

Návrh modifikace metodiky EPA AP-42 pro výpočet emisí resuspendovaných částic ze zpevněných komunikací

**Tento návrh byl vypracován v rámci projektu Technologické agentury ČR
č. TA02030664 „Souhrnná metodika pro hodnocení vlivů provozu silničních
komunikací na obyvatele v jejich okolí“.**

ZPRACOVAL: ATEM – Ateliér ekologických modelů, s. r. o.
Hvožd'anská 3/2053
148 01 Praha 4
e-mail: atem1@atem.cz
tel.: 241 494 425

ŘEŠITELÉ: Mgr. Jan Karel
Mgr. Radek Jareš
Bc. Eva Smolová

Květen 2013

O B S A H

1. ÚVOD	3
2. ZÁKLADNÍ KONSTRUKCE VÝPOČETNÍHO POSTUPU	4
3. VLIV PARAMETRU SL NA VELIKOST VYPOČTENÉ EMISE	6
4. POSTUP ÚPRAVY VÝPOČETNÍHO POSTUPU	11
4.1. Stanovení průběhu hodnoty sL v závislosti na intenzitě dopravy	11
4.2. Stanovení průběhu hodnoty multiplikátoru pro zimní období	16
5. VÝSLEDNÝ NÁVRH VÝPOČETNÍHO POSTUPU	17
5.1. Určení hodnoty sL pro letní období	17
5.2. Určení hodnoty multiplikátoru pro zimní období.....	20
5.3. Výpočet průměrného emisního faktoru.....	20
6. LITERATURA	22

1. ÚVOD

Předkládaný návrh modifikace metodiky EPA byl vypracován v rámci projektu Technologické agentury ČR č. TA02030664 „Souhrnná metodika pro hodnocení vlivů provozu silničních komunikací na obyvatele v jejich okolí“.

Návrh se týká nevýfukových emisí z automobilové dopravy, konkrétně pak stanovení množství emisí částic zvržených pohybem automobilů z povrchu vozovky. Při průjezdu vozidla po komunikaci jsou prachové částice, uložené na povrchu vozovky, vynášeny do ovzduší, a to zejména působením turbulentního proudění vzduchu za vozidlem. Zásadním aspektem těchto emisí je skutečnost, že částice může být po zvržení deponována zpět na povrch komunikace a opětovně vynášena do ovzduší, proto se pro tento efekt používá výraz sekundární prašnost nebo též resuspenze.

Pro výpočet emisí pocházejících ze sekundární prašnosti není v ČR zakotvena žádná „oficiální metodika“, patrně nejčastěji je v různých obměnách používána metodika US EPA „AP-42, Compilation of Air Pollutant Emission Factors“, část „13.2.1. Paved roads“ (dále jen metodika AP-42) [1]. Aplikace metodiky AP-42 však přináší některé poměrně závažné problémy. Pravděpodobně nejvýznamnější je skutečnost, že použití doporučeného postupu pro zadání jedné ze vstupních veličin (konkrétně „množství jemných prachových částic na povrchu vozovky“) ovlivňuje výsledek výpočtu zcela nežádoucím způsobem.

V následujícím textu je nejprve představen příslušný výpočetní postup, dále je prezentován uvedený problém a je předložen návrh úpravy výpočetního postupu.

2. ZÁKLADNÍ KONSTRUKCE VÝPOČETNÍHO POSTUPU

Podle metodiky AP-42 se množství emisí zvířených prachových částic určuje pomocí následujícího vzorce:

$$E = k \times sL^{0.91} \times W^{1.02}$$

kde:

- E = emisní faktor pro příslušnou velikostní skupinu částic, vyjádřený ve stejných jednotkách jako koeficient *k* (emisní faktor je stanoven pro suchou vozovku)
- *k* = koeficient pro danou velikostní skupinu částic (viz níže)
- *sL* = množství prachových částic o velikosti menší než 75 μm usazených na povrchu vozovky (g/m²)
- *W* = průměrná hmotnost vozidel (krátké tuny – viz níže)

Hodnoty koeficientu *k* jsou následující (v gramech na vozokilometr):

- pro částice frakce PM_{2,5} = 0,15 gramů na 1 vozokilometr
- pro částice frakce PM₁₀ = 0,62 gramů na 1 vozokilometr
- pro částice frakce PM₁₅ = 0,77 gramů na 1 vozokilometr
- pro částice frakce PM₃₀ = 3,23 gramů na 1 vozokilometr, přičemž tato hodnota je určena i k výpočtům emisí celkových částic (TSP) zvířených z povrchu komunikace

Výše uvedená rovnice vyjadřuje množství emise prachových částic, zvířených z povrchu suché vozovky. Stanovení celkové emise v delším časovém období se zohledněním vlivu srážek se pak vypočte pomocí korekčního koeficientu, vyjadřujícího četnost srážek. Metodika AP-42 uvádí dvě varianty výpočtu, a to na základě denních dat (počet dnů se srážkami) nebo dat hodinových (počet hodin srážek). Příslušné rovnice jsou následující:

- na základě denních dat:

$$E_{ext} = k \times sL^{0.91} \times W^{1.02} \times \left(1 - \frac{P}{4N}\right)$$

- na základě hodinových hodnot:

$$E_{ext} = k \times sL^{0.91} \times W^{1.02} \times \left(1 - \frac{1.2P}{N}\right)$$

kde:

- E_{ext} = průměrný roční (nebo jiný dlouhodobý) emisní faktor, vyjádřený ve stejných jednotkách jako koeficient k
- P = počet dnů nebo hodin s měřitelnými srážkami (dle metodiky AP-42 nad 0,01 palce, tj. nad 0,254 mm)
- N = celkový počet dnů resp. hodin

Pro finální výpočet produkce emisí z daného úseku komunikace je přirozeně nutno emisní faktor vynásobit počtem vozidel za daný časový úsek (obvykle za průměrný den), délkou komunikace a průměrovacím časem. Výpočet produkce celkových emisí z konkrétního silničního úseku v gramech za sekundu je tedy pak následující (při vyjádření vlivu srážek na základě denních dat):

$$E_{\text{kom}} = d \times \frac{ADT}{24 \times 3600} \times k \times sL^{0.91} \times W^{1.02} \times \left(1 - \frac{P}{4N}\right)$$

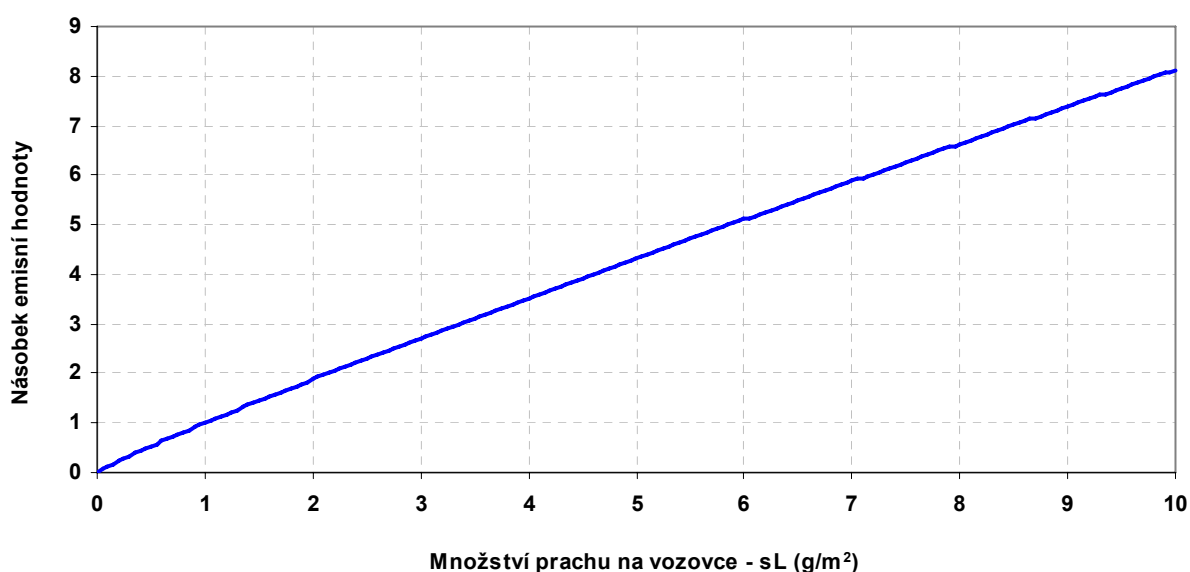
kde:

- E_{kom} = emise z dané komunikace v $\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$
- d = délka komunikace v km
- ADT = průměrný denní počet vozidel na komunikaci (*average daily traffic*)
- ostatní parametry mají stejný význam jako v předchozí rovnici

3. VLIV PARAMETRU SL NA VELIKOST VYPOČTENÉ EMISE

Použitá veličina množství prachu na vozovce (sL – *Silt loading*) vyjadřuje množství částic menších než 75 µm usazených na povrchu vozovky, vyjádřeno v gramech na m² povrchu. Výsledná závislost emise na hodnotě sL je vyjádřena členem sL^{0,91}, jedná se tedy téměř o lineární nárůst.

Obr. 1. Závislost vypočtené emise na veličině sL (množství prachu na vozovce) dle metodiky AP-42



Jedná se o veličinu zatíženou poměrně značnou nejistotou. Metodika AP-42 doporučuje její stanovení na základě přímých měření – sběrem vzorků, oddělením frakce PM₇₅ na kalibrovaných sítích a následné gravimetrické stanovení. Důvodem je skutečnost, že množství prachu na vozovce je zásadně ovlivněno množstvím lokálních podmínek – charakterem dopravy (rychlost, intenzita dopravy, podíl těžkých vozidel), charakterem komunikace (obrubníky, počet pruhů, parkovací stání), využitím okolních pozemků (zemědělství, nová výstavba) a dalšími faktory (zimní posyp, přenos prachu větrem).

V případě, že není možné měření provést, je možné vycházet z doporučených hodnot, stanovených metodikou pro komunikace s různou intenzitou dopravy. Tyto hodnoty jsou uvedeny v následující tabulce.

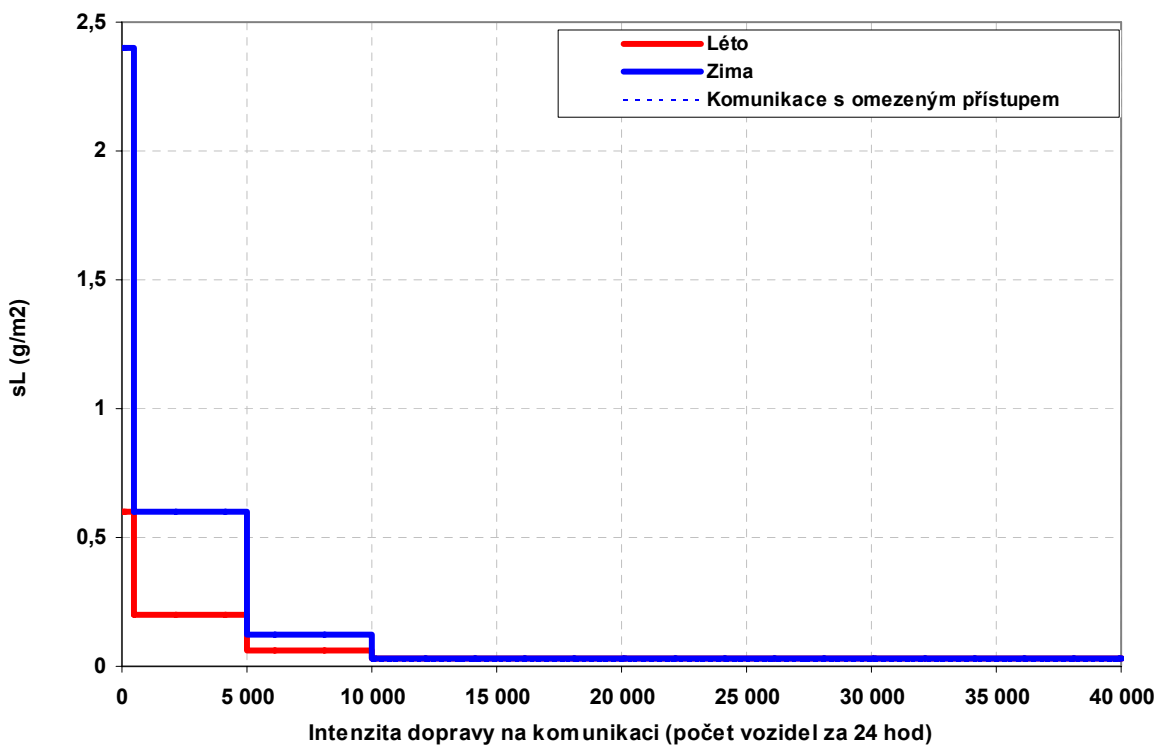
Tab. 1. Nastavení hodnoty sL v závislosti na intenzitě dopravy a charakteru komunikace – doporučené hodnoty dle metodiky AP-42

Hodnota sL – množství prachových částic menších než 75 µm na povrchu vozovky (g/m ²)	Průměrná denní intenzita dopravy (počet vozidel za 24 hod)			
	< 500	500 – 5 000	5 000 - 10 000	> 10 000
Základní hodnota sL	0,6	0,2	0,06	0,03 / 0,015*
Multiplikátor pro zimní období (během měsíců s tuhými srážkami)	×4	×3	×2	×1
Jednorázové navýšení po provedení zimního posypu komunikace (g/m ²)	2	2	2	2
Doba od posypu do dosažení základních hodnot (dny)	7	3	1	0,5

*) pro komunikace s omezeným přístupem

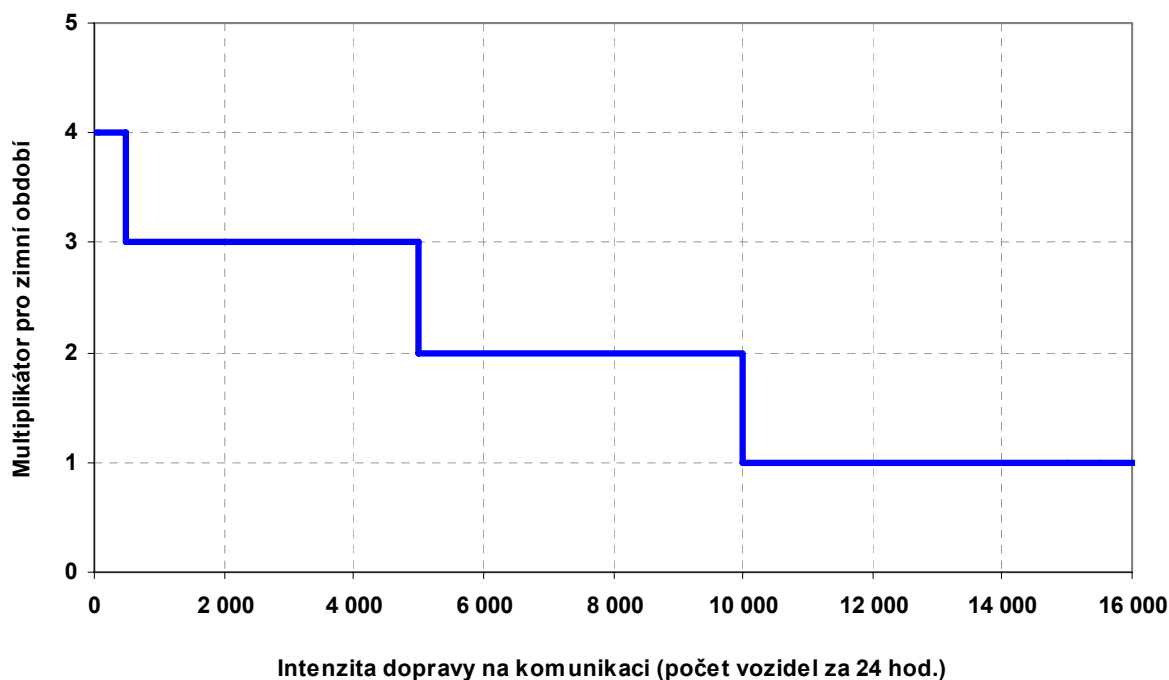
Pro lepší představu rozdílů v zadání parametru sL jsou doporučené hodnoty vyneseny do grafu na následujícím obrázku.

Obr. 2. Doporučené hodnoty sL v závislosti na intenzitě dopravy dle AP-42



Doporučené hodnoty multiplikátoru pro zimní období uvádí graf na následujícím obrázku.

Obr. 3. Doporučené hodnoty multiplikátoru pro zimní období v závislosti na intenzitě dopravy dle AP-42

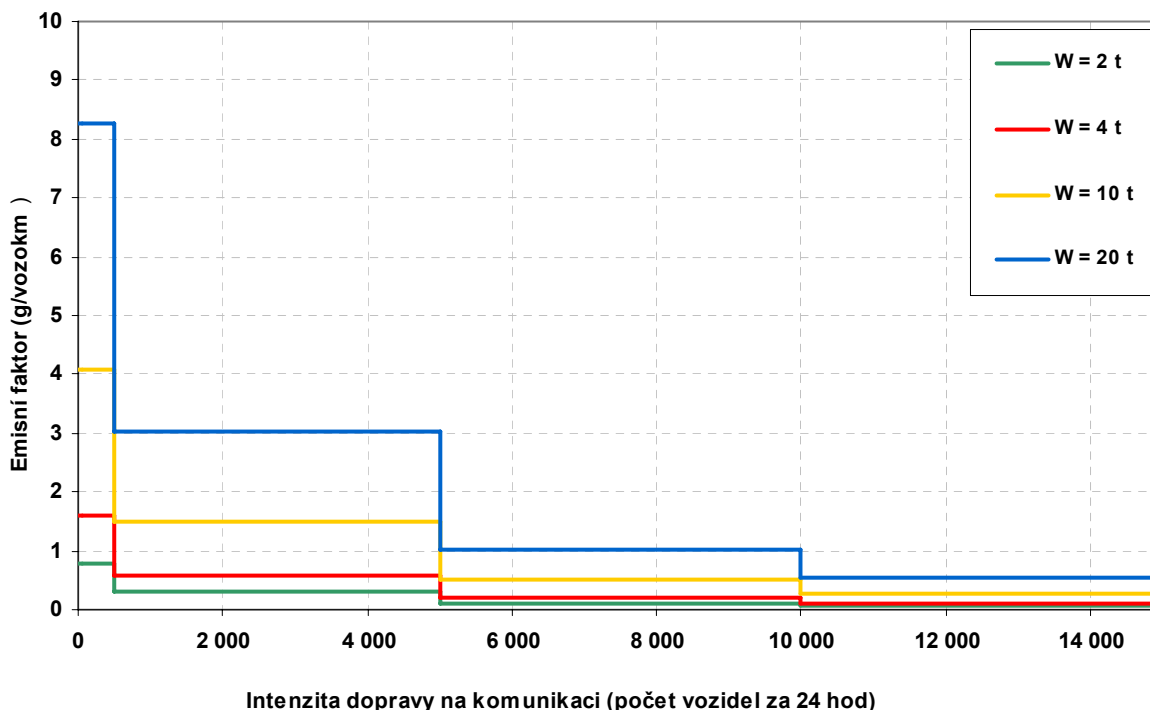


Podle metodiky AP-42 se tedy na nejvíce zatížených dálničních tazích vyskytuje 40 – 160 × méně prachových částic o velikosti do 75 µm, než na nejméně zatížených ulicích s intenzitami do 500 vozidel za den.

Aplikace doporučených hodnot dle tab. 1 zcela zásadně ovlivňuje výsledky výpočtu emisí, a to ne zcela žádoucím způsobem. Patrně nejvýznamnější problém spočívá v tom, že při aplikaci metodiky AP-42 spolu s doporučenými hodnotami sL dochází v „hraničních oblastech“ intenzit dopravy ke skokovým změnám hodnoty sL při mírné změně intenzity dopravy. Tento jev se v ročním průměru dále znásobuje použitím různých hodnot multiplikátoru pro zimní období.

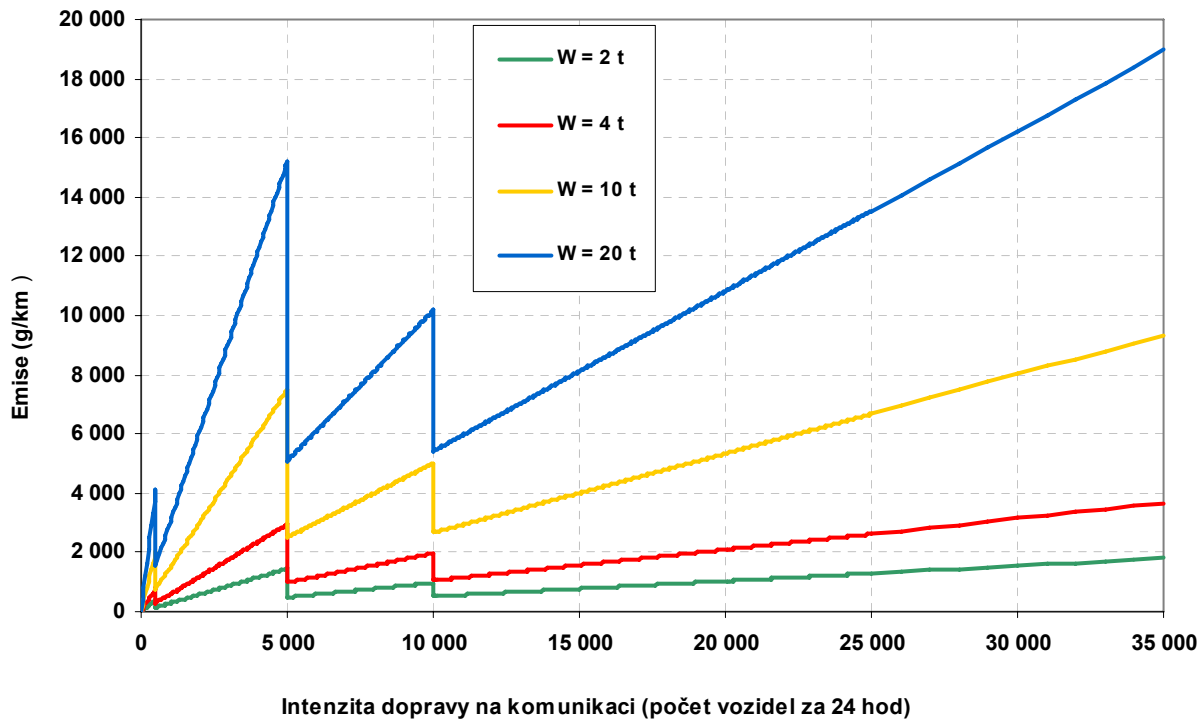
Uvedené jevy související s doporučenými hodnotami sL jsou patrné z následujících dvou obrázků. Na obr. 4 jsou zobrazeny úrovně jednotkových emisních faktorů v gramech na vozokilometr v závislosti na intenzitě dopravy na komunikaci, pro silnice s různou hodnotou průměrné hmotnosti dopravního proudu. Jak je zřejmé, je nastavení parametru sL zcela rozhodující pro výsledné stanovení emisního faktoru.

Obr. 4. Určení jednotkového emisního faktoru PM_{10} v závislosti na intenzitě dopravy při použití doporučených hodnot sL pro různé průměrné hmotnosti vozidel



Následující graf na obr. 5 pak ukazuje, jakým způsobem se daný výpočetní postup projeví v celkové produkci emisí z úseku komunikace, tj. po vynásobení počtem vozidel. V jednotlivých intervalech intenzity dopravy (0 – 500 voz./den, 500 – 5000 voz./den, atd.) se při konstantním sL zvyšuje emise lineárně s intenzitou dopravy. V „hraničních“ místech však dochází ke skokovému poklesu emisní hodnoty o desítky procent. Lokálního maxima je dosaženo při intenzitě 5000 vozidel za den, srovnatelná emise je pak znovu dosažena až při intenzitě 28 100 voz./den.

Obr. 5. Výpočet produkce emisí PM₁₀ z 1 km komunikace v závislosti na intenzitě dopravy při použití doporučených hodnot sL



4. POSTUP ÚPRAVY VÝPOČETNÍHO POSTUPU

Je zřejmé, že výše uvedené výpočetní řešení není pro praktickou aplikaci optimální. Z tohoto důvodu byly hledány možnosti takové modifikace výpočetního postupu, která by umožnila zadávat hodnoty sL i hodnoty multiplikátoru pro zimní období spojitě, bez skokových přechodů.

4.1. Stanovení průběhu hodnoty sL v závislosti na intenzitě dopravy

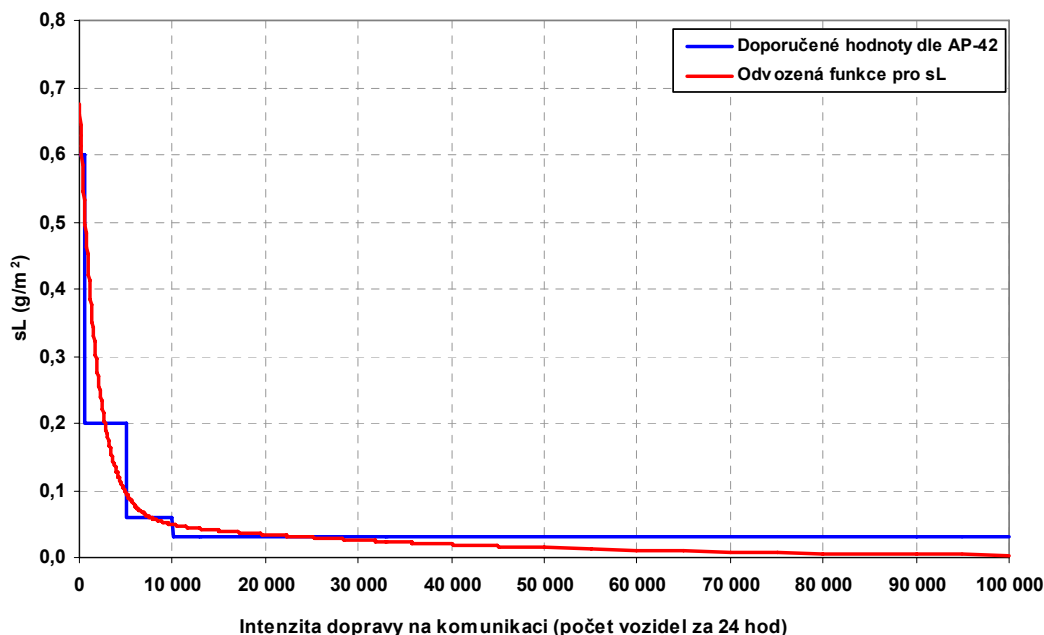
Určité řešení spočívá ve vytvoření regresní křivky, která nabývá doporučených hodnot sL při zadání středních hodnot jednotlivých intervalů intenzity dopravy, jak ukazuje tab. 2. Hodnota sL by pak v závislosti na intenzitě neklesala skokově, nýbrž pozvolně. Křivka byla zpracována pro letní období s tím, že pro zimní část roku se použije křivka navržená na základě multiplikátorů (viz v kap. 4.2).

Průběh dané funkce je uveden na obrázku 6.

Tab. 2. Návrh modifikace postupu pro určení hodnoty sL

Interval průměrné denní intenzity dopravy (voz./den)	< 500	500 - 5 000	5 000 - 10 000	> 10 000	
Střední hodnota intervalu použitá pro tvorbu funkce sL podle intenzity (voz./den)	250	2 750	7 500	25 000	50 000
Hodnota sL (g/m ²)	0,6	0,2	0,06	0,03	0,015

Obr. 6. Použití středních hodnot doporučených rozpětí intenzit dopravy pro tvorbu spojitě funkce ke stanovení sL

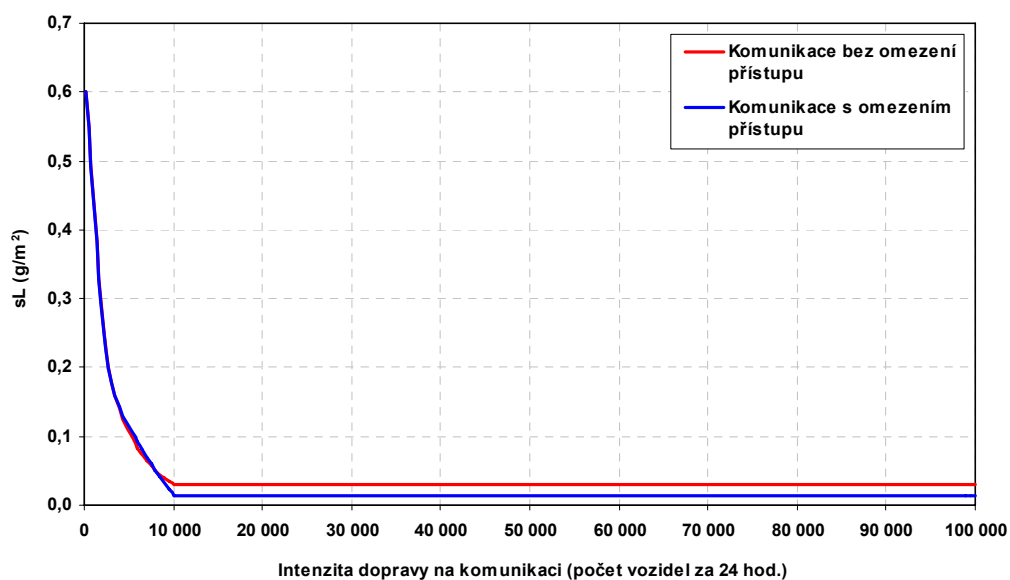


Jak je patrné, bylo u tohoto návrhu aplikováno řešení, které spojuje hodnoty pro komunikace s omezením a bez omezení přístupu s tím, že jako „komunikace s omezením přístupu“ jsou uvažovány silnice s více než 50 tisíci vozidel za den. Dále je zřejmé, že při hodnotách dopravní zátěže nad 25 tisíc, resp. nad 50 tisíc vozidel za den dochází k určitému „podhodnocení“ vypočtených emisí v porovnání s metodikou AP-42.

Tyto skutečnosti se ukázaly při praktické aplikaci metodiky jako nežádoucí. Proto bylo zvoleno alternativní řešení, které je založeno na podmíněnou funkci, kdy při překročení určité meze intenzity dopravy je uvažována konstantní hodnota sL na úrovni 0,03 resp. 0,015 g/m². Současně byl oddělen výpočetní postup komunikace s omezením a bez omezení přístupu.

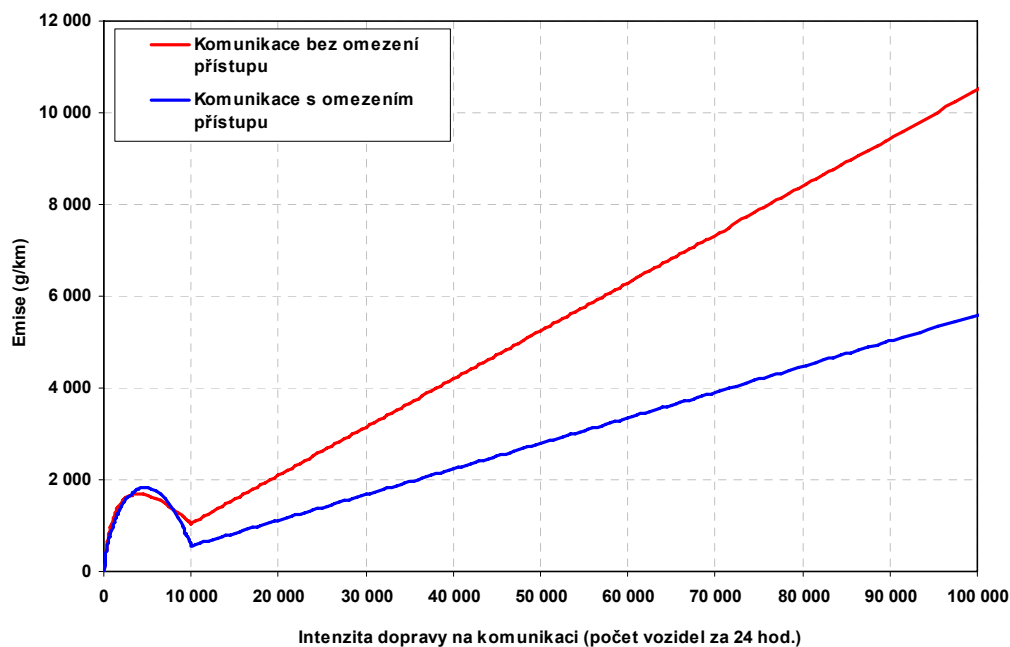
Aby bylo možné zachovat shodný průběh funkce sL při nižších hodnotách intenzity dopravy, byly navrženy takové funkce, které mají až do 10 tis. voz. / den prakticky shodný průběh a „oddělují se“ teprve při vyšších hodnotách. Nejprve byl uvažován takový průběh sL, který nabývá při 10 tis. voz. / den hodnoty sL právě 0,03 resp. 0,015 g/m² a dále je konstantní. Tyto funkce jsou prezentovány v grafu na obr. 7.

Obr. 7. Řešení spojitě funkce ke stanovení sL



Následující obrázek ukazuje průběhy celkových emisí PM₁₀ pro komunikace s omezením a bez omezení přístupu v závislosti na intenzitě dopravy při použití modifikované funkce sL.

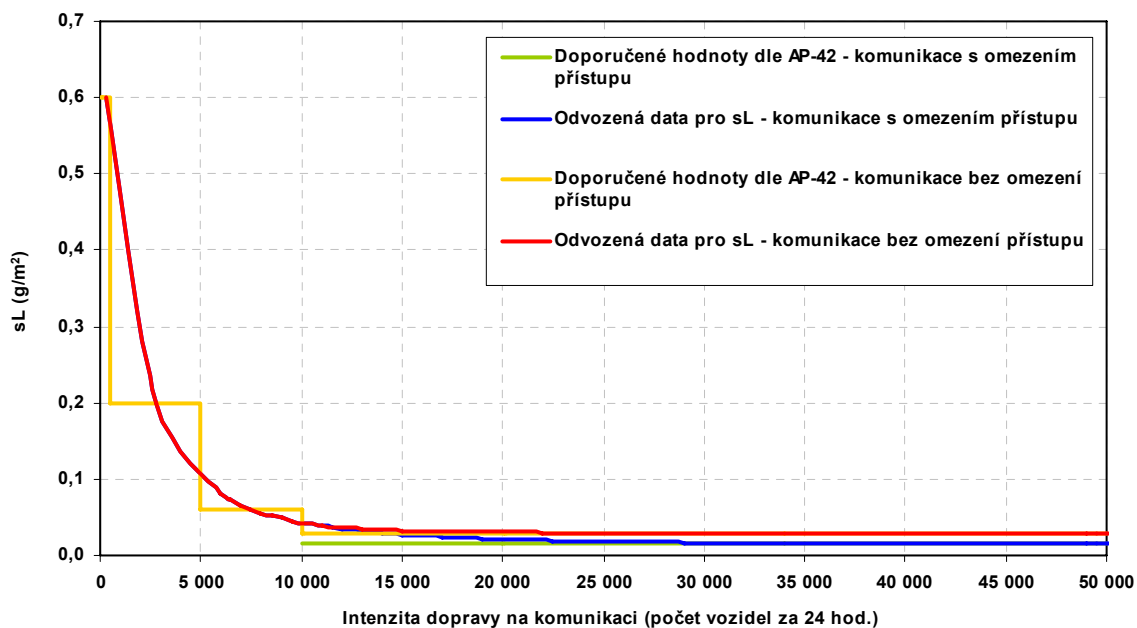
Obr. 8. Výpočet produkce emisí PM₁₀ při použití modifikované funkce pro určení hodnot sL (W = 4 t)



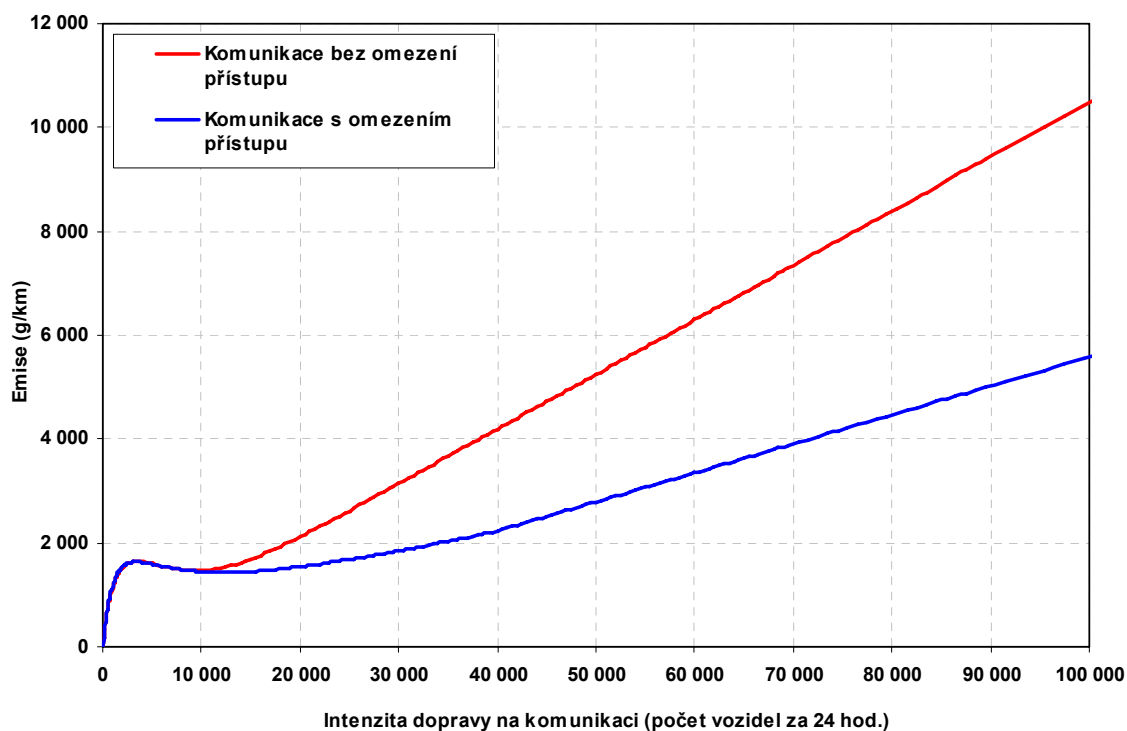
Z obrázku je patrný výrazný „zlom“ při intenzitě dopravy na úrovni 10 tis. vozidel za den. Je nepochybné, že tato prudká změna neodpovídá reálné situaci v automobilové dopravě. V dalším kroku proto byla věnována pozornost „vyhlazení“ funkcí v oblasti intenzit kolem 10 000 vozidel za den. Funkce jsou stejně jako v metodice AP-42 navrženy shodně až do intenzity 10 000 voz./den a dále se rozcházejí v závislosti na rozdílných hodnotách sL pro komunikace s omezením a bez omezení přístupu.

Výsledný návrh je pak prezentován na obr. 9 (průběh funkce sL) a 10 (průběh celkových emisí).

Obr. 9. Řešení spojitě funkce ke stanovení sL



Obr. 10. Výpočet produkce emisí PM₁₀ při použití modifikované funkce pro určení hodnot sL (W = 4 t)



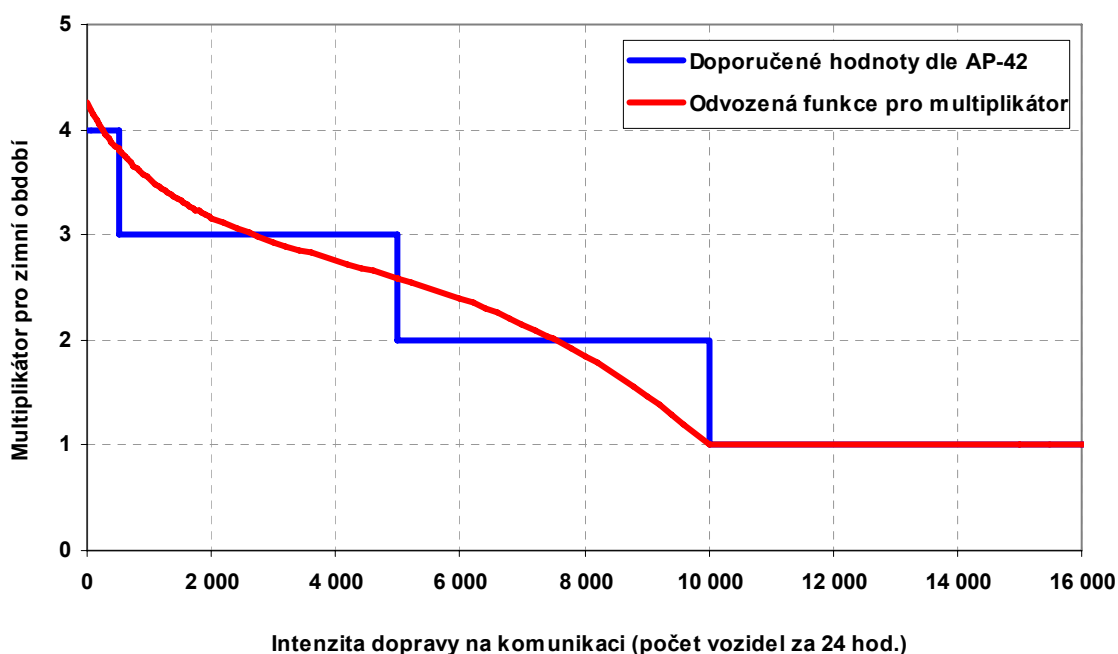
4.2. Stanovení průběhu hodnoty multiplikátoru pro zimní období

Další vstupní hodnotou, která je rovněž stanovena diskrétně v závislosti na intervalech intenzity dopravy na komunikaci, je multiplikátor pro zimní období. Stejně jako u průběhu hodnot sL byla vytvořena regresní křivka, která nabývá doporučených hodnot multiplikátoru při zadání středních hodnot jednotlivých intervalů intenzity dopravy, jak ukazuje tab. 3. Hodnota multiplikátoru by pak v závislosti na intenzitě dopravy neklesala skokově, nýbrž pozvolně. Tento průběh byl uvažován až do intenzity dopravy 10 000 voz./den, kde multiplikátor nabývá hodnoty 1, dále je uvažován konstantní průběh (obr. 11).

Tab. 3. Návrh modifikace postupu pro určení multiplikátoru pro zimní období

Interval průměrné denní intenzity dopravy (voz./den)	< 500	500 – 5 000	5 000 – 10 000	> 10 000
Střední hodnota intervalu použitá pro tvorbu funkce multiplikátoru podle intenzity (voz./den)	250	2 750	7 500	10 000
Hodnota multiplikátoru	4	3	2	1

Obr. 11. Použití středních hodnot doporučených rozpětí intenzit dopravy pro tvorbu spojitě funkce ke stanovení multiplikátoru pro zimní období



5. VÝSLEDNÝ NÁVRH VÝPOČETNÍHO POSTUPU

5.1. Určení hodnoty sL pro letní období

Výsledný návrh funkcí ke stanovení hodnoty sL v letním období na komunikacích s omezením a bez omezení přístupu je uveden na předcházejícím obr. 9 a je dán následujícími rovnicemi:

1) Pro komunikace bez omezení přístupu

$$sL = a + b \times \exp(-c \times ADT) + d \times \exp(-e \times ADT)$$

kde:

- sL = množství prachových částic o velikosti menší než 75 μm usazených na povrchu vozovky (g/m^2)
- ADT = průměrný denní počet vozidel na komunikaci (*average daily traffic*)
- konstanty: $a = 2,98836366438775 \times 10^{-2}$
 $b = 0,291164802583441$
 $c = 9,43038520274373 \times 10^{-4}$
 $d = 0,369564444341721$
 $e = 3,32212994363627 \times 10^{-4}$

2) Pro komunikace s omezením přístupu

a) intenzita dopravy (ADT) < 39 500 voz / den

$$sl = a + b / (1 + ((ADT - c) / d)^2)$$

kde:

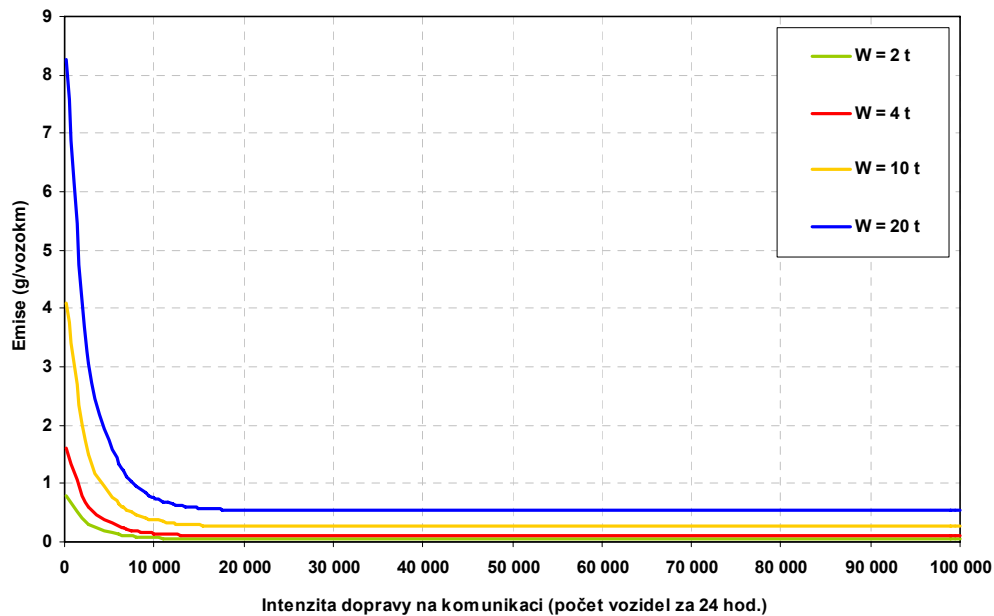
- konstanty: $a = 1,25660990932695 \times 10^{-2}$
 $b = 1,02795749358738$
 $c = -1478,62015445707$
 $d = 1996,17800619622$

b) intenzita dopravy (ADT) \geq 39 500 voz / den

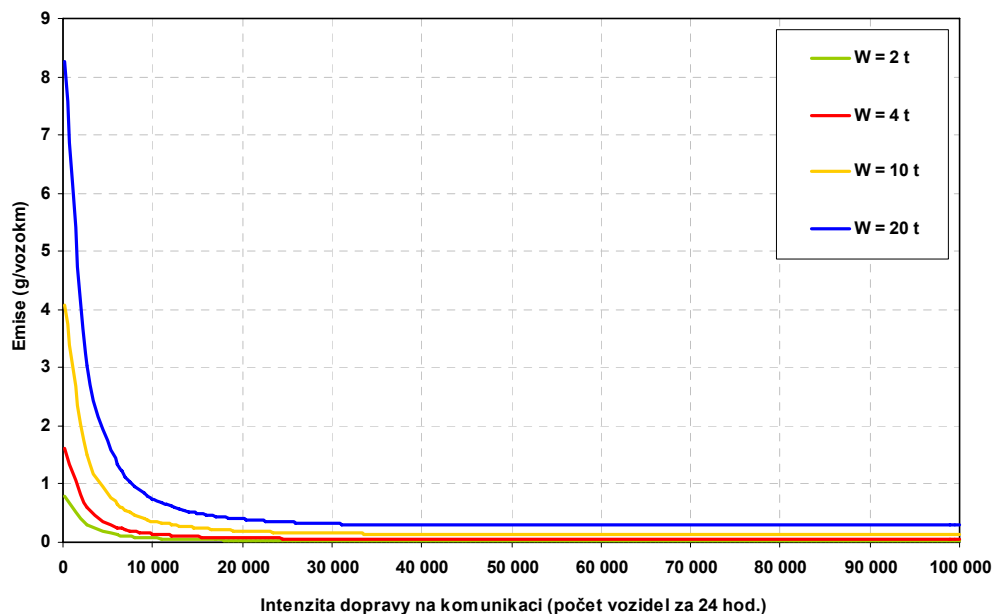
$$sL = 0,015 \text{ g}/\text{m}^2$$

Obrázky 12 až 15 ukazují výsledný průběh měrných a celkových emisí PM_{10} v závislosti na intenzitě dopravy pro komunikace s omezením a bez omezení přístupu.

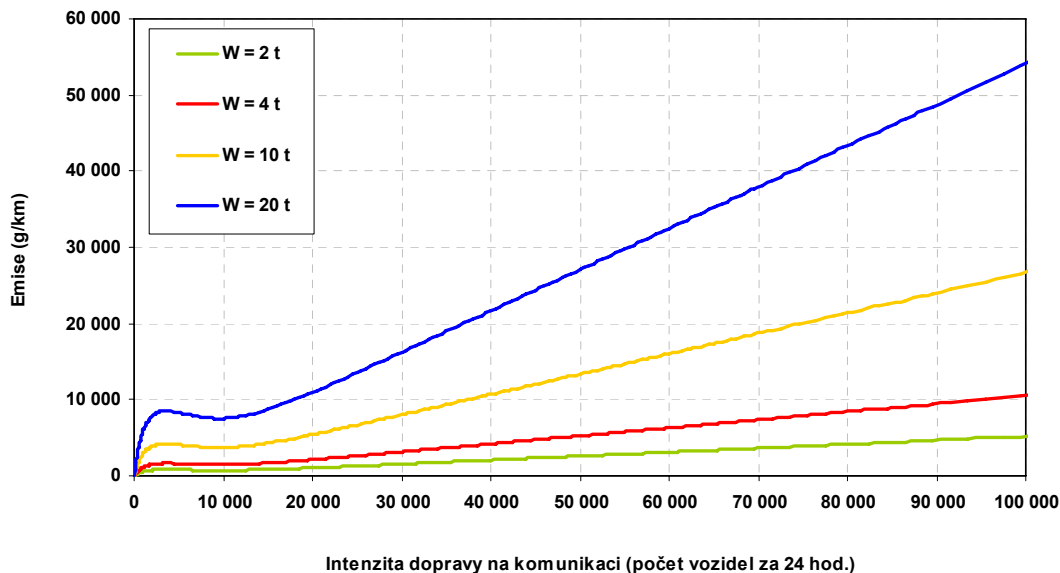
Obr. 12. Výpočet produkce emisí PM₁₀ na komunikaci bez omezení přístupu při použití modifikované funkce pro určení hodnot sL



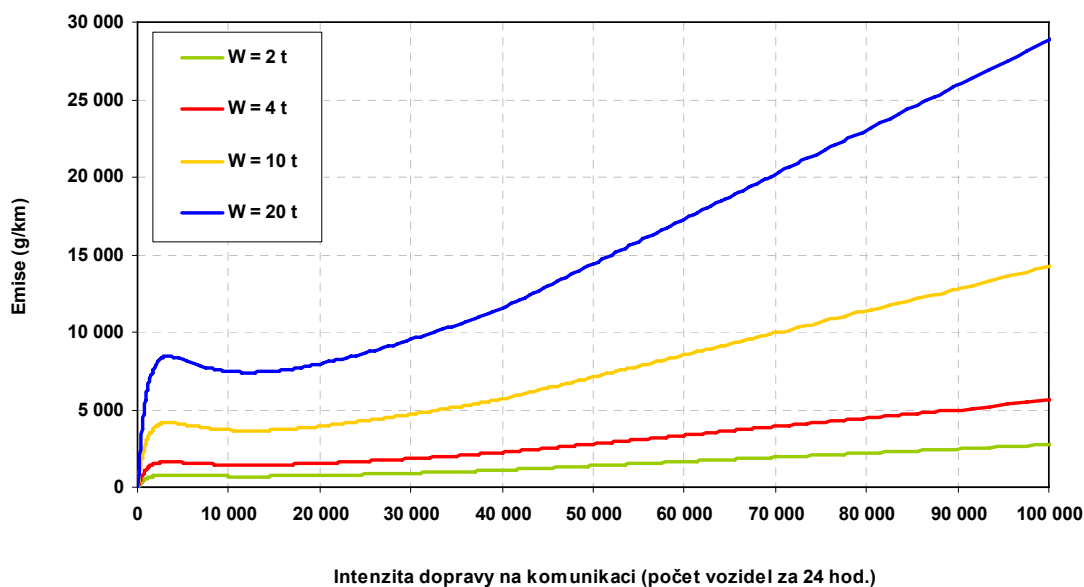
Obr. 13. Výpočet produkce emisí PM₁₀ na komunikaci s omezením přístupu při použití modifikované funkce pro určení hodnot sL



Obr. 14. Výpočet produkce emisí PM₁₀ na komunikaci bez omezení přístupu při použití modifikované funkce pro určení hodnot sL



Obr. 15. Výpočet produkce emisí PM₁₀ na komunikaci s omezením přístupu při použití modifikované funkce pro určení hodnot sL



5.2. Určení hodnoty multiplikátoru pro zimní období

Výsledný návrh funkce ke stanovení hodnoty multiplikátoru v zimním období v závislosti na intenzitě dopravy je uveden na předcházejícím obr. 11 a je dán následující rovnicí:

$$m = a + b \times ADT + c \times ADT^{1,5} + d \times ADT^2$$

kde:

- m = multiplikátor pro zimní období
- ADT = průměrný denní počet vozidel na komunikaci (*average daily traffic*)
- konstanty: $a = 4,24999961947965$
 $b = -1,3496511516288 \times 10^{-3}$
 $c = 2,43572801163424 \times 10^{-5}$
 $d = -1,41107682685768 \times 10^{-7}$

5.3. Výpočet průměrného emisního faktoru

Výpočet průměrné hodnoty emisního faktoru E je proveden na základě váženého průměru emisních faktorů pro letní a zimní období. Rozdílné hodnoty E pro letní a zimní období jsou dány odlišným stanovením hodnoty sL , která pro letní období vychází ze stanovené funkce (kap. 5.1). V zimním období je pak tato hodnota sL vynásobena hodnotou multiplikátoru, který se stanovuje dle rovnice uvedené v kap. 5.2. Pro stanovení počtu zimních měsíců s tuhými srážkami dle dané oblasti lze použít např. Atlas podnebí České republiky, který byl vydán v roce 2007 Českým hydrometeorologickým ústavem [2].

Rovnice pro výpočet průměrné hodnoty emisního faktoru E je pak následující:

$$E = (sL^{0,91} \times L + sL^{0,91} \times Z \times m) / 12 \times k \times (W \times 1,1)^{1,02} \times (1 - P/4N)$$

kde:

- E = průměrný emisní faktor (g/vozokm)
- sL = množství prachových částic o velikosti menší než 75 μm usazených na povrchu vozovky v letním období (g/m²)
- Z = počet měsíců s tuhými srážkami
- $L = 12 - Z$
- m = multiplikátor pro zimní období

- k = koeficient pro danou velikostní skupinu částic (g/vozokm)
- W = průměrná hmotnost vozidel (t)
- P = počet dnů s měřitelnými srážkami (dle Atlasu podnebí České republiky)
- N = celkový počet dnů

6. LITERATURA

- [1] US EPA (2011): AP-42, Compilation of Air Pollutant Emission Factors, Section 13.2.1, Paved roads. US EPA Research Triangle Park.
- [2] TOLASZ, Radim (2007): Atlas podnebí Česka. 1. vyd. Praha: Český hydrometeorologický ústav; Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci