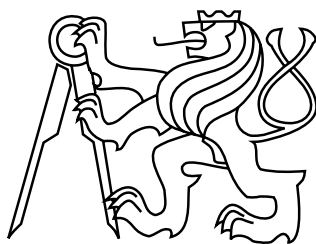


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STAVEBNÍ
STUDIJNÍ PROGRAM GEODÉZIE A KARTOGRAFIE
STUDIJNÍ OBOR GEODÉZIE A KARTOGRAFIE



DIPLOMOVÁ PRÁCE
ANALÝZA VLIVU ZNEČIŠTĚNÍ OVZDUŠÍ NA
OBYVATELSTVO POMOCÍ GIS

Vedoucí práce: Doc. Ing. Lena HALOUNOVÁ, Ph.D.
Katedra geomatiky

červen 2016

Bc. Jan HABAL



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Thákurova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Bc. Habal Jméno: Jan Osobní číslo: 381 473

Zadávací katedra: Geomatika - k155

Studijní program: Geodézie a kartografie

Studijní obor: Geodézie a kartografie

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Analýza vlivu znečištění ovzduší na obyvatelstvo pomocí GIS

Název diplomové práce anglicky: Analysis of air pollution effects on population using GIS

Pokyny pro vypracování:

Obsahem práce bude analýza vlivu znečištění ovzduší, které je dáno bodovými daty z měřicích stanic ČHMÚ. Bude zkoumán jeho vliv na obyvatelstvo v několika oblastech ČR. Obsahem práce bude také popis použitých dat včetně popisu jednotlivých polutantů, metodiky zpracování a zhodnocení výsledků.


Seznam doporučené literatury:


bude vytvořen v první části zpracování diplomové práce při rešerši literatury s danou tematikou

Jméno vedoucího diplomové práce: Doc.Ing. Lena Halounová, CSc.

Datum zadání diplomové práce: 18.2.2016

Termín odevzdání diplomové práce: 22.5.2016


Podpis vedoucího práce


Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

22.2.2016
Datum převzetí zadání


Podpis studenta(ky)

ABSTRAKT

Úvod práce obsahuje teorii shrnující hlavní poznatky a trendy problematiky znečištění ovzduší a jeho analýzy pomocí nástrojů GIS. Vlastním obsahem práce je tvorba map koncentrací několika znečišťujících látek (polutantů) ve třech krajích České republiky. Mapy jsou vytvořeny na základě imisních dat z databáze Českého hydrometeorologického ústavu a jsou doplněna dopravními daty ze sčítání dopravy za rok 2010. Pro tvorbu map byla použita kombinace vlastního postupu a běžných nástrojů GIS. Analyzovanými kraji jsou kraj Vysočina, hlavní město Praha a Ústecký kraj. Z demografických dat těchto krajů je určena expozice obyvatel a citlivých skupin těmto polutantům za rok 2011. Dosažené expozice jsou porovnány s platnými limitními hodnotami. Výsledkem práce jsou přehledné tabulky expozice v jednotlivých administrativních jednotkách krajů, slovní zhodnocení, mapy znečištění a mapy expozice obyvatel.

KLÍČOVÁ SLOVA

znečištění ovzduší, GIS, imisní data, doprava, interpolace, mapy, obyvatelstvo

ABSTRACT

The introduction of this thesis summarizes a theory and trends of air pollution and its analysis using GIS. The body of the thesis deals with mapping ambient air quality of several pollutants in three regions of the Czech Republic. The maps are made on the basis of air quality data freely accessible from the database of Czech hydrometeorological institute. Complementary source of data are vehicular traffic data from the national census in the year 2010. The maps are made using a combination of self devised and standard GIS methods. The three analyzed regions are: Vysočina district, Prague and Ústecký district. Using also demographic data of these regions the exposure of its population to the harmful effects of air pollutants is computed. The reference year is 2011. Computed exposure values are compared with limit values. The results are shown in tables at the end of the thesis which contains also verbal evaluation. Interpolated maps of air quality and population exposure maps are attached as appendices to the thesis.

KEYWORDS

air pollution, GIS, air quality measurements, traffic, interpolation, maps, population

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tuto diplomovou práci jsem vypracoval samostatně. Veškerou použitou literaturu a podkladové materiály uvádím v seznamu zdrojů.

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat vedoucí práce docentce Halounové za vedení a připomínky k této práci. Dále chci poděkovat nejenom jí, ale i dalším odborníkům z Fakulty stavební za výuku předmětů orientovaných na geografické informační systémy, které mi poskytly nezbytný základ znalostí pro tvorbu této práce. Na závěr chci poděkovat mé rodině, která mě podporovalo po celou dobu mého studia.

Obsah

Úvod	7
1 Současný stav řešené problematiky	10
1.1 Současná legislativa	11
1.2 Studie zkoumající vliv na zdraví lidí	13
1.3 Studie využívající technologie GIS	15
1.4 České a evropské agentury odpovědné za monitoring ovzduší	18
1.5 Současné trendy v oblasti znečištění ovzduší	20
2 Látky znečišťující ovzduší - polutanty	24
2.1 Pevné suspendované částice - PM	25
2.2 Oxidy dusíku - NO _x a NO ₂	26
2.3 Oxid siřičitý - SO ₂	27
2.4 Oxid uhelnatý - CO	28
2.5 Ozón - O ₃	28
2.6 Ostatní znečišťující látky	29
2.7 Metodika posuzování znečištění	30
3 Popis použitých dat	33
3.1 Data z imisních monitorovacích stanic	33
3.2 Dopravní data	35
3.3 Demografická data	38
4 Interpolační metody	39
4.1 Deterministické metody	40
4.2 Stochastické metody	41
5 Postup řešení	44
5.1 Tvorba map znečištění	44
5.2 Analýza expozice obyvatel	49

6	Výsledky	51
6.1	Kraj Vysočina	51
6.2	Hlavní město Praha	54
6.3	Ústecký kraj	57
	Závěr	62
	Použité zdroje	66
	Seznam zkratk	70
	Seznam příloh	71
A	Mapy koncentrací polutantů	72
A.1	Koncentrace PM ₁₀ v kraji Vysočina	72
A.2	Koncentrace PM ₁₀ v hlavním městě Praze	73
A.3	Koncentrace NO ₂ v hlavním městě Praze	74
A.4	Koncentrace PM ₁₀ v Ústeckém kraji	75
A.5	Koncentrace NO ₂ v Ústeckém kraji	76
A.6	Koncentrace SO ₂ v Ústeckém kraji	77
B	Mapy expozice populace	78
B.1	Expozice obyvatel kraje Vysočina polutantu PM ₁₀	78
B.2	Expozice obyvatel hlavního města Prahy polutantu PM ₁₀	79
B.3	Expozice obyvatel hlavního města Prahy polutantu NO ₂	80
B.4	Expozice obyvatel Ústeckého kraje polutantu PM ₁₀	81
B.5	Expozice obyvatel Ústeckého kraje polutantu NO ₂	82
B.6	Expozice obyvatel Ústeckého kraje polutantu SO ₂	83

Úvod

Ovzduší vždy bylo a je kontaminováno znečišťujícími látkami, které se do něj dostávají jak přírodní, tak lidskou činností. Jelikož ovzduší je všude kolem nás, tak má jeho znečištění vliv na zdraví nás všech a také na životní prostředí jako celek. Pokud se chceme pokusit již kontaminované ovzduší napravit, pak je nutná dobrá znalost výchozí situace. Z tohoto důvodu je ovzduší předmětem monitoringu a hodnocení jeho kvality. Finanční prostředky na toto vynaložené se pak mohou vrátit v podobě efektivnějšího provádění nápravných opatření.

Zemské klima se mění od nepaměti, ale lidstvem způsobené znečištění ovzduší (antropogenní znečištění), způsobené spalováním fosilních paliv a průmyslovou aktivitou, tyto změny výrazně urychluje. Znečištění, kromě přímého vlivu na zdraví lidí žijících ve znečištěných oblastech, působí i nepřímě. Významnou částí emitovaných plynů jsou tzv. skleníkové plyny, které způsobují dnes již dobře prozkoumaný skleníkový efekt (Villanyi, 2010). Skleníkové plyny přispívají velkou měrou ke globální změně klimatu, která ve výsledku ohrožuje přírodu jako celek a životy nás všech.

Zvýšené znečištění ovzduší, dané spalováním fosilních paliv a průmyslovou činností, provází lidstvo již od počátku průmyslové revoluce avšak konkrétní účinky si začali lidé uvědomovat přibližně až od poloviny 20. století. Jednou z přelomových událostí se stal tzv. *Velký smog* v Londýně v roce 1952 (Gouveia, 2000). Vlády mnoha zemí poté přistoupily k tvorbě politik sloužících k regulaci a následné redukci znečišťování ovzduší. Typicky jsou znečištění ovzduší vystaveni více lidé v městských aglomeracích, kde působí zvýšená koncentrace škodlivých látek vlivem hustého osídlení, dopravy a industrializace (Pečka, 2014).

Boj se znečištěným ovzduším je v současnosti zakotven v naší potažmo evropské legislativě. Směrnice o kvalitě vnějšího ovzduší a čistším ovzduším pro Evropu (Evropský parlament, 2008) stanoví: "potřebu snížit znečištění na úroveň, které minimalizují škodlivé účinky na lidské zdraví, přičemž zvláštní pozornost se věnuje citlivým skupinám obyvatel; škodlivé účinky na životní prostředí jako celek; zlepšit monitorování a posuzování kvality ovzduší, včetně depozice znečišťujících látek; a poskytovat veřejnosti informace".

Geografické informační systémy a ochrana životního prostředí jsou dva provázané obory vědní činnosti. GIS pracuje s prostorovými informacemi - geodaty a provádí s nimi analýzy, syntézy, modely atd. GIS nám usnadňuje práci s velkými objemy dat a umožňuje zautomatizovat některé postupy a docílit vyšší efektivity. Při řešení mnoha problémů životního prostředí je spolupráce GIS odborníka a odborníka na danou oblast životního prostředí vhodná, efektivní a účelná. Díky GIS můžeme data o životním prostředí (environmentální data) lépe chápat, analyzovat nebo prezentovat.

Spolu s metodami, které podporují digitální sběr dat (dálkový průzkum Země, digitální snímkování či GNSS), nám GIS poskytují velice efektivní nástroje pro práci s environmentálními daty. GIS nám pomáhají například v: ukládání a šíření environmentálních dat, provádění prostorových a statistických analýz s těmito daty, modelování hypotetických scénářů pro krizové řízení a v mnoha dalších oblastech.

Právě prezentace dat o znečištěném ovzduší (nebo obecněji dat o životním prostředí) veřejnosti je důležitou disciplínou. Data pouze v číselné podobě nemají především pro laiky velkou vypovídající hodnotu. V této situaci nastupuje technologie GIS, která umožní k datům přiřadit geografickou informaci a tím rozšiřuje možnosti jejich prezentace. Říká se, že obraz může vyjádřit více než tisíc slov, a proto v GIS vytvořená mapa znečištění může mít mnohem větší vypovídající hodnotu než pouhá tabulka imisních dat. S tvorbou spojených map určitého jevu v prostoru z nějaké diskrétní podmnožiny přesných měřených údajů nutně přicházejí nepřesnosti. Úkolem GIS odborníka je vybrat metody a provést analýzu s cílem minimalizovat tyto nepřesnosti a zhotovit znázornění (mapu), které bude mít vysokou vypovídající schopnost.

V rámci České republiky byla doposud věnována velká pozornost oblasti Ostravska (např. diplomová práce Pečka, 2014). Z tohoto důvodu jsou oblastmi zájmu této diplomové práce: hlavní město Praha, Ústecký kraj a kraj Vysočina. Praha byla zvolena z důvodu jejího rostoucího významu jakožto srdce české ekonomiky, kde byl v posledních letech zaznamenán významný nárůst automobilové dopravy. Ústecký kraj byl v minulosti nechvalně proslavený špatným životním prostředím. Situace se od roku 1990 ve všech ukazatelích významně zlepšila, ale v kraji je stále přítomno

nejvíce uhelných elektráren a povrchových dolů v naší republice. Kraj Vysočina byl vybrán pro srovnání. Tento kraj se vyznačuje čistým životním prostředím, neobsahuje větší sídla a mimo dálnice D1 se na jeho území nevyskytují žádné další vytížené silniční tahy.

Analýza vlivu znečištění ovzduší na obyvatelstvo bude vytvořena na základě imisních dat z monitorovacích stanic sítě ČHMÚ, dopravních dat ŘSD a demografických dat o zkoumaných krajích. Pro analýzu byl vybrán referenční rok 2011 a to z několika důvodů. Za prvé demografická data jsou v současnosti aktuální ke sčítání obyvatelstva právě z roku 2011. Za druhé dopravní data v potřebném rozsahu jsou v současnosti aktuální ke sčítání dopravy z roku 2010 a lze předpokládat, že za jeden rok se vytíženost většiny silnic rapidně nezměnila. A za třetí v posledních letech došlo v důsledku mírného zlepšení situace ovzduší v ČR k pozastavení činnosti několika měřicích stanic, a proto jsou data z roku 2011 obsáhlejší.

Nejdůležitější datová sada - imisní měření ze stanic ČHMÚ byla získána z veřejně dostupné databáze na webu ČHMÚ (ČHMÚ, 2012b). Mezi hlavní sledované znečišťující látky v této databázi patří: pevné suspendované částice (PM_{10}), oxid dusičitý (NO_2), oxid siřičitý (SO_2), oxid uhelnatý (CO) a ozón (O_3). Ne všechny stanice měří všechny polutanty, a proto je dostupnost některých dat relativně omezená. Z tohoto důvodu byla výsledná analýza provedena v následujícím rozsahu: analýza vlivu PM_{10} , SO_2 a NO_2 pro Ústecký kraj; analýza vlivu PM_{10} a NO_2 v Praze; analýza vlivu PM_{10} v kraji Vysočina.

Výsledkem práce jsou imisní mapy - mapy znečištění pro výše uvedené kraje a znečišťující látky (polutanty). Celkem je tedy zhotoveno 6 map. Dalšími výsledky práce jsou mapy a tabulky průměrných expozic skupin obyvatelstva jednotlivých obcí resp. městských částí ve zkoumaných krajích a slovní hodnocení výsledků. Práce byla vyhotovena v software ArcGIS 10.1 společnosti ESRI a dále v běžně dostupných tabulkových a textových editorech.

1 Současný stav řešení problematiky

Studiu znečištěného ovzduší se věnuje celá řada vědeckých studií a knih. Lidstvem způsobené (antropogenní) znečištění se skládá z mnoha substancí, a proto je v řadě těchto studií možno nalézt širokou škálu témat. Některé studie se věnují globálním efektům znečištěného ovzduší. Mezi globální efekty patří globální oteplování planety Země, které je způsobeno lidskou činností způsobeným uvolňováním skleníkových plynů do ovzduší (Villanyi, 2010). Další studie se věnují například vlivům depozice znečišťujících látek z ovzduší do půdy a do vody nebo způsobeným ztrátám biodiverzity.

Tato práce je zaměřena především na zkoumání expozice obyvatelstva polutantům, které byly do ovzduší uvolněny právě lidskou činností. Jedná se o expozici v lokálním měřítku, která lépe vystihuje míru expozice obyvatelstva a zdravotní vlivy, než například studium na úrovni států. Těmto vlivům se již v minulosti věnovalo mnoho prací, z nichž některé budou uvedeny v následujících sekcích.

Mezi významné zdroje znečištění v dnešní době patří především doprava, která způsobuje znečištění oxidy dusíku a suspendovanými částicemi. Nákladní doprava a naftové motory produkují obecně více emisí než benzínové motory. Emise nevznikají pouze při spalovacích procesech v motoru vozidla, ale také obrušováním brzdových destiček či otěrem pneumatik s vozovkou. Negativní vliv má stáří vozidel, proto některá města zavádějí zóny zakazující nebo zpoplatňující vjezd starších vozidel.

Dalším zdrojem znečištění ve městech jsou topeniště. Tento vliv je silně sezónní s očekávaným maximem v zimních měsících. V závislosti na druhu kotle jsou emitovány především suspendované částice. Modernizace kotlů velmi významně přispívá ke snížení tohoto vlivu.

Znečištění ovzduší je silně ovlivněno atmosférickými podmínkami ve spodní části atmosféry do výšky cca 2 km. Největší vliv má směr a síla větru, dále teplota a především "schopnost atmosféry promíchávat jednotlivé vrstvy". Tato schopnost je omezena v období inverze, kdy se látky znečišťující ovzduší hůře rozptýlí a zůstávají tak koncentrovanější.

Nicméně je třeba poznamenat, že vliv na ovzduší nemají jen zdroje v bezprostředním okolí daného místa. Ve velké míře dochází také k transportu polutantů na relativně velké vzdálenosti. Například bylo prokázáno, že na kvalitu ovzduší ve Španělsku má vliv i přenos minerálního prachu ze severní Afriky (Pečka, 2014).

V souvislosti se znečištěním je třeba rozlišovat pojmy *emise* a *imise*. *Imise* jsou hodnoty znečištění ovzduší vyjádřené hmotnostní koncentrací znečišťující látky v ovzduší (obvykle v $\mu\text{g}/\text{m}^3$). *Imise* mohou být změřené nebo výsledkem objektivního odhadu či modelování. Oproti tomu *emise* jsou hodnoty znečištění vyjádřené celkovým objemem vypuštěné látky z konkrétního zdroje (uvádí se obvykle v tunách za rok) - například emise motorové dopravy za dané město nebo emise konkrétní elektrárny.

Zdroje emisí jsou v souladu s legislativou v ČR rozděleny na 4 kategorie a to dle jejich třídy v Registru emisí a zdrojů znečišťování ovzduší (REZZO) na: REZZO 1 (zvláště velké a velké zdroje), REZZO 2 (střední zdroje), REZZO 3 (malé zdroje) a REZZO 4 (mobilní zdroje). Jsou evidovány údaje o celkovém množství vypuštěných látek za rok (ČHMÚ, 2012a).

1.1 Současná legislativa

Platná Evropská legislativa vychází z 6. akčního programu pro životní prostředí (EEA, 2011). Tento program zahrnuje mnoho legislativních opatření: směrnici 2004/107/EC (týká se těžkých kovů v ovzduší), směrnici 2008/50/EC (týká se hlavních polutantů), směrnici 2010/75/EU (reguluje průmyslové emise), tzv. EURO směrnice (stanovují limity pro emise v automobilech), směrnice 1999/32/EC (regulující obsah síry v palivech) a mnoho dalších.

Monitoring a způsoby opatření pro snižování vlivů znečištění ovzduší v ČR vycházejí ze zmíněné směrnice 2008/50/EC (Evropský parlament, 2008). Směrnice udává, že pro geografickou interpretaci údajů o znečištění ovzduší z jednotlivých míst se má použít modelování a tím určovat kolektivní expozice obyvatelstva znečišťujícími látkám. Vycházet by se vždy mělo z měření imisních dat, která by měla být reprezentativní pro danou lokalitu, srovnatelná v rámci EU a pořízená standardizovanými

metodami. Měření mají probíhat nejenom v městských oblastech se zaměřením na expozici obyvatelstva, ale také ve venkovských oblastech se zaměřením na expozici ekosystémů a vegetace.

Posuzování hodnot znečištění probíhá dle nastavených pravidel (více v sekci 2.7). V případě dobrého ovzduší je nadále třeba tento stav zachovávat pomocí vhodných opatření. V oblastech, kde dochází k překračování nějakých prahových resp. limitních hodnot, je třeba nadále dodržovat potřebný počet měření resp. zavádět tzv. plány kvality ovzduší pro snižování koncentrací škodlivin. Informace o kvalitě ovzduší jsou zpřístupňovány v jednotném formátu v souladu se směrnicí o zřízení Infrastruktury pro prostorové informace v Evropském společenství (INSPIRE). Tato ustanovení jsou od členských států vynutitelná pod hrozbou sankcí.

Evropská legislativa (Evropský parlament, 2008) dále ukládá na národních úrovních povinnost:

- zřídit orgány pověřené posuzováním kvality vnějšího ovzduší,
- spolupracovat s ostatními členskými státy,
- stanovit zóny a aglomerace v rámci kterých se znečištění posuzuje,
- zřídit alespoň minimální počet monitorovacích stanic pro každou zónu nebo aglomeraci stanovený přílohami směrnice.

V ČR je v současnosti problematika znečištění legislativně ošetřena zákonem č. 201/2012 Sb. (zákon o ochraně ovzduší). Pro analýzu znečištění v roce 2011 v rámci této publikace platil ještě starý zákon č. 86/2002 Sb. pod stejným názvem. Tento zákon např. vymezuje: zvláštní ochranu ovzduší v oblastech se zhoršenou kvalitou ovzduší a povinnosti krajů a velkých měst vypracovávat programy pro zlepšení kvality ovzduší pro znečišťující látky, které v nedávné době překročily imisní limity. Dalším zákonem, který se týká této problematiky je rozsáhlý zákon č. 114/1992 Sb. (o ochraně přírody a krajiny), který vymezuje například územní ochranu přírodních rezervací nebo orgány zodpovědné za správu životního prostředí. Konkrétní imisní limity jsou právně ošetřeny nařízením vlády 42/2011 Sb. "o sledování a vyhodnocování kvality ovzduší"(více v sekci 2.7).

1.2 Studie zkoumající vliv na zdraví lidí

Vliv znečištění ovzduší na zdraví lidí je v současnosti již velmi dobře prozkoumán a je zcela nezpochybnitelný. Rozsáhlou publikací, která tvoří sborník výzkumných děl více autorů, je kniha (Villanyi, 2010). Obsahuje popis vlivů polutantů jak na zdraví lidí, tak i na biosféru, která je také zasažena a na jejíž ochranu by se nemělo zapomínat. V této knize se může čtenář dozvědět, jak se měří koncentrace škodlivin v ovzduší (včetně moderních bezkontaktních metod), popis důležitých zdrojů znečištění, jak se provádí výzkum v městských či lesních oblastech nebo způsob vzniku a působení skleníkových plynů. Skleníkové plyny jsou zdrojem nepřímého nebezpečí pro zdraví obyvatel celé planety, protože způsobují tzv. skleníkový efekt. Následná globální změna klimatu pak ovlivňuje nás všechny.

Mezi studie zkoumající vliv znečištění ovzduší na zdraví lidí patří např. (Jerret, 2005). Tato studie zkoumá spojitost úmrtnosti a vystavení dlouhodobému vlivu ovzduší znečištěného jemnými pevnými částicemi ($PM_{2.5}$) na poměrně podrobném měřítku v Los Angeles, USA. Los Angeles je město, které má v rámci USA dlouhodobě problémy se znečištěním a je dobře pokryté monitorovacími stanicemi. Proto bylo možno dosáhnout přesných výsledků s podrobností na jednotlivé čtvrti města. Subjekty vystavené zvýšené koncentraci $PM_{2.5}$ v ovzduší měly statisticky prokázanou vyšší úmrtnost. Byl prokázán proměnlivý vliv znečištění v rámci jednoho města, kdežto dřívější studie obsahovaly spíše meziměstské srovnání. Studie tohoto typu vyžaduje jednak velmi podrobná imisní a emisní data, ale také přesnou specifikaci zdravotního stavu dostatečného počtu lidí, kteří trpěli zdravotními problémy. Jerret pracoval s daty o 22 905 subjektech v letech 1980-2000, proto lze jeho studii považovat za velmi přínosnou pro zkoumání dlouhodobých vlivů znečištění. Studie je navíc doplněna o podrobná data o subjektech a zkoumaných oblastech. Zahnutí těchto faktorů (například kouření, životní styl, ekologická či dopravní data o oblastech atd.) umožnila určit přesněji korelaci mezi znečištěním a úmrtností.

Další ze studií je (Gouveia, 2000). Tato studie zkoumá vliv působení několika polutantů na obyvatele města Sao Paulo, Brazílie. Byla jedna z prvních věnujících se rozvojové zemi. V těchto zemích je zřejmý nedostatek studií oproti Evropě a Severní

Americe, který ale nekoresponduje se situací, že znečištění v těchto zemích stoupá. Na druhou stranu trend je v Evropě a Severní Americe opačný a znečištění klesá. Gouveia ve své práci bere v potaz socio-ekonomické vlivy působící na zkoumané obyvatelstvo a klasifikuje obyvatelstvo do tříd dle životních podmínek. Výsledky studie ukázaly náročnost korelační analýzy mezi znečištěním ovzduší a zdravotními vlivy. Překvapivě nebyl prokázán statisticky významný zvýšený vliv na zdraví dětí, ale tento vliv byl prokázán pro populaci starší 65 let.

V rámci České republiky je analýza zdravotních vlivů znečištění ovzduší také předmětem výzkumu. Z řady závěrečných vysokoškolských prací lze zmínit např. (Rychlíková, 2014). Práce popisuje vliv aerosolových částic (PM) na zdraví lidí. Kombinuje data z měření na imisních stanicích a měření personální expozice zkoumaných subjektů. Práce je zaměřena na zvýšenou citlivost dětí a těhotných žen. Výsledkem práce je např. fakt, že nemocnost dětí vystavených zvýšeným koncentracím PM stoupá 1,5 až 5 násobně oproti "čistým lokalitám".

Zdravotními vlivy se intenzivně zabývá také Světová zdravotnická organizace např. v práci (WHO, 2001). Je zde uvedeno, že vliv na zdraví lidí je jednoznačně prokázán, avšak je těžké odlišit v jaké míře působí jednotlivé polutanty. Znečištění ovzduší podle WHO způsobuje sníženou kvalitu života, zvýšenou nemocnost a úmrtnost a to především u starších lidí. Jako nejlepší studie jsou vyhodnoceny ty, které pracují s velkou reprezentativní skupinou subjektů (tzv. *cohort studies*). Jedním ze závěrů práce je to, že u znečištění PM nelze jasně stanovit spodní hranici, pod kterou už je úroveň znečištění prokazatelně zdraví neškodná. Tedy i v případě nepřekračování limitních hodnot nejsou zdravotní rizika zcela vyloučeny.

WHO se obecně tematice znečištěného ovzduší věnuje velice intenzivně. V článku (WHO, 2016) se můžeme dozvědět, že problém s polutanty se v současnosti týká především chudších zemí. Nejvíce zasažena je jihovýchodní a východní část Asie. Článek uvádí zvýšenou nemocnost dětí hlavně do 5 let a zvýšenou úmrtnost populace 50-75 let. Znečištěné ovzduší přispívá ke zvýšenému výskytu infarktů, mozkových mrtvic či chronických plicních onemocnění.

1.3 Studie využívající technologie GIS

Použití GIS pro mapování znečištěného ovzduší je v současnosti zcela běžně využívaným pracovním postupem. Imisní respektive emisní data obsahují prostorovou informaci a jsou tedy geodaty jako kterákoliv jiná data. Proto se k práci s nimi dá s výhodami využít geografický informační systém.

Studie (Ibrahim, 2012) se věnuje mapování prostorového rozložení polutantů v ovzduší v hlavním městě Malajsie. To je provedeno pouze na základě imisních dat - dlouhodobých průměrů z národní monitorovací sítě. Jedná se konkrétně o sledování polutantů O_3 , CO, NO_2 , SO_2 a PM_{10} . To je stejná sestava polutantů, která se monitoruje v Evropě potažmo v ČR. Autoři vytvořili několik imisních map metodou IDW. Jednalo se o mapy ročních průměrů, maxim a dále také o mapy vývoje znečištění v čase. Znečištění v Malajsii je stejně jako u nás silně ovlivněno sezónou (ovšem v ČR se tak děje ze zcela jiných příčin). Výsledný model byl poté validován přímo měřením koncentrací v terénu a porovnáním s interpolovanými hodnotami. Dosažená shoda nebyla příliš vysoká (průměrná diference okolo 30% z absolutní hodnoty koncentrace polutantu). Autoři práce uvádějí několik příčin a to především: nedostatečnou hustotu monitorovacích stanic (pouze 2 v centru města + ostatní na periferii) a působení sezónních i krátkodobých vlivů, které nebylo možno vystihnout krátkodobým validačním měřením.

Další prací a opět z Asie je studie (Shakeel et al, 2015), která mapuje znečištění v zemi, kde je to velice přínosné a to v Pákistánu. Jedná se o mapování ve velkém měřítku v malé části města Sheikhpura. Toto město je typickým příkladem asijského města v současné době, které trápí nepřiměřeně vysoká hustota zalidnění a rostoucí hustota dopravy. Tyto vlivy přispívají ke zhoršování ovzduší v těchto oblastech. Imisní data byla naměřena v krátké době v 15 náhodně zvolených lokalitách a jedná se tedy o mapování rozložení znečištění v určitém krátkém časovém období. Pro analýzu byl použit ArcGIS 10 a další software. Na základě prostorové informace o bodech sběru dat byly vytvořeny mapy metodami IDW a kriging. Mapy vytvořené metodou kriging vykazovaly méně rozdílné hodnoty a byly vyhlazenější než mapy vytvořené metodou IDW. Následně byla provedena statistická analýza výsledků. Byla

zjištěna pozitivní korelace znečištění NO_x a dopravy v místech s hustou dopravou a korelace SO_2 s průmyslovou výrobou především v místech, kde dochází ke spalování uhlí a olejů. Výsledné koncentrace byly velice proměnlivé, i když bylo mapování provedeno v podstatě v mikroměřítku několika desítek km^2 . Závěrem je tedy fakt, že mapování znečištění v městských hustě zalidněných oblastech je náročná činnost a je třeba vhodně zvolit polohu monitorovacích stanic a využít maximum dostupných dat (dopravní či průmyslová data).

Využitím jednoho z nepoužívanějších GIS software na světě (ArcGIS) pro účely analýzy znečištění ovzduší se zabýval (Krivoruchko, 2008). Opět se věnuje již jednou zmíněné oblasti Los Angeles v USA. V práci je uvedeno několik metod. Nejprve je provedena analýza časové řady obsahující interpolaci tzv. 1D dat (časová řada koncentrací ozónu z jedné konkrétní stanice). Je využita geostatistická metoda kriging z důvodů možnosti odhadu nejistot. Analýzou byly odhadovány hodnoty znečištění v časech kdy stanice nemohla měřit. To lze aplikovat za předpokladu, že znečištění je spojitě se měnící veličina. To lze pro oblast v mírném pásmu a znečištění ozónem (který je ovlivněn hlavně počasím) považovat za splněné. Software ArcGIS neumožňuje vizualizaci 1D dat, avšak práce s nimi je možná. V práci jsou dále uvedeny interpolace 2D dat ze stanic měřících SO_2 . Jsou použity metody IDW a kriging. Metoda kriging se potýká s problémem slabé prostorové korelace dat. Autor uvádí, že je to způsobeno malým počtem monitorovacích stanic, který není dostatečný pro správnou geostatistickou analýzu a často velmi rozdílnými podmínkami v okolí jednotlivých stanic. V tomto případě je tedy odhad metodou IDW vyhodnocen jako lepší. Práce (Krivoruchko, 2008) na závěr zmiňuje fenomén tzv. *probability mapping*. V rámci tohoto postupu nejsou interpolovány přímo koncentrace škodlivin v prostoru, ale je určována pravděpodobnost překročení určité meze. Toho lze dobře docílit např. pomocí metody cokriging, která využívá výhody dostatku dalších dat, které jsou s výskytem daného polutantu prostorově korelovány (více o metodě v sekci 4.2).

Mezi další studie využívající technologie GIS patří v sekci 1.2 zmíněná studie (Jarret, 2005), která pro analýzu expozice zkoumaných subjektů pracuje s mapami

koncentrací pevných částic vytvořených metodami: *bikubický spline*, *ordinary kriging*, *universal kriging* a s metodou *radial basis functions*. Metody založené na krigingu byly vyhodnoceny jako nejvhodnější, protože se jedná o tzv. nejlepší nestranný odhad a je možná jeho validace.

Velice zajímavou a komplexní prací je publikace (SAEFL, 2004) ze Švýcarska. Je zde popsáno modelování NO₂ na území celého státu. Výchozím bodem jsou mapy emisí zvané *emission inventories*, ze kterých je následně simulována disperze NO₂ pomocí funkcí šíření polutantů. Dále jsou využita meteorologická data a digitální model terénu. Disperzní model, který je založený na *Gaussově modelu šíření látek v ovzduší*, poté počítá v pravidelném gridu pro každou buňku průměrný roční vliv na okolní buňky. Celý výpočet byl proveden v software Arc/Info společnosti ESRI v pravidelném gridu 200 x 200 m. Výsledky studie uvádějí to, že: NO₂ má nejvyšší lokální koncentrace podél vytížených dálnic; hodnoty jsou oproti dřívějším letům nižší pravděpodobně díky zavedení EURO norem pro motorová vozidla; v celém Švýcarsku je požadovaná koncentrace NO₂, kterou nelze potlačit na národní úrovni; model dosahuje shody přibližně +/- 20% s měřenými daty. Zajímavostí je, že ve Švýcarsku je limitní koncentrace NO₂ nižší než stanovují předpisy Evropské unie pro členské státy včetně ČR. Z čehož lze usuzovat, že i při dosažení podlimitních koncentrací NO₂ v ČR nelze zanedbávat zdravotní efekty.

Na území ČR využívá nástroje GIS ČHMÚ při tvorbě map pro své grafické ročenky (ČHMÚ, 2012a), o kterých bude zmínka v následující sekci 1.4. Mapy jsou kompozicí z více nezávisle vytvořených map a po zavedení lineárního regresního modelu jsou pro interpolaci reziduí použity metoda inverzních vzdáleností (IDW) a metoda kriging. Při aplikaci interpolační metody kriging je možno vypočítat chyby odhadu interpolovaných hodnot. Hodnoty těchto chyb ukazují mimo jiné na účelnost zahuštění staniční sítě a naopak.

Problematikou modelování šíření emisí v ovzduší se podrobně zabývala diplomová práce (Sánka, 2008). V práci je uveden popis způsobů modelování tohoto procesu. V zásadě lze modely rozdělit na: dynamické modely (modely změny emisí zdrojů s časem) a statistické modely (statický zdroj a jeho difuze v prostředí). Samotné

šíření znečišťujících látek prostorem je velice komplexní problematika. Práce uvádí základní dělení na:

- statistické modely (založeny na statistickém vyhodnocení získaných reálných dat), tyto modely mají omezenou použitelnost pouze pro oblasti se stejnými či velmi podobnými podmínkami jako oblast sběru dat;
- fyzikální modely (vzniklé na základě experimentálních dat), na základě experimentálních dat je sestaven matematický model;
- deterministické modely (nepracují s reálnými daty), vycházejí z matematických rovnic, které popisují šíření látek v prostoru.

Mezi deterministické modely, které jsou používány nejčastěji, patří například Gaussův model zmíněný výše nebo model SYMOS 97 používaný v ČR (zmíněný v sekci 1.4). Výpočtem modelu práce nekončí. Následně nastupují klasické interpolační techniky pro interpolaci reziduí mezi body získanými z výše uvedených modelů.

1.4 České a evropské agentury odpovědné za monitoring ovzduší

V rámci České republiky je sledováním kvality ovzduší pověřen *Český hydrometeorologický ústav* a to konkrétně jeho útvar zvaný *Úsek ochrany čistoty ovzduší*. Každoročně jsou vydávány grafické a tabelární ročenky o kvalitě ovzduší v ČR. ČHMÚ shromažďuje údaje v *Informačním systému kvality ovzduší (ISKO)*. V rámci ISKO jsou obsažena měřená imisní data z monitorovacích stanic ČHMÚ a jsou doplněna daty ze stanic zdravotních ústavů, společnosti ČEZ, městských úřadů a dalších příspěvateľů. V databázi jsou též zahrnuty informace z příhraničních oblastí Německa a Polska. Území ČR je pro potřeby hodnocení kvality ovzduší rozděleno na zóny a aglomerace (ČHMÚ, 2012a). Zóny odpovídají území krajů a aglomerace jsou na území ČR 3: Praha, Brno a Ostravsko. Zvláštní pozornost je věnována i zóně Ústecký kraj.

Grafická ročenka (ČHMÚ, 2012a) obsahuje mapové podklady s rozlišením 1 x 1 km zpracované pomocí GIS. Mapy imisí jsou zpracovány na základě údajů z databáze naměřených hodnot, chemického složení srážek ze srážkoměrných stanic a modelových výpočtů vycházejících ze známých emisí. Mapy jsou poté podle potřeby manuálně upraveny na základě expertního odhadu jeho tvůrců. Pro modelování šíření emisí na území ČR se využívá model SYMOS 97, který počítá koncentrace na základě podrobných emisních inventur (ze systému REZZO) a meteorologických veličin pro období hodnoceného roku. Pro interpolaci některých veličin (např. ozón) jsou využity další veličiny (např. nadmořská výška). Důležitým faktorem je klasifikace a rozlišení reprezentativnosti stanic.

Hlavním úřadem, který se v rámci Evropské unie zabývá monitorováním znečištění ovzduší je *European Environment Agency* (Evropská agentura životního prostředí) zkráceně EEA. Konkrétně její podvýbor *Air and climate change* (Podvýbor pro změnu klimatu a kvalitu ovzduší). Součástí EEA jsou národní organizace všech 28 států EU + zástupci Islandu, Lichtenštejnska, Norska, Švýcarska a Turecka. EEA také spolupracuje s organizacemi z: Albánie, Bosny a Hercegoviny, Makedonie, Černé Hory, Srbska a Kosova. Celkem je tedy zastoupeno 33 členských zemí a 6 spolupracujících zemí.

EEA provozuje databázi údajů z imisních monitorovacích stanic z celé Evropy, kam přispívají jednotlivé členské organizace. Jedná se o databázi **AirBase** (EEA, 2011). Za ČR je přispěvatelem do AirBase ČHMÚ, který každoročně zasílá imisní data. Databáze obsahuje časové série dat o znečištění a metadata o stanicích. Pro představu lze uvést, že v roce 2009 databáze obsahovala data z (z toho českých):

- 2809 (124) stanic monitorujících PM₁₀,
- 798 (33) stanic monitorujících PM_{2,5},
- 3147 (89) stanic monitorujících NO₂,
- 2015 (73) stanic monitorujících SO₂,
- 1304 (29) stanic monitorujících CO,
- 2176 (60) stanic monitorujících O₃.

EEA vydává mnohé dokumenty o stavu kvality ovzduší a metodách jeho analýzy. Metody hodnocení vlivu PM_{10} a ozónu (O_3) na populaci a krajinu se zabývá studie (EEA, 2009). Tato práce obsahuje popis metod a výsledné mapy znečištění pokrývající téměř celou Evropu v rozlišení 10 x 10 km. Jsou zde uvedeny v praxi tři možné postupy tvorby map znečištění a to:

- využití pouze dat z pozemních monitorovacích stanic + souřadnice a výška stanice,
- kombinace pozemních dat a modelů šíření polutantů (lineární regresní model + interpolace reziduí),
- kombinace pozemních dat, modelů šíření polutantů a dalších doplňkových dat (např. meteorologická data nebo topografie terénu) vedoucí na vícenásobný lineární regresní model a interpolaci reziduí.

Mapy v (EEA, 2009) jsou vytvořeny více metodami, které se liší pro městské a venkovské oblasti a dle typu interpolovaného polutantu. Byly využity dva velice komplexní modely šíření polutantů na velké vzdálenosti a to model *Unified EMEP* s rozlišením 50 x 50 km vytvořený pod záštitou programu *European Monitoring and Evaluation Programme* a dále model *LOTOS-EUROS* (rozlišení 25 x 25 km) vytvořený pro vyhodnocení šíření plynných i pevných polutantů v ovzduší holandskými vědci. Práce dále obsahuje procentuální podíly populace vystavené zvýšeným hodnotám znečištění ovzduší v rámci celého modelovaného území a analýzu zdravotních dopadů (např. očekávaný počet předčasných úmrtí způsobených expozicí znečištěnému ovzduší).

1.5 Současné trendy v oblasti znečištění ovzduší

Kvalitu ovzduší na území celé Evropy a její trendy v letech 1999-2009 shrnuje publikace (EEA, 2011). Emise několika polutantů poklesly velmi významně v tomto období. Jedná se především o SO_2 a olovo (Pb). Na druhou stranu pokles v koncentracích PM a O_3 nebyl tak vysoký navzdory vysokému počtu zavedených opatření.

Ze zprávy plynou následující průměrné poklesy v koncentracích hlavních polutantů za sledované období:

- SO₂ pokles o 56%,
- PM₁₀ pokles o 16%,
- NO₂ pokles o 15%,
- NO_x pokles o 28%,
- CO pokles o 44%,
- O₃ - z důvodu nedostatku dat nebyl údaj publikován; pro známá data - stagnace koncentrací,
- těžké kovy (Pb a jiné) pokles o 70%.

I přes tyto skutečnosti jsou limitní hodnoty běžně překračovány. Následující tabulka shrnuje počet městského obyvatelstva, které žilo v letech 2006-2008 v oblastech překračujících jeden nebo více imisních limitů konkrétních polutantů dle EU a také dle přísnějších limitů WHO:

znečišťující látka	EU limit [% obyvatel]	WHO limit [% obyvatel]
SO ₂	0.3-2.3	68-85
PM ₁₀	18-40	80-90
NO ₂	7-19	7-19
CO	0-2	0-2
O ₃	16-50	95
Pb	< 1	< 1

Tab. 1.1: Evropské městské obyvatelstvo vystavené v letech 2006-2008 nadlimitním koncentracím znečišťujících látek (zdroj: EEA, 2011)

Z tabulky vidíme, že hodnoty se velmi liší v závislosti na zvoleném kritériu. WHO používá velice přísná kritéria, která se snaží vliv ovzduší na zdraví zcela minimalizovat. Kritéria stanovená EU, která jsou nicméně platná z pohledu naší legislativy, jsou méně přísná a v praxi lépe dosažitelná. Dále je třeba poznamenat, že se jedná o procentuální součet populace vystavené koncentracím znečištění přesahující jeden

nebo více imisních limitů. V některých případech se tak jedná pouze o krátkodobé (sezónní) překročení limitů.

Na území ČR v minulosti patřily mezi hlavní znečišťující látky SO_2 , NO_x a vysoká prašnost daná vysokou koncentrací PM. Po roce 1990 došlo k mnoha opatřením, která významně přispěla k redukci emisí (např. odsíření elektráren či zavedení tzv. EURO norem). V průběhu 90. let 20. století byl v ČR patrný klesající trend ve znečištění ovzduší SO_2 , PM_{10} , NO_2 a NO_x . Studie (Vágnerová, 2011) uvádí snížení znečištění na Mostecku až na trojnásobně nižší hodnoty oproti roku 1970. Emise poklesly např. pro SO_2 o 70-80% a pro PM_{10} o 50-60%. Vývoj je dán také poklesem produkce, změnou skladby průmyslu, renovací vozového parku a změnou používaných paliv. Skladba polutantů v ovzduší se nicméně v průběhu času měnila.

Pokles emisí se po roce 2000 zpomalil a pro některé polutanty kolísá rok od roku oběma směry. To je z části způsobeno nárůstem osobní silniční dopravy, a proto se situace v některých lokalitách začala opět zhoršovat. K tomu dále přispělo neodpovědné chování lidí, kteří využívají k topení v domácnostech nekvalitní či někdy dokonce zakázaná paliva. Kolísání koncentrací v průběhu roku je způsobeno aktuálními rozptylovými podmínkami či silou topné sezóny daného roku (ČHMÚ, 2012a). Emise ozónu O_3 na rozdíl od ostatních polutantů stoupají v teplých rocích. Do roku 2006 nebyl pozorován jasný trend kromě sezonních výkyvů způsobených teplými roky. Naopak od roku 2006 byl patrný mírný pokles i pro teplejší sezóny.

Z důvodu změny mixu polutantů v ovzduší probíhala v čase změna skladby a vybavení monitorovacích stanic. Například stanic pro SO_2 výrazně ubylo z důvodu zlepšené situace na našem území. Oproti tomu jak nasvědčují výzkumy tak frakce suspendovaných částic $\text{PM}_{2.5}$ má největší vliv na lidské zdraví, a proto postupně přibývá stanic měřících tento polutant.

Dalším z trendů (Pečka, 2014), který lze na našem území pozorovat je klesající podíl na vypuštěných emisích PM u zvláště velkých zdrojů znečištění spadajících do třídy REZZO 1 (patří sem např. elektrárny) a stoupající podíl zdrojů ze třídy REZZO 4 (mobilní zdroje - automobily apod.).

Pro srovnání lze také uvést trendy z jiného vyspělého státu a to z USA. Dle (EPA, 2016) mezi lety 1990-2014 v USA došlo k:

- 36% průměrnému poklesu v koncentracích PM_{10} ,
- 35% průměrnému poklesu v koncentracích $PM_{2.5}$ (2000-2014),
- 45% průměrnému poklesu v koncentracích NO_2 ,
- 76% průměrnému poklesu v koncentracích SO_2 ,
- 77% průměrnému poklesu v koncentracích CO.

Pozn. : jedná se o průměrně poklesy nejvyšších koncentrací na všech stanicích, u dlouhodobých průměrných hodnot lze očekávat o něco nižší hodnoty.

Z předešlých řádků plyne jasný závěr, že vlády vyspělých zemí jsou si problému znečištěného ovzduší dobře vědomy a zavedly již řadu opatření vedoucích ke zlepšení situace. Na druhou stranu situace ještě stále není tak dobrá, aby bylo možno vyloučit zdravotní rizika, která znečištěné ovzduší způsobuje. Situace v rozvojových zemích je pak o poznání horší, a proto tak celá problematika nadále neztrácí na aktuálnosti.

2 Látky znečišťující ovzduší - polutanty

Pojem "znečištěné ovzduší" je velice široký a pro laika možná ne zcela zřejmý. Pro příklad lze uvést několik případů známých v ČR mezi něž např: zimní smog spojený s inverzí v Ostravě, nezdravé ovzduší v blízkosti dálnice nebo kyselá deště, které se ještě v nepříliš dávné době vyskytovaly na Ústecku. Tyto tři případy zhoršené kvality ovzduší jsou vždy způsobeny jinou znečišťující látkou v ovzduší. Tyto látky se také nazývají *polutanty*. Tyto látky mají nepříznivé účinky na lidské zdraví a životní prostředí ve kterém žijeme.

Znečišťující látky v ovzduší lze obecně rozdělit na **primární** a **sekundární**. **Primární** polutanty jsou emitovány přímo do atmosféry buď z přírodních zdrojů (např. sopečná činnost nebo mořský aerosol), nebo z antropogenních zdrojů (lidská činnost). **Sekundární** polutanty vznikají až v atmosféře z jiných látek (z tzv. prekurzorů). Takto dochází například ke konverzi plyných látek (SO_2 , NO_x) na pevné částice. Hlavními zdroji znečištění v ČR jsou antropogenní polutanty z veřejné energetiky, dopravy či výrobních procesů (ČHMÚ, 2012a).

Polutantů je velké množství, ale některé z nich byly v minulosti vyhodnoceny jako významnější, a jsou proto nejčastěji měřeny a využívány pro hodnocení kvality ovzduší. Zdroj (EPA, 2016) uvádí seznam 6 monitorovaných polutantů (v angličtině *criteria air pollutants*), které jsou nejčastěji sledovány. Jedná se o:

- pevné suspendované částice - PM,
- oxid dusičitý - NO_2 ,
- oxid siřičitý - SO_2 ,
- oxid uhelnatý - CO,
- ozón - O_3 ,
- olovo - Pb.

Tento seznam stanovený Agenturou pro ochranu životního prostředí Spojených států Amerických se shoduje s polutanty, které jsou jako nejdůležitější vyhodnoceny i

v rámci Evropy potažmo ČR. Pro účely této práce bude vynecháno bude pouze olovo, které se u nás příliš neměří a nemá velký význam. V následujících sekcích budou popsány tyto nejdůležitější polutanty. Problematice se mimo již zmíněných prací věnuje také (Vágnerová, 2011).

2.1 Pevné suspendované částice - PM

Pevné suspendované částice se někdy nazývají polétavý prach, prašný aerosol či tuhé znečišťující látky. Obecně se jedná o tuhé látky o průměru větším než $0,5 \mu m$ vzniklé rozrušením původního materiálu nebo při různých spalovacích procesech. Mezi suspendované částice patří různorodé pevné látky v ovzduší s různým chemickým složením a velikostí. Obecně lze říci, že čím menší částice, tím více škodí zdraví, protože pronikají hlouběji do plic. PM způsobují podráždění sliznice, snížení imunity a při dlouhodobé expozici vedou k chronickým problémům a kardiovaskulárním potížím. V současnosti se rozlišují a odděleně měří dvě frakce pevných částic a to: **PM₁₀** a **PM_{2,5}**. Jedná se o všechny pevné částice ve vzduchu o aerodynamickém průměru menším než $10 \mu m$ (*hrubé částice*) resp. $2,5 \mu m$ (*jemné částice*).

Pro představu o velikosti těchto částic lze zmínit, že běžný lidský vlas má průměr $50 - 70 \mu m$. I přesto jsou některé druhy PM příčinou viditelného znečištění - smogu, se kterým se můžeme setkat ve městech při špatných rozptylových podmínkách. Jak bylo uvedeno v sekci 1.2 je zde předpoklad, že vliv ovzduší znečištěného PM na zdraví lidí nemá spodní hranici (tzn. i nízké koncentrace mají zdravotní vliv, i když snížený). Zdravotní rizika jsou různorodá daná koncentrací, velikostí a chemickým složením PM. Podle velikosti PM pronikají do dýchací soustavy, do plic a v extrémních případech až do krve.

Velké množství nejškodlivějších frakcí PM tedy především PM_{2,5} obsahují zplodiny obsažené ve výfukových plynech (Adamec, 2007). Tyto částice setrvávají v ovzduší po dlouhou dobu a mají toxické a karcinogenní účinky na populaci zejména ve velkých městech s intenzivní dopravou. Emise PM navíc nevznikají jen při spalovacích procesech, ale také při otěrech pneumatik o vozovku nebo při obrušování

spojkového a brzdového obložení. Množství PM produkovaných dopravou v ČR od roku 1990 roste.

Problematikou znečištění pevnými částicemi se podrobně zabývá publikace (NEAA, 2005). Je zde uvedeno, že na území Nizozemí je přibližně 45% pevných částic v ovzduší antropogenního původu. Zbylých 55 % je přírodního původu kam patří především mořská sůl či půdní prach. Ve studii je znázorněna mapa, kde se vzrůstající vzdáleností od moře klesá objem mořské soli v celkovém objemu PM, a proto se dá předpokládat, že v ČR bude tento poměr více ve prospěch antropogenních částic PM. Dále je zde uveden předpoklad, že až 2/3 veškerého množství antropogenních pevných částic pochází ze zdrojů mimo Nizozemí a dochází tedy k velkému objemu dálkového transportu. Mezi hlavní domácí zdroje patří silniční doprava, u které k dálkovému transportu příliš nedochází. Publikace dále zmiňuje vliv PM na tzv. *skleníkový efekt*, který způsobuje oteplování atmosféry Země.

V rámci ČR se situace znečištěním PM dlouhodobě příliš nezlepšuje a na mnoha stanicích dochází k překračování mezních hodnot (nejčastěji na Ostravsku). Výskyt PM v ovzduší je silně ovlivněn sezónou (v topné sezóně je zvýšený výskyt) a horšími rozptylovými podmínkami (při inverzi a slabém větru zvýšený výskyt).

2.2 Oxidy dusíku - NO_x a NO_2

Na začátek je třeba zmínit rozdíl mezi oxidem dusičitým NO_2 a oxidy dusíku NO_x . NO_x označuje souhrn NO (oxidu dusného) a NO_2 . Tyto dvě látky jsou emitovány současně (obvykle se silnou převahou NO) a poté se část NO mění na NO_2 (reakcí s přízemním ozónem). Pro lidské zdraví je škodlivý NO_2 (jsou pro něj stanoveny imisní limity). Pro ochranu ekosystémů a vegetace je škodlivý i NO , a proto se stanovuje souhrnný imisní limit pro NO_x (ČHMÚ, 2012a). V současnosti při výrazně snížených koncentracích SO_2 začínají být NO_x převažující polutanty působící na vegetaci. Emise NO_x vznikají nejvíce při spalování fosilních paliv v silniční dopravě. Emise vznikají i přírodní činností a to především vulkanickou činností. Avšak v rámci Evropy je jejich podíl zanedbatelný.

NO₂ patří do skupiny vysoce reaktivních plynů a je spojován s velkým množstvím negativních onemocnění dýchací soustavy lidí. Současné vědecké poznatky ukazují jak na vliv krátkodobé expozice velmi vysokým koncentracím NO₂ (např. problémy s dýcháním u astmatiků), tak na dlouhodobý vliv na zdraví lidí žijících ve znečištěných oblastech.

Monitorovací stanice v blízkosti frekventovaných dálnic mají koncentrace NO₂ o 30-100% vyšší než stanice mimo dosah těchto komunikací (EPA, 2016). NO₂ se poměrně rychle rozptyluje, a proto lidé žijící v těsné blízkosti frekventovaných silnic mohou být vystaveni výrazně vyšším koncentracím tohoto polutantu než vykazují měření, pokud jsou monitorovací stanice umístěny mimo dosah těchto vlivů. V rámci celé Evropy dochází k pravidelnému překračování imisních limitů na tzv. dopravních stanicích (hot-spot).

Dále je třeba poznamenat, že současná legislativa zavádějící EURO normy pro motorová vozidla sice snížila celkové emise NO_x vypuštěné jednotlivými automobily, avšak moderní diesellové motory produkují poměrově výrazně více škodlivějšího (pro zdraví lidí) NO₂ vůči NO než starší motory (EEA, 2011).

Oxidy dusíku dále způsobují také výrazné sekundární znečištění. Při chemických reakcích s jinými látkami v ovzduší mohou měnit skupenství na pevné a formovat pevné částice (PM). Dále se mohou měnit na O₃ především za současného působení tepla a slunečního svitu.

2.3 Oxid siřičitý - SO₂

SO₂ je bezbarvý, nehořlavý a reaktivní plyn a vzniká především spalováním fosilních paliv a tavením rud s obsahem síry. Spalování uhlí je největší antropogenní zdroj emisí SO₂, který může až za 50% ročních emisí ve světě. SO₂ existuje také přírodního původu a uvolňuje se sopečnou činností. V atmosféře dochází k chemickým reakcím a tvorbě aerosolu v kapalně nebo i pevně formě. To může vést k tzv. "kyselým deštům".

SO₂ působí negativně na funkci plic a ve velmi vysokých koncentracích má dráždivé účinky. Studie ukázaly zvýšený výskyt ambulantních ošetření mezi astmatiky,

děťmi a staršími lidmi, u kterých došlo k pobytu v prostředí znečištěném SO_2 . Mimo to působí negativně na ekosystém a vegetaci, a proto jsou stanoveny imisní limity pro ochranu lidského zdraví i vegetace. SO_2 způsobuje zvýšenou kyselost půdy a vodních zdrojů, kde setrvává po dlouhou dobu.

Mimo jiné je SO_2 často prekurzorem ostatních polutantů a mění se na pevné částice především té nejjemnější frakce - $\text{PM}_{2.5}$ (EEA, 2011). Nicméně výskyt SO_2 v ovzduší, měl hlavně díky odsíření elektráren a zavedení přísnějších limitů obsahu síry v palivech, v posledních letech významný klesající trend (sekce 1.5). V posledních letech je tak situace znečištění SO_2 na území ČR dobrá, k překračování mezních hodnot prakticky nedochází a jeho vlivy jsou minimalizovány (ČHMÚ, 2012a).

2.4 Oxid uhelnatý - CO

CO je bezbarvý plyn bez zjevného zápachu. Jeho zdrojem jsou procesy při nichž dochází k nedokonalému spalování fosilních paliv. Jeho největším zdrojem jsou mobilní zdroje - doprava a v druhé řadě také domácí topeniště při spalování nevhodného či přímo zakázaného paliva. Zvýšená koncentrace CO ve vzduchu způsobuje bolesti hlavy, snižuje pozornost a zhoršuje transport kyslíku v krvi. CO je nejnebezpečnější pro lidi, kteří již mají sníženou schopnost transportu kyslíku (srdeční onemocnění) a může přispět ke zvýšenému riziku srdečních selhání.

CO obvykle setrvává v atmosféře po dobu několika měsíců a pozvolna se mění na silný skleníkový plyn CO_2 . Nicméně emise CO v posledních 20 letech silně poklesly s modernizací vozového parku. Moderní motory a katalyzátory významně snížily obsah CO ve výfukových plynech automobilů. V rámci ČR tak v posledních letech k překračování imisních limitů pro CO nedochází (ČHMÚ, 2012a).

2.5 Ozón - O_3

V případě O_3 se rozlišují dva druhy. Za prvé je to stratosférický ozón, který se formuje v horních vrstvách atmosféry a chrání nás před negativními vlivy UV záření. Tento druh ozónu je často zmiňován jako "dobrý ozón", který nás chrání a jehož nedostatek

(ozónové díry) je problém. Druhým typem ozónu, který je problematický z hlediska znečištění ovzduší a kterému se věnují následující řádky, je tzv. *přízemní ozón*.

O₃ je tzv. sekundární znečišťující látkou v ovzduší, protože není emitován do ovzduší přímo lidskou nebo jinou činností. Vzniká chemickou reakcí za účinku slunečního záření a prekurzory, mezi které patří: NO_x, CO, těkavé organické látky a další (ČHMÚ, 2012a). Největší míra znečištění ozónem proto bývá v letních měsících (na rozdíl od ostatních polutantů) a to jak v městských, tak venkovských oblastech. Mezi nejvýznamnější zdroje znečištění, které vedou právě ke vzniku O₃, patří průmysl a silniční doprava.

Dýchání O₃ může vést k poškození dýchací soustavy především u astmatiků a starších lidí. V kombinaci s dalšími látkami přispívá k viditelnému znečištění - smogu. O₃ je také prokazatelně toxický pro vegetaci. Působí nepříznivě na rostliny, brání jim v růstu a snižuje jejich schopnost měnit CO₂ na kyslík (fotosyntéza) čímž působí negativně na celou planetu.

Výskyt a vliv ozónu je silně ovlivněn geografíí a ukazuje pozitivní korelaci s rostoucí nadmořskou výškou. Dále je v Evropě viditelný jasný gradient, kde v jižních státech jsou měřené koncentrace výrazně vyšší než v severních státech (EEA, 2011). Analýza dlouhodobého trendu koncentrace O₃ musí zohledňovat jeho ovlivnitelnost meteorologickými podmínkami dané sezóny (proto nelze vždy tvrdit, že imise ozónu prokazatelně poklesly nebo stouply, pokud byla sluneční aktivita výrazně jiná od předešlých let).

2.6 Ostatní znečišťující látky

Mezi další látky nepříznivě ovlivňující ovzduší patří následující polutanty, které nebudou podrobně rozebrány, protože nejsou součástí dat této diplomové práce a nejsou ve velké míře měřeny Českým hydrometeorologickým úřadem.

- Benzen a benzo(a)pyren,
- sulfan,
- těžké kovy: olovo, kadmium, arsen, nikl či rtuť,

- amoniak,
- polycyklické aromatické uhlovodíky,
- těkavé organické látky,
- skleníkové plyny: oxid uhličitý, metan nebo jiné fluorované plyny.

Některé z těchto látek (např. těžké kovy) mají závažné účinky na zdraví lidí. Často mnohem závažnější než jiné polutanty uvedené v dřívějších sekcích. Nicméně ve většině vyspělých zemí je situace s těmito látkami v ovzduší na dlouhodobě dobré úrovni, a proto již nejsou ve vysoké míře sledovány a vyhodnocovány. Významnější problém dnes představuje snad jen látka **benzo(a)pyren**, která dosahuje nadlimitních hodnot v řadě evropských lokalit (EEA, 2011). Tato látka se přidává jako aditivum do pohonných hmot nebo vzniká při spalování dřeva. Je karcinogenní a přenáší se na velké vzdálenosti.

2.7 Metodika posuzování znečištění

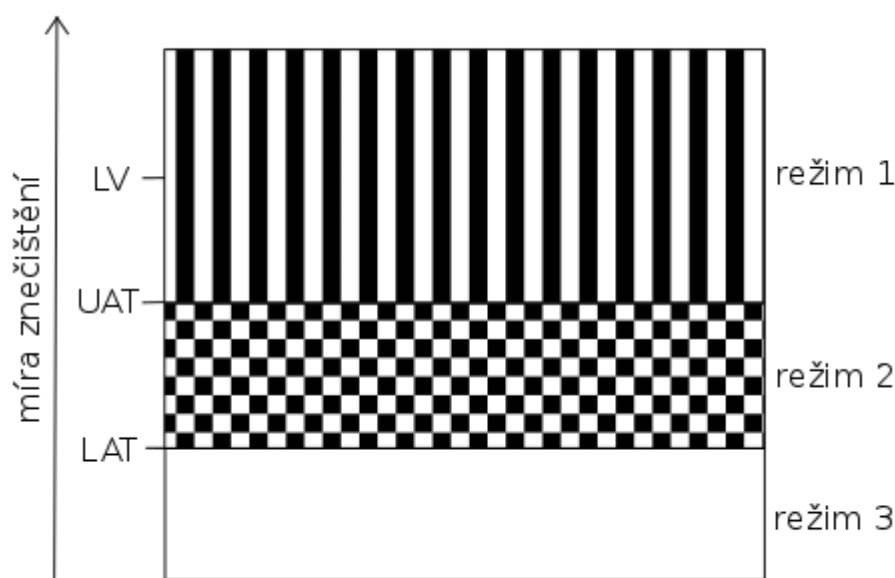
Po vstupu ČR do EU došlo k převzetí metodiky posuzování znečištění stanovené evropskými směrnici. Jednalo se nejprve o směrnici EU 99/30/EC a poté o 2008/50/ES (Evropský parlament, 2008). Postupy hodnocení kvality ovzduší jsou popsány mimo jiné také v (VÚRV, 2008). Evropská legislativa vymezila povinnost členských států rozdělit své území do zón (odpovídají našim krajům) a aglomerací (souvislé osídlení, kde žije více než 250 000 obyvatel), v rámci kterých se hodnotí kvalita ovzduší.

Stanovení kvality ovzduší má pokrývat celou hodnocenou oblast, a proto se provádí na základě kombinace měření koncentrací v ovzduší - imisí, modelování a odborných odhadů. Předností modelů je fakt, že jsou spojitě a mohou lépe vystihovat některé zákonitosti spojené se šířením polutantů, ale obecně jsou méně přesné než hodnoty získané měřením. Určené imisní úrovně jsou porovnávány se 4 postupně narůstajícími úrovněmi míry znečištění ovzduší:

- dolní prahová hodnota - lower assessment threshold (**LAT**),

- horní prahová hodnota - upper assessment threshold (**UAT**),
- imisní limit - limit value **LV**,
- toleranční mez - margin of tolerance **MT**.

Pro každou znečišťující látku jsou stanoveny v příslušné směrnici tyto prahové resp. limitní hodnoty. Posuzování znečištění ovzduší pak probíhá dle zásad stanovených směrnici. Jestliže bude v průběhu **posledních 5 let třikrát a více** překročena mez LAT nebo UAT je třeba přejít na přísnější režim monitoringu znečištění. Situace je znázorněna v obrázku 2.1.



Obr. 2.1: Režimy posuzování znečištění

Pro zóny a aglomerace spadající do režimu 1 platí, že měření jsou nadále povinná s předepsanými počty stanic stanovenými směrnici (Evropský parlament, 2008). Pro zóny a aglomerace spadající do režimu 2 platí, že měření je povinné, ale je možné zvolit nižší počet monitorovacích stanic (směrnice nicméně stanovuje minimální počet) nebo použít jiné metody měření, za předpokladu doplnění dat informacemi z jiných zdrojů. Pro režim 3 se postup liší pro zóny, ve kterých stačí odhadovat znečištění pouze za pomoci modelování a pro aglomerace, kde se vyžaduje minimálně 1 monitorovací stanice na aglomeraci doplněná modelováním.

Při překročení hodnoty LV je daná oblast zařazena mezi oblasti se zhoršenou kvalitou ovzduší (OZKO) a je nutno pro ni vytvořit tzv. *plán kvality ovzduší*. Tento plán by měl v co nejkratší době zavést opatření, která sníží znečištění pod limitní úroveň. To se může projevit např. na udělování povolení pro průmyslové činnosti nebo regulací dopravy (Evropský parlament, 2008).

Platné imisní limity na území ČR v roce 2011 pro vybrané polutanty uvádí tabulka 2.1 (ČHMÚ, 2011). Imisní limity vycházejí z platné legislativy v roce 2011.

znečišťující látka	doba průměrování	LAT [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	UAT [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	LV [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	MT [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
PM ₁₀	rok	20	28	40	48
NO ₂	rok	26	32	40	60
SO ₂	24 hodin	50	75	125	-
CO	24 hodin	5000	7000	10000	-
O ₃	24 hodin	-	-	120	-

Tab. 2.1: Platné imisní limity pro ochranu zdraví lidí v roce 2011

Ve zdroji pro data (ČHMÚ, 2011) byla autorem této práce nalezena chyba v hodnotách LAT a UAT pro polutant PM₁₀. Tyto hodnoty jsou chybně uvedeny v poloviční výši 10 resp 14 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, které neodpovídají hodnotě dohledatelné v platné evropské legislativě. Mimo limitů pro ochranu zdraví lidí jsou také stanoveny limity pro ochranu vegetace a ekosystémů pro SO₂, NO_x a O₃ (tabulka 2.2).

znečišťující látka	doba průměrování	LAT [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	UAT [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	LV [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	MT [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
NO _x	rok	19.5	24	30	-
SO ₂	rok	8	12	20	-
O ₃	květen-červenec	-	-	6000*	-

* - jedná se o hodnotu tzv. AOT40, která je součtem koncentrací nad limit 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Tab. 2.2: Platné imisní limity pro ochranu ekosystémů a vegetace v roce 2011

Z hlediska této práce budou relevantními hodnotami roční prahové a limitní hodnoty pro PM₁₀ a NO₂ pro ochranu zdraví lidí. Roční limit pro SO₂ není stanoven a 24 hodinová data nejsou k dispozici. Lze alespoň posoudit roční vliv SO₂ na ekosystémy a vegetaci (tab 2.2). Polutanty CO a O₃, jak již bylo zmíněno, nejsou pro nedostatek dat analyzovány.

3 Popis použitých dat

Data o znečištěném ovzduší lze v souladu se současnými poznatky rozdělit na emisní a imisní data. V závislosti na použitých datech se pak liší postup interpolace prostorového rozložení koncentrace polutantů. V rámci této práce jsou zdrojovými daty měřené koncentrace polutantů v ovzduší nebo-li imisní data. Pro interpolaci emisních dat je nutné využít jeden z modelů šíření látek v ovzduší, které byly uvedeny v sekci 1.3. Imisní data někdy nedokážou vystihnout všechny specifika např. městského prostředí z důvodu nízkého počtu monitorovacích stanic. Z tohoto důvodu byla zdrojová data této práce doplněna o dopravní data.

Doprava je v současnosti na území ČR a obecně Evropy velice významným zdrojem znečištění. Podíl průmyslu na znečištění naopak klesá v důsledku přesunu výroby do Asie a také kvůli technologiím, které snižují množství vypouštěných škodlivin. Pokles průměrných emisí vypuštěných automobilem v rámci Evropy sice také klesá, ale počty aut a ujetých kilometrů každoročně stoupají, a proto se situace ohledně dopravního znečištění nezlepšuje. Ve výfukových plynech je obsaženo velké množství polutantů např. CO, NO_x, SO₂ nebo PM (Adamec, 2007). Navíc jak bylo zmíněno v sekci 2.1 množství PM produkovaných dopravou v ČR setrvale roste. Dopravní znečištění je silně lokální a má zřejmou prostorovou korelaci s polohou vytížených silnic. Využití dopravních data pro účely této práce bude popsáno v části 3.2.

3.1 Data z imisních monitorovacích stanic

Jak již bylo zmíněno v sekci 1.4 imisní data na území ČR pocházejí z ISKO. Databáze ISKO obsahuje za referenční rok 2011 jak krátkodobá data na úrovni denních průměrných koncentrací, tak dlouhodobá data na úrovni roční průměrné koncentrace. Pro účely této práce byla využita dlouhodobá data. Monitorovací stanice v ISKO jsou klasifikovány dle (ČHMÚ, 2012a) na:

- dopravní (stanice přímo ovlivněná dopravou, umístěná do 50 m od komunikace s velkou intenzitou dopravy, stanice by měla reprezentovat linii v co nejdelší délce),

- průmyslová (stanice přímo ovlivněná průmyslem, umístěná v areálu továrny),
- pozadřová (stanice v nezatižených lokalitách, měřící pozadí regionů, měst a průmyslových oblastí), pozadřové stanice se dále dělí na:
 - městská,
 - předměstská,
 - venkovská.

Důležitým parametrem pro správnou interpretaci imisních dat je jejich reprezentativnost. Každá stanice se nachází v unikátním prostředí a každá svým měřením reprezentuje jiné okolí. Například stanice umístěná v centru města bude těžko reprezentovat jeho předměstí, které je sice jen několik km vzdálené. Na druhou stranu venkovská stanice umístěná na kopci v krajině může reprezentovat kvalitu ovzduší v okruhu několika desítek km. Správné rozlišení těchto skutečností je nezbytné pro správnou interpolaci dat z bodových měření imisních stanic do spojitého prostoru. V databázi ISKO jsou u každé stanice vedeny údaje o reprezentativnosti daného měření. Reprezentativnost je dána přibližným poloměrem (rádiusem), pro který lze považovat data za validní. Kategorie jsou následující (ČHMÚ, 2016) :

- mikroměřítko (do 100 m),
- střední měřítko (100 - 500 m),
- okrskové měřítko (0,5 - 4 km),
- oblastní měřítko - městské nebo venkovské (4 - 50 km),
- oblastní měřítko - regionální (desítky až stovky km).

Jak lze vidět kategorie jsou relativně široce vymezené. Je to z důvodu složitosti atmosféry, kde působí obrovské množství vlivů a odhadnout šíření polutantů v ovzduší je náročné. Nicméně i tato hrubá kategorizace monitorovacích stanic je prospěšná pro zlepšení kvality výsledků interpolace.

Imisní data za rok 2011 pocházejí z tabelární ročenky (ČHMÚ, 2012b). Jedná se o roční průměrné koncentrace PM_{10} , NO_2 a SO_2 z imisních monitorovacích stanic,

kde došlo k dostatečnému počtu měření umožňující výpočet ročního průměru. Souřadnice stanic v systému WGS-84 byly získány z portálu ČHMÚ. Data, která tedy obsahují informace o poloze, výšce, reprezentativnosti, měřené veličině dané stanice a roční průměrné koncentraci, byla naimportována jako bodová vrstva do systému ArcGIS.

3.2 Dopravní data

Data o hustotě silničního provozu na vybraných komunikacích pocházejí ze sčítání dopravy v roce 2010 (ŘSD, 2011). Sčítání dopravy neprobíhá každoročně, ale obvykle jednou za 5 let. Lze předpokládat, že pro referenční rok 2011 se situace oproti roku 2010 příliš nezměnila. Z tohoto důvodu jsou využita právě tato data. Sčítání dopravy probíhá pouze na dálnicích a silnicích vyšších tříd. Výsledkem jsou průměrné denní intenzity v počtu vozidel za 24 hodin pro jednotlivé úseky komunikací. Pro potřeby této práce byly použity pouze úseky silnic, kde je denní intenzita dopravy nad 10 000 aut denně v rámci Prahy a přibližně nad 6 000 aut denně v kraji Vysočina a Ústeckém kraji. V těchto krajích je hustota silničního provozu obecně mnohem nižší a počet použitých úseků je nižší než v Praze. Dá se předpokládat, že ostatní komunikace jsou také zdroji znečištění, nicméně největší vliv mají nejvytíženější komunikace, které byly do práce zahrnuty.

Pro kompatibilitu dat je třeba data o hustotě provozu správně interpretovat vzhledem k imisním datům. Pro tyto účely byla provedena vlastní analýza. Byly zvoleny dopravní stanice typu hot-spot (stanice velmi exponované dopravě). Byly analyzovány jejich průměrné koncentrace z několika let. Jak bylo dříve uvedeno analýza bude provedena pouze pro polutanty SO_2 , PM_{10} a NO_2 . Prvotní prohlídkou těchto dat bylo zjištěno, že koncentrace SO_2 naměřené na dopravních stanicích nevykazují vyšší hodnoty než běžné stanice. To vcelku jasně odpovídá faktům uvedeným v předchozí kapitole, že tento polutant dnes v hlavní míře pochází ze stacionárních zdrojů a díky směrnici regulující obsah síry v palivech je vliv dopravy zanedbatelný. Dále byly tedy analyzovány pouze údaje o koncentracích PM_{10} a NO_2 . Data jsou uvedena v tabulce 3.1.

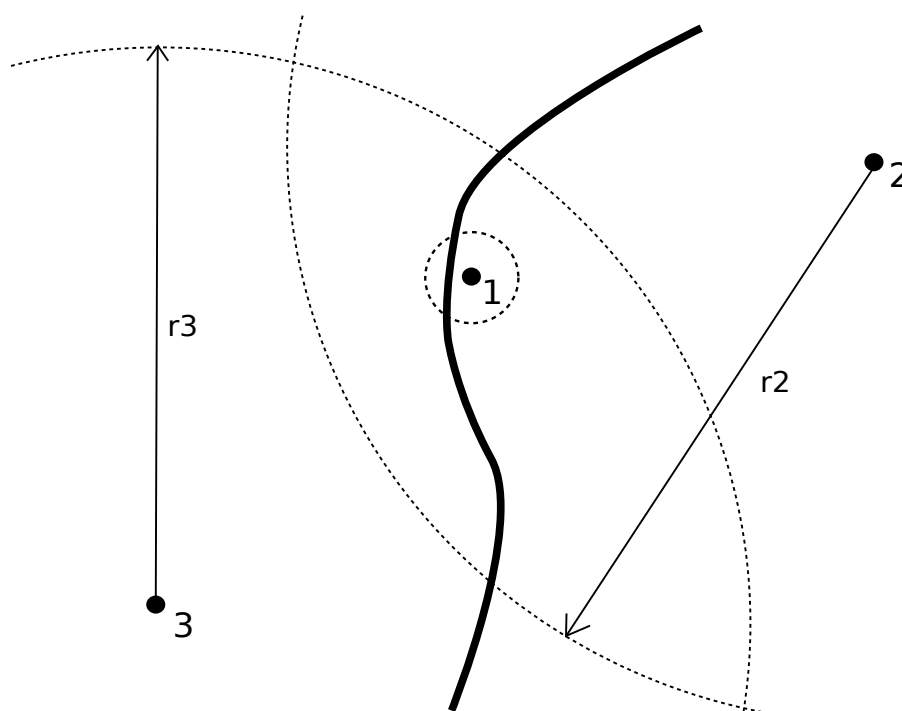
Lokalita	rok	průměr aut denně	roční koncentrace PM ₁₀ [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	roční koncentrace NO ₂ [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
Praha-Legerova	2012	84000	28.3	57.7
Praha-Legerova	2011	83000	33.6	69.5
Praha-Legerova	2010	82000	33.9	67.3
Brno hot-spot	2011	24000	30.7	48.2
Brno hot-spot	2010	24000	34.5	51.8
Brno Svatoplukova	2011	42000	39	39.4
Brno Svatoplukova	2010	42000	43.7	45.2
Ostrava hot-spot	2011	20000	43.6	46.3
Ostrava hot-spot	2010	20000	44.5	50.9
Ústí n. L. hot-spot	2011	20000	36.2	38.1
Ústí n. L. hot-spot	2010	20000	35.4	47.8
Brno Lány	2011	59000	35.1	29.6
Brno Lány	2010	58000	33.1	30.0
Hradec Kr. - Brněnská	2011	26000	30.9	24.3
Hradec Kr. - Brněnská	2010	26000	29.5	25.7

Tab. 3.1: Analýza dopravních stanic

Pro tuto sadu dat nelze vyjádřit jednoznačnou závislost koncentrace polutantů na počtu projíždějících aut. Zobrazení do grafu neukazuje zřejmý trend. To je pravděpodobně způsobeno několika vlivy. V průměrných denních počtech vozidel se nedá vyčíst informace o jejich stáří či rozlišení osobních a nákladních aut. Uvedené stanice jsou ve městech, kde působí mnoho vlivů a jsou také různě umístěny vůči komunikacím (v rozsahu cca 4 - 400 m od komunikací). Stanovení přesné závislosti koncentrací PM₁₀ a NO₂ na vytíženosti dané komunikace je tedy velice problematické a mimo rozsah této diplomové práce.

Nicméně jednoznačně lze porovnáním s jinými stanicemi prohlásit, že tyto dopravně exponovanější lokality vykazují významně vyšší koncentrace polutantů PM₁₀ a NO₂ než stanice, které jsou ve srovnatelném prostředí, ale nejsou přímo exponované dopravě. Do značné míry tedy bylo přistoupeno k extrapolaci dat, která přispěje ke znatelnému zkvalitnění výsledných map znečištění. Princip problému je znázorněn na obrázku 3.1.

V obrázku je znázorněna situace ve městě, kterým prochází vytížená komunikace (silná plná čára). Nacházejí se zde tři monitorovací stanice z nichž: stanice č. 1 je dopravní (hot-spot) stanicí, která má velmi malý poloměr reprezentativnosti



Obr. 3.1: Modelová situace určení dopravního znečištění

(tečkovaná čára); stanice č.2 a 3 jsou běžné městské stanice s větším poloměrem reprezentativnosti (r_2 a r_3). Z analýzy dat vyplynulo, že stanice č. 1 vykazuje zvýšené koncentrace PM_{10} a NO_2 . Nicméně její reprezentativnost je dána malou hodnotou (malým poloměrem). Výsledná interpolace mapy znečištění by byla zkvalitněna postupem, který by měřenou hodnotu ze stanice č. 1 extrapoloval podél celé délky komunikace. Tento postup je v této práci použit a více o něm bude pojednáno v sekci 5.1.

K tomuto tématu lze také zmínit studii (Adamec, 2006). Studie provedla analýzu dat naměřených v letech 2005 a 2006 na vybraných dopravních lokalitách v ČR. Měřená data obsahovala koncentrace PM. Studie uvádí jasný závěr zvýšené koncentrace PM v ovzduší v blízkosti vytížených silnic. Distribuce částic do okolí je silně sezónní záležitostí v závislosti na rozptylových podmínkách. V dlouhodobém horizontu lze nicméně konstatovat, že ovzduší v blízkosti vytížených komunikací je znatelně znečištěnější. Průměrná koncentrace PM_{10} v dopravně exponovaných lokalitách dosáhla hodnoty $39 \mu g/m^3$, což je pro daný rok hodnota významně nadprůměrná v porovnání s dopravně ne-exponovanými stanicemi.

3.3 Demografická data

Demografické údaje v podrobnosti na úrovni obcí pocházejí z databáze ArcČR 500. Tato digitální vektorová databáze vznikla ve spolupráci společnosti ARCDATA PRAHA, s.r.o., Zeměměřického úřadu a Českého statistického úřadu a je distribuována zdarma. V souladu s licenčními podmínkami bude u vypracovaných map uvedeno označení původu dat. Databáze ArcČR 500 je vedena v závazném státním systému JTSK a administrativní jednotky jsou vedené jako polygonová data. Použité administrativní jednotky se známými demografickými daty jsou na úrovni obcí a obsahují data ze sčítání obyvatelstva z roku 2011. Pro účely této práce se jedná především o: počty obyvatel, počty obyvatel do 15 let a počty obyvatel nad 65 let.

Pro oblast Prahy nejsou v databázi dostupné demografické údaje pro jinou podrobnost než pro celé hlavní město. To je pro potřeby této práce nedostatečné. Demografické údaje na úrovni městských obvodů a městských částí byly k vektorovým datům reprezentujícím tyto sídelní jednotky doplněny ze statistických údajů poskytovaných magistrátem hlavního města Prahy (ÚRHP Praha, 2012). Dělení Prahy na městské obvody a městské části je uvedeno v následující tabulce.

Městská část/obvod	Městská část/obvod	Městská část/obvod
Praha 1	Královice	Kunratice
Praha 2	Křeslice	Libuš
Praha 3	Nedvězí	Praha 12
Praha 4	Satalice	Velká Chuchle
Praha 5	Praha 22	Lysolaje
Praha 6	Praha 21	Nebušice
Praha 7	Vinoř	Praha 17
Praha 8	Lipence	Praha-Suchdol
Praha 9	Lochkov	Đáblice
Praha 10	Přední Kopanina	Dolní Chabry
Běchovice	Praha 16	Čakovice
Benice	Řeporyje	Troja
Březiněves	Slivenec	Praha 19
Dolní počernice	Praha 13	Praha 14
Dubeč	Šeberov	Dolní Měcholupy
Praha 20	Újezd	Praha 15
Klánovice	Zbraslav	Petrovice
Koloděje	Zličín	Šterboholy
Kolovraty	Praha 11	Praha 18

Tab. 3.2: Členění Prahy na městské obvody a části

4 Interpolační metody

Data o znečištění, uvedená v předchozí kapitole, jsou diskrétní imisní data známá pouze v konkrétních bodech resp. liniích v prostoru. Pro analýzu expozice populace žijící na plošném území je vhodné z těchto dat vytvořit spojité mapy znečištění. Je tedy třeba určit hodnoty i v místech, kde nebylo provedeno měření resp. nejsou známa dopravní data. Toho se docílí interpolací sledovaného jevu. Vždy je třeba mít na paměti, že každá interpolační metoda poskytuje výsledky zatížené nepřesnostmi. Úkolem odborníků je vybrat nejvhodnější metodu, která tyto nepřesnosti minimalizuje. Práce (Křikavová, 2009) uvádí několik dělení interpolačních metod na:

- **deterministické a stochastické,**
- globální a lokální,
- exaktní a aproximující,
- metody váženého průměru a metody bázových funkcí.

Deterministické metody poskytují exaktní matematický model pouze na základě měřených hodnot. Oproti nim stochastické metody pracují s prvky statistiky (geostatistiky) resp. náhody a výsledná predikce hodnot je založena na prostorové korelaci blízkých hodnot. Metody globální zahrnují do výpočtu odhadu v určovaném bodě hodnoty ve všech měřených bodech na rozdíl od lokálních metod, které pracují např. s fixním okolím a vybírají malou část měřených bodů. Exaktní metody se vyznačují tím, že vždy perfektně zachovávají hodnoty v měřených bodech. Aproximující metody toto nemusí z principu dodržet a hledají nejlepší odhad pro celou plochu. Metody váženého průměru, jak plyne z jejich názvu, používají pro výpočet neznámých hodnot matematickou formuli váženého průměru. Kdežto metody bázových funkcí hledají neznámé hodnoty jako lineární kombinaci předem daných bázových funkcí.

V následující sekci bude popsáno několik interpolačních technik, které jsou vhodné pro interpolaci dat znečištění ovzduší dle prvního z uvedených dělení.

4.1 Deterministické metody

Do této kategorie patří například metody: metoda přirozeného souseda, spline, metoda trendu nebo IDW (metoda inverzních vzdáleností). Popis těchto metod lze nalézt např. v (Křikavová, 2009). Metoda přirozeného souseda je velice jednoduchá metoda, která nalezne využití spíše v případech velkého počtu měřených dat v pravidelné síti. Tuto vlastnost zdrojová data této práce nemají, a proto by byla metoda nevhodná. Metody spline a trend pracují s faktem, že sledovaný jev je popsitelný nějakou matematickou funkcí (např. polynomickou). Rozložení koncentrací polutantů v ovzduší závisí na mnoha faktorech a toto obecně nelze předpokládat. Z povahy dat znečištění ovzduší se pak jako jediná vhodná metoda jeví metoda IDW, která zde bude popsána.

Zkratka IDW pochází z anglického pojmu *Inverse distance weighting*. Metoda pracuje s faktem, že bližší místa v prostoru mají podobnější hodnoty. Matematická formule je velice jednoduchá. Jedná se o vážený průměr kde váha w klesá s rostoucí vzdáleností d :

$$w_i = \frac{1}{d_i^n}.$$

w_i vyjadřuje váhu i -tého známého bodu v bodě interpolovaném. Tyto body jsou od sebe ve vzdálenosti d_i . Mocnina n u vzdálenosti se volí dle povahy sledovaného jevu. Pro jevy, u kterých klesá podobnost s rostoucí vzdáleností rychleji, se volí vyšší mocniny. Obvykle se n volí v rozsahu 1 - 3. Výsledný odhad interpolované veličiny z ve zkoumaném bodě \hat{z} je tedy dán váženým průměrem:

$$\hat{z} = \frac{\sum w_i z_i}{\sum w_i},$$

kde z_i je hodnota sledovaného jevu (např. koncentrace polutantu) v i -tém známém bodě. Z povahy této metody je jasné, že interpolované hodnoty budou vždy ležet v intervalu vymezeném maximálními měřenými hodnotami. A proto je důležité, aby výchozí data obsahovala měření v místech extrémů.

4.2 Stochastické metody

Stochastické metody, jak již bylo zmíněno, spojují postupy interpolace a geostatistiky. Geostatistika je v rámci technologií GIS důležitá vědní disciplína a věnuje se jí dlouhá řada prací. Namátkou lze uvést: (Oliver, Webster, 2015), (Špička, 2015), (Stein, 1999) či (Juříková, 2010), ze kterých byly čerpány informace pro následující řádky.

Geostatistika se rozvíjela přibližně od 50. let 20. století v souvislosti s průzkumy ložisek surovin. V dnešní době se postupů geostatistiky používá v mnoha oborech např. v: těžarství, zemědělství a v neposlední řadě také v oboru mapování environmentálních rizik. Výhodou geostatistických postupů je to, že poskytují nejlepší a nestranný odhad a umožňují odhadnout chyby modelu. Geostatistická technika odhadu neznámých hodnot se nazývá **kriging**.

Kriging vyžaduje matematický model pro popsání prostorové korelace interpolované veličiny. Tento model se hledá ve tvaru *variogramu* častěji nazývaného *semivariogramu*. Je to funkce vyjadřující vzájemnou závislost hodnot sledovaného jevu v prostoru (v závislosti na vzájemné vzdálenosti, ale někdy i směru). Hodnoty semivariogramu tzv. *semivariance* γ se určují podle vztahu (Špička, 2015):

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n(h)} \sum (z(x_i + h) - z(x_i))^2.$$

Tento vztah udává semivarianci pro všechny páry bodů ve vzdálenosti h , počet párů takto vzdálených bodů je $n(h)$, měřené hodnoty v bodech x_i jsou $z(x_i)$ a měřené hodnoty v bodech vzdálených h jsou $z(x_i + h)$.

Rozlišujeme semivariogram experimentální založený pouze na měřených hodnotách a teoretický založený na matematické funkci, kterým se snažíme co nejlépe proložit variogram experimentální. Nejčastější typy funkcí experimentálního variogramu uvádí (Oliver, Webster, 2015):

- lineární funkce,
- mocninné funkce,
- sférický model,

- exponenciální model,
- vícenásobný sférický model.

Semivariogram může být isotropický (stejný ve všech směrech) nebo anizotropický (různý v různých směrech) v závislosti na charakteru dat. Další důležitou charakteristikou variogramu jsou 3 hodnoty udávané anglickými termíny: **nugget** - velikost posunutí variogramu v jeho počátku (nenulová variance v nulové vzdálenosti daná nepřesnostmi v měření), **sill** - maximální vzdálenost variogramu na svislé ose (maximální variance mezi body v prostoru) a **range** - vzdálenost na vodorovné ose kde variogram dosahuje maxima (udává vzdálenost, od které se již prostorová korelace nemění a je obvykle nulová).

Po zhotovení semivariogramu je teprve přistoupeno k prostorové predikci neboli ke krigingu. Kriging poskytuje nejlepší lineární nestranný odhad v neznámém bodě na základě znalosti prostorové variace interpolované veličiny popsané semivariogramem. Základní vztah krigingu pro sledovaný jev z v bodě x je:

$$z(x) = \mu + \epsilon(x),$$

kde μ je střední hodnota a ϵ je náhodná chyba. Odhad hodnoty v neznámém bodě x_0 se poté určí z:

$$\hat{z}(x_0) = \sum w_i z(x_i),$$

kde w_i je váha i -tého známého bodu a $z(x_i)$ je hodnota v tomto bodě. Pro sumu všech vah w_i platí, že je rovna 1. Dále rozeznáváme několik druhů krigingu, které se liší (Špička, 2015), (Juříková, 2010):

- **simple kriging** (jednoduchý kriging) - μ je známá a konstantní střední hodnota,
- **ordinary kriging** (běžný kriging) - μ je neznámá a konstantní střední hodnota,
- **universal kriging** (univerzální kriging) - $\mu = \mu(x)$ střední hodnota je funkcí prostorových souřadnic,

- **cokriging** - tato metoda pracuje s prostorovou korelací více zkoumaných veličin, které jsou vzájemně závislé; například pro interpolaci srážek je možné využít digitální model terénu, protože srážky jsou korelované s nadmořskou výškou,
- **Bayesian kriging** - používá informace z minulosti; počítá semivariogram z dat z více časových řad a tím umožňuje jeho přesnější konstrukci, která následně může zpřesnit výslednou predikci hodnot.

Závěrečnou fází krigingu je validace modelu označovaná anglickým termínem *cross-validation* (Oliver, Webster, 2015). Ta spočívá vždy v odstranění jednoho bodu z modelu a následném přepočtu modelu. Hodnota ve vypuštěném bodě určená na základě nového modelu se označí $\hat{z}(x_i)$. Model se takto přepočte vždy s vypuštěním jednoho bodu a poté lze určit charakteristiky modelu:

- střední chyba (*mean error*): $ME = \frac{1}{N} \sum (z(x_i) - \hat{z}(x_i))$,
- kvadratická střední chyba (*mean square error*): $MSE = \frac{1}{N} \sum (z(x_i) - \hat{z}(x_i))^2$,
- odmocnina z kvadratické střední chyby (*root mean square error*):
 $RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (z(x_i) - \hat{z}(x_i))^2}$.

N je počet měření. ME by měla být co nejbližší 0, protože odhad je nestranný. MSE a RMSE by měly být co nejmenší, protože odhad je nejlepší. Na základě těchto požadavků lze vyhodnocovat model a měnit jeho parametry tak, aby jsme dosáhli nejpříznivějších hodnot. Tento postup *cross-validation* je součástí GIS například nadstavby Geostatistical analyst softwaru ArcGIS (ESRI, 2012).

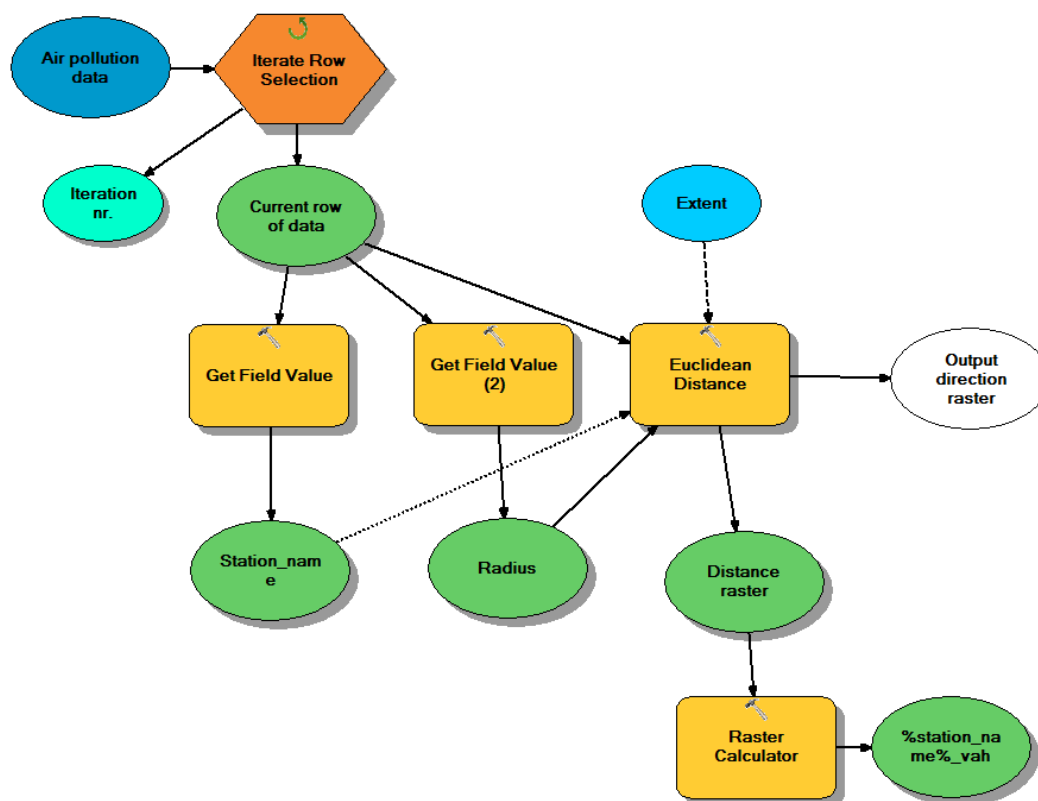
5 Postup řešení

5.1 Tvorba map znečištění

Mapy znečištění byly vytvořeny v software ArcGIS. Prvotním plánem bylo mapy vytvořit metodami IDW a kriging popsány v předchozí sekci. Tyto metody byly vyzkoušeny ovšem s neuspokojivými výsledky. Byla zjištěna limitující vlastnost software, který neumožňuje zohlednit rozdílnou reprezentativnost monitorovacích stanic. Měření z dopravních resp. předměstských stanic s reprezentativností v řádu stovek metrů resp. desítky kilometrů nelze ve výpočetním algoritmu těchto metod rozlišit. Další příčinou omezující především metodu kriging je nedostatečný objem dat, který by umožnil přesnou konstrukci semivariogramu. Například ve studii (Krivoruchko, 2008) byla použita pro modelaci map znečištění data z 90 monitorovacích stanic, a přesto byl tento počet vyhodnocen jako ne zcela dostatečný. Imisních monitorovacích stanic na sledovaném území není mnoho a navíc některé z nich v roce 2011 nepořídily dostatek dat k výpočtu ročního průměru. V rámci této práce jsou dostupná data v počtu cca 10-25 stanic pro každý kraj.

Z těchto důvodů byl navrhnout vlastní postup, který je svým principem modifikací metody IDW a výsledná mapa znečištění je dána váženým průměrem vstupních hodnot. Výpočet je proveden v rastrech pro snadnější implementaci a rozlišuje odlišné charakteristiky všech vstupních dat. Tento postup byl realizován v prostředí *model builder* v rámci software ArcGIS, které umožňuje navrhnout vlastní algoritmu výpočtu a volání běžných funkcí pro automatizaci určitého postupu. Schema výpočtu je na obrázku 5.1.

Výpočet probíhá v cyklu (iterate row selection), který jde v rámci imisních dat (air pollution data) po jednotlivých řádcích - stanicích. Pro každou stanicí (current row of data) je poté získán její název (station name), poloměr její reprezentativnosti (radius) a naměřená imisní hodnota (z). Poté je spočítán rastr vzdáleností (distance raster) funkcí *euclidean distance*. Rastr vzdálenosti je rastr, jehož hodnoty jsou dány vzdáleností od dané stanici v metrech. Výpočet hodnot rastru vzdáleností je omezen maximální hodnotou danou veličinou *radius*. Rozsah tohoto rastru je daný veličinou



Obr. 5.1: Model pro výpočet váhových rastrů v ArcGIS model builder

extent a obsahuje celé území počítaného kraje. V oblastech mimo platný rádius obsahuje vzdálenostní rastr hodnotu "null" tedy žádná data. Následně je z daného rastru vzdáleností spočítán váhový rastr pro konkrétní stanici (station name vah) v prostředí *raster calculator*. Hodnota buňky váhového rastru w_i je dána následujícím způsobem:

$$w_i = \frac{1}{1 + d_i},$$

kde hodnota d_i je hodnota odpovídající buňky váhového rastru. Navýšení vzdálenosti o 1 je zvoleno z důvodu výpočtu hodnoty buňky, která leží přímo v místě monitorovací stanice. Zde by tak došlo k dělení nulou. Zvětšení nulové vzdálenosti o 1 tak vede k váze rovné 1 v místě monitorovací stanice. V místech kde rastr vzdáleností neobsahuje data je zavedena podmínka:

$$w_i = 0 \quad \text{if} \quad d_i = \text{null}.$$

Hodnota daného váhového rastru je tedy nulová v místech mimo rádius konkrétní stanice. Tímto postupem jsou vytvořeny váhové rastry pro všechny imisní stanice, které budou vstupovat do dalších výpočtů.

Po určení váhových rastrů všech imisních stanic pro konkrétní kraj a znečišťující látku je vypočten rastr znečištění (mapa znečištění) pro danou lokalitu váženým průměrem z těchto rastrů. Zde tedy dochází k analogii s metodou IDW. Interpolovaná hodnota znečištění $\hat{z}(x)$ v bodě (buňce rastru) x je dána váženým průměrem z měřených hodnot z_i , kde váha w_i klesá se vzdáleností:

$$\hat{z}(x) = \frac{\sum z_i * w_i}{\sum w_i}.$$

Takto získaná mapa znečištění obsahuje pouze data z imisních monitorovacích stanic, a proto je dalším krokem výpočtu doplnění dopravních dat. K dálnicím a důležitým komunikacím vyšších tříd z databáze ArcČR 500 byly doplněny údaje o hustotě provozu, tak jak bylo uvedeno v sekci 3.2. Silnice byly poté manuálně jedna po druhé roztříděny do tříd dle dvou kritérií. Prvním kritériem je hustota provozu tzn. silnice s vyšší hustotou provozu náleží obecně do vyšší třídy. Druhým kritériem bylo umístění silnice vůči imisním stanicím a již vytvořené prvotní mapě znečištění. Zatřídění komunikace nesmělo být ve významném rozporu s blízko ležící monitorovací stanicí a mělo tak ideálně extrapolovat její naměřenou hodnotu po celé délce komunikace.

Komunikace byly tedy v rámci jednotlivých krajů roztříděny do několika tříd s klesající hodnotou koncentrace daného polutantu. Pro hlavní město Prahu a Ústecký kraj byly komunikace zvlášť roztříděny vzhledem k polutantům PM_{10} a NO_2 . Pro kraj Vysočina bylo provedeno pouze zatřídění pro PM_{10} , protože jiné polutanty v tomto kraji nejsou analyzovány. Příklad roztřídění v Praze je uveden v tabulce 5.1.

Pro všechny komunikace zařazené do jednotlivých tříd byly poté, stejně jako pro imisní stanice, spočítány vzdálenostní rastry, kde rozsah vzdálenosti (rádius) sahá do vzdálenosti 1 km v extravilánu a do 500 m v intravilánu. Tyto hodnoty byly zvoleny na základě literatury, kde např. (Adamec, 2007) nebo (ČHMÚ, 2012a) uvádí významný vliv dopravy řádově ve stovkách metrů v okolí vytížené komunikace.

třída PM10	koncentrace [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	třída NO2	koncentrace [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
1	34	1	50
2	32,5	2	47
3	31,3	3	45
4	30	4	43
5	29	5	40
6	28,2	6	37,5
7	27,3	7	35
-	-	8	32

Tab. 5.1: Třídy komunikací dle znečištění v Praze

Po určení vzdálenostního rastru komunikací byl určen taktéž váhový rastr dle vztahu:

$$w_i = \frac{1}{5 + 2 * d_i}.$$

Váha těchto rastrů tedy klesá s dvojnásobkem vzdálenosti, což bylo zavedeno z důvodu přisouzení větší váhy měřením imisních stanic. Vzdálenost je dále zvětšena o hodnotu 5. To je provedeno pro snížení váhy v případech, kdy komunikace probíhá v těsné blízkosti více stanic. Pro buňky ležící velmi blízko komunikace a měřící stanice může vzniknout větší diference a je vhodné považovat měření z imisní stanice za důležitější. V takových buňkách je tedy váha měření ze stanice rovna 1 a váha dané silnice rovna 0,2.

Ze všech váhových rastrů pro daný kraj a polutant (váhové rastry imisních stanic + váhové rastry komunikací) je vypočten výsledný rastr znečištění (mapa znečištění) opět modifikací metody IDW tedy váženým průměrem:

$$\hat{z}(x) = \frac{\sum z_i * w_i}{\sum w_i}.$$

Měřené hodnoty z_i představují pro váhové rastry imisních stanic naměřené roční imisní průměry za rok 2011. Pro váhové rastry komunikací byly hodnoty z_i stanoveny empiricky již dříve uvedeným postupem (s příklady hodnot v tabulce 5.1). Toto zavedení hodnot z_i pro komunikace s sebou nevyhnutelně přináší jisté nepřesnosti. Nicméně na následujícím příkladu je vysvětlen jeho jednoznačný přínos.

V obrázku 5.2 vidíme centrum Prahy, které je poměrně hustě pokryto monitorovacími stanicemi. Vedle jména stanice je uveden roční průměr NO_2 . Stanice Legerova



Obr. 5.2: Příklad přínosu extrapolace dopravních dat

je dopravní stanice (tzv. hot spot) v těsné blízkosti magistrály v centru města, kde dle údajů ze sčítání dopravy denně projelo v průměru 80 000 aut a patří tak k nejvytíženějším komunikacím v ČR. Tato stanice má reprezentativnost zatříděnou do kategorie "mikroměřítko" tzn. maximálně několik set metrů (viz sekce 3.1). Na druhou stranu např. stanice Vršovice, Riegrovy sady nebo Karlín spadají do kategorie "okrskové měřítko" s poloměrem reprezentativnosti až 4 km. Je tedy zřejmé, že prostá interpolace z dat monitorovacích stanic by nevyhnutelně přinesla velké nepřesnosti (podhodnocení) podél uvedené komunikace (tlustá čára). Proto bylo přistoupeno k extrapolaci těchto dat. Například v tomto konkrétním případě, byla komunikace zařazena do třídy 1 a byla jí přisouzena hodnota $z_i = 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Hodnota byla mírně podhodnocena. Naměřená hodnota na monitorovací stanici Praha - Legerova je v rámci celostátních dat velmi extrémní. Navíc tato monitorovací stanice leží

přímo u komunikace a pro oblast 250 x 250 m (jedna buňka rastru) je pravděpodobně NO₂ již rozptýlen na nižší koncentraci v ovzduší.

Na tomto případě tedy bylo ukázáno, že extrapolace dopravních dat po celé délce linií je přínosem. Hodnoty byly obvykle mírně podhodnoceny vzhledem k tomu, že buňky rastrů jsou poměrně velké a reprezentují tak širší okolí. Navíc jak uvádí literatura imise z dopravy se poměrně rychle rozptylují (především NO₂). Reálné imise tedy mohly být v některých místech mírně podhodnoceny, ale vždy bylo zmenšeno podhodnocení, které by vzniklo úplnou absencí těchto dat. Jak bylo uvedeno v sekci 3.2 vliv komunikací byl brán v potaz pouze pro mapy koncentrací PM₁₀ a NO₂, a nikoliv pro koncentrace SO₂ (tato mapa tedy byla vytvořena pouze z váhových rastrů imisních stanic).

Výsledných map znečištění bylo vytvořeno celkem 6. Velikost buňky výsledné mapy byla zvolena s ohledem na podrobnost dat a velikost území. Přehled vytvořených map znečištění je uveden zde:

- mapa koncentrací PM₁₀ v kraji Vysočina s velikostí buňky 500 x 500 m,
- mapa koncentrací PM₁₀ v Praze s velikostí buňky 250 x 250 m,
- mapa koncentrací NO₂ v Praze kraji s velikostí buňky 250 x 250 m,
- mapa koncentrací PM₁₀ v Ústeckém kraji s velikostí buňky 500 x 500 m,
- mapa koncentrací NO₂ v Ústeckém kraji s velikostí buňky 500 x 500 m,
- mapa koncentrací SO₂ v Ústeckém kraji s velikostí buňky 500 x 500 m.

5.2 Analýza expozice obyvatel

Vstupními daty pro tuto analýzu jsou vytvořené mapy znečištění a polygonové vrstvy obcí (pro Ústecký kraj a Vysočinu) a městských obvodů nebo částí (pro Prahu). Mapy znečištění vyjadřují prostorové koncentrace jednotlivých polutantů v daných krajích. Polygonové vrstvy obcí/městských částí obsahují prostorové vymezení těchto administrativních jednotek a demografické údaje: počet trvale žijících obyvatel, počty (resp. podíly) dětí, dospělých a seniorů. Cílem je určit expozici

obyvatel a jednotlivých citlivých skupin polutantům na základě vypočtených map znečištění.

Z map znečištění byly vypočteny průměrné koncentrace pro jednotlivé obce resp. městské části v software ArcGIS funkcí *zonal statistics*. Tato funkce umožňuje pro vstupní rastr spočítat charakteristiky v rámci definovaných "zón" neboli v tomto případě v rámci uvedených administrativních jednotek. Mezi tyto charakteristiky patří: průměrná hodnota rastru, medián, modus, maximum, minimum, rozsah nebo směrodatná odchylka hodnot v buňkách vstupního rastru. Vzhledem k tomu, že demografická data jsou agregovaná vždy za celý polygon obce/městské části, tak nedává smysl hledat v rámci této jednotky maximální, minimální nebo nejčastější hodnoty, a proto jsou počítány pouze průměrné hodnoty rastru.

Výstup z funkce *zonal statistics* je uložen jako nový atribut do polygonové vrstvy obcí/městských částí jednotlivých krajů. Na základě těchto údajů byla poté v software ArcGIS vytvořena grafická prezentace výsledků (viz. příloha B). Barevná škála těchto map byla volena tak, aby vhodně reprezentovala relativní rozdíly mezi obcemi resp. městskými částmi jednotlivých krajů.

Pro polutant SO_2 nejsou stanoveny roční imisní limity pro ochranu zdraví obyvatelstva, ale jsou stanoveny limity pro ochranu ekosystémů a vegetace. Jsou stanoveny limity LAT ($8 \mu\text{g}/\text{m}^3$), UAT ($12 \mu\text{g}/\text{m}^3$) a LV ($20 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Pro území Ústeckého kraje bylo určeno kolik procent plochy spadá do jednotlivých kategorií (a z toho plynoucích režimů monitoringu). Mapa znečištění SO_2 byla v software ArcGIS reklasifikována nově na 3 třídy. Přičemž třída 1 představuje buňky s koncentrací $z < LAT$, třída 2 buňky s $LAT < z < UAT$ a třída 3 buňky s $z > UAT$. Toto bylo provedeno funkcí *reclassify* a poté byl vyjádřen procentuální podíl jednotlivých tříd na celkové ploše Ústeckého kraje.

Všechny výsledky uvedené v této sekci jsou uvedeny v následující kapitole 6.

6 Výsledky

6.1 Kraj Vysočina

Výsledná mapa znečištění polutantem PM_{10} je uvedena jako příloha A.1. Tato rastrová mapa má rozlišení 500 x 500 m a tato velikost je v poměru k některým malým obcím kraje Vysočina relativně vysoká. Na území toho kraje se nachází celkem 668 obcí. Z uvedeného důvodu a také z důvodu redukce objemu dat byly do následujících tabulek výsledků (6.1 a 6.2) zvoleny pouze obce nad 1000 obyvatel a obce, které mají průměrnou expozici vypočtenou jako průměr z více než 20 buněk rastru znečištění. Tyto 2 podmínky na území kraje Vysočina splňuje celkem 66 obcí. Údaje v tabulce jsou seřazeny od nejlidnatějších obcí k těm nejméně lidnatým.

Obec	Počet obyvatel	0 - 14 let	15 - 64 let	65+ let	Počet buněk	PM_{10} [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
Jihlava	50510	7512	33980	9018	355	23,9
Třebíč	37095	5264	25947	5884	226	23,9
Havlíčkův Brod	23345	3346	15616	4383	236	21,3
Žďár nad Sázavou	21669	2942	14693	4034	145	23,7
Pelhrimov	16203	2269	10990	2944	364	20,5
Velké Meziříčí	11662	1744	7999	1919	162	26,8
Humpolec	10932	1532	7202	2198	198	23,3
Nové Město na Moravě	10180	1507	6850	1823	246	21,4
Chotěboř	9480	1383	6396	1701	217	19,2
Bystřice n. P.	8444	1152	5811	1481	215	21,7
Moravské Budějovice	7524	980	5100	1444	147	22,4
Světlá nad Sázavou	6735	856	4834	1045	168	19,4
Třešť	5812	857	3930	1025	191	21,9
Telč	5490	731	3648	1111	85	21,1
Ledeč nad Sázavou	5429	651	3616	1162	86	19,4
Polná	5116	857	3410	849	153	22,2
Velká Bíteš	5064	792	3512	760	184	26,0
Náměšť nad Oslavou	4964	684	3380	900	74	22,4
Pacov	4889	645	3241	1003	143	19,1
Jaroměřice n. R.	4170	649	2846	675	203	22,5
Jemnice	4133	557	2880	696	120	21,0
Přibyslav	4002	659	2693	650	143	21,5
Kamenice nad Lipou	3847	493	2619	735	125	19,6
Brtnice	3709	558	2554	597	295	22,7
Ždárec nad Doubravou	3174	529	2071	574	106	18,3

Tab. 6.1: Výsledky kraj Vysočina

Obec	Počet obyvatel	0 - 14 let	15 - 64 let	65+ let	Počet buňek	PM ₁₀ [μg/m ³]
Žirovnice	2954	382	1955	617	177	19,9
Luka nad Jihlavou	2782	459	1839	484	61	22,6
Golčův Jeníkov	2656	385	1832	439	112	19,4
Počátky	2568	366	1689	513	122	20,1
Batelov	2340	359	1552	429	168	21,0
Okříšky	2073	278	1396	399	25	23,2
Měřín	1960	306	1320	334	70	27,1
Kamenice	1921	326	1312	283	141	23,7
Dobronín	1889	316	1349	224	55	22,1
Křižanov	1875	280	1325	270	49	21,0
Horní Cerekev	1829	269	1230	330	132	20,4
Štoky	1816	354	1233	229	156	23,3
Černovice	1761	229	1177	355	145	19,2
Hrotovice	1751	268	1190	293	82	21,3
Starec	1647	298	1102	247	61	23,6
Krucemburk	1577	235	1056	286	115	19,7
Želetava	1540	228	1050	262	110	22,7
Hamry nad Sázavou	1521	257	1049	215	29	23,6
Svratka	1416	169	925	322	58	17,6
Kněžice	1380	196	978	206	92	22,8
Mohelno	1354	157	931	266	71	20,7
Habry	1318	206	865	247	108	19,0
Herálec (okres Ž.n.S.)	1306	184	876	246	97	19,1
Nové Veselí	1296	196	866	234	38	22,1
Dolní Cerekev	1296	219	894	183	61	21,1
Okrouhlice	1282	218	826	238	73	19,7
Velký Beranov	1268	199	916	153	41	23,0
Velká Losenice	1220	267	811	142	57	21,4
Jimramov	1198	172	765	261	87	21,2
Budišov	1190	181	809	200	52	23,9
Rouchovany	1185	174	804	207	97	20,7
Vladislav	1143	140	777	226	77	23,4
Herálec (okres H.B.)	1143	174	767	202	112	23,3
Bohdalov	1135	195	765	175	64	22,6
Nová Cerekev	1125	159	730	236	139	20,0
Lípa	1123	188	766	169	57	20,0
Želiv	1114	146	747	221	108	19,8
Stonařov	1062	190	733	139	58	22,5
Nový Rychnov	1044	163	715	166	124	20,3
Česká Bělá	1021	170	702	149	67	19,8
Lukavec	1018	124	683	211	86	19,2
Vilémov	1003	135	634	234	100	18,0

Tab. 6.2: Výsledky kraj Vysočina

Jak plyne z uvedených tabulek znečištění ovzduší polutantem PM₁₀ v kraji Vysočina je poměrně nízké. V žádné z obcí nedošlo v roce 2011 k překročení limitní hodnoty 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Průměrná roční koncentrace je v 60 z 66 (90,9 %) z analyzovaných obcí mezi hodnotami 19,0-23,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Většina větších obcí leží v rozmezí hodnot LAT a UAT (definice v sekci 2.7) a to znamená, že situace je dobrá a monitoring ovzduší je třeba nadále udržovat, avšak není nutno zřizovat vyšší než minimální počet monitorovacích stanic.

Nejvyšší koncentrace vykazují v tabulkách tučně zvýrazněné obce: Velké Meziříčí, Velká Bíteš a Měřín. Tyto obce mají protáhlý tvar podél dálnice D1, která je hlavním zdrojem znečištění v kraji Vysočina, jak názorně ukazují přílohy A.1 a B.1. Situace v těchto obcích prokazuje zvýšené hodnoty v rámci samotného kraje, ale hodnoty nejsou natolik závažné, aby bylo nezbytné zavádět opatření vedoucí ke snižování znečištění nebo zvyšovat stupeň monitoringu. Následující přehled shrnuje data pro všech 668 obcí kraje Vysočina:

- oblastí s koncentrací do 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ - 128 635 obyvatel (25,8%) z toho 18 231 dětí (14,2%) a 24 171 seniorů (18,8%),
- oblastí s koncentrací 20 - 23 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ - 199 172 obyvatel (39,9%) z toho 30 283 dětí (15,2%) a 34 448 seniorů (17,3%),
- oblastí s koncentrací 23 - 26 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ - 152 567 obyvatel (30,6%) z toho 22 455 dětí (14,7%) a 26 562 seniorů (17,4%),
- oblastí s koncentrací nad 26 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ - 19 025 obyvatel (3,8%) z toho 2 924 dětí (15,4%) a 3 134 seniorů (16,5%).

Pozn.: procenta za celkovým počtem obyvatel vyjadřují podíl z celého obyvatelstva daného kraje a procenta za počtem dětí a seniorů vyjadřují podíl těchto skupin na počtu obyvatel spadající do dané třídy. Pozn. 2: dětmi jsou myšleny osoby do 15 let věku a seniory osoby nad 65 let věku dle metodiky sčítání obyvatelstva.

V těchto třídách je patrný mírný nárůst podílu seniorů v obcích s nižšími koncentracemi daný převahou této skupiny ve venkovských - čistších oblastech.

6.2 Hlavní město Praha

Pro oblast hlavního města Prahy byly zhotoveny mapy znečištění polutantem PM₁₀ (příloha A.2) a NO₂ (příloha A.3) v rozlišení 250 x 250 m. Výsledky analýzy expozice obyvatel jsou uvedeny pro všech 57 městských částí a obvodů v tabulkách 6.3 a 6.4. Grafické znázornění této analýzy je zobrazeno v přílohách B.2 a B.3.

Městská část nebo obvod	Počet obyvatel	0 - 14 let	15 - 64 let	65+ let	Počet buňek	PM ₁₀ [μg/m ³]	NO ₂ [μg/m ³]
Praha 1	30002	3300	21751	4950	92	31,3	36,7
Praha 2	49193	5067	36354	7772	67	31,2	38,7
Praha 3	73587	8095	52688	12804	106	28,6	33,8
Praha 4	128431	14256	84379	29796	385	29,2	34,8
Praha 5	84103	11017	61143	11943	436	29,0	34,1
Praha 6	101574	12900	67140	21534	664	27,3	28,2
Praha 7	42200	5317	30300	6583	112	29,1	34,1
Praha 8	103508	13042	72042	18424	349	26,1	28,6
Praha 9	53972	6908	37618	9445	210	29,1	36,8
Praha 10	110971	12873	73241	24858	301	30,4	36,6
Běchovice	3604	357	2901	346	109	25,5	25,5
Benice	519	78	380	61	44	21,0	11,1
Březiněves	1054	204	730	119	56	23,7	20,5
Dolní Počernice	2198	336	1517	345	91	27,6	30,4
Dubeč	3278	567	2259	452	142	26,0	23,8
Praha 20	15071	2246	10942	1884	271	25,8	26,6
Klánovice	3123	593	2011	518	89	21,0	10,4
Koloděje	1286	246	907	134	62	21,0	10,4
Kolovraty	3262	754	2172	336	102	22,8	16,7
Královice	319	50	213	56	76	21,0	10,4
Křeslice	857	173	610	74	56	21,3	12,0
Nedvězí	250	36	189	25	61	23,1	17,6
Satalice	2393	447	1682	263	63	24,3	21,5
Praha 22	8366	1464	6007	895	249	23,2	17,9
Praha 21	9907	1763	7024	1119	164	24,0	20,5
Vinoř	3736	654	2727	355	97	21,0	10,4
Lipence	2266	417	1552	297	131	21,9	14,7
Lochkov	613	113	404	96	45	28,0	34,1
Přední Kopanina	787	121	600	66	49	24,2	22,0
Praha 16	8462	1109	6059	1295	149	22,8	17,6
Řeporyje	3833	567	2859	406	159	27,4	25,7
Slivenec	2806	471	1945	390	120	26,9	29,2
Praha 13	61018	8604	47167	5248	207	27,3	29,2
Šeberov	2833	501	2028	303	81	23,6	18,5
Újezd	2729	549	1927	254	57	26,7	27,7

Tab. 6.3: Výsledky pro hlavní město Prahu

Městská část nebo obvod	Počet obyvatel	0 - 14 let	15 - 64 let	65+ let	Počet buňek	PM ₁₀ [μg/m ³]	NO ₂ [μg/m ³]
Zbraslav	9438	1548	6550	1340	158	25,9	27,4
Zličín	5067	704	3831	532	121	26,1	27,4
Praha 11	78575	9586	57203	11786	158	30,0	34,9
Kunratice	8642	1504	6188	951	129	26,3	18,9
Libuš	9846	1398	7572	876	84	27,0	20,4
Praha 12	54829	6470	40683	7676	373	26,7	24,2
Velká Chuchle	2012	332	1344	336	98	25,2	27,0
Lysolaje	1334	235	908	191	39	27,0	23,1
Nebošice	3324	688	2244	392	58	26,8	27,2
Praha 17	25542	3320	19770	2452	52	26,9	28,5
Praha-Suchdol	6699	965	4683	1052	82	26,7	21,2
Dáblvice	3207	638	2129	439	114	25,4	29,8
Dolní Chabry	3602	648	2464	490	78	21,7	21,2
Čakovice	10112	1729	7291	1092	161	21,2	11,3
Troja	1237	224	823	190	53	26,9	25,3
Praha 19	6611	1091	4495	1025	95	26,0	26,0
Praha 14	46291	7129	34487	4675	218	28,7	33,7
Dolní Měcholupy	2197	411	1584	202	72	30,2	33,7
Praha 15	31015	4063	22951	4001	164	30,5	34,7
Petrovice	6291	881	4819	591	28	29,2	30,7
Šterboholy	1933	346	1428	159	47	31,7	39,7
Praha 18	17193	2287	13015	1891	91	28,1	34,0

Tab. 6.4: Výsledky pro hlavní město Prahu

Znečištění ovzduší polutantem PM₁₀ v Praze je v rozsahu 21,0 - 31,7 μg/m³ a tedy limitní hodnota 40 μg/m³ nebyla překročena. Nižších hodnot je dosaženo pouze v okrajových částech, které navíc nejsou dobře pokryty vstupními daty. Vyšší koncentrace jsou obecně v hustěji osídlených oblastech, oblastech blíže centru města a oblastech s hustou dopravou. Přibližně polovina města leží v oblastech s koncentracemi mezi hodnotami LAT a UAT a polovina nad hodnotou UAT. Pražská aglomerace by tedy měla být zařazena spíše do režimu monitoringu 1 (více v sekci 2.7). Pro přehlednost byly městské části s hodnotou přesahující hodnotu 30 μg/m³ v tabulce zvýrazněny. Obyvatelstvo Prahy lze roztrždit do následujících kategorií:

- oblasti s koncentrací do 26 μg/m³ - 99 744 obyvatel (7,9% z celkového počtu) z toho 16 676 dětí (16,7%) a 12 296 seniorů (12,3%),
- oblasti s koncentrací 26 - 28 μg/m³ - 401 410 obyvatel (31,9% z celkového počtu) z toho 53 180 dětí (13,2%) a 62 034 seniorů (15,5%),

- oblastí s koncentrací 28 - 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ - 530 643 obyvatel (42,2% z celkového počtu) z toho 65 476 dětí (12,3%) a 89 515 seniorů (16,9%),
- oblastí s koncentrací nad 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ - 225 311 obyvatel (17,9% z celkového počtu) z toho 26 060 dětí (11,6%) a 41 941 seniorů (18,6%).

V těchto datech lze vidět stoupající podíl citlivé starší populace v oblastech se zvýšenou koncentrací. Jedná se především o centrum města, kde žije více seniorů a méně rodin s dětmi. Na okrajích města s nižší koncentrací je naopak situace opačná a žije zde více dětí. Obecně je však podíl dětí v Praze nižší než v ostatních krajích. Rozdíly koncentrací v rámci celého hlavního města nicméně nejsou příliš velké a proto lze předpokládat, že zdravotní vlivy budou podobné.

Znečištění polutantem NO_2 je v rámci městských částí a obvodů Prahy poměrně rozdílné. Dosahuje hodnot v rozsahu 10,4-39,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Nicméně pokrytí vstupními daty na okrajích Prahy je velmi slabé a koncentrace jsou určeny ze vzdálených stanic mimo Prahu (do výpočtu byly zahrnuty i 2 stanice z území Středočeského kraje). Po průzkumu vstupních dat a výsledků lze prohlásit, že všechny v tabulce uvedené hodnoty pod 18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ lze považovat za podhodnocené. Těmito oblastmi jsou okrajové části Prahy vymezené světle žlutou barvou v příloze B.3.

Nejvyšší koncentrace jsou především v centru města, a jelikož většina NO_2 pochází z dopravy, tak především v oblastech s hustou automobilovou dopravou. V tabulce je zvýrazněno 6 nejvíce znečištěných oblastí. Přibližně 60% obyvatel Prahy žije na území s koncentrací vyšší než je hodnota UAT (32 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), a proto by měl být monitoring zařazen i nadále do režimu 1. Nicméně limitní hodnota 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ nebyla na území hlavního města překročena. Následující přehled uvádí rozdělení obyvatelstva Prahy dle stupňů znečištění NO_2 :

- oblastí s koncentrací do 26 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ - 163 047 obyvatel (13,0% z celkového počtu) z toho 24 365 dětí (13,0%) a 20 664 seniorů (12,7%)
- oblastí s koncentrací 26 - 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ - 335 296 obyvatel (26,7% z celkového počtu) z toho 45 042 dětí (13,4%) a 53 225 seniorů (15,9%)

- oblastí s koncentrací 30 - 34 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ - 147 757 obyvatel (11,8% z celkového počtu) z toho 19 138 dětí (13,0%) a 20 509 seniorů (13,9%)
- oblastí s koncentrací nad 34 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ - 611 008 obyvatel (48,6% z celkového počtu) z toho 72 847 dětí (11,9%) a 111 389 seniorů (18,2%)

Z těchto dat plyne, že velká část obyvatel Prahy se stoupajícím podílem citlivé skupiny seniorů žije v oblastech s vyššími hodnotami koncentrací NO_2 . Tyto hodnoty sice nepřekračují limitní hodnotu, ale nelze vyloučit jejich negativní zdravotní vliv.

6.3 Ústecký kraj

V Ústeckém kraji se nachází celkem 349 obcí. Mapy koncentrací polutantů jsou v přílohách A.4, A.5 a A.6 a jednotlivé mapy expozice pro všechny obce lze nalézt v přílohách B.4, B.5 a B.6. Do následujícího přehledu byly zvoleny pouze obce splňující stejné vstupní podmínky jako v případě kraje Vysočina. Tyto podmínky splňuje celkem 90 obcí.

Obec	Počet ob.	0 - 14 let	15 - 64 let	65+ let	Počet buňek	PM_{10} [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	NO_2 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	SO_2 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
Ústí nad Labem	93523	14889	62407	16227	378	27,9	19,3	10,1
Most	67332	10028	46583	10721	346	28,9	18,6	10,9
Dečín	50104	8015	32875	9214	469	26,2	16,6	9,1
Teplice	50024	7478	33242	9304	94	28,8	20,6	11,7
Chomutov	49185	7467	33577	8141	116	26,9	19,4	10,4
Litvínov	25140	3853	16705	4582	167	26,9	16,2	11,2
Litoměřice	24136	3701	16284	4151	74	29,3	18,5	8,1
Jirkov	20029	3283	14380	2366	69	25,3	16,4	10,5
Žatec	19224	3107	12978	3139	170	25,1	16,5	9,8
Louny	18476	2827	12609	3040	86	26,5	16,6	10,2
Kadaň	17923	2863	12200	2860	262	24,5	14,0	9,8
Bílina	16703	2636	11621	2446	129	27,9	17,4	11,5
Varnsdorf	15664	2455	10604	2605	105	22,0	13,4	7,0
Kláštorec n. O.	14902	2170	10556	2176	214	22,6	14,6	10,6
Krupka	13269	2163	9232	1874	186	27,0	15,3	12,3
Roudnice n. L.	12949	1922	8543	2484	67	26,7	17,7	9,0
Rumburk	11155	1763	7672	1720	102	21,2	13,6	6,6
Štětí	8895	1387	6094	1414	211	25,9	15,2	8,5
Lovosice	8730	1304	5683	1743	46	28,1	20,1	9,4
Duchcov	8520	1414	5695	1411	63	27,9	16,4	11,6
Dubí	8127	1253	5480	1394	137	27,0	15,0	11,5

Tab. 6.5: Výsledky pro Ústecký kraj

Obec	Počet ob.	0 - 14 let	15 - 64 let	65+ let	Počet buňek	PM ₁₀ [μg/m ³]	NO ₂ [μg/m ³]	SO ₂ [μg/m ³]
Podbořany	6302	1035	4314	953	238	23,8	13,4	9,0
Šluknov	5618	960	3799	859	190	20,4	11,4	7,0
Česká Kamenice	5425	848	3603	974	158	24,0	15,9	7,4
Jílové	5106	759	3585	762	148	23,1	14,7	10,4
Postoloprty	4955	909	3363	683	188	26,2	16,1	10,2
Osek	4836	692	3280	864	166	27,1	14,2	11,4
Meziboří	4753	608	3170	975	57	25,8	14,0	11,1
Chlumeck	4472	662	3129	681	42	26,7	16,6	11,4
Jiříkov	3875	646	2592	637	55	20,3	11,2	6,4
Benešov n. P.	3832	617	2552	663	42	24,8	15,1	8,4
Lom	3760	584	2642	534	65	27,7	14,3	11,6
Krásná Lípa	3560	584	2254	722	128	21,4	12,1	7,3
Libochovice	3535	527	2292	716	64	27,5	15,4	10,7
Trmice	3124	634	2131	359	27	27,7	20,3	10,3
Košťany	3094	516	2108	470	100	26,7	13,8	10,8
Terezín	2941	435	1974	532	52	27,9	17,6	9,0
Vejprty	2939	376	2108	455	39	20,3	11,2	9,8
Úštěk	2805	397	1962	446	296	26,0	15,6	8,5
Bohušovice n. O.	2543	418	1728	397	32	27,3	17,0	9,2
Chabarovice	2522	422	1708	392	68	27,2	17,5	11,2
Kryry	2371	353	1609	409	157	22,4	13,8	6,5
Obrnice	2274	545	1537	192	33	28,7	21,2	11,1
Povrly	2236	331	1530	375	102	25,9	16,2	9,8
Velké Březno	2215	377	1460	378	32	26,7	18,2	9,8
Mikulášovice	2204	333	1493	378	105	21,7	12,3	8,0
Peruc	2199	319	1457	423	216	27,0	15,0	10,5
Horní Jiřetín	2183	381	1473	329	159	25,3	14,4	10,9
Budyně nad Ohří	2155	351	1423	381	131	27,2	16,3	10,0
Hrob	2016	327	1364	325	43	26,9	14,4	11,3
Trebenice	1992	298	1332	362	85	26,9	15,1	10,7
Velký Šenov	1949	300	1323	326	77	21,0	11,9	7,6
Bystřany	1902	258	1255	389	33	28,2	19,8	11,4
Vroutek	1858	263	1295	300	209	22,6	13,0	8,4
Dolní Poustevna	1825	323	1271	231	46	21,8	12,4	8,5
Libouchec	1781	262	1245	274	112	25,0	14,3	10,6
Mšené-lázně	1734	270	1159	305	149	27,4	15,5	10,5
Hoštka	1727	334	1158	235	76	26,0	15,7	8,8
Bečov	1575	293	1108	174	108	27,2	14,2	10,6
Velemín	1564	243	1037	284	163	27,0	16,8	10,7
Libešice	1528	216	1090	222	130	26,4	15,6	8,9
Žitenice	1527	251	1070	206	53	28,2	16,3	8,9
Lubenec	1446	186	972	288	149	22,3	12,8	8,7
Lenešice	1439	247	968	224	55	26,5	14,3	10,4
Spořice	1437	257	1027	153	71	25,5	15,2	10,2
Křešice	1423	206	942	275	41	27,1	16,1	9,1

Tab. 6.6: Výsledky pro Ústecký kraj

Obec	Počet ob.	0 - 14 let	15 - 64 let	65+ let	Počet buňek	PM ₁₀ [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	NO ₂ [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	SO ₂ [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
Čížkovice	1404	246	940	218	28	27,5	15,7	10,1
Chřibská	1396	215	972	209	63	22,5	13,0	7,6
Řehlovice	1386	227	944	215	34	27,2	17,2	10,8
Polepy	1355	226	932	197	75	26,4	15,9	9,0
Brozany nad Ohří	1336	243	878	215	56	27,7	21,4	9,7
Braňany	1313	223	935	155	24	28,6	15,3	11,4
Březno	1276	205	882	189	183	25,5	13,8	10,1
Staré Krecany	1265	213	862	190	147	20,5	11,4	6,9
Bechlín	1249	210	858	181	60	25,9	13,9	8,6
Dolní Podluží	1189	179	828	182	62	22,1	12,5	7,3
Radonice	1159	196	795	168	124	23,2	12,8	9,6
Údlice	1147	181	812	154	49	26,1	16,4	10,5
Háj u Duchova	1112	180	794	138	32	27,2	14,4	11,4
Perštejn	1109	174	775	160	82	21,2	12,6	10,6
Zabrušany	1108	162	777	169	36	27,8	16,8	11,6
Vernerice	1099	170	772	157	129	25,4	15,3	8,4
Kovářská	1089	130	800	159	85	20,2	10,6	10,8
Straškovy	1068	185	698	185	33	26,2	17,4	9,8
Hrobčice	1063	173	756	134	171	26,9	14,6	11,3
Cítoliby	1040	198	682	160	26	26,4	19,2	10,0
Vysoká Pec	1017	138	714	165	77	24,2	14,2	10,7
Měcholupy	1010	156	694	160	116	24,2	13,9	8,8
Světec	1006	148	693	165	48	27,1	16,1	11,6
Chuderov	1005	190	702	113	62	26,7	15,6	10,0

Tab. 6.7: Výsledky pro Ústecký kraj

Znečištění polutantem PM₁₀ v uvedených obcích Ústeckého kraje je v rozsahu 20,2 - 29,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a je obecně vyšší ve větších městech. Koncentrace v 8 obcích (tučně zvýrazněné) přesahuje hodnotu UAT (28 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), ale nelze říci, že se jedná o hodnoty výrazně se odchylojící od koncentrací v ostatních obcích. Většina obcí tohoto kraje spadá do pásma mezi hodnotami LAT a UAT (20 - 28 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) a situace je zde tedy relativně dobrá. Limitní hodnota 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ nebyla překročena v žádné z obcí Ústeckého kraje. Následující přehled uvádí statistiku pro všech 349 obcí kraje:

- oblastí s koncentrací do 24 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ - 108 281 obyvatel (13,2% z celkového počtu) z toho 16 591 dětí (15,3%) a 17 196 seniorů (15,9%),
- oblastí s koncentrací 24 - 26 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ - 125 672 obyvatel (15,3% z celkového počtu) z toho 20 088 dětí (16,0%) a 18 984 seniorů (15,1%),

- oblastí s koncentrací 26 - 28 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ - 420 591 obyvatel (51,1% z celkového počtu) z toho 66 203 dětí (15,7%) a 70 431 seniorů (16,7%),
- oblastí s koncentrací nad 28 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ - 168 170 obyvatel (20,4% z celkového počtu) z toho 25 588 dětí (15,2%) a 28 364 seniorů (16,9%).

Většina populace žije v oblastech s relativně vyššími koncentracemi PM_{10} . Jedná se především o oblast tzv. severočeské hnědouhelné pánve a také o většinu větších měst v kraji (Most, Litoměřice, Ústí nad Labem, Teplice, Chomutov, Litvínov nebo Bílina). Situace je přehledně znázorněna v expoziční mapě - příloze B.4. V kraji se nachází vyšší procentuální podíl dětí než v Praze nebo na Vysočině, avšak nelze stanovit, že by byl relativně větší nebo menší ve znečištěnějších oblastech. Naopak podíl seniorů je mírně vyšší ve znečištěnějších oblastech.

Znečištění ovzduší polutantem NO_2 je v Ústeckém kraji na velice nízké úrovni. V tabulkách 6.5, 6.6 a 6.7 uvedené obce mají rozsah průměrných koncentrací 10,6 - 21,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ což je bez výjimky pod hodnotou LAT (26 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Proto bylo v tomto kraji přistoupeno k méně intenzivnímu monitoringu vedoucímu ke snižování počtu monitorovacích stanic v nedávné době. Pouze 5 z uvedených obcí má koncentrace nad 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a tyto jsou v tabulce zvýrazněny.

V expoziční mapě (příloha B.5) nelze najít jednoznačné oblasti s vyššími koncentracemi, kromě malých obcí podél dálnice D8 v jihovýchodní části kraje. Většina z těchto obcí nenáleží do výše uvedeného přehledu, tudíž se jedná o velmi malé obce. Obecně lze prohlásit, že je mírně vyšších hodnot dosaženo ve větších městech (Most, Chomutov, Teplice nebo Ústí nad Labem), ale hodnoty koncentrací NO_2 jsou v porovnání s Prahou velmi nízké, což je způsobeno především méně intenzivní dopravou. Názorné srovnání poskytuje porovnání map koncentrací NO_2 pro Prahu a Ústecký kraj (přílohy A.3 a A.5), kde byla použita stejná barevná škála.

V rámci Ústeckého kraje byla také vyhotovena analýza pro polutant SO_2 . Průměrné roční koncentrace v uvedených obcích jsou 6,4 - 12,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Roční imisní limity pro SO_2 nejsou stanoveny, ale tyto hodnoty jsou velice příznivé a pro zdraví lidí téměř nezávadné (lze provést alespoň přibližné porovnání s 24 hodinovými limity uvedenými v sekci 2.7). Situace je tak v souladu se současnou literaturou (např.

ČHMÚ, 2012a), která uvádí výrazné snížení koncentrací tohoto polutantu v nedávné době. V relativním srovnání jsou koncentrace mírně vyšší v oblasti měst Litvínov, Bílina, Teplice a Krupka (viz expoziční mapa B.6), ale jedná se stále o hodnoty nízké.

Nicméně pro polutant SO_2 jsou stanoveny roční imisní limity pro ochranu ekosystémů a vegetace (více v sekci 2.7). Proto je zde uveden přehled území Ústeckého kraje vůči těmto limitům:

- 11,2 % území kraje s hodnotami pod $8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ tedy pod hodnotou LAT,
- 87,8 % území kraje s hodnotami $8 - 12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ tedy mezi hodnotami LAT a UAT,
- 1,0 % území kraje s hodnotami nad $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ tedy nad hodnotou UAT.

Limitní hodnota $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ nebyla na území kraje překročena. Z tohoto srovnání dále plyne, že z pohledu ochrany ekosystémů a vegetace by měl být Ústecký kraj zařazen do tzv. režimu 2 monitoringu. Polutant SO_2 je třeba sledovat a modelovat avšak postačuje minimální počet stanic. To odpovídá situace v současné době kdy je řada stanic měřících koncentrace SO_2 vyřazována z provozu. V minulosti vysoký počet stanic monitorujících SO_2 v Ústeckém kraji se tak snižuje.

Závěr

Současná literatura uvádí, že znečištění ovzduší v České republice od roku 1990 významně pokleslo. K tomu přispělo např. odsíření a odprášení velkých zdrojů, plynoifikace či modernizace vozového parku (Rychlíková, 2014). Analýza provedená v rámci této práce podává výsledky, které se shodují s těmito fakty. Znečištění ovzduší je na sledovaném území na relativně dobré úrovni. K překročení limitních hodnot ve sledovaném roce 2011 nedošlo ani v jednom ze sledovaných krajů. To však neznamená, že na sledovaném území nehrozí zdravotní rizika. Jak bylo uvedeno v sekci 1.2 pro koncentrace některých polutantů neexistuje prokazatelná spodní hranice, od které by byl jejich vliv na zdraví lidí nulový. Proto je třeba udržovat snahu o další zlepšování kvality ovzduší.

Srovnání krajů lze provést pouze pro polutant PM_{10} , pro který byla analýza vyhotovena ve všech třech krajích. Z dat uvedených v předešlé sekci plyne, že ze srovnání vychází nejhůře hlavní město Praha, kde je obyvatelstvo vystaveno nejvyšším koncentracím. Jako srovnávací hodnota byla zvolena koncentrace $26 \mu g/m^3$, která se vyskytuje na všech krajů. Srovnání expozice obyvatel je uvedeno v tabulce 6.8.

Kraj	$< 26 \mu g/m^3$	$> 26 \mu g/m^3$
Vysočina	480 373 (96,2 %) obyvatel	19 025 (3,8 %) obyvatel
Praha	106 355 (8,5 %) obyvatel	1 150 753 (91,5 %) obyvatel
Ústecký	233 953 (28,5 %) obyvatel	588 761 (71,5 %) obyvatel

Tab. 6.8: Srovnání expozice PM_{10} ve všech krajích

Vzduch na Vysočině je tedy s ohledem na znečištění PM_{10} nejčistší a většina obyvatel tohoto kraje je tak vystavena hodnotám nižším než jsou vystaveni obyvatelé Prahy a Ústeckého kraje. Hlavním zdrojem znečištění v tomto kraji je silně vytížená dálnice D1. Zbytek území kraje vykazuje velmi příznivé hodnoty. Znečištění ovzduší PM_{10} v Ústeckém kraji je mírně větší, ale na nižší úrovni než v Praze. V Ústeckém kraji vychází z relativního porovnání hůře větší města, kde dochází ke koncentraci průmyslu a dopravy.

Hlavní město Praha vychází ze srovnání nejhůře. Pro další srovnání s Ústeckým krajem lze uvést, že v oblastech s koncentracemi nad $28 \mu g/m^3$ žije 60,1 % obyvatel

Prahy a pouze 20,4 % obyvatel Ústeckého kraje. Nejhorší situace je především v centru Prahy, které je zatíženo velmi hustou zástavbou a dopravou. Ze srovnání tak plyne závěr souhlasící s literaturou, že množství pevných částic v ovzduší z dopravy má rostoucí tendenci. V Praze je doprava v rámci ČR jednoznačně nejintenzivnější.

Srovnání znečištění polutantem NO_2 lze provést pouze pro Prahu a Ústecký kraj. Situace v Praze je mnohem horší a na základě dosažených výsledků lze prohlásit, že prakticky všichni obyvatelé Ústeckého kraje žijí v oblastech s nižšími koncentracemi NO_2 , než jakým je vystaven průměrný obyvatel Prahy. Oxid dusičitý je s dopravou korelován ještě více než pevné částice, a tudíž jsou na území hlavního města nejvyšší předpoklady pro jeho vysoké koncentrace. Na nejvytíženějších komunikacích v Praze jsou průměrné denní počty automobilů několikanásobně vyšší než na nejvytíženějších komunikacích Ústeckého kraje.

V rámci Ústeckého kraje lze pozorovat relativně vyšší koncentrace pouze podél dálnice D8 v jihovýchodní části kraje a dále pak v několik větších městech. V rámci Prahy jsou poměrně velké rozdíly ve vypočtených koncentracích mezi oblastmi v centru a na okrajích města. Centrum města je velice dobře pokryto monitorovacími stanicemi, a proto lze předpokládat, že výsledky jsou zde přesné. Na druhou stranu okrajové části města nejsou dobře pokryty vstupními daty a určené koncentrace jsou s vysokou pravděpodobností podhodnocené. Dále je ovšem zmínit fakt, že plynný polutant NO_2 se ve vzduchu rychle rozptýluje, a proto může modelaci jeho koncentrací v ovzduší provázet řada nepřesností.

Analýza koncentrací SO_2 byla provedena pouze pro Ústecký kraj. V minulosti (především před rokem 1990) byly koncentrace SO_2 v tomto kraji velmi vysoké, proto zde bylo zřízeno nejvíce monitorovacích zařízení. Analýza prokázala dobrou shodu se současnou literaturou, která udává velmi hluboký pokles v koncentracích v posledních letech. Zavedená opatření byla a jsou účinná a i při vysoké koncentraci uhelných elektráren v kraji se to nikterak neprojevuje na zvýšených koncentracích SO_2 v ovzduší. Negativní vliv oxidu siřičitého na populaci a přírodu v Ústeckém kraji lze tedy prohlásit za nízký.

Znečištěné ovzduší nejvíce škodí citlivým skupinám obyvatel, mezi které patří děti a senioři. Na území Prahy žije obecně nižší podíl těchto citlivých skupin než

v kraji Vysočina a v Ústeckém kraji. To je dáno tím, že do Prahy se stěhují nejvíce lidé v produktivním věku. Na druhou stranu podíl seniorů byl v rámci Prahy vyšší v oblastech s horším ovzduším, což se týká především centra města. V Ústeckém kraji je situace obdobná a také zde žije relativně vyšší podíl seniorů ve znečištěnějších oblastech (větších městech), ale situace je méně jednoznačná než v Praze. Naopak v kraji Vysočina je situace opačná a vyšší podíl seniorů žije v čistších lokalitách (na venkově). Na druhou stranu v žádném ze sledovaných krajů nebyl zjištěn významně vyšší nebo nižší výskyt dětské populace ve znečištěnějších oblastech. Obecně lze ovšem jednoznačně prohlásit, že je ovzduší v hustěji zastavěných oblastech znečištěnější než ve venkovských oblastech.

Výsledky práce nám také říkají, že situaci ve sledovaných oblastech je nadále nutno sledovat. I když na sledovaném území nejsou překročeny limitní hodnoty, jsou často překročeny tzv. prahové hodnoty. Překročení prahových hodnot pro danou zónu či aglomeraci pak udává stupeň monitoringu, který je nutný nadále dodržet. Především polutant PM_{10} je nadále nutno měřit a podrobně sledovat ve všech sledovaných krajích. Hlavní město Praha by mělo nadále spadat do nejpřísnějšího režimu 1. Ústecký kraj a kraj Vysočina spadají spíše do méně přísného režimu 2 (informace o režimech v sekci 2.7). Polutant NO_2 je pak nutno monitorovat v režimu 1 i v budoucnosti především v Praze. V Ústeckém kraji je situace s NO_2 a SO_2 na velice dobré úrovni, a proto je možné zařadit nižší stupně monitoringu.

Práce prokázala shodu s dobře známou skutečností, že v současnosti je ve vyspělých zemích hlavním zdrojem znečištění doprava. Např. v USA žilo v roce 2010 přibližně 93 miliónů lidí (30% populace) v oblastech, kde je ovzduší významně zhoršeno vlivem automobilové dopravy (Friedman, 2010). Tato situace nastala i přesto, že současné automobily emitují znatelně méně emisí než jejich předchůdci. To se děje z důvodu masivního nárůstu počtu automobilů, většího nájezdu u průměrného řidiče a rostoucí oblíbenosti větších automobilů. Naším cílem by měla být nadále renovace vozového parku na modernější vozy s lepší účinností spalování paliva, zavedení účinných opatření v centrech velkých měst, přechod na ne-fosilní paliva a případná snaha o omezení využívání aut jako takových.

Znečištění ovzduší představuje problematiku, kterou je se třeba nadále intenzivně zabývat. Zpráva (WHO, 2016) udává, že v roce 2012 zemřelo 12,6 milionu lidí na celém světě předčasně v důsledku znečištěného prostředí. Největší vliv mělo právě znečištěné ovzduší, které zapříčinilo 8,2 milionu úmrtí. Problémy s kvalitou pitné vody, které byly v minulosti hlavní příčinou předčasné úmrtnosti v rozvojových zemích, v poslední dekádě poklesly. Avšak problémy se znečištěným ovzduším trvají a lokálně se i zhoršují. Nenechme se zmýlit klesajícím trendem v Evropě a Severní Americe a neberme problém znečištěného ovzduší za vyřešený. V současné globalizované ekonomice se většina průmyslové výroby přesouvá do chudších zemí. V kombinaci s rostoucí životní úrovní (která vede např. k rostoucímu počtu automobilů nebo stěhování lidí do měst) se situace v rozvojových zemích spíše zhoršuje.

Technologie GIS nám poskytuje ideální prostředek pro práci s daty o znečištěném ovzduší, jako je v této práci uvedená analýza. Bylo tak možno spojit data z různých zdrojů, vedená v různých souřadnicových systémech a poté je graficky znázornit, upravovat a interpolovat tak, aby byla analýza efektivní a názorná. Výsledkem práce jsou kromě tabulek a slovního zhodnocení také grafické přílohy připojené na závěr této práce. Zhotovené mapy koncentrací polutantů a mapy expozice populace poskytují přehledný a ucelený obraz situace v analyzovaných krajích.

Použité zdroje

ADAMEC, Vladimír, Jiří HUZLÍK, Roman LIČBINSKÝ, 2007. *Imisní zatížení ovzduší suspendovanými částicemi z dopravy*. [online], Centrum dopravního výzkumu, Observatoř bezpečnosti silničního provozu. Dostupné z: <http://www.czrso.cz/clanky/imisni-zatizeni-ovzdusi-suspendovanymi-casticemi-z-dopravy/>

ČHMÚ, 2011. *Imisní limity 2011*. [online], Český hydrometeorologický ústav, Praha. Dostupné z: http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/tab_roc/2011_enh/pdf/limity_CZ.pdf/

ČHMÚ, 2012a. *Znečištění ovzduší na území České Republiky v roce 2011*. Grafická ročenka, Český hydrometeorologický ústav - Úsek ochrany čistoty ovzduší, Praha. Dostupné z: <http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/grafroc/groc/gr11cz/obsah.html>

ČHMÚ, 2012b. *Tabelární přehled 2011: Znečištění ovzduší a atmosférická depozice v datech ČR*. Tabelární ročenka, Český hydrometeorologický ústav - Úsek ochrany čistoty ovzduší, Praha. Dostupné z: http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/tab_roc/2011_enh/index_CZ.html

ČHMÚ, 2016. *Portál Českého hydrometeorologického ústavu*. [online], Český hydrometeorologický ústav. Dostupné z: <http://portal.chmi.cz/>

EEA, 2009. *Spatial assessment of PM10 and ozone concentrations in Europe (2005)*. EEA Technical report 1/2009. Technická zpráva, European Environment Agency, Copenhagen. ISSN: 1725-2237. Dostupné z: <http://www.eea.europa.eu/publications/spatial-assessment-of-pm10-and-ozone-concentrations-in-europe-2005-1>

EEA, 2011. *Air Quality in Europe - 2011 report*. EEA Technical report 12/2011. Technická zpráva, European Environment Agency, Copenhagen. ISSN: 1725-2237. Dostupné z: <http://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2011>

EPA, 2016. *Criteria Air Pollutants*. [online], United States Environmental Protection Agency. Dostupné z: <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants>

ESRI, 2012. *ArcGIS 10.1 Help Library*. Součást software, Environmental Systems Research Institute.

EVROPSKÝ PARLAMENT, 2008. *Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2008/50/ES o kvalitě vnějšího ovzduší a čistším ovzduší pro Evropu*. Úřední věstník Evropské unie. Dostupné z: http://www.iprpraha.cz/uploads/assets/soubory/data/UAP/UAP2012/priloha_statisticke_udaje_uap_2012.pdf

FRIEDMAN, David, 2010. *Vehicular Pollution*. [online], Pollution Issues. Dostupné z: <http://www.pollutionissues.com/Ve-Z/Vehicular-Pollution.html>

GOUVEIA, Nelson, Tony FLETCHER, 2000. *Time series analysis of air pollution and mortality*. In: *Journal of Epidemiology & Community Health 2000*. [online], BMJ London. ISSN: 1470-2738. Dostupné z: <http://jech.bmj.com/content/54/10/750.full>

IBRAHIM, Mohd, Hwang YONG, 2012. *Mapping the Spatial Distribution of Criteria Air Pollutants in Peninsular Malaysia Using GIS*. In: *Air Pollution - Monitoring, Modelling and Health*. InTech. ISBN: 978-953-51-0424-7

JERRET, Michael et al, 2005. *Spatial analysis of Air Pollution and Mortality in Los Angeles*. In: *Epidemiology, Volume 16, Number 6*. [online], Lippincott Williams & Wilkins. ISSN: 1044-3983. Dostupné z: http://gsweventcenter.com/Draft_SEIR_References%5C2005_11_Jerrett.pdf

JUŘÍKOVSKÁ, Lucie, 2010. *Interpolace dešťových srážek v horských povodích*. Disertační práce, Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Hornicko - geologická fakulta.

KŘÍKAVOVÁ, Linda, 2009. *Interpolace bodových dat v GIS*. Bakalářská práce, ČVUT v Praze, Fakulta Stavební.

KRIVORUCHKO, Konstantin, 2008. *Using Geostatistical Analyst for analysis of California air quality*. [online], ESRI library. Dostupné z: <http://www.esri.com/library/whitepapers/pdfs/using-geostat-ca-airquality.pdf>

NEAA, 2005. *Particulate matter: a closer look. Report 5000370011*. [online], Netherlands Environmental Assessment Agency, Bilthoven. ISBN: 90 6960 1338. Dostupné z: <http://rivm.openrepository.com/rivm/handle/10029/7368>

OLIVER, Margaret, Richard WEBSTER, 2015. *Basic Steps in Geostatistics: The Variogram and Kriging*. Springer Science + Business media, New York. ISBN: 978-3-319-15864-8.

PĚČKA, Petr, 2014. *Analýza znečištění města Ostravy*. Diplomová práce, Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta.

ŘSD, 2011. *Výsledky celostátního sčítání dopravy na silniční a dálniční síti ČR v roce 2010*. [online], Ředitelství silnic a dálnic. Dostupné z: <http://scitani2010.rsd.cz/>

RYCHLÍKOVÁ, Eva, 2014. *Emidemiologická analýza vlivu znečištění ovzduší na zdraví v regionálním měřítku*. Disertační práce, Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta.

SAEFL, 2004. *Modelling of NO₂ and benzene ambient concentrations in Switzerland 2000 to 2020*. [online], Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape, Berne. Environmental documentation No. 188. Dostupné z: <http://www.bafu.admin.ch/publikationen/publikation/00288/index.html?lang=en>

SÁŇKA, Ondřej, 2008. *Modelování a vizualizace environmentálních dat v prostoru a čase s využitím GIS*. Diplomová práce, Masarykova univerzita v Brně, Přírodovědecká fakulta.

SHAKEEL, M. et al, 2015. *Application of GIS in Visualization and Assessment of Ambient Air Quality for SO₂ and NO_x in Sheikhpura City, Pakistan*. In: *Geography journal Volume 5 Issue 3*. Creative Commons Acces. ISSN: 2167-0587

ŠPIČKA, Jan, 2015. *Bayesovské metody v krigování*. Diplomová práce, ČVUT v Praze, Fakulta Stavební.

STEIN, Michael, 1999. *Interpolation of Spatial Data - Some Theory for Kriging*. Springer Science + Business media, New York. ISBN: 978-1-4612-7166-6.

ÚRHP PRAHA, 2012. *Statistické údaje 2012, územně analytické podklady hlavního města Prahy*. [online], Útvar rozvoje hl. m. Prahy.

VÁGNEROVÁ, Milena, 2011. *Znečišťující látky v ovzduší*. [online], Ekologické centrum Most, Výzkumný ústav pro hnědé uhlí a.s.. Dostupné z: <http://www.ohk-most.cz/Files/OHK/Most/VUHU-Nezkracenaverze.pdf>

VILLANYI, Vanda, 2010. *Air Pollution*. Sciyo, Croatia. ISBN: 978-953-304-143-5

VÚRV, 2008. *Kap. 3.04. - Nové aplikační postupy hodnocení kvality ovzduší podle EU. In: Souhrnná zpráva z projektu: Kauzální monitoring vlivu imisí na zemědělskou výrobu*. [online], Výzkumný ústav rostlinné výroby, Praha. Dostupné z: <https://sites.google.com/a/eto.vurv.cz/monitoring-imisi/monitoring-imisi/vyzkumna-zprava>

WHO, 2001. *Quantification of the Health Effects of Exposure to Air Pollution*. [online], World Health Organization, European centre for environment and health, Copenhagen. EUR/01/5026342. Dostupné z: <http://apps.who.int/iris/handle/10665/108463>

WHO, 2016. *An estimated 12.6 million deaths each year are attributable to unhealthy environments*. [online], World Health Organization. Dostupné z: <http://who.int/mediacentre/news/releases/2016/deaths-attributable-to-unhealthy-environments/en/>

Poznámka: Aktuálnost všech uvedených zdrojů je ověřena k datu 15.4.2016.

Seznam zkratek

CO	Oxid uhelnatý
ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav
EEA	European Environmental Agency - Evropská agentura životního prostředí
EPA	United States Environmental Protection Agency - Agentura pro ochranu životního prostředí Spojených států Amerických
GIS	Geografický informační systém
IDW	Inverse distance weighting - metoda inverzních vzdáleností
ISKO	Informační systém kvality ovzduší ČHMÚ
LAT	Lower assessment threshold - dolní prahová hodnota pro posuzování znečištění ovzduší
NO ₂	Oxid dusičitý
NO _x	Oxidy dusíku obecně
O ₃	Ozón
Pb	Olovo
PM	Particulate matter - pevné suspendované částice
PM _{2.5}	Pevné suspendované částice s aerodynamickým průměrem < 2,5 μm
PM ₁₀	Pevné suspendované částice s aerodynamickým průměrem < 10 μm
REZZO	Registr emisí a zdrojů znečišťování ovzduší
ŘSD	Ředitelství silnic a dálnic České republiky
SO ₂	Oxid siřičitý
UAT	Upper assessment threshold - horní prahová hodnota pro posuzování znečištění ovzduší
WHO	World Health Organization - Světová zdravotnická organizace

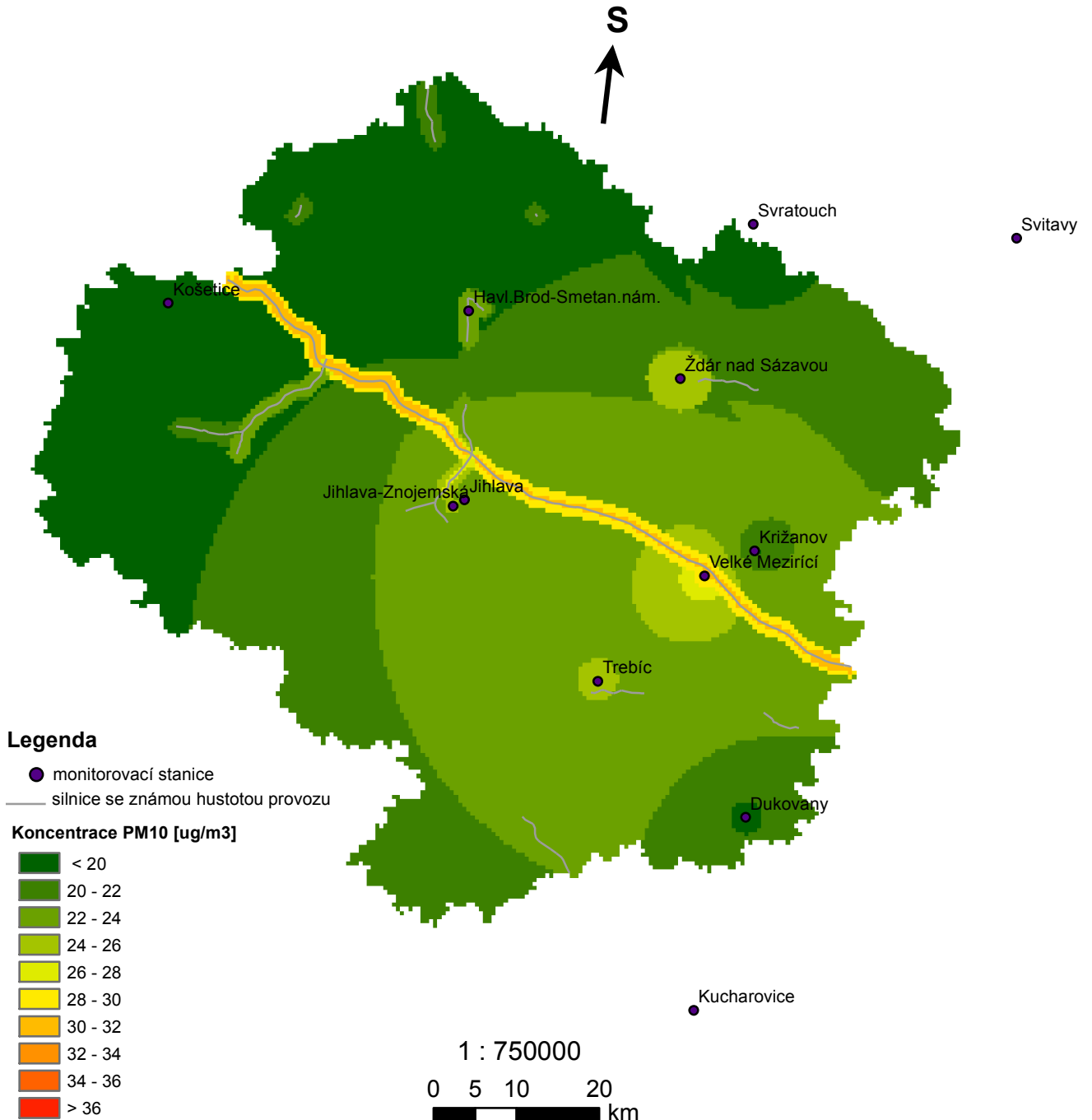
Seznam příloh

A	Mapy koncentrací polutantů	72
A.1	Koncentrace PM ₁₀ v kraji Vysočina	72
A.2	Koncentrace PM ₁₀ v hlavním městě Praze	73
A.3	Koncentrace NO ₂ v hlavním městě Praze	74
A.4	Koncentrace PM ₁₀ v Ústeckém kraji	75
A.5	Koncentrace NO ₂ v Ústeckém kraji	76
A.6	Koncentrace SO ₂ v Ústeckém kraji	77
B	Mapy expozice populace	78
B.1	Expozice obyvatel kraje Vysočina polutantu PM ₁₀	78
B.2	Expozice obyvatel hlavního města Prahy polutantu PM ₁₀	79
B.3	Expozice obyvatel hlavního města Prahy polutantu NO ₂	80
B.4	Expozice obyvatel Ústeckého kraje polutantu PM ₁₀	81
B.5	Expozice obyvatel Ústeckého kraje polutantu NO ₂	82
B.6	Expozice obyvatel Ústeckého kraje polutantu SO ₂	83

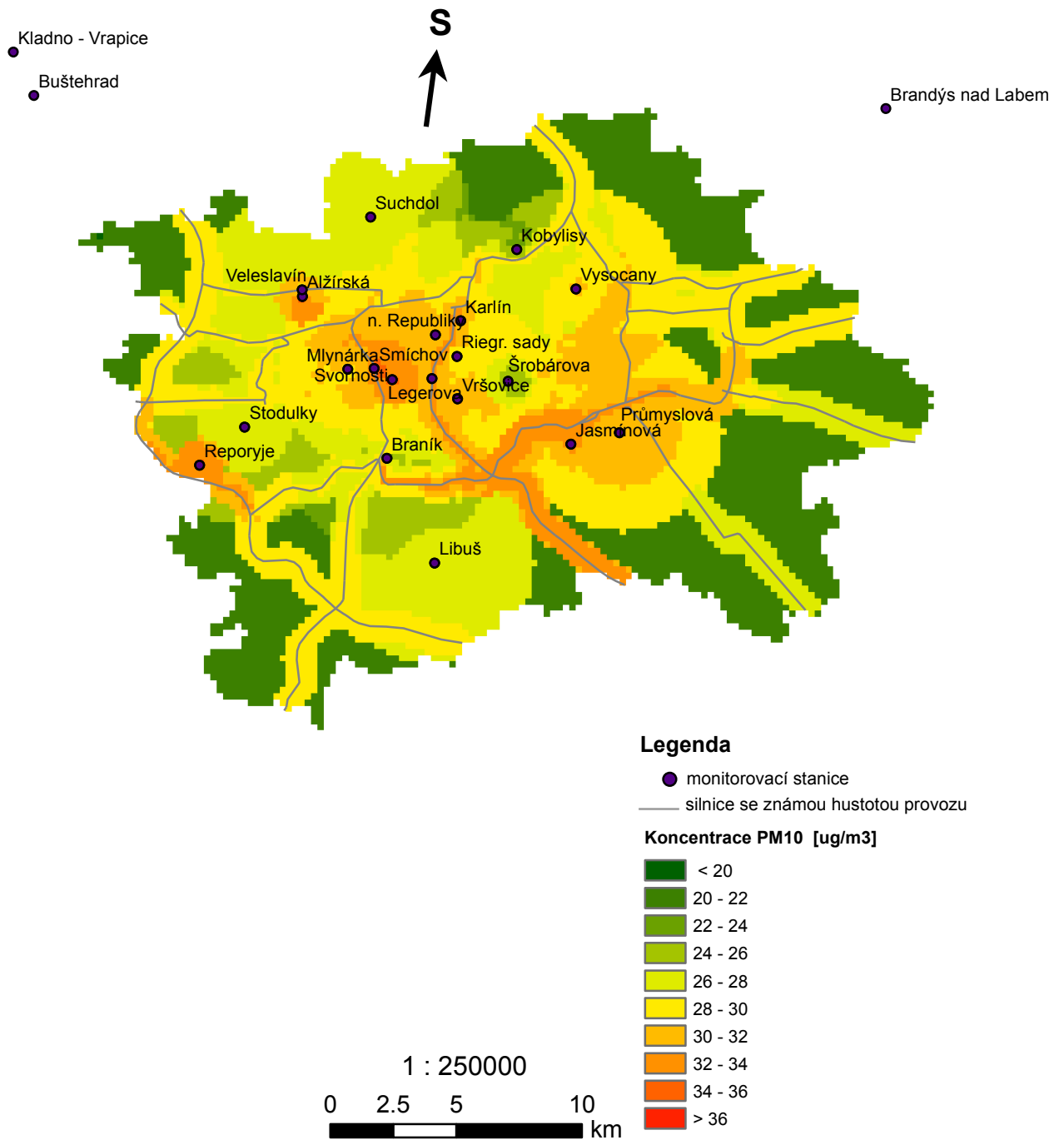
Pozn.: Tyto mapy byly vytvořeny s využitím dat z databáze ArcČR 500, která je ve vlastnictví společnosti ARCDATA Praha s.r.o., Zeměměřického úřadu a Českého statistického úřadu. Dalšími zdroji dat jsou imisní data ve vlastnictví Českého hydrometeorologického ústavu a data o hustotě provozu na vybraných komunikacích ve vlastnictví Ředitelství silnic a dálnic ČR.

A Mapy koncentrací polutantů

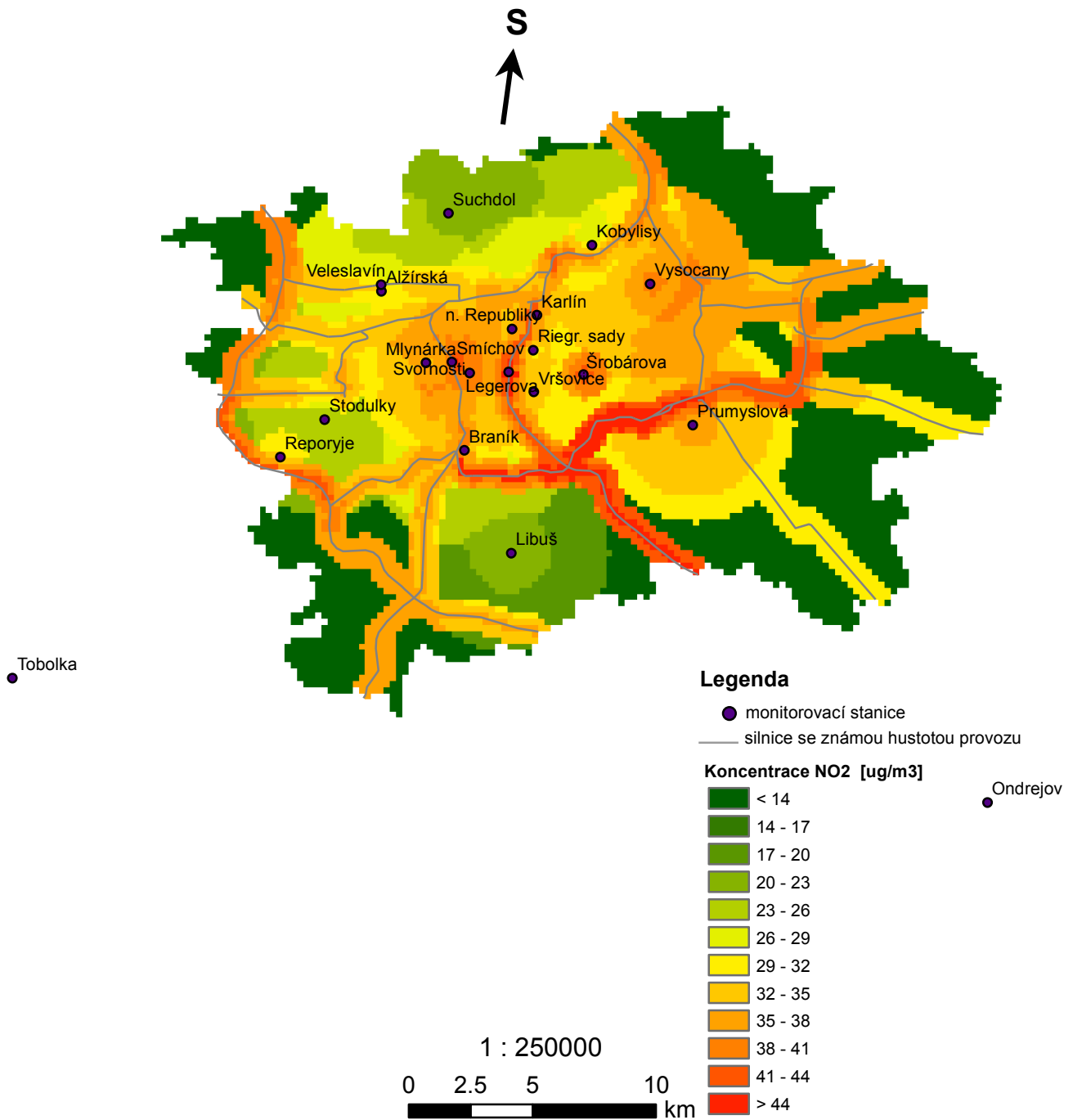
A.1 Koncentrace PM₁₀ v kraji Vysočina



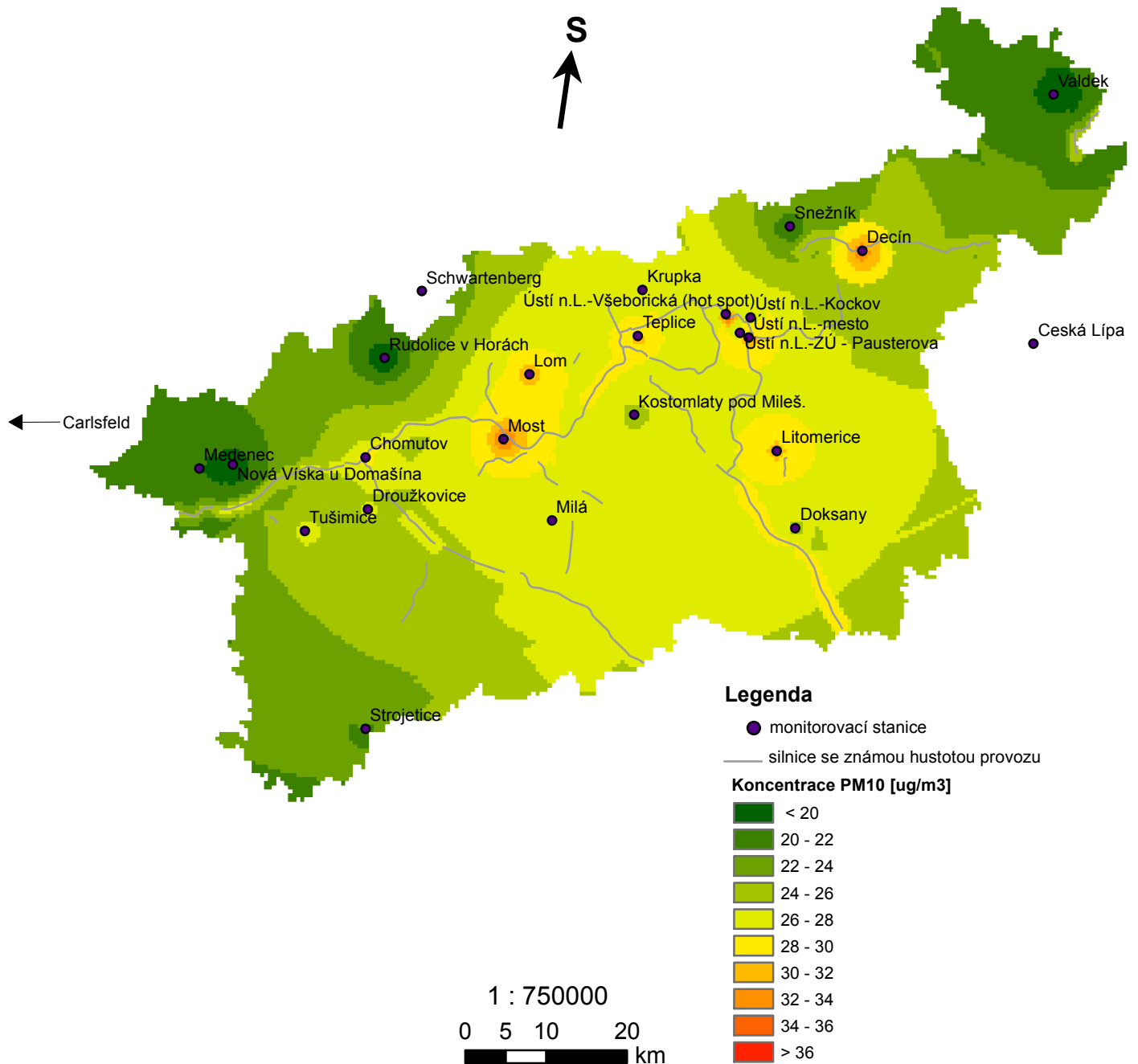
A.2 Koncentrace PM₁₀ v hlavním městě Praze



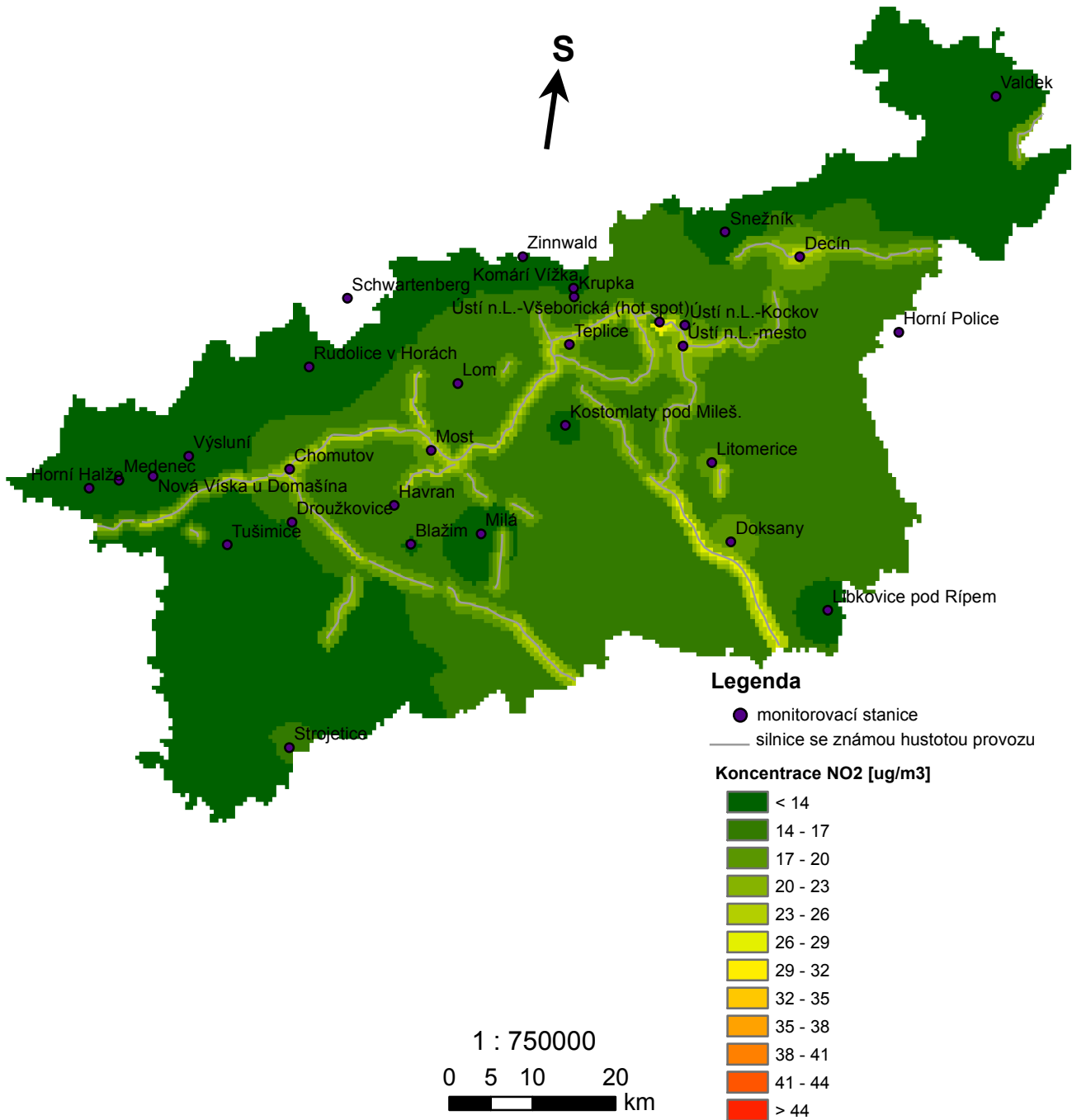
A.3 Koncentrace NO₂ v hlavním městě Praze



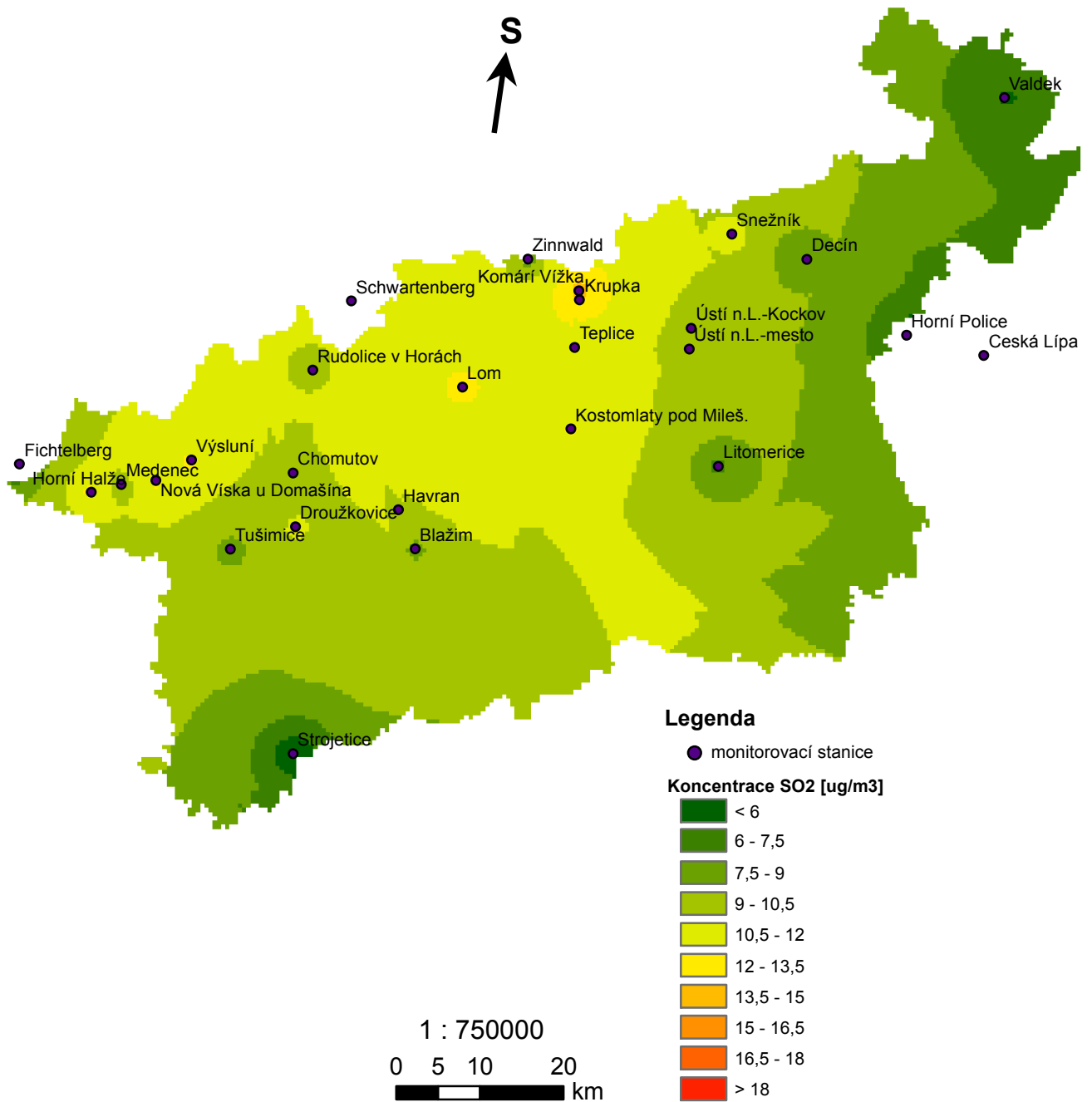
A.4 Koncentrace PM₁₀ v Ústeckém kraji



A.5 Koncentrace NO₂ v Ústeckém kraji

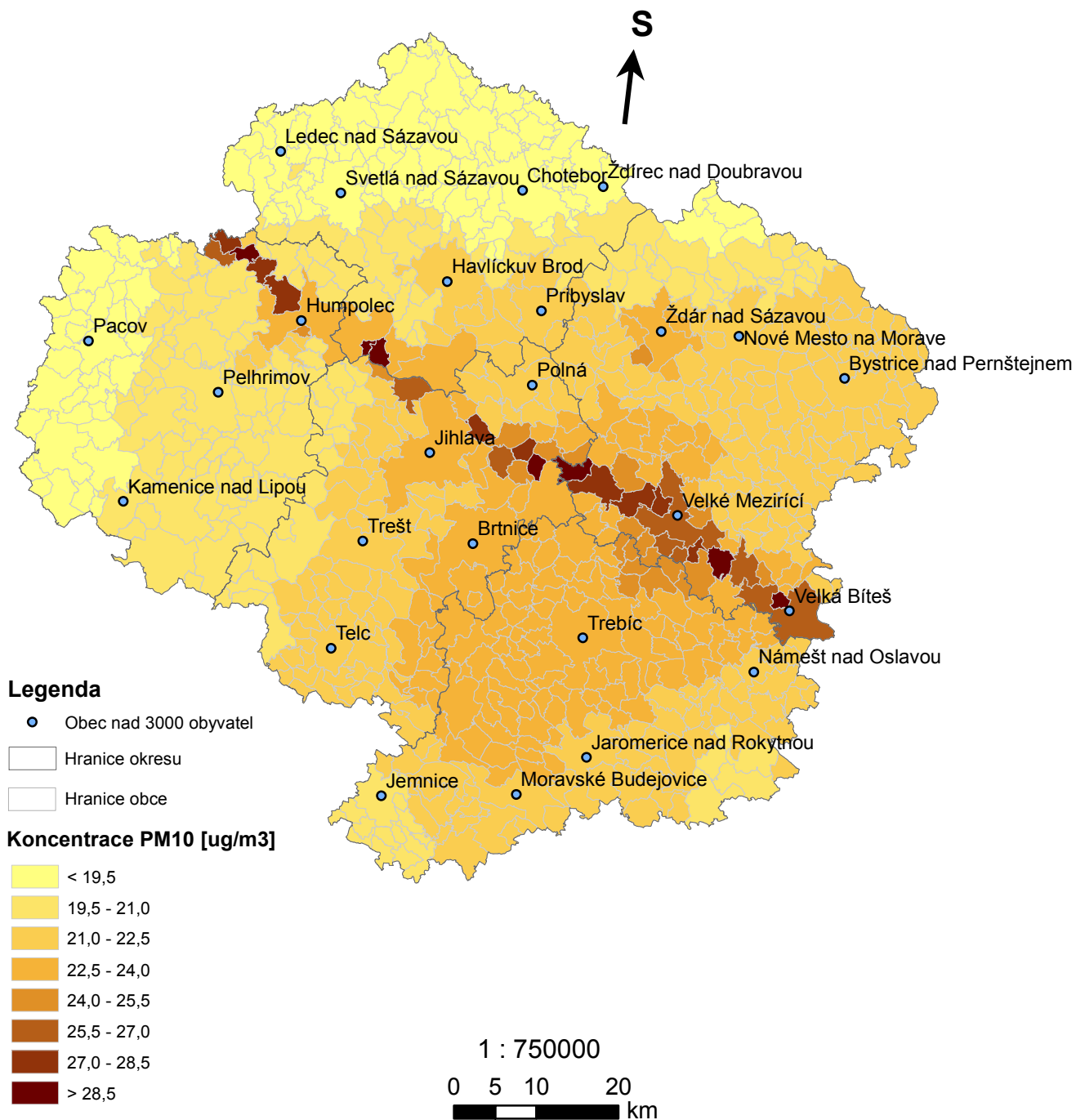


A.6 Koncentrace SO₂ v Ústeckém kraji

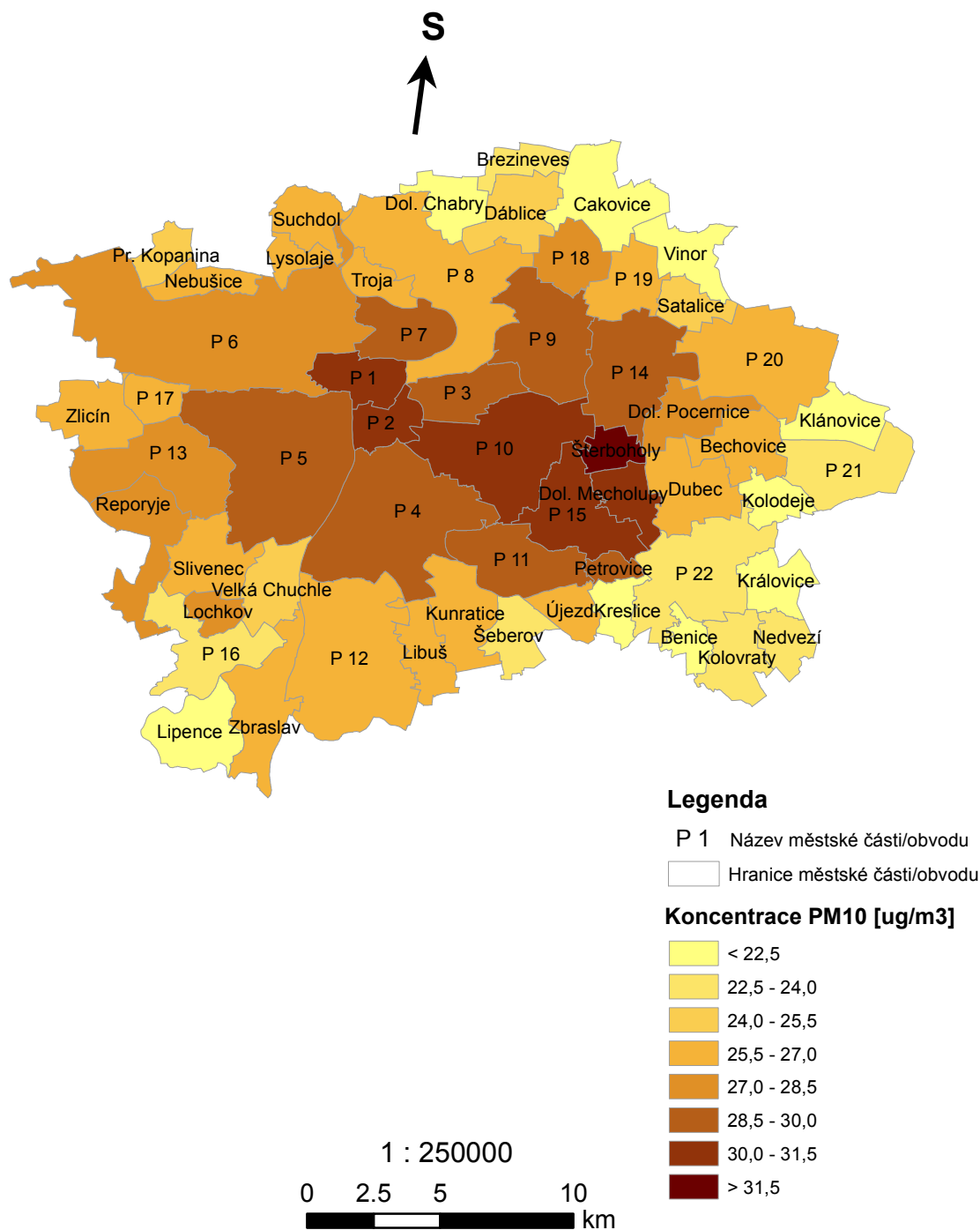


B Mapy expozice populace

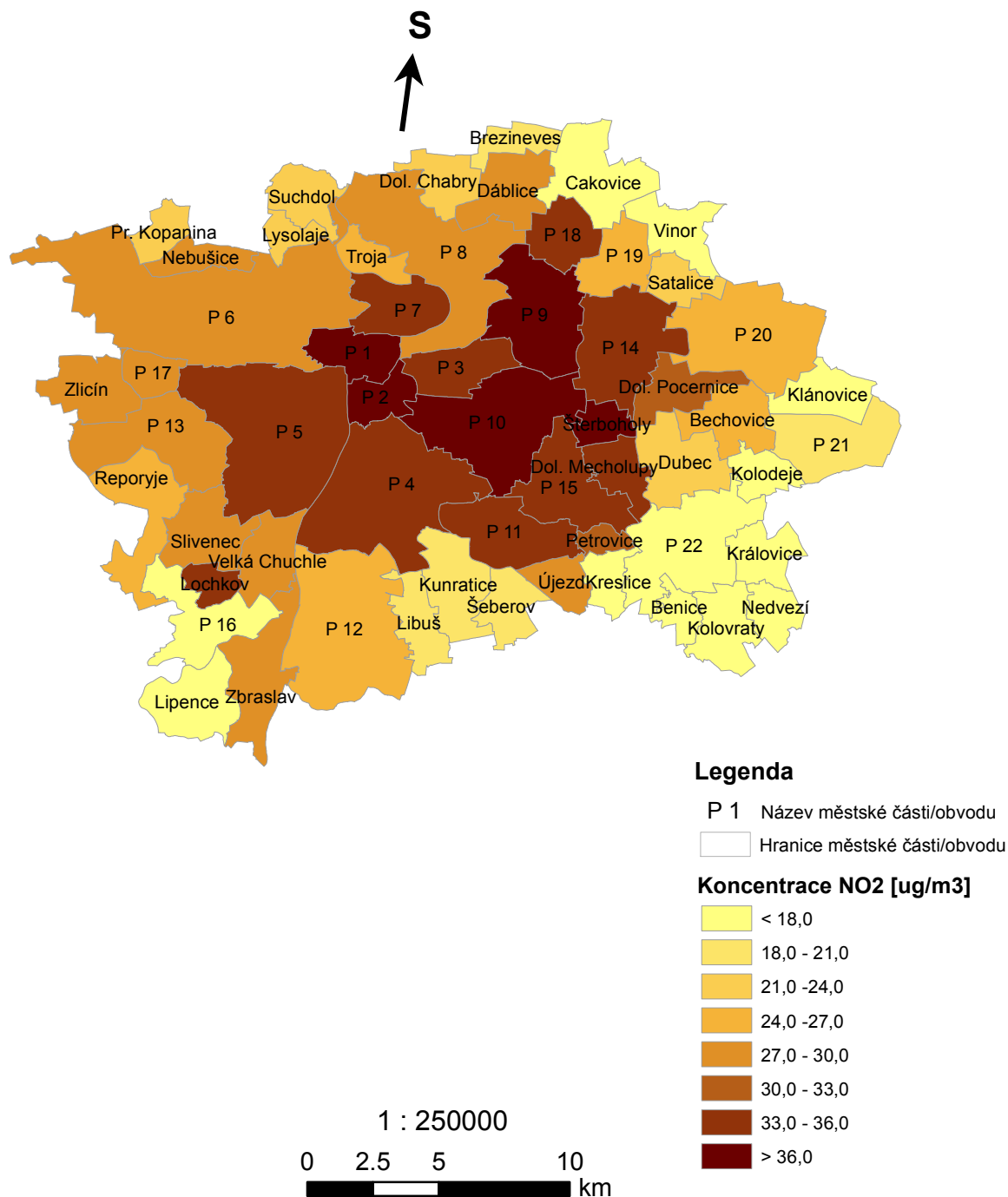
B.1 Expozice obyvatel kraje Vysočina polutantu PM₁₀



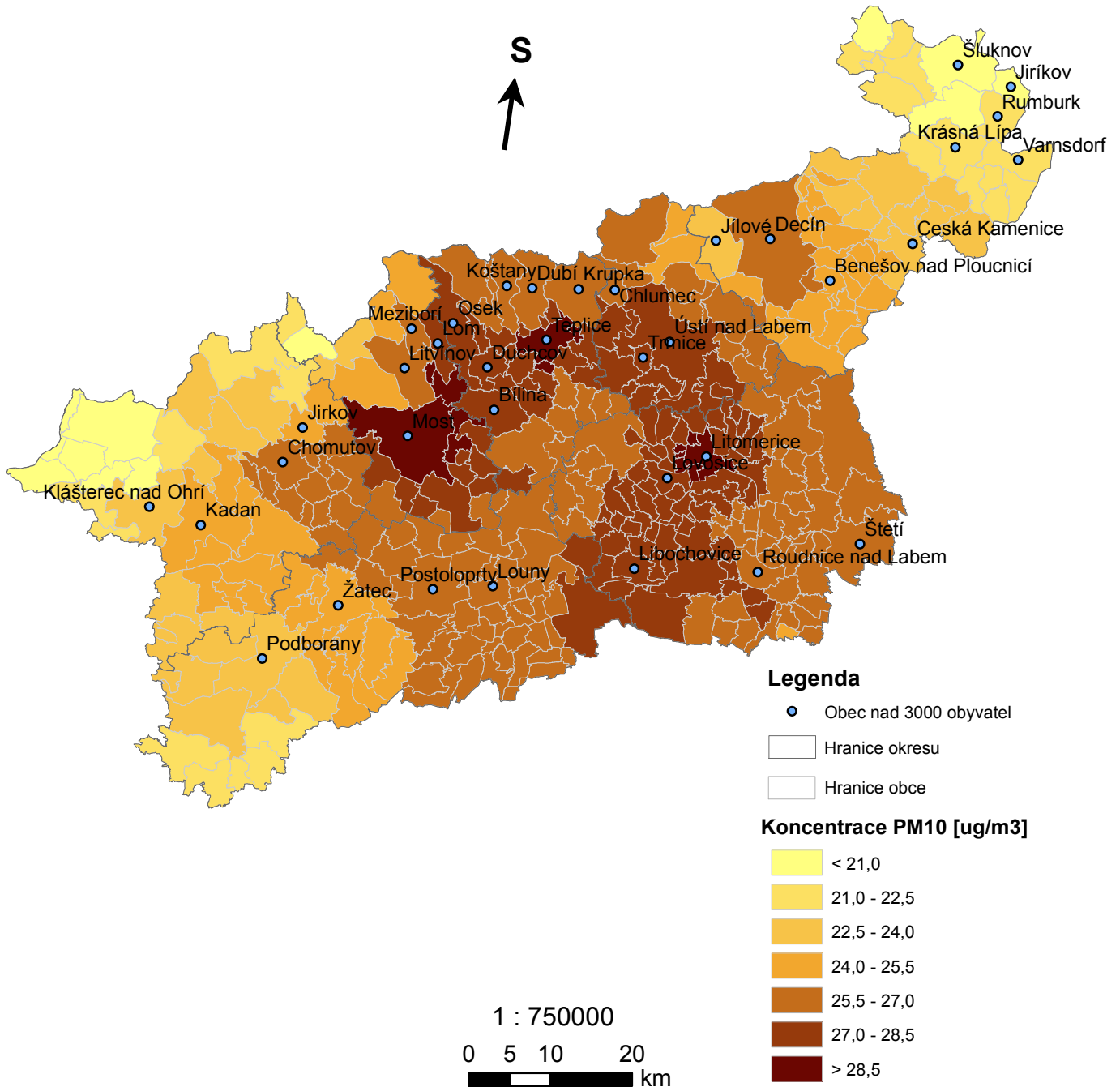
B.2 Expozice obyvatel hlavního města Prahy polutantu PM₁₀



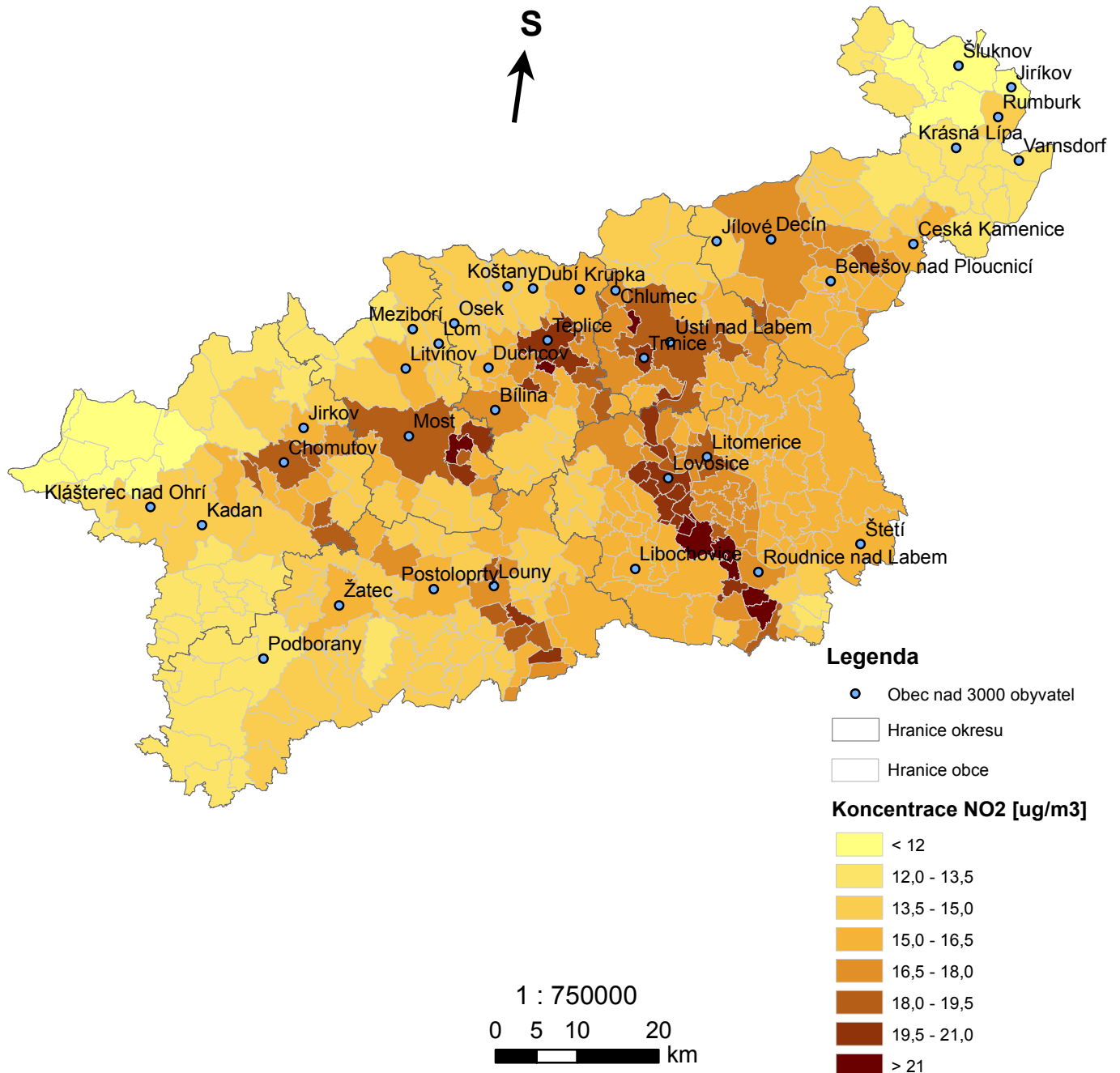
B.3 Expozice obyvatel hlavního města Prahy polutantu NO₂



B.4 Expozice obyvatel Ústeckého kraje polutantu PM_{10}



B.5 Expozice obyvatel Ústeckého kraje polutantu NO₂



B.6 Expozice obyvatel Ústeckého kraje polutantu SO₂

