

MĚŘENÉ DOPADY NÍZKOEMISNÍCH ZÓN NA ZMĚNU KVALITY OVZDUŠÍ V NĚMECKÝCH MĚSTECH. PONAUCENÍ PRO ČESKOU REPUBLIKU

MEASURED IMPACTS OF LOW EMISSION ZONES ON AIR QUALITY CHANGES IN GERMAN CITIES. A LESSON FOR THE CZECH REPUBLIC

MAREK TÖGEL, ROMAN ČAMPULA, LIBOR ŠPIČKA

Centrum dopravního výzkumu, v. v. i., Brno, Česká republika

SOUHRN

Od roku 2013 mohou města a obce v České republice zřizovat nízkoemisní zóny (NEZ), od kterých se očekává zlepšení kvality ovzduší ve městech. Přesto zatím nebyla v žádném českém městě zavedena ani jediná zóna. Kritici zavedení NEZ, s odkazem na některé odborné zahraniční studie, poukazují na zanedbatelné dopady tohoto opatření. Jaké jsou tedy závěry zahraničních studií? Tato přehledová práce analyzovala celkem 15 studií, které empiricky měřily dopady NEZ na koncentrace imisí PM_{10} , $PM_{10-2.5}$, $PM_{2.5}$ a oxidů dusíku v německých městech. Závěry metaanalýzy ukazují, že NEZ přispěly ke snížení průměrných ročních koncentrací PM_{10} o 3–9 % a počet dní s nadlimitní denní koncentrací PM_{10} pomohly snížit o 7–20 %. Několik pilotních studií ukázalo významné účinky NEZ při snižování jemných frakcí pevných částic ($PM_{2.5}$), nicméně tyto závěry zatím nelze považovat za jednoznačné. Naopak zcela zanedbatelný dopad NEZ se jasně prokázal v případech změn koncentrací oxidů dusíku (NO , NO_2 a NO_x). Závěry německých studií tak mimo jiné potvrzují výroky některých autorů o nefunkčnosti evropského rámce emisních standardů Euro ve vztahu k limitům NO_x .

Klíčová slova: ovzduší – znečištění, nízkoemisní zóny (NEZ), Spolková republika Německo

SUMMARY

Since 2013 municipalities in the Czech Republic are allowed to implement low emission zones (LEZs), which are supposed to improve air quality in urban areas. Nevertheless, no LEZs have been implemented in any Czech city yet. Many critics of the introduction NEZ, referring to some international scientific studies, point out the negligible impacts of this measure. What are the real outcomes of scientific papers then? This meta-analysis analysed 15 primary studies, which conducted empirical research of LEZs' impacts on imissions of PM_{10} , $PM_{10-2.5}$, $PM_{2.5}$, soot and nitrogen oxides. According to the results of the meta-analysis, LEZs contributed to the reduction of annual average concentrations of PM_{10} by 3–9% and the number of exceedance days of PM_{10} by 7–20%. Several pilot studies showed significant effects of LEZs on reductions of fine particles ($PM_{2.5}$). However, these outcomes can not be regarded as definite. On the contrary, a quite negligible impact of LEZs has been demonstrated in the case of changes in nitrogen oxides concentrations. Outcomes of German studies, besides other things confirm some authors' (1) statements on the non-functionality of the EU framework for Euro emission regulations regarding limits of nitrogen oxides.

Key words: air pollution, low-emission zones, Federal Republic of Germany

<https://doi.org/10.21101/hygiena.a1721>

Úvod

Předkládaná analýza se zabývá problematikou účinnosti tzv. nízkoemisních zón (NEZ), tedy geograficky vymezených oblastí, v nichž je regulován provoz vozidel splňujících určitá kritéria z hlediska produkce emisí nebo spotřeby (1). Nízkoemisní zóny lze v ČR zřizovat na základě zákona o ochraně ovzduší (23) a naříze-

ní vlády o emisních plakétách (3) od března roku 2013. Opatření bylo do legislativy začleněno v reakci na stále se zhoršující kvalitu ovzduší v EU, kde emise z automobilové dopravy způsobují závažné zdravotní dopady milionům obyvatel. Dle studie EEA (4) se odhaduje, že podíl populace evropských měst vystavené nadlimitním koncentracím PM_{10} činil v letech 2000 až 2016 mezi 13–42 %. V roce 2015 pak emise $PM_{2.5}$, NO_2 a O_3

produkované převážně automobilovou dopravou způsobily jen v zemích EU celkem 391 tis. předčasných úmrtí, z toho cca 11 tis. v České republice. V relativním srovnání tyto látky způsobily v ČR průměrně 104,8 předčasných úmrtí na 100 tis. obyvatel, což je nad průměrem celé EU-28 (95,5) i některých sousedních zemích jako Německo (96,6) nebo Rakousko (87,2).

Přístup českých měst a obcí k cílům snižování emisí z automobilové dopravy je prozatím spíše rezervovaný ve srovnání s Německem, Holandskem, Itálií, Dánskem či Rakouskem, kde už byly zavedeny NEZ řádově v desítkách měst. Přesto si již několik českých měst nechalo zpracovat studii proveditelnosti NEZ, která zjišťuje možnosti stanovení zóny a kvantifikuje dopady na kvalitu ovzduší v analyzovaném území. Některé z těchto studií prokázaly, že by stanovením NEZ došlo na jejich území k významnému snížení emisí PM_{10} a NO_2 (5, 6), v jiných by dopady jejich zavedení nebyly tak významné (7–9). I přes jednoznačné závěry těchto studií, které ve všech případech prokázaly pozitivní vliv NEZ na snížení emisí z automobilové dopravy a doporučily technický postup k jejich stanovení, nepřistoupilo zatím žádné české město k vyhlášení NEZ na svém území.

Tato studie se zabývá analýzou účinnosti NEZ zavedených v německých městech. Česká legislativa NEZ přímo vychází z německého systému (10), z čehož lze předpokládat, že závěry analýz z německého prostředí budou mít určitou vypovídací váhu i pro český kontext. Metodou meta-analýzy zkoumáme závěry 15 německých studií (primární studie), které zjišťovaly dopady zavedení NEZ na kvalitu ovzduší. Závěry těchto studií jsou následně diskutovány v kontextu působení externích faktorů, které mohly ovlivnit jejich výsledky.

Jeden z klíčových sporů ve veřejné diskuzi se týká skutečných dopadů NEZ. Zatímco zastánci argumentují příkladem zavedení NEZ ve stovkách západoevropských měst a doporučením EU (11), odpůrci argumentují studiemi (12), které pozitivní účinky NEZ neprokazují (13). Vzhledem k faktu, že v českém prostředí zatím nebyl publikován žádný odborný článek týkající se metodologie hodnocení dopadů NEZ, vysvětlujeme podstatu fungování NEZ, způsob přenosu dopadů na úroveň ovzduší a metodologii měření účinků NEZ detailněji.

Širší kontext a předpoklady fungování nízkoemisních zón

V rámci evropské politiky zlepšování kvality ovzduší přijal Evropský parlament v roce 2008 směrnici (14), kterou byly stanoveny limity znečišťujících látek v ovzduší. V oblasti silniční dopravy působí na nadnárodní úrovni evropská politika na výrobce automobilů prostřednictvím emisních standardů Euro, kterými reguluje maximální emisivitu nových vozidel uváděných do provozu. Přirozenou obměnou skladby vozového parku v členských zemích přibývá vozidel s nižší emisivitou, což vede k efektu zlepšování kvality ovzduší.

Na národní a regionální úrovni je iniciativa předána členským státům, regionům a obcím, jejichž aktivity by měly v případě překračování stanovených emisních limitů směřovat k přijímání opatření snižujících nežádoucí emise (14). Jedním z potenciálních opatření snižujících nežádoucí emise z automobilové dopravy jsou nízko-

emisní zóny, které k snižování napomáhají dvojím způsobem. Zaprvé zabraňují vjezdu do center měst vozidlům s vysokou emisivitou, čímž fyzicky vytlačí zdroje vysokého znečištění z centra měst, a zadruhé urychlují zmíněnou přirozenou obměnu vozového parku. Právě urychlování přirozené obměny vozového parku zesiluje účinek emisních standardů Euro, které jsou kladeny na výrobce automobilů. Těm jsou tak částečně kompenzovány investice do technologií snižujících nežádoucí emise a celý systém je směřován k vizi nízkoemisní či zcela bezemisní automobilové dopravy (15).

Podstata fungování NEZ je tak přímo spjata s třemi základními předpoklady. Prvním předpokladem je pokles emisivity u nových vozidel uváděných na trh EU. Druhým předpokladem je skutečné vymístění vozidel s nepovolenými emisemi, k čemuž by měl sloužit efektivní systém kontroly vjezdu do NEZ. Třetím předpokladem spočívá v reakci řidičů, resp. vlastníků vozidel na dané opatření. Právě reakce vlastníků vozidel je rozhodující pro fungování opatření. Majitelé vozidel mohou na zřízení NEZ reagovat obměnou vozidla za novější typ, který splňuje emisní parametry NEZ, nebo mohou pro cesty do NEZ využít jiný dopravní mód a vlastněné vozidlo využívat pouze pro cesty mimo NEZ a nebo mohou přemístit své každodenní destinace do území mimo NEZ. Důsledkem posledních dvou jmenovaných reakcí je změna intenzit dopravy a dopravních výkonů, které mohou růst nebo klesat. Konkrétní dopady pak závisí vždy na prostorové distribuci zdrojů a cílů cest dopravní poptávky v daném území.

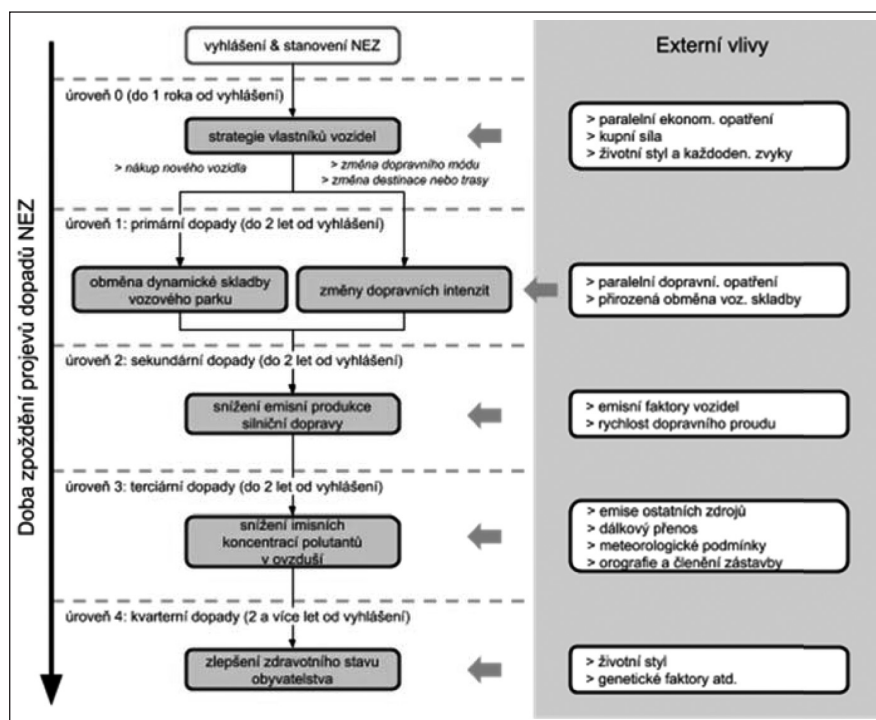
Dopady nízkoemisních zón na kvalitu ovzduší

Dopady nízkoemisních zón na zlepšení kvality ovzduší resp. snížení zdravotních rizik lze považovat za cílové změny, kterých se navrhovatel NEZ snaží dosáhnout. Dosažení změn v těchto oblastech však neprobíhá přímo, ale prostřednictvím řady změn v jiných oblastech jako je složení vozového parku, dopravní intenzity nebo emisivita vozidel. Dopady NEZ jsou navíc do značné míry zkreslovány celou řadou externích ovlivňujících faktorů. Zachycení celého systému zamýšlených dopadů a externích faktorů prezentuje obr. 1.

Dopady NEZ lze členit celkem do 5 úrovní dle doby zpoždění projevů jejich dopadů. Po vyhlášení a stanovení NEZ začnou obyvatelé zájmového území a ti, kteří mají každodenní prostorové vazby s územím NEZ, reagovat na opatření prostřednictvím již výše zmíněných strategií: obměna vozidla, změna dopravního módu či relokace destinací a tras vedoucích do NEZ (úroveň 0). Potenciální zastoupení těchto strategií u české populace není zatím z empirických průzkumů známo. V již vypracovaných českých studiích proveditelnosti jsou tyto reakce stanoveny arbitrárně na základě odborného odhadu (podrobněji např. 6, 16).

Reakce obyvatel vede ke změnám ve skladbě vozového parku a u dopravních intenzit v NEZ a jejích okolí (úroveň 1). Tyto dopady jsou však ovlivněny řadou dalších vlivů jako jsou paralelně aplikované investice a opatření v oblasti dopravní a environmentální politiky, změny životního stylu nebo změny v kupní síle obyvatelstva.

Změna dopravních intenzit a obměna vozového parku vedou ke změnám v emisní produkci vozového par-



Obr. 1. Úrovně dopadů NEZ a ovlivňující externí faktory (upraveno podle 21).

ku (úroveň 2). Každý z těchto dopadů však na celkovou produkci emisí automobilové dopravy působí jinak. Zatímco snížení dopravních intenzit působí pokles emisí produkce všech druhů emisí (včetně abrazie brzd a pneumatik a resuspenze prachu z povrchu vozovek), obměna vozového parku způsobuje pouze pokles emisí z výfukových plynů. Podle predikcí dopadů NEZ v Berlíně mohl její efekt omezit max. 22 % celkových imisí $PM_{2,5}$ na dopravních stanicích, což představuje cca 15 % imisí PM_{10} (17). Klíčovými externími vlivy na této úrovni dopadů jsou hodnoty tzv. emisních faktorů, tedy emisní produkce vozidla na jednotku ujeté vzdálenosti, a rychlost dopravního proudu. Hodnotu emisních faktorů stanovují výrobci vozidel a musí být v souladu s pravidly plnění emisních norem Euro. Problémem však může být skutečnost, že emisní produkce zvláště u nových vozidel (Euro 5 a Euro 6) může v běžném provozu výrazně překračovat tyto emisní standardy (18, 19). Dalšími vlivy s dopady na výslednou emisní produkci po zavedení NEZ mohou být změny rychlosti dopravního proudu vlivem nadměrné zátěže komunikací, nehod nebo uzavírek, nicméně někteří autoři poukazují na zanedbatelný dopad těchto vlivů (20).

Nižší emisní produkce z automobilové dopravy v důsledku zavedení NEZ vede ke snižování příspěvku dopravy k imisním koncentracím polutantů v ovzduší (úroveň 3). Velikost změn celkových imisních koncentrací nicméně závisí i na emisní produkci ostatních zdrojů (stacionárních, plošných a jiných druhů dopravy), dálkovém přenosu a meteorologických vlivech, které působí skrze vertikální členění zástavby a orografické podmínky dané lokality.

Snížením imisních koncentrací polutantů v ovzduší by mělo dojít i k předpokládanému snížení zdravotních rizik a zlepšení zdraví obyvatelstva (úroveň 4). Podle WHO (23) patří mezi zdravotně nejrizikovější polutanty, které produkuje silniční doprava přímo nebo zprostředkovaně chemickými reakcemi v atmosféře, hrubé pevné částice (PM_{10}), jemné pevné částice ($PM_{2,5}$), oxid

dusičitý (NO_2), benzen a přízemní ozón (O_3). V Evropě jsou oxidy dusíku (NO_x) produkovány z 39 % silniční dopravou, v případě PM_{10} je to z 10 % a $PM_{2,5}$ z 11 % (23). Oxidy dusíku navíc dále přispívají k formování polévatého prachu (22). Široká základna epidemiologických a toxikologických studií potvrdila, že dlouhodobá i krátkodobá expozice PM zvyšuje riziko celé řady onemocnění, zvláště pak kardiopulmonálních (24). Dlouhodobá expozice NO_2 způsobuje kardiiovaskulární a respirační onemocnění a je stejně závažná jako expozice $PM_{2,5}$ (25). Podle posledních údajů EEA (4) způsobují koncentrace $PM_{2,5}$, NO_2 a O_3 v zemích EU cca 391 tis., 79 tis., resp. 18 tis. předčasných úmrtí.

Metodologické aspekty měření účinku NEZ v Německu

V této studii jsme provedli metaanalýzu 15 empirických studií (primární studie), které vyhodnocovaly dopady NEZ na imisní koncentrace v ovzduší zpětně po jejich zavedení (ex post hodnocení). Tyto studie k měření používají standardní metody měření polutantů v ovzduší na dopravních stanicích imisního monitoringu (14, 26). Na rozdíl od zpracovaných studií proveditelnosti (ex ante hodnocení), nemají tyto studie prediktivní charakter, ale slouží pro empirické ověření účinku intervence, v tomto případě tedy NEZ.

Problematickým aspektem měření účinku NEZ je kontrola ovlivňujících vnějších faktorů. Z rešerše primárních studií vyplynulo, že řada studií měří velikost účinku prostou analýzou trendu a následnou deskriptivní analýzou, aniž by vnější faktory kontrolovaly. Některé studie však používají difference-in-difference přístup (DID), kde je měřený účinek rozdílem diferencí experimentální (indexové měřicí stanice) a kontrolní (referenční měřicí stanice) skupiny pozorování (podrobněji 27). Tato technika předchází eliminaci vnějších faktorů tím, že charakteristiky obou skupin jsou velmi podob-

né a jediná odlišnost spočívá v měřené intervenci (zavedení NEZ). Vzhledem k prostorovému charakteru intervence však jednotlivé studie používají odlišně strukturovaná data.

Studie lze rozdělit do 3 skupin podle použité struktury dat. Zaprvé jsou to studie, ve kterých experimentální skupinu tvoří stanice ve městech se zavedenou NEZ a kontrolní skupinu stanice ve městech bez zavedené NEZ. Zadruhé jsou to studie, u kterých experimentální skupinu tvoří stanice uvnitř vymezené NEZ a kontrolní skupinu stanice mimo NEZ. Obě skupiny stanic jsou ovšem v rámci stejného města, kde byla NEZ zavedena. Zatřetí jsou to studie, ve kterých experimentální skupinu tvoří dvojice měření na indexové stanici uvnitř NEZ a kontrolní skupinu dvojice měření na příslušné referenční stanici mimo NEZ. Obě dvojice měření jsou spárovány a analyzovány jako jeden celek – tedy čtveřice měření (quadruplets). I v tomto případě se obě stanice nachází v rámci stejného města, kde byla zavedena NEZ (podrobněji k metodě 28, 29).

Každá studie využívající DID přístup následně volí metodu pro samotnou kvantifikaci účinku NEZ. V případě některých studií je to již zmíněná deskriptivní analýza (DA), která ovšem neeliminuje riziko vlivu vnějších faktorů. Některé studie využívají statistickou analýzu případně v kombinaci s analýzou časových řad, kde je kontrolován vliv trendu v datech (30). Nejvíce sofistikovaným přístupem je regresní analýza (RA), kde je měřený účinek závislou proměnnou a soubor nezávislých proměnných tvoří vnější faktory a samotná intervence. Set nezávislých proměnných se mezi jednotlivými studiemi liší, nicméně společným jmenovatelem jsou proměnné o dlouhodobých i periodických změnách dopravních intenzit, emisích ostatních zdrojů měřených na pozadových stanicích a meteorologických podmínkách (teplota, síla větru, srážky apod.). Zcela odlišný přístup k měření účinku NEZ pak představuje využití metody positive matrix factorization (PMF), kterou jsou ve vzorcích poléťavého prachu identifikovány zdroje těchto emisí a následně analyzovány rozdíly spojené s účinkem zkou-

mané intervence (31). Dle výše uvedených hledisek lze rozdělit primární studie do celkem 5 různých skupin dle použité metodologie měření účinku NEZ (tab. 1).

Výsledný soubor primárních studií je z hlediska metodologie velmi různorodý, téměř unikátní. V současné době neexistuje jednotný přístup měření účinku NEZ a metodologický přístup mnohdy reflektuje specifika vědního oboru autorského týmu.

Metodologie metaanalýzy

Pro dosažení cílů této kvantitativní přehledové studie byl zvolen výzkumný design prostřednictvím metaanalýzy empirických studií (primární studie) hodnotících dopady implementace NEZ na kvalitu ovzduší. Empirické studie byly do metaanalýzy zvoleny na základě následujících dvou kritérií:

1. studie analyzovaly účinek NEZ pouze v německých městech,
2. studie splňovaly definici ex post hodnocení měřící účinku NEZ prostřednictvím analýzy dat ze stanic imisního monitoringu ovzduší.

První kritérium reflektuje již zmíněný společný geograficko-politický kontext problematiky NEZ v Německu a České republice. V odborné literatuře existuje celá řada ex post hodnocení účinků NEZ i v jiných evropských zemích (Nizozemsko, Dánsko, Švédsko), kde však NEZ fungují v odlišných legislativních kontextech.

Druhé kritérium směřuje k vyloučení studií, jejichž výsledky mají prediktivní (ex ante), nikoliv empirický charakter. Navíc analýza dopadů probíhá na pozorovaných změnách v ovzduší, tedy na úrovni, kde jsou účinky NEZ především žádané. Zavedení druhého kritéria odlišuje tuto metaanalýzu od studií obdobného typu v Německu (32, 33), kde autoři kombinují závěry obou typů hodnocení.

Dopady na kvalitu ovzduší jsou v primárních studiích hodnoceny prostřednictvím analýzy dopadů na imisní koncentrace pevných prachových částic (PM), sazí a oxidů dusíku (NO_x).

Tab. 1. Přehled metodologických přístupů a technik měření účinků NEZ v analyzovaném souboru primárních studií

Primární studie	Technika analýzy a struktura dat	Kvantifikace účinku intervence
Lutz a kol. (37), Cyrys a kol. (39), Rauterberg-Wulff a kol. (38), Rasch a kol. (42), Löschau a kol. (43)	analýza trendu na panelových datech měřících stanic (TA-S)	deskriptivní analýza (DA)
Laberer a kol. (12)	difference-in-difference analýza na panelových datech měst (DID-M)	deskriptivní analýza (DA)
Wolff (20), Malina a kol. (35), Gehrsitz (36)	difference-in-difference analýza na panelových datech měst (DID-M)	regresní analýza (RA)
Jiang a kol. (30)	difference-in-difference analýza na panelových datech měřících stanic (DID-S)	analýza časové řady (TS) a statistická analýza (SA)
Fensterer a kol. (41)	difference-in-difference analýza na panelových datech měřících stanic (DID-S)	regresní analýza (RA)
Morfeld a kol. (40), Morfeld a kol. (34), Morfeld a kol. (29)	difference-in-difference analýza na panelových datech čtveřic měření (quadruplets) (DID-Q)	regresní analýza (RA)
Qadir a kol. (31)	analýza časové řady měření stanice pomocí metody positive matrix factorization (PMF)	statistická analýza (SA)

- Konkrétně se jednalo o následující ukazatele:
- průměrné roční koncentrace PM_{10}
 - počet dní s překročením maximálních (limitních) denních koncentrací PM_{10}
 - průměrné roční koncentrace $PM_{2,5}$, popř. dalších frakcí ultra jemných pevných částic
 - koncentrace elementárního uhlíku (EC) se specifickou dobou průměrování
 - imisní koncentrace černého uhlíku (BC) se specifickou dobou průměrování
 - průměrné roční koncentrace NO
 - průměrné roční koncentrace NO_2
 - průměrné roční koncentrace NO_x

Vysoká diverzita metodologických přístupů značně komplikuje samotnou metaanalýzu. Zvláště u studií, které žádným způsobem nekontrolují vliv vnějších faktorů (TA-S, DA), byl v rámci metaanalýzy aplikován přepočtení výsledků dle DID přístupu, pokud to data v primárních studiích umožnila. U vybraných studií probíhala dodatečná aplikace DID přístupu tak, že z klasifikace jednotlivých měřicích stanic byly stanoveny indexové a referenční dopravní stanice. Indexové stanice se nachází uvnitř NEZ a referenční mimo NEZ v rámci stejného města. Naměřené hodnoty z období před a po zřízení NEZ byly odečteny a rozdíl těchto diferencí mezi dopravní stanicí v NEZ a mimo NEZ je pak považován za skutečný efekt NEZ (DID-S). Stejný postup aplikovali i jiní autoři (30), kteří však výsledky korigovali ještě o eliminaci trendu změn imisních koncentrací. Tento další postup však u korigovaných studií nebylo možné aplikovat z důvodu krátké doby měření. Jedinou výjimku vůči uvedenému postupu tvoří již zmíněná studie Qadir a kol. (31), kde vnější faktory měření mají zcela jinou podstatu a korekci vůči vnějším faktorům nebylo třeba provádět.

Vedle kvantitativních ukazatelů účinku NEZ byly do srovnávací metaanalýzy zahrnuty i kódované charakteristiky jednotlivých primárních studií, které slouží k analýze odlišností a hodnocení věrohodnosti primárních studií. Ke srovnání slouží tyto charakteristiky:

- geografická poloha a počet hodnocených NEZ
- rok implementace a stupeň restrikce NEZ (stupeň 1 = povolení vjezdu pro vozidla emisní kategorie 2 a vyšší; stupeň 2 = povolení vjezdu pro vozidla emisní kategorie 3 a vyšší; stupeň 3 = povolení vjezdu pro vozidla emisní kategorie 4 a vyšší)
- rozsah měření a časový rámec
- metodologický přístup k měření účinku (viz tab. 1)

Kvantitativní ukazatele účinku jsou v tab. 2–4 prezentovány v původních hodnotách (publikovaných v rámci primárních studií) a v harmonizovaných relativizovaných vzájemně srovnatelných hodnotách.

Výsledky metaanalýzy

Původní a harmonizované výsledky primárních studií v oblasti dopadů na průměrné roční a maximální denní koncentrace PM_{10} jsou prezentovány v tab. 2 (celkem 13). V případě ročních průměrů PM_{10} lze mezi studiemi analyzujícími dopady za jednotlivá města a soubory měst nalézt rozdíly ve variabilitě výsledků. Zatímco výsledky studií zpracovaných za soubory měst (12, 20, 30, 34–36) varíují od –3,6 do –8,6 %, v případě jednotlivých měst

(38–44) je to od –13 do +15 %. Nutno dodat, že negativní dopad (tedy nárůst koncentrací) nebo nulový dopad NEZ se prokázal pouze v případě 4 studií zpracovávaných pro jednotlivá města (12, 37, 40, 42). Výsledky studií (36, 38, 42, 43), které analyzovaly vliv zavedení vyššího stupně NEZ (2 nebo 3), ukázaly až na jeden případ vyšší účinek než při zavedení NEZ ve stupni 1.

Výrazně silnější efekt zavedení NEZ se ukazuje ze studií, které analyzovaly dopady zavedení NEZ na změnu počtu dní s překročením maximálních denních koncentrací PM_{10} (celkem 4). Podle výsledků studií analyzujících tento ukazatel v Berlíně (37, 38) a studií za soubory měst (30, 36) účinek NEZ varíuje od –7,3 do –19,5 %. Z výsledků jednoznačně nevyplyvá, že by zavedení vyššího stupně NEZ mělo v případě tohoto ukazatele vyšší účinek.

Kvantifikované dopady zavedení NEZ na koncentrace jemných frakcí PM ($PM_{1,0}$, $PM_{nm50-100}$ a $PM_{nm30-200}$) a celkového (TC), elementárního (EC) a černého uhlíku (BC) jsou prezentovány v tab. 3. Publikované primární studie v této oblasti (celkem 5) vyhodnocovaly dopady NEZ pouze pro jednotlivá města. V případě jemných frakcí PM se měřené účinky zavedení NEZ pohybují od –15 do –61 %. Nutno dodat, že se však jedná o původní výsledky primárních studií, jelikož tyto studie neumožňovaly korekci hodnot skrze DID přístup, tak jako v případě koncentrací PM_{10} . Naopak v případě koncentrací uhlíku již hodnoty harmonizované jsou a i tak výsledky indikují výrazný pokles koncentrací po zavedení NEZ. V Berlíně činil pokles TC vlivem zavedení NEZ (stupeň 1 a 2) –9,3 %, resp. –14,8 %. V případě EC činil pokles vlivem zavedení NEZ –11,6 % (Lipsko), resp. –40 až –60 % (Mnichov). V Lipsku varioval měřený pokles koncentrací BC po zavedení NEZ od –21,3 do –25,8 %.

Dopady zavedení NEZ na koncentrace oxidů dusíku (NO , NO_2 a NO_x) v kvantifikovaných harmonizovaných i původních hodnotách jsou prezentovány v tab. 4. Z publikovaných primárních studií (celkem 6) se celkem tři zabývaly dopady na úrovni jednotlivých měst (Berlín, Lipsko) a další 3 analyzovaly dopady na úrovni celých souborů měst. V případě NO změny varíují od –3,2 do +1,9 %, u NO_2 od –3,9 do +5,1 % a u NO_x od –2,4 do +4,8 %. Z výsledků primárních studií tedy nelze prokázat ani negativní, ani pozitivní dopad zavedení NEZ na koncentrace oxidů dusíku.

Diskuse

Metodologické vlivy

Existující diskrepance výsledků primárních studií jsou dány především odlišným rozsahem měření a použitou metodologií. Například výsledky studií za jednotlivá města jsou více variabilní než v případě studií za celé soubory německých měst. Míra účinku NEZ se může dále lišit podle kvality ovzduší ve městě před zavedením zóny. Wolff (20) prokázal, že účinek NEZ byl v silně znečištěných městech vyšší v průměru o 3,5 procentního bodu. Dále rozdíly mezi závěry studií týkající se mnichovské NEZ (39–41) vyplývají z metodických aspektů týkajících se odhadu parametrů regresního modelu (podrobněji 33, 41). Jádrem diskrepance mezi závěry souborových studií německých měst (34, 35) byla odlišná metodika zpracování dat z měřicích stanic UBA

Tab. 2. Původní a harmonizované výsledky primárních studií zjišťujících dopady implementace NEZ na průměrné roční koncentrace PM_{10} a na počet překročení maximálního denního limitu PM_{10}

Primární studie	Posuzovaná města s NEZ, rok zřízení a stupeň restrikce	Rozsah měření (dopravní stanice) a časový rámec	Metodologický přístup po korekci (korekce = *)	Relativní/absolutní změna prům. roč. koncentrací PM_{10} uvnitř NEZ – výsledky studií	Relativní změna prům. roč. koncentrací PM_{10} uvnitř NEZ – harmonizované hodnoty	Relativní/absolutní změna počtu překročení max. denních koncentrací PM_{10} – výsledky studií	Relativní změna počtu překročení max. denních koncentrací PM_{10} – harmonizované hodnoty
Lutz a kol. (37)	Berlin (1/2008, stupeň 1)	5 stanic, 1/2006–12/2008	DID-S, DA*	-3 %	-0,9 %	-14,3 %	-7,3 %
Rauterberg-Wulff a kol. (38)	Berlin (1/2010, stupeň 3)	5 stanic, 1/2006–12/2010	DID-S, DA*	-7 %	-3,1 %	-6 až -10 dní	-19,5 %
Cyrys a kol. (39)	Mnichov (10/2008, stupeň 1) ¹	5 stanic, 10/2007–1/2009	DID-S, DA*	-5,4 % až -12,3 %	-5,0 %	-	-
Morfeld a kol. (40)	Mnichov (10/2008, stupeň 1) ¹	5 stanic, 10/2007–1/2009	DID-Q, RA	-0,7 %	-0,7 %	-	-
Fensterer a kol. (41)	Mnichov (10/2008, stupeň 1) ¹	3 stanice, 1/2006–9/2010	DID-S, RA	-4,5 % až -13 %	-4,5 % až -13 %	-	-
Rasch a kol. (42)	Lipsko (3/2011, stupeň 3)	3 stanice, 7/2009–10/2012	DID-S, DA*	+31 % až +25 %	+15,0 %*	-	-
Löschau a kol. (43)	Lipsko (3/2011, stupeň 3)	4 stanice, 1/2010–12/2015	DID-S, DA*	-1,3 % až -5,3 %	-3,1 %	-	-
Laberer a kol. (12)	Berlin, Mannheim, Stuttgart (2008, vše stupeň 1)	22 stanic, 1/2007–12/2008	DID-M, DA	+0,08 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ -1,86 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ -0,83 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	+0,2 %, -6,5 %, -2,4 %	-	-
Morfeld a kol. (34)	19 měst, vše stupeň 1	43 stanic, 1/2005–12/2009	DID-Q, RA	-0,72 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	-3,6 %	-	-
Wolff (20)	Mannheim, Kolín, Reutlingen, Leonberg (2008, vše stupeň 1)	185 stanic ² , 1/2005–10/2008	DID-M, RA	-8,6 %	-8,6 %	-	-
Malina a kol. (35)	25 měst (2008–2009, vše stupeň 1) ³	74 stanic, 1/2000–12/2009	DID-M, RA	-2,33 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	-7,8 % ⁴	-	-
Gehrsitz (36)	82 měst (2008–2012), stupeň 1 a stupeň 2, 3)	1/2005–12/2012 ⁵	DID-M, RA	stup. 1 = -1,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ stup. 2, 3 = -1,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	stup. 1 = -3,7 % stup. 2, 3 = -4,7 %	stup. 1 = -7 dní stup. 2 = -6 dní	stup. 1 = -15,8 % stup. 2, 3 = -15 %
Jiang a kol. (30)	19 měst (2008, vše stupeň 1)	147 stanic, 1/2002–12/2012	DID-S, TS+SA	-1,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	-5,2 %	-9 dní	-18,3 %

¹Od února 2008 je v centru Mnichova zavedena tranziční doprava nákladních vozidel nad 3,5 t a NEZ byla zavedena v říjnu 2008. Hodnotiči primární studie proto analyzovali dopadu obou těchto opatření. ²Údaj reprezentuje celkový počet stanic, nikoliv počet dopravních stanic, tak jako u ostatních případů. ³Informace autorů je chybna. U studie Malina a kol. (35), že se jednalo pouze o 23 německých měst, jelikož ve 2 z uvedených měst byly NEZ zavedeny až po ukončení období měření dopadu. Dále autoři ve své studii uvádějí i dopady zavedení NEZ ve stupni 2, nicméně tyto výsledky nebyly zahrnuty do metaanalýzy vzhledem k použití metodologie. Účinek tohoto stupně NEZ je také ve studii odhadnut regresním modelem na základě pouze 1 případu, a to města Hanover (zřízené 1/2009). ⁴Jelikož autoři ve své studii neuvádějí popisné statistiky, ze kterých lze přibližně stanovit relativní změny, byla pro výpočet relativních hodnot použita data ze souboru měst ze studie Jiang a kol. (30). ⁵Autoři převýšili počet stanic ve studii neuvádějí.

Tab. 3. Harmonizované výsledky a původní hodnoty primárních studií (v závorce) zjišťujících dopady implementace NEZ na průměrné roční koncentrace jemných frakcí pevných částic, TC, EC a BC

Primární studie	Posuzovaná města s NEZ, rok zřízení a stupeň restrikce	Rozsah měření (dopravní stanice) a časový rámec	Metodologický přístup po korekci (korekce = *)	Relativní změna prům. roč. koncentrací jemných frakcí PM (vše původní hodnoty)	Relativní změna prům. roč. koncentrací TC (původní hodnoty v závorce)	Relativní změna prům. roč. koncentrací EC (původní hodnoty v závorce)	Relativní změna prům. roč. koncentrací BC (původní hodnoty v závorce)
Lutz a kol. (37)	Berlín (1/2008, stupeň 1)	22 stanic, 1/2005–12/2008	DID-S, DA*	PM ₁₀ -16 %	-9,3 % (-14 až -16 %)	-	-
Rautenberg-Wulff, a kol. (38)	Berlín (1/2010, stupeň 3)	22 stanic, 1/2005–12/2010	DID-S, DA*	-	-14,8 % (-52 %)	-	-
Qadir a kol. (31)	Mnichov (10/2008, stupeň 1) ¹	1 stanice, 10/2006–2/2010	PMF, SA	-	-	-40 až 60 % ²	-
Rasch a kol. (42)	Lipsko (3/2011, stupeň 3)	2 stanice, 7/2009–10/2012	DID-S, DA*	PM _{nm50-100} -15 až -20 %	-	-	-21,3 % (-27 až -36 %)
Löschau a kol. (43)	Lipsko (3/2011, stupeň 3)	2 stanice, 1/2010–12/2015	DID-S, DA*	PM _{nm30-200} -61 %	-	-11,6 % (-36 %)	-25,8 % (-48 %)

¹Od února 2008 je v centru Mnichova zavedena tranzitní doprava nákladních vozidel nad 3,5 t a NEZ byla zavedena v říjnu 2008. Hodnotící primární studie proto analyzovaly dopady obou těchto opatření.²Relativní hodnota účinku NEZ reprezentuje změnu emisí v rámci traffic factoru, tedy emisí EC, u nichž byl metodou PMF identifikován zdroj automobilová doprava, resp. emise spalovacích motorů. Podíl tzv. traffic factoru na celkovém množství měřených emisí EC není autory uveden.Tab. 4. Harmonizované výsledky a původní hodnoty primárních studií (v závorce) zjišťujících dopady implementace NEZ na průměrné roční koncentrace NO, NO₂ a NO_x

Primární studie	Posuzovaná města s NEZ, rok zřízení a stupeň restrikce	Rozsah měření (dopravní stanice) a časový rámec	Metodologický přístup po korekci (korekce = *)	Relativní změna prům. roč. koncentrací NO (vše harmonizované hodnoty)	Relativní změna prům. roč. koncentrací NO ₂ (původní hodnoty v závorce)	Relativní změna prům. roč. koncentrací NO _x (původní hodnoty v závorce)
Lutz a kol. (37)	Berlín (1/2008, stupeň 1)	5 stanic, 1/2005–12/2008	DID-S, DA*	-	+3,9 % (-7 až -10 %)	-
Rautenberg-Wulff a kol. (38)	Berlín (1/2010, stupeň 3)	5 stanic, 1/2005–12/2010	DID-S, DA*	-	+0,6 % (-5 %)	-
Löschau a kol. (43)	Lipsko (3/2011, stupeň 3)	2 stanice, 1/2010–12/2015	DID-S, DA*	-	-2,7 % (-10 %)	+4,5 % (+5 %)
Morfeld a kol. (29)	17 měst, (2008-2009, vše stupeň 1)	53 stanic, 1/2005–12/2009	DID-Q, RA	-3,2 až +1,9 %	-3,9 až -1,9 %	-2,4 až +4,8 %
Gehrsitz (36)	82 měst (2008-2012, stupeň 1 a stupeň 2 a 3)	1/2005–12/2012 ¹	DID-M, RA		stup. 1 = -0,8 % stup. 2,3 = -3,2 %	
Jiang a kol. (30)	19 měst (2008, vše stupeň 1)	154 stanic; 1/2002–12/2012	DID-S, TS+SA	-0,8 %	+5,1 %	+1,7 %

¹Autor přesný počet stanic ve studiích nemá.

a specifikace regresního modelu (podrobněji 44, 45). Právě zahrnutí proměnných jako intenzita dopravního proudu či skladba vozového parku mezi vysvětlující proměnné regresního modelu vnímá Morfeld a kol. (29) jako problematické, jelikož tyto proměnné nejsou nezávislé na implementaci NEZ.

Podstata fungování NEZ předpokládá, že potenciální účinek NEZ v průběhu času klesá, jelikož podíl omezených aut se přirozenou obměnou vozového parku snižuje. Tento princip empiricky potvrzuje (36) na příkladu průměrných ročních koncentrací PM_{10} , který u měst, jež zavedla NEZ nejdříve, zjistil míru účinku v průměru o 0,5 p. b. vyšší než u měst, kde byly NEZ zřízeny později. Stejná studie indikuje i potenciálně vyšší účinek zavedení NEZ vyššího stupně omezení (2 a 3), který byl oproti stupni 1 vyšší o 2 p. b.

Výsledky studií však mohou být ovlivněny i řadou dalších vlivů, které přímo i nepřímo působí na změny dopravních intenzit a skladby vozového parku. Klasickým příkladem je výrazné zlepšení v kvalitě ovzduší naměřené po zavedení NEZ v Mnichově (31, 41), které se výrazně liší od dopadů v jiných německých městech. Zřízení NEZ nicméně předcházelo v několikaměsíčním předstihu zavedení zákazu průjezdu vozidel nad 3,5 t na vnitřním obchvatu města. I sami autoři hodnotící studie přiznávají, že primární studie tak neměřila samotný účinek NEZ izolovaně, ale v kombinaci dopravním omezením pro nákladní vozidla (41). Dalším vlivem, který mohl napomoci implementaci NEZ a zesílit efekt tohoto opatření, byl program tzv. šrotovného zavedený německou vládou po celý rok 2009 (32).

Vliv NEZ na koncentrace pevných částic (PM)

Výsledky primárních studií hodnotících dopady NEZ na průměrné roční koncentrace PM_{10} prokázaly, že vlivem zavedení NEZ došlo ke snížení o 3 až 9 %. Toto snížení, mnohdy kritizované pro malý účinek, je nicméně v souladu s původními proklamacemi a očekáváními UBA (32). Relativně malé snížení PM_{10} vlivem NEZ je Rauterberg-Wulff a kol. (38) vysvětlováno poklesem koncentrací především u jemných frakcí PM produkovaných převážně ve spalovacích motorech. Z podrobné prostorové analýzy dopadů NEZ (36) vyplývá, že ke snižování imisních koncentrací dochází i v blízkém okolí mimo NEZ (pokles o cca 6 %).

Výrazně vyšší účinek NEZ byl zjištěn v případě dopadů na počet dní s překročením maximálních denních koncentrací PM_{10} . Účinek NEZ, tedy pokles počtu dní s překročením limitu, se v případě tohoto indikátoru odhaduje od -7 do -20 %. Zavedení NEZ mělo v tomto ohledu pozitivní přínos z hlediska plnění imisních limitů v některých německých městech (30) a lze jej vnímat jako efektivní opatření naplňování tohoto limitu (36). V tomto kontextu je proto otázkou dalšího výzkumu, zda by úbytek dní s překročením max. koncentrací PM_{10} mohl v českém prostředí působit preventivně i na vznik smogových situací zvláště v oblastech, kde je automobilová doprava majoritním zdrojem znečištění.

Vysoký účinek NEZ v případě změn koncentrací jemných frakcí PM ($PM_{2,5}$, $PM_{1,0}$ atd.) a dále koncentrací TC, EC a BC je třeba prozatím interpretovat jako indikativní. V současné době existuje velmi málo studií, které potvrzují účinky NEZ na koncentrace těchto látek, a je proto potřeba další výzkum. Především neexistují

žádné studie za soubory měst, které by poskytly důkazy o působení NEZ v různých geografických lokalitách. Obdobnou interpretaci dopadů NEZ na tyto látky používají i přehledové studie účinků NEZ z německého prostředí (33).

Prokázané dopady NEZ na koncentrace PM_{10} v ovzduší se zatím neprojevují na úrovni zdravotních dopadů. Ačkoli existují studie kalkulující významné dopady NEZ v oblasti zlepšení zdraví obyvatelstva (20, 35), epidemiologické studie (46–48) ani jiná empirická měření ukazatelů zdravotních charakteristik obyvatelstva (36) zatím neprokázaly vliv NEZ v úrovni dopadů na zdraví. Dále je třeba opatrně interpretovat výše zjištěný přínos NEZ z hlediska poklesu koncentrací jemných frakcí PM ($PM_{2,5}$, $PM_{1,0}$ atd.). Někteří autoři (31, 38, 41) zdůrazňují význam zavedení NEZ v souvislosti právě s poklesem těchto frakcí, které jsou dle jejich odůvodnění výrazně více zdraví škodlivé než hrubé frakce PM ($PM_{2,5-10}$). Toto odůvodnění je však v rozporu se závěry přehledové studie Kelly a kol., dle které nebyl prokázán rozdíl v míře zdravotních rizik různých frakcí PM. Podle závěrů autorů je rozhodující z hlediska závažnosti zdravotních rizik především typ zdroje PM, přičemž za prokazatelně zdraví ohrožující jsou považovány emise z dieselových motorů a z abraze brzd a pneumatik všech vozidel (24).

Vliv NEZ na koncentrace oxidů dusíku (NO_x)

Lze konstatovat, že výsledky primárních studií v případě dopadů NEZ na změny koncentrací NO , NO_2 a NO_x jsou ve vzájemném souladu. Účinek NEZ je v případě těchto polutantů zcela zanedbatelný, což potvrzují studie na úrovni jednotlivých měst, i studie hodnotící dopady v souborech měst. Morfeld a kol. (29) vysvětluje nulový účinek NEZ u těchto látek již zmíněným rozdílem mezi reálnými provozními emisemi (RDE) a emisními normami Euro. Dalším faktorem může být zvyšování emisí NO_x u dieselových vozidel, které implementovaly dodatečně filtr pevných částic (retrofitting). Ačkoli Rauterberg-Wulff a kol. (38) ve své studii tento vliv rozporují, nulový efekt NEZ prokázaný v této přehledové studii naznačuje, že původní obavy (např. 50) ze zvyšování emisí NO_x vlivem retrofitingu byly oprávněné. Podle Carslaw a kol. (50) nová dieselová vozidla Euro 5 a Euro 6 sice již snižují emise NO_x , nicméně redukce se týkají především nákladních vozidel. U osobních vozidel ani v nejnovějších normách Euro k redukci RDE oxidů dusíku nedošlo, což potvrzují i další měření RDE (18, 19). Navíc podle Hoofmana a kol. (51) není ani možné, aby se situace v blízké době zlepšila, jelikož emise studených startů, produkované v běžném provozu ve městě, nejsou mandatorní v rámci procesu schvalování typu vozidla (homologace). Proto RDE dieselových vozidel nemohou nikdy splňovat limity stanovené normami Euro. V praxi to podle autorů bude znamenat, že celkové emise NO_x budou vlivem přirozené měny vozového parku na Euro 5 a 6 do budoucna ještě narůstat. V tomto kontextu se implementace NEZ jeví dokonce jako kontraproduktivní při snižování NO_x z dopravy ve městech. Jako efektivnější řešení snižování NO_x se proto nabízí regulace celé skupiny dieselových vozidel, které mají oproti benzinovým vozidlům výrazně vyšší emise těchto látek.

Implikace pro zavádění NEZ v českém kontextu

Závěry empirických studií z Německa jsou v případě změn průměrných ročních koncentrací PM_{10} v souladu

s některými studii proveditelnosti z českých měst (6, 16). Pozitivní účinky NEZ na snížení počtu dní s překročením maximálních denních koncentrací PM_{10} a jemných frakcí PM by měly po metodologické stránce reflektovat do budoucna nově všechny studie proveditelnosti NEZ a hodnocení těchto indikátorů zahrnout. České studie proveditelnosti naopak selhávají v odhadu změn emisí NO_2 a NO_x , kde mylně předpokládají pokles po zavedení NEZ, ač závěry empirických v Německu potvrdily opak. Tento nesoulad může být způsoben právě diskrepancí mezi RDE a emisními faktory použitými pro kalkulace emisí v českých studiích.

Z hlediska další implementace NEZ v prostředí českých měst jakožto nástroje snižování zdravotních dopadů emisí automobilové dopravy je třeba cílit na omezování nejrizikovějších zdrojů emisí v automobilové dopravě, tedy emisí z dieselových motorů a emisí z abraze brzd a pneumatik. Využití NEZ jako nástroje k omezení právě dieselových vozidel doporučuje řada odborných studií (24, 51) a stejným směrem cílí svou dopravní politiku i první západoevropská města ve Francii, Španělsku, Německu nebo Řecku (52, 53).

Závěr

Tato přehledová studie systematicky analyzovala závěry empirických studií z německého prostředí, které se zabývaly kvantifikací účinků nízkoemisních zón (NEZ). Po nezbytné metodologické harmonizaci výsledků jednotlivých studií byly interpretovány výsledky za jednotlivé skupiny polutantů. Nízkoemisní zóny v menší míře pozitivně působí na snižování průměrných ročních koncentrací PM_{10} a ve větší míře na snižování počtu dní s překročením denních limitů PM_{10} . Několik empirických studií prokázalo významné dopady NEZ při snižování emisí jemných frakcí PM, nicméně tyto dopady zatím nebyly potvrzeny v širokém geografickém měřítku. Zcela zanedbatelný účinek mají NEZ při snižování koncentrací oxidů dusíku, což je způsobeno selháním politiky EU při snižování emisí NO_x prostřednictvím emisních norem Euro.

Poděkování:

Tento článek byl vytvořen za finanční podpory Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy v rámci programu Národní program udržitelnosti I, projektu Dopravní VaV centrum (LO1610) na výzkumné infrastruktuře pořázené z Operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace (CZ.1.05/2.1.00/03.0064).

Strět zájmů: žádný.

LITERATURA

- Ricci A, Gaggi S, Enei R, Tomassini M, Fioretto M, Gargani F, et al. Study on urban vehicle access regulations - final report. Brussels: European Union; 2017.
- Zákon č. 201 ze dne 2. května 2012 o ochraně ovzduší. Sbírka zákonů ČR. 2012;částka 69:2786-841.
- Nařízení vlády č. 56 ze dne 6. února 2013 o stanovení pravidel pro zařazení silničních motorových vozidel do emisních kategorií a o emisních plakétách. Sbírka zákonů ČR. 2013;částka 25:442-7.
- Guerreiro C, Colette A, de Leeuw F, González Ortiz A. European Environment Agency. Air quality in Europe - 2018 report. Luxembourg: Publications Office of the European Union; 2018.
- Špička L, Dostál I, Jedlička J, Pelikán L, Tichý J, Tögel M a kol. Studie proveditelnosti nízkoemisních zón ve městě Olomouci. Brno: Centrum dopravního výzkumu; 2013.
- Kovařík J, Ptáček M, Kučera T, Vojta J, Zachariáš M, Doubek P a kol. Zpracování studie proveditelnosti záměru vyhlášení nízkoemisní zóny ve městě Tábor. Praha: HaskoningDHV Czech Republic; 2015.
- Jedlička J, Bucek J, Dostál I, Pelikán L, Špička L, Tichý J a kol. Aktualizace části Studie proveditelnosti nízkoemisní zóny v podmínkách hl. m. Prahy. Brno: Centrum dopravního výzkumu; 2015.
- Havlíček A, Bedáň P, Nešpor J, Němečková J, Kapusta J, Hebký T a kol. Studie proveditelnosti zavedení nízkoemisní zóny na území statutárního města Brna. Brno: Brněnské komunikace; 2017.
- Lollek V, Výtisk J, Starostová R, Jedlička J, Čámpula R. Studie proveditelnosti pro zavedení nízkoemisních zón na území statutárního města Ostravy. Ostrava: E-expert; 2018.
- Křečková M. Nízkoemisní zóny jako nový nástroj zlepšení kvality ovzduší. České právo životního prostředí. 2012;(32):71-7.
- Urbanaccessregulations.eu [Internet]. Emmendingen: Sadler Consultants; 2018 [cited 2019 May 15]. What are Low Emission Zones? Available from: <https://urbanaccessregulations.eu/low-emission-zones-main/what-are-low-emission-zones>.
- Laberer C, Niedermeier M. Wirksamkeit von Umweltzonen. München: Interessenvertretung Verkehr; 2009.
- iDNES.cz/Zpravodajství [Internet]. Praha: MAFRA; 2017 [cit. 2019-05-15]. Heller J. Praha se vrací k vizi nízkoemisních zón, na podobě se koalice neshodla. Dostupné z: https://www.idnes.cz/praha/zpravy/praha-ozivuje-nizkoemisni-zony.A170316_2312681_praha-zpravy_rsr.
- Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2008/50/ES ze dne 21. května 2008 o kvalitě vnějšího ovzduší a čistším ovzduší pro Evropu. Úřední věstník Evropské unie. 2018;51(L152):1-44.
- Sdělení Komise Evropskému parlamentu, Radě, Evropskému hospodářskému a sociálnímu výboru a Výboru regionů. Evropská strategie pro nízkoemisní mobilitu. COM(2016) 501 Final. Brusel: Evropská komise; 2016.
- Špička L, Bucek J, Dufek J, Jedlička J, Pávková A, Pelikán L a kol. Studie proveditelnosti nízkoemisních zón v podmínkách hlavního města Prahy. Brno: Centrum dopravního výzkumu; 2013.
- Lutz M. The low emission zone in Berlin - results of a first impact assessment. In: Proceedings of the workshop on NOx: Time for Compliance; 2009 Nov; Birmingham.
- Weiss M, Bonnel P, Hummel R, Provenza A, Manfredi U. On-road emissions of light-duty vehicles in Europe. Environ Sci Technol. 2011 Oct 1;45(19):8575-81.
- Baldino C, Tietge U, Muncrief R, Bernard Y, Mock P. Road tested: comparative overview of real-world versus type-approval NOx and CO2 emissions from diesel cars in Europe. Berlin: International Council on Clean Transportation Europe; 2017.
- Wolff H. Keep your clunker in the suburb: low-emission zones and adoption of green vehicles. Econ J. 2014 Aug;124(578):F481-512.
- London low emission zone [Internet]. London: Transport for London; 2008 [cited 2019 May 15]. Available from: <http://content.tfl.gov.uk/lez-impacts-monitoring-baseline-report-2008-07.pdf>.
- Krzyzanowski M, Kuna-Dibbert B, Schneider J, editors. Health effects of transport-related air pollution. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe; 2005.
- European Environment Agency. European Union emission inventory report 1990-2015 under the UNECE Conven-

- tion on Long-range Transboundary Air Pollution (LRTAP). Luxembourg: Publications Office of the European Union; 2018.
24. Kelly FJ, Fussell JC. Air pollution and public health: emerging hazards and improved understanding of risk. *Environ Geochem Health*. 2015 Aug;37(4):631-49.
 25. Faustini A, Rapp R, Forastiere F. Nitrogen dioxide and mortality: review and meta-analysis of long-term studies. *Eur Respir J*. 2014 Sep;44(3):744-53.
 26. Směrnice Komise (EU) 2015/1480 ze dne 28. srpna 2015, kterou se mění několik příloh směrnice Evropského parlamentu a Rady 2004/107/ES a 2008/50/ES, kterými se stanoví pravidla pro referenční metody, ověřování údajů a umístění míst odběru vzorků při posuzování kvality vnějšího ovzduší. Úřední věstník Evropské unie. 2015;58(L226):4-11.
 27. Bertrand M, Duflo E, Mullainathan S. How much should we trust differences-in-differences estimates? *Q J Econ*. 2004 Feb;119(1):249-75.
 28. Morfeld P, Spallek M, Groneberg D. Zur Wirksamkeit von Umweltzonen: Design einer Studie zur Ermittlung der Schadstoffkonzentrationsänderung für Staubpartikel (PM10) und andere Größen durch Einführung von Umweltzonen in 20 deutschen Städten. *Zentralbl Arbeitsmed Arbeitsschutz Ergonomie*. 2011;61(5):148-65.
 29. Morfeld P, Groneberg DA, Spallek MF. Effectiveness of low emission zones: large scale analysis of changes in environmental NO₂, NO and NO_x concentrations in 17 German cities. Sun Q, editor. *PLoS One*. 2014 Aug 12;9(8):e102999.
 30. Jiang W, Boltze M, Groer S, Scheuven D. Impacts of low emission zones in Germany on air pollution levels. *Transp Res Procedia*. 2017;25:3370-82.
 31. Qadir RM, Abbaszade G, Schnelle-Kreis J, Chow JC, Zimmermann R. Concentrations and source contributions of particulate organic matter before and after implementation of a low emission zone in Munich, Germany. *Environ Pollut*. 2013 Apr;175:158-67.
 32. Cyrus J, Peters A, Soentgen J, Wichmann HE. Low emission zones reduce PM10 mass concentrations and diesel soot in German cities. *J Air Waste Manag Assoc*. 2014 Apr;64(4):481-7.
 33. Cyrus J, Wichmann HE, Rückerl R, Peters A. Umweltzonen in Deutschland: Probates Mittel zur Einhaltung geltender Luftqualitätsstandards? *Bundesgesundheitsbl*. 2018 Jun;61(6):645-55.
 34. Morfeld P, Groneberg DA, Spallek M. Wirksamkeit von Umweltzonen in der ersten Stufe: Analyse der Feinstaubkonzentrationsänderungen (PM10) in 19 deutschen Städten. *Pneumologie*. 2014 Jan;68(03):173-86.
 35. Malina C, Scheffler F. The impact of Low Emission Zones on particulate matter concentration and public health. *Transp Res Part A Policy Pract*. 2015 Jul;77:372-85.
 36. Gehrsitz M. The effect of low emission zones on air pollution and infant health. *J Environ Econ Manage*. 2017 May;83:121-44.
 37. Lutz M, Rauterberg-Wulff A. Ein Jahr Umweltzone Berlin: Wirkungsuntersuchungen. Berlin: Senatsverwaltung für Gesundheit, Umwelt und Verbraucherschutz; 2009.
 38. Rauterberg-Wulff A, Lutz M. Ein Jahr Umweltzone Stufe 2 in Berlin. Berlin: Senatsverwaltung für Gesundheit, Umwelt und Verbraucherschutz; 2011.
 39. Cyrus J, Peters A, Wichmann HE. Umweltzone München - Eine erste Bilanz. *Umweltmed Forsch Prax*. 2009;14(3):127-32.
 40. Morfeld P, Stern R, Bultjes P, Groneberg DA, Spallek M. Einrichtung einer Umweltzone und ihre Wirksamkeit auf die PM10-Feinstaubkonzentration - eine Pilotanalyse am Beispiel München. *Zentralbl Arbeitsmed Arbeitsschutz Ergonomie*. 2013;63(2):104-15.
 41. Fensterer V, Küchenhoff H, Maier V, Wichmann HE, Breiten S, Peters A, et al. Evaluation of the impact of low emission zone and heavy traffic ban in Munich (Germany) on the reduction of PM₁₀ in ambient air. *Int J Environ Res Public Health*. 2014 May 13;11(5):5094-112.
 42. Rasch F, Birmili W, Weinhold K, Nordmann S, Sonntag A, Spindler G, et al. Signifikante Minderung von Ruß und der Anzahl ultrafeiner Partikel in der Außenluft als Folge der Umweltzone in Leipzig. *Gefahrst Reinhalt Luft*. 2013;73(11-12):483-9.
 43. Löschau G, Wiedensohler A, Birmili W, Rasch F, Spindler G, Müller K, et al. Messtechnische Begleitung der Einführung der Umweltzone in der Stadt Leipzig, Teil 5: Immissionssituation von 2010 bis 2015 und Wirkung der Umweltzone. Dresden: Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie; 2016.
 44. Morfeld P, Groneberg DA, Spallek M. The impact of Low Emission Zones on particulate matter concentration and public health: a comment. *Transp Res Part A Policy Pract*. 2015 Dec;82:255-6.
 45. Malina C, Scheffler F. The impact of Low Emission Zones on particulate matter concentration and public health: a rejoinder. *Transp Res Part A Policy Pract*. 2015 Dec;82:257-8.
 46. Kelly F, Armstrong B, Atkinson R, Anderson HR, Barratt B, Beevers S, et al. The London Low Emission Zone Baseline Study. Boston (MA): Health Effects Institute; 2011.
 47. Wood HE, Marlin N, Mudway IS, Bremner SA, Cross L, Dundas I, et al. Effects of air pollution and the introduction of the London Low Emission Zone on the prevalence of respiratory and allergic symptoms in schoolchildren in East London: a sequential cross-sectional study. *PLoS ONE*. 2015 Aug 21;10(8):e0109121.
 48. Mudway IS, Dundas I, Wood HE, Marlin N, Jamaludin JB, Bremner SA, et al. Impact of London's low emission zone on air quality and children's respiratory health: a sequential annual cross-sectional study. *Lancet Public Health*. 2019 Jan;4(1):e28-40.
 49. Carslaw DC. Evidence of an increasing NO₂/NO_x emissions ratio from road traffic emissions. *Atmos Environ*. 2005 Aug;39(26):4793-802.
 50. Carslaw DC, Murrells TP, Andersson J, Keenan M. Have vehicle emissions of primary NO₂ peaked? *Faraday Discuss*. 2016 Jul 18;189:439-54.
 51. Hooftman N, Messagie M, Van Mierlo J, Coosemans T. A review of the European passenger car regulations - real driving emissions vs local air quality. *Renew Sustain Energy Rev*. 2018 Apr;86:1-21.
 52. BBC News [Internet]. London: BBC; 2018 [cited 2019 May 15]. Diesel ban approved for German cities to cut pollution. Available from: <https://www.bbc.com/news/business-43211946>.
 53. ZME Science [Internet]. Bucharest: ZME Science LLC; 2016 [cited 2019 May 15]. Micu A. Paris, Madrid, Athens, Mexico City to ban all diesels by 2025, mayors announce. Available from: <https://www.zmescience.com/ecology/pollution-ecology/four-mayors-diesel/>.

Došlo do redakce: 6. 6. 2019

Přijato k tisku: 26. 7. 2019

*Mgr. Marek Tögel
Centrum dopravního výzkumu, v. v. i.
Lišeňská 33a, 636 00 Brno
Česká republika
E-mail: togel.marek@gmail.com*