



Evropská unie
Evropský sociální fond
Operační program Zaměstnanost

Pro zdravější, atraktivnější a bezpečnější Hulice Reg. č. projektu CZ.03.4.74/0.0/0.0/17_080/0009966

SOUHRNNÁ ZPRÁVA

Měření kvality ovzduší v obci Hulice

Datum zpracování: 8.7.2021

IDENTIFIKAČNÍ ÚDAJE

- **Číslo smlouvy**

SML/9497/2021

- **Název předmětu zakázky**

Měření kvality ovzduší Hulice

- **Objednatel**

Obec Hulice

zastoupen: Martin Kapek, starosta obce

sídlo: Hulice 33, 257 63, Trhový Štěpánov

IČ: 00231801

DIČ: CZ00231801

kontaktní osoba:

- **Dodavatel**

Centrum dopravního výzkumu, v. v. i.

Líšeňská 33a, 636 00 Brno

IČ: 44 99 45 75

- **Odpovědný řešitel**

RNDr. Jiří Huzlík, Ph.D.

.....

podpis, datum

- **Řešitelský tým**

RNDr. Jiří Huzlík, Ph.D.

Ing. Vilma Jandová

Karel Effenberger

Ing. Radek Vít

Ing. Eva Havlíčková

RNDr. Leoš Pelikán, Ph.D.

Mgr. Roman Ličbinský, Ph.D.

- **Termín realizace zakázky**

11. 3. 2021 – 10. 7. 2021

OBSAH

Seznam použitých zkratk	5
Souhrn	6
1 Popis lokalit	7
1.1 Vnější okraj obce	8
1.2 Lokalita obecní úřad	9
2 Metodika měření	10
2.1 Přístroje a zařízení	10
2.2 Hodnocení výsledků	11
2.3 Měřené škodliviny	12
2.3.1 Pevné částice frakcí PM ₁₀ a PM _{2,5}	12
2.3.2 Oxid dusičitý	12
2.4 Imisní limity pro sledované látky	13
3 Vyhodnocení kvality ovzduší	14
3.1 Pevné částice frakce PM ₁₀ a PM _{2,5}	14
3.1.1 Hodinové koncentrace PM ₁₀	14
3.1.2 Hodinové koncentrace PM _{2,5}	18
3.1.3 Koncentrační růžice PM ₁₀	23
3.1.4 Koncentrační růžice PM _{2,5}	28
3.1.5 Průměrné denní koncentrace PM ₁₀ a PM _{2,5}	34
3.2 Oxidy dusíku	37
3.2.1 Hodinové koncentrace oxidů dusíku.....	37
3.2.2 Koncentrační růžice oxidů dusíku	43
3.2.3 Průměrné denní koncentrace NO, NO ₂ a NO _x	49
4 Navrhovaná opatření	52
4.1 Opatření v rámci obce Hulice	52
4.1.1 Omezení prašnosti výsadbou zeleně	52

4.1.2	Úklid a údržba komunikací	52
4.1.3	Výměna kotlů na tuhá paliva	53
4.2	Opatření v rámci Ředitelství silnic a dálnic (ŘSD).....	53
4.2.1	Protihluková stěna	53
4.2.2	Snížení rychlosti na dálnici	54
5	Závěr.....	55
6	Literatura	57

Seznam použitých zkratk

NO	oxid dusnatý
NO ₂	oxid dusičitý
NO _x	souhrn koncentrací oxidu dusnatého a oxidu dusičitého vyjádřeného jako koncentrace oxidu dusičitého (součet hmotnostních zlomků NO + NO ₂ v ppb převedený na odpovídající hmotnostní koncentraci NO ₂)
NWR	Nonparametric Wind Regression
PM ₁₀	pevné částice s aerodynamickým průměrem menším nebo rovným 10 μm dispergované v ovzduší
PM _{2,5}	pevné částice s aerodynamickým průměrem menším nebo rovným 2,5 μm dispergované v ovzduší
ŘSD	Ředitelství silnic a dálnic
RH	relativní vlhkost [%]
ws	rychlost větru [m.s ⁻¹]

Souhrn

V dubnu až květnu 2021 po dobu čtyř týdnů bylo provedeno měření koncentrací vybraných škodlivých látek a meteorologických parametrů v obci Hulice za účelem ověření možného znečištění v důsledku dopravního provozu na blízké dálnici D1. Měřicí kampaň byla zacílena na koncentrace PM_{10} , $PM_{2,5}$ a NO_2 .

Lokality byly vybrány s ohledem na vzdálenost od dálnice, na okraji obce přiléhající k dálnici a ve středu obce. Svou roli sehrálo i bezpečné umístění přístrojů a přístup k elektrické energii. Všechny měřené škodliviny jsou ovlivněny zejména meteorologickými podmínkami. Obecně lze shrnout, že vyšší koncentrace jsou měřeny při nízkých rychlostech větru až bezvětří (špatný rozptyl škodlivin), při nízkých teplotách (přidává se vliv lokálních topenišť) a vyšších relativních vlhkostech vzduchu.

Z hlediska koncentrací pevných částic PM_{10} nemá na kvalitu ovzduší doprava příliš významný vliv, přičemž koncentrace PM_{10} v byly na obou lokalitách prakticky stejné jak co do průměru, tak hodinového průběhu. K mírnému ovlivnění dochází pouze na okraji obce, který není nijak chráněný proti vzdušnému proudění od dálnice D1.

Z hlediska koncentrací jemnější frakce pevných částic $PM_{2,5}$ se projevil spíše vliv lokálních zdrojů než dopravy, kdy po celou dobu byly koncentrace $PM_{2,5}$ v centru obce než na okraji obce v blízkosti dálnice D1.

Koncentrace oxidů dusíku (NO , NO_2 a NO_x) mají svůj primární zdroj v dopravě, proto i jejich koncentrace jsou dopravou více ovlivněny. V případě oxidů dusíku tak koncentrace významně ovlivňuje počet vozidel, a dále také zda je lokalita uzavřená (např. zástavbou) nebo otevřená. Vyšší hodnoty koncentrací tak byly měřeny na okraji obce v blízkosti dálnice D1.

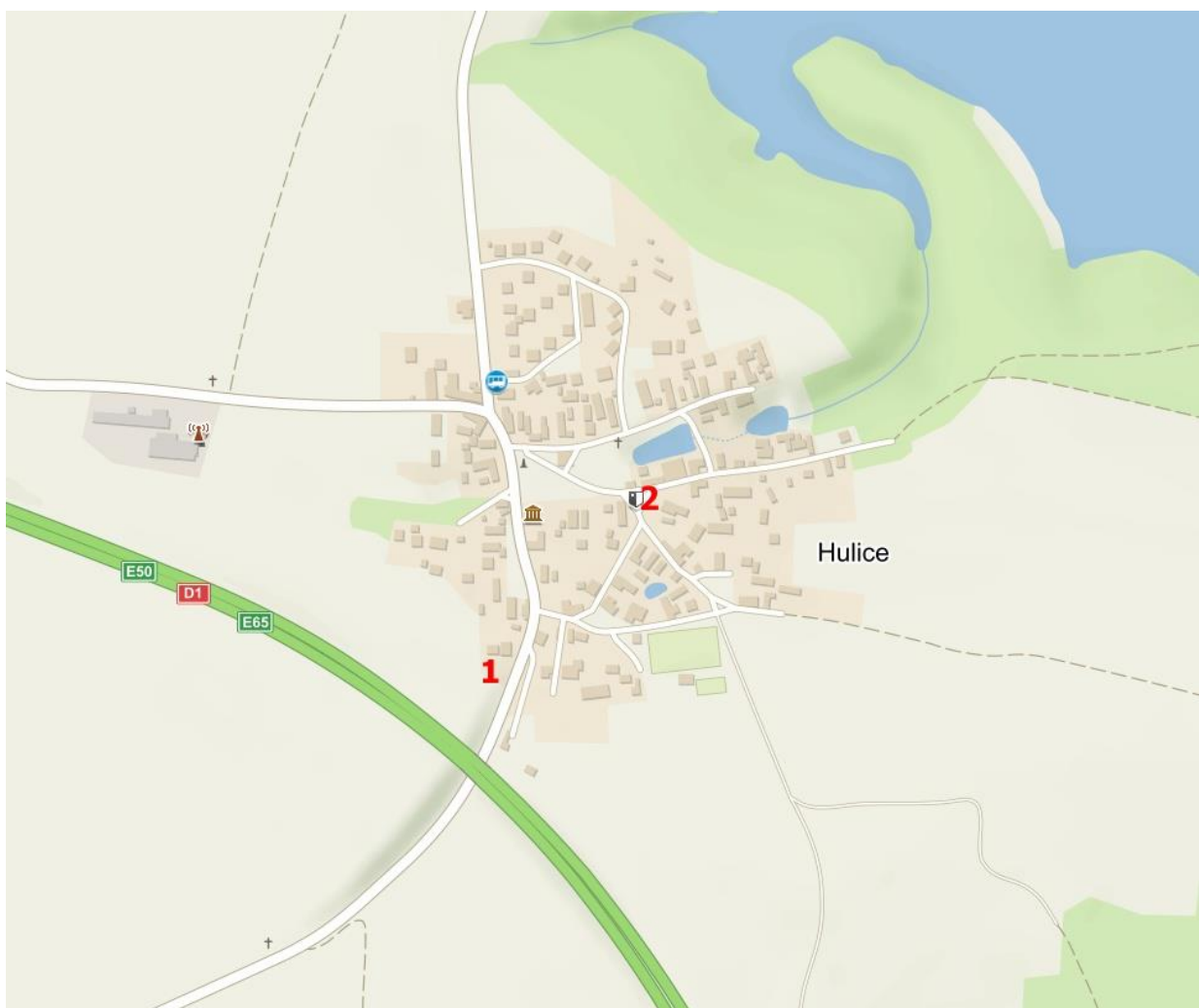
Na obou lokalitách byl pozorován růst koncentrací směrem k večerním a nočním hodinám, což by mohlo naznačovat vliv lokálních topenišť. S tím korespondují i průměrné denní teploty za celou měřicí kampaň, které pouze ve třech případech přesáhly $14^{\circ}C$.

Na žádné z lokalit nedošlo během celého měření k překročení žádného z legislativních limitů. Je pouze možné se domnívat, že k překročení limitů by mohlo dojít pouze za mimořádně nepříznivých rozptylových podmínek.

Na základě zjištěných výsledků byla navržena opatření na úrovni obce i ŘSD, která mohou přispět ke zlepšení kvality ovzduší v obci Hulice. Opatření navrhovaná na úrovni obce (omezení prašnosti výsadbou zeleně, úklid a údržba komunikací, výměna kotlů na tuhá paliva) budou mít vliv zejména na úroveň prašnosti, opatření navrhovaná na úrovni ŘSD (protihluková stěna, snížení rychlosti na dálnici) zejména na úroveň znečištění oxidem dusičitým.

1 Popis lokalit

Pro ověření vlivu dopravy na kvalitu ovzduší v obci Hulice byly vybrány 2 lokality vzdálené od sebe přibližně 300 metrů. Lokality byly vybrány jak s ohledem na reprezentativnost pro posouzení úrovně znečištění v obci, tak na bezpečné umístění měřící techniky, a to zejména z pohledu zabezpečení přístrojů proti krádeži, i dostupnosti připojení k elektrické energii. Lokalita 1 (dále Hulice) se nacházela v blízkosti zahrady domu č. p. 10. Měřící zařízení byla umístěna přibližně 30 m od nejbližší zástavby, která byla od měřících zařízení orientována severně. Jihozápadním směrem ve vzdálenosti 90 m od měřící lokality se nachází dálnice D1. Lokalita 2 (dále OU Hulice) se nacházela u obecního úřadu obce Hulice, v centru samotné obce (č. p. 33). Ve vzdálenosti 380 m od měřící lokality se nachází dálnice D1. Lokality zobrazuje následující Obr. 1.



Obr. 1: Měřící lokality – rodinný dům na vnějším okraj obce (1) a obecní úřad ve středu obce (2), mapový podklad: www.mapy.cz

1.1 Vnější okraj obce

Měření na lokalitě vnější okraj obce (lokalita Hulice) bylo umístěno v blízkosti dálnice D1, jak ukazuje mapa a fotografie lokality (Obr. 2 a Obr. 3). Zeměpisné souřadnice 49,7076289N, 15,0851661E.



Obr. 2: Měřicí lokalita vnější okraj obce, bod 1 vyznačuje přesnou lokalizaci stanice, mapový podklad: www.mapy.cz



Obr. 3: Měřicí lokalita vnější okraj obce

1.2 Lokalita obecní úřad

Měření na lokalitě obecní úřad (lokalita OU Hulice) bylo umístěno ve středu obce, jak ukazuje mapa a fotografie lokality (Obr. 4a Obr. 5). Zeměpisné souřadnice 49,7096756N, 15,0878414E.



Obr. 4: Měřicí lokalita obecní úřad, bod 2 vyznačuje přesnou lokalizaci stanice, mapový podklad: www.mapy.cz



Obr. 5: Měřicí lokalita obecní úřad

2 Metodika měření

K vlastním měřením bylo využito několik typů přístrojů v závislosti na charakteru sledované škodliviny a dva typy statistických softwarových balíčků pro zpracování naměřených dat.

2.1 Přístroje a zařízení

Koncentrace plyných škodlivin byly měřeny kontinuálně přístrojem Airpointer (Recordum Messtechnik GmbH, Rakousko) v souladu s přílohou č. 6 k vyhlášce č. 330/2012 Sb. ve znění pozdějších předpisů. Konkrétně oxid dusnatý (NO), oxid dusičitý (NO₂) a jejich souhrn (NO_x) referenční metodou podle české technické normy ČSN EN 14211: 2014 „Kvalita ovzduší – Normovaná metoda stanovení oxidu dusičitého a oxidu dusnatého na principu chemiluminiscence“.

Přístroj Airpointer je kompaktní, integrovaný, vícesložkový měřicí systém pro měření škodlivin v ovzduší se zabudovanou jednotkou regulace teploty, nulového vzduchu a systémem pro sběr a zpracování údajů. Hlavice pro průběžné nasávání vzdušiny je ve výšce cca 1,8 m nad terénem. Tímto přístrojem byly rovněž stanoveny kontinuálně koncentrace pevných částic PM₁₀ a PM_{2,5} nefelometrickou metodou, přičemž naměřená data byla validována na základě diskontinuálních 24hodinových odběrů na filtry s využitím sekvenčních vzorkovačů SVEN LECKEL SEQ 47/50-CD (Sven Leckel Ingenierbüro, Německo), s následnou gravimetrickou analýzou na mikrováhách MX5 (Mettler – Toledo GmbH, Švýcarsko). Gravimetrická metoda stanovení koncentrací PM je rovněž referenční metodou podle české technické normy ČSN EN 12341: 2000 „Kvalita ovzduší – Stanovení frakce PM₁₀ aerosolových částic – Referenční metoda a postup při terénní zkoušce ověření těsnosti shody mezi výsledky hodnocené a referenční metody“. Koncentrace pevných částic frakce PM_{2,5} byly stanoveny stejným postupem. Měřicí sestavu znázorňuje Obr. 6.



Obr. 6: Použitá měřicí zařízení – lokalita OU Hulice

Měření souvisejících meteorologických prvků, tj. směru a rychlosti větru, teploty a relativní vzdušné vlhkosti byla realizována rovněž přístrojem Airpointer (Recordum Messtechnik GmbH, Rakousko), resp. meteorologickou stanicí WS500-UMB (G. Lufft Mess- und Regeltechnik GmbH, Německo), která je plně integrována do přístroje. Čas uváděný ve zprávě odpovídá času platnému v ČR v příslušném období, tzn. SELČ.

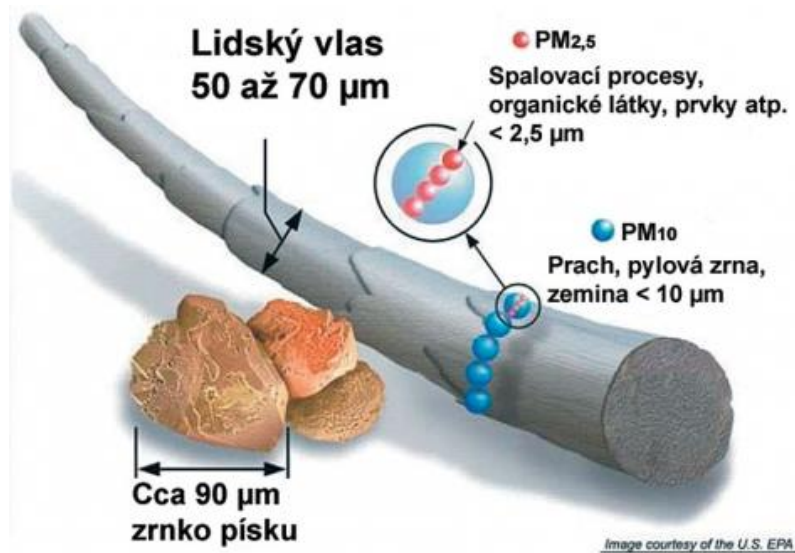
2.2 Hodnocení výsledků

K analýze a zobrazení závislosti znečištění ovzduší na meteorologických podmínkách sloužil OpenSource balík R (R Core Team, Rakousko) [1]. Především bylo využito souboru balíčků „Tidyverse“, obsahují nástroje pro zpracování a analýzu dat a jejich vizualizaci [2]. Dále bylo využito balíčku „openair“, jehož součástí jsou algoritmy pro použité polární grafy [3]. Mapové podklady byly připraveny s využitím balíčku „ggmap“ [4] s využitím Google Maps Static API pro podkladovou mapu.

2.3 Měření škodliviny

2.3.1 Pevné částice frakcí PM₁₀ a PM_{2,5}

Pevné částice frakce PM₁₀ jsou částice s maximální velikostí aerodynamického průměru 10 μm, částice PM_{2,5} pak mají aerodynamický průměr maximálně 2,5 μm. Tyto částice pronikají do dolních partií dýchacích cest (thorakální částice). O jaké částice se velikostně jedná, ukazuje následující Obr. 7.



Obr. 7: Srovnání velikostí částic PM₁₀ a PM_{2,5} se zrnky písku či lidským vlasem, zdroj: upraveno dle US EPA

Částice o větší velikosti se zachycují v horních cestách dýchacích, do plic nepronikají a jejich koncentrace se proto neměří. Pozornost se naopak zaměřuje k čím dál menším částicím, protože platí, že čím menší průměr částice, tím hlouběji se v lidském těle dostane a tím je pro člověka nebezpečnější. Negativní zdravotní účinky PM₁₀ a PM_{2,5} se projevují již při velmi nízkých koncentracích bez zřejmé spodní hranice bezpečné koncentrace. Zdravotní rizika částic ovlivňuje jejich koncentrace, velikost, tvar a chemické složení. Mohou se podílet na snížení imunity, mohou způsobovat zánětlivá onemocnění plicní tkáně a oxidativní stres organismu. Při chronickém působení mohou způsobovat respirační onemocnění a snižovat funkci plic.

Pevné částice jsou emitovány jak přírodními (např. sopky či prашné bouře), tak i antropogenními (např. elektrárny a průmyslové technologické procesy, doprava, spalování uhlí v domácnostech, spalování odpadu) zdroji. Většina těchto antropogenních emisních zdrojů je soustředěna v urbanizovaných oblastech, tj. v oblastech, ve kterých žije velká část populace.

2.3.2 Oxid dusičitý

Expozice zvýšeným koncentracím oxidu dusičitého ovlivňuje plicní funkce a způsobuje snížení imunity. Více než 90 % z celkových oxidů dusíku ve venkovním ovzduší je emitováno ve formě NO. NO₂ vzniká relativně rychle reakcí NO s přízemním ozonem nebo s radikály typu HO₂, popř. RO₂. Řadou chemických reakcí se část NO_x přemění na HNO₃/NO₃⁻, které jsou z atmosféry odstraňovány

suchou a mokrou atmosférickou depozicí. Pozornost je věnována NO_2 z důvodu jeho negativního vlivu na lidské zdraví. Hraje také klíčovou roli při tvorbě fotochemických oxidantů.

V Evropě vznikají emise oxidů dusíku (NO_x) převážně z antropogenních spalovacích procesů, kde NO vzniká reakcí mezi dusíkem a kyslíkem ve spalovaném vzduchu. Hlavní antropogenní zdroje představuje především silniční doprava (významný podíl má ovšem i doprava letecká a vodní) a dále spalovací procesy ve stacionárních zdrojích [5].

K překročení ročního imisního limitu NO_2 dochází pouze na omezeném počtu stanic, a to na dopravně exponovaných lokalitách aglomerací a velkých měst. Lze předpokládat, že k překročení imisních limitů může docházet i na dalších dopravně exponovaných místech, kde není prováděno měření.

2.4 Imisní limity pro sledované látky

Základní právní normou upravující hodnocení kvality ovzduší v České republice je zákon o ochraně ovzduší [6].

V následující Tab. 1 jsou zobrazeny imisní limity pro ochranu zdraví lidí, imisní limity pro celkový obsah znečišťující látky v částicích PM_{10} pro ochranu zdraví lidí a imisní limity pro troposférický ozón. Kromě samotných imisních limitů tabulky uvádí také přípustnou četnost překročení za kalendářní rok (je-li stanovena), horní mez pro posuzování (UAT) a dolní mez pro posuzování (LAT). Pokud jsou v území překračovány hodnoty horní meze pro posuzování, je pro hodnocení kvality ovzduší nutné koncentrace měřit stacionárním měřením. V případě, že jsou nižší než dolní mez pro posuzování, postačuje pro posuzování úrovně znečištění výpočet pomocí modelu. V případě koncentrací mezi dolní a horní mezí pro posuzování se používá kombinace měření a výpočtu. Horní a dolní meze pro posuzování jsou uvedeny v imisní vyhlášce [7]. Poslední sloupec (pLV) v Tab. 1 zobrazuje maximální povolený počet překročení limitní hodnoty (LV) za kalendářní rok.

Tab. 1: Imisní limity vyhlášené pro ochranu zdraví lidí a maximální počet jejich překročení

Znečišťující látka	Doba průměrování	Imisní limit LV	UAT	LAT	pLV
Pevné částice frakce PM_{10}	24 hodin	$50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	$35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	$25 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	35
Pevné částice frakce PM_{10}	1 kalendářní rok	$40 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	$28 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	$20 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	
Pevné částice frakce $\text{PM}_{2,5}$	1 kalendářní rok	$20 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	$17 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	$12 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	
Oxid dusičitý NO_2	1 hodina	$200 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	$140 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	$100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	18
Oxid dusičitý NO_2	1 kalendářní rok	$40 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	$32 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	$26 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	

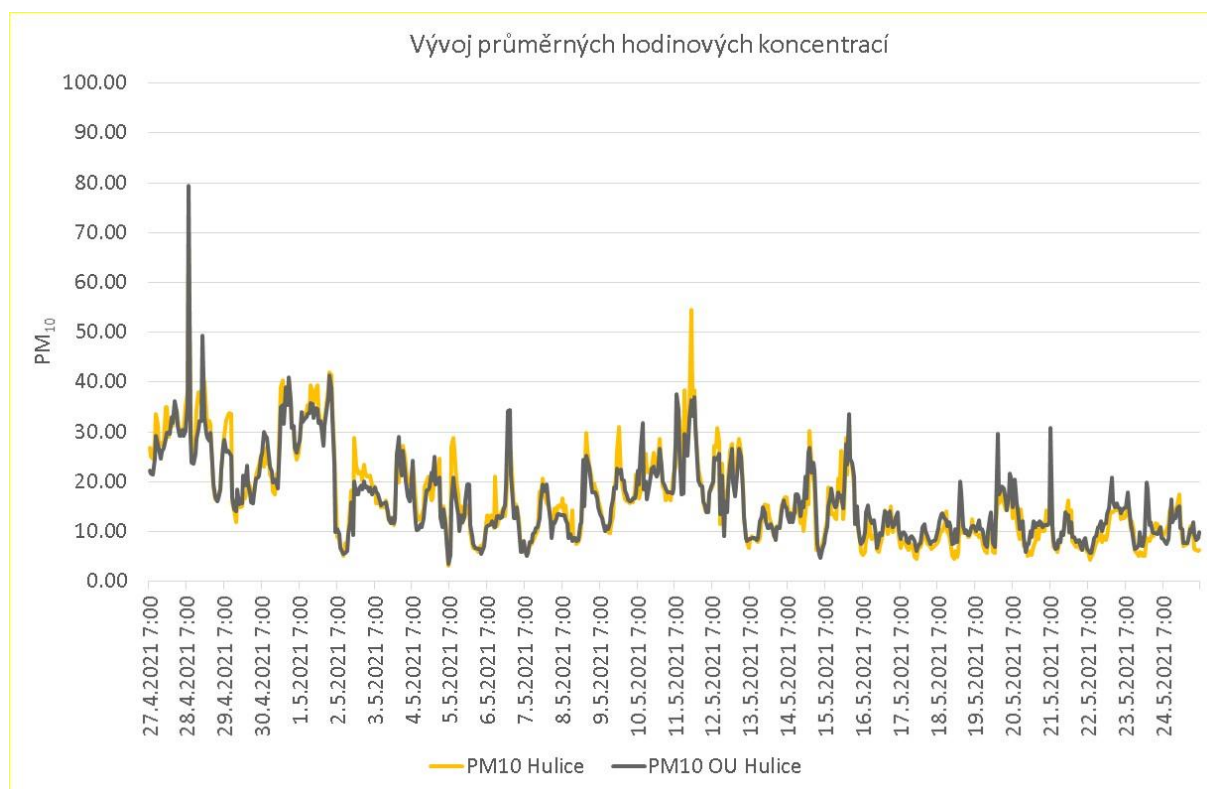
3 Vyhodnocení kvality ovzduší

3.1 Pevné částice frakce PM₁₀ a PM_{2,5}

Jak již bylo uvedeno dříve, koncentrace pevných částic frakcí PM₁₀ i PM_{2,5} se měřily na obou lokalitách kontinuálně. Díky tomu je možné provést hodnocení i na úrovni hodinových koncentrací a srovnat je např. s aktuálními meteorologickými podmínkami.

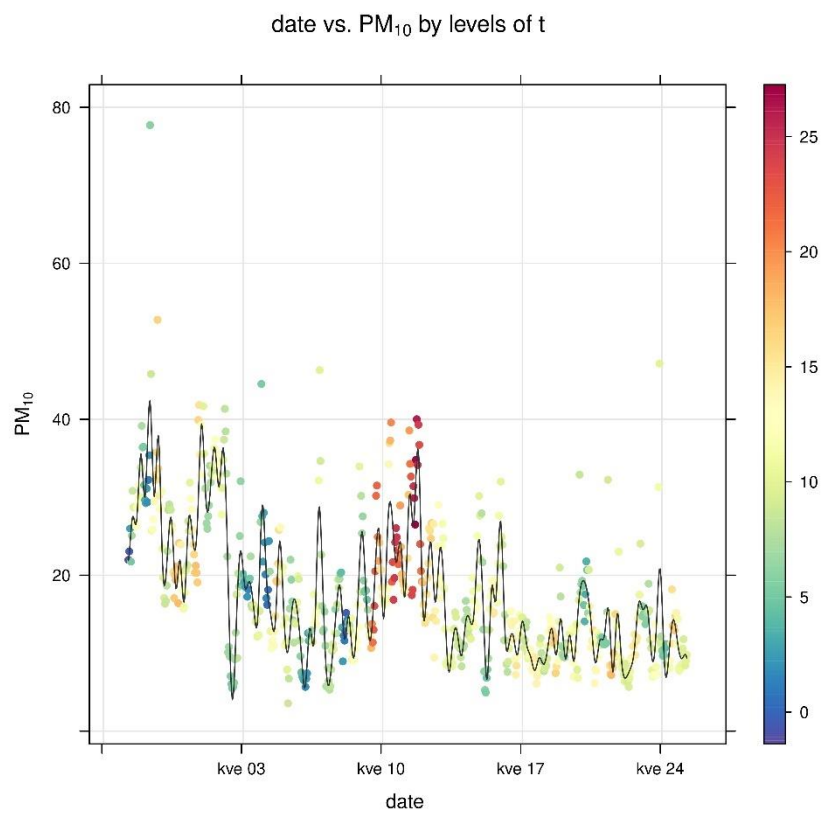
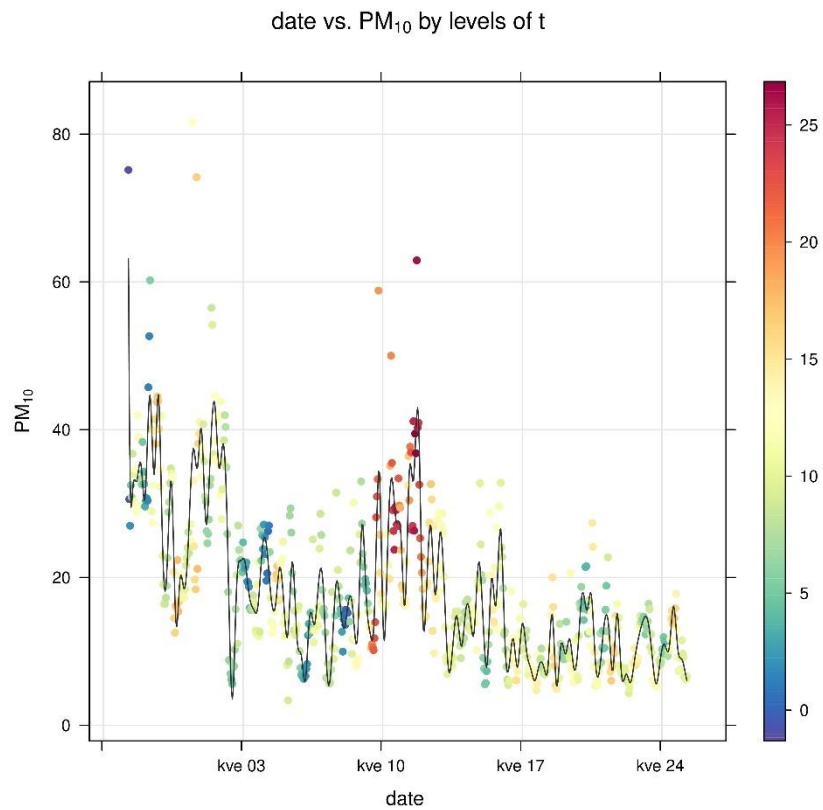
3.1.1 Hodinové koncentrace PM₁₀

Vývoj průměrných hodinových koncentrací PM₁₀ na obou lokalitách je zobrazen na následujícím Obr. 8. Z grafu je patrné, že celkový trend je v některých dnech podobný, v některé dny se však významně liší. Koncentrace PM₁₀ jsou na obou lokalitách velmi podobné. Důvodem je pravděpodobně blízkost obou lokalit a působení stejných zdrojů. Statistické zpracování průměrných hodinových koncentrací uvádí Tab. 2.

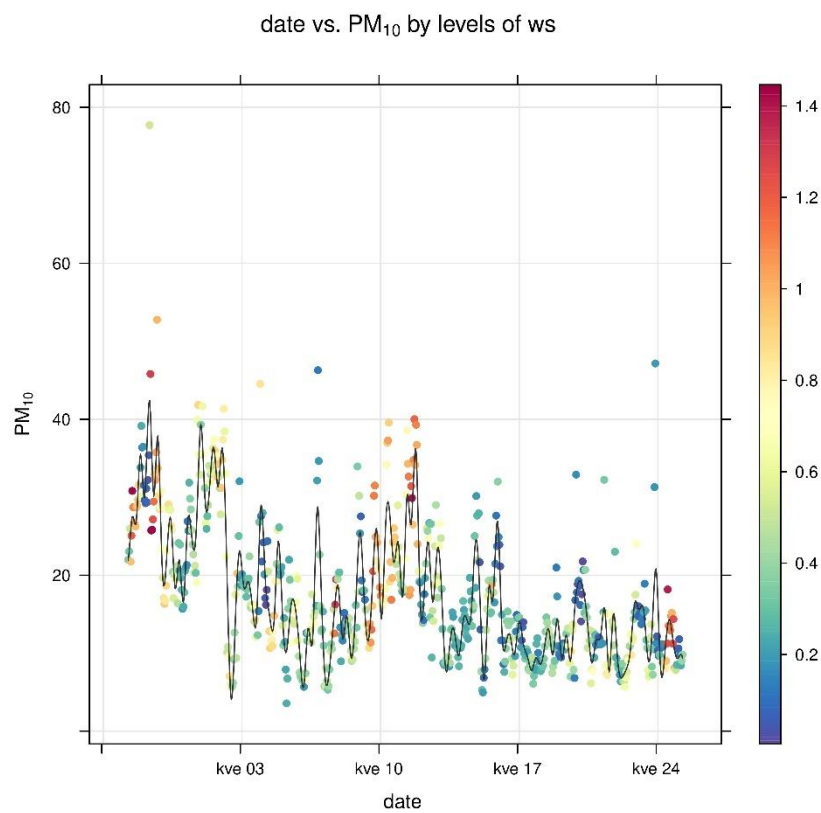
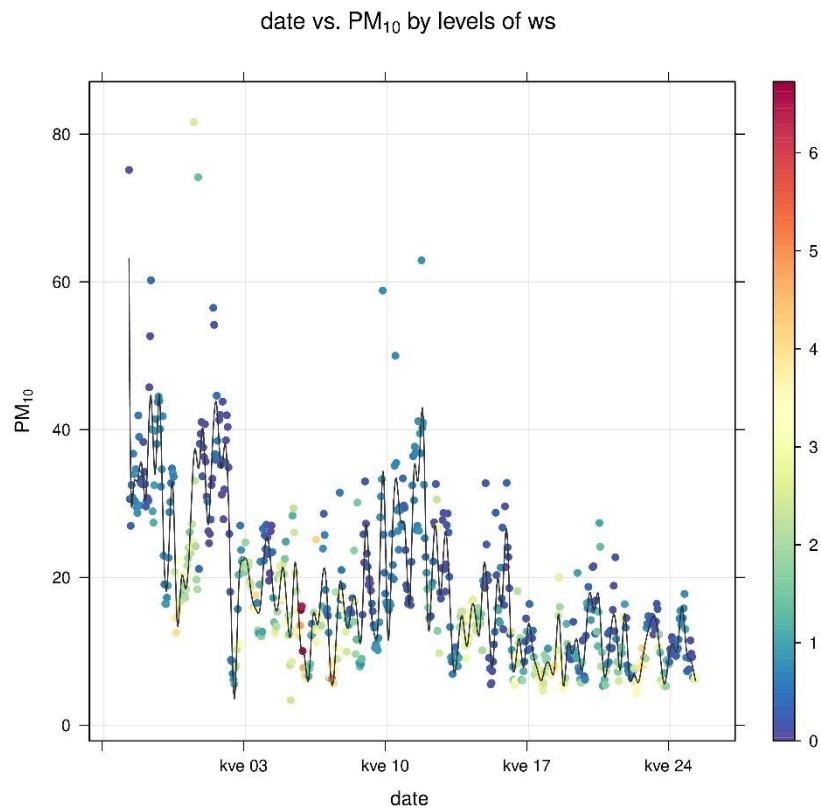


Obr. 8: Vývoj průměrných hodinových koncentrací PM₁₀ [µg.m⁻³] na lokalitách Hulice a OU Hulice

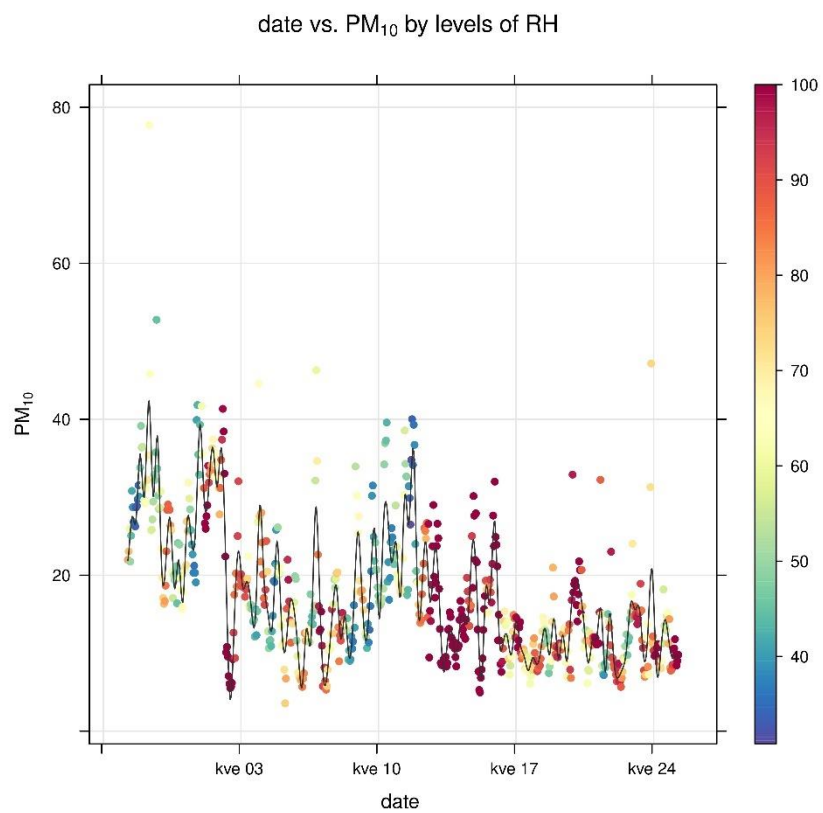
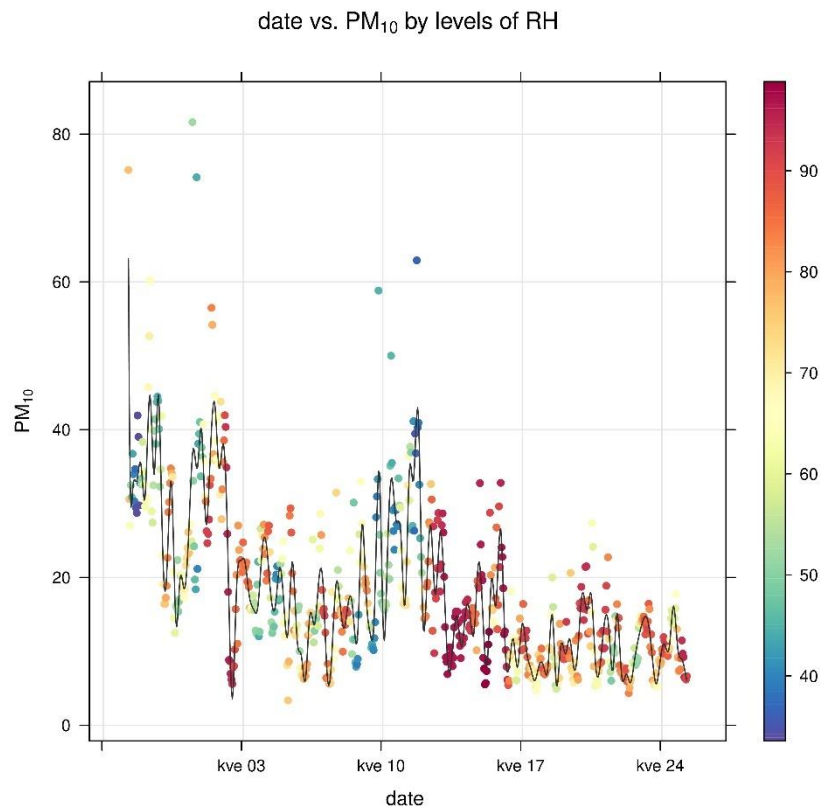
Pro vývoj koncentrací PM₁₀ mohou být důležité meteorologické podmínky, zejména pak teplota vzduchu, rychlost větru a relativní vlhkost vzduchu. Vztah mezi průměrnými hodinovými koncentracemi PM₁₀ a jednotlivými meteorologickými veličinami zobrazují následující Obr. 9 - Obr. 11, kde hodnoty meteorologických veličin jsou znázorněny barevnou škálou.



Obr. 9: Průměrné hodinové koncentrace PM_{10} v závislosti na teplotě vzduchu, lokality Hulice (nahore) a OU Hulice (dole)



Obr. 10: Průměrné hodinové koncentrace PM_{10} v závislosti na rychlosti proudění větru, lokality Hulice (nahore) a OU Hulice (dole)



Obr. 11: Průměrné hodinové koncentrace PM_{10} v závislosti na relativní vlhkosti vzduchu, lokality Hulice (nahore) a OU Hulice (dole)

Vliv těchto podmínek na koncentrace PM₁₀ nebyl prokázán, patrně hrají roli konkurenční vztahy mezi resuspenzí a rozptylovými podmínkami.

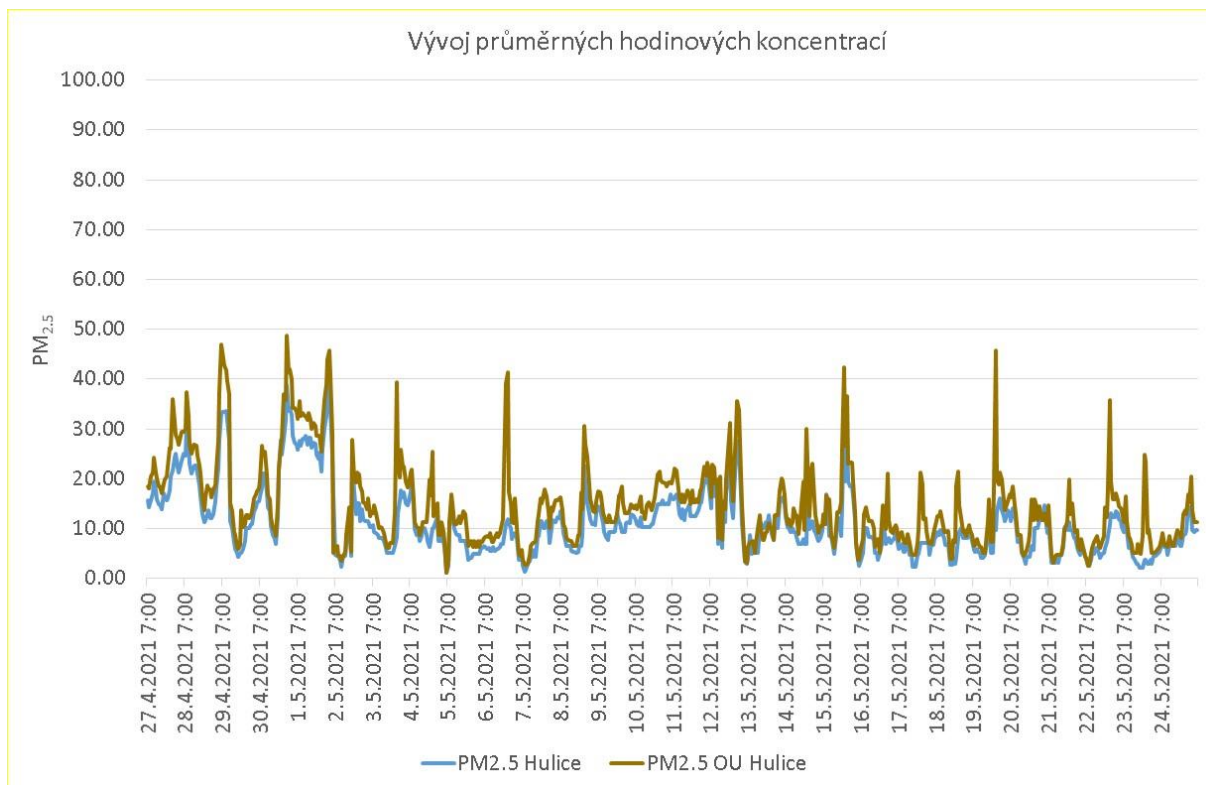
Tab. 2: Statistické zpracování průměrných hodinových koncentrací PM₁₀ (μg·m⁻³) na lokalitách Hulice a OU Hulice

Lokalita	Škodlivina	Průměr	Směrodatná odchylka	Medián	Minimum	Maximum
Hulice	PM ₁₀	16,58	9,10	14,48	3,22	67,59
OU Hulice	PM ₁₀	16,57	8,32	14,73	3,47	79,47

Souvislosti mezi rychlostí a směrem větru a koncentracemi škodlivin pak nejlépe vystihují koncentrační růžice. Této tématice je věnována následující kapitola 3.1.3.

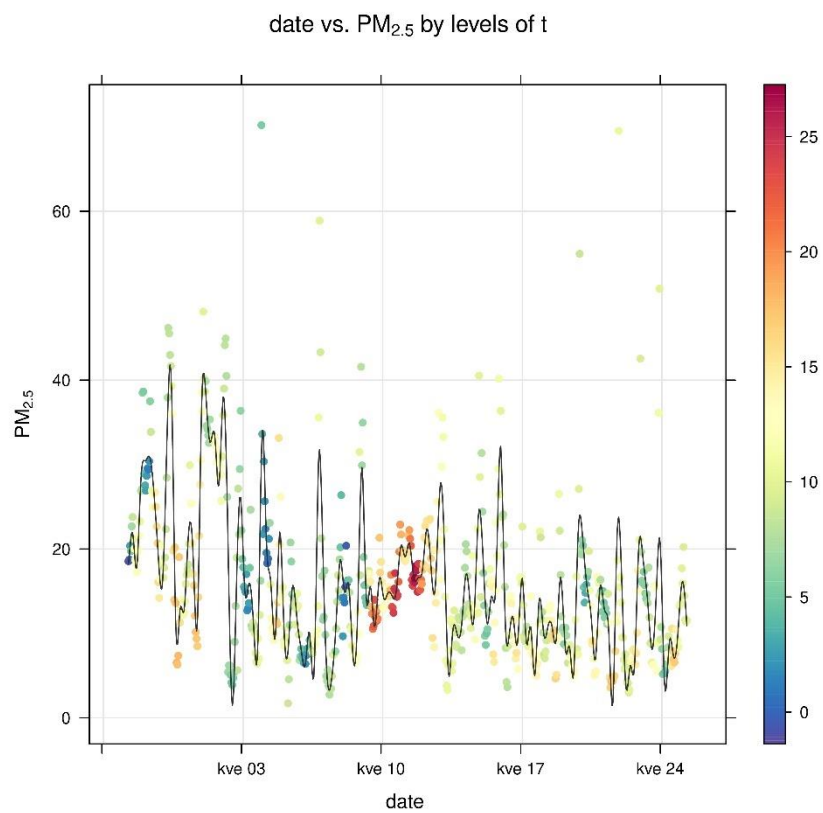
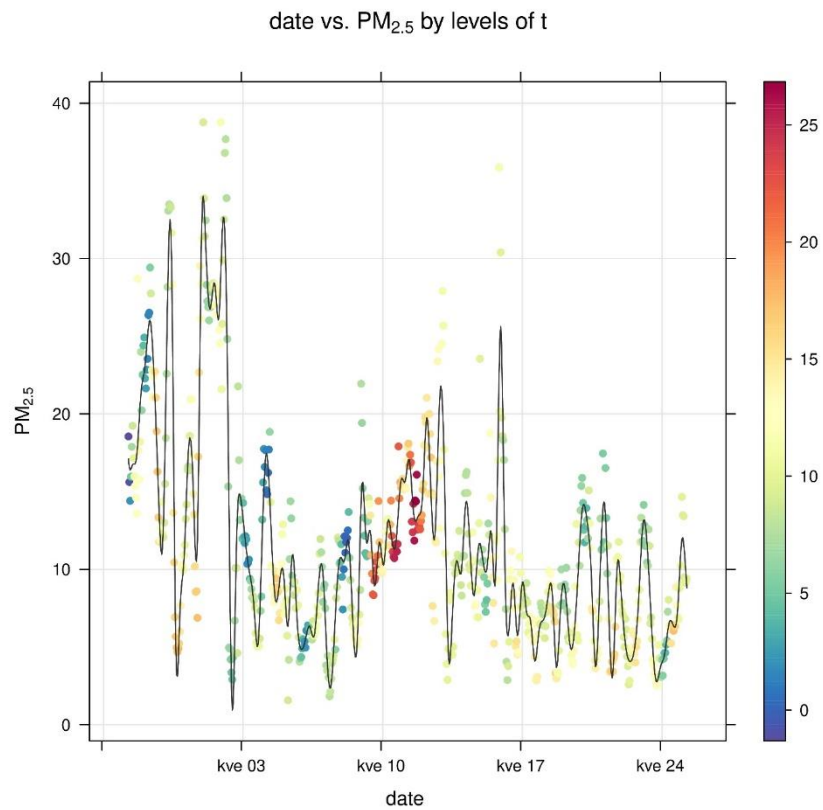
3.1.2 Hodinové koncentrace PM_{2,5}

Vývoj průměrných hodinových koncentrací PM_{2,5} na obou lokalitách je zobrazen na následujícím Obr. 12. Z grafu je patrné, že celkový trend je na obou lokalitách podobný. Koncentrace PM_{2,5} na lokalitě OU Hulice jsou poněkud vyšší než na lokalitě Hulice. Svůj vliv mohou mít lokální zdroje, které ovlivňují koncentrace na lokalitě OU Hulice (např. lokální topeniště). Statistické zpracování průměrných hodinových koncentrací uvádí Tab. 3.

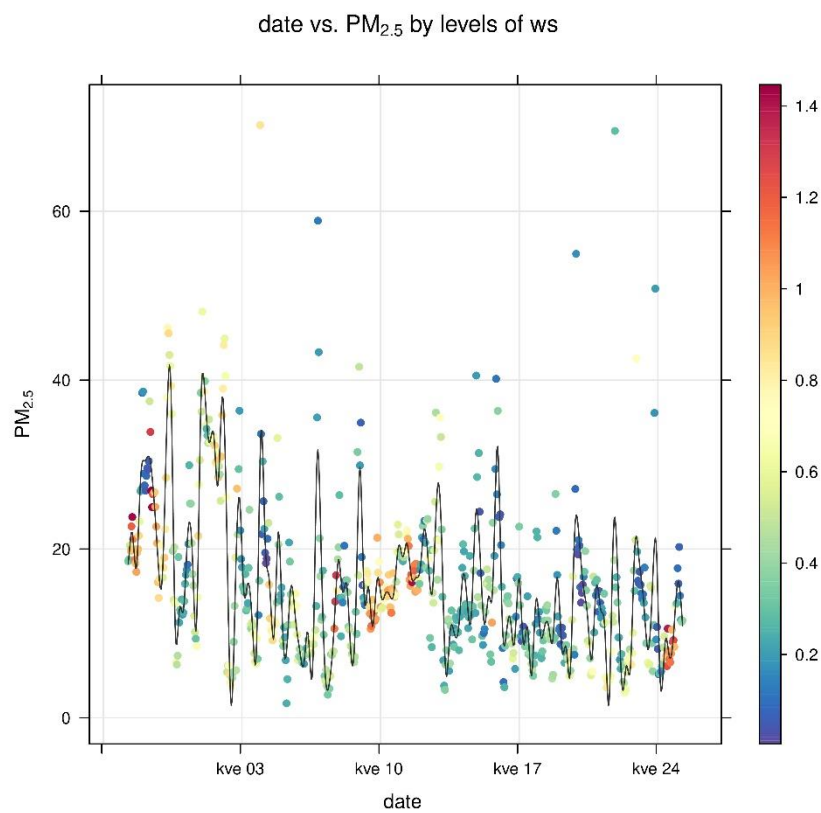
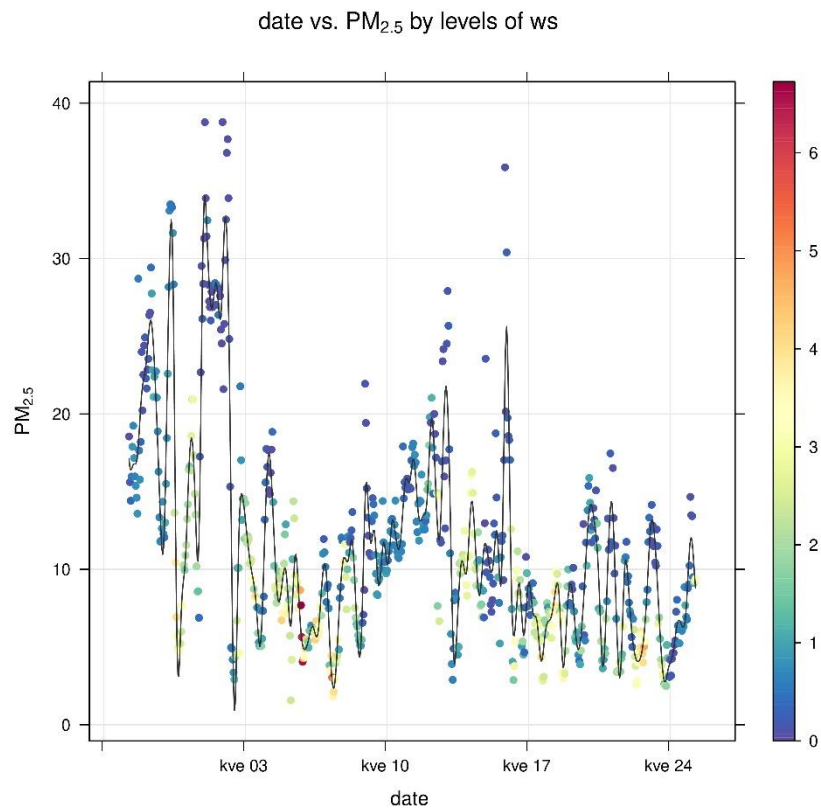


Obr. 12: Vývoj průměrných hodinových koncentrací PM_{2,5} [µg.m⁻³] na lokalitách Hulice a OU Hulice

Pro vývoj koncentrací PM_{2,5} mohou být důležité meteorologické podmínky, zejména pak teplota vzduchu, rychlost větru a relativní vlhkost vzduchu. Vztah mezi průměrnými hodinovými koncentracemi PM_{2,5} a jednotlivými meteorologickými veličinami zobrazují následující Obr. 13 - Obr. 15.

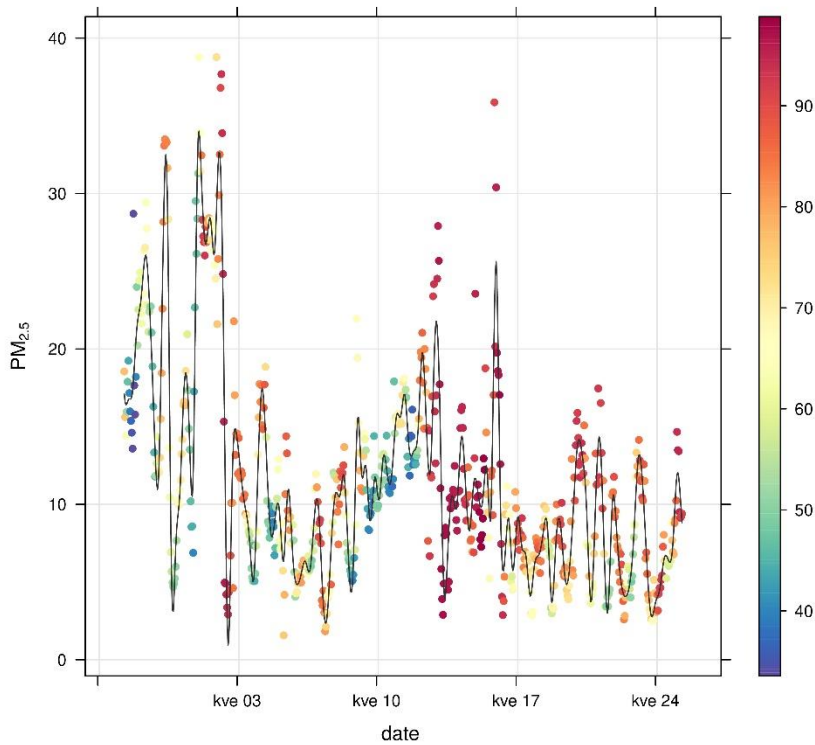


Obr. 13: Průměrné hodinové koncentrace $PM_{2.5}$ v závislosti na teplotě vzduchu, lokality Hulice (nahore) a OU Hulice (dole)

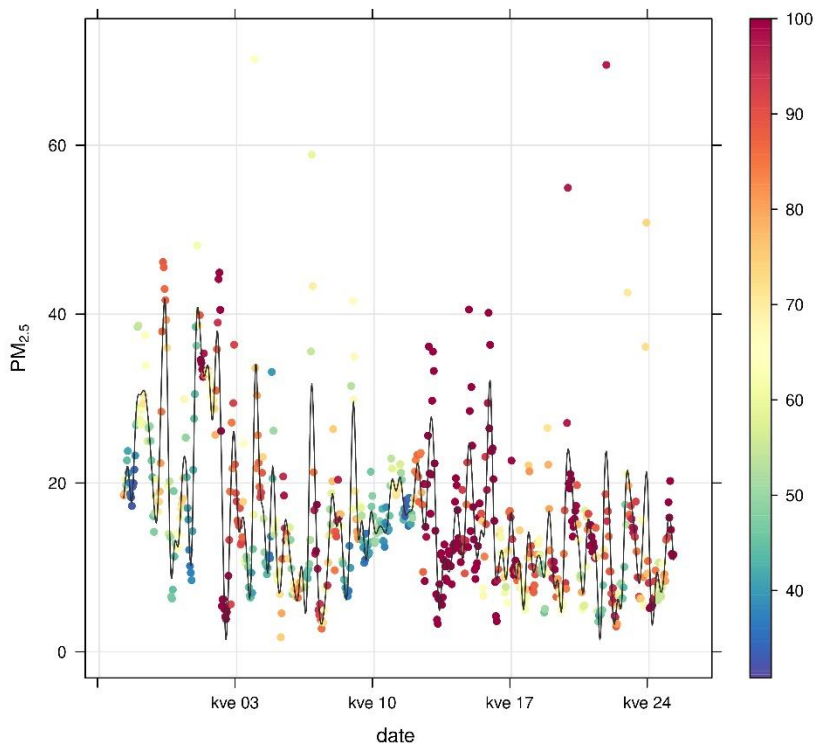


Obr. 14: Průměrné hodinové koncentrace $PM_{2.5}$ v závislosti na rychlosti proudění větru, lokality Hulice (nahore) a OU Hulice (dole)

date vs. $PM_{2.5}$ by levels of RH



date vs. $PM_{2.5}$ by levels of RH



Obr. 15: Průměrné hodinové koncentrace $PM_{2.5}$ v závislosti na relativní vlhkosti vzduchu, lokality Hulice (nahore) a OU Hulice (dole)

Na uvedených obrázcích je vidět, že tyto vlivy nejsou příliš výrazné. V řadě případů jsou koncentrace $PM_{2,5}$ sniženy při vyšších teplotách, není to však vždy pravidlem (Obr. 13). Grafy na Obr. 14 naznačují pozitivní vliv zvýšené rychlosti proudění vzduchu na lepší rozptylové podmínky a tím i určité snížení koncentrací $PM_{2,5}$. U relativní vlhkosti (Obr. 15) žádný průkazný vliv pozorován nebyl.

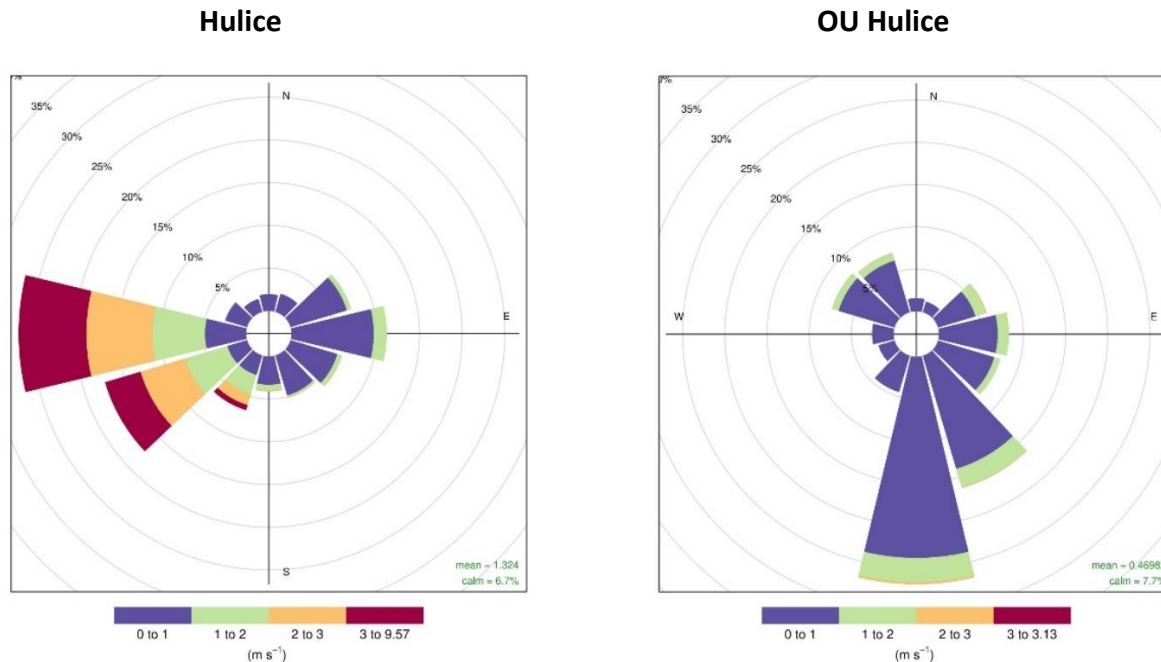
Tab. 3: Statistické zpracování průměrných hodinových koncentrací $PM_{2,5}$ ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) na lokalitách Hulice a OU Hulice

Lokalita	Škodlivina	Průměr	Směrodatná odchylka	Medián	Minimum	Maximum
Hulice	$PM_{2,5}$	11,26	6,88	9,72	1,25	39,30
OU Hulice	$PM_{2,5}$	14,84	8,65	13,03	1,25	48,74

Souvislosti mezi rychlostí a směrem větru a koncentracemi škodlivin pak nejlépe vystihují koncentrační růžice. Této tématice je věnována následující kapitola 3.1.3.

3.1.3 Koncentrační růžice PM_{10}

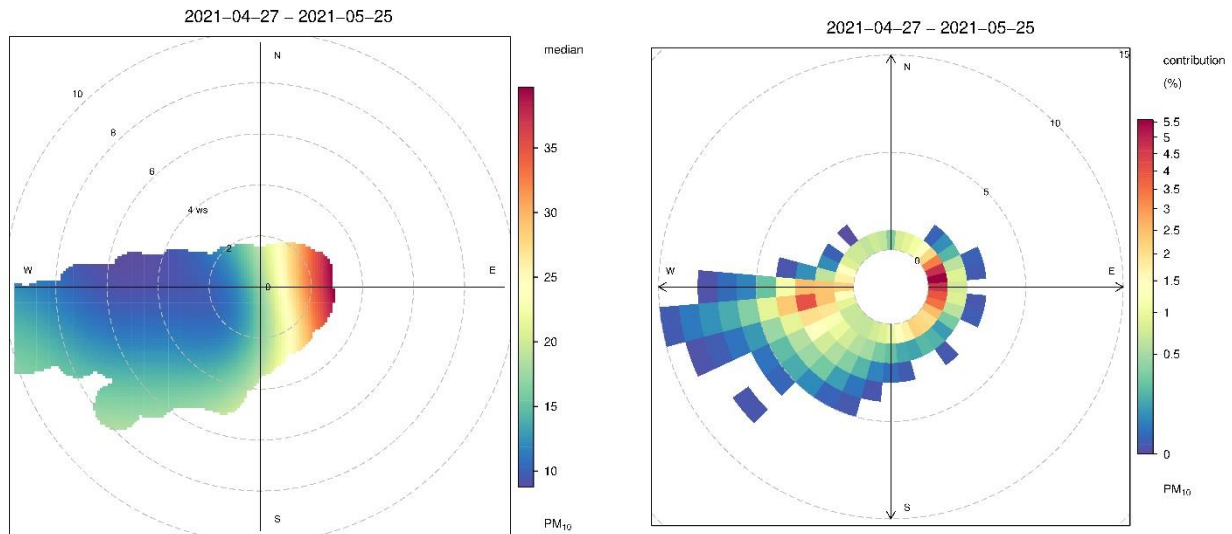
Koncentrační růžice jsou nástroj pro analýzu znečištění ovzduší na základě meteorologických charakteristik. Základem pro koncentrační růžice je růžice větrná, která je dále členěná dle rychlosti větru. Tyto větrné růžice zobrazuje Obr. 16. Na lokalitě Hulice převládá západní a jihozápadní proudění, při kterém jsou měřeny vyšší rychlosti větru než $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Na lokalitě OU Hulice převládá jižní a jihovýchodní proudění, rychlosti větru jsou nižší než $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.



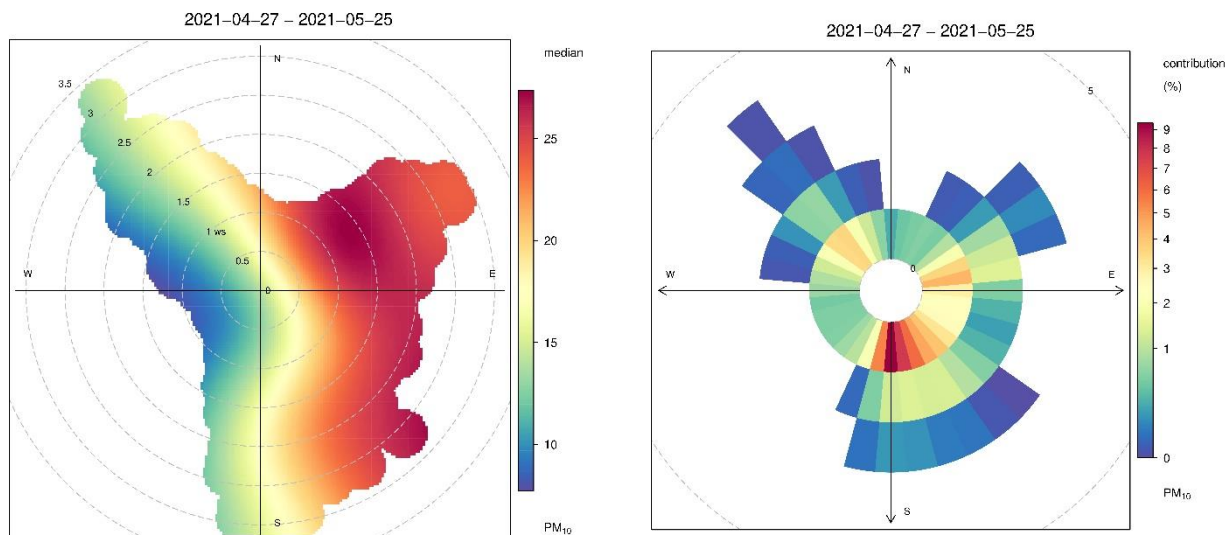
Obr. 16: Větrné růžice členěné dle rychlosti a směru větru, lokality Hulice (vlevo) a OU Hulice (vpravo)

Pro konstrukci koncentračních růžic jsou použita minutová data meteorologických prvků a koncentrací škodlivin – pro kampaň v Hulicích tak bylo použito na každé lokalitě cca 40330 údajů.

Vychází se z větrné růžice, do polárních souřadnic se ukládá jednak směr větru jako u klasické větrné růžice, a dále pak rychlost větru – ve středu růžice je bezvětří, s rostoucí vzdáleností od středu roste rychlost větru. Pro jednotlivé rychlosti a směry větru je pak v koncentrační růžici uvedena střední hodnota koncentrace dané škodliviny, naměřená vždy při daných rychlostech a směrech větru. Koncentrace je vyjádřena barevnou škálou. Střední hodnota může být vyjádřena jako medián minutových hodnot, jejich průměr nebo robustní metodou NWR (Nonparametric Wind Regression) [8].



Obr. 17: Koncentrační růžice (vlevo) a vážená koncentrační růžice (vpravo) pro PM₁₀, lokalita Hulice

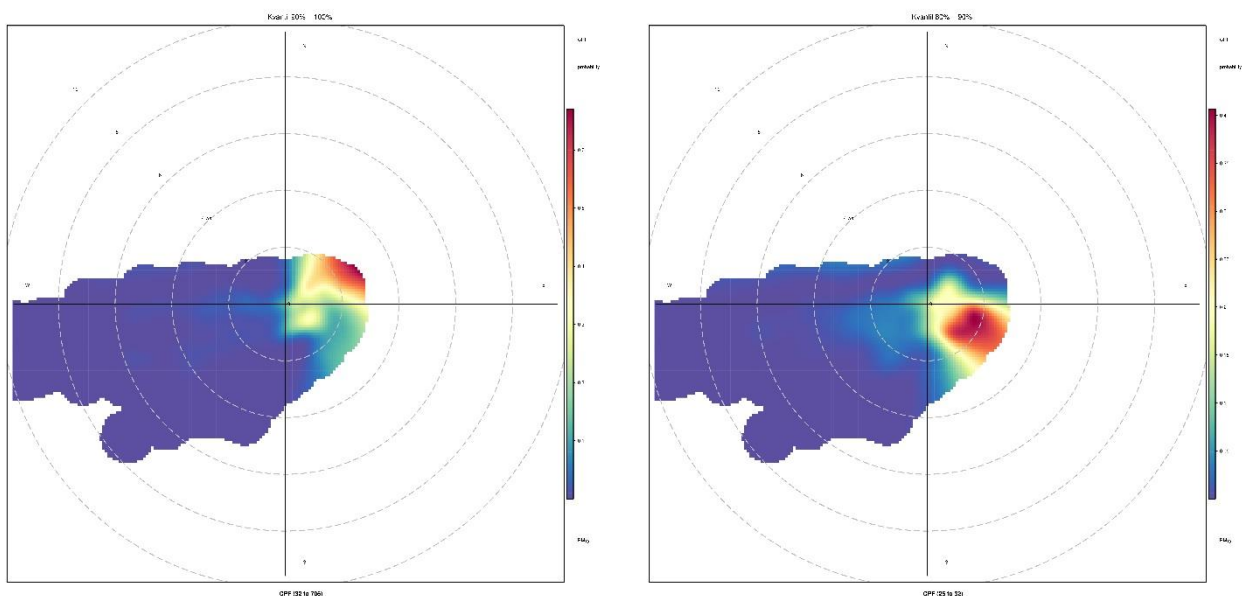


Obr. 18: Koncentrační růžice (vlevo) a vážená koncentrační růžice (vpravo) pro PM₁₀, lokalita OU Hulice

Základní koncentrační růžice tak ukazuje, při jakých rychlostech a směrech větru jsou v průměru dosahovány (nejvyšší) koncentrace. Vážená koncentrační růžice pak vypočte vážený průměr (tzn.,

že je vzata v úvahu také četnost výskytu), a dává tak informaci, jakým procentem se jednotlivé směry větru podílí na měřených koncentracích dané škodliviny.

Koncentrační růžice na lokalitě Hulice (Obr. 17) ukazuje, že v průměru jsou nejvyšší koncentrace měřeny při proudění z východních směrů. Z těchto směrů nefouká příliš často, avšak koncentrace měřené při tomto proudění jsou vysoké. Proto jsou příspěvky k celkovému znečištění na této lokalitě nejvyšší. Ze západních směrů může být tato lokalita ovlivněna dálnicí. Nízké koncentrace PM₁₀ jsou sice měřeny při západním proudění, ale protože z těchto směrů foukal vítr nejčastěji (Obr. 16), projevilo se to i ve vážené koncentrační růžici. Vzhledem k tomu, že na lokalitě Hulice byly měřeny v některé dny velmi vysoké koncentrace, byla provedena analýza, jaké směry a rychlosti větru odpovídají těmto nejvyšším koncentracím. Následující Obr. 19 zobrazuje pravděpodobnost, ze kterých směrů a při jaké rychlosti větru bylo měřeno 10 % nejvyšších minutových koncentrací PM₁₀ (vlevo) a druhých 10 % nejvyšších koncentrací PM₁₀ (vpravo).

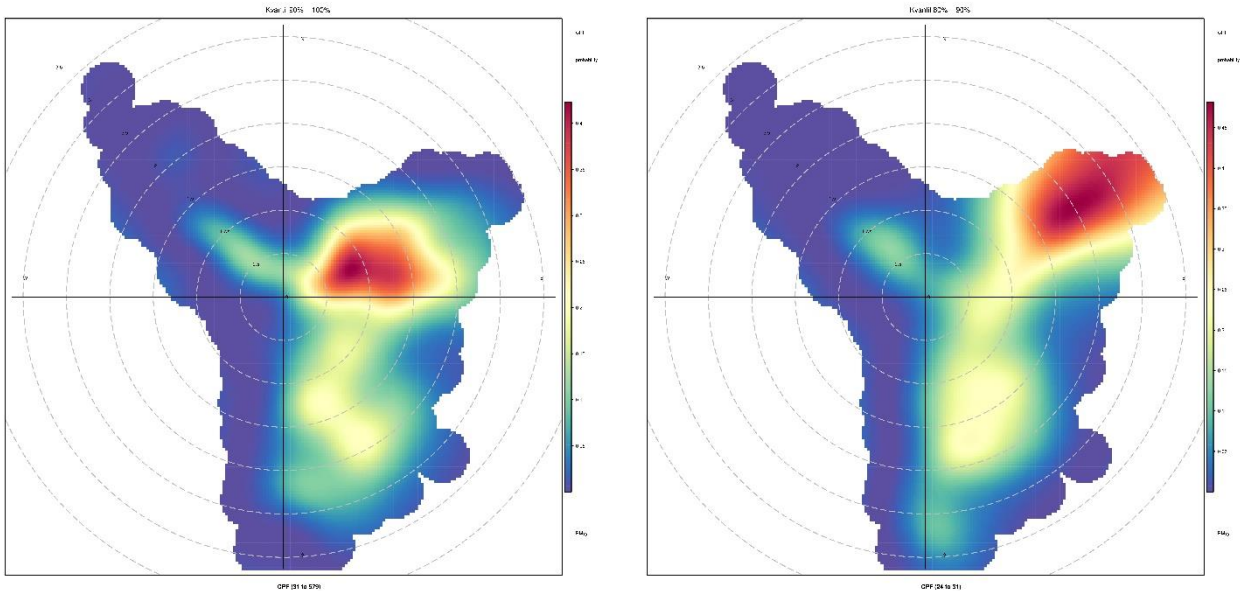


Obr. 19: Pravděpodobnost, při jakých rychlostech a směrech větru je měřeno 10 % nejvyšších minutových koncentrací PM₁₀ (vlevo) a druhých 10 % nejvyšších koncentrací PM₁₀ (vpravo) na lokalitě Hulice

Je tedy patrné, že důležité jsou zejména jihovýchodní a severovýchodní směry větru a nízké rychlosti větru. V obou případech se pravděpodobně jedná o místní zdroje (Obr. 2), může se jednat i o příspěvek dopravy z místní komunikace.

Na lokalitě OU Hulice jsou nejvyšší koncentrace měřeny při východním proudění, v sektoru od jihu až po sever. Z jižního směru je měřeno maximum v případě vážené koncentrační růžice. Méně významné, ale přesto patrné byly v případě vážené koncentrační růžice i příspěvky z východu a severozápadu, což pravděpodobně respektuje místní zástavbu (Obr. 4). Vzhledem k tomu, že na lokalitě OU Hulice byly měřeny v některé dny velmi vysoké koncentrace PM₁₀, byla provedena analýza, jaké směry a rychlosti větru odpovídají těmto nejvyšším koncentracím. Obr. 20 zobrazuje

pravděpodobnost, ze kterých směrů a při jaké rychlosti větru bylo měřeno 10 % nejvyšších minutových koncentrací PM₁₀ (vlevo) a druhých 10 % nejvyšších koncentrací PM₁₀ (vpravo).



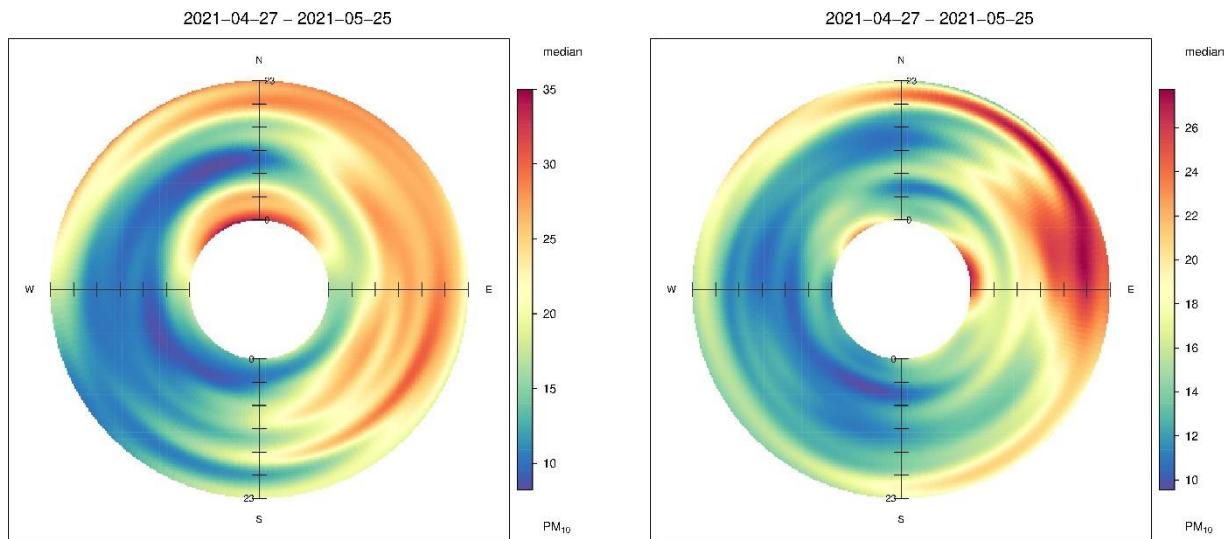
Obr. 20: Pravděpodobnost, při jakých rychlostech a směrech větru je měřeno 10 % nejvyšších minutových koncentrací PM₁₀ (vlevo) a druhých 10 % nejvyšších koncentrací PM₁₀ (vpravo) na lokalitě OU Hulice

Je tedy patrné, že důležité jsou východoseverovýchodní a severovýchodní směry větru a nízké až střední rychlosti větru. V obou případech se pravděpodobně jedná o místní zdroje (Obr. 4).

Dalším užitečným nástrojem pro analýzu dat o kvalitě ovzduší je zobrazení denního chodu. Ten je zobrazen spolu se směrem větru opět v polárních souřadnicích, takže podobně jako u koncentrační růžice bylo možné analyzovat rychlost a směr větru spolu se znečištěním, z následujících obrázků bude možné vyčíst znečištění v závislosti na směru větru a denní době. A obdobně jako bylo ve středu koncentrační růžice bezvětrí a směrem od středu rostla rychlost větru, tak je v případě denního chodu uvnitř půlnoc a směrem od středu rostou hodiny až k 23. hodině na okraji kruhu.

Z denního chodu na lokalitě Hulice (Obr. 21 vlevo) vyplývá, že nejvyšší hodnoty koncentrací PM₁₀ jsou měřeny v době od 20 hodin večer do 5 hodin ráno při severním proudění (směrem od obce). Zvýšené koncentrace jsou pak po celý den měřeny prakticky ze všech směrů s výjimkou jihozápadního proudění. To znamená opět, že nejvýznamnější zdroje PM₁₀ se pravděpodobně nacházejí uvnitř obce, zejména v nočních hodinách (pravděpodobně lokální vytápění)

V případě lokality OU Hulice (Obr. 21 vpravo) jsou významné zejména východní směry větru a doba od cca 14 hodin do 4 hodin ráno. Od 20 hodin do brzkých ranních hodin jsou poněkud zvýšené koncentrace PM₁₀ při všech směrech větru. To podporuje hypotézu o zdrojích PM₁₀ uvnitř obce.

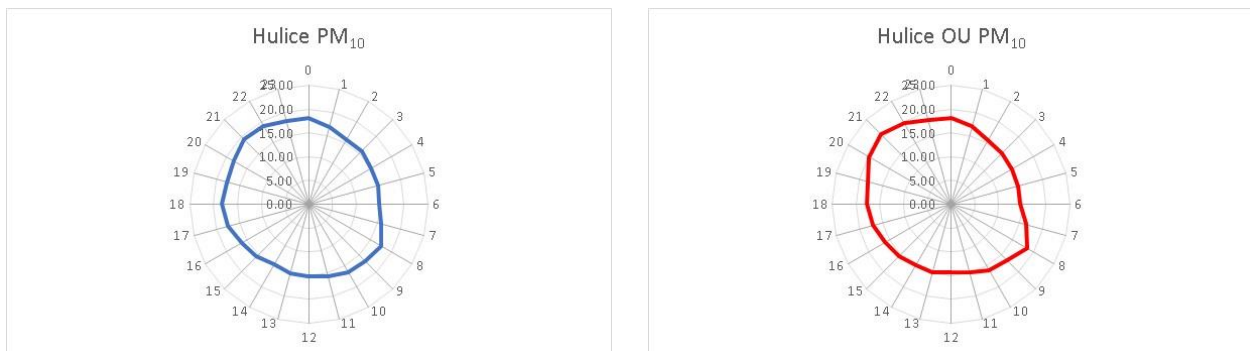


Obr. 21: Denní chod koncentrací PM₁₀, lokalita Hulice (vlevo) a lokalita OU Hulice (vpravo)

Jednou z možností, jak zobrazit denní chod koncentrací škodlivin jsou paprskové grafy. Na paprskovém grafu je znázorněna denní doba v hodinách na ose úhlů a koncentrace škodliviny na radiální ose. Odchytky od průměrné koncentrace se pak zobrazují jako deformace „kruhu“ (ve skutečnosti 24úhelíku). Zprůměrované hodnoty pro jednotlivé hodiny za den (denní chod) za celé měřené období bez ohledu na směr větru zobrazuje následující Obr. 22.

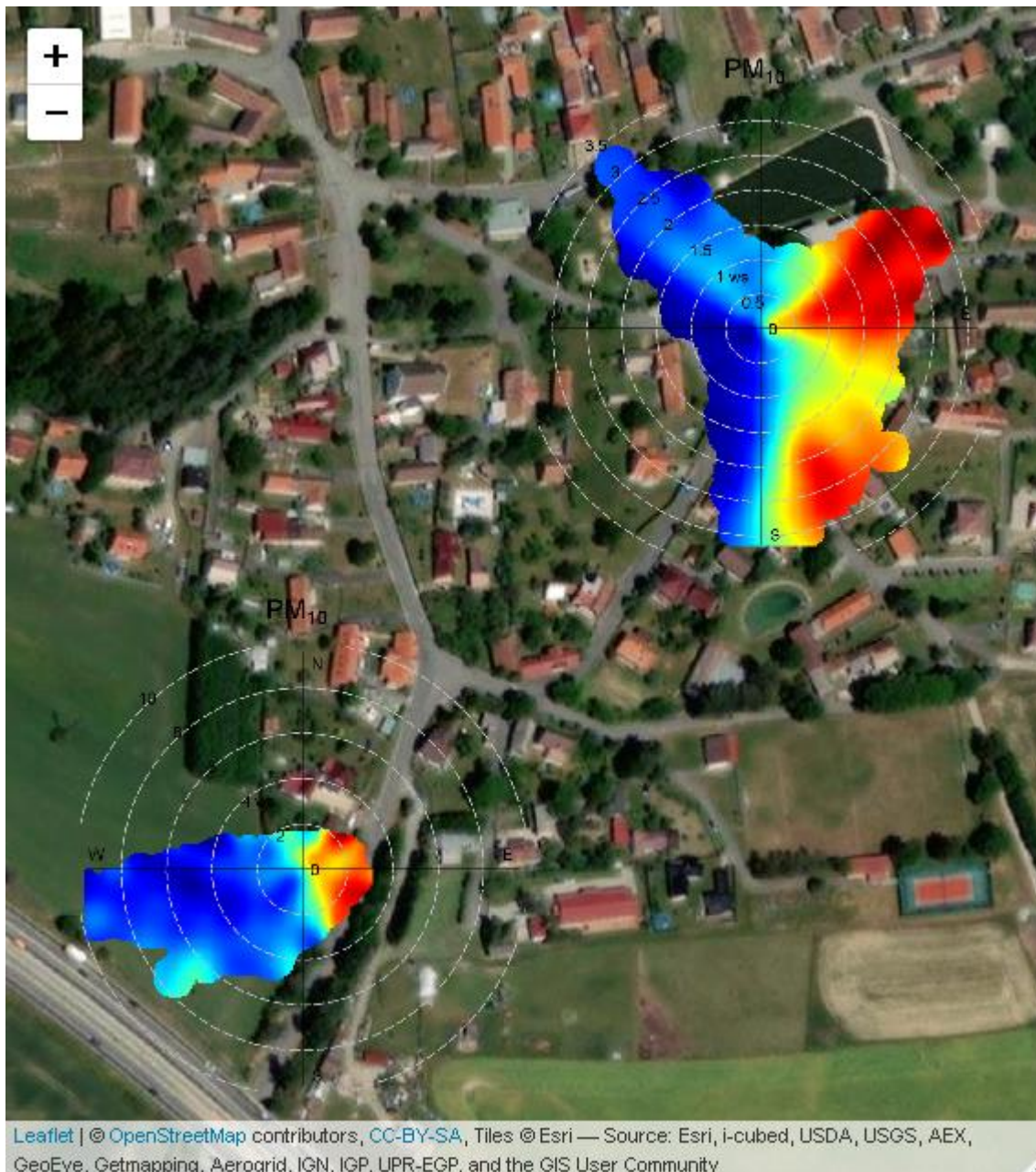
Z paprskových grafů na Obr. 22 je velmi dobře patrné to, co již naznačovaly denní chody v koncentračních růžicích. Obě lokality mají podobný trend s maximálními koncentracemi v dopoledních hodinách (mezi 6. – 10. hodinou) a v odpoledních a večerních hodinách (mezi 16. – 2. hodinou). To opět potvrzuje hypotézu o místních zdrojích (zvýšené koncentrace PM₁₀ v noci), vyloučit však nelze i vliv dopravy v ranních a odpoledních hodinách.

Uvedená zjištění jsou v souladu se skutečností, že v rámci celé ČR se na celkových emisích částic PM₁₀ nejvíce podílí vytápění domácností v lokálních topeništích, přestože jsou tato topeniště na rozdíl od ostatních sektorů v provozu pouze v chladné části roku.



Obr. 22: Průměrný denní chod hodinových koncentrací PM₁₀ na lokalitách Hulice (vlevo) a OU Hulice (vpravo)

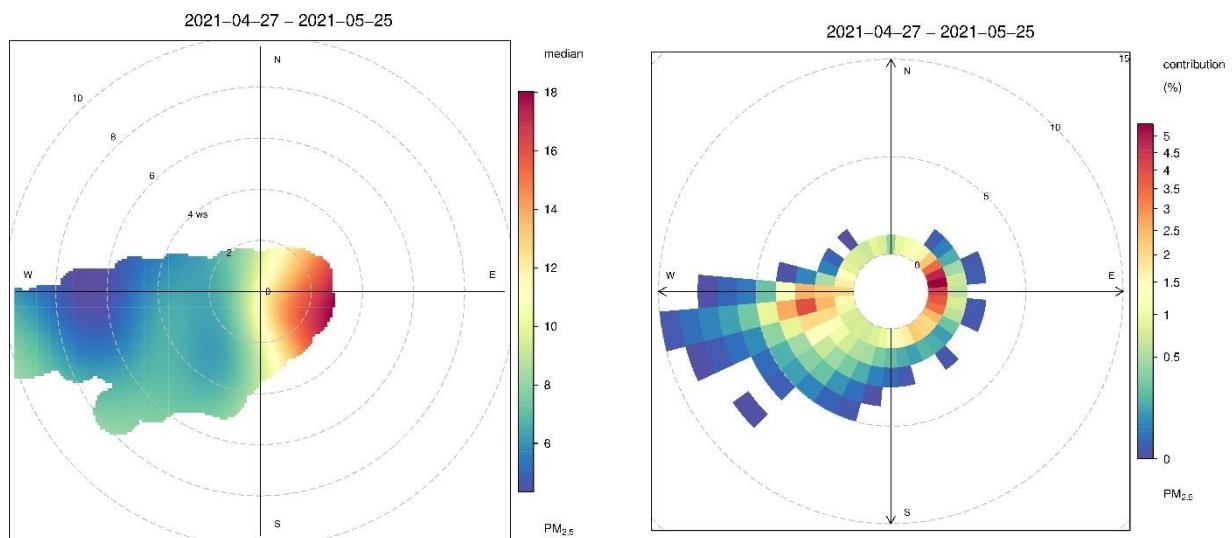
Celkové zobrazení koncentračních růžic PM_{10} na obou lokalitách je znázorněno na Obr. 23.



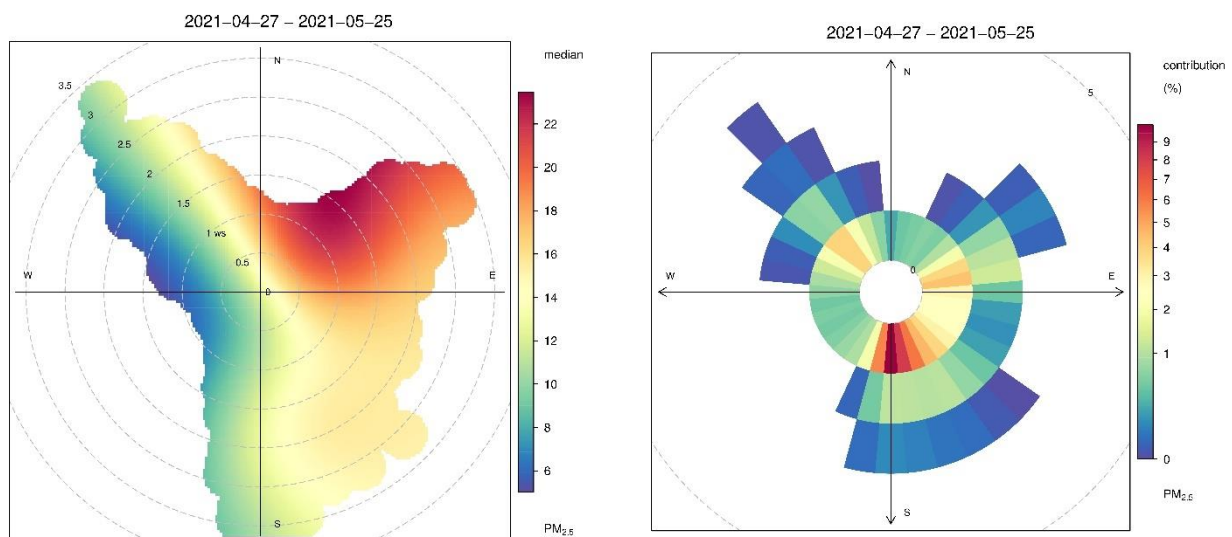
Obr. 23: Koncentrační růžice pro PM_{10} na obou lokalitách (zobrazení koncentrací metodou NWR)

3.1.4 Koncentrační růžice $PM_{2.5}$

Obecný popis konstrukce koncentračních růžic byl již popsán v kapitole 3.1.3.



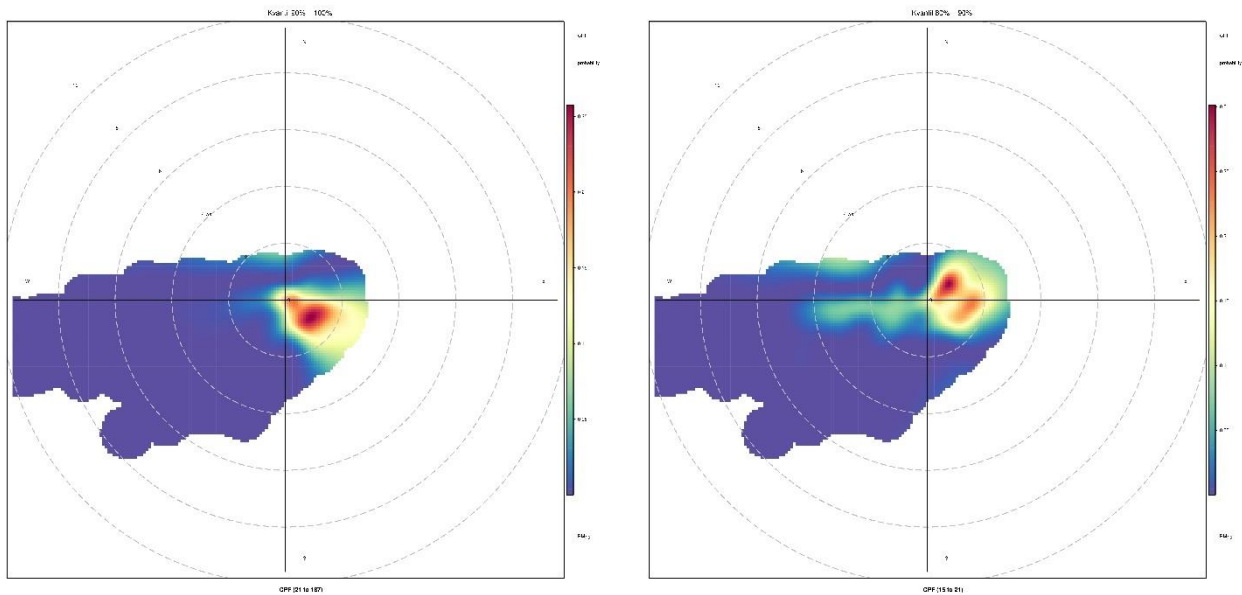
Obr. 24: Koncentrační růžice (vlevo) a vážená koncentrační růžice (vpravo) pro $PM_{2,5}$, lokalita Hulice



Obr. 25: Koncentrační růžice (vlevo) a vážená koncentrační růžice (vpravo) pro $PM_{2,5}$, lokalita OU Hulice

Koncentrační růžice na lokalitě Hulice (Obr. 24) ukazuje, že v průměru jsou nejvyšší koncentrace měřeny při východním proudění. Z těchto směrů nefouká příliš často, avšak koncentrace měřené při tomto proudění jsou vysoké. Proto jsou příspěvky k celkovému znečištění na této lokalitě nejvyšší. Ze západních směrů může být tato lokalita ovlivněna dálnicí. Nízké koncentrace $PM_{2,5}$ jsou sice měřeny při západním proudění, ale protože z těchto směrů foukal vítr nejčastěji (Obr. 16), projevilo se to i ve vážené koncentrační růžici. Vzhledem k tomu, že na lokalitě Hulice byly měřeny v některé dny velmi vysoké koncentrace, byla provedena analýza, jaké směry a rychlosti větru odpovídají těmto nejvyšším koncentracím. Následující Obr. 26 zobrazuje pravděpodobnost,

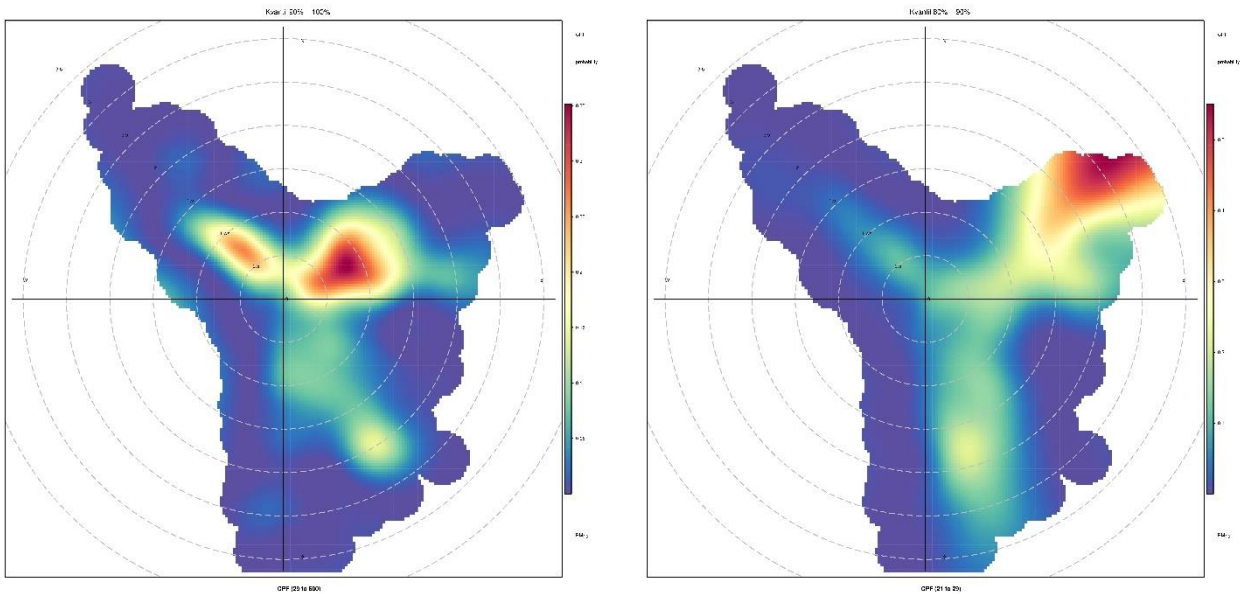
ze kterých směrů a při jaké rychlosti větru bylo měřeno 10 % nejvyšších minutových koncentrací $PM_{2,5}$ (vlevo) a druhých 10 % nejvyšších koncentrací PM_{10} (vpravo).



Obr. 26: Pravděpodobnost, při jakých rychlostech a směrech větru je měřeno 10 % nejvyšších minutových koncentrací $PM_{2,5}$ (vlevo) a druhých 10 % nejvyšších koncentrací $PM_{2,5}$ (vpravo) na lokalitě Hulice

Je tedy patrné, že důležité jsou zejména jihovýchodní a severovýchodní směry větru a nízké rychlosti větru. V obou případech se pravděpodobně jedná o místní zdroje (Obr. 2), může se jednat i o příspěvek dopravy z místní komunikace.

Na lokalitě OU Hulice jsou nejvyšší koncentrace měřeny při severovýchodním proudění (Obr. 25). Z jižního směru je měřeno maximum v případě vážené koncentrační růžice. Méně významné, ale přesto patrné byly v případě vážené koncentrační růžice i příspěvky z východu a severozápadu, což pravděpodobně respektuje místní zástavbu (Obr. 4). Vzhledem k tomu, že na lokalitě OU Hulice byly měřeny v některé dny velmi vysoké koncentrace $PM_{2,5}$, byla provedena analýza, jaké směry a rychlosti větru odpovídají těmto nejvyšším koncentracím. Následující Obr. 26 zobrazuje pravděpodobnost, ze kterých směrů a při jaké rychlosti větru bylo měřeno 10 % nejvyšších minutových koncentrací $PM_{2,5}$ (vlevo) a druhých 10 % nejvyšších koncentrací $PM_{2,5}$ (vpravo).



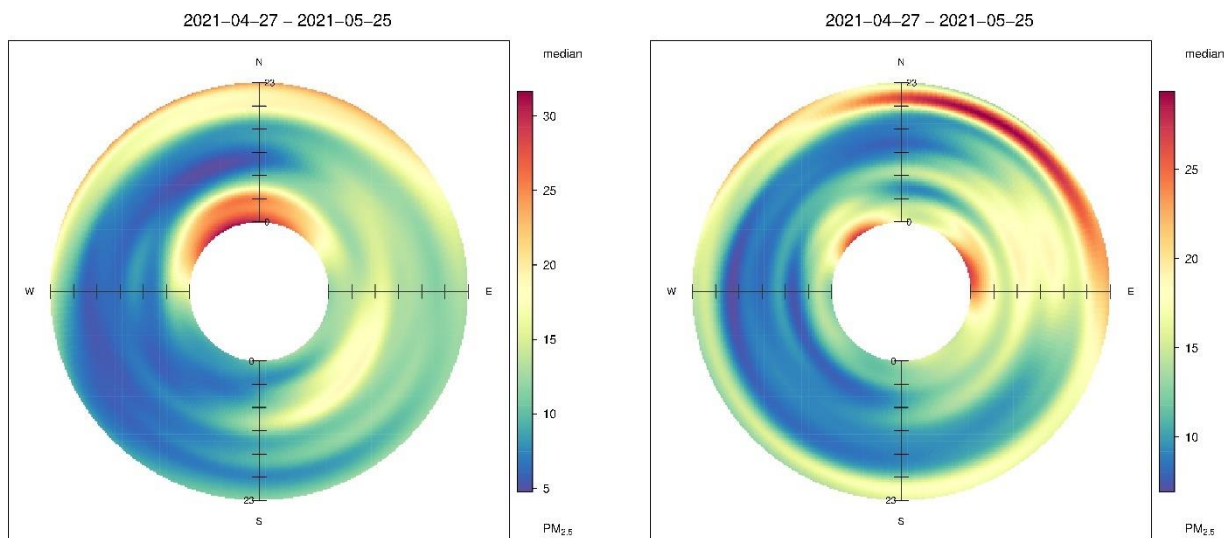
Obr. 27: Pravděpodobnost, při jakých rychlostech a směrech větru je měřeno 10 % nejvyšších minutových koncentrací $PM_{2,5}$ (vlevo) a druhých 10 % nejvyšších koncentrací $PM_{2,5}$ (vpravo) na lokalitě OU Hulice

Je tedy patrné, že důležité jsou východoseverovýchodní a severovýchodní směry větru a nízké až střední rychlosti větru. V obou případech se pravděpodobně jedná o místní zdroje (Obr. 2).

Dalším užitečným nástrojem pro analýzu dat o kvalitě ovzduší je zobrazení denního chodu. Obecně je zobrazení popsáno v kapitole 3.1.3.

Z denního chodu na lokalitě Hulice (Obr. 28 vlevo) vyplývá, že nejvyšší hodnoty koncentrací $PM_{2,5}$ jsou měřeny v době od 19 hodin večer do 5 hodin ráno při severním proudění (směrem od obce). Mírně zvýšené koncentrace jsou pak po celý den měřeny prakticky ze všech směrů s výjimkou jihozápadního proudění. To znamená opět, že nejvýznamnější zdroje $PM_{2,5}$ se pravděpodobně nacházejí uvnitř obce, zejména v nočních hodinách (pravděpodobně lokální vytápění)

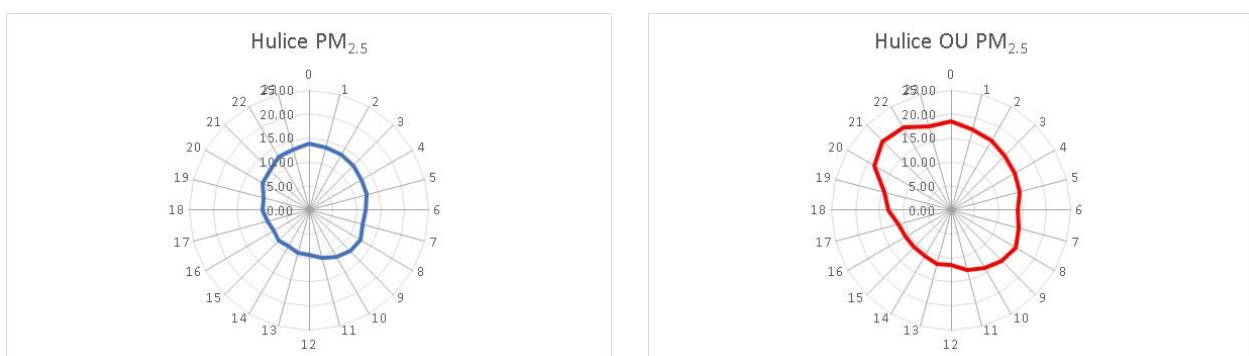
V případě lokality OU Hulice (Obr. 28 vpravo) jsou významné zejména východní směry větru a doba od cca 20 hodin do 4 hodin ráno. Od 20 hodin do brzkých ranních hodin jsou poněkud zvýšené koncentrace $PM_{2,5}$ při všech směrech větru. To podporuje hypotézu o zdrojích $PM_{2,5}$ uvnitř obce.



Obr. 28: Denní chod koncentrací $PM_{2,5}$, lokalita Hulice (vlevo) a lokalita OU Hulice (vpravo)

Zprůměrované hodnoty pro jednotlivé hodiny za den (denní chod) za celé měřené období bez ohledu na směr větru zobrazuje následující Obr. 29.

Z paprskových grafů na Obr. 29 je velmi dobře patrné to, co již naznačovaly denní chody v koncentračních růžicích. Obě lokality mají podobný trend s maximálními koncentracemi v dopoledních hodinách (mezi 6. – 10. hodinou) a ve večerních a nočních hodinách (mezi 18. – 5. hodinou). Na lokalitě OU Hulice je navíc zřetelnější zvýšení koncentrací $PM_{2,5}$ mezi 19. – 23. hodinou. To opět potvrzuje hypotézu o místních zdrojích (zvýšené koncentrace $PM_{2,5}$ v noci), vyloučit však nelze i vliv dopravy v ranních a odpoledních hodinách.



Obr. 29: Průměrný denní chod hodinových koncentrací $PM_{2,5}$ na lokalitách Hulice a OU Hulice

Uvedená zjištění jsou v souladu se skutečností, že v rámci celé ČR se na celkových emisích částic PM_{10} nejvíce podílí vytápění domácností v lokálních topeništích, přestože jsou tato topeniště na rozdíl od ostatních sektorů v provozu pouze v chladné části roku.

Celkové zobrazení koncentračních růžic $PM_{2,5}$ na obou lokalitách je znázorněno na Obr. 30.



Obr. 30: Koncentrační růžice pro PM_{2.5} na obou lokalitách (zobrazení koncentrací metodou NWR)

3.1.5 Průměrné denní koncentrace PM₁₀ a PM_{2,5}

Vývoj průměrných denních koncentrací PM₁₀ a PM_{2,5} na obou lokalitách je uveden v Tab. 4. Statistické zpracování průměrných denních koncentrací PM₁₀ a PM_{2,5} na obou lokalitách pak uvádí Tab. 5. Již na první pohled je patrné, že zatímco koncentrace PM₁₀ se v jednotlivých lokalitách prakticky neliší, koncentrace PM_{2,5} jsou na lokalitě OU Hulice poněkud vyšší.

Tab. 4: Průměrné denní koncentrace PM₁₀ a PM_{2,5}, lokality Hulice a OU Hulice

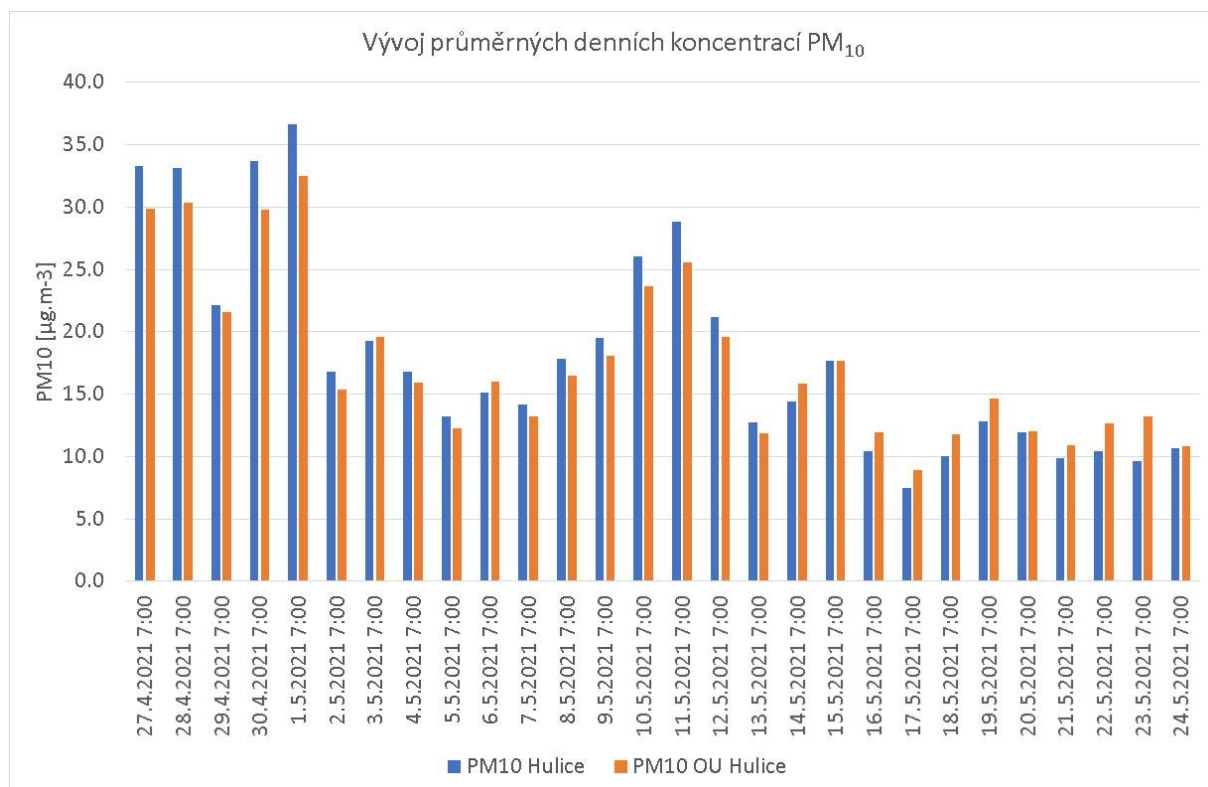
Začátek odběru	Konec odběru	Hulice PM ₁₀	Hulice PM _{2,5}	OU Hulice PM ₁₀	OU Hulice PM _{2,5}
Jednotka		μg·m ⁻³	μg·m ⁻³	μg·m ⁻³	μg·m ⁻³
27.4.2021 7:00	28.4.2021 7:00	33,3	19,7	29,8	24,6
28.4.2021 7:00	29.4.2021 7:00	33,1	19,6	30,4	24,6
29.4.2021 7:00	30.4.2021 7:00	22,1	14,3	21,6	19,6
30.4.2021 7:00	1.5.2021 7:00	33,7	22,1	29,8	26,6
1.5.2021 7:00	2.5.2021 7:00	36,6	28,3	32,5	31,6
2.5.2021 7:00	3.5.2021 7:00	16,8	9,9	15,4	14,5
3.5.2021 7:00	4.5.2021 7:00	19,2	10,3	19,6	18,0
4.5.2021 7:00	5.5.2021 7:00	16,8	9,6	15,9	13,8
5.5.2021 7:00	6.5.2021 7:00	13,2	7,2	12,3	10,6
6.5.2021 7:00	7.5.2021 7:00	15,1	7,2	16,0	14,6
7.5.2021 7:00	8.5.2021 7:00	14,2	8,0	13,2	12,1
8.5.2021 7:00	9.5.2021 7:00	17,9	9,9	16,5	15,2
9.5.2021 7:00	10.5.2021 7:00	19,5	11,2	18,1	14,5
10.5.2021 7:00	11.5.2021 7:00	26,1	13,8	23,7	17,1
11.5.2021 7:00	12.5.2021 7:00	28,8	15,4	25,5	18,7
12.5.2021 7:00	13.5.2021 7:00	21,2	15,3	19,6	18,6
13.5.2021 7:00	14.5.2021 7:00	12,7	10,0	11,8	11,9
14.5.2021 7:00	15.5.2021 7:00	14,4	10,1	15,8	15,9
15.5.2021 7:00	16.5.2021 7:00	17,7	14,2	17,7	18,0
16.5.2021 7:00	17.5.2021 7:00	10,4	7,7	11,9	11,5
17.5.2021 7:00	18.5.2021 7:00	7,5	6,0	8,9	10,0
18.5.2021 7:00	19.5.2021 7:00	10,1	7,4	11,8	11,4
19.5.2021 7:00	20.5.2021 7:00	12,8	9,4	14,7	14,2
20.5.2021 7:00	21.5.2021 7:00	11,9	9,6	12,0	12,3
21.5.2021 7:00	22.5.2021 7:00	9,9	6,8	10,9	11,4
22.5.2021 7:00	23.5.2021 7:00	10,4	7,8	12,7	12,6
23.5.2021 7:00	24.5.2021 7:00	9,6	5,1	13,2	11,6
24.5.2021 7:00	25.5.2021 7:00	10,7	8,4	10,8	10,9

Tab. 5: Statistické zpracování průměrných denních koncentrací PM₁₀ a PM_{2,5} (µg·m⁻³) na lokalitách Hulice a OU Hulice

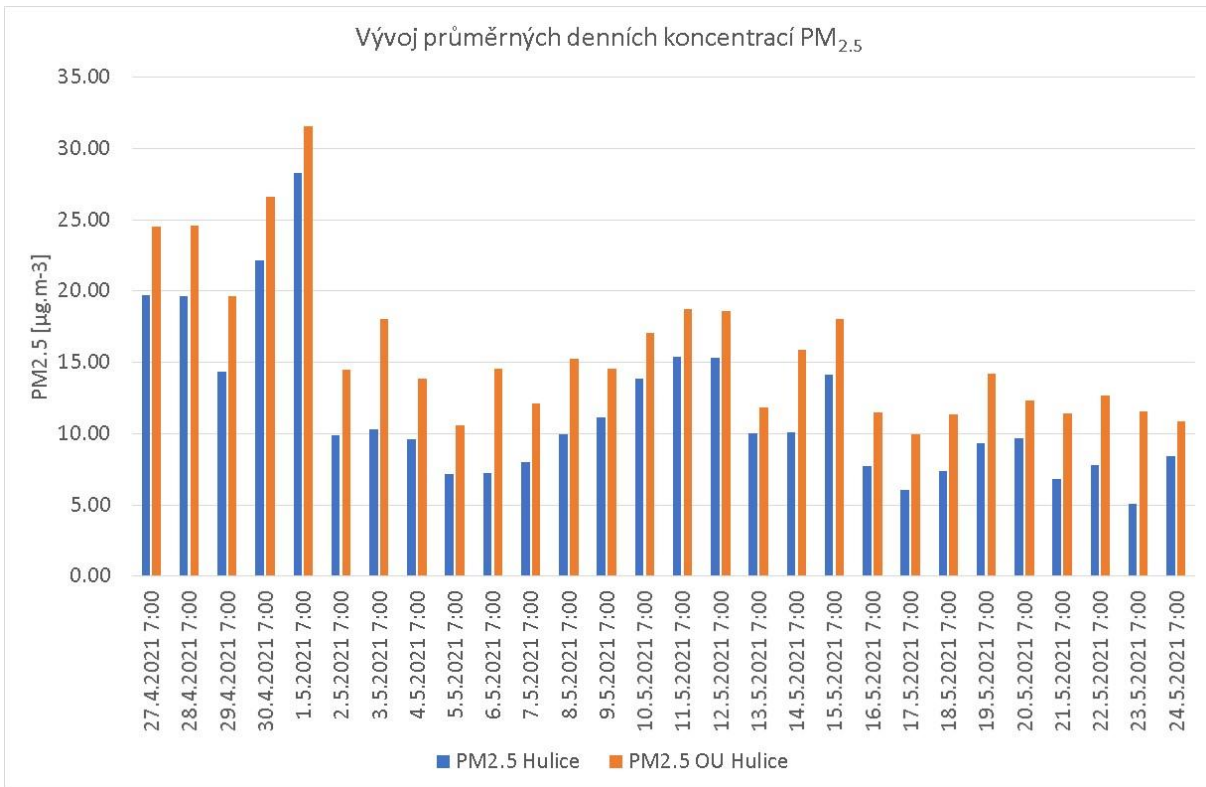
Lokalita	Škodlivina	Průměr	Směrodatná odchylka	Medián	Minimum	Maximum
Hulice	PM ₁₀	18,06	8,39	15,96	7,46	36,63
OU Hulice	PM ₁₀	17,59	6,76	16,02	8,88	32,52
Hulice	PM _{2,5}	11,58	5,43	9,90	5,09	28,26
OU Hulice	PM _{2,5}	15,97	5,46	14,36	9,75	32,10

Průměrné relativní zastoupení PM_{2,5} v PM₁₀ činí na lokalitě Hulice 64 % a na lokalitě OU Hulice 91 %. Lokalita Hulice je tedy více ovlivněna hrubší frakcí PM₁₀. Zatímco průměrná koncentrace PM₁₀ je na obou lokalitách přibližně stejná, průměrná koncentrace PM_{2,5} se liší. Důvodem relativně vyšších podílů koncentrací hrubší frakce v PM₁₀ tak mohou místní zdroje jako zemědělská, stavební a další činnost případně resuspenze půdy v okolí na lokalitě bližší k dálnici, důvodem vyššího podílu jemnější frakce PM_{2,5} jako součásti PM₁₀ na lokalitě v blízkosti OU Hulice mohou být lokální zdroje (lokální topeniště).

Graficky je pak vývoj průměrných denních koncentrací PM₁₀ a PM_{2,5} zobrazen na následujících Obr. 31 a Obr. 32.



Obr. 31: Vývoj průměrných denních koncentrací PM₁₀ na lokalitách Hulice a OU Hulice



Obr. 32 - Vývoj průměrných denních koncentrací PM_{2,5} na lokalitách Hulice a OU Hulice

Již na první pohled je patrné, že koncentrace PM₁₀ a koncentrace PM_{2,5} mají na obou lokalitách podobný průběh. V případě průměrných denních koncentrací PM₁₀ je podobně jako v případě hodinových koncentrací patrný rozdíl mezi lokalitami, koncentrace na lokalitě OU Hulice byly v devíti případech vyšší než koncentrace měřené na lokalitě Hulice. Hodnota imisního limitu pro denní koncentraci PM₁₀ (50 µg·m⁻³) nebyla v žádné lokalitě překročena. Na lokalitě OU Hulice byly koncentrace PM_{2,5} ve všech případech vyšší než na lokalitě Hulice.

3.2 Oxidy dusíku

Emise oxidů dusíku (NO_x) se tvoří při spalování paliv v závislosti na teplotě spalování, obsahu dusíku v palivu a přebytku spalovacího vzduchu. Emise NO_x vznikají i při některých chemicko-technologických procesech (výroba kyseliny dusičné, amoniaku, hnojiv apod.). Sektor dopravy vč. nesilničních vozidel se v roce 2017 podílel na celorepublikových emisích NO_x 40,1 % [9].

3.2.1 Hodinové koncentrace oxidů dusíku

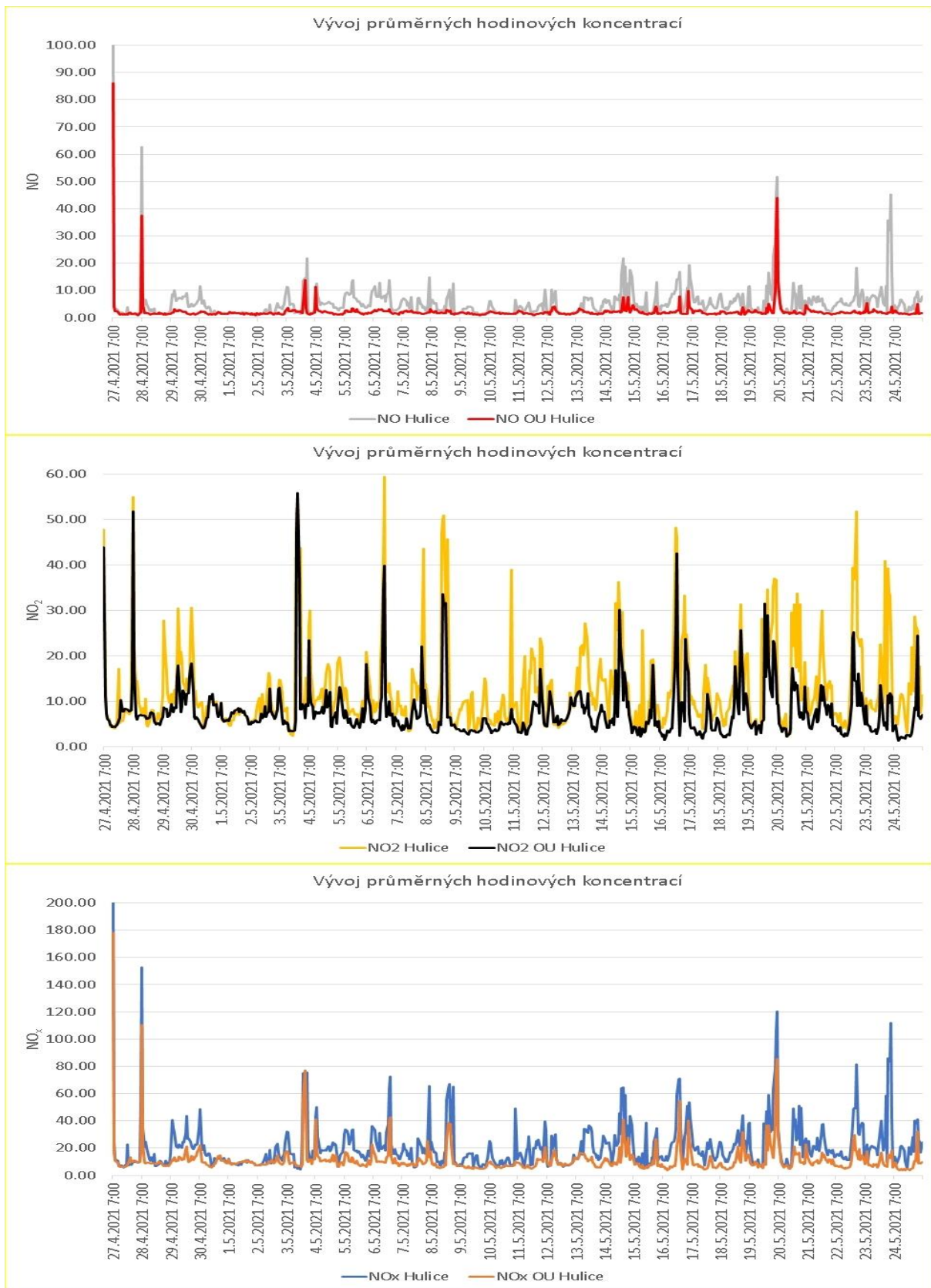
Vývoj průměrných hodinových koncentrací NO , NO_2 a NO_x na obou lokalitách je zobrazen na následujícím Obr. 33. Koncentrace NO_x tvoří součet koncentrací $\text{NO} + \text{NO}_2$ v ppb přepočtený na koncentraci NO_2 v $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Z grafů je patrné, že trend vývoje koncentrací je na obou lokalitách podobný. Přesto zejména z hlediska NO_2 a NO_x (ale i z hlediska NO) jsou koncentrace na lokalitě Hulice vyšší než na lokalitě OU Hulice. To nejpravděpodobněji souvisí s lokalizací stanoviště Hulice, které je blíže k dálnici než stanoviště OU Hulice.

V Tab. 6 jsou pak uvedeny statistické údaje hodinových koncentrací oxidů dusíku na obou lokalitách.

Tab. 6: Statistické zpracování průměrných hodinových koncentrací NO , NO_2 a NO_x ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) na lokalitách Hulice a OU Hulice

Lokalita	Škodlivina	Průměr	Směrodatná odchylka	Medián	Minimum	Maximum
Hulice	NO	5,37	6,44	4,11	0,97	100,53
Hulice	NO_2	12,36	9,24	9,56	2,14	59,41
Hulice	NO_x	20,64	17,26	16,33	4,32	203,17
OU Hulice	NO	2,28	4,21	1,73	0,91	86,06
OU Hulice	NO_2	7,65	6,16	6,13	1,32	55,74
OU Hulice	NO_x	11,22	10,88	8,91	3,54	178,02

Z průměrných hodnot koncentrací v Tab. 6 je patrné, že na obou lokalitách byly naměřeny nižší hodnoty koncentrací NO než NO_2 . Doprava primárně emituje právě NO , který je následně v atmosféře oxidován na NO_2 , který je pak sledován legislativou. Nízký poměr koncentrací NO / NO_2 naznačuje nepříliš významné ovlivnění lokality dopravou. V případě lokality Hulice byl průměrný poměr NO / NO_2 , vypočtený z hodinových koncentrací, roven 0,43. Obdobně činila průměrná hodnota poměru NO / NO_2 na lokalitě OU Hulice 0,30. Jedná se o nízké hodnoty, hodnota poměru na pozadových lokalitách se v ročním průměru pohybuje zhruba mezi 0,2 – 0,4 [10], [11]. Podzimní období (nízké teploty, mlhy) může tento poměr mírně zvyšovat, přesto je patrné částečné znečištění oxidy dusíku ze silniční dopravy, které se projevuje vyšším poměrem na lokalitě na okraji obce bližším k dálnici (lokalita Hulice) než uvnitř obce (lokalita OU Hulice).



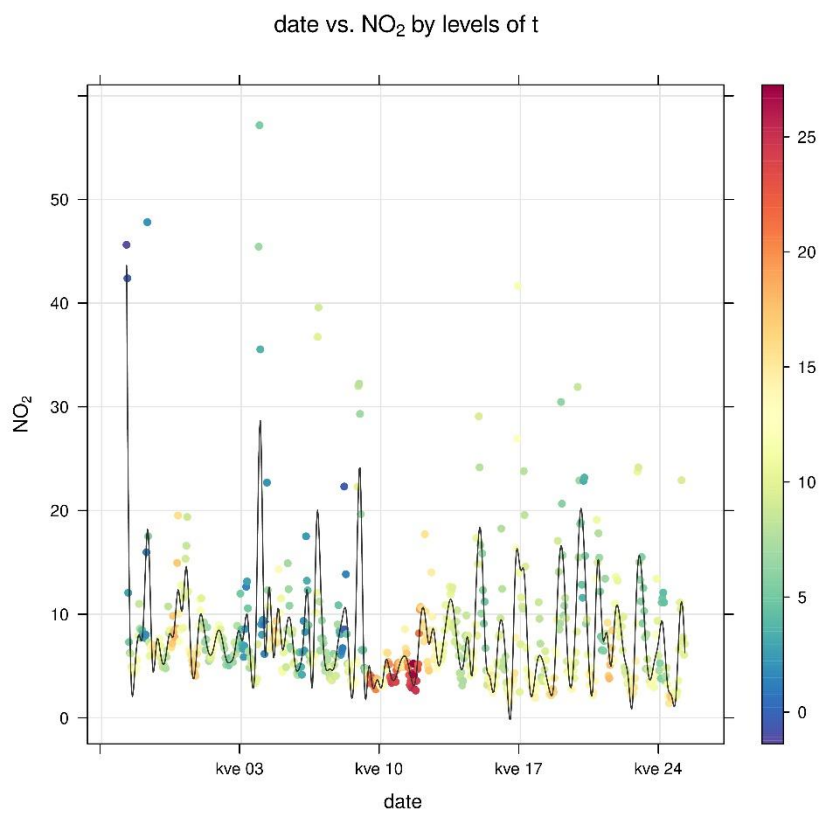
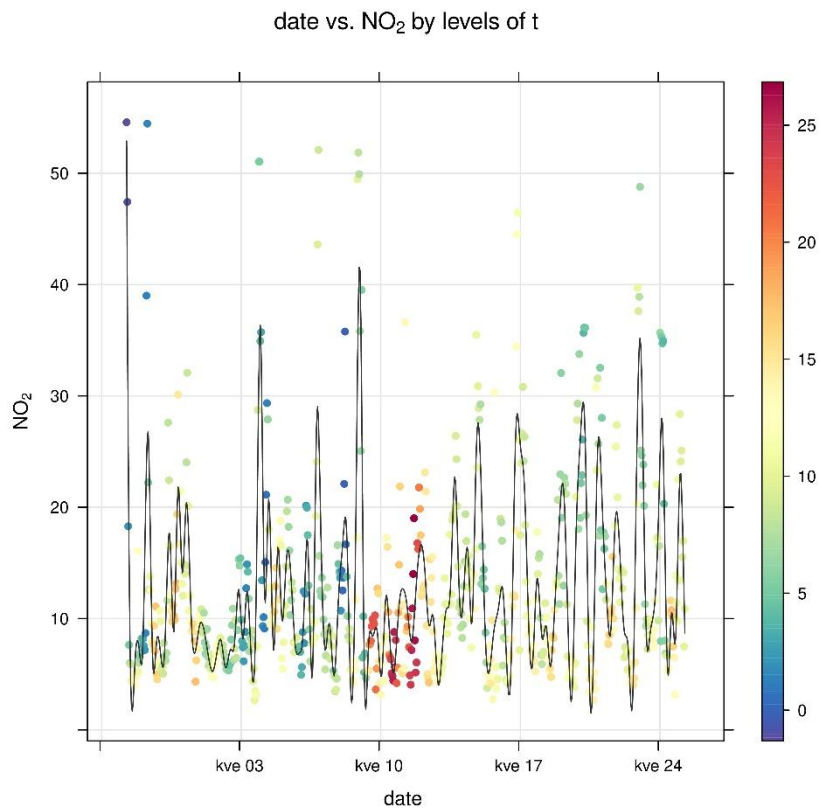
Obr. 33: Vývoj průměrných hodinových koncentrací NO (nahore), NO₂ (uprostřed) a NO_x (dole) na lokalitách Hulice a OU Hulice

Z tabulky je rovněž patrné, že maximální koncentrace NO₂ dosáhly na lokalitě Hulice hodnoty 59,41 µg·m⁻³ a na lokalitě OU Hulice 55,74 µg·m⁻³. Z toho vyplývá, že během kampaně nedošlo ani jednou k překročení hodnoty imisního limitu pro hodinovou koncentraci NO₂ (200 µg·m⁻³).

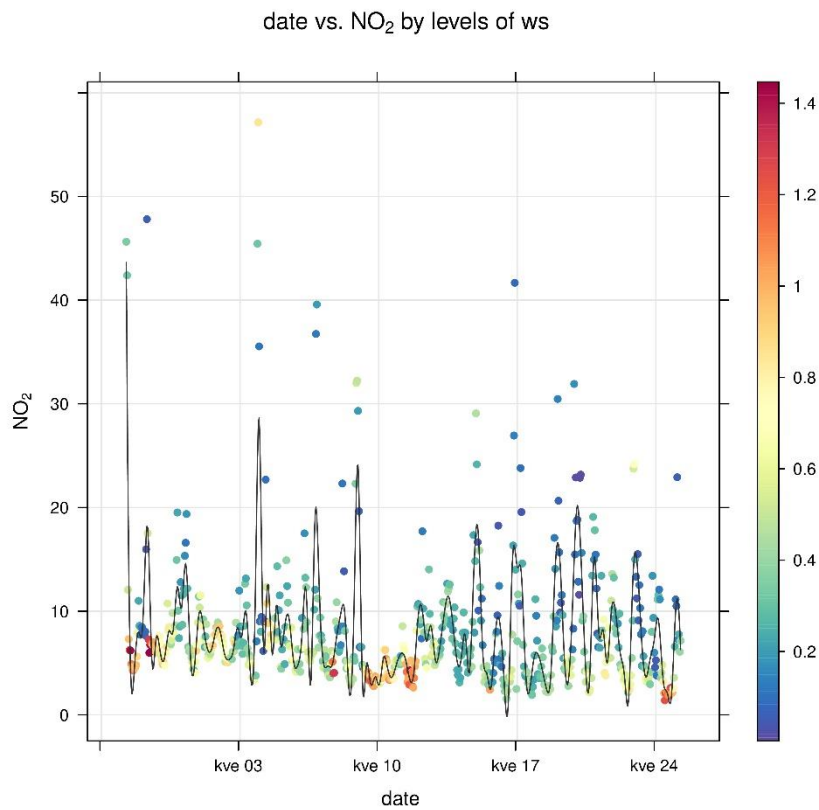
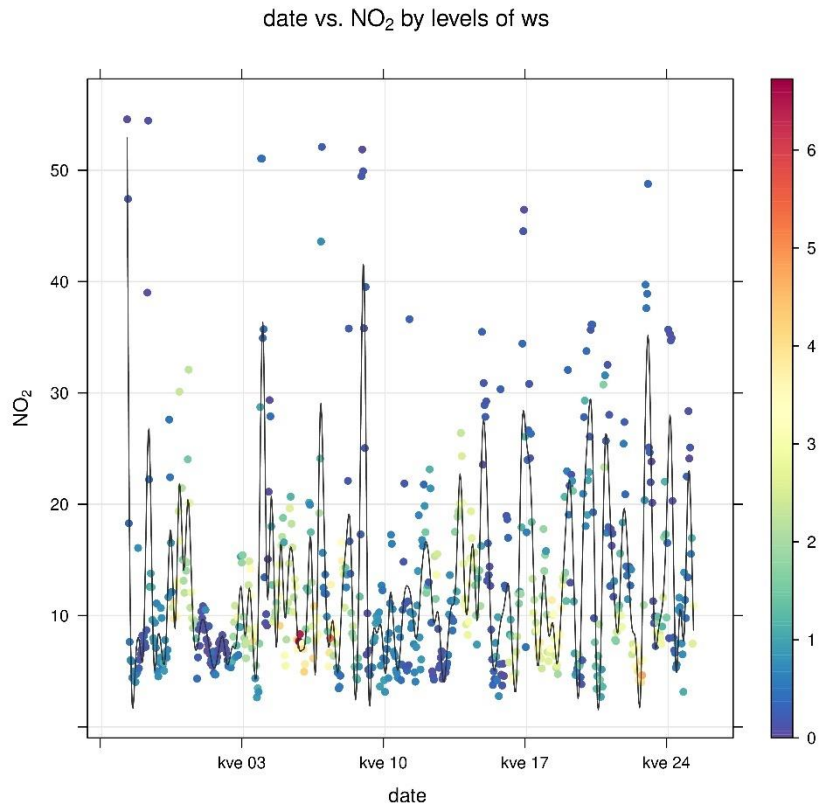
Pro vývoj koncentrací oxidů dusíku jsou velmi důležité meteorologické podmínky, zejména pak teplota vzduchu, rychlost větru a relativní vlhkost vzduchu. Vztah mezi průměrnými hodinovými koncentracemi NO₂ a jednotlivými meteorologickými veličinami zobrazují následující Obr. 34 – Obr. 36. Uváděny jsou pouze koncentrace NO₂, protože tato látka je uvedena v české legislativě.

Z grafů na Obr. 34 je patrné, že vyšší teploty se mohou odrazit v nižších koncentracích NO₂. Obdobný vliv mají vyšší rychlosti větru. Z Obr. 35 je patrné, že na lokalitě Hulice většina píků nízkých koncentrací korespondovala s vyššími rychlostmi větru, kdy docházelo k lepšímu rozptylu škodlivin prouděním vzduchu. V případě relativních vlhkostí pak platí, že při nižších hodnotách vlhkosti jsou zpravidla měřeny nižší koncentrace NO. Uvedené efekty nejsou striktním pravidlem, ale spíše určitou tendencí.

Souvislosti mezi rychlostí a směrem větru a koncentracemi škodlivin pak nejlépe vystihují koncentrační růžice. Této tématice je věnována následující kapitola 3.2.2.

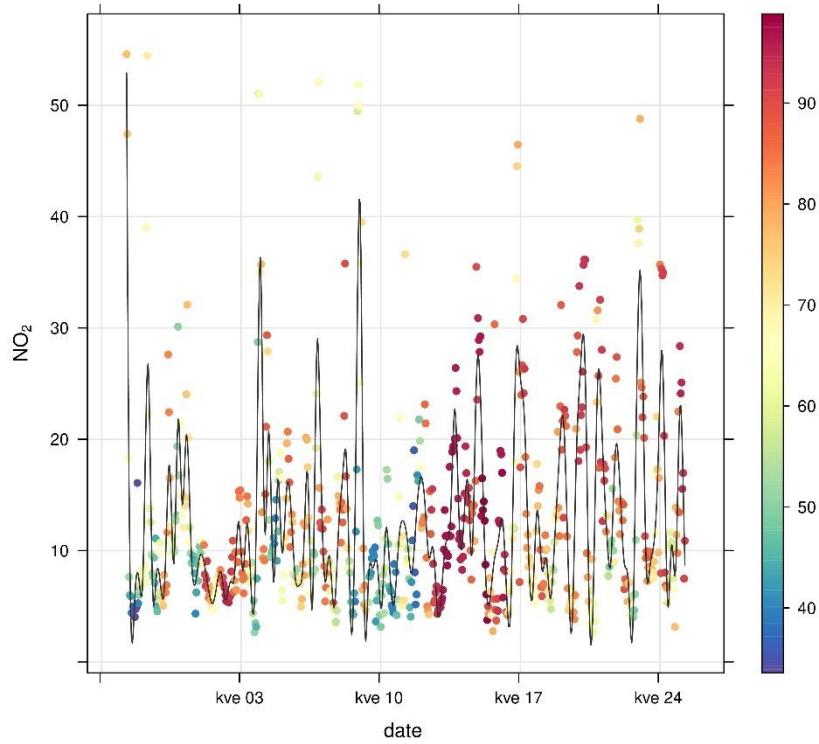


Obr. 34: Průměrné hodinové koncentrace NO₂ v závislosti na teplotě vzduchu, lokality Hulice (nahore) a OU Hulice (dole)

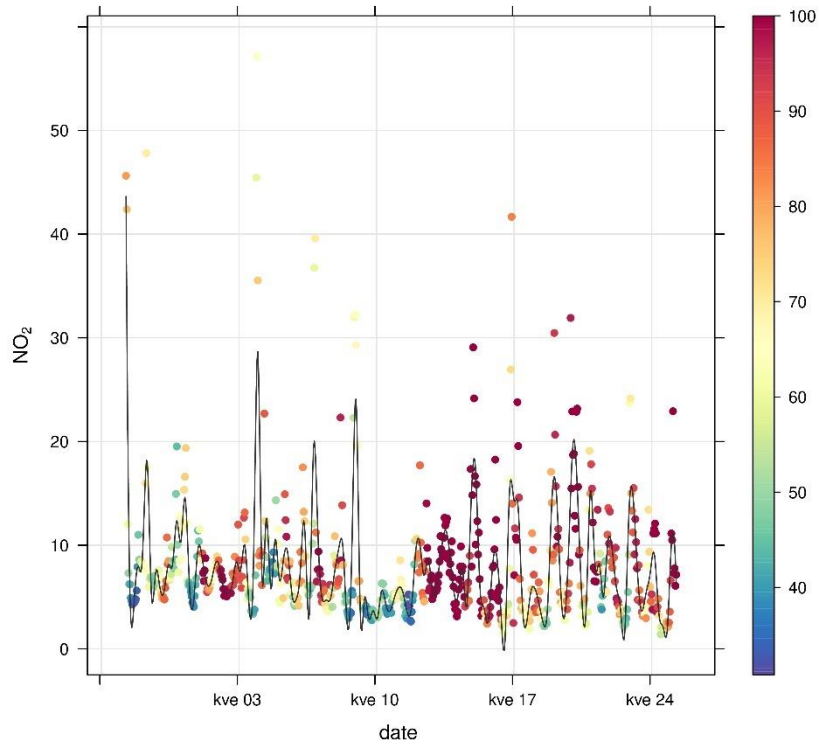


Obr. 35: Průměrné hodinové koncentrace NO₂ v závislosti na rychlosti proudění větru, lokality Hulice (nahore) a OU Hulice (dole)

date vs. NO₂ by levels of RH



date vs. NO₂ by levels of RH



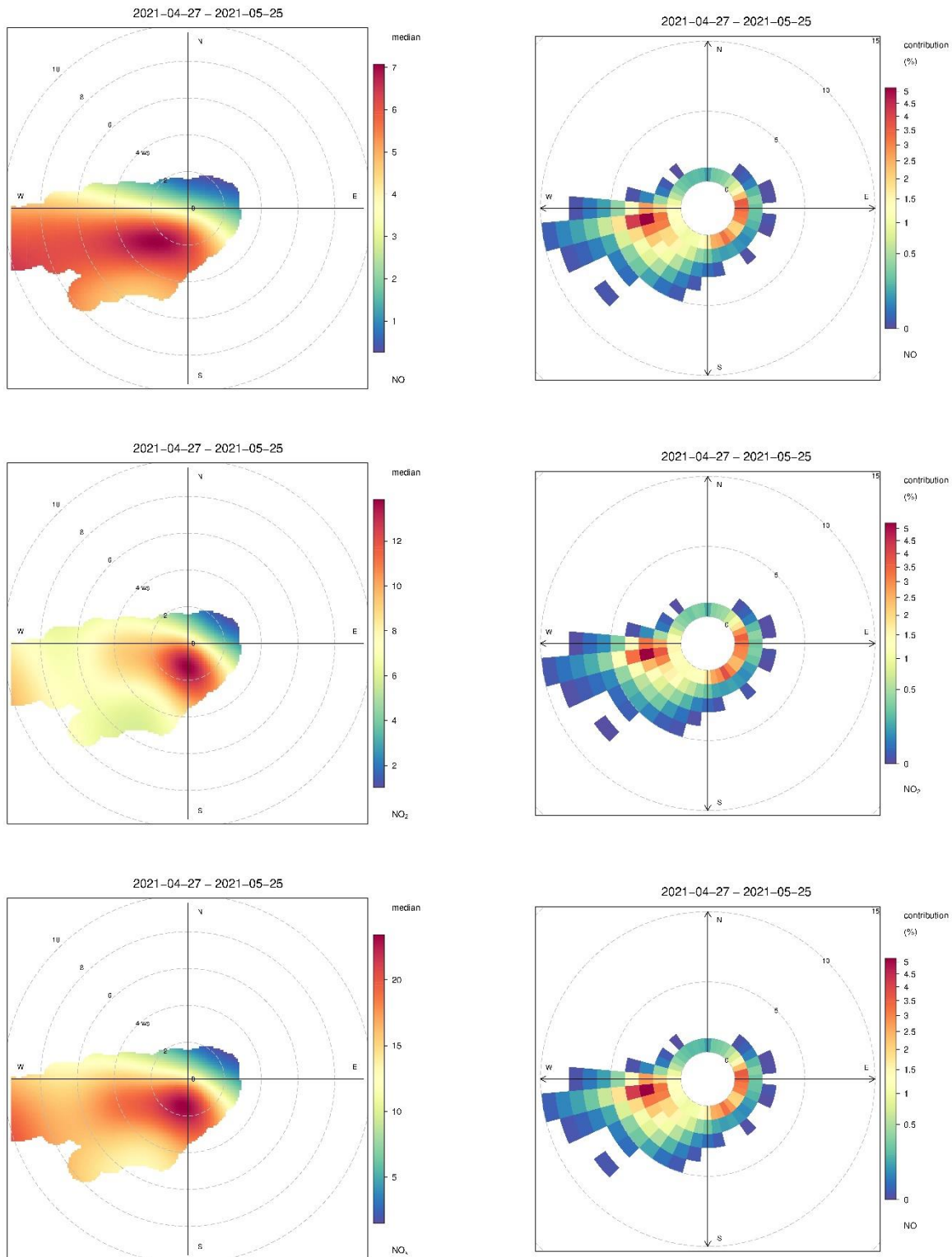
Obr. 36: Průměrné hodinové koncentrace NO₂ v závislosti na relativní vlhkosti vzduchu, lokality Hulice (nahore) a OU Hulice (dole)

3.2.2 Koncentrační růžice oxidů dusíku

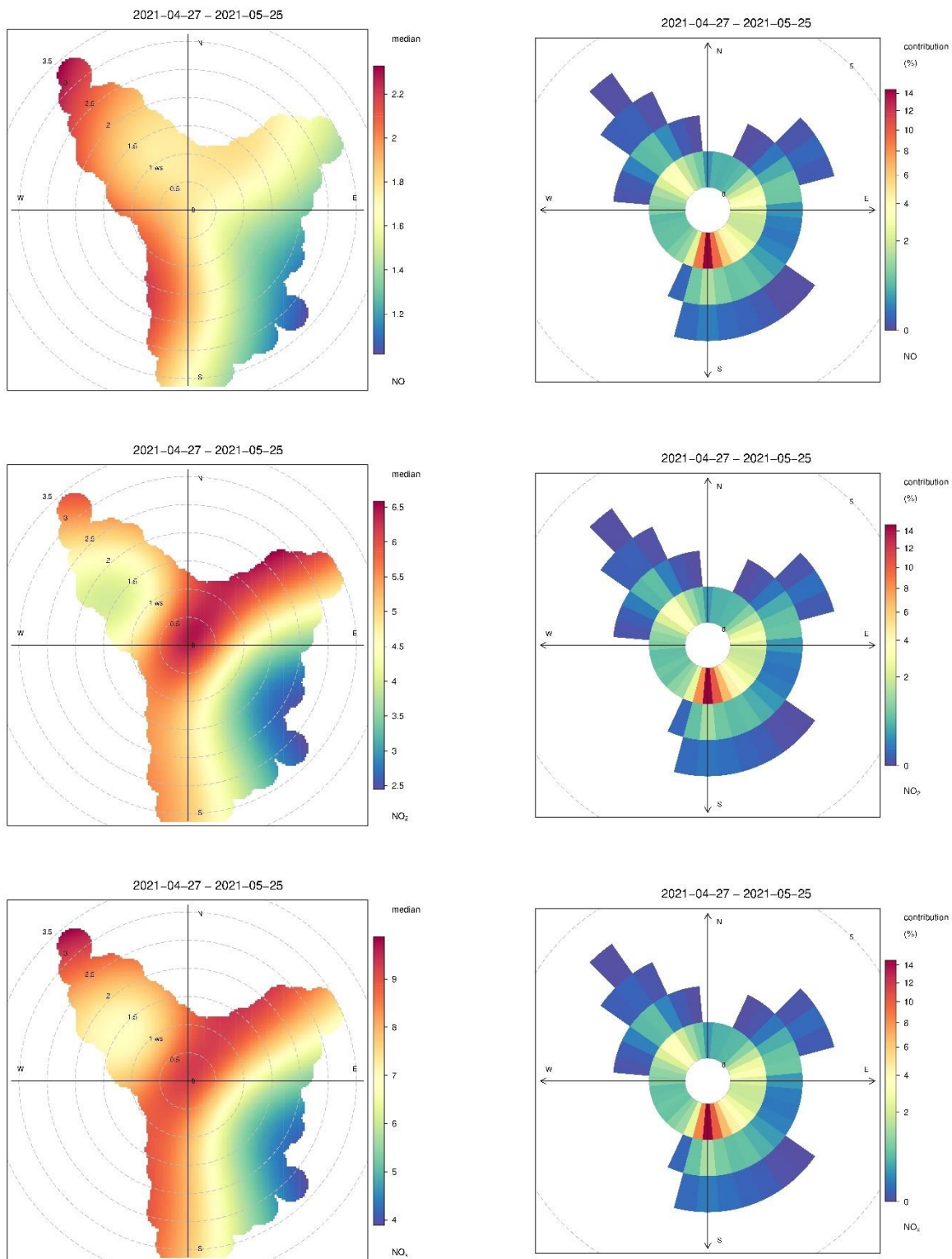
Koncentrační růžice jsou nástroj pro analýzu znečištění ovzduší na základě meteorologických charakteristik. Pro jejich konstrukci jsou použita minutová data meteorologických prvků a koncentrací škodlivin – pro kampaň na každé z lokalit tak bylo použito cca 40330 údajů. Vychází se z větrné růžice (Obr. 16), detaily systému zobrazování koncentračních růžic jsou popsány v kapitole 3.1.3.

Z koncentračních růžic vyplývá, že vysokých koncentrací je zpravidla dosahováno při nízkých rychlostech větru až bezvětří. Koncentrační růžice na lokalitě Hulice (Obr. 37) pak ukazuje, že nejvyšších koncentrací je dosahováno při jižních až západních směrech proudění. Projevuje se to především v případě koncentrací NO_2 , které jsou v této lokalitě majoritní složkou (viz měřítko), ale také na koncentracích NO_x . Nejvyšší příspěvek k měřeným koncentracím NO , NO_2 i NO_{NO_x} byl zaznamenán ze západojihozápadu. Z těchto směrů fouká nejčastěji, což se projeví i na podílu znečištění. Další příspěvky k měřeným koncentracím NO , NO_2 a NO_x jsou významné při větrech vanoucích od jihu až východu. Zde se může jednat o příspěvek místní komunikace

Na lokalitě OU Hulice jsou nejvyšší koncentrace měřeny při všech směrech proudění větru s výjimkou směru severovýchodního. Nejvyšší příspěvky koncentrací NO , NO_2 i NO_x byly zaznamenány z jihu (Obr. 38). Vzhledem k tomu, že se jedná na této lokalitě o přibližně poloviční koncentrace než na lokalitě Hulice, může se jednat buď o příspěvek z místních komunikací, nebo i od dálnice.



Obr. 37: Koncentrační růžice (vlevo) a vážená koncentrační růžice (vpravo) pro NO (nahore), NO₂ (uprostřed) a NO_x (dole), lokalita Hulice

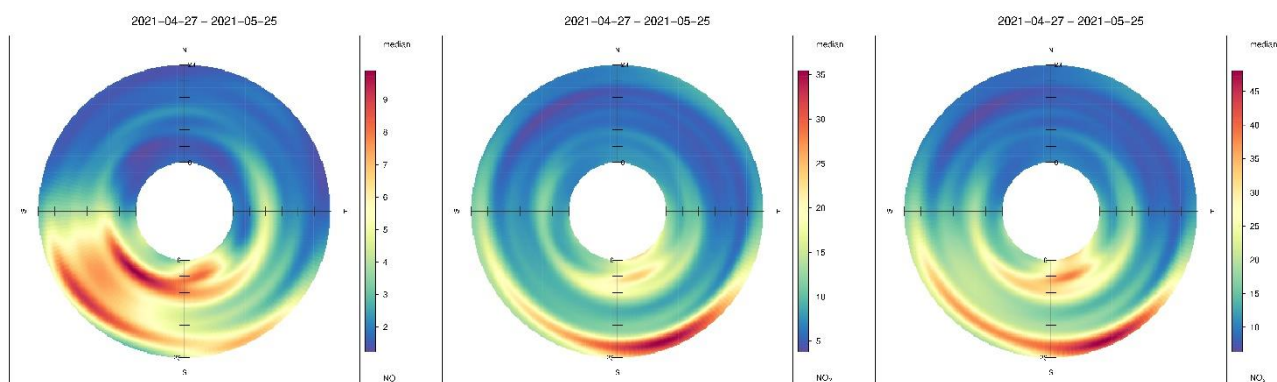


Obr. 38: Koncentrační růžice (vlevo) a vážená koncentrační růžice (vpravo) pro NO (nahore), NO₂ (uprostřed) a NO_x (dole), lokalita OU Hulice

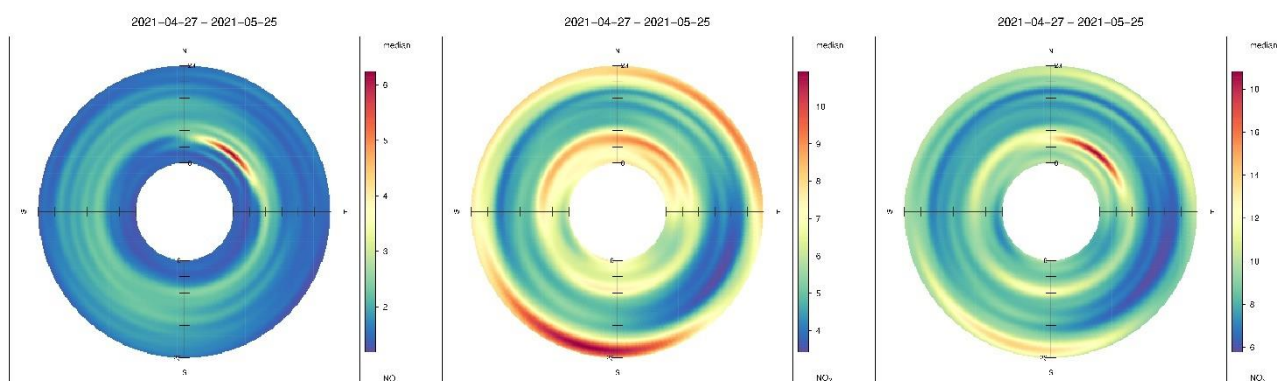
Dalším užitečným nástrojem pro analýzu dat o kvalitě ovzduší je zobrazení denního chodu. Obecně je zobrazení popsáno v kapitole 3.1.3.

Z denního chodu na lokalitě Hulice (Obr. 39) vyplývá, že nejvyšší hodnoty koncentrací NO_2 a NO_x byly naměřeny v nočních hodinách, což odpovídá oxidaci NO ozónem za nepřítomnosti světelného záření. Patrně se jednalo o oxidaci NO pocházejícího z provozu na dálnici. Zvýšené koncentrace NO byly naměřeny během ranní dopravní špičky kolem 8. hodiny a ve večerních hodinách, zejména při jihozápadním proudění (směr od dálnice).

Nejvyšší koncentrace NO na lokalitě OU Hulice byly kolem 8. hodiny ranní při severovýchodním proudění. V tomto případě se může jednat o místní zdroje. Nejvyšší hodnoty koncentrací NO_2 byly naměřeny v nočních hodinách při jihozápadním proudění, což pravděpodobně odpovídá oxidaci NO ozónem za nepřítomnosti světelného záření. Patrně se jednalo o oxidaci NO pocházejícího z provozu na dálnici. Nezanedbatelné však byly i zvýšené koncentrace NO_2 při ostatních směrech proudění během noci a brzkých ranních hodin, jejichž zdroje se patrně nacházely uvnitř obce. Zde je však nutné připomenout, že maxima denního chodu na lokalitě OU Hulice byly zhruba poloviční oproti lokalitě Hulice.

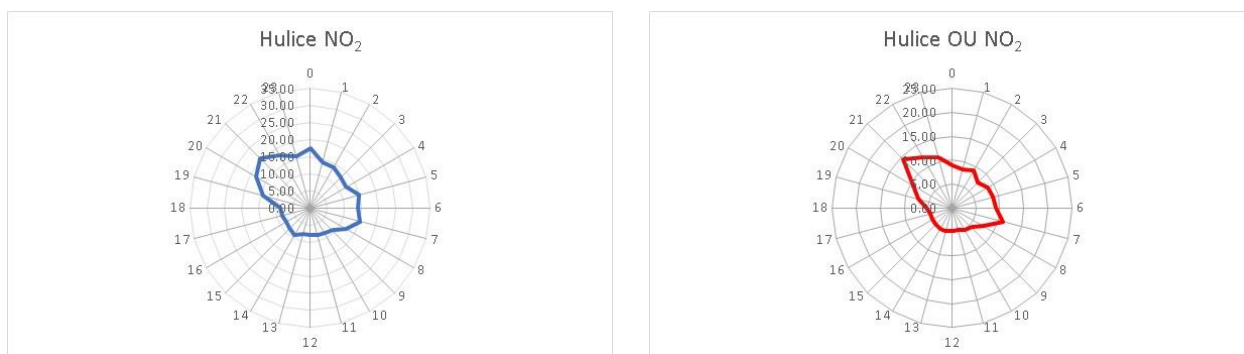


Obr. 39: Denní chod koncentrací NO (vlevo), NO_2 (uprostřed) a NO_x (vpravo), lokalita Hulice



Obr. 40: Denní chod koncentrací NO (vlevo), NO_2 (uprostřed) a NO_x (vpravo), lokalita OU Hulice

Zprůměrované hodnoty pro jednotlivé hodiny za den (denní chod) za celé měřené období bez ohledu na směr větru zobrazuje následující Obr. 41 pro oxid dusičitý.



Obr. 41: Průměrný denní chod hodinových koncentrací pro NO₂ na lokalitách Hulice a OU Hulice

Z paprskových grafů na Obr. 41 je velmi dobře patrné to, co již naznačovaly denní chody v koncentračních růžicích. Na obou lokalitách byly oproti denním hodinám zvýšené koncentrace NO₂ v nočních hodinách s maximy kolem 21. a 7. hodiny. Je tedy možné předpokládat, že u ranního maxima se jedná o dopravní špičku, u večerního maxima o kombinaci atmosférických jevů, lokálních zdrojů a dopravních zdrojů.

Celkové zobrazení koncentračních růžic NO₂ na obou lokalitách je znázorněno na Obr. 42.



Obr. 42: Koncentrační růžice pro NO₂ na obou lokalitách (zobrazení koncentrací metodou NWR)

3.2.3 Průměrné denní koncentrace NO, NO₂ a NO_x

Vývoj průměrných denních koncentrací NO, NO₂ a NO_x na obou lokalitách je uveden v Tab. 7. Statistické zpracování průměrných denních hodnot je pak uvedeno v Tab. 8.

Tab. 7: Průměrné denní koncentrace NO, NO₂ a NO_x, lokality Hulice a OU Hulice

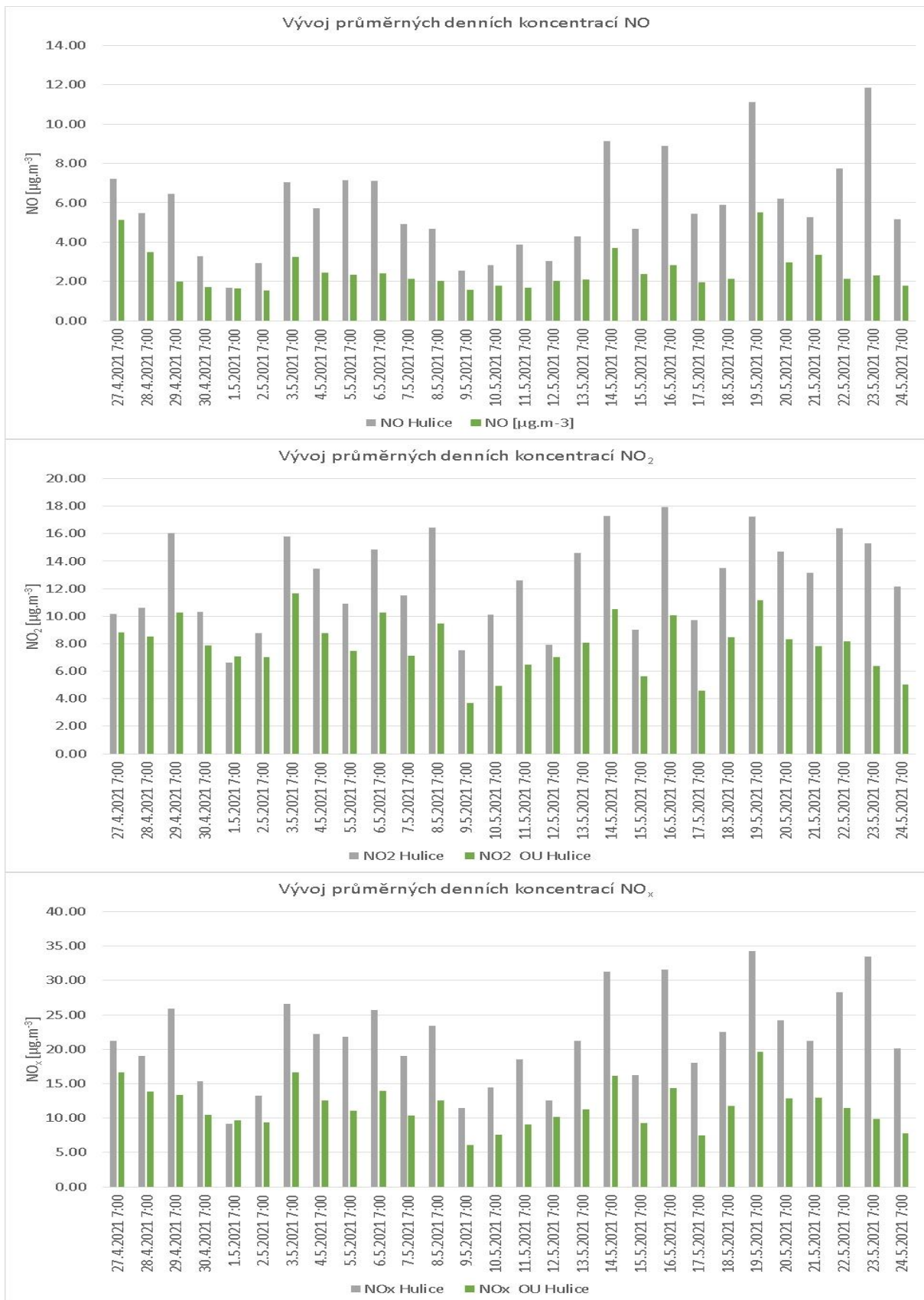
Začátek odběru	Konec odběru	Hulice NO	Hulice NO ₂	Hulice NO _x	OU Hulice NO	OU Hulice NO ₂	OU Hulice NO _x
Jednotka		μg·m ⁻³	μg·m ⁻³	μg·m ⁻³	μg·m ⁻³	μg·m ⁻³	μg·m ⁻³
27.4.2021 7:00	28.4.2021 7:00	7,21	10,18	21,24	5,11	8,83	16,67
28.4.2021 7:00	29.4.2021 7:00	5,47	10,63	19,01	3,48	8,50	13,83
29.4.2021 7:00	30.4.2021 7:00	6,44	16,02	25,89	1,98	10,28	13,32
30.4.2021 7:00	1.5.2021 7:00	3,29	10,29	15,34	1,70	7,89	10,49
1.5.2021 7:00	2.5.2021 7:00	1,67	6,63	9,19	1,64	7,09	9,61
2.5.2021 7:00	3.5.2021 7:00	2,93	8,77	13,26	1,55	7,01	9,39
3.5.2021 7:00	4.5.2021 7:00	7,04	15,77	26,57	3,25	11,64	16,62
4.5.2021 7:00	5.5.2021 7:00	5,72	13,44	22,21	2,45	8,78	12,54
5.5.2021 7:00	6.5.2021 7:00	7,13	10,92	21,85	2,34	7,49	11,08
6.5.2021 7:00	7.5.2021 7:00	7,11	14,82	25,72	2,39	10,24	13,90
7.5.2021 7:00	8.5.2021 7:00	4,91	11,53	19,05	2,11	7,11	10,37
8.5.2021 7:00	9.5.2021 7:00	4,66	16,44	23,41	2,01	9,47	12,54
9.5.2021 7:00	10.5.2021 7:00	2,56	7,52	11,45	1,56	3,67	6,05
10.5.2021 7:00	11.5.2021 7:00	2,81	10,13	14,44	1,76	4,93	7,60
11.5.2021 7:00	12.5.2021 7:00	3,88	12,58	18,53	1,68	6,49	9,07
12.5.2021 7:00	13.5.2021 7:00	3,04	7,91	12,58	2,02	7,03	10,12
13.5.2021 7:00	14.5.2021 7:00	4,29	14,61	21,18	2,08	8,07	11,26
14.5.2021 7:00	15.5.2021 7:00	9,13	17,30	31,30	3,71	10,50	16,18
15.5.2021 7:00	16.5.2021 7:00	4,69	9,00	16,19	2,36	5,63	9,25
16.5.2021 7:00	17.5.2021 7:00	8,90	17,95	31,59	2,81	10,04	14,35
17.5.2021 7:00	18.5.2021 7:00	5,43	9,70	18,02	1,94	4,56	7,44
18.5.2021 7:00	19.5.2021 7:00	5,89	13,47	22,50	2,11	8,48	11,71
19.5.2021 7:00	20.5.2021 7:00	11,13	17,24	34,30	5,49	11,18	19,60
20.5.2021 7:00	21.5.2021 7:00	6,20	14,70	24,20	2,98	8,32	12,88
21.5.2021 7:00	22.5.2021 7:00	5,25	13,16	21,21	3,36	7,81	12,96
22.5.2021 7:00	23.5.2021 7:00	7,74	16,37	28,25	2,13	8,17	11,44
23.5.2021 7:00	24.5.2021 7:00	11,86	15,28	33,46	2,31	6,36	9,90
24.5.2021 7:00	25.5.2021 7:00	5,17	12,15	20,08	1,77	5,05	7,75

Tab. 8: Statistické zpracování průměrných denních koncentrací NO, NO₂ a NO_x (μg·m⁻³) na lokalitách Hulice a OU Hulice

Lokalita	Škodlivina	Průměr	Směrodatná odchylka	Medián	Minimum	Maximum
Hulice	NO	5,77	2,48	5,45	1,67	11,86
Hulice	NO ₂	12,66	3,28	12,87	6,63	17,95
Hulice	NO _x	21,50	6,60	21,23	9,19	34,30
OU Hulice	NO	7,88	2,03	7,98	3,67	11,64
OU Hulice	NO ₂	11,71	3,16	11,35	6,05	19,60
OU Hulice	NO _x	17,57	6,71	15,88	8,91	32,47

Graficky je pak vývoj průměrných denních koncentrací NO, NO₂ a NO_x zobrazen na následujícím Obr. 43.

Již na první pohled je patrné, že na lokalitě Hulice byly vždy naměřeny vyšší koncentrace NO na lokalitě OU Hulice; koncentrace NO₂ a NO_x s výjimkou dne 1.5. také. Rozdíly jsou významné. Důvodem je nejpravděpodobněji větší blízkost lokality Hulice k dálnici D1. Hodnota imisního limitu pro průměrnou roční koncentraci NO₂ (40 μg·m⁻³) nebyla při zprůměrování celé doby měření v žádné lokalitě překročena.



Obr. 43: Vývoj průměrných denních koncentrací NO, NO₂ a NO_x na lokalitách Hulice a OU Hulice

4 Navrhovaná opatření

Během celého měření kvality ovzduší v obci Hulice nedošlo k překročení žádného legislativou definovaného imisního limitu u sledovaných znečišťujících látek. V této kapitole jsou nicméně popsána možná opatření, která mohou být v obci Hulice realizovaná za účelem dalšího zlepšení kvality ovzduší. Tato navrhovaná opatření jsou rozdělena dle pravomocí pro jejich realizaci, a to obcí Hulice a Ředitelstvím silnic a dálnic (ŘSD) jakožto vlastníka blízké dálnice D1.

Hlavním zdrojem oxidů dusíku je na území obce Hulice doprava, čemuž odpovídají i naměřené koncentrace této škodliviny jak na vnějším okraji obce přiléhajícím k dálnici D1, tak ale i v centru obce. Možná opatření ke snížení koncentrací této škodliviny tak spadají do gesce ŘSD jakožto vlastníka a správce dálnice D1.

Pevné částice pochází na území obce z více zdrojů, kterými jsou nejen doprava, ale i lokální topeniště a resuspenze orné půdy v blízkosti obce nechráněné větrnými bariérami. Z výsledků měření v obci vyplývá, že nejvyšší koncentrace PM byla naměřena v centru obce, a proto je možné předpokládat výhradně lokální zdroje této škodliviny nacházející se přímo v obci. Možná opatření ke snížení koncentrací této škodliviny je tak možné realizovat přímo obcí Hulice.

4.1 Opatření v rámci obce Hulice

4.1.1 Omezení prašnosti výsadbou zeleně

Výsadba vhodného druhového složení dřevin, obzvláště stromů, která vytvoří pás dřevin s protiprašnou funkcí, zejména v oblastech blízkosti silnic a polí, která tvoří ochrannou bariéru proti částicím. Vhodná je kombinace stromů s keři o různé výšce. Výška vegetační bariéry pro dosažení maximálního účinku bariéry by měla činit 10-11 m [12]. Vhodné dřeviny pro výsadbu jsou např. habr obecný (*Carpinus betulus*), dub letní (*Quercus robur*), buk lesní (*Fagus sylvatica*), javor mléč (*Acer platanoides*), jasan ztepilý (*Fraxinus excelsior*), borovice lesní (*Pinus sylvestris*), olše lepkavá (*Alnus glutinosa*), líska obecná (*Corylus avellana*), ptačí zob obecný (*Ligustrum vulgare*), bez černý (*Sambucus nigra*), trnka obecná (*Prunus spinosa*), jeřáb ptačí (*Sorbus aucuparia*). Zahraniční studie uvádějí, že vhodnou kombinací zeleně lze docílit snížení koncentrací pevných částic až o 23 % (viz. např. [13], [14], [15], [16], [17], [18]).

4.1.2 Úklid a údržba komunikací

Komunikace jsou významným zdrojem zejména resuspenze prachových částic PM, proto je zapotřebí tyto částice z povrchu komunikací soustavně odstraňovat, optimálně každé 2 týdny nebo alespoň 4-krát ročně. Nejvhodnější je kombinace samosběrných vozů s následným oplachem komunikace tlakovou vodou. Dalším zdrojem PM je inertní posyp v zimním období, kdy je nutné po zimě provést jednorázové vyčištění všech komunikací. V letním období může být zdrojem PM provoz zemědělských strojů, i zde je nezbytné po skončení zemědělských prací úklid komunikací

v obci. Realizované studie naznačují, že vakuové zametání v kombinaci s umytím vozovky (8x během měsíce) může přispět ke snížení koncentrací PM₁₀ o 7 – 10 % [19]. V případě zimní údržby je vhodné nahradit inertní posyp emulzemi zejména s příměsí na bázi MgCl₂ nebo CaCl₂, které umožní následné vázání PM₁₀ na povrch komunikací a omezují jejich zpětný vznos [20].

4.1.3 Výměna kotlů na tuhá paliva

Lokální topeniště jsou dalším významným zdrojem pevných částic PM. Hlavní příčinou jsou zastaralé a špatně fungující kotle na tuhá paliva, používaná pro vytápění a ohřev vody. Velkým problémem bývá špatný způsob užívání, čím obyvatelé topí nebo chybné nastavení kotle. Obec může poskytnout osvětovou kampaň obyvatelům s informacemi o výměně nevyhovujícího kotle na tuhá paliva a možnost případných dotací na nové nízkoemisní kotle [21]. Přínos opatření z hlediska kvality ovzduší dosud nelze přesně definovat, ale Český hydrometeorologický ústav zpracovává rozsáhlou studii [TITSMZP704] „Měření a analýza znečištění ovzduší s důrazem na vyhodnocení podílu jednotlivých skupin zdrojů“ s dobou řešení duben 2018 až prosinec 2021, ve které jsou realizována měření kvality ovzduší v několika menších obcích před výměnou kotlů a po jejich výměně. Na základě těchto měření pak budou kvantifikovány přínosy tohoto opatření v podmínkách malých sídel v ČR.

4.2 Opatření v rámci Ředitelství silnic a dálnic (ŘSD).

4.2.1 Protihluková stěna

Z výsledků měření vyplývá, že nejvyšší koncentrace NO₂ byla naměřena na vnějším okraji obce, která pravděpodobně pochází z dopravy na dálnice D1. Výstavbou protihlukové stěny dojde k omezení nejen emisí hluku, ale také může podpořit i snížení proudění emisí škodlivých látek kdy protihluková stěna slouží jako pevná překážka. Přehled účinnosti protihlukových stěn pro různé škodliviny uvádí Tab. 9.

Tab. 9: Střední a průměrná hodnota snížení koncentrací znečišťujících látek v blízkosti silnice pro znečišťující látky měřit za různých meteorologických a časových podmínek [22].

Škodlivina	Vzdálenost od stěny	Medián (%)	Průměr (%)
CO	0 - 50	50	46
	50 - 150	31	21
	150 - 300	9	18
NO ₂	0 - 50	37	37
	50 - 150	41	39
	150 - 300	33	28
PM	0 - 50	53	43
	50 - 150	63	49
	150 - 300	26	18
Ultra jemné částice	0 - 50	48	50
	50 - 150	34	44
	150 - 300	16	15

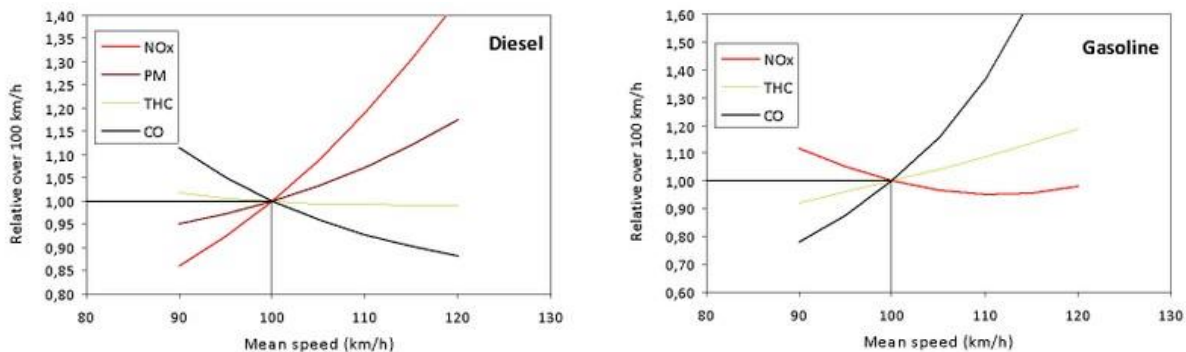
Vliv protihlukových stěn z pevných materiálů může mít vliv na redukci znečišťujících látek od 50 % ve vzdálenosti do 50 m do 30 % ve vzdálenosti 150 m [22]. Vliv má nejen vzdálenost od protihlukové stěny, ale také samotná výška stěny. Studie realizovaná Phoenixu a Idaho Falls porovnávala rozdíly ve výšce stěn od 4,5 m do 6 m se zjištěním, že s rostoucí výškou se nezvyšuje účinnost redukce [23].

Samozřejmě při uvádění těchto hodnot je potřeba brát v úvahu meteorologické podmínky, jako je převládající proudění větru či kolísání teplot. Přesto lze uvažovat při realizaci protihlukových stěn i s možností snížení koncentrací znečišťujících látek.

Efekt pevné překážky je možné ještě zvýšit nanesením různých aktivních látek, které efekt snížení koncentrací znečišťujících škodlivin mohou zvýšit jejich zachycením, či aktivní chemickou reakcí a následným smyvem. Tímto efektem se zabývaly některé zahraniční studie a byly publikovány vědecké články. Snížení rozptylu pevných částic může být rovněž podpořeno ozeleněním protihlukové stěny.

4.2.2 Snížení rychlosti na dálnici

Dalším navrhovaným opatřením pro snížení emisí, zejména oxidů dusíku, může být snížení maximální povolené rychlosti na dálnici na 110 km/hod v úseku dotčené obce Hulice. Smyslem tohoto opatření je především zajistit plynulost dopravy v předem definovaném rychlostním režimu. Z níže uvedeného grafu na Obr. 44 vyplývá závislost produkce emisí škodlivin diesellového motoru (vlevo) a benzínového motoru (vpravo) na rychlosti.



Obr. 44: Závislost produkce emisí škodlivin diesellového motoru (vlevo) a benzínového motoru (vpravo) na rychlosti. (Zdroj EMISIA - ETC/ACM)

5 Závěr

V dubnu až květnu 2021 bylo provedeno měření koncentrací vybraných škodlivých látek a meteorologických parametrů na dvou lokalitách v obci Hulice, na okraji obce přiléhající k nedaleké dálnici D1 u rodinného domu (označeno jako Hulice) a v centru obce u obecního úřadu (OU Hulice). Měření bylo za účelem ověření možného vlivu dopravního provozu na blízké dálnici D1 na kvalitu ovzduší v obci.

Z naměřených výsledků a analýz vyplynulo následující:

- Z hlediska koncentrací pevných částic PM_{10} nemá na kvalitu ovzduší doprava příliš významný vliv. Koncentrace PM_{10} v obou lokalitách byly prakticky stejné jak co do průměru, tak hodinového průběhu. K mírnému ovlivnění dochází pouze na okraji obce, který není nijak chráněn proti vzdušnému proudění od dálnice D1. Kromě dopravy zde zřejmě dochází k významnému ovlivnění jinými lokálními zdroji.
- Z hlediska koncentrací jemnější frakce suspendovaných částic $PM_{2,5}$ se projevil spíše vliv lokálních zdrojů než dopravy. Po celou dobu kampaně měřily byly koncentrace $PM_{2,5}$ na lokalitě OU Hulice vyšší než na lokalitě Hulice. Průměrné relativní zastoupení $PM_{2,5}$ v PM_{10} činilo na lokalitě Hulice 64 % a na lokalitě OU Hulice 91 %.
- Koncentrace oxidů dusíku (NO , NO_2 a NO_x) mají svůj primární zdroj v dopravě, proto i jejich koncentrace jsou dopravou více ovlivněny. V případě oxidů dusíku tak koncentrace významně ovlivňuje počet vozidel, a dále také zda je lokalita uzavřená (např. zástavbou) nebo otevřená. Na této lokalitě byly za celou měřicí kampaň naměřeny vyšší koncentrace NO_2 než na lokalitě OU Hulice. Vliv na vyšší koncentrace NO_2 na lokalitě Hulice má menší vzdálenost od dálnice.
- Významný podíl na zvýšených koncentracích škodlivin mají také meteorologické podmínky a horší provětrávanost lokalit z důvodu zástavby. Zvýšené hodnoty koncentrací se zpravidla vyskytují při nízkých rychlostech větru až bezvětří, nízkých teplotách a vyšší relativní vlhkosti vzduchu. Na lokalitě Hulice zřejmě hraje významnou roli mikroklima, které je větším provětráváním, protože jde o místo mimo zástavbu. Ale přes tuto skutečnost byly na této lokalitě naměřeny vyšší koncentrace oxidů dusíku než na lokalitě OU Hulice, která je uvnitř zástavby v obci. To potvrzuje, že tato lokalita je ve větší míře ovlivněna dopravou. Naopak pevné částice $PM_{2,5}$ z analogických důvodů lze přiřadit ve větší míře lokálním zdrojům.
- V obou lokalitách byl pozorován růst koncentrací směrem k večerním a nočním hodinám, což by mohlo naznačovat vliv lokálních topenišť. S tím korespondují i průměrné denní teploty za celou měřicí kampaň, které pouze ve třech případech přesáhly $14^\circ C$. V případě koncentrací oxidů dusíku je potřeba rozlišovat mezi NO a NO_2 . Koncentrace NO byly relativně vysoké pouze během ranní dopravní špičky, poté významně poklesly. Naopak v případě legislativou sledovaného NO_2 byly koncentrace vysoké během ranní špičky, vyšší hodnoty byly pozorovány během večerních hodin.

- Na žádné z lokalit nedošlo během celého měření k překročení žádného z legislativních limitů. Je však možné se domnívat, že k překročení limitů by mohlo dojít pouze za mimořádně nepříznivých rozptylových podmínek.
- Na základě zjištěných výsledků byla navržena opatření na úrovni obce i ŘSD, která mohou přispět ke zlepšení kvality ovzduší v obci Hulice. Opatření navrhovaná na úrovni obce (omezení prašnosti výsadbou liniové zeleně, úklid a údržba komunikací, výměna kotlů na tuhá paliva) budou mít vliv zejména na úroveň prašnosti, opatření navrhovaná na úrovni ŘSD (protihluková stěna, snížení rychlosti na dálnici) zejména na úroveň znečištění oxidem dusičitým.

6 Literatura

- [1] R Core Team, „R: A language and environment for statistical computing,“ R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria., 2018. [Online]. Available: <https://www.R-project.org/>.
- [2] H. Wickham a et al., „Welcome to the tidyverse,“ *Journal of Open Source Software*, sv. 4, č. 43, p. 1686, 2019.
- [3] D. Carslaw a K. Ropkins, „Openair - an R package for air quality data analysis,“ *Environmental*, Sv. %1 z %227-28, pp. 52 - 61, 2012.
- [4] H. Wickham a D. Kahle, „ggmap: Spatial Visualization with ggplot2,“ *The R Journal*, sv. 5, č. 1, pp. 144-161, 2013.
- [5] ČHMÚ, „Znečištění ovzduší na území České Republiky,“ 1996 - 2016. [Online]. Available: http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/grafroc/grafroc_CZ.html.
- [6] MŽP, *Zákon č. 201/2012 Sb. o ochraně ovzduší*, 2012.
- [7] MŽP, *Vyhláška č. 330/2012 Sb. o způsobu posuzování a vyhodnocení úrovně znečištění, rozsahu informování veřejnosti o úrovni znečištění a při smogových situacích*, Praha, 2012.
- [8] R. HENRY, G. A. NORRIS, R. VEDANTHAM a J. R. TURNER, „Source Region Identification Using Kernel Smoothing,“ *Environmental Science & Technology*, sv. 43, č. 11, p. 4090–4097, 5 May 2009.
- [9] ČHMÚ, „Znečištění ovzduší na území České republiky v roce 2018,“ 2019. [Online]. Available: http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/grafroc/18groc/gr18cz/IV.1.PM_CHMU2018.pdf. [Přístup získán 2019].
- [10] Bucek s.r.o., „Vyhodnocení kvality ovzduší v Jihomoravském kraji v letech 2010 – 2016,“ 2017. [Online]. Available: <https://www.kr-jihomoravsky.cz/Default.aspx?PubID=344133&TypeID=7>.
- [11] R. Skeřil, „Vyhodnocení kvality ovzduší v Jihomoravském kraji v roce 2017,“ 2017. [Online]. Available: <https://www.kr-jihomoravsky.cz/Default.aspx?ID=378742&TypeID=61>.
- [12] ATEM, *Metodika pro realizaci výsadeb dřevin pohlcujících prachové částice podél silničních komunikací i u tzv. plošných zdrojů prašnosti*, Praha: ATEM, 2016.
- [13] Y. Xing a P. Brimblecombe, „Urban park layout and exposure to traffic-derived air pollutants,“ *Landscape and Urban Planning*, p. 194, 1 February 2020.
- [14] Y. Xing a P. Brimblecombe, „Trees and parks as "the lungs of cities",“ *Urban Forestry & Urban Greening*, č. 48, p. 126552, 1 December 2019.
- [15] Y. Xing a P. Brimblecombe, „Role of vegetation in deposition and dispersion of air pollution in urban parks,“ *Atmospheric Environment*, sv. 201, pp. 73-83, 1 March 2019.
- [16] E. von Schneidemesser, K. Steinmar, E. Weatherhead, B. Bonn, H. Gerwig a J. Quedenau, „Air pollution at human scales in an urban environment: Impact of local environment and vehicles on particle number concentrations,“ *Science of the Total Environment*, sv. 688, pp. 691-700, 20 June 2019.

- [17] S. Kang, T. Kang, T. Park, G. Park, J. Lee, J.]. Hong, J. Hong, J. .. Lee a T. Lee, „Characterization of aerosol composition, concentration, and sources in Bukhansan National Park, Korea,“ *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, sv. 34, č. 3, pp. 457-468, 14 June 2018.
- [18] J. Mori, A. Fini, M. Galimberti, M. Ginepro, G. Burchi, D. Massa a F. Ferrini, „Air pollution deposition on a roadside vegetation barrier in a Mediterranean environment: Combined effect of evergreen shrub species and planting density,“ *Science of Total Environment*, sv. 643, pp. 725-737, 1 December 2018.
- [19] F. Amato, X. Querol, C. Johansson, C. Nagl a A. Alastuey, „A review on the effectiveness of street sweeping, washing and dust suppressants as urban PM control methods,“ *Science of the Total Environment*, sv. 408, p. 3070–3084, 21 May 2010.
- [20] M. Gustafsson, G. Blomqvist, J. Janhäll a M. G. Norman, Operational measures against PM10 pollution in Stockholm. Evaluation of Winter season 2013–2014., sv. 847, Stockholm: VTI, 2015.
- [21] „Státní fond životního prostředí ČR,“ 07 07 2021. [Online]. Available: <https://www.sfzp.cz/dotace-a-pujcky/kotlikove-dotace/>. [Přístup získán 2021].
- [22] R. W. Baldauf, V. Isakov, P. Deshmukh, A. Venkatram, B. Yang a K. M. Zhang, „Influence of solid noise barriers on near-road and on-road air quality,“ *Atmospheric Environment*, sv. 129, pp. 265-276, 14 January 2016.
- [23] D. Finn, K. Clawson, R. G. Carter, J. Rich, R. Eckman, S. Perry, V. Isakov a D. Heist, „Tracer studies to characterize the effects of roadside noise barriers on near-road pollutant dispersion under varying atmospheric stability conditions,“ *Atmospheric Environment*, sv. 44, p. 204 – 214, 17 October 2010.