–březen) a teplou (duben–září) sezonu.

4. Výsledky

Pro základní orientaci v datech byly nejprve spočítány korelační matice závislosti mezi dvojicemi všech uvažovaných meteorologických i nemeteorologických proměnných. Z tab. 1–3 vyplývá, že korelace téměř mezi všemi dvojicemi posuzovaných veličin jsou statisticky významné na hladině 0,05. To je mj. dáno i velkým rozsahem analyzovaných souborů, kdy i malé (věcně nepříliš významné) korelace jsou statisticky významné. Statisticky nevýznamné jsou korelace mezi koncentracemi PM_{10} a $PM_{2,5}$ a teplotou vzduchu v teplé sezoně na lokalitě Ústí n.L.-Kočkov, mezi koncentracemi $PM_{2,5}$ a srážkami během teplé sezony na všech třech lokalitách a mezi koncentracemi PM_{10} a srážkami během teplé sezony na lokalitě Tušimice. Korelační koeficienty většiny meteorologických faktorů a znečišťujících látek jsou záporné, tj. s rostoucí hodnotou meteorologického faktoru klesá koncentrace znečišťující látky v ovzduší. Výjimkou jsou korelace koncentrací PM_{10} a $PM_{2,5}$ a teploty vzduchu na lokalitě Tušimice a korelace koncentrací PM_{10} a srážkami v teplé sezoně na lokalitě Most.

Korelace znečišťujících látek se srážkami jsou v teplé sezoně velmi malé, bez ohledu na statistickou významnost. V chladném období jsou korelace vyšší a indikují pokles znečištění s růstem srážkových úhrnů, což lze mj. přičíst odlišnému charakteru srážek v obou sezonách. V teplé sezoně jsou srážky spojeny spíše s tvorbou kupovitě, resp. bouřkové oblačnosti a obvykle mají kratší trvání a větší intenzitu. Naopak v chladné sezoně jsou srážky vázány primárně na frontální systémy a vrstevnatou oblačnost a obvykle mají delší trvání a menší intenzitu (Tolasz 2007). Během chladné sezony jsou vyšší i korelace s ostatními meteorologickými faktory. V případě VI je patrné, že $\log VI$ má vyšší korelační koeficient než VI a zvolená logaritmická transformace je tedy vhodnější pro použití v lineární regresi než VI.

Tab. 1 Korelační matice pro teplotu vzduchu, srážky, rychlost větru, $\log VI$ a VI vs. PM_{10} , $PM_{2,5}$ a NO_2 , Ústí n.L.-Kočkov, 2011–2020.

Table 1. Correlation matrix for air temperature, precipitation, wind speed, $\log VI$ and VI vs. PM_{10} , $PM_{2,5}$ and NO_2 , Ústí n.L.-Kočkov, 2011–2020.

	PM_{10}		$PM_{2,5}$		NO_2	
	chladná sezona	teplá sezona	chladná sezona	teplá sezona	chladná sezona	teplá sezona
teplota vzduchu	-0,228	0,000	-0,290	-0,009	-0,140	-0,126
srážky	-0,095	-0,019	-0,090	0,010	-0,028	-0,016
rychlost větru	-0,365	-0,238	-0,324	-0,208	-0,446	-0,330
$\log VI$	-0,423	-0,273	-0,384	-0,250	-0,412	-0,309
VI	-0,296	-0,165	-0,286	-0,171	-0,268	-0,196

Tab. 2 Korelační matice pro teplotu vzduchu, srážky, rychlost větru, $\log VI$ a VI vs. PM_{10} , $PM_{2,5}$ a NO_2 , Tušimice, 2011–2020.

Table 2. Correlation matrix for air temperature, precipitation, wind speed, $\log VI$ and VI vs. PM_{10} , $PM_{2,5}$ and NO_2 , Tušimice, 2011–2020.

	PM_{10}		$PM_{2,5}$		NO_2	
	chladná sezona	teplá sezona	chladná sezona	teplá sezona	chladná sezona	teplá sezona
teplota vzduchu	-0,266	0,039	-0,212	0,091	-0,303	-0,212
srážky	-0,048	0,004	-0,028	0,005	-0,029	-0,018
rychlost větru	-0,396	-0,192	-0,321	-0,141	-0,464	-0,354
$\log VI$	-0,426	-0,138	-0,391	-0,140	-0,472	-0,344
VI	-0,312	-0,097	-0,279	-0,100	-0,349	-0,231

Tab. 3 Korelační matice pro teplotu vzduchu, srážky, rychlost větru, $\log VI$ a VI vs. PM_{10} , $PM_{2,5}$ a NO_2 , Most, 2011–2020.

Table 3. Correlation matrix for air temperature, precipitation, wind speed, $\log VI$ and VI vs. PM_{10} , $PM_{2,5}$ and NO_2 , Most, 2011–2020.

	PM_{10}		$PM_{2,5}$		NO_2	
	chladná sezona	teplá sezona	chladná sezona	teplá sezona	chladná sezona	teplá sezona
teplota vzduchu	-0,345	-0,125	-0,344	-0,068	-0,328	-0,338
srážky	-0,079	0,013	-0,067	-0,009	-0,046	-0,031
rychlost větru	-0,416	-0,337	-0,378	-0,196	-0,522	-0,527
$\log VI$	-0,519	-0,430	-0,470	-0,338	-0,464	-0,506
VI	-0,344	-0,253	-0,334	-0,212	-0,352	-0,316

Pozn.: Tučně jsou označeny korelace významné na hladině $p < 0,05$.
Note: Correlations significant at the $p < 0,05$ level are marked in bold.

4.1 Vícerozměrná vzestupná lineární kroková regrese

V tab. 4–9 jsou uvedeny výsledky regresi, přičemž všechny regrese jsou statisticky významné na hladině $p < 0,000$. Znaménko regresních koeficientů (b) vyjadřuje směr vlivu jednotlivých meteorologických faktorů. Postupné koeficienty determinace (R^2) dobře ukazují věcný význam dané kombinace prediktorů pro analyzovanou závislost. Tučným řezem písma jsou označeny kroky, kdy přidáním příslušné meteorologické proměnné se ještě zvýšil celkový koeficient determinace R^2 , který vystihuje celkový vliv meteorologických faktorů na koncentraci znečišťujících látek (ten je uveden jako poslední tučně označený řádek posledního sloupce jednotlivých regresi) a vyjadřuje míru rozptylu, který se dá vysvětlit příslušnou regresi. Je třeba zdůraznit, že vzájemné meteorologické faktory jsou vzájemně korelovány a jejich působení je tedy nutné hodnotit celkově.

4.1.1 Koncentrace PM_{10}

V případě koncentrací PM_{10} (tab. 4–5) se v chladném období na všech lokalitách nejvíce uplatňuje VI, ve výrazně menší míře pak teplota a rychlost větru. Vliv srážek je v rámci vícenásobných lineárních regresi prakticky zanedbatelný. Regresi lze vysvětlit cca 23–33 % rozptylu koncentrací PM_{10} v chladné sezoně a 6–20 % v teplé sezoně. V chladné sezoně je závislost koncentrací PM_{10} na všech uvažovaných meteorologických faktorech nepřímo úměrná. V teplé sezoně se na lokalitách Ústí n.L.-Kočkov a Most nejvíce uplatňuje vliv VI, zatímco na lokalitě Tušimice vliv rychlosti větru a na úroveň znečištění zde

Tab. 4 Souhrnné výsledky vícenásobných regresi PM_{10} vs. teplota vzduchu, srážky, rychlost větru, $\log VI$ pro chladnou sezonu na lokalitách Ústí n.L. Kočkov, Tušimice, Most.

Table 4. Summary results of multiple regressions PM_{10} vs. air temperature, precipitation, wind speed, $\log VI$ for the cold season at the sites of Ústí n.L. Kočkov, Tušimice, Most.

	b	t	sig. (p)	Vícenás. (R)	Vícenás. (R²)
Ústí nad Labem-Kočkov; chladná sezona; N=43590; F=3318; p<0,0000					
abs. člen	61,419	139,764	0,000		
$\log VI$	-8,037	-54,662	0,000	0,423	0,179
teplota vzduchu	-0,720	-41,150	0,000	0,456	0,208
rychlost větru	-2,143	-36,790	0,000	0,481	0,232
srážky	-3,947	-10,151	0,000	0,483	0,233
Tušimice; chladná sezona; N=43225; F=3620; p<0,0000					
abs. člen	59,802	156,465	0,000		
$\log VI$	-6,727	-51,006	0,000	0,431	0,186
rychlost větru	-2,546	-45,820	0,000	0,477	0,228
teplota vzduchu	-0,692	-35,738	0,000	0,500	0,250
srážky	-3,613	-7,313	0,000	0,501	0,251
Most; chladná sezona; N=43526; F=5429; p<0,0000					
abs. člen	75,400	198,459	0,000		
$\log VI$	-10,315	-78,765	0,000	0,519	0,270
teplota vzduchu	-1,055	-49,147	0,000	0,560	0,314
rychlost větru	-2,868	-34,349	0,000	0,576	0,332
srážky	-3,974	-7,333	0,000	0,577	0,333

má tedy výrazně významný podíl horizontální přenos. Oproti chladné sezoně je závislost PM_{10} na teplotě přímo úměrná. Vysoké teploty jsou v létě charakteristické pro anticyklonální situace, které jsou často provázány stabilním zvrstvením atmosféry, a je tedy omezeno vertikální promíchávání vzduchu. Vliv srážek na koncentraci PM_{10} je na všech třech lokalitách prakticky zanedbatelný, na lokalitách Ústí n.L.-Kočkov a Most je zanedbatelný i vliv teploty. Menší vliv srážek v létě lze vysvětlit i jejich charakterem, kdy větší úhrny spadnou obvykle za relativně krátkou dobu (přeháňky, bouřky) a často až pozdě odpoledne nebo večer. V případě vyšších koncentrací v ranních a dopoledních hodinách může zůstat celodenní průměr koncentrací vysoký i přes večerní srážky.

Tab. 5 Souhrnné výsledky vícenásobných regresí PM_{10} vs. teplota vzduchu, srážky, rychlost větru, logVI pro teplou sezonu na lokalitách Ústí n.L. Kočkov, Tušimice, Most.

Table 5. Summary results of multiple regressions PM_{10} vs. air temperature, precipitation, wind speed, logVI for the cold season at the sites of Ústí n.L. Kočkov, Tušimice, Most.

	b	t	sig. (p)	Vícenás. (R)	Vícenás. (R²)
Ústí nad Labem-Kočkov; teplá sezona; N=43131; F=1041; p<0,0000					
abs. člen	33,800	94,001	0,000		
logVI	-4,244	-38,635	0,000	0,276	0,076
rychlost větru	-1,001	-22,388	0,000	0,295	0,087
teplota vzduchu	0,064	5,804	0,000	0,297	0,088
srážky	-0,124	-1,212	0,226	0,297	0,088
Tušimice; teplá sezona; N=43447; F=711; p<0,0000					
abs. člen	26,670	71,478	0,000		
rychlost větru	-1,850	-37,722	0,000	0,219	0,048
teplota vzduchu	0,280	23,089	0,000	0,239	0,057
logVI	-1,644	-14,465	0,000	0,248	0,061
srážky	0,170	1,393	0,164	0,248	0,061
Most; teplá sezona; N=43325; F=2815; p<0,0000					
abs. člen	52,413	148,401	0,000		
logVI	-7,585	-69,949	0,000	0,429	0,184
rychlost větru	-2,389	-34,095	0,000	0,453	0,205
srážky	0,867	6,036	0,000	0,454	0,206
teplota vzduchu	0,064	4,831	0,000	0,454	0,206

Pozn.: Tučně jsou vyznačeny kroky regresí do momentu, kdy další přidání prediktoru již nezvyšuje celkovou determinaci regrese. N ... počet případů, F ... statistika celkové regrese, p ... statistická významnost celkové regrese
b... parciální regresní koeficienty výsledné regrese, t ... t-statistiky regresních koeficientů, sig. (p) ... statistická významnost
R ... vícenásobné regresní koeficienty, R² ... koeficienty determinace při daném počtu proměnných zahrnutých do jednotlivých postupných kroků regrese

Note: Regression steps are shown in bold until the next addition of a predictor no longer increases the overall regression determination. N ... number of cases, F ... overall regression statistic, p ... statistical significance of the overall regression

b ... partial regression coefficients of the resulting regression, t ... t-statistics of the regression coefficients, sig. (p) ... statistical significance

R ... multiple regression coefficients, R² ... coefficients of determination for a given number of variables included in each successive step of the regression

Tab. 6 Souhrnné výsledky vícenásobných regresí $PM_{2,5}$ vs. teplota vzduchu, srážky, rychlost větru, logVI pro chladnou sezonu na lokalitách Ústí n.L. Kočkov, Tušimice, Most.

Table 6. Summary results of multiple regressions $PM_{2,5}$ vs. air temperature, precipitation, wind speed, logVI for the cold season at the sites of Ústí n.L. Kočkov, Tušimice, Most.

	b	t	sig. (p)	Vícenás. (R)	Vícenás. (R²)
Ústí nad Labem-Kočkov; chladná sezona; N=43441; F=3050; p<0,0000					
abs. člen	45,870	125,719	0,000		
logVI	-5,686	-46,634	0,000	0,381	0,145
teplota vzduchu	-0,805	-55,549	0,000	0,446	0,199
rychlost větru	-1,548	-32,098	0,000	0,466	0,217
srážky	-3,233	-10,053	0,000	0,468	0,219
Tušimice; chladná sezona; N=25876; F=1422; p<0,0000					
abs. člen	49,312	94,389	0,000		
logVI	-7,119	-41,560	0,000	0,393	0,155
rychlost větru	-1,303	-20,844	0,000	0,414	0,171
teplota vzduchu	-0,394	-16,969	0,000	0,424	0,180
srážky	0,862	1,443	0,149	0,424	0,180
Most; chladná sezona; N=43503; F=4336; p<0,0000					
abs. člen	51,296	178,670	0,000		
logVI	-6,646	-67,139	0,000	0,469	0,220
rychlost větru	-0,833	-51,286	0,000	0,520	0,270
teplota vzduchu	-1,852	-29,330	0,000	0,533	0,285
srážky	-2,219	-5,411	0,000	0,534	0,285

Tab. 7 Souhrnné výsledky vícenásobných regresí $PM_{2,5}$ vs. teplota vzduchu, srážky, rychlost větru, logVI pro teplou sezonu na lokalitách Ústí n.L. Kočkov, Tušimice, Most.

Table 7. Summary results of multiple regressions $PM_{2,5}$ vs. air temperature, precipitation, wind speed, logVI for the cold season at the sites of Ústí n.L. Kočkov, Tušimice, Most.

	b	t	sig. (p)	Vícenás. (R)	Vícenás. (R²)
Ústí nad Labem-Kočkov; teplá sezona; N=43158; F=837; p<0,0000					
abs. člen	24,514	87,381	0,000		
logVI	-3,112	-36,309	0,000	0,253	0,064
rychlost větru	-0,634	-18,185	0,000	0,267	0,071
srážky	0,367	4,585	0,000	0,268	0,072
teplota vzduchu	0,033	3,905	0,000	0,268	0,072
Tušimice; teplá sezona; N=25988; F=293; p<0,0000					
abs. člen	21,663	47,962	0,000		
logVI	-2,553	-18,925	0,000	0,144	0,021
teplota vzduchu	0,238	19,699	0,000	0,189	0,036
rychlost větru	-0,723	-14,154	0,000	0,207	0,043
srážky	0,293	2,169	0,030	0,208	0,043
Most; teplá sezona; N=43076; F=1913; p<0,0000					
abs. člen	33,690	113,663	0,000		
logVI	-5,643	-62,054	0,000	0,339	0,115
teplota vzduchu	0,103	9,363	0,000	0,341	0,116
rychlost větru	-0,468	-7,987	0,000	0,343	0,118

Tab. 8 Souhrnné výsledky vícenásobných regresí NO₂ vs. teplota vzduchu, srážky, rychlost větru, logVI pro chladnou sezonu na lokalitách Ústí n.L. Kočkov, Tušimice, Most.

Table 8. Summary results of multiple regressions NO₂ vs. air temperature, precipitation, wind speed, logVI for the cold season at the sites of Ústí n.L. Kočkov, Tušimice, Most.

	b	t	sig. (p)	Vícenás. (R)	Vícenás. (R²)
Ústí nad Labem-Kočkov; chladná sezona; N=41583; F=3360; p<0,0000					
abs. člen	36,121	148,310	0,000		
rychlost větru	-1,956	-60,651	0,000	0,446	0,199
logVI	-3,444	-42,245	0,000	0,486	0,236
teplota vzduchu	-0,193	-19,926	0,000	0,494	0,244
srážky	1,309	6,046	0,000	0,494	0,244
Tušimice; chladná sezona; N=41480; F=5187; p<0,0000					
abs. člen	26,210	181,079	0,000		
rychlost větru	-1,224	-58,525	0,000	0,455	0,207
logVI	-2,237	-44,988	0,000	0,504	0,254
teplota vzduchu	-0,239	-32,747	0,000	0,522	0,273
Most; chladná sezona; N=41449; F=7380; p<0,0000					
abs. člen	41,606	207,112	0,000		
rychlost větru	-3,300	-75,330	0,000	0,522	0,273
logVI	-3,162	-45,873	0,000	0,565	0,319
teplota vzduchu	-0,488	-43,285	0,000	0,590	0,348

4.1.2 Koncentrace PM_{2,5}

Koncentrace PM_{2,5} (tab. 6–7) se chovají obdobně jako PM₁₀, závislosti na všech meteorologických faktorech jsou nepřímo úměrné. Regresí lze vysvětlit cca 18–28 % rozptylu koncentrací PM_{2,5} v chladné sezoně a 4–12 % v teplé sezoně. V chladném období jsou koncentrace na všech lokalitách nejvýznamněji ovlivňovány VI. Vliv srážek je ve všech případech prakticky zanedbatelný. Na lokalitě Ústí n.L.-Kočkov je významná i závislost na rychlosti větru, na lokalitě Tušimice pak na teplotě a rychlosti větru. V teplém období jsou na lokalitě Most téměř zanedbatelné závislosti na teplotě a rychlosti větru. Stejně jako v případě PM₁₀ je závislost PM_{2,5} na teplotě, oproti chladné sezoně, přímo úměrná.

4.1.3 Koncentrace NO₂

Koncentrace NO₂ (tab. 8–9) jsou v chladné i teplé sezoně na všech lokalitách nejvýznamněji závislé na rychlosti větru a VI, v menší míře pak na teplotě. Vliv srážek je ve všech případech prakticky zanedbatelný. Regresí lze vysvětlit cca 24–35 % rozptylu koncentrací NO₂ v chladné sezoně a 14–39 % v teplé sezoně. Všechny statisticky významné závislosti mají nepřímo úměrný charakter. Nejvyšší závislost je v chladné i teplé sezoně patrná na lokalitě Most. Vzhledem k tomu, že největší množství emisí NO₂ pochází ze silniční dopravy, lze usuzovat na vliv parkoviště v těsné blízkosti měřicí stanice a nedaleké vytižené městské komunikace a silnice I/13. V případě nízkých teplot mohou mít vliv na koncentrace i tzv. studené starty automobilů, které produkují více emisí než běžný provoz.

Tab. 9 Souhrnné výsledky vícenásobných regresí NO₂ vs. teplota vzduchu, srážky, rychlost větru, logVI pro teplou sezonu na lokalitách Ústí n.L. Kočkov, Tušimice, Most.

Table 9. Summary results of multiple regressions NO₂ vs. air temperature, precipitation, wind speed, logVI for the cold season at the sites of Ústí n.L. Kočkov, Tušimice, Most.

	b	t	sig. (p)	Vícenás. (R)	Vícenás. (R²)
Ústí nad Labem-Kočkov; teplá sezona; N=41217; F=2314; p<0,0000					
abs. člen	18,067	115,029	0,000		
rychlost větru	-0,857	-44,177	0,000	0,329	0,108
LogVI	-1,474	-30,682	0,000	0,365	0,133
teplota vzduchu	-0,109	-22,868	0,000	0,380	0,144
Tušimice; teplá sezona; N=41582; F=1877; p<0,0000					
abs. člen	17,483	138,018	0,000		
rychlost větru	-0,813	-49,181	0,000	0,330	0,109
logVI	-1,390	-36,005	0,000	0,380	0,144
teplota vzduchu	-0,084	-20,489	0,000	0,391	0,153
srážky	-0,065	-1,583	0,113	0,391	0,153
Most; teplá sezona; N=41309; F=6546; p<0,0000					
abs. člen	41,119	196,252	0,000		
rychlost větru	-3,259	-79,204	0,000	0,528	0,278
logVI	-3,954	-61,417	0,000	0,599	0,359
teplota vzduchu	-0,341	-44,018	0,000	0,623	0,388
srážky	-0,430	-5,171	0,000	0,623	0,388

Pozn.: Tučně jsou vyznačeny kroky regresí do momentu, kdy další přidání prediktoru již nezvyšuje celkovou determinaci regrese. N ... počet případů, F ... statistika celkové regrese, p ... statistická významnost celkové regrese
b... parciální regresní koeficienty výsledné regrese, t ... t-statistiky regresních koeficientů, sig. (p) ... statistická významnost
R ... vícenásobné regresní koeficienty, R² ... koeficienty determinace při daném počtu proměnných zahrnutých do jednotlivých postupných kroků regrese

Note: Regression steps are shown in bold until the next addition of a predictor no longer increases the overall regression determination. N ... number of cases, F ... overall regression statistic, p ... statistical significance of the overall regression
b ... partial regression coefficients of the resulting regression, t ... t-statistics of the regression coefficients, sig. (p) ... statistical significance
R ... multiple regression coefficients, R² ... coefficients of determination for a given number of variables included in each successive step of the regression

4.2 Epizody s vysokými koncentracemi PM₁₀

V období 2011–2020 se vyskytlo celkem 481 dní, kdy koncentrace PM₁₀ překročily hodnotu denního imisního limitu alespoň na jedné ze tří studovaných lokalit. Z těchto 481 dní bylo 279 dní s anticyklonální situací a 202 dní s cyklonální (tab. 10), přičemž pro hodnocení synoptické situace byl využit kalendář synoptických typů (ČHMÚ 2010). Nejčastěji se vyskytovala východní anticyklonální situace (Ea), a to v 76 dnech, dále jihozápadní cyklonální situace (SWc) v 53 dnech a jihovýchodní anticyklonální situace (SEa) v 50 dnech. Nejméně často byly vyšší koncentrace zaznamenány v průběhu severní cyklonální situace (Nc; 1 den) a severozápadní anticyklonální situace (NWa; 4 dny). Nejvíce dní s koncentracemi PM₁₀ nad hodnotou

Tab. 10 Počet výskytu cyklonálních a anticyklonálních situací během epizod s vysokými koncentracemi PM_{10} .Table 10. Number of occurrences of cyclonic and anticyclonic large-scale weather situations during episodes with high PM_{10} concentrations.

Anticyklonální situace			Cyklonální situace		
Ea	východní anticyklonální situace	76	SWc	jihozápadní cyklonální situace	53
SEa	jihovýchodní anticyklonální situace	50	Bp	brázda postupující přes střední Evropu	32
A	anticyklóna nad střední Evropou	44	B	brázda nízkého tlaku nad střední Evropou	21
Ap	putující anticyklóna	31	SEc	jihovýchodní cyklonální situace	18
Sa	jižní anticyklonální situace	30	Ec	východní cyklonální situace	16
SWa	jihozápadní anticyklonální situace	24	Cv	cyklóna výšková	15
NEa	severovýchodní anticyklonální situace	12	Wc	západní cyklonální situace	15
Wa	západní anticyklonální situace	8	Wcs	západní cyklonální situace s jižní dráhou	13
NWa	severozápadní anticyklonální situace	4	Vfz	vchod frontální zóny	11
			NWc	severozápadní cyklonální situace	7
			Nc	severní cyklonální situace	1
Celkem		279	Celkem		202

denního imisního limitu (92) bylo zaznamenáno v roce 2011, přičemž 64 z nich bylo označeno jako anticyklonální situace a 28 jako cyklonální. Naopak nejméně dní bylo zaznamenáno v roce 2020, a to v 6 dnech s jako anticyklonální a v 7 jako cyklonální situací.

V průběhu let 2011–2020 se vyskytlo několik dlouhotrvajících epizod, kdy průměrné denní koncentrace PM_{10} překračovaly hodnotu denního imisního limitu a docházelo i k vyhlášení smogových situací či regulací. Výskyt těchto dlouhotrvajících epizod je typický pro anticyklonální situace, a to zejména povětrnostní typ anticyklóna nad střední Evropou (A), východní anticyklonální situace (Ea) a jihovýchodní anticyklonální situace (SEa). Tedy situace, kdy se střed anticyklony nachází nad ČR, nebo nad ČR zasahuje její týlová část a dochází k vytváření mohutných teplotních inverzí. K překročení hodnoty denního imisního limitu během cyklonální situace prakticky nedochází.

5. Diskuse

Z výsledků vyplývá, že hladina koncentrací PM_{10} , $PM_{2.5}$ a NO_2 v ovzduší je nejvíce ovlivňována jak prouděním v horizontálním směru, tak vertikálním promícháváním. Závislost látek znečišťujících ovzduší na VI a rychlosti větru je nepřímo úměrná, tj. s rostoucí hodnotou VI a rychlosti větru koncentrace klesají. VI reprezentuje vertikální promíchávání a stabilitu atmosféry, zatímco rychlost větru je ukazatelem horizontálního přenosu znečištění. VI, coby součin tloušťky mezní vrstvy a průměrné rychlosti větru v mezní vrstvě, je však silně závislý i na rychlosti přízemního větru. Při stejné rychlosti přízemního větru budou v případě silné inverze počínající blízko u země hodnoty VI nízké a více se zde bude uplatňovat horizontální rychlost větru než vertikální promíchávání. Při dálkovém přenosu znečištění hraje významnou roli geografie a směr větru ve vztahu ke zdroji znečištění. Úroveň znečištění závisí na vzdálenosti od zdroje znečištění a na tom, zda se jedná o návětrnou či závětrnou stranu. Přírodní překážky mohou horizontální rozptyl výrazně omezit. V uzavřeném údolí s častým výskytem inverzí je vertikální i horizontální přenos znečišťujících látek omezen, jak dokládají např. Whiteman (2014) a Chemel (2016). V obou případech je míra promíchávání zastoupena parametrem tepelné bilance. Na otevřeném prostoru pak záleží na charakteru, nejen přírodních, překážek, které mohou rozptyl výrazně omezit nebo naopak podpořit.

Závislost PM_{10} a $PM_{2.5}$ na teplotě se liší podle ročního období. V chladné sezoně koncentrace s klesající teplotou klesají, v průběhu teplé sezony naopak stoupají. Růst koncentrací PM_{10} s rostoucí teplotou vzduchu odpovídá závěrům některých uvedených prací (Juneng 2011; Blažek 2013; Trivedi 2014). Vliv teploty je v chladné a teplé sezoně odlišný. Odráží zejména skutečnost, že při vyšších teplotách se méně topí a je tedy méně emisí z vytápění.

Vliv úhrnů srážek se v regresních analýzách jevil ve všech případech statisticky prakticky zanedbatelný. Závislost koncentrací na srážkách je však nelineární, velmi záleží na intenzitě a době trvání srážek. Ke stejnému závěru došel i Hassan (2020), který uvádí, že reakce koncentrací na srážkovou činnost nemusí být okamžitá.

Během uvažovaného období 2011–2020 překročily koncentrace PM_{10} hodnotu denního imisního limitu alespoň na jedné ze tří studovaných lokalit ve 481 dnech. Z toho je 279 dní hodnoceno jako dny s anticyklonální synoptickou situací a 202 s cyklonální. V průběhu dlouhotrvajících epizod s vysokými koncentracemi PM_{10} , kdy docházelo i k vyhlášení smogových situací či regulací, převažovaly anticyklonální situace. Jedná se zejména o situace, kdy se střed anticyklony nachází nad ČR nebo nad ČR zasahuje její týlová část a dochází k vytváření mohutných teplotních inverzí. Tyto závěry jsou v souladu se závěry uvedenými v pracích Blažka (2013), Černého a Kedera (2007), kde jsou anticyklonální situace hodnoceny jako problematické, neboť vedou ke stabilizaci teplotního zvrstvení atmosféry a dochází ke vzniku teplotních inverzí. K dlouhotrvajícím inverzím mohou významně přispívat i geografické podmínky, které výrazně ovlivňují místní podmínky a lokální cirkulaci vzduchu. Přírodní překážky mohou horizontální rozptyl omezit nebo naopak podpořit.

6. Závěr

Koncentrace suspendovaných částic PM_{10} a $PM_{2.5}$ a oxidu dusičitého NO_2 vykazují úzkou vazbu na meteorologické a rozptylové podmínky. Regresí lze vysvětlit cca 23–33 % rozptylu v chladné a 6–20 % v teplé sezoně koncentrací PM_{10} . U koncentrací $PM_{2.5}$ to činí cca 18–28 % v chladné a 4–12 % v teplé sezoně a u NO_2 pak cca 24–35 % rozptylu v chladné a 14–39 % v teplé sezoně.

Epizody vysokých koncentrací PM_{10} nastávají nejčastěji při anticyklonálních situacích, a to zejména situacích, kdy se střed anticyklony nachází nad ČR, nebo nad ČR zasahuje její týlová část a dochází k vytváření mohutných teplotních inverzí.

V rámci diplomové práce, ze které tento článek vychází, nebylo možno řešit zdaleka všechny aspekty problematiky vlivu meteorologických faktorů na úroveň znečištění venkovního ovzduší. Řadě speciálních úloh, např. detailnímu studiu ventilačního indexu, vlivu intenzity a doby trvání srážek na kvalitu ovzduší, je nutno věnovat pozornost v budoucnu.

Literatura:

- BLAŽEK, Z., ČERNIKOVSKÝ L., KRAJNY, E., KREJČÍ, B., OŠRÓDKA, L., VOLNÁ, V., WOJTYLAK, M., 2013. Vliv meteorologických podmínek na kvalitu ovzduší v přeshraniční oblasti Slezska a Moravy: Wpływ warunków meteorologicznych na jakość powietrza w obszarze przygranicznym Śląska i Moraw. Praha: Český hydrometeorologický ústav. ISBN 978-80-87577-15-8. Dostupné také z: http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/poboc/OS/OCO/pdf_ooco/publikace.pdf.
- CICHOWICZ, R., WIELGOSIŃSKI, G., FETTER, W., 2017. Dispersion of atmospheric air pollution in summer and winter season. *Environmental Monitoring and Assessment*, Vol. **189**, Issue 12. ISSN 0167-6369. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s10661-017-6319-2>.
- ČERNÝ, E., KEDER, J., 2007. Rozbor epizod vysokého znečištění ovzduší na počátku roku 2006 ve vztahu k meteorologickým podmínkám. *Meteorologické zprávy*, roč. **60**, č. 1, 7–12. ISSN 0026-1173.
- ČHMÚ, 2010. Typizace povětrnostních situací pro území České republiky [online]. Český hydrometeorologický ústav [cit. 2024-04-23]. Dostupné z: <https://www.chmi.cz/historicka-data/pocasi/typizace-povetrnostnich-situci>.
- ČHMÚ, 2023a. Znečištění ovzduší na území České republiky v roce 2022 [online]. Český hydrometeorologický ústav [cit. 2024-08-07]. Dostupné z WWW: https://www.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/grafroc/19groc/gr19cz/Obsah_CZ.html.
- ČHMÚ, 2023b. Systém sběru, zpracování a hodnocení dat [online]. Český hydrometeorologický ústav [cit. 2024-08-07]. Dostupné z WWW: <https://www.chmi.cz/files/portal/docs/reditel/SIS/nakladatelstvi/assets/system-sberu-2022.pdf>.
- FERGUSON, S., 2001. Smoke dispersion prediction systems [online]. National Wildfire Coordination Group [cit. 2021-08-04]. In: HARDY, C., OTTMAR, R., PETERSON, J., CORE, J., SEAMON, P., 2001. *Smoke Management Guide for Pre646 scribed and Wildland Fire: 2001 Edition*, s. 163–178.
- HASSAN, Hanashriah, Mohd LATIF, Liew JUNENG, Norhaniza AMIL, Md KHAN, Diong YIK a Nur ABDULLAH, 2020. Interaction of PM_{10} concentrations with local and synoptic meteorological conditions at different temporal scales. *Atmospheric Research*, Vol. **241**. ISSN 0169-8095. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.104975>.
- HE, J., GONG, S., YU, Y., 2017. Air pollution characteristics and their relation to meteorological conditions during 2014–2015 in major Chinese cities. *Environmental Pollution*, Vol. **223**, Issue 223, s. 484–496. ISSN 0269-7491. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.01.050>.
- CHEMEL, CH., ARDUINI, G., STAQUET, CH., LARGERON, Y., LEGAIN, D., TZANOS, D., PACI, A., 2016. Valley heat deficit as a bulk measure of wintertime particulate air pollution in the Arve River Valley. *Atmospheric Environment*, Vol. **128**, s. 208–215. ISSN 1352-2310. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.12.058>.
- JUNENG, L., LATIF, M., TANGANG, F., 2011. Factors influencing the variations of PM_{10} aerosol dust in Klang Valley, Malaysia during the summer. *Atmospheric Environment*, Vol. **45**, Issue 26, s. 4370–4378. ISSN 1352-2310. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.05.045>.
- KALBARCZYK, R., KALBARCZYK, E., 2020. Meteorological conditions of the winter-time distribution of nitrogen oxides in Poznań: A proposal for a catalog of the pollutants variation. *Urban Climate*, Vol. **33**. ISSN 2212-0955. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100649>.
- KALISA, E., FADLALLAH, S., AMANI, M., NAHAYO, L., HABİYARE-MYE, G., 2018. Temperature and air pollution relationship during heatwaves in Birmingham, UK. *Sustainable Cities and Society*. Vol. **43**, s. 111–120. ISSN 2210-6707. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.08.033>.
- KEDER, J., ŠKÁCHOVÁ, H., 2011. Hodnocení rozptylových podmínek pro šíření znečišťujících látek pomocí ventilačního indexu. In: Ochrana ovzduší ve státní správě – teorie a praxe VII. Chrudim: Vodní zdroje Ekomonitor. s. 19–23. ISBN 978-80-86832-62-3.
- KUBÁNKOVÁ, V., HENDL, J., 1987. Statistika pro zdravotníky: Zdravotnické aktuality Ministerstva zdravotnictví ČSR. Svazek 208. Praha: Avicen, zdravotnické nakladatelství, n. p.
- LAÑA, I., DEL SER, J., PADRÓ, A., VÉLEZ, M., CASANOVA-MATEO, C., 2016. The role of local urban traffic and meteorological conditions in air pollution: A data-based case study in Madrid, Spain. *Atmospheric Environment*, Vol. **145**, s. 424–438. ISSN 1352-2310. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.09.052>.
- PEARCE, J., BERINGER, J., NICHOLLS, N., HYNDMAN, R., TAPPER, N., 2011. Quantifying the influence of local meteorology on air quality using generalized additive models. *Atmospheric Environment*, Vol. **45**, Issue 6, s. 1328–1336. ISSN 1352-2310. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.11.051>.
- ŠKÁCHOVÁ, H., 2019. Využití ventilačního indexu při stanovení podmínek pro rozptyl znečišťujících látek. Ústí nad Labem. Bakalářská práce. Univerzita J. E. Purkyně v Ústí nad Labem, Fakulta životního prostředí.
- ŠKÁCHOVÁ, H., 2021. Vliv meteorologických faktorů na koncentrace vybraných látek znečišťujících ovzduší. Ústí nad Labem. Diplomová práce. Univerzita J. E. Purkyně v Ústí nad Labem, Fakulta životního prostředí.
- TAI, A., MICKLEY, L., JACOB, D., 2010. Correlations between fine particulate matter ($PM_{2.5}$) and meteorological variables in the United States: Implications for the sensitivity of $PM_{2.5}$ to climate change. *Atmospheric Environment*, Vol. **44**, Issue 32, s. 3976–3984. ISSN 1352-2310. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.06.060>.
- TOLASZ, R. (eds.), 2007. Atlas podnebí Česka: Climate atlas of Czechia. Praha: Český hydrometeorologický ústav. ISBN 978-80-86690-26-1.
- TRIVEDI, D., ALI, K., BEIG, G., 2014. Impact of meteorological parameters on the development of fine and coarse particles over Delhi. *Science of The Total Environment*, Vol. **478**, s. 175–183. ISSN 00489697. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.01.101>.
- WHITEMAN, C., HOCH, S., HOREL, J., CHARLAND, A., 2014. Relationship between particulate air pollution and meteorological variables in Utah's Salt Lake Valley. *Atmospheric Environment*, Vol. **94**, s. 742–753. ISSN 1352-2310. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.06.012>.
- ZVÁRA, K., 1989. Regresní analýza. Praha: Academia, ISBN 80-200-0125-5.

Lektoři (Reviewers):

RNDr. Vladimíra Volná, Ph.D., doc. Mgr. Michal Žák, Ph.D.