

**T A**

**Č R**

Program **Omega**



A T E M –  
ATELIÉR EKOLOGICKÝCH MODELŮ, S. R. O.

## **Metodika pro kvantifikaci efektu výsadeb vegetačních bariér na snížení koncentrací suspendovaných částic**

**Tato metodika je výsledkem řešení výzkumného projektu TA ČR č. TD020357  
„Optimalizace výsadeb dřevin pohlcujících prachové částice“.**

Červen 2016

## O B S A H

<b>1. CÍLE A OBSAH METODIKY .....</b>	<b>4</b>
<b>2. POSTUP ZPRACOVÁNÍ METODIKY PRO KVANTIFIKACI ÚČINKU VEGETAČNÍCH BARIÉR 5</b>	
<b>3. FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ ZÁCHYT ČÁSTIC NA VEGETAČNÍCH BARIÉRÁCH .....</b>	<b>7</b>
3.1. Umístění vegetační bariéry vůči zdroji emisí .....	9
3.2. Výška a šířka vegetačního pásu.....	10
3.3. Hustota a struktura vegetačního pásu .....	15
3.4. Druhovú skladbu vegetačního pásu .....	21
<b>4. MODELOVÁNÍ Vlivu VEGETAČNÍ BARIÉRY NA ŠÍŘENÍ ZNEČIŠTĚNÍ OD KOMUNIKACE 29</b>	
4.1. Popis modelování metodou CFD .....	29
4.2. Vstupní data a výchozí parametry .....	30
4.2.1 Rozměry zvolených variant vegetační bariéry a vybrané komunikace .....	31
4.2.2 Hustota modelované vegetační bariéry.....	32
4.2.3 Meteorologické vstupy .....	34
4.3. Shrnutí variant modelových výpočtů.....	37
4.4. Verifikace CFD modelu na základě terénních měření a rešerše .....	38
4.5. Výsledky modelových výpočtů .....	44
4.6. Zpracování výstupů modelových výpočtů .....	49
4.6.1 Grafické výstupy – listnaté stromy .....	49
4.6.2 Grafické výstupy – jehličnaté stromy .....	80
4.6.3 Shrnutí výstupů modelových výpočtů .....	101
<b>5. ODVOZENÍ ROVNIC PRO KVANTIFIKACI ÚČINKU VEGETAČNÍCH BARIÉR .....</b>	<b>105</b>
<b>6. NÁVRH VÝPOČETNÍ METODIKY.....</b>	<b>111</b>
6.1. Výpočet účinnosti vegetační bariéry - částice PM <sub>10</sub> a PM <sub>2,5</sub> , benzo(a)pyren, těžké kovy .....	111
6.1.1 Výpočet účinnosti vegetační bariéry složené z listnatých dřevin pro referenční hladinu 1,5 m .....	112
6.1.2 Výpočet účinnosti vegetační bariéry složené z jehličnatých dřevin pro referenční hladinu 1,5 m .....	117
6.1.3 Výpočet účinnosti vegetační bariéry složené z listnatých dřevin pro referenční hladinu 3 m .....	122
6.1.4 Výpočet účinnosti vegetační bariéry složené z listnatých dřevin pro referenční hladinu 6 m .....	125
6.1.5 Výpočet účinnosti vegetační bariéry složené z jehličnatých dřevin pro referenční hladinu 3 m .....	129
6.1.6 Výpočet účinnosti vegetační bariéry složené z jehličnatých dřevin pro referenční hladinu 6 m .....	133
6.2. Výpočet účinnosti vegetační bariéry - celkový prach (částice frakce PM <sub>75</sub> ) .....	136
6.2.1 Výpočet účinnosti vegetační bariéry složené z listnatých dřevin pro referenční hladinu 1,5 m .....	136
6.2.2 Výpočet účinnosti vegetační bariéry složené z jehličnatých dřevin pro referenční hladinu 1,5 m .....	142
6.2.3 Výpočet účinnosti vegetační bariéry složené pro referenční hladiny 3 a 6 m (listnaté a jehličnaté dřeviny) ....	145
<b>7. ANALÝZA ZÁCHYTU ZÁSTUPCŮ PAH A TĚŽKÝCH KOVŮ .....</b>	<b>155</b>
7.1. Studie se vzorky z otevřeného prostoru.....	156
7.2. Studie se vzorky z tunelu.....	165

7.3. Shrnutí výsledků.....	170
<b>8. VZOROVÉ PŘÍKLADY .....</b>	<b>171</b>
8.1. Hodnocení účinnosti stávající vegetační bariéry – lokalita Březiněves.....	172
8.2. Hodnocení účinnosti projektované vegetační bariéry – lokalita Velké Meziříčí.....	175
<b>9. SROVNÁNÍ „NOVOSTI POSTUPŮ“ .....</b>	<b>182</b>
<b>10. POPIS UPLATNĚNÍ CERTIFIKOVANÉ METODIKY .....</b>	<b>183</b>
<b>11. EKONOMICKÉ ASPEKTY .....</b>	<b>184</b>
<b>12. SEZNAM POUŽITÉ SOUVISEJÍCÍ LITERATURY .....</b>	<b>185</b>
<b>13. SEZNAM PUBLIKACÍ, KTERÉ PŘEDCHÁZELY METODICE.....</b>	<b>189</b>
<b>14. JMÉNA Oponentů.....</b>	<b>190</b>

**PŘÍLOHA:** Rozložení hodnot účinnosti vegetační bariéry pro vybrané kombinace vstupních parametrů – výšky bariéry (H), šířky bariéry (W) a vzdálenosti od komunikace (d)

## 1. CÍLE A OBSAH METODIKY

Předkládaná metodika byla vypracována jako výstup projektu Technologické agentury ČR č. TD020357 „Optimalizace výsadeb dřevin pohlcujících prachové částice“, který byl realizován v letech 2014 – 2015. Cílem tohoto projektu bylo vytvoření komplexního nástroje, který by umožnil kvantifikovat účinky vegetačních bariér s prioritní hygienickou funkcí ve vazbě na jejich rozměry, hustotu, druhovou skladbu atd. Výsadba vegetačních pásů dřevin podél komunikací reprezentuje opatření, kterým lze významně omezit vliv silniční dopravy. Znečištění ovzduší způsobené automobilovou dopravou představuje jeden z hlavních problémů ochrany ovzduší na území České republiky. Jedná se především o koncentrace suspendovaných částic, jejichž imisní limity jsou překračovány podél významných dopravních tahů; doprava též přispívá k překračování limitu pro benzo(a)pyren, který je navázán právě na suspendované částice. Z těchto důvodů má snížení imisních příspěvků suspendovaných částic z automobilových komunikací pro ochranu ovzduší zásadní význam.

K problematice účinku vegetačních výsadeb z hlediska snížení koncentrací suspendovaných částic bylo dosud zpracováno mnoho dílčích studií zaměřených na různé aspekty, avšak výsledný vliv bariéry je stále pouze odhadován s tím, že se obecně předpokládá pozitivní efekt, ale bez bližšího upřesnění. Pokud je její účinnost stanovována výpočtem, tak vesměs na základě značně zastaralých a zjevně nepřesných podkladů, určených původně k jinému účelu. V důsledku toho není ani možné připravit plán vegetačních výsadeb tak, aby bylo dosaženo maximálního efektu při daných finančních a prostorových možnostech, popřípadě dochází k tomu, že nevhodně provedené výsadby ve skutečnosti nepřinesou požadované efekty. V některých případech se dokonce může dostavit opačný efekt, kdy dojde ke kumulaci znečištění a nárůstu koncentrací (Brantley et al., 2014).

V této metodice jsou shrnuty poznatky z provedené rešerše odborné literatury, dále je prezentován model použitý pro hodnocení prostupu částic přes polopropustnou vegetační bariéru a výsledky modelování. Na základě informací získaných z rešerše a modelových výpočtů je navržen metodický postup pro výpočet účinků bariéry ve smyslu snížení imisních příspěvků silniční komunikace. Metodika je zaměřena především na rozptyl částic frakce PM<sub>75</sub> a PM<sub>10</sub>, zahrnuty však jsou i částice PM<sub>2,5</sub> a rovněž polycyklické aromatické uhlovodíky a těžké kovy vázané na tyto částice.

Uplatnění metodiky se předpokládá zejména v oblastech projektové přípravy a realizaci výsadeb, pro projekty dopravní infrastruktury, pro přípravu projektů k žádostem o dotační podporu a pro rozhodování orgánů veřejné správy.

## 2. POSTUP ZPRACOVÁNÍ METODIKY PRO KVANTIFIKACI ÚČINKU VEGETAČNÍCH BARIÉR

Zpracování metodiky probíhalo v rámci řešení projektu TD020357 postupně v následujících krocích:

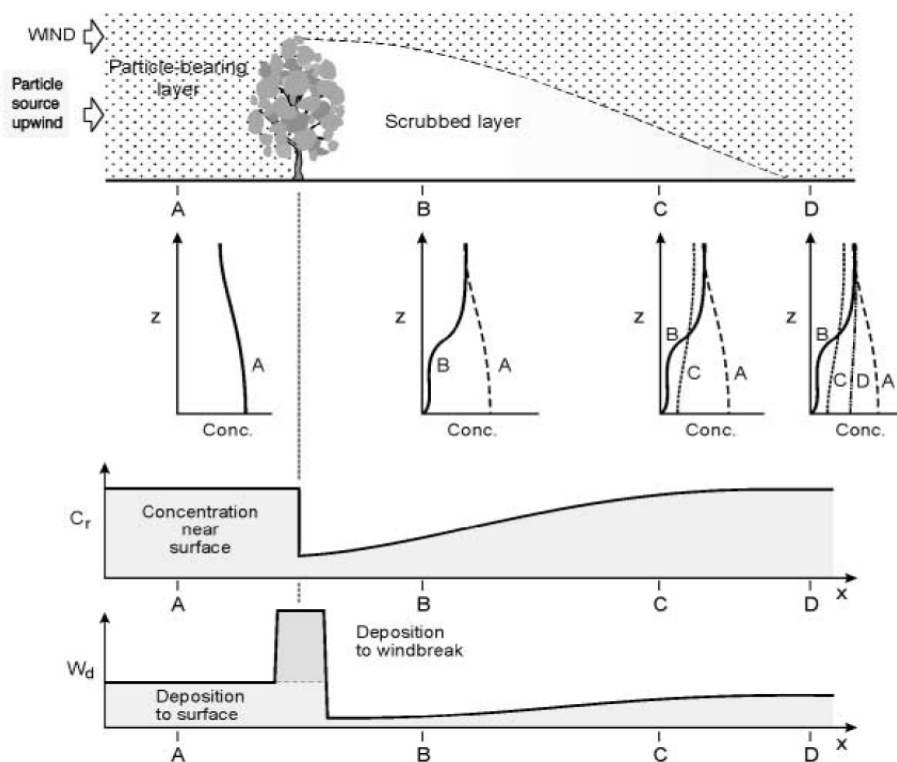
- nejprve byla provedena rešerše domácích a zahraničních prací k uvedené problematice, která byla zaměřena zejména na vlastnosti vegetačního pásu ovlivňující jeho účinnost z hlediska záchytu prachových částic – umístění vegetační bariéry vůči zdroji emisí, výška a šířka vegetačního pásu, hustota a struktura vegetačního pásu a druhová skladba vegetačního pásu
- následovalo provedení série měření koncentrací suspendovaných částic v okolí silnic s vegetačními bariérami prostřednictvím mobilních prachoměrů, které měly sloužit k verifikaci výpočetního modelu
- dále byly provedeny speciální modelové výpočty pomocí CFD modelu (*Computational Fluid Dynamics*). Jednalo se o simulaci proudění a rozptylu vzdušiny nesoucí pevné částice při průchodu přes polopropustnou vegetační bariéru. Výpočetní metoda byla aplikována na 2D situaci, reprezentující příčný řez silnice s přilehlým vegetačním blokem.
- následně byly vyhodnoceny výsledky modelových výpočtů s cílem parametrizovat základní vlastnosti vegetační bariéry (šířka, výška, hustota) ve vztahu k podílu zachycených prachových částic ze silniční komunikace. Výsledky byly podrobeny detailní analýze, jejíž záměrem bylo vytvořit podklad ve formě sestavy matematických vztahů pro tvorbu výpočetní metodiky, která by umožnila stanovit účinnost bariéry bez nutnosti aplikace časově i finančně náročného CFD modelování pro každý jednotlivý případ. Jako hodnocená výstupní hodnota byla zvolena účinnost vegetační bariéry, vyjádřená jako snížení koncentrace suspendovaných částic v prostoru za bariérou v procentech oproti stavu bez bariéry.
- odvozené výpočetní rovnice pro kvantifikaci účinku vegetačních bariér byly sestaveny do podoby souhrnné výpočetní metodiky a byly stanoveny vstupní hodnoty vlastností vegetačních bariér, pro které je metodika platná. Jedná se o vlastnosti – šířka a výška bariéry, vzdálenost od hranice komunikace, optická porosita bariéry, druhové složení bariéry.
- možnosti uplatnění metodiky jsou prezentovány na modelových příkladech, kdy je posuzována účinnost stávající vegetační bariéry nebo hodnocen účinek realizace nové vegetační bariéry v několika návrhových variantách podél komunikace, kde se v současnosti bariéra nenachází
- samostatná část je věnována záchytu těžkých kovů a polycyklických aromatických uhlovodíků, vázaných na suspendované částice, pomocí vegetačních bariér. Řešení

vychází z předpokladu, že tyto látky jsou vázány na prachové částice, avšak nerovnoměrně v rámci jejich velikostního spektra, pro určení účinku bariéry je proto nutné znát rozdělení PAH (resp. benzo(a)pyrenu) a těžkých kovů v jednotlivých frakcích PM.

### 3. FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ ZÁCHYT ČÁSTIC NA VEGETAČNÍCH BARIÉRÁCH

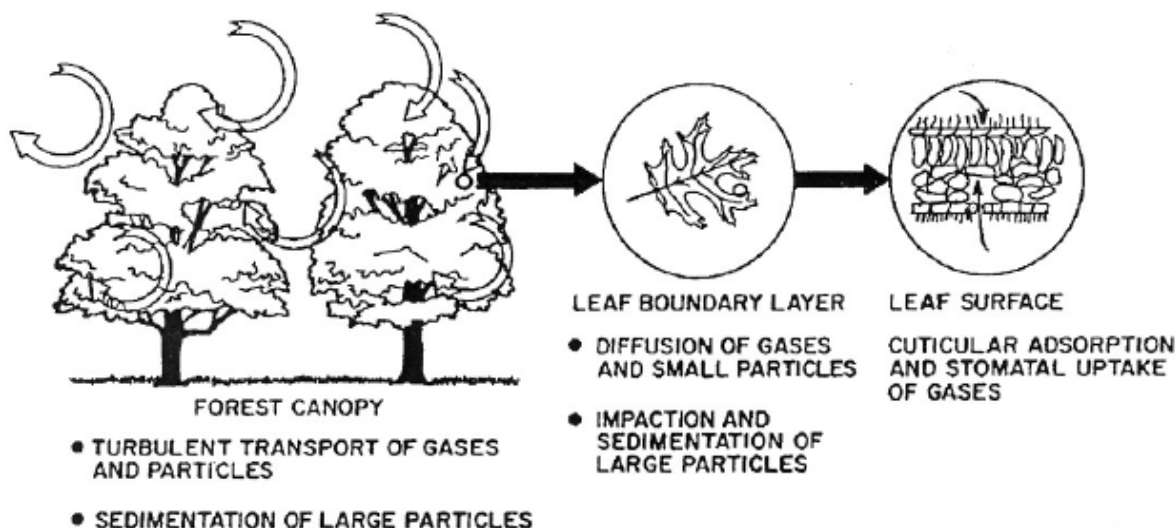
Při průchodu vzdušninu obsahující rozptýlené prachové částice přes porost dřevin se uplatňují dva mechanismy, které vedou k usazování částic. Prvním mechanismem je snížení rychlosti proudění vzduchu, které se projevuje zvýšenou depozicí prachových částic. Průběh koncentrací suspendovaných částic v čase a prostoru při průchodu vegetační bariérou přehledně a schematicky znázorňuje studie Raupach et al. (2001), jak ukazuje obrázek 3.1. Ve výchozích podmínkách se předpokládá rovnoměrné rozložení koncentrací částic ve vzduchové mase. Při kontaktu s větrolamem část dopadající vzduchové hmoty přejde přes horní okraj větrolamu, další část prochází přes něj, přičemž dojde k depozici částic na povrchu dřevin. V části vzdušninu, která přechází přes horní okraj větrolamu, se tedy koncentrace částic nesníží, zatímco v části proudící skrz něj ano. Na závětrné straně větrolamu tak dochází ke snížení koncentrací částic. Současně poklesne rychlost proudícího vzduchu, což přispěje ke zvýšení depozice částic. Ve větší vzdálenosti od větrolamu se vzduchová hmota promíchává a koncentrace částic se tak vyrovnávají.

**Obr. 3.1. Schéma změn koncentrací  $c_r$  a rychlosti větru  $w_d$  při průchodu vzdušninu přes větrolam (Raupach et al., 2001)**



Druhým efektem je přímý záchyt prachových částic na dřevinách, zejména na jejich listech, a to opět depozicí nebo impaktem. Mechanismus záchytu částic na listech stromů přehledně popisuje například Cavanagh et al. (2006). Částice jsou nejprve transportovány ke korunám stromů, kde následně postupují do tzv. „hraniční vrstvy listů“. Zde se částice menší než 1  $\mu\text{m}$  infiltrují do listu, větší částice se usazují prostřednictvím sedimentace nebo zachytáváním o překážky na listech. Jemné částice se následně mohou dostávat do průduchů v listech, které jsou průměrně 8 – 10  $\mu\text{m}$  velké. Procesy probíhající při depozici částic znázorňuje obrázek 3.2. Rychlost depozice pevných částic je proměnlivá a je závislá na jejich velikosti. Větší částice se usazují rychleji, zatímco menší jsou transportovány na větší vzdálenosti, usazují se pomaleji, a to především prostřednictvím Brownovy difúze.

**Obr. 3.2. Procesy probíhající při depozici polutantů na listech vegetace (Cavanagh et al., 2006)**



Vlastnosti vegetačního pásu, ovlivňující jeho účinnost z hlediska záchytu prachu, je možné rozdělit do dvou skupin:

- faktory prostorového uspořádání porostu – výška a šířka bariéry, propustnost (mezery mezi jednotlivými stromy), horizontální a vertikální struktura porostu, vzdálenost od zdroje emisí, převýšení vůči zdroji emisí
- faktory druhového složení porostu – dřeviny jehličnaté × listnaté, stálezelené × opadavé, tvar a hustota koruny, velikost absolutní listové plochy, velikost, pohyblivost, sklon a povrchové vlastnosti listů



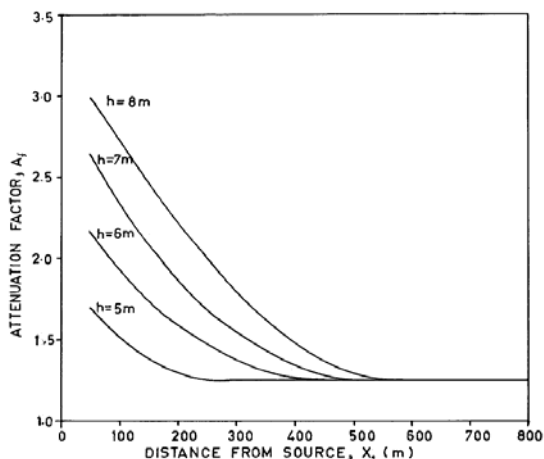
Souhrnný postup pro vyčíslení účinnosti vegetačních bariér nebyl dosud zpracován, celá řada studií však hodnotí vlivy jednotlivých faktorů na rozptyl prachových částic šířených od zdroje emisí (obvykle od silniční komunikace). Poznatky těchto studií jsou shrnuty v následujících kapitolách.

### 3.1. UMÍSTĚNÍ VEGETAČNÍ BARIÉRY VŮČI ZDROJI EMISÍ

Vhodná vegetační bariéra s protiprašnou funkcí by měla být vysazena co nejbližší ke zdroji emisí, a to pokud možno po obou stranách komunikace, nebo ve směru převládajícího proudění větru (a přirozeně též ve směru k příslušné zástavbě, která má být vegetační bariérou ochráněna). To ovšem může být problematické vzhledem k požadavkům na minimální vzdálenost stromů od komunikace v souvislosti s bezpečností silničního provozu. Prostor bezprostředně u komunikace je však možné využít alespoň pro výsadbu pásu nižších keřů, které mohou účinně brzdit přízemní proudění a tím vytvářet vhodné podmínky pro následnou depozici prachu na listech navazujících dřevin. Důvodem je nejen skutečnost, že i nižší dřeviny bezprostředně u komunikace se do značné míry podílejí na záchytu prachových částic emitovaných z povrchu vozovky, ale zejména schopnost těchto keřů účinně brzdit přízemní proudění a tím vytvářet vhodné podmínky pro následnou depozici prachu na listech navazujících dřevin (Cowherd et al., 2005).

Umístěním vegetační bariéry vůči zdroji emisí se dále zabýval Chaulya et al. (2000), jehož studie se zaměřila na otázku vysazování zeleně v okolí lomu, jakožto plošného zdroje prašnosti. Z obrázku 3.3. je patrné, že vliv výšky dřevin se nejvýznamněji projevuje, pokud je vegetační bariéra situována co nejbližší ke zdroji emisí prachových částic. Účinnost záchytu částic je pak vyjádřena pomocí faktoru zeslabení ( $A_f$  – attenuation factor), který je určen jako poměr mezi hmotnostní koncentrací znečišťující látky bez přítomnosti zeleného pásu ke koncentraci za přítomnosti zeleného pásu.

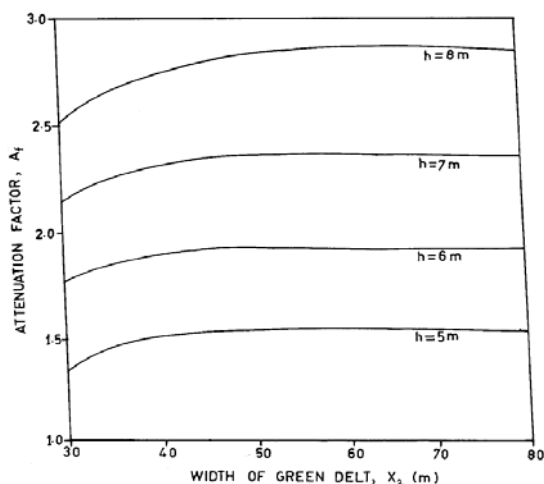
**Obr. 3.3. Závislost účinnosti vegetační bariéry na její vzdálenosti od zdroje emisí**



### 3.2. VÝŠKA A ŠÍŘKA VEGETAČNÍHO PÁSU

Závislost výšky a šířky vegetačního pásu na jeho účinnosti popisuje opět Chaulya et al. (2000). Z grafu (Obr. 3.4.) je patrné, že zatímco s výškou stromů (v rozpětí 5 – 8 m) se účinnost zvyšuje prakticky lineárně, u šířky zeleného pásu účinnost narůstá jen do 40 metrů. Proto je v uvedené studii hodnota 40 m považována za optimální šířku zeleného pásu, která umožňuje maximalizaci účinku ve vztahu k vynaloženým nákladům. Jak již bylo zmíněno, účinnost záchytu částic je vyjádřena pomocí faktoru zeslabení ( $A_f$  – attenuation factor).

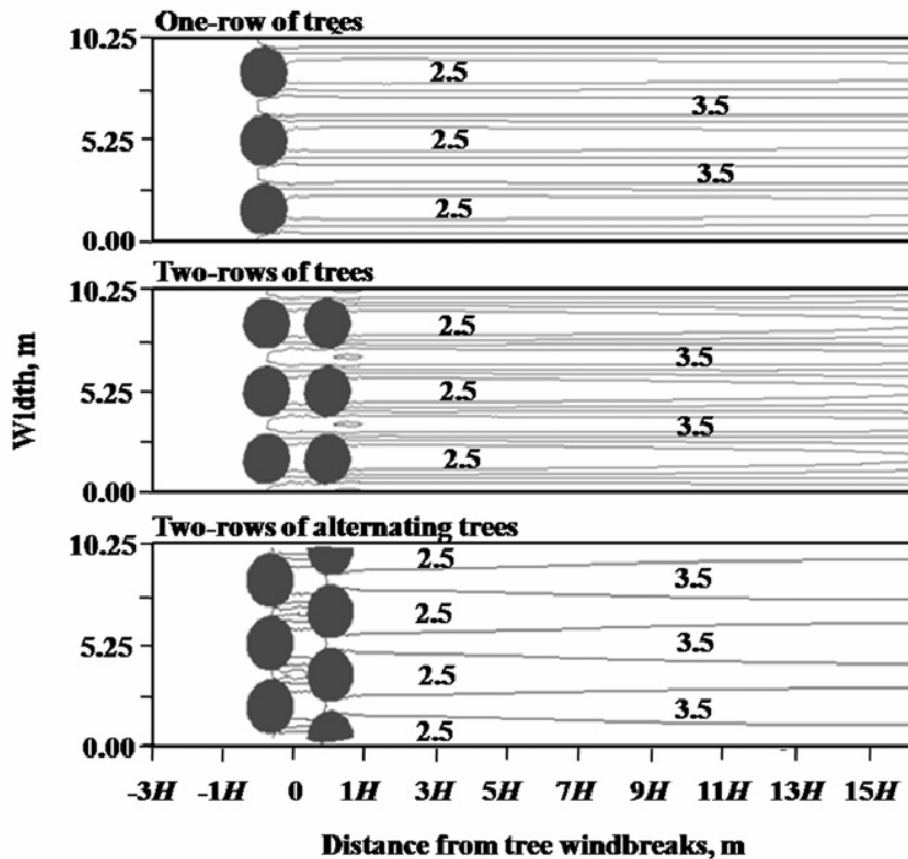
**Obr. 3.4. Závislost účinnosti vegetační bariéry na její šířce a výšce**



Účinnost záchytu částic významně závisí na rychlosti větru při průchodu vzdušninou pásem dřevin. Touto problematikou se zabýval Bitog et al. (2012) a

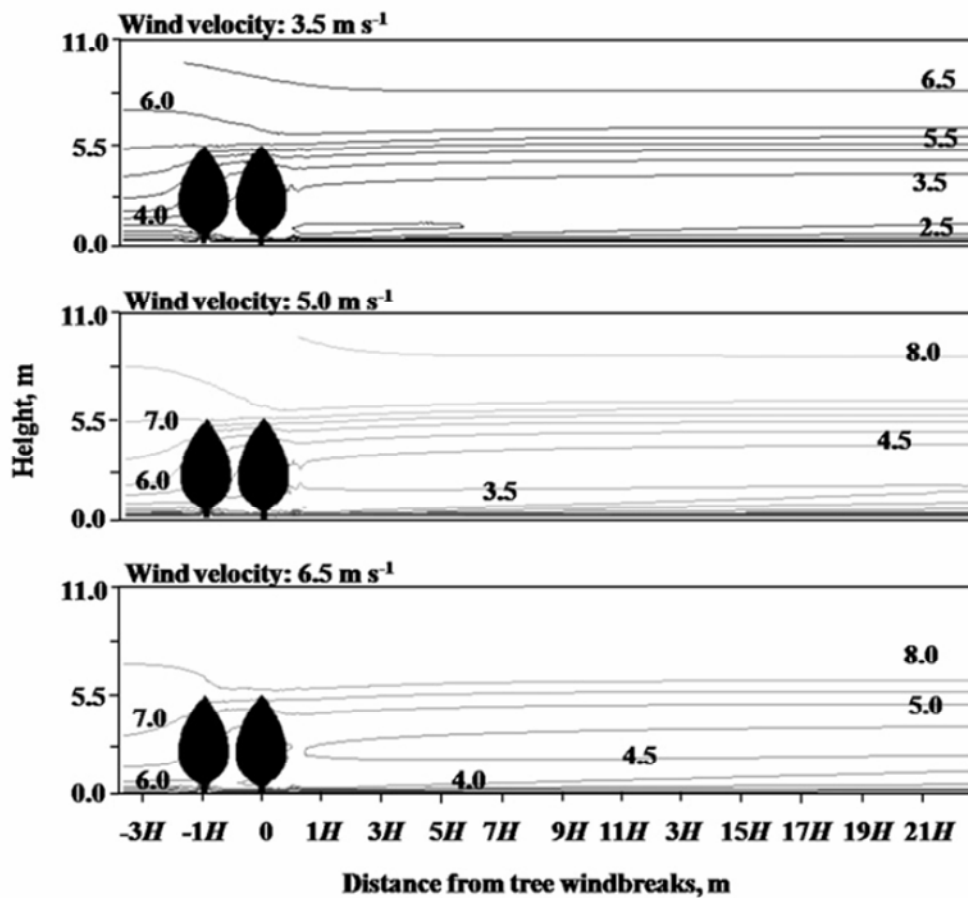
obrázek 3.5. uvádí průběh změn rychlosti větru při průchodu vzdušninou jednotlivými variantami vegetačních pásů pro výchozí rychlost větru max.  $8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Výsledky prokázaly, že dvě řady střídajících se stromů jsou více efektivní než jedna či dvě řady stromů ve stejné úrovni.

Obr. 3.5. Průběh změn rychlosti větru při průchodu vzdušninou pásem dřevin  
(Bitog et al., 2012)



Obrázek 3.6. pak uvádí průběh změn rychlosti větru při průchodu vzdušninou vegetačním pásem skládajícím se ze dvou řad střídajících se stromů pro různé rychlosti větru. Studie také ukázala, že stromy ve vzdálenosti 0,5 m od sebe jsou mnohem účinnější ve snižování rychlosti větru než stromy vzdálené od sebe 0,75 a 1,0 m.

**Obr. 3.6. Průběh změn rychlosti větru při průchodu vzdušninu pásem dřevin  
(Bitog et al., 2012)**



Podle Menke et al. (2008) se snížení rychlosti větru za stromořadím projevuje až do vzdálenosti dvacetinásobku jeho výšky, jak schematicky znázorňuje následující obrázek.

**Obr. 3.7. Schéma snížení rychlosti větru za vegetační bariérou (Menke et al., 2008)**

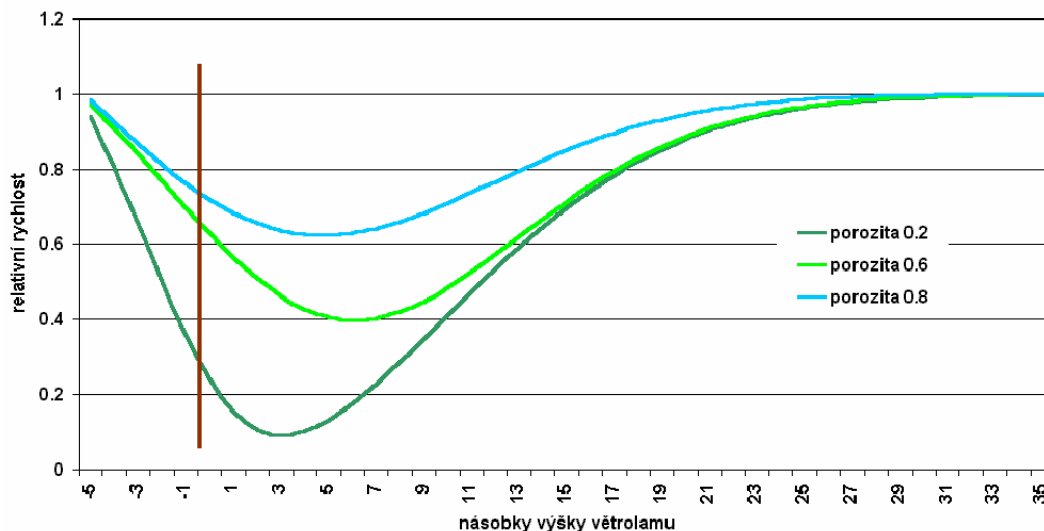


Obdobné závěry týkající se závislosti výšky bariéry na zpomalení proudění vzduchu uvádí i řada českých autorů, kteří se zaměřují zejména na větrolamy. Tyto vegetační pásy mají v zemědělské krajině primárně protierozní funkci, avšak výsledky

z výzkumů jejich účinnosti jsou do značné míry využitelné i pro doprovodnou zeleň komunikací s primárně protiprašným účinkem.

Studie Litschmann et al. (2005) vymezuje oblast, v níž se projevují účinky větrolamu při kolmém proudění větru, v rozsahu od  $-5h$  (návětrná strana) do  $30 - 35h$  (závětrná strana). Minimální rychlosti větru se vyskytují ve vzdálenostech  $4 - 6h$  na závětrné straně. Průběh rychlosti větru pro různé hodnoty překážkové porosity v závislosti na vzdálenosti od větrolamu. Překážková porosita byla stanovena na základě optické porosity, šířky a výšky větrolamu. Z obrázku 3.8. je zřejmé, že k největšímu snížení rychlosti větru nedochází těsně za větrolamem, avšak přibližně ve vzdálenosti tří až šestinásobku jeho výšky.

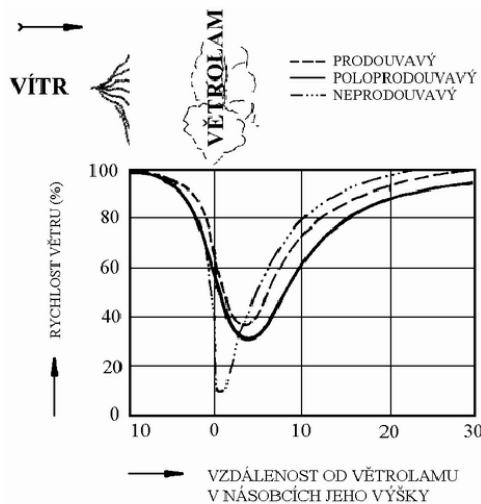
**Obr. 3.8. Relativní snížení rychlosti větru před a za větrolamem v závislosti na jeho porositě (Litschmann et al., 2005)**



Další studie (Dufková et al., 2006, Středa et al., 2007) se zabývaly vlivem vybraných větrolamů dané šířky a výšky ( $18 \times 20$ ,  $7 \times 14$ ,  $4 \times 22$  m) na rychlost a směr proudění vzduchu v horizontálním a vertikálním profilu. Z výsledků studie vyplynulo, že snížení rychlosti větru se projevuje do vzdálenosti  $150 - 200$  metrů za vegetačním pásem. Vliv větrolamů na snížení rychlosti větru byl patrný i v době, kdy jeho hlavní dřeviny nebyly ještě olistěné. Uvedené závěry potvrzuje studie (Muziková et al., 2010) zaměřená na vliv větrolamů v závislosti na vzduchu v období od dubna do září. Měření prokázalo výrazný vliv větrolamu na rychlost větru na závětrné straně, a to i v mimovegetační době, kdy jeho hlavní dřeviny nebyly ještě olistěné. Nejvyšší účinnost větrolamu byla patrná ve vzdálenosti  $50 - 100$  metrů od větrolamu, nezanedbatelný účinek byl však zřejmý ještě i ve vzdálenosti  $150$  metrů.

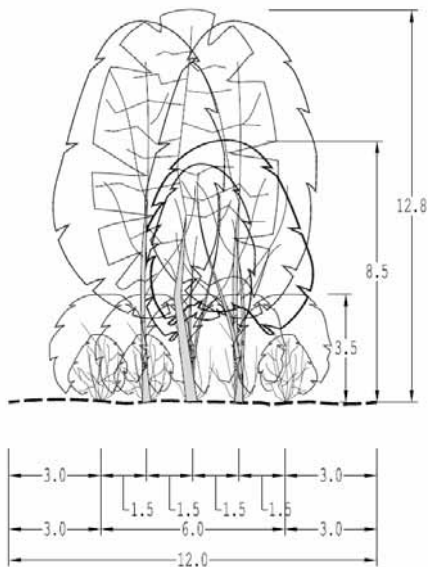
Polopropustný větrolam, skládající se z více řad stromů s méně zapojenými korunami a keřového patra vyvinutého v menší míře, má vliv na snížení rychlosti větru na závětrné straně do vzdálenosti cca 20 – 25ti násobku své výšky, jak je patrné z následujícího obrázku (Dostál, 2007).

**Obr. 3.9. Účinnost různých typů větrolamů v závislosti na rychlosti proudění a vzdálenosti od vegetačního pásu (Dostál, 2007)**



Metodika „Optimalizace funkcí větrolamů v zemědělské krajině“ (Podhrázská et al., 2008) mimo jiné uvádí metodu hodnocení a kategorizace větrolamů na základě jejich účinnosti, která závisí zejména na šířce, propustnosti pro vzdušné proudění a druhové skladbě dřevin. Za optimální prostorové parametry vegetačního pásu je považována šířka 12 metrů a výška 12 – 15 metrů (Obr. 3.10.). Horizontální funkčnost větrolamu je dána plošnou mezerovitostí porostu. Vertikální funkčnost větrolamu pak závisí na jeho hustotě resp. propustnosti, která je dána šířkou větrolamu, druhovou skladbou dřevin a keřů a jejich sponem. Vlastní větrolam by měl být tvořen 6 až 8 řadami stromů a 4 řadami keřů (po dvou řadách na obou stranách).

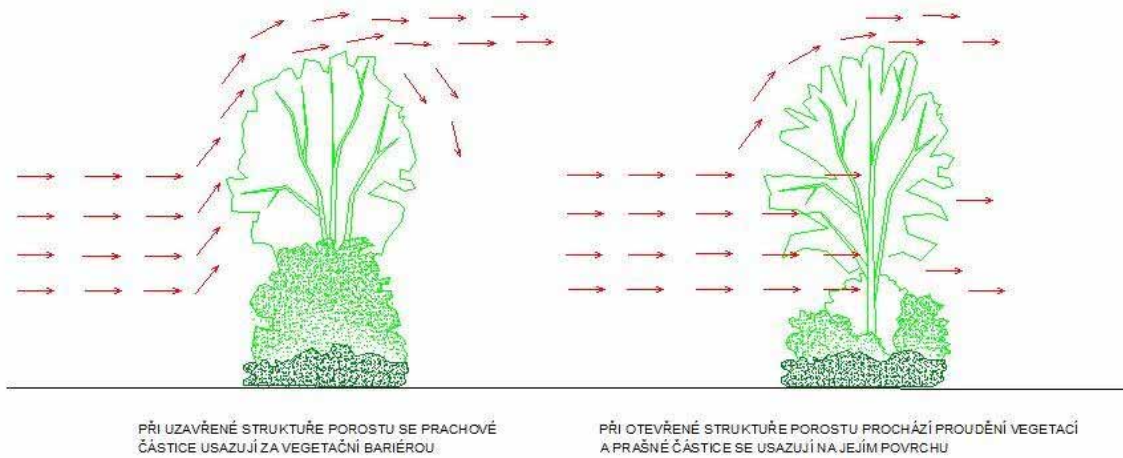
**Obr. 3.10. Příčný řez vegetačního pásu s optimálními prostorovými parametry  
(Podhrázká et al., 2008)**



### 3.3. HUSTOTA A STRUKTURA VEGETAČNÍHO PÁSU

Významným faktorem, který podstatným způsobem ovlivňuje výsledný efekt vegetačního pásu na záchyt částic emitovaných v prostoru komunikace, je hustota vysazeného porostu. Většina studií, které se touto problematikou zabývají, se přiklání k názoru, že při příliš vysoké hustotě porostu dochází k přesměrování proudění tak, že vzdušina obtéká vegetační bariéru, místo aby procházela skrz porost, čímž dochází k nárůstu koncentrace prachových částic za vegetačním pásem (Cowherd et al., 2005, Raupach et al., 2001). Naproti tomu nízká hustota stromového pokryvu naopak způsobuje průchod vzdušiny porostem bez dostatečného záchytu částic (Obr. 3.11.).

**Obr. 3.11. Ovlivnění proudění vzduchu hustotou vegetační bariéry (Karel et al., 2011)**

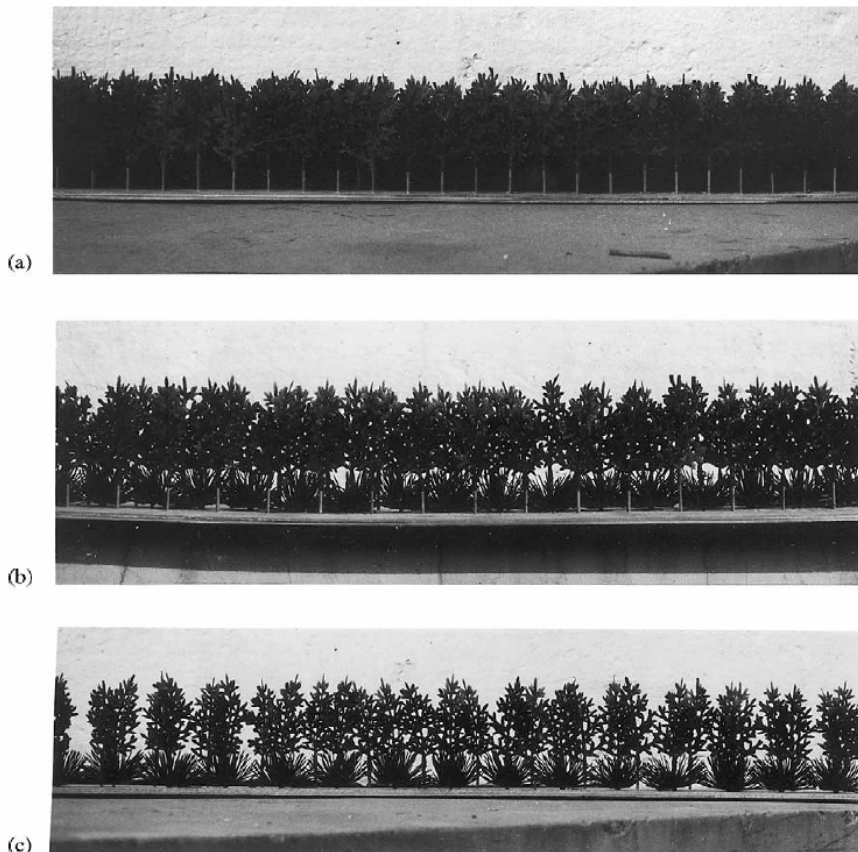


Proto je nutné hledat optimální hustotu porostu, která souvisí především s rozestupy jednotlivých stromů a jejich uspořádáním, aby byla zajištěna maximální účinnost vegetační bariéry. Kromě toho platí, že jsou-li pásy tvořeny pouze vysokokmeny, dochází k vytváření turbulencí, které zamezují účinnému oddělování prachových částic (Kappis et al., 2007). Proto je vhodné kombinovat stromy a keře, které tyto turbulence naruší a umožní separaci prachových částic.



Vliv hustoty a struktury vegetačního pásu je možné popsat např. tzv. optickou porositou porostu, která je definována jako poměr mezi otevřenou plochou a celkovou plochou vegetačního pásu. Studie Guan et al. (2003) popisuje experimenty provedené pro vegetační pásy s optickou porositou v rozmezí 0,016 – 0,389, jak uvádí následující obrázky.

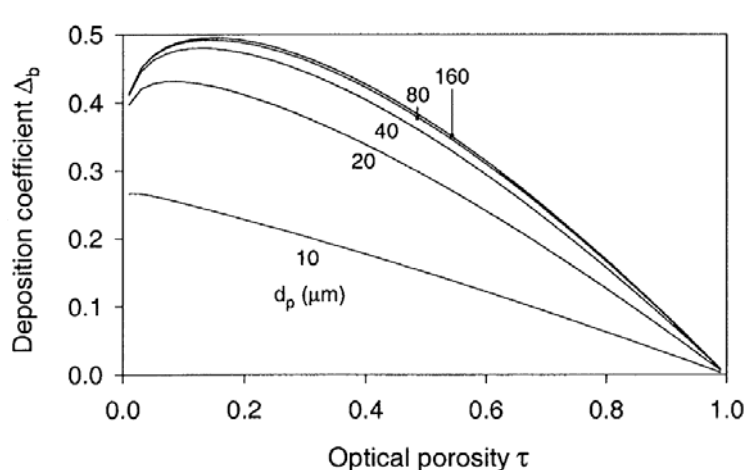
**Obr. 3.12. Vegetační pásy s různou hodnotou optické porosity: (a) 0,016, (b) 0,142, (c) 0,389 (Guan et al., 2003)**



Studie (Raupach et al., 2001) vztahuje optickou porositu vegetačního pásu k tzv. koeficientu depozice, což je bezrozměrné číslo závislé na celkové depozici částic, výšce vegetačního pásu, referenční rychlosti větru a výchozí koncentraci částic. Obrázek 3.13. znázorňuje průběh hodnot koeficientu depozice pro částice o velikosti 10 – 160  $\mu\text{m}$  v závislosti na optické porositě vegetačního pásu při rychlosti větru 4 m.s-1. Z výsledků studie je patrné, že k maximálnímu zachytu prachových částic o velikosti 30 – 160  $\mu\text{m}$  dochází při optické porositě 0,15, naopak maximální zachyt částic o velikosti 10  $\mu\text{m}$  je zřejmý při optické porositě blížíící se 0.

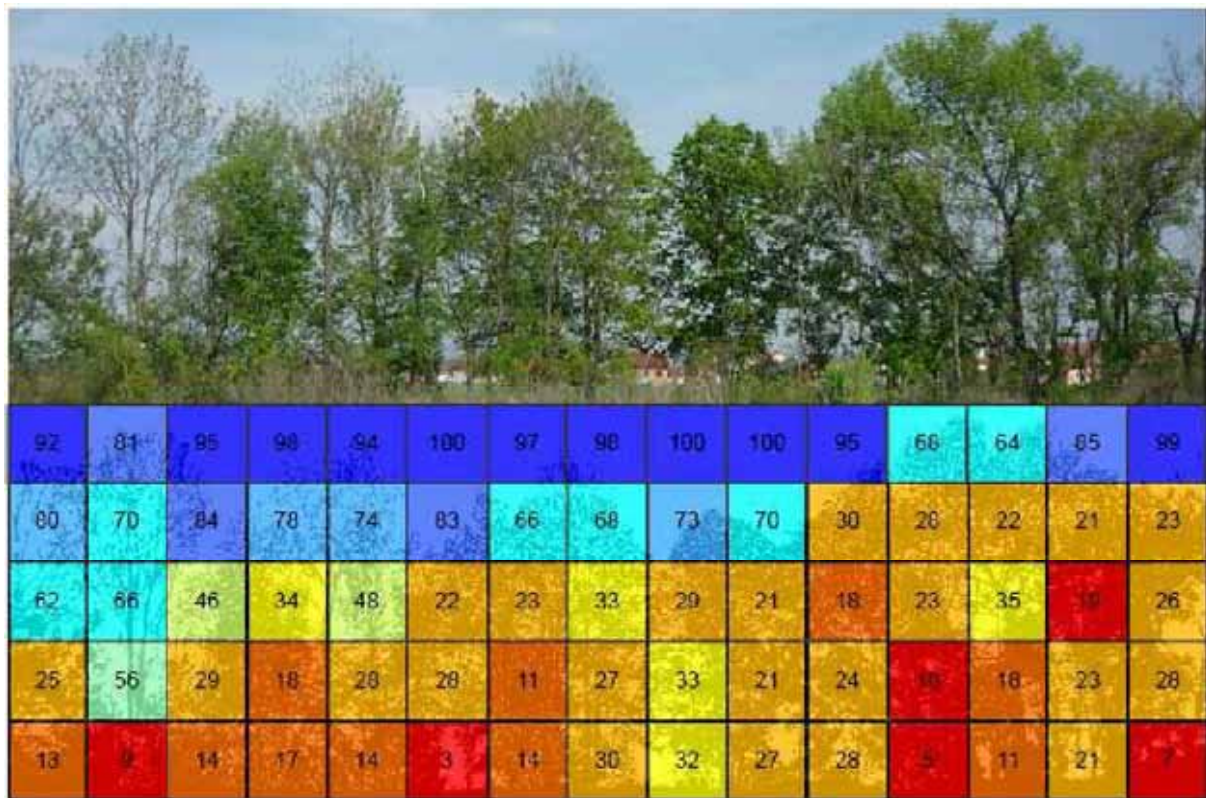
Zároveň je však konstatováno, že vegetační bariéra musí být dostatečně hustá, aby účinně absorbovala prachové částice, ale přitom i dostatečně řídká, aby částice protékaly skrz a mohly se zachytit. Vizuální představu o rozmístění dřevin v porostu o maximální účinnosti pro zachyt jemných a hrubších částic lze získat např. z výše uvedené studie Guan et al. (2003) – viz obr. 3.12.

**Obr. 3.13. Závislost optické porosity vegetačního pásu na koeficientu depozice částic o různé velikosti (Raupach et al., 2001)**



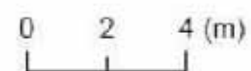
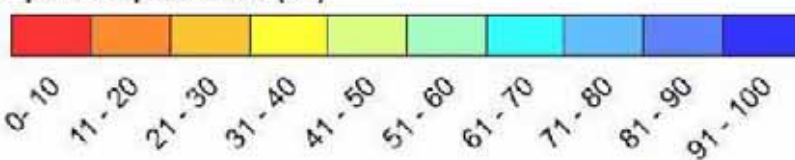
Metodické postupy pro stanovení optické porosity uvádí již zmíněné studie, které se zaměřují i na vyhodnocení účinnosti větro lamů. Stanovení optické porosity vegetačního pásu je možné provést na základě převedení jeho fotografie na černobílou a zjištění poměru bílých a černých bodů (Jareš et al., 2011, Muziková et al., 2010). Optická porosita je vyjádřena barevnou škálou v rozmezí 10 % pro čtvercovou síť o straně oka 2 metry, jak ukazuje následující obrázek.

**Obr. 3.14. Stanovení optické porosity (%) vegetačního pásu (Muziková et al., 2010)**



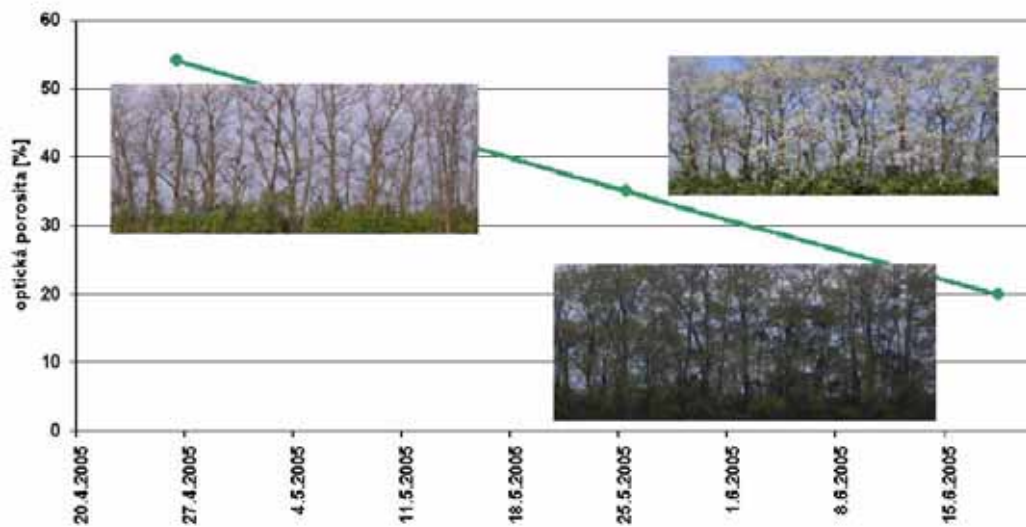
### Legenda

#### Optická porozita (%)



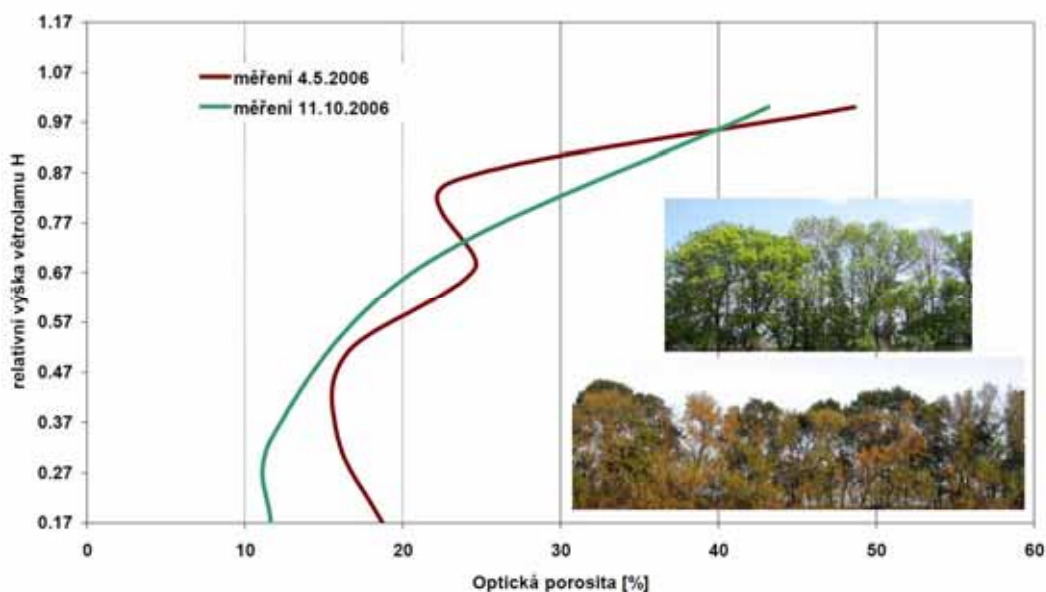
Obdobný přístup pro stanovení optické porosity dle fotografie byl použit ve studii Litschmann et al. (2005), kde však byl podíl bílých bodů k jejich celkovému počtu vyjádřen pro celý výřez vegetační bariéry, jak uvádí následující obrázek.

**Obr. 3.15. Vývoj optické porosity (%) větrolamu v průběhu vegetačního období (Litschmann et al., 2005)**



Studie (Litschmann et al., 2007) byla zaměřena na monitorování vývoje optické porosity vegetačního pásu v průběhu vegetačního období, a to v závislosti na druhové skladbě a zastoupení opadavých a neopadavých dřevin. Optická porositá byla opět stanovena pro čtvercovou síť a vyhodnocena v jednotlivých výškových vrstvách (Obr. 3.16.). Uvedená metoda umožňuje kvantifikovat účinek vegetačního pásu z hlediska jeho hustoty, vertikální průběh optické porosity pak slouží k hodnocení homogenity vegetačního pásu.

**Obr. 3.16. Vertikální průběh optické porosity (%) vegetačního pásu (Litschmann et al., 2007)**





### 3.4. DRUHOVÁ SKLADBA VEGETAČNÍHO PÁSU

Účinnost vegetačního pásu z hlediska záchytu prachových částic významně ovlivňuje i jeho druhová skladba, která závisí na vlastnostech jednotlivých druhů dřevin. Jedná se zejména o následující vlastnosti:

- dřeviny jehličnaté × listnaté, stálezelené × opadavé – větší účinek mají stálezelené jehličnaté stromy oproti stromům opadavým převážně listnatým. Avšak i v bezlistém stavu působí stromy jako bariéra, která zpomaluje proudění vzduchu a tím usnadňuje depozici částic.
- velikost, tvar a charakter koruny stromu – větší účinek mají silně rozvětvené stromy, navíc čím je koruna větší a hustší, tím je větší absolutní plocha listů zachycujících částice; rovněž se uvádí, že dřeviny s kulovitou korunou jsou účinnější oproti dřevinám s korunou jehlancovitou
- vlastnosti listů / jehlic – velikost aktivní plochy listů či jehlic, pohyblivost listů (účinnější jsou dřeviny s větším počtem malých pohyblivých listů), sklon listů (vodorovně položené listy mají větší účinek), povrchové vlastnosti (větší záchyt vykazují listy se specifickým povrchem, např. listy lepkavé, chlupaté a rýhované)

Schopnost záchytu částic v závislosti na druhové skladbě vegetačního pásu je možné vyhodnotit na základě různých vlastností. Ve vztahu k modelování byla jako nejvhodnější vybrána veličina „deposition velocity“, tj. rychlost depozice částic ( $v_g$ ). Studie sledující záchyt prachu u různých druhů dřevin pomocí hodnoty  $v_g$  vycházejí buď z měření ve větrných tunelech za přesně definovaných podmínek nebo z terénního měření u jednotlivých vegetačních bariér. V následujícím přehledu jsou shrnuty výsledky vybraných prací, uvedeny jsou údaje i pro druhy, které se v ČR jako původní nevyskytují, protože mohou sloužit např. pro odhad situace u podobných zdejších druhů.

Ve studii (Beckett et al., 2000) byly použity částice o průměrné velikosti  $0,8 \mu\text{m}$  s odchylkou  $0,18 \mu\text{m}$ , které tedy spadaly do skupiny  $\text{PM}_1$  a účinek byl sledován celkem u 5 druhů dřevin. Výsledné hodnoty rychlosti depozice částic pro jednotlivé druhy dřevin shrnuje následující tabulka.

**Tab. 3.1. Střední hodnota rychlosti depozice částic ( $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ) v závislosti na druhu dřeviny a rychlosti větru**

Rychlost větru ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	borovice černá	cypřišovec leylandův	javor babyka	jeřáb prostřední	topol chlupatoplodý
1	0,13 (0,02)	0,08 (0,0)	0,03 (0,02)	0,04 (0,02)	0,03 (0,0)
3	1,15 (0,09)	0,76 (0,13)	0,08 (0,02)	0,39 (0,17)	0,12 (0,04)
8	19,24 (3,65)	8,24 (2,1)	0,46 (0,11)	1,82 (0,9)	1,05 (0,08)
10	28,05 (2,22)	12,2 (4,67)	0,57 (0,01)	2,11 (0,5)	1,18 (0,22)

Z měření vyplynulo, že hodnota  $v_g$  silně narůstá s rychlostí nabíhajícího proudění větru. Zároveň je zřejmé, že mezi jednotlivými druhy dřevin jsou výrazné rozdíly, vyšší schopnost zachytu vykazují oba jehličnany, přičemž diference mezi druhy narůstá s rychlostí větru. Z listnatých stromů poté vychází nejlépe jeřáb, který díky hrubším a chlupatým listům dosahoval nejvyšších hodnot  $v_g$  ze všech listnatých dřevin. Naproti tomu nižších hodnot dosahoval topol s jedním hlavním kmenem a s velkými hladkými listy na dlouhých řapících.

Shodný autorský tým (Freer-Smith et al., 2003) navazuje na tuto práci další sérií měření pro částice o průměrné velikosti  $0,8 \mu\text{m}$  s odchylkou  $0,18 \mu\text{m}$  a uvádí výsledky pro dalších 7 druhů stromů, jak shrnuje následující tabulka.

**Tab. 3.2. Střední hodnota rychlosti depozice částic ( $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ) v závislosti na druhu dřeviny a rychlosti větru**

Rychlost větru ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	dub zimní	olše lepkavá	jasan ztepilý	javor klen	douglaska tisolistá	blahovičník kulatoplodý
3	0,831 (0,956)	0,125 (0,057)	0,178 (0,560)	0,042 (0,027)	1,269 (1,167)	0,018 (0,007)
6	1,757 (2,582)	0,173 (0,055)	0,383 (0,124)	0,197 (0,123)	1,604 (0,668)	0,029 (0,005)
9	3,134 (4,305)	0,798 (0,424)	0,725 (0,275)	0,344 (0,940)	6,040 (3,998)	0,082 (0,009)

Výsledky (Tab. 3.2.) potvrzují závěry předchozí studie (Becket et al., 2000) a rozšiřují počet druhů stromů, u kterých byl pomocí shodné metodiky sledován záchyt prachu na základě měření ve větrném tunelu. Z experimentu dále vyplynulo, že záchyt částic na listech a jehlicích výrazně převažuje nad záchytem na povrchu kmene a větví. Oproti domácím druhům s vysokou hodnotou rychlosti depozice částic se u subtropického druhu – blahovičníku ukázalo, že hladké, kožnaté listy jsou pro potřeby vysazování vegetačních bariér s protiprašnou funkcí nevhodné.

Studie Räsänen et al. (2013) uvádí výsledky (Tab. 3.3.) pro 4 druhy dřevin a pro částice o průměrné velikosti 0,7  $\mu\text{m}$  s odchylkou 3  $\mu\text{m}$  (s tím, že 96 % částic spadá do frakce  $\text{PM}_{2,5}$ ).

**Tab. 3.3. Střední hodnota rychlosti depozice částic ( $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ) v závislosti na druhu dřeviny a rychlosti větru**

Rychlost větru ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	bříza pýřitá	bříza bělokorá	lípa obecná	borovice lesní
3	0,25	0,13	0,15	0,65

Výsledky opět potvrzují vyšší schopnost zachytu u jehličnatého druhu. Studie dále uvádí vlastnosti listnatých stromů, které přispívají k vyššímu zachytu částic. Jedná se o nízkou smáčivost listů, nízkou hustotu průduchů a chlupatost listů. Jehlice / listy u jednotlivých druhů stromů se vyznačují následujícími vlastnostmi:

- bříza pýřitá – výrazně chlupaté listy z obou stran, velmi široké průduchy o nízké hustotě
- bříza bělokorá – výrazně chlupaté listy, vysoká vodivost průduchů
- lípa – chlupaté listy, malé průduchy s vysokou hustotou
- borovice – bez chlupů, nesmáčivý povrch jehlic, nízká vodivost průduchů

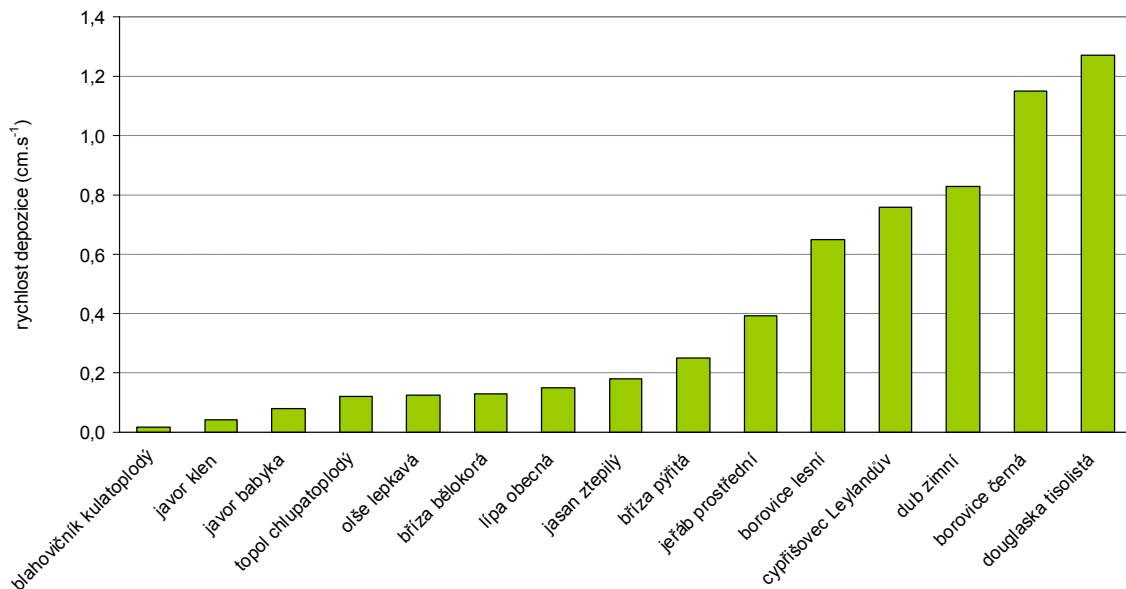
Pokud tedy zanedbáme vliv rozdílu ve velikosti částic u studie Räsänen et al. (2013), je možné porovnat hodnoty rychlosti depozice částic pro rychlost 3  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , jak uvádí následující tabulka.

**Tab. 3.4. Porovnání rychlosti depozice částic  $v_g$  pro rychlost větru 3  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  u jednotlivých druhů dřevin**

Autor	Druh	$v_g$ ( $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ )	velikost částic ( $\mu\text{m}$ )
Freer-Smith, 2003	blahovičník kulatoplodý	0,018	0,8 $\pm$ 0,18
Freer-Smith, 2003	javor klen	0,042	0,8 $\pm$ 0,18
Beckett, 2000	javor babyka	0,080	0,8 $\pm$ 0,18
Beckett, 2000	topol chlupatoplodý	0,120	0,8 $\pm$ 0,18
Freer-Smith, 2003	olše lepkavá	0,125	0,8 $\pm$ 0,18
Räsänen, 2013	bříza bělokorá	0,130	0,7 $\pm$ 3,00
Räsänen, 2013	lípa obecná	0,150	0,7 $\pm$ 3,00
Freer-Smith, 2003	jasan ztepilý	0,178	0,8 $\pm$ 0,18
Räsänen, 2013	bříza pýřitá	0,250	0,7 $\pm$ 3,00
Beckett, 2000	jeřáb prostřední	0,390	0,8 $\pm$ 0,18

Autor	Druh	$v_g$ (cm.s <sup>-1</sup> )	velikost částic (μm)
Räsänen, 2013	borovice lesní	0,650	0,7 ± 3,00
Beckett, 2000	cypřišovec Leylandův	0,760	0,8 ± 0,18
Freer-Smith, 2003	dub zimní	0,831	0,8 ± 0,18
Beckett, 2000	borovice černá	1,150	0,8 ± 0,18
Freer-Smith, 2003	douglaska tisolistá	1,269	0,8 ± 0,18

**Obr. 3.17. Porovnání rychlosti depozice částic pro rychlost větru 3 m.s<sup>-1</sup> u jednotlivých druhů dřevin**



Z porovnání rychlosti depozice částic s průměrnou velikostí 0,7 – 0,8 μm pro jednotlivé druhy dřevin je patrné, že:

- v oblasti nejnižších hodnot se nacházejí převážně listnaté stromy s hladkými / kožnatými listy
- následují listnaté stromy s rýhovanými / chlupatými / lepkavými listy
- v oblasti vyšších hodnot se vyskytují jehličnany (borovice, douglaska)
- pro řadu běžných listnatých stromů jsou hodnoty velmi podobné (javor, topol, olše, lípa, jasan), vyšší pak pro břízu pýřitou a jeřáb, následují jehličnany, mezi nimiž je zvláštní výjimkou listnatý dub zimní

Výsledky studií zaměřených na sledování účinnosti různých druhů dřevin přímo v terénu, tj. u jednotlivých vegetačních bariér lze jen velmi obtížně srovnávat z důvodu

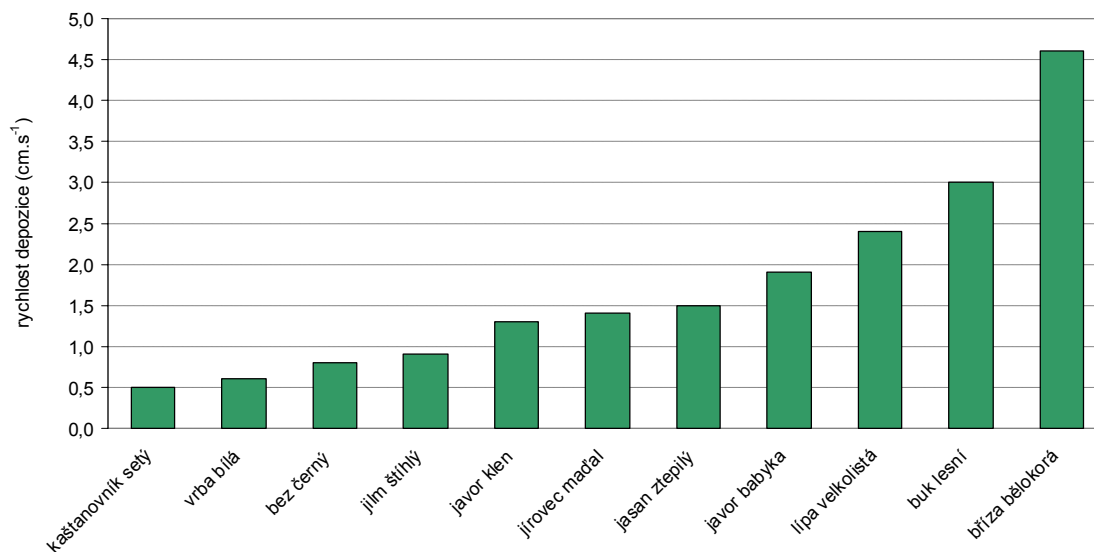


jejich výrazného ovlivnění místními podmínkami, zejména meteorologickou situací. Studie Mitchell et al. (2010) uvádí hodnoty rychlosti depozice pro částice PM<sub>10</sub> odvozené pomocí měření magnetických vlastností listů pro celkem 11 druhů listnatých dřevin. Vzhledem k tomu, že se jedná o měření ve venkovním prostoru, není uvedena rychlost proudění, a proto nelze hodnoty porovnávat s výše uvedenými měřeními ve větrných tunelech. Údaje však poskytují alespoň relativní porovnání schopnosti dřevin k záchytu PM<sub>10</sub>. Shrnutí výsledků uvádí následující tabulka.

**Tab. 3.5. Porovnání rychlosti depozice částic pro jednotlivé druhy listnatých dřevin (Mitchell et al., 2010)**

Druh	$v_g$ (cm.s <sup>-1</sup> )	Povrch listů svrchní / spodní
kaštanovník setý	0,5	rýhovaný, voskový / chlupatý (jen mladý porost)
vrba bílá	0,6	hladký, voskový / hladký
bez černý	0,8	hladký / chlupatý
jilm štíhlý	0,9	hladký / hladký
javor klen	1,3	rýhovaný / chlupatý
jírovec maďal	1,4	rýhovaný / rýhovaný
jasan ztepilý	1,5	rýhovaný / chlupatý (jen mladý porost)
javor babyka	1,9	hladký, lepkavý / rýhovaný
lípa velkolistá	2,4	rýhovaný / rýhovaný, chlupatý
buk lesní	3,0	rýhovaný, chlupatý / chlupatý
bříza bělokorá	4,6	rýhovaný, chlupatý / rýhovaný

**Obr. 3.18. Porovnání rychlosti depozice částic pro jednotlivé druhy listnatých dřevin (Mitchell et al., 2010)**



Z výsledků studie je patrné, že povrch listů má významný vliv na schopnost záchytu částic. Nejvyšší hodnoty rychlosti depozice částic se vyskytují u dřevin s rýhovanými a chlupatými listy a dále pak u stromů s lepkavými listy jako je např. javor babyka, lípa a bříza. Nízké hodnoty rychlosti depozice částic jsou pak u dřevin s hladkým a voskovým povrchem listů.

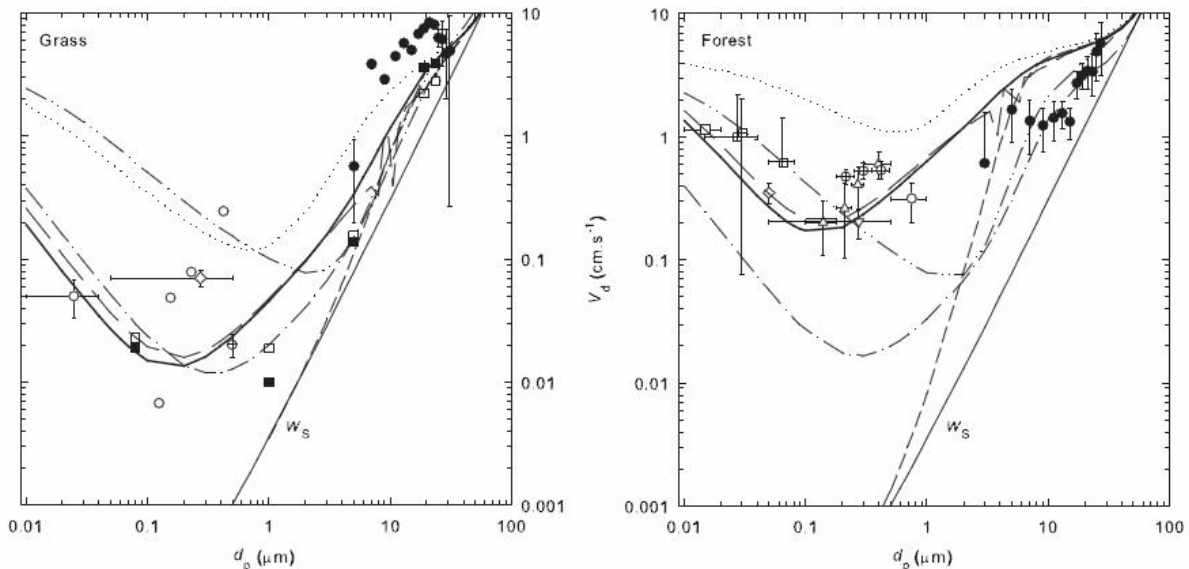
Z porovnání výsledků měření ve větrných tunelech a v terénu vyplývá, že rychlost depozice částic pro jednotlivé druhy stromů zcela neodpovídá, např. co se týká jejich pořadí, což může být částečně dáno tím, že různé druhy stromů se vyznačují odlišnou schopností záchytu u různě velkých částic. Obecně lze uvést, že:

- studie pro větrné tunely se jeví jako vhodné pro porovnávání s modelováním metodou CFD (kap. 3.1.), vzhledem k tomu, že obsahují obdobná vstupní data
- výsledky studie Mitchell et al. (2010) se jeví jako hodnotné, neboť jsou zpracovány pro PM<sub>10</sub> jakožto klíčový polutant a zahrnují převážně druhy stromů původní i v ČR
- studie Mitchell et al. (2010) však neobsahuje jehličnany, což je její zásadní nedostatek. Z předchozích studií lze uvažovat, že schopnost záchytu bude u jehličnanů vyšší než u listnatých dřevin.

Dále jsou uvedeny studie Petroff et al. (2008a, 2008b, 2009, 2010), z jejichž principů vychází použitý CFD model (kap. 3.1.). Studie byly zaměřeny na porovnání

schopnosti záchytu částic o velikosti cca 0,1 – 30  $\mu\text{m}$  na základě výsledků měření jiných studií. Účinnost byla sledována zejména u různých druhů travin, v menší míře pak i souhrnně u jehličnatých a listnatých porostů, na rozdíl od předchozích studií, které se týkají konkrétních druhů stromů. Shrnutí hodnot rychlosti depozice v závislosti na velikosti částic uvádějí následující obrázky.

**Obr. 3.19. Závislost depoziční rychlosti na velikosti částic – traviny (vlevo) a jehličnaté porosty (vpravo)**



Uvedené studie zohledňují ve výpočtu celou plochu listů na rozdíl od předchozích studií, které používají jen projekci na plochu kolmou na směr proudu. Proto je třeba v případě porovnávání studií kompenzovat výsledky následujícím přepočtem:

$$v_g^{Petroff} = v_g \cdot k_x$$

kde:

- $v_g$  = rychlost depozice částic ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )
- $k_x$  = parametr úhlového rozdělení

Parametr úhlového rozdělení závisí na rozložení listů / jehlic, jak je zřejmé z následující tabulky.

**Tab. 3.6. Parametr úhlového rozdělení ( $k_x$ ) dle rozložení listů / jehlic (Petroff et al. 2008b a 2009)**

Rozložení	Listy	Jehlice
horizontální	0	$2 / \pi^2$

<b>Rozložení</b>	<b>Listy</b>	<b>Jehlice</b>
planofilní	0,135	0,24
plagiofilní	0,216	0,27
erektofilní	0,270	0,30
vertikální	$1 / \pi$	$1 / \pi$
extremofilní	0,189	0,26
rovnoměrný	$2 / \pi^2$	0,27

## 4. MODELOVÁNÍ VLIVU VEGETAČNÍ BARIÉRY NA ŠÍŘENÍ ZNEČIŠTĚNÍ OD KOMUNIKACE

V rámci projektu TD020357 byla provedena série modelových výpočtů pomocí CFD modelu (*Computational Fluid Dynamics*), jejichž cílem bylo vyhodnotit vlivy vlastností vegetační bariéry na výsledný záchyt prachových částic ze silniční komunikace a parametrizovat vztah mezi podílem zachycených částic a základními vlastnostmi bariéry (šířka, výška, hustota).

### 4.1. POPIS MODELOVÁNÍ METODOU CFD

Model CFD je obecně určen pro analýzy proudění tekutin či plynů v komplikovaných podmínkách, v daném případě byl model použit pro simulaci proudění a rozptylu vzdušniny nesoucí pevné částice při průchodu přes polopropustnou vegetační bariéru (Šíp et al., 2015). Výpočetní metoda byla aplikována na 2D model silnice s přilehlým vegetačním blokem a vychází z řady zákonitostí popisujících vliv vegetace na proudové pole, depozici pevných částic na listech vegetace a turbulenci vlivem silničního provozu.

Přenos pevných částic zahrnující spádovou rychlost částic a ukládání částic na vegetaci je popsáno následovně:

- proudění vzduchu je popsáno RANS rovnicemi nestlačitelného proudění – rovnicí pro tlak, odvozené z požadavku nestlačitelnosti proudění, rovnicemi pro vektor rychlosti odvozenými ze zákona zachování hybnosti a rovnicí pro potenciální teplotu
- šíření pevných částic je popsáno rovnicí advekce-difuze pro hustotu pevných částic ve vzduchu
- pro modelování turbulence je použit algebraický model podle (Blackadar, 1962)

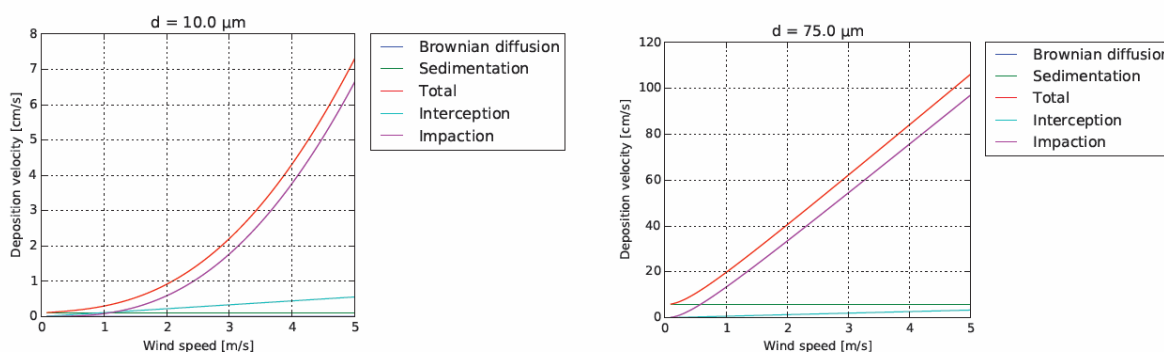
Modelování vlivu vegetace na proudové pole je zohledněno následujícím způsobem:

- výchozím předpokladem je horizontálně homogenní vegetace
- vertikální rozložení olistění je určeno profilem LAD (*Leaf Area Density*), který popisuje listovou plochu na jednotku objemu v dané výšce
- aerodynamický efekt, kdy vegetační blok slouží jako překážka proudění a proud zpomaluje či odchyluje, je zohledněn v rovnicích hybnosti
- záchyt pevných částic na listech a větvích je modelován přidaným členem v rovnici pro hustotu částic ve vzduchu. Jedná se o depoziční rychlost, která reflektuje čtyři

základní procesy, kterými jsou částice přenášeny ze vzduchu na plochu listů – Brownovská difuze, intercepce (záchyt částice letící podél listu), impakce (dopad částice na list vlivem setrvačnosti) a spád vlivem gravitace (Obr. 4.1.).

- listnaté stromy jsou zastoupeny druhem javor babyka s šířkou listů 10 mm a plagiofilním rozložením (Petroff et al., 2009) a jehličnaté stromy druhem borovice lesní s průměrem jehlic 2 mm (Petroff et al., 2008b)

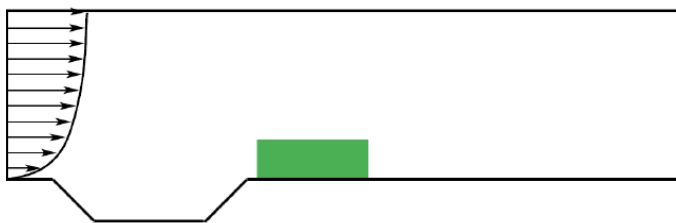
**Obr. 4.1. Závislost depoziční rychlosti na rychlosti větru pro vegetační bariéry složené z listnatých stromů – částice o velikosti 10 μm (vlevo) a 75 μm (vpravo)**



## 4.2. VSTUPNÍ DATA A VÝCHOZÍ PARAMETRY

Vybraná výpočetní varianta byla zvolena jako nejtypičtější situace, kterou reprezentuje zjednodušený 2D model silnice v mírném zářezu s přilehlou jednostrannou vegetační bariérou, jak je uvedeno na obrázku 4.2. Rozměry výpočetní oblasti byly 350 × 100 m.

**Obr. 4.2. Výpočetní varianta – silnice v mírném zářezu**

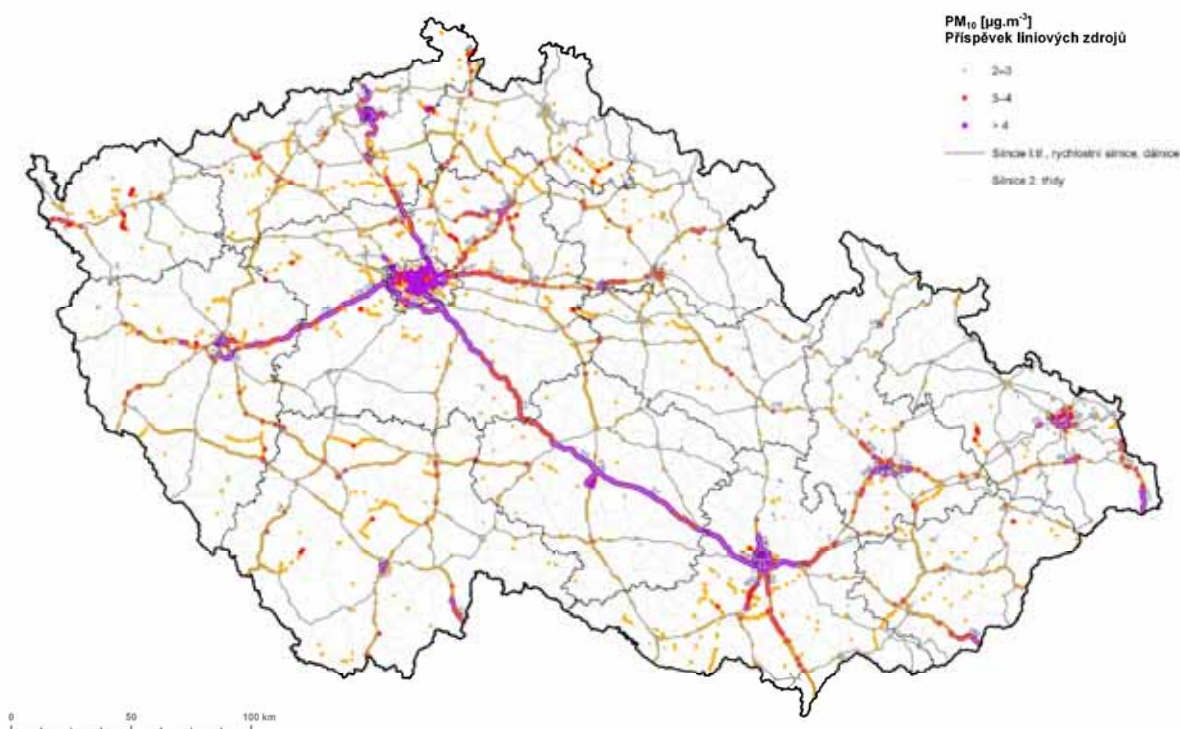


Vstupní emise byla zadána pro čtyřpruhovou komunikaci, reprezentovanou čtyřmi liniovými zdroji ( $4 \times 1 \mu\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$  na 1 metr délky komunikace) umístěnými v jednotlivých jízdních pružích. Výsledky modelových výpočtů odpovídající uvedené vstupní emisi jsou pak uvedeny v kap. 3.5.

Vzhledem k tomu, že modelované koncentrace jsou pak vůči emisi relativní, byla pro zpracování výstupů modelových výpočtů a prezentaci výsledků (kap. 3.6.) zvolena emise  $10 \mu\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$  na 1 metr délky komunikace, což přibližně odpovídá imisní hodnotě  $3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  na kraji komunikace. Z obrázku 4.3. je patrné, že vybraný příspěvek liniových zdrojů odpovídá více zatíženým komunikacím v ČR a jeví se tak jako vyhovující pro představu o reálném dopadu vegetační bariéry.

**Obr. 4.3. Imisní příspěvky liniových zdrojů – průměrné roční koncentrace  $\text{PM}_{10}$**

Suspendované částice  $\text{PM}_{10}$  – příspěvek liniových zdrojů

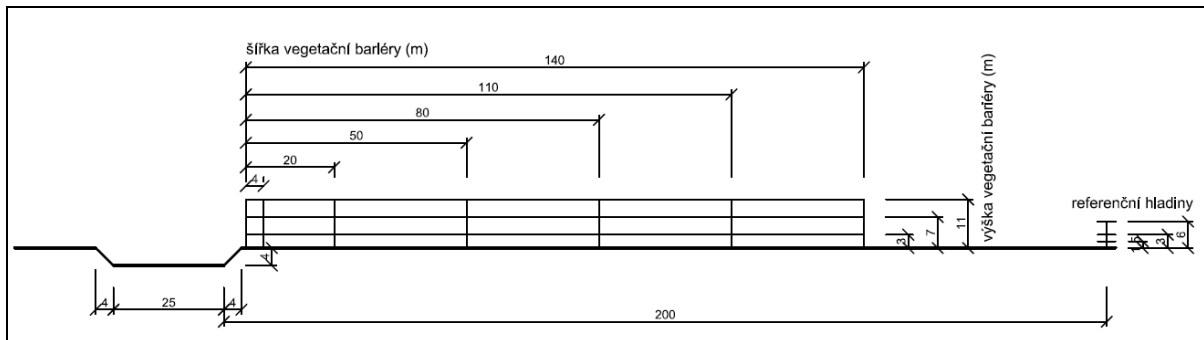


#### 4.2.1 Rozměry zvolených variant vegetační bariéry a vybrané komunikace

Vliv vegetační bariéry byl modelován v několika variantách, schéma rozměrových konfigurací bariéry (výška  $\times$  šířka) a její pozice vůči silnici, která je 1 metr od horní hrany zářezu, jsou uvedeny na obrázku 4.4. Jako modelový případ byla zvolena čtyřpruhová silnice šířky 25 metrů a svahy pod úhlem  $45^\circ$  délky a výšky 4 metry umístěnými na obou stranách silnice.



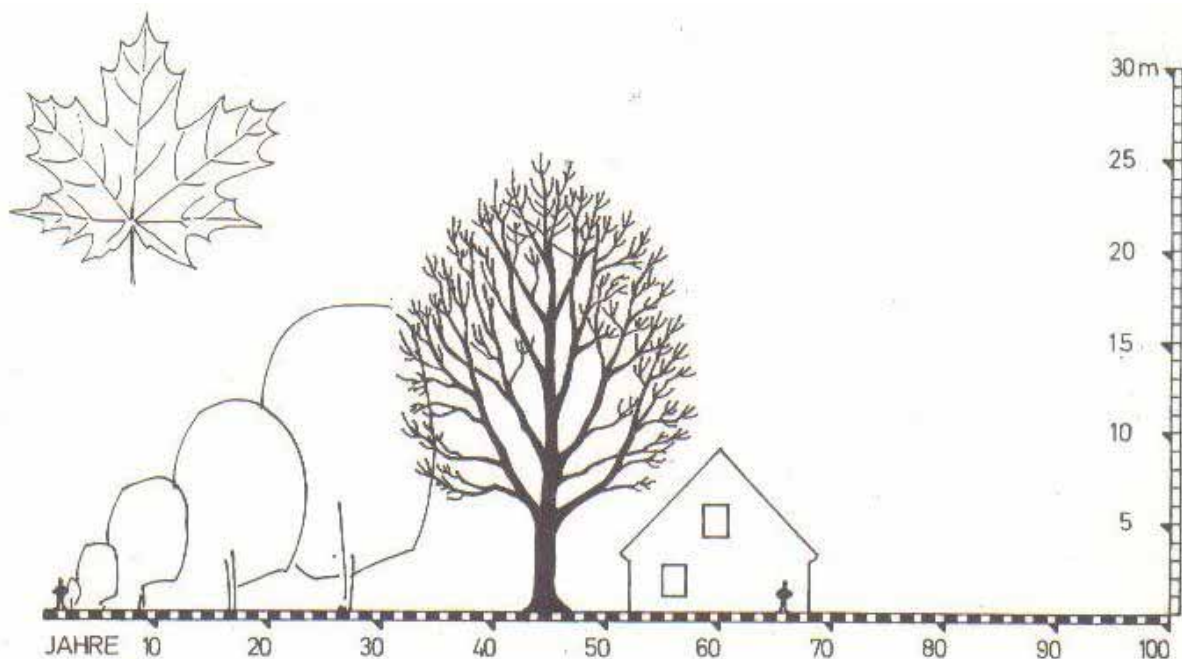
**Obr. 4.4. Schématický záznam silnice s přilehlou vegetační bariérou ve 2D řezu**



## 4.2.2 Hustota modelované vegetační bariéry

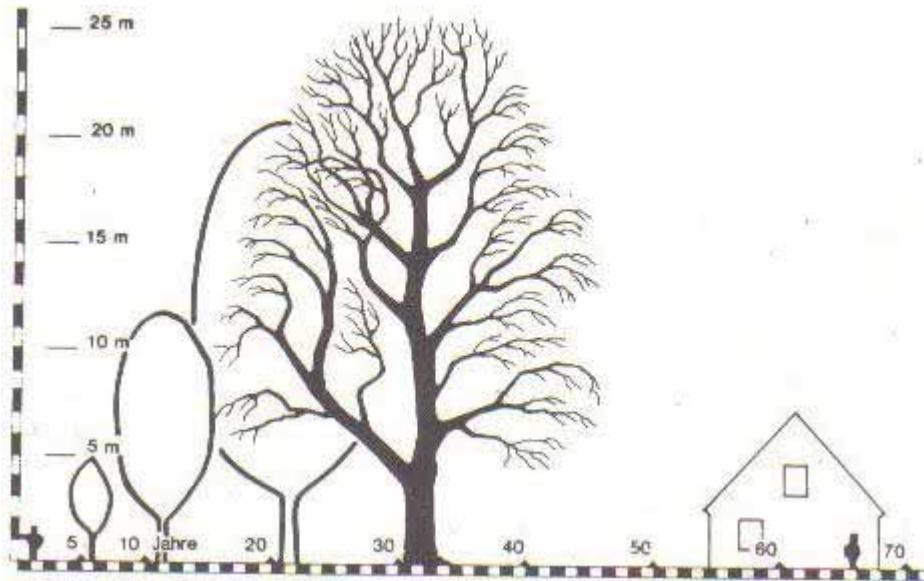
Vliv rozestupů dřevin a hustoty jejich olistění byl simulován prostřednictvím veličiny LAD (*Leaf Area Density*), vyjádřené v  $m^2$  listové plochy na  $m^3$  objemu bariéry. Model umožňuje zadávat její hodnotu jako prostorově proměnnou, v použité simulaci byla uvažována bariéra v horizontálních směrech homogenní, avšak s proměnnou hustotou ve vertikálním směru tak, aby byl zohledněn výškový profil odpovídající reálné struktuře porostu. Za tímto účelem byly pro všechny tři modelované výškové varianty (3, 7 a 11 m) nakonfigurovány typické sestavy dřevin, které zahrnují listnaté i jehličnaté stromy a keře. K tomu byl použit podklad neznámého původu – schématické tvary korun podle stáří stromu. Příklady stromů jsou uvedeny na Obr. 4.5. – 4.7.

**Obr. 4.5. Závislost výšky a profilu stromu na jeho stáří – javor mlč**

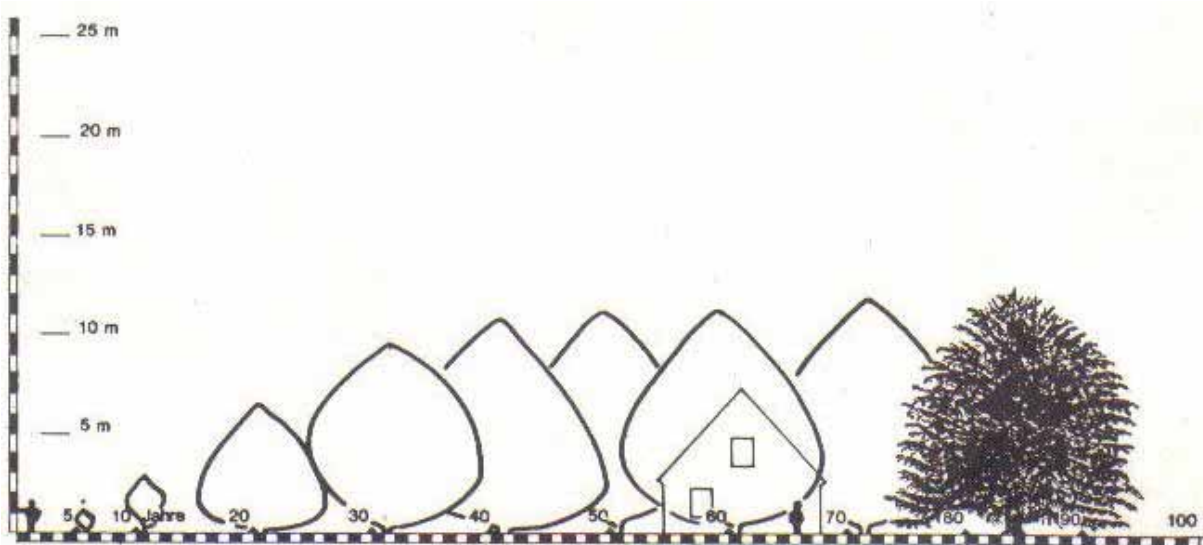




**Obr. 4.6. Závislost výšky a profilu stromu na jeho stáří – topol černý**

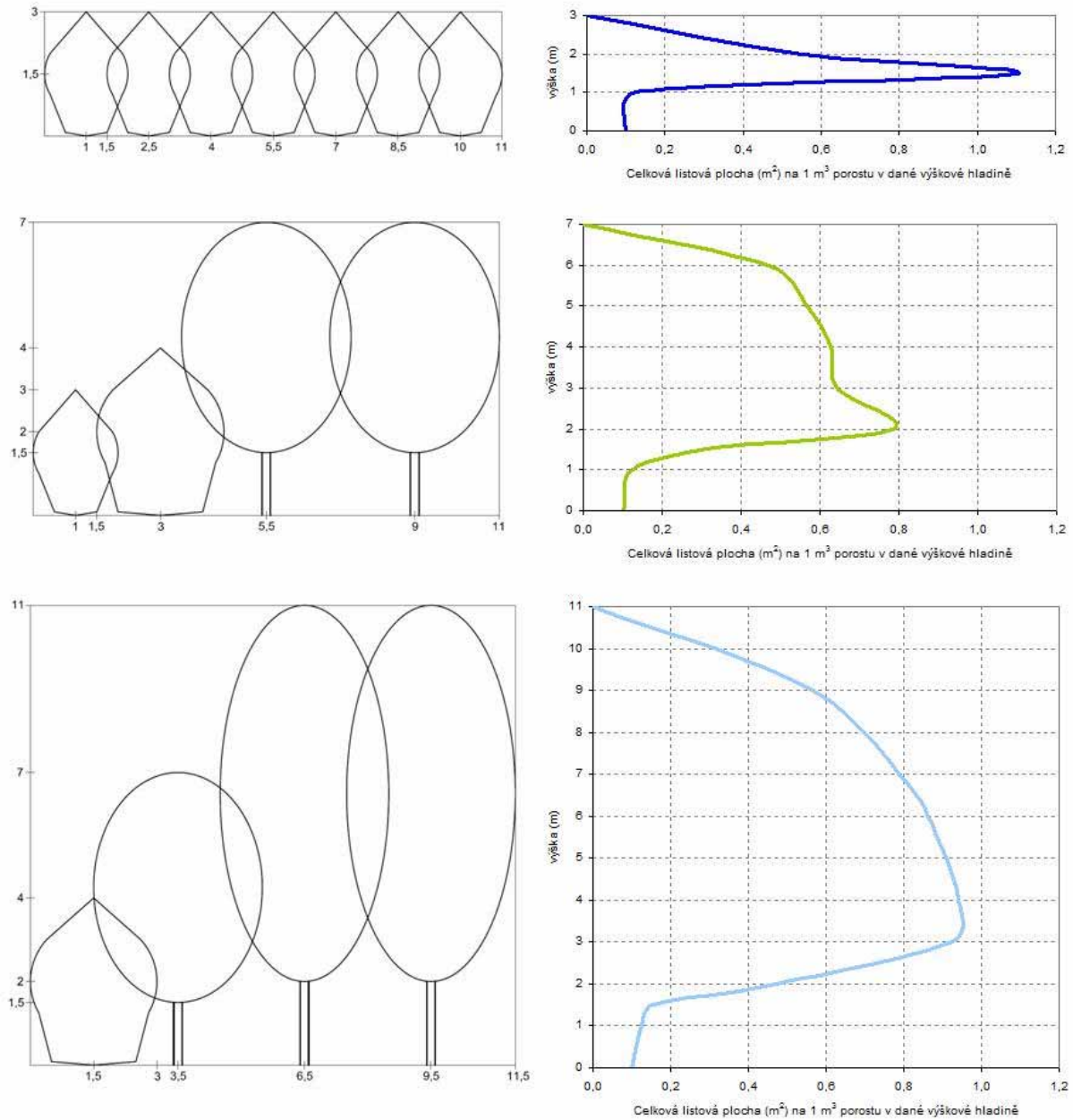


**Obr. 4.7. Závislost výšky a profilu stromu na jeho stáří – tis červený**



Následně byl odvozen „prostor vyplněný dřevinami“ v jednotlivých výškových hladinách. Ten byl pak přenásobený hodnotami indexu listové plochy (Vreštiak et al., 1991), přepočtený na 1 m<sup>3</sup> objemu bariéry a vyneseny do následujícího grafu. Výsledné sestavy vegetačních bariér a odvozené výškové profily LAD uvádí následující obrázek.

Obr. 4.8. Sestava dřevin s listovou plochou na 1 m<sup>3</sup> porostu pro bariéry výšky 3, 7, 11 m



Kromě tohoto „základního stavu“, který lze vyjádřit v relativní stupnici hodnotou  $D = 1$ , byly modelovány ještě varianty odpovídající hodnotám  $D = 0,25$ ,  $0,5$  a  $1,5$ . Dále byl modelován stav bez bariéry ( $D = 0$ ).

### 4.2.3 Meteorologické vstupy

V rámci přípravy modelových výpočtů byla testována citlivost modelu na zadání meteorologických vstupů. Cílem bylo upřesnit charakteristické modelové situace, pro

něž může být provedena kompletní sestava dalších výpočtů, sloužících pro parametrizaci vlivu vegetační bariéry. Pro ověřování byla použita standardní klasifikace rozptylových podmínek podle Bubníka-Koldovského, tzn.:

- 3 třídy rychlostí větru, popsané středními rychlostmi ve výšce 10 m nad terénem: 1,7, 5,0 a 11 m.s<sup>-1</sup>
- 5 tříd stability, popisujících teplotní zvrstvení atmosféry (superstabilní, stabilní, izotermní, normální, konvektivní)

Jednotlivým třídám stability byl přiřazen odpovídající teplotní gradient, rychlosti větru byly přepočteny pomocí logaritmického profilu na rychlost těsně nad zemským povrchem. Následně byly vyloučeny nereálné kombinace (např. superstabilní zvrstvení a nejvyšší rychlost větru) a bylo definováno 8 charakteristických variant atmosférických podmínek, pro něž byly výpočty provedeny (tab. 4.1.).

**Tab. 4.1. Ověřované varianty meteorologických podmínek**

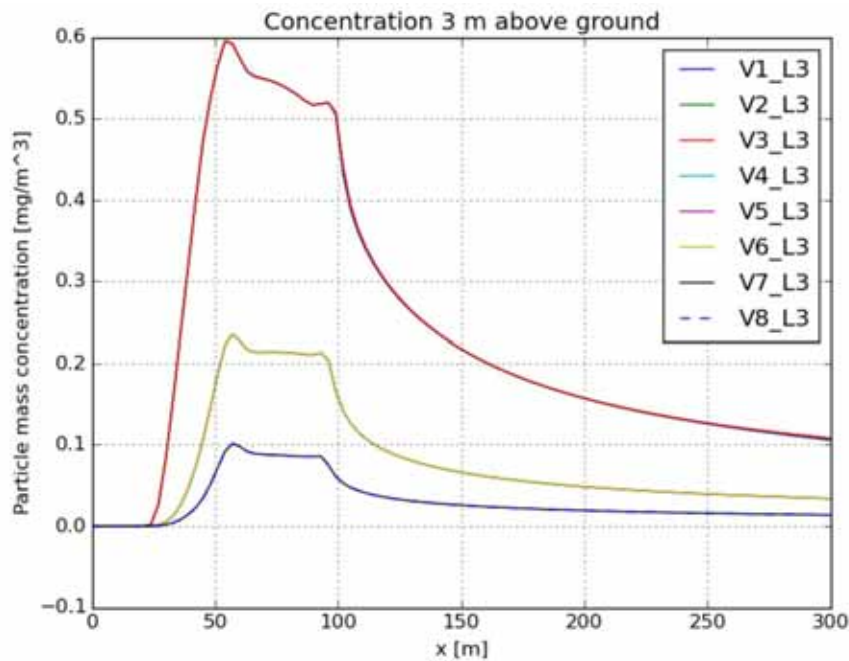
Teplotní gradient (K/m)	Třída stability	Rychlost větru (m.s <sup>-1</sup> )		
		1,7	5,0	11,0
-0,016	I+II	V1	V4	-
0,0	III	V2	V5	V7
0,007	IV	V3	V6	V8

Výpočty byly provedeny pro 3 varianty vzájemného uspořádání komunikace a vegetační bariéry (v rovině, s jednostranným zářezem, s oboustranným zářezem). Výsledky modelových výpočtů pro nejtypičtější uspořádání s jednostranným zářezem (resp. vegetační bariérou na mírně vyvýšeném zemním valu) uvádějí obrázky 4.9. a 4.10. Z porovnání výsledků vyplývá, že stabilní zvrstvení atmosféry výsledek modelování prakticky neovlivňuje, což je patrně dáno malým vertikálním rozměrem (řádově metry). Naproti tomu rychlost proudění má na výslednou koncentraci podstatný vliv, který je dán částečně rozdíly v rozptylu znečišťující látky, zčásti však i odlišnou účinností vegetační bariéry, která se více projevuje při vyšších rychlostech větru.

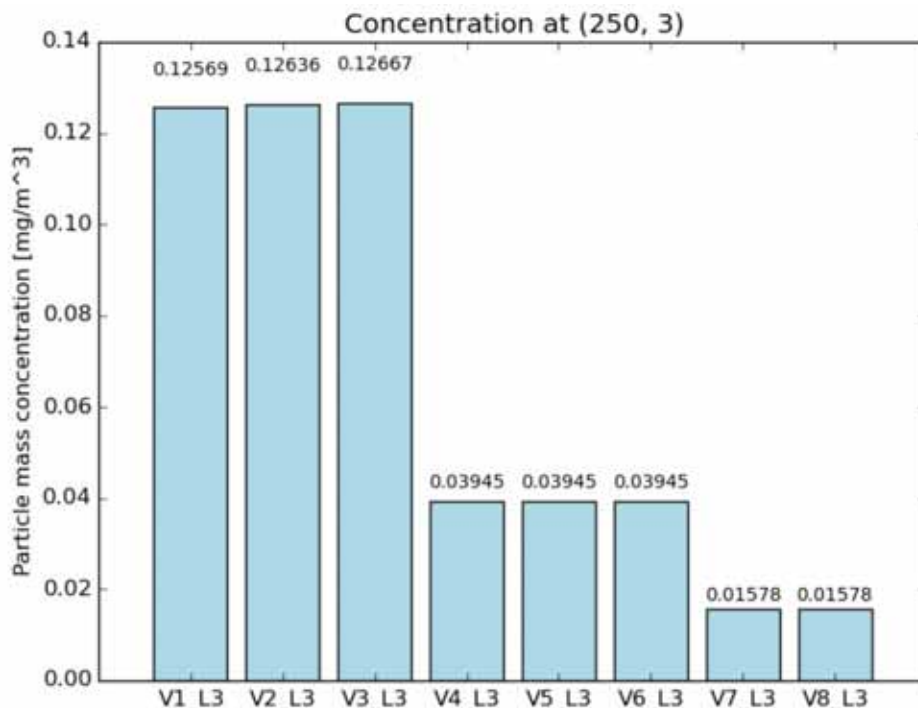
Na základě analýzy a diskuse výsledků byla pro modelové scénáře zvolena střední rychlost větru 5 m.s<sup>-1</sup>, a to z více důvodů. První důvod byl praktický – v rámci daného rozsahu projektu bylo možné provést pouze konečný počet výpočtů a jevílo se jako přínosnější namodelovat více rozměrových kombinací vegetačních bariér, než menší počet variant bariéry při různých meteorologických vstupech. Tento závěr dále potvrzuje obvyklé rozložení rychlostí větru na území ČR, kdy střední rychlost je

jednoznačně dominantní, jakož i centrální poloha vypočtených hodnot pro  $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  v rámci zjištěných výsledků. Lze tak konstatovat, že hodnoty vypočtené pro  $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  jsou dostatečně reprezentativní i pro průměrné rozložení rychlostí větru. Co se týče teplotního zvrstvení, byly další modelové výpočty provedeny pro III. třídu stability, ale jak bylo uvedeno, stabilní zvrstvení vypočtené hodnoty prakticky neovlivňuje.

**Obr. 4.9. Charakteristický průběh koncentrací částic  $\text{PM}_{10}$  v modelovaných variantách meteorologických podmínek**



**Obr. 4.10. Hodnoty koncentrací vypočtené ve vzdálenosti 250 m pro ověřované varianty meteorologických podmínek**



### 4.3. SHRNUTÍ VARIANT MODELOVÝCH VÝPOČTŮ

Varianty základních vlastností vegetační bariéry (šířka, výška a hustota vegetační bariéry) a jejich kombinace, které byly zahrnuty do CFD modelu, a to zvlášť pro listnaté a jehličnaté stromy, shrnuje následující tabulka.

**Tab. 4.2. Základní vlastnosti modelovaných variant vegetační bariéry**

Základní vlastnosti	Listnaté stromy	Jehličnaté stromy
šířka bariéry (m)	4*, 20, 50, 80, 110, 140	20, 80
výška bariéry (m)	3, 7, 11	3, 7, 11
hustota bariéry	0; 0,25; 0,5; 1,0; 1,5	0; 1,0

\*) bariéra o šířce 4 metry byla modelována pouze pro hustotu D = 1

Celkem se jednalo o modelování 63 kombinací pro vegetační bariéry složené z listnatých stromů, 6 kombinací pro bariéry složené ze stromů jehličnatých a navíc varianta bez vegetační bariéry. Pro každou variantu pak byly počítány vlivy na částice frakce PM<sub>10</sub> a celkový prach, vyjádřený jako frakce PM<sub>75</sub>.



#### 4.4. VERIFIKACE CFD MODELU NA ZÁKLADĚ TERÉNNÍCH MĚŘENÍ A REŠERŠE

V rámci projektu byl proveden sběr základních experimentálních dat, tj. měření koncentrací suspendovaných částic ve vybraných vhodných lokalitách v okolí komunikací s vegetačními bariérami, kde byly zaznamenávány změny koncentrací prachových částic frakce  $PM_{10}$  a  $PM_{2,5}$  prostřednictvím mobilních prachoměrů DustTrakDT. Kromě koncentrací byla souběžně načítána též meteorologická data (teplota, tlak, rychlost a směr větru) pomocí meteostanice WMR300. Příklady vegetačních bariér podél komunikací uvádějí následující obrázky.

**Obr. 4.11. Vegetační bariéry složené z jehličnatých stromů**



**Obr. 4.12. Vegetační bariéry složené z listnatých stromů**



**Obr. 4.13. Vegetační bariéry složené ze stromů a doplněné keřovými porosty**



Z provedených měření a následné analýzy výsledků vyplynulo, že měření jsou značně závislá na vhodných meteorologických podmínkách, a to především na směru a rychlosti větru. Směr proudění vzduchu by měl být ideálně v kolmém směru na hodnocenou komunikaci a vegetační bariéru. Při terénních měření se však ukázalo, že proudění vzduchu se obvykle stáčí podél vegetační bariéry a nebylo tak proto možné zaznamenat dostatečně časově reprezentativní vzorky měření, na základě kterých by bylo vhodné verifikovat výpočetní model. Další problém nastal s rychlostí větru, která obzvláště v místech za vegetační bariérou nebyla dostatečně vysoká, aby bylo možné provést měření. Navíc imisní příspěvky komunikace byly za bariérou již silně maskovány příspěvky ostatních zdrojů, resp. imisním pozadím. V souhrnu se tak ukázalo, že nebylo možné verifikovat CFD model na základě terénních měření.

Proto byly hledány alternativní cesty ověření použitého modelu. V rámci diskuse výsledků bylo konstatováno, že nejvhodnějším (resp. jediným možným) postupem by byla verifikace modelu pomocí měření ve větrném tunelu, kdy je možné sledovat vliv vegetace na proudění a záchyt částic za přesně definovaných podmínek a nezávisle na vlivech okolního prostředí. Provedení obdobného měření v rámci projektu nebylo možné vzhledem k jeho rozsahu, bylo však možné využít výsledky měření ve větrných tunelech, publikované v literatuře.

Vyhodnocení shody použitého CFD modelu s údaji získanými rešerší tak bylo provedeno na základě srovnání použitých parametrizací pro simulaci procesu depozice pevných částic na listech vegetace. Tento jev je v metodě CFD zohledněn na základě studie Petroff et al. (2009) pro vegetační bariéry složené z listnatých stromů a dle Petroff et al. (2008b) pro vegetační bariéry složené z jehličnatých stromů. Vegetace je v modelu definována následujícími parametry:

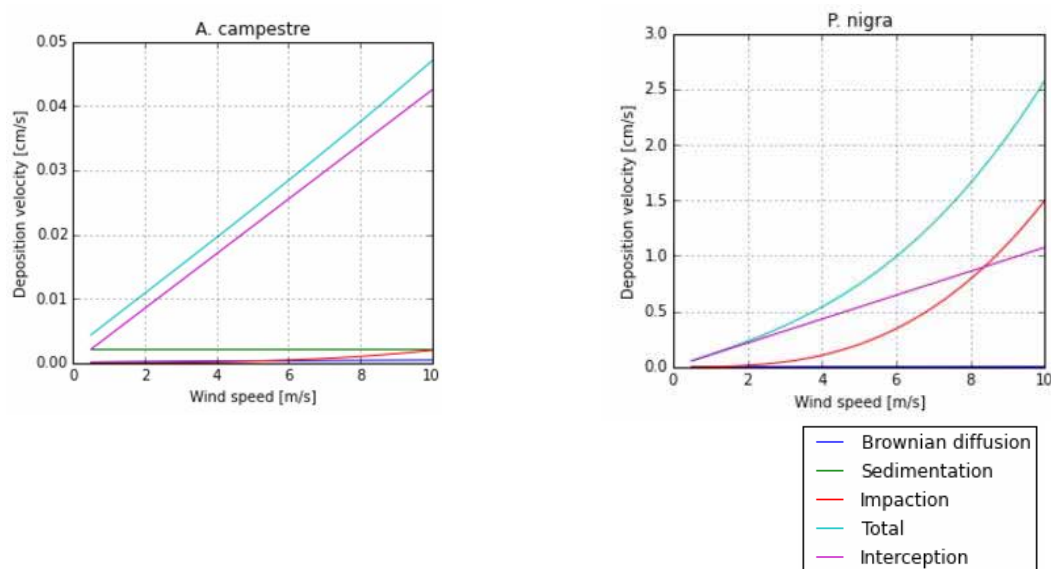
- typ vegetace – listnaté / jehličnaté stromy
- velikost listů / jehlic
- rozložení orientace listů

Vzhledem k tomu, že studie Petroff et al. (2008b, 2009) byly zaměřeny na porovnání schopnosti záchytu částic u různých druhů travin, v menší míře pak i souhrnně u jehličnatých a listnatých porostů bez přímé souvislosti s vegetačními bariérami, byly jejich výsledky porovnány se závěry dalších studií získaných v rámci rešerše, které se primárně zabývaly sledováním účinnosti vegetačních bariér složených z různých druhů dřevin. Schopnost záchytu částic v závislosti na druhové skladbě vegetačního pásu byla obdobně jako v provedené rešerši vyhodnocena na základě veličiny rychlost depozice částic. Z obrázku 4.14. je patrná závislost depoziční



rychlosti na rychlosti větru pro částice o velikosti 1  $\mu\text{m}$ , a to zvlášť pro listnaté druhy zastoupené javorem babykou a jehličnaté druhy zastoupené borovicí černou.

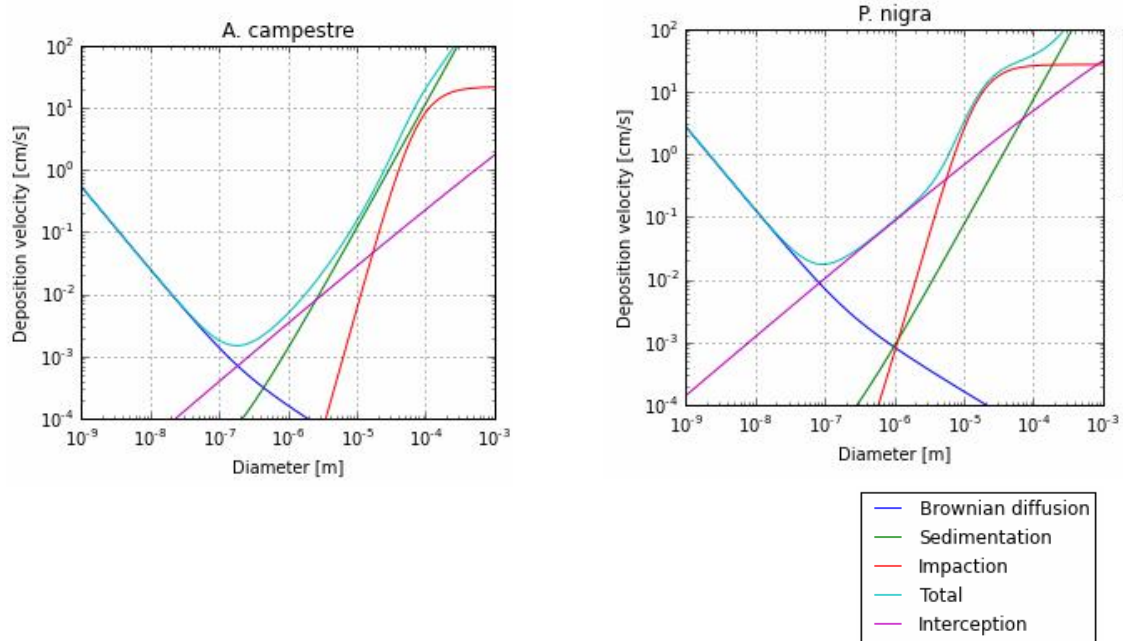
**Obr. 4.14. Závislost depoziční rychlosti částic  $\text{PM}_{10}$  na rychlosti větru – listnaté porosty (vlevo) a jehličnaté porosty (vpravo)**



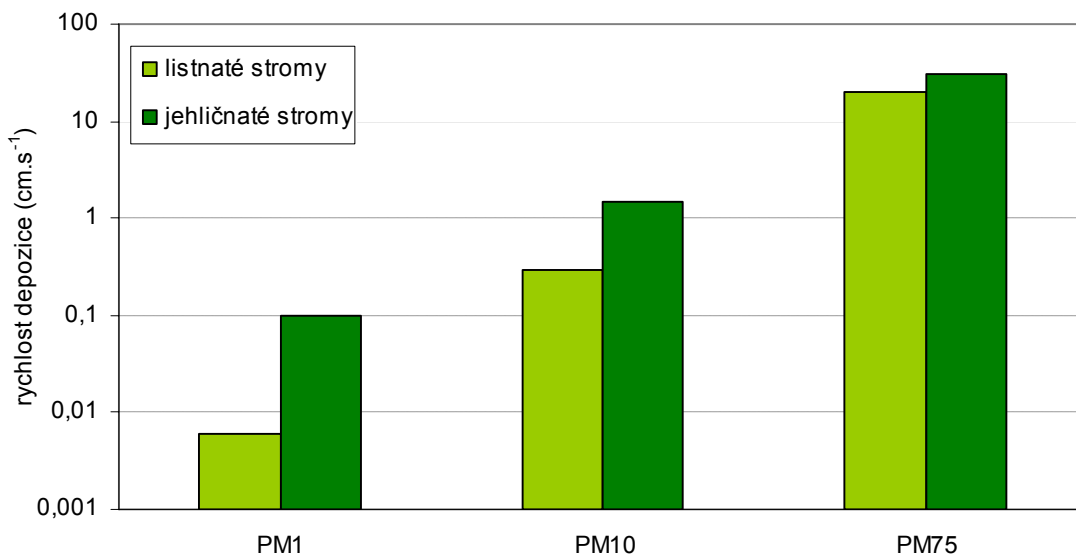
Uvedené výsledky byly porovnány se studií Beckett et al. (2000), ve které byl sledován účinek stejných druhů dřevin a velikosti částic 1  $\mu\text{m}$  (kap. 2.4.). Vzhledem k tomu, že Beckett et al. (2000) nezohledňuje ve výpočtu celou plochu listů, ale používá jen projekci na plochu kolmou na směr proudu, bylo nutné hodnoty uvedené ve studii Petroff et al. (2008b, 2009) kompenzovat přepočtem na základě parametru úhlového rozdělení ( $k_x$ ) pro zvolené plagiofilní rozložení listů, jehož hodnota je pro listnaté stromy rovna 0,216 a pro jehličnaté stromy rovna 0,27. Po této korekci z porovnání výsledků obou autorů vyplývá, že hodnoty rychlosti depozice částic pro modelované rychlosti větru do 3  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  se téměř shodují. Použitý CFD model se tedy ukázal jako vhodný pro aplikaci na řešený případ silnice s přílehlou vegetační bariérou složenou z listnatých a jehličnatých stromů i přesto, že vychází z předpokladů pro záchyt částic u různých druhů travin.

Dále byla porovnána rychlost depozice pro rychlost větru 1  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  v závislosti na velikosti částic  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{10}$  a  $\text{PM}_{75}$ , a to zvlášť pro listnaté druhy zastoupené javorem babykou a jehličnaté druhy zastoupené borovicí černou (Obr. 4.15. a 4.16.).

**Obr. 4.15. Závislost depoziční rychlosti na velikosti částic – listnaté porosty (vlevo) a jehličnaté porosty (vpravo)**



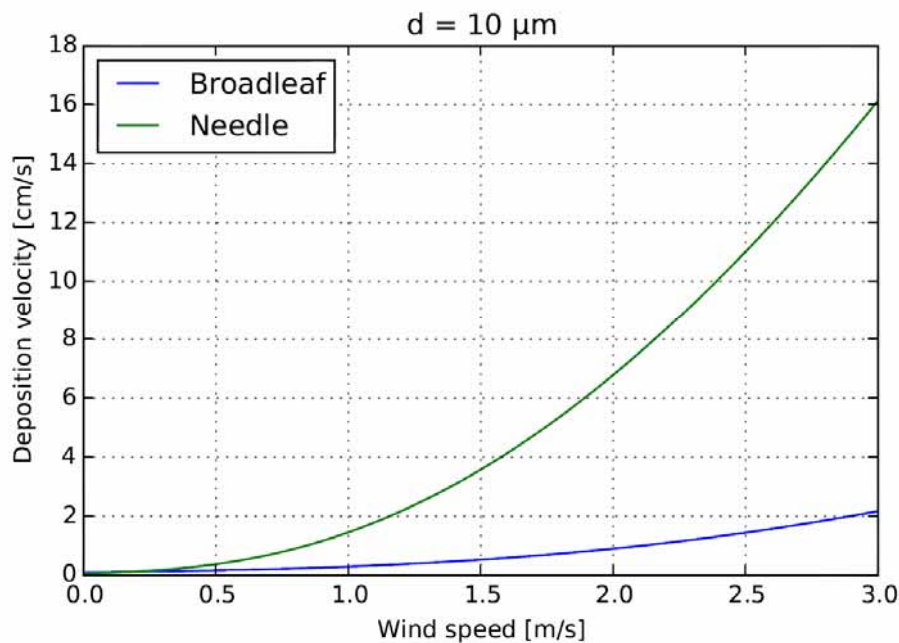
**Obr. 4.16. Porovnání rychlosti depozice částic PM<sub>1</sub>, PM<sub>10</sub> a PM<sub>75</sub> pro vegetační bariéry složené z listnatých / jehličnatých stromů**



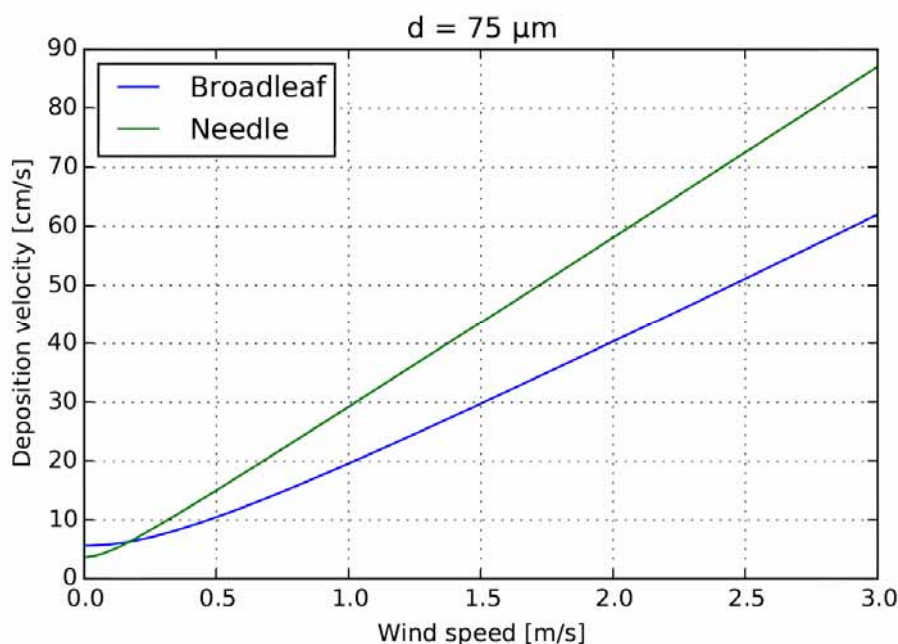
Z porovnání je patrné, že rychlost depozice narůstá se zvyšující se velikostí částic. Zároveň je zřejmé, že vyšší schopnost záchytu mají jehličnany oproti listnatým druhům dřevin. Výsledky jsou tedy rovněž v souladu s provedenou rešerší odborné literatury.

Porovnání schopnosti záchytu částic o velikosti 10 a 75  $\mu\text{m}$  je zřejmé i z obrázků 4.17. a 4.18., které vyjadřují závislost rychlosti depozice částic na rychlosti větru. Výsledky opět potvrzují závěry rešerše, kdy  $v_g$  narůstá s rychlostí nabíhajícího prodění vzduchu. Současně je patrné, že rozdíl v depoziční rychlosti listnatých a jehličnatých stromů se zvyšující se rychlostí výrazně roste pro částice  $\text{PM}_{10}$  oproti částicím  $\text{PM}_{75}$ .

**Obr. 4.17. Porovnání závislosti depoziční rychlosti a rychlosti větru pro vegetační bariéry složené z listnatých a jehličnatých stromů – částice o velikosti 10  $\mu\text{m}$**



**Obr. 4.18. Porovnání závislosti depoziční rychlosti a rychlosti větru pro vegetační bariéry složené z listnatých a jehličnatých stromů – částice o velikosti 75  $\mu\text{m}$**



#### 4.5. VÝSLEDKY MODELOVÝCH VÝPOČTŮ

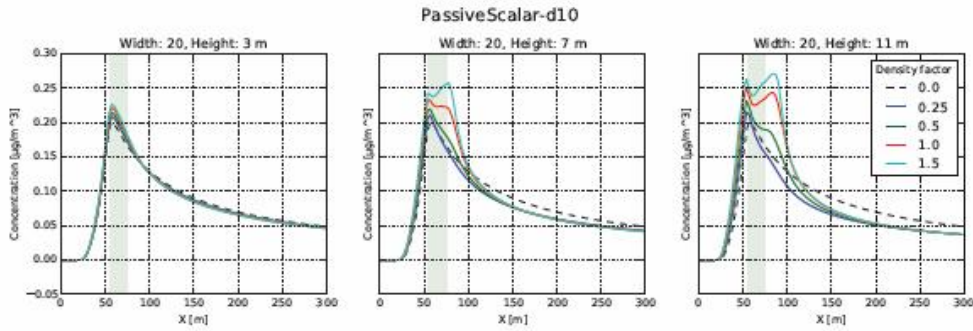
Výsledky modelových výpočtů jsou prezentovány v referenční hladině 3 m pro kombinace výšky ( $H = 3, 7$  a  $11$  m), šířky ( $W = 20, 50, 80, 110$  a  $140$  m) a hustoty ( $D = 0; 0,25; 0,5; 1,0$  a  $1,5$ ) vegetační bariéry složené z **listnatých stromů**, a to na následujících grafech:

- průběh koncentrací částic  $\text{PM}_{10}$  se vzdáleností od komunikace (Obr. 4.19.)
- průběh koncentrací částic  $\text{PM}_{75}$  se vzdáleností od komunikace (Obr. 4.20.)

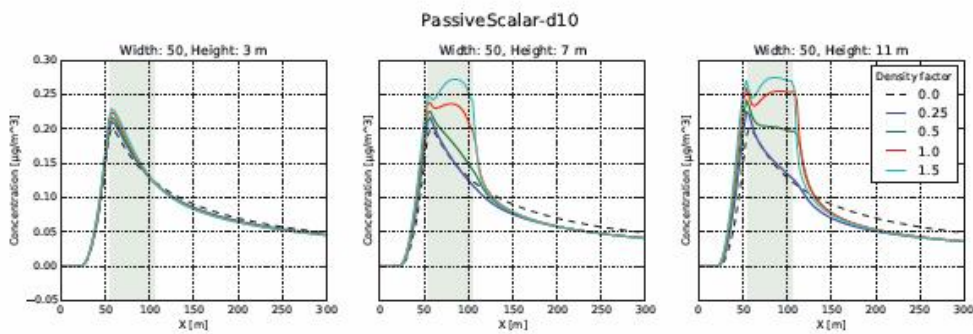
Výsledky modelových výpočtů jsou prezentovány v referenční hladině 3 m pro kombinace výšky ( $H = 3, 7$  a  $11$  m), šířky ( $W = 20$  a  $80$  m) a hustoty ( $D = 0$  a  $1,0$ ) vegetační bariéry složené z **jehličnatých stromů**, a to na následujících grafech:

- průběh koncentrací částic  $\text{PM}_{10}$  se vzdáleností od komunikace (Obr. 4.21.)
- průběh koncentrací částic  $\text{PM}_{75}$  se vzdáleností od komunikace (Obr. 4.22.)

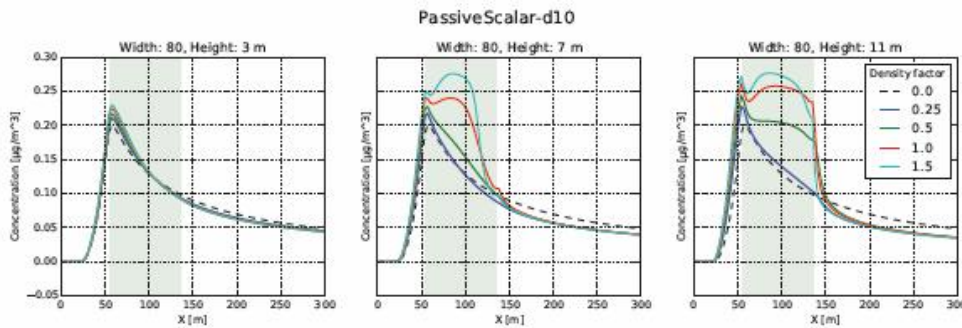
Obr. 4.19. Průběh koncentrací částic PM<sub>10</sub> od silnice – listnaté stromy, referenční hl. 3 m



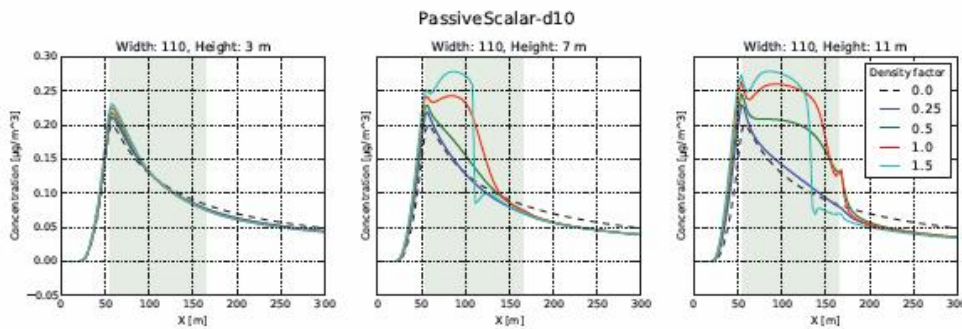
k 11: Průběh koncentrace ve 3 m nad zemí. Sada D, poloměr částic  $d = 10 \mu\text{m}$ , šířka vegetace 20 m.



k 12: Průběh koncentrace ve 3 m nad zemí. Sada D, poloměr částic  $d = 10 \mu\text{m}$ , šířka vegetace 50 m.

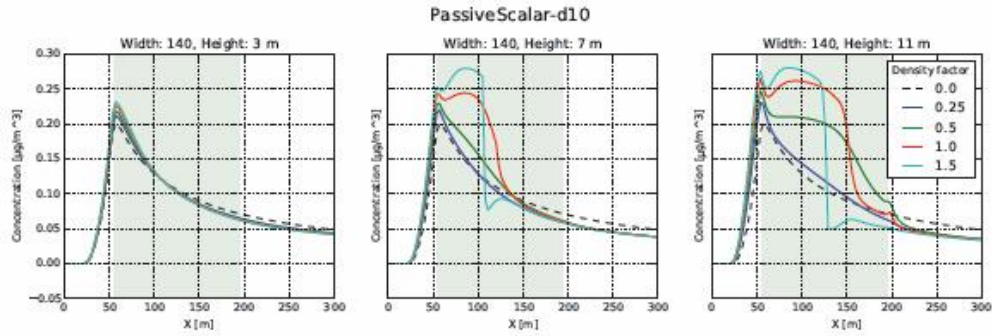


ek 13: Průběh koncentrace ve 3 m nad zemí. Sada D, poloměr částic  $d = 10 \mu\text{m}$ , šířka vegetace 80 m.



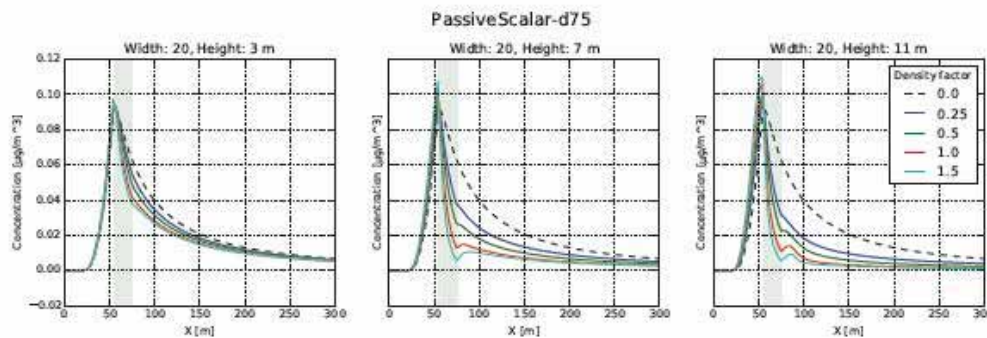
ok 14: Průběh koncentrace ve 3 m nad zemí. Sada D, poloměr částic  $d = 10 \mu\text{m}$ , šířka vegetace 110 m.



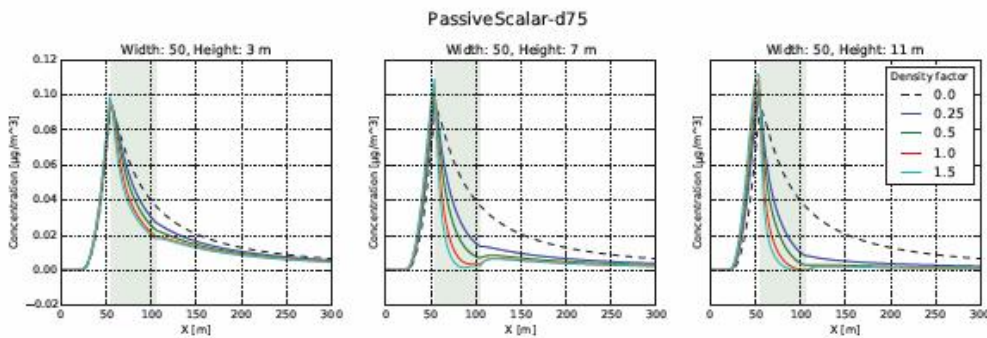


15: Průběh koncentrace ve 3 m nad zemí. Sada D, poloměr částic  $d = 10 \mu\text{m}$ , šířka vegetace 140 m.

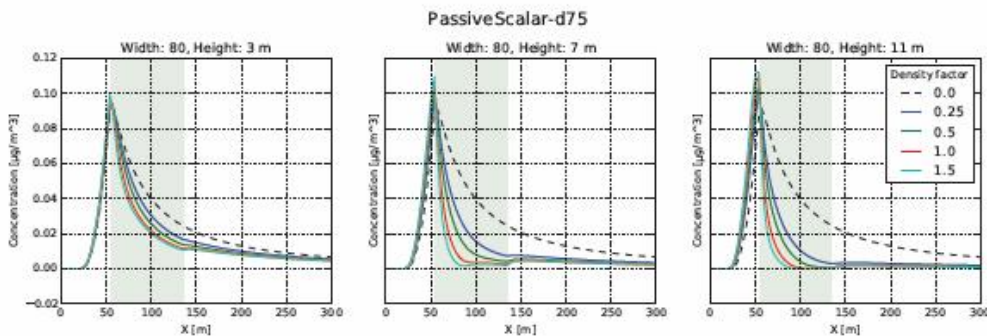
Obr. 4.20. Průběh koncentrací částic  $\text{PM}_{75}$  od silnice – listnaté stromy, referenční hl. 3 m



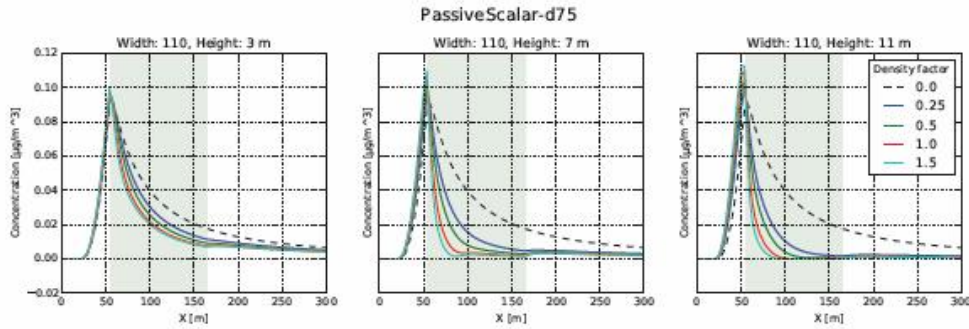
16: Průběh koncentrace ve 3 m nad zemí. Sada D, poloměr částic  $d = 75 \mu\text{m}$ , šířka vegetace 20 m.



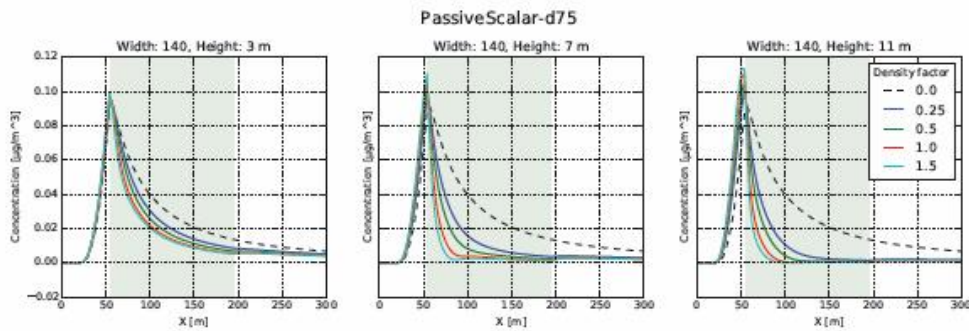
17: Průběh koncentrace ve 3 m nad zemí. Sada D, poloměr částic  $d = 75 \mu\text{m}$ , šířka vegetace 50 m.



18: Průběh koncentrace ve 3 m nad zemí. Sada D, poloměr částic  $d = 75 \mu\text{m}$ , šířka vegetace 80 m.

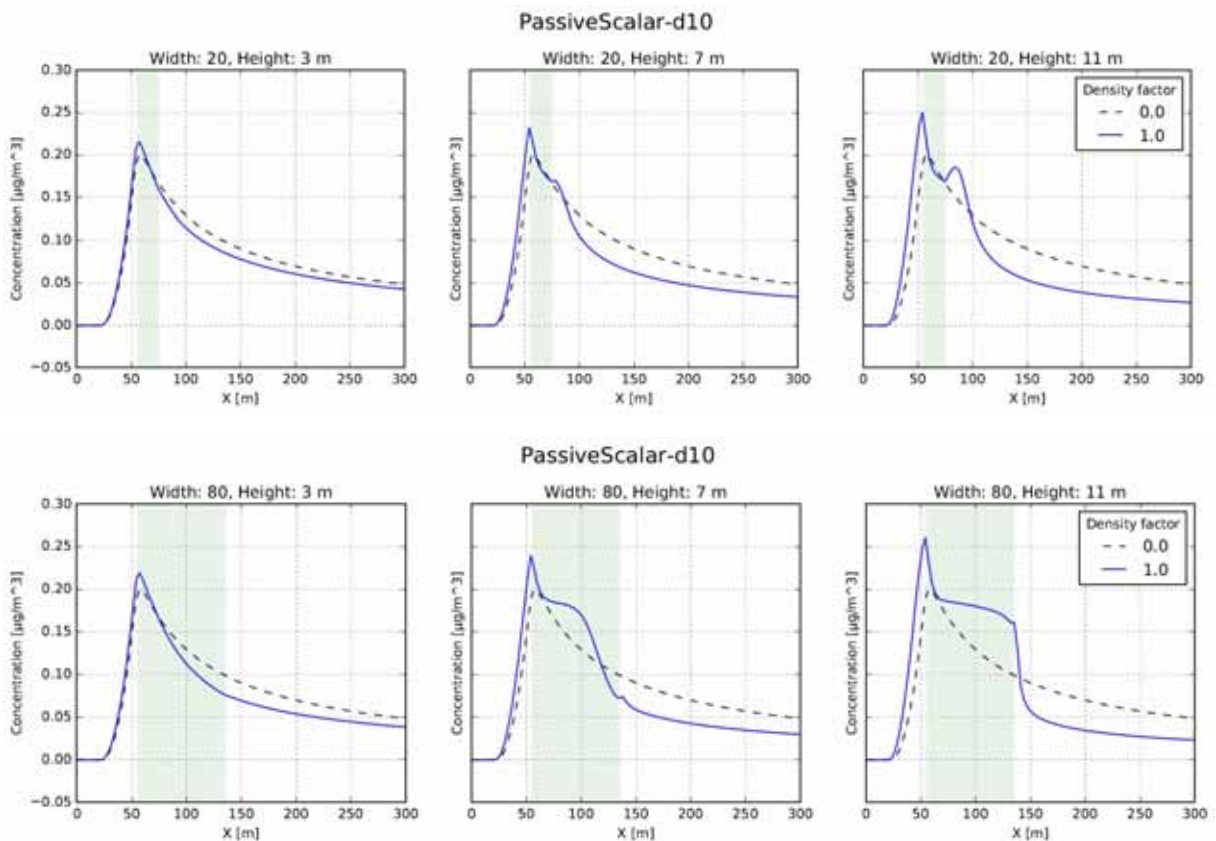


k 19: Průběh koncentrace ve 3 m nad zemí. Sada D, poloměr částic  $d = 75 \mu\text{m}$ , šířka vegetace 110 m.



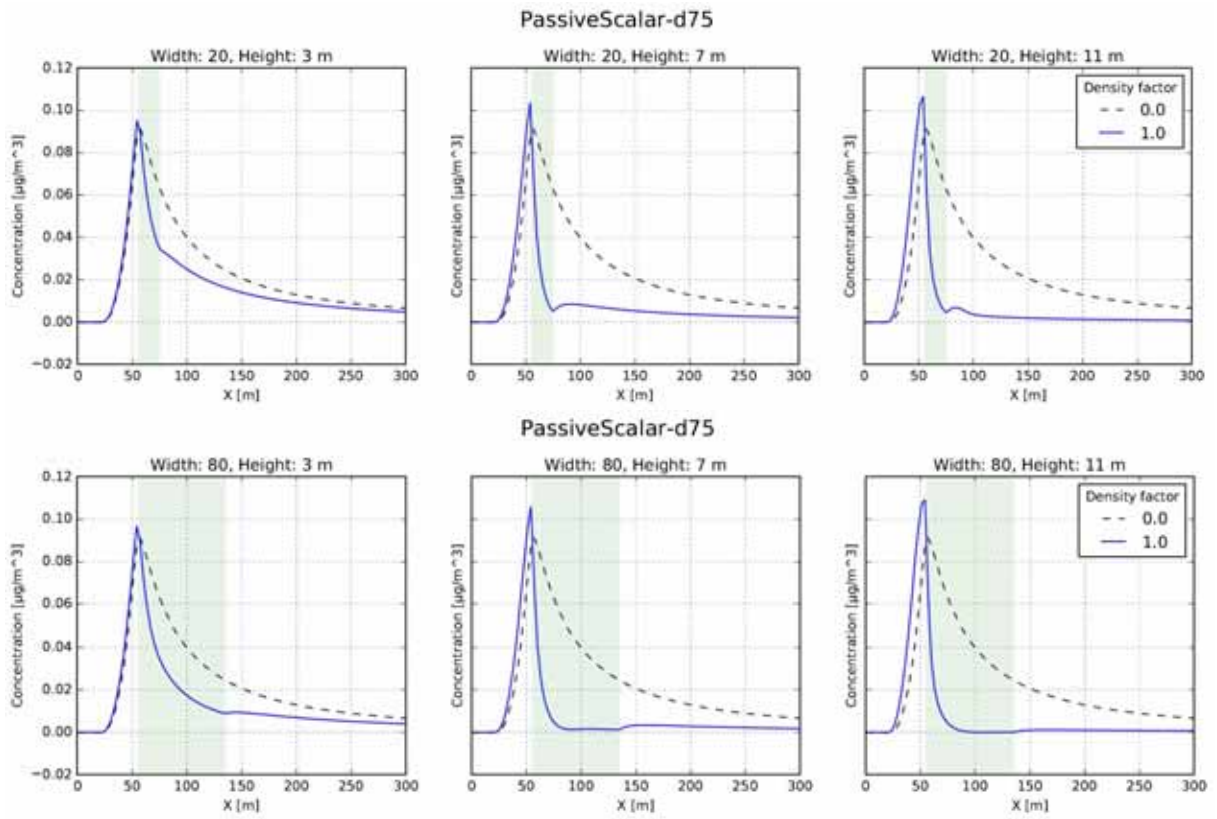
k 20: Průběh koncentrace ve 3 m nad zemí. Sada D, poloměr částic  $d = 75 \mu\text{m}$ , šířka vegetace 140 m.

Obr. 4.21. Průběh koncentrací částic  $\text{PM}_{10}$  od silnice – jehličnaté stromy, ref. hl. 3 m





Obr. 4.22. Průběh koncentrací částic PM<sub>75</sub> od silnice – jehličnaté stromy, ref. hl. 3 m



## 4.6. ZPRACOVÁNÍ VÝSTUPŮ MODELOVÝCH VÝPOČTŮ

Výsledky modelových výpočtů, které udávají rozložení koncentrací ve 2D řezu do vzdálenosti 250 metrů od hranice komunikace a do výšky 100 metrů, byly exportovány pomocí programu Paraview a vyneseny pro následující výškové receptorové hladiny:

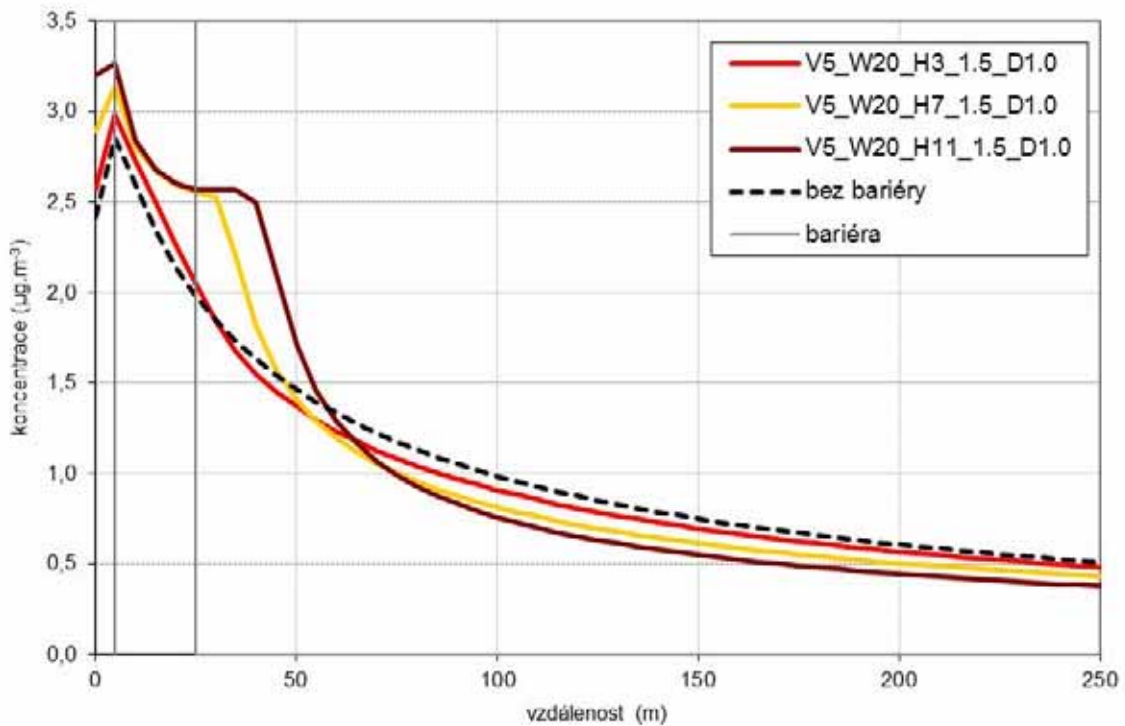
- 1,5 metru – respirační zóna pro venkovní pobyt
- 3 metry – výška oken v 1. patře domů
- 6 metrů – výška oken ve 2. patře domů

### 4.6.1 Grafické výstupy – listnaté stromy

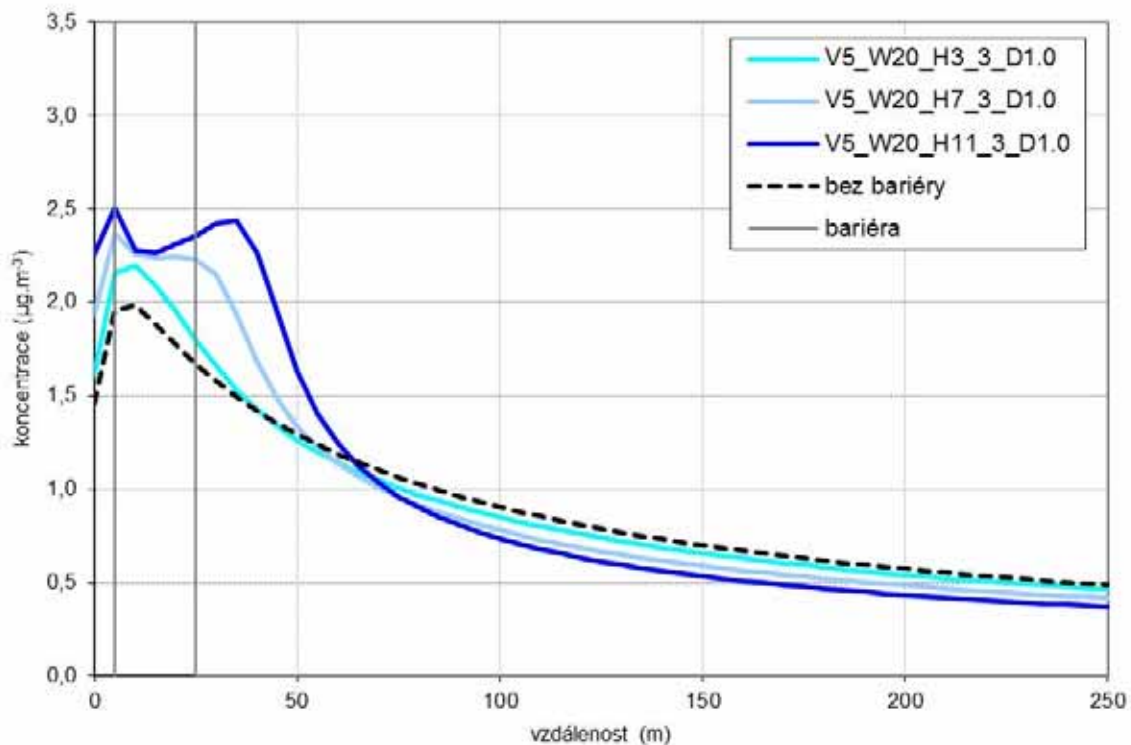
Zpracované výsledky modelování pro kombinace výšky (3, 7 a 11 m) a šířky (20, 50, 80, 110 a 140 m) vegetační bariéry o hustotě  $D = 1$  složené z **listnatých stromů** a varianty referenční hladiny (1,5; 3 a 6 m) prezentují následující grafy:

- průběh koncentrací částic  $PM_{10}$  se vzdáleností od komunikace (Obr. 4.23. – 4.37.)
- průběh účinnosti bariéry vůči znečištění  $PM_{10}$  – vyjádřené jako procentuelní snížení koncentrací částic ve stavu s bariérou v porovnání se stavem bez bariéry (tj. bez bariéry = 100 %) – se vzdáleností od komunikace (Obr. 4.38. – 4.44.)
- hodnoty koncentrací částic  $PM_{10}$  ve vzdálenosti 200 m od hranice komunikace (Obr. 4.45. – 4.47.) % snížení koncentrací částic  $PM_{10}$  ve vzdálenosti 200 m od hranice komunikace (Obr. 4.48. – 4.50.)
- průběh koncentrací částic  $PM_{75}$  se vzdáleností od komunikace (Obr. 4.51. – 4.65.)
- průběh účinnosti bariéry vůči znečištění  $PM_{75}$  – vyjádřené jako procentuelní snížení koncentrací částic ve stavu s bariérou v porovnání se stavem bez bariéry (tj. bez bariéry = 100 %) – se vzdáleností od komunikace (Obr. 4.66. – 4.72.)
- hodnoty koncentrací částic  $PM_{75}$  ve vzdálenosti 200 m od hranice komunikace (Obr. 4.73. – 4.75.) % snížení koncentrací částic  $PM_{75}$  ve vzdálenosti 200 m od hranice komunikace (Obr. 4.76. – 4.78.)

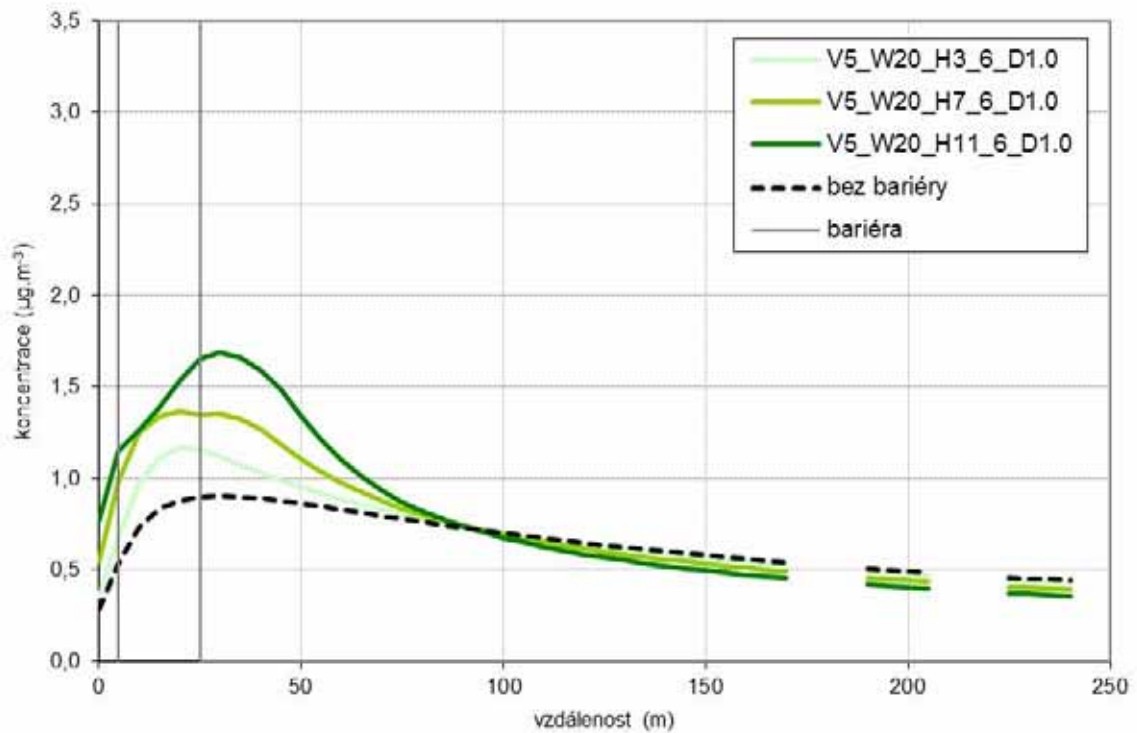
**Obr. 4.23. Průběh koncentrací částic PM<sub>10</sub> od silnice pro hustotu bariéry D = 1, šířku bariéry W = 20 m a různé výšky bariéry H = 3, 7 a 11 m, referenční hl. 1,5 m**



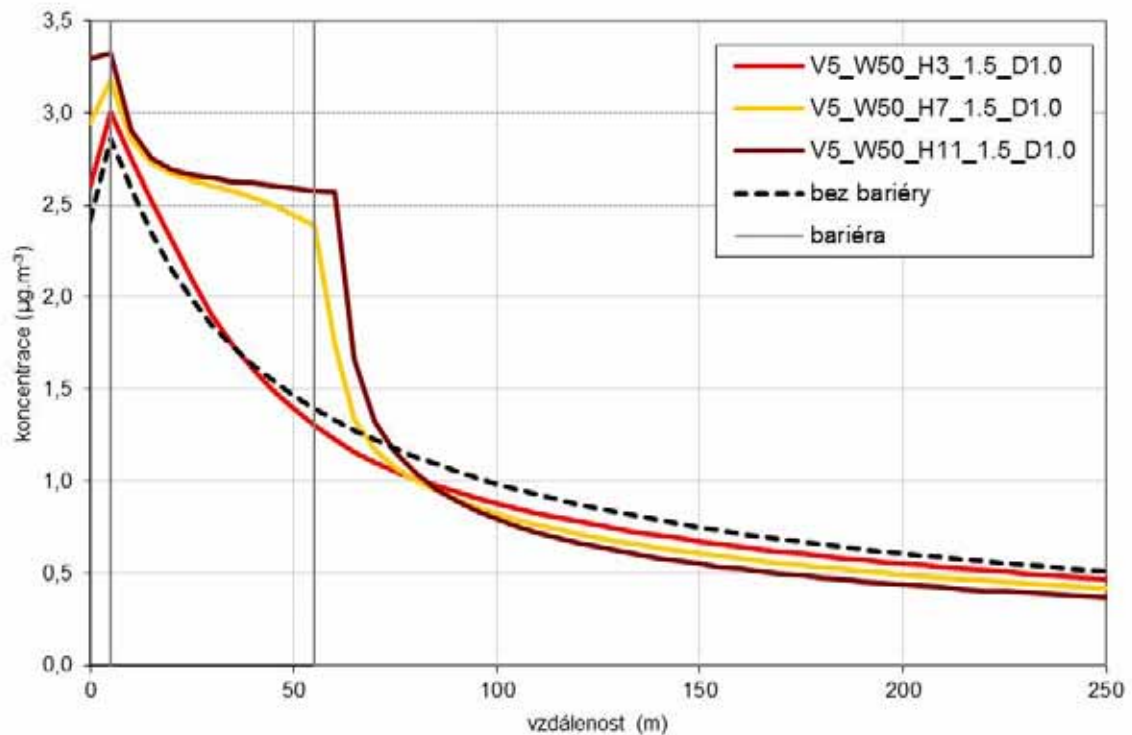
**Obr. 4.24. Průběh koncentrací částic PM<sub>10</sub> od silnice pro hustotu bariéry D = 1, šířku bariéry W = 20 m a různé výšky bariéry H = 3, 7 a 11 m, referenční hl. 3 m**



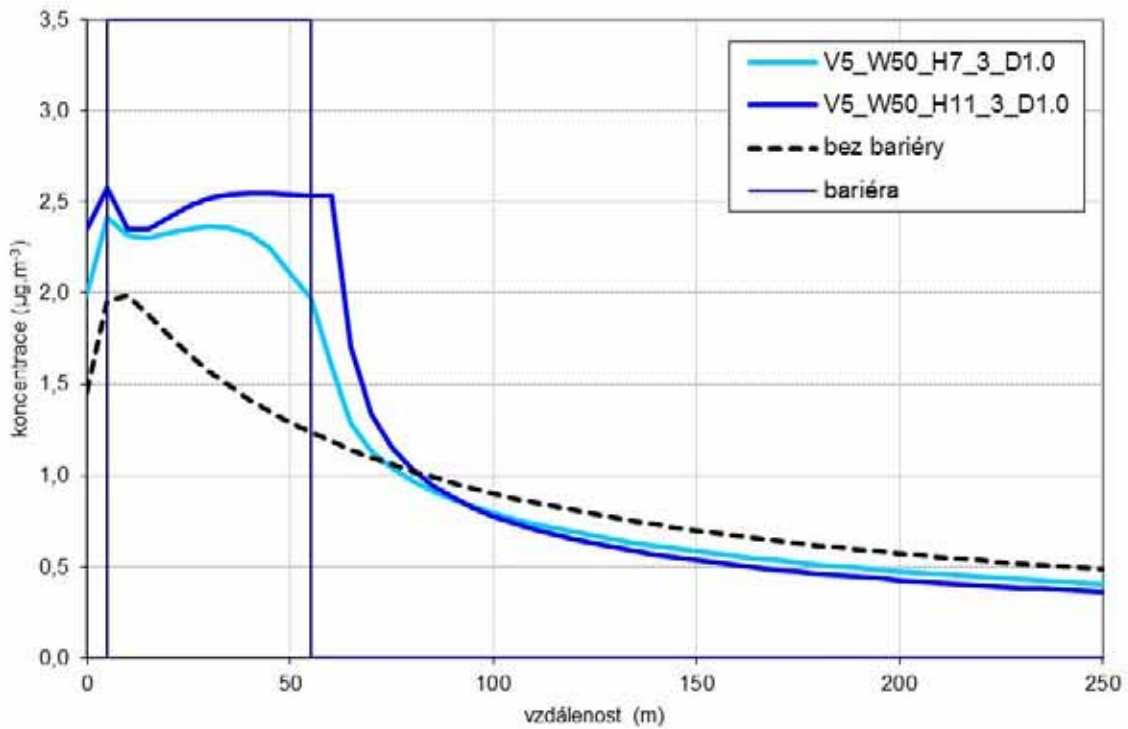
**Obr. 4.25. Průběh koncentrací částic PM<sub>10</sub> od silnice pro hustotu bariéry D = 1, šířku bariéry W = 20 m a různé výšky bariéry H = 3, 7 a 11 m, referenční hl. 6 m**



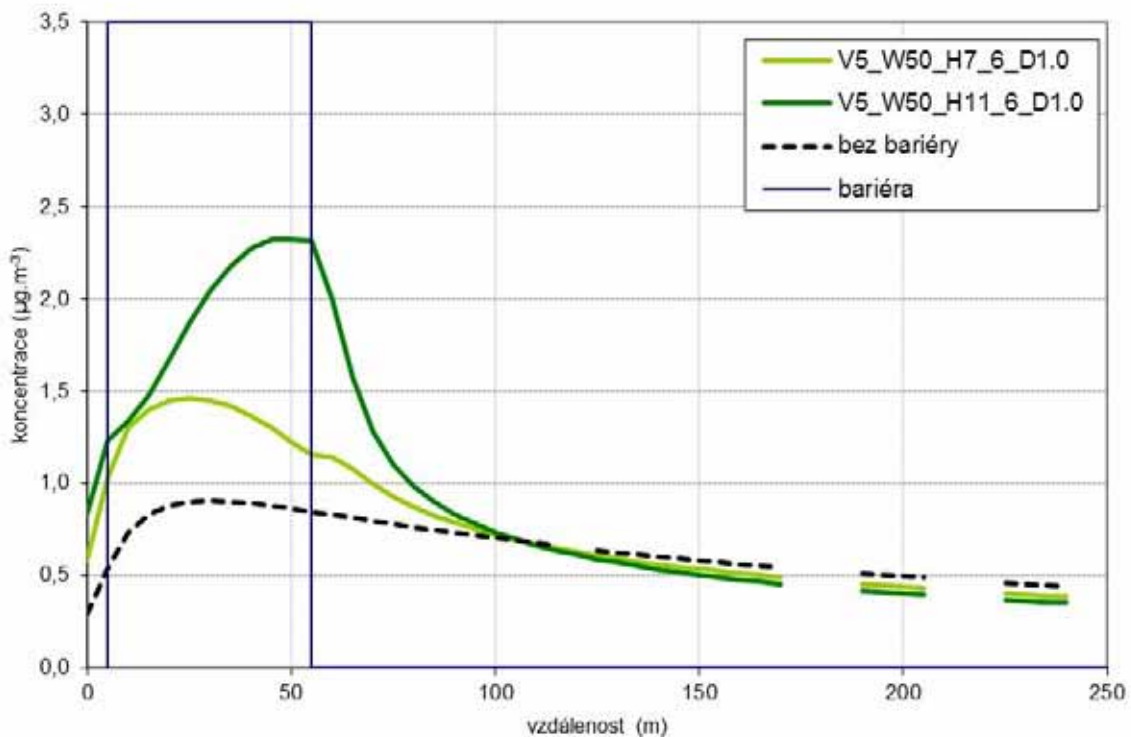
**Obr. 4.26. Průběh koncentrací částic PM<sub>10</sub> od silnice pro hustotu bariéry D = 1, šířku bariéry W = 50 m a různé výšky bariéry H = 3, 7 a 11 m, referenční hl. 1,5 m**



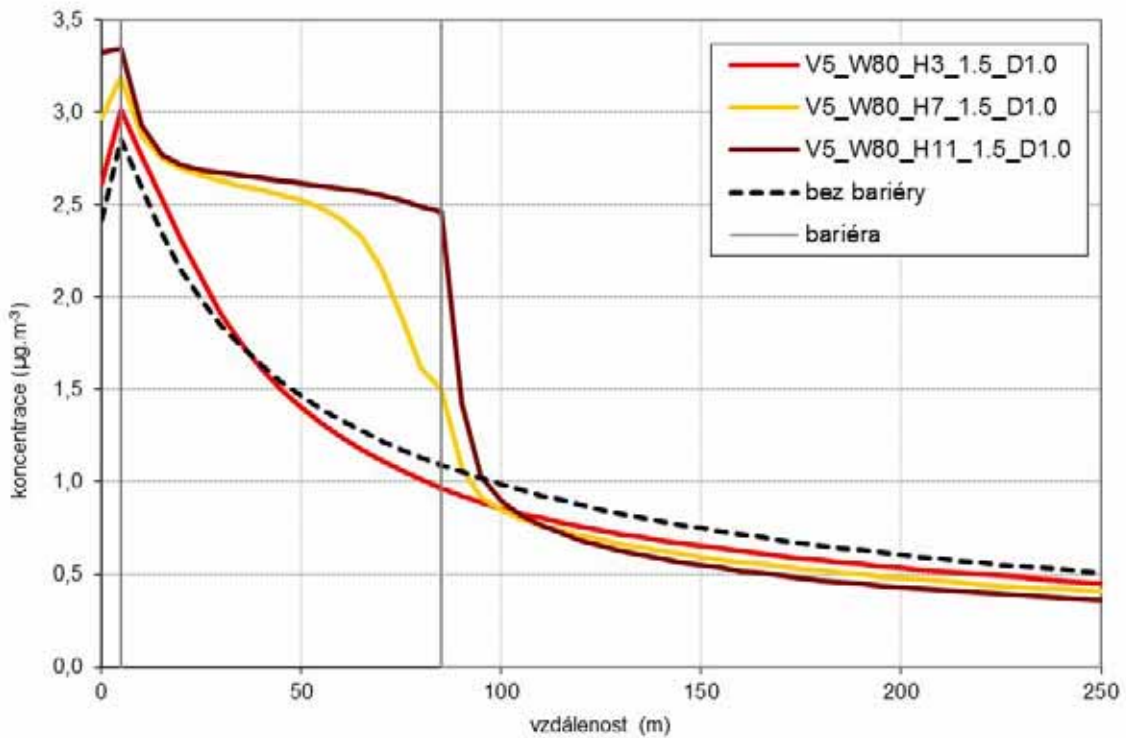
Obr. 4.27. Průběh koncentrací částic PM<sub>10</sub> od silnice pro hustotu bariéry D = 1, šířku bariéry W = 50 m a různé výšky bariéry H = 3, 7 a 11 m, referenční hl. 3 m



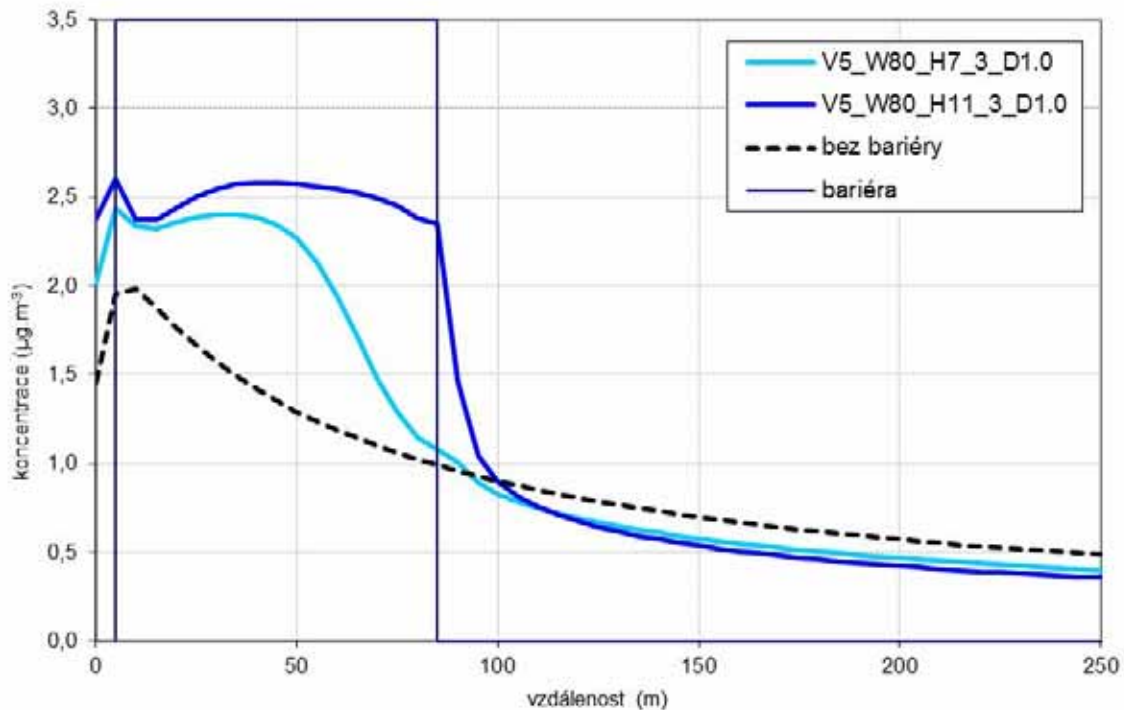
Obr. 4.28. Průběh koncentrací částic PM<sub>10</sub> od silnice pro hustotu bariéry D = 1, šířku bariéry W = 50 m a různé výšky bariéry H = 3, 7 a 11 m, referenční hl. 6 m



Obr. 4.29. Průběh koncentrací částic PM<sub>10</sub> od silnice pro hustotu bariéry D = 1, šířku bariéry W = 80 m a různé výšky bariéry H = 3, 7 a 11 m, referenční hl. 1,5 m

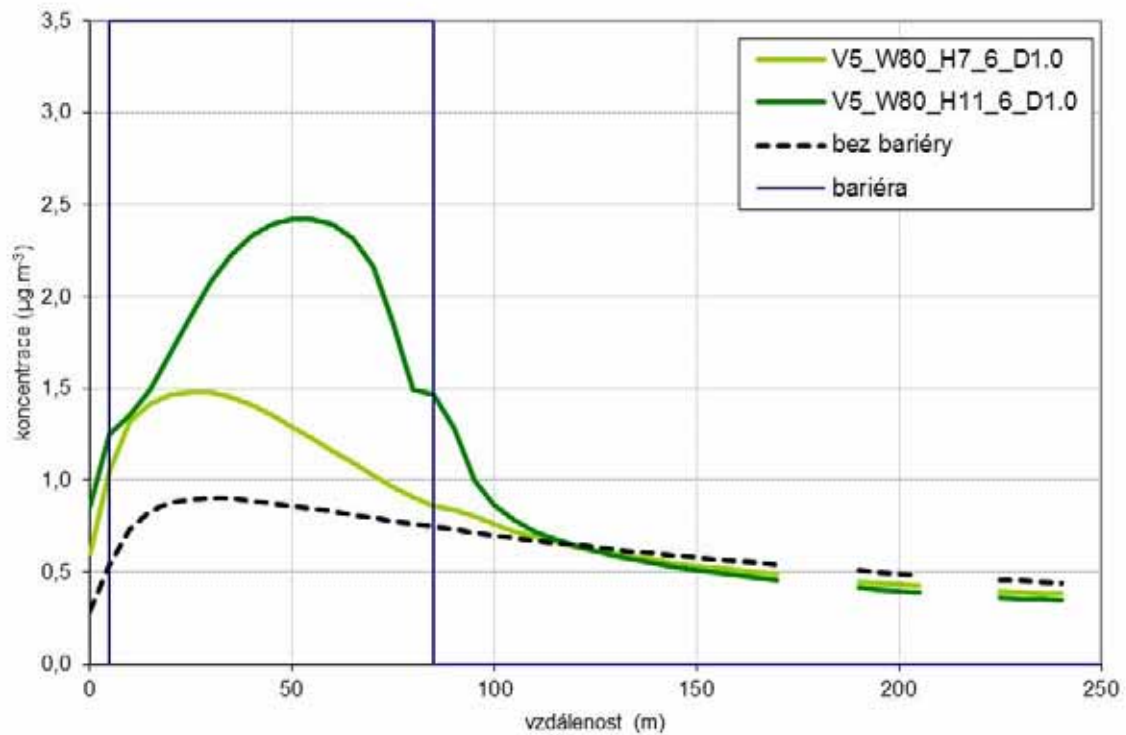


Obr. 4.30. Průběh koncentrací částic PM<sub>10</sub> od silnice pro hustotu bariéry D = 1, šířku bariéry W = 80 m a různé výšky bariéry H = 3, 7 a 11 m, referenční hl. 3 m

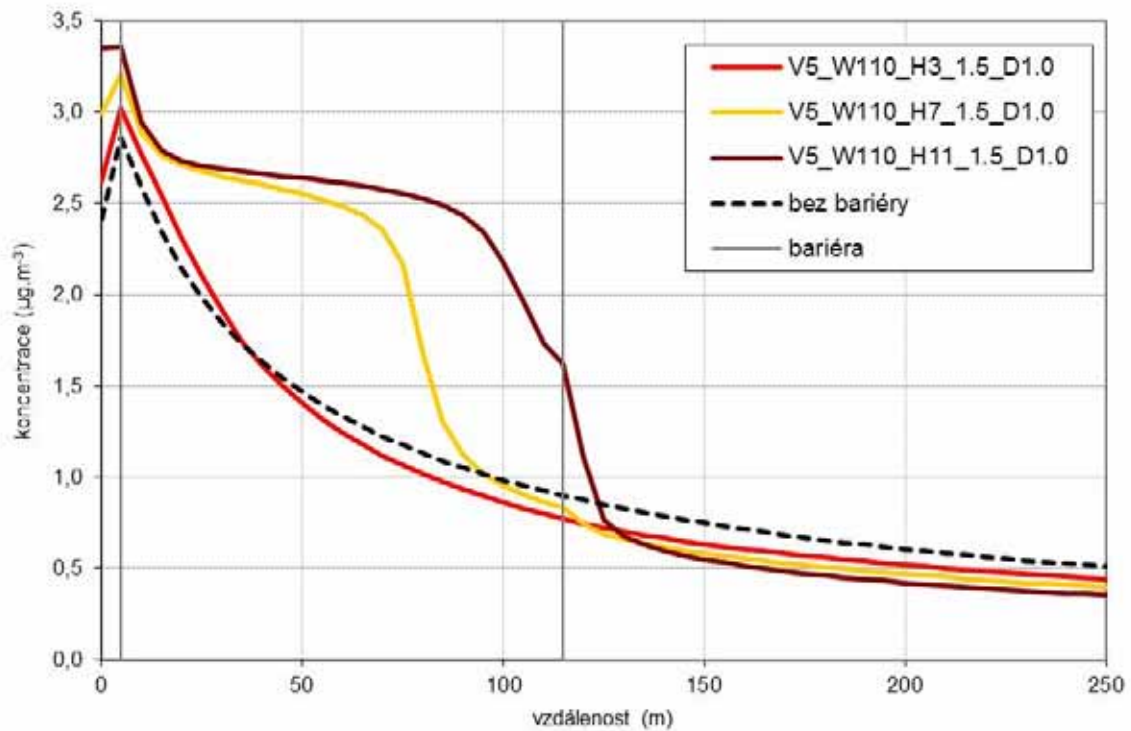




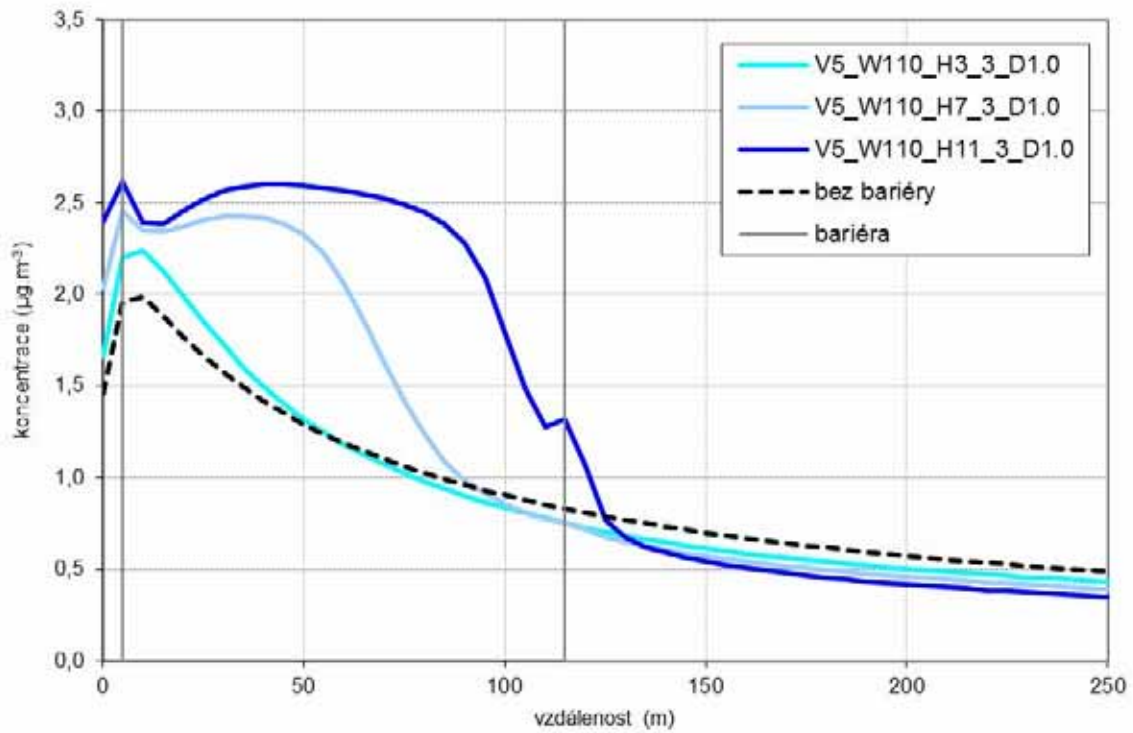
**Obr. 4.31. Průběh koncentrací částic PM<sub>10</sub> od silnice pro hustotu bariéry D = 1, šířku bariéry W = 80 m a různé výšky bariéry H = 3, 7 a 11 m, referenční hl. 6 m**



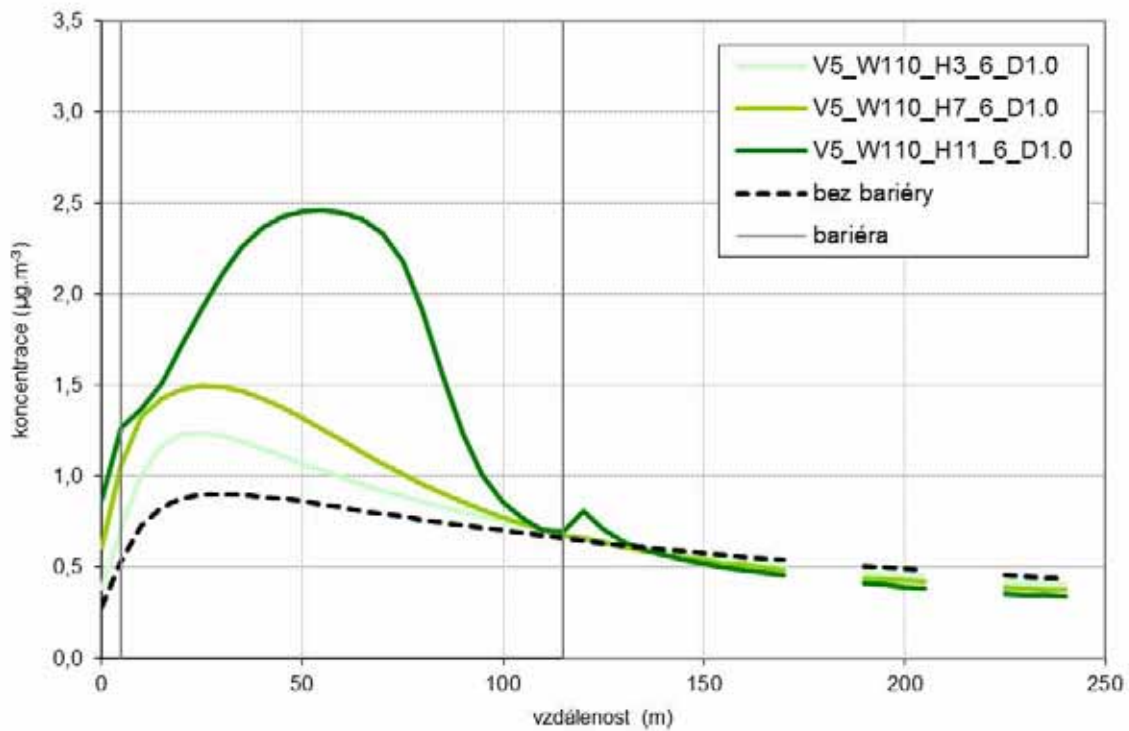
**Obr. 4.32. Průběh koncentrací částic PM<sub>10</sub> od silnice pro hustotu bariéry D = 1, šířku bariéry W = 110 m a různé výšky bariéry H = 3, 7 a 11 m, referenční hl. 1,5 m**



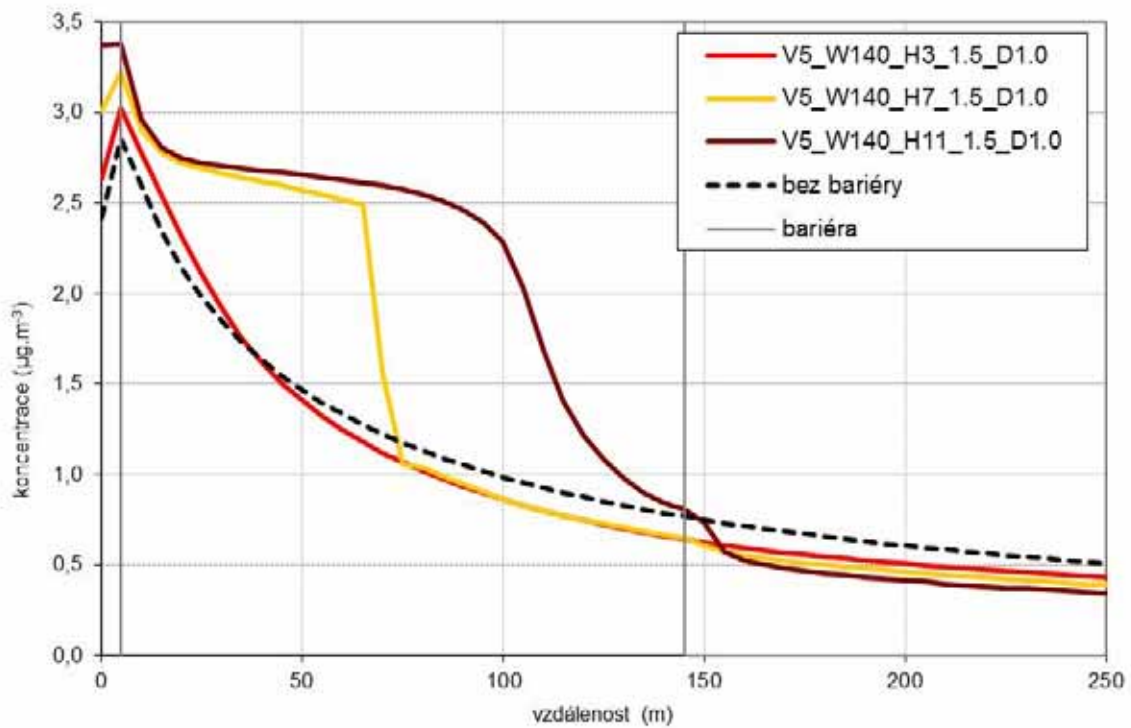
Obr. 4.33. Průběh koncentrací částic PM<sub>10</sub> od silnice pro hustotu bariéry D = 1, šířku bariéry W = 110 m a různé výšky bariéry H = 3, 7 a 11 m, referenční hl. 3 m



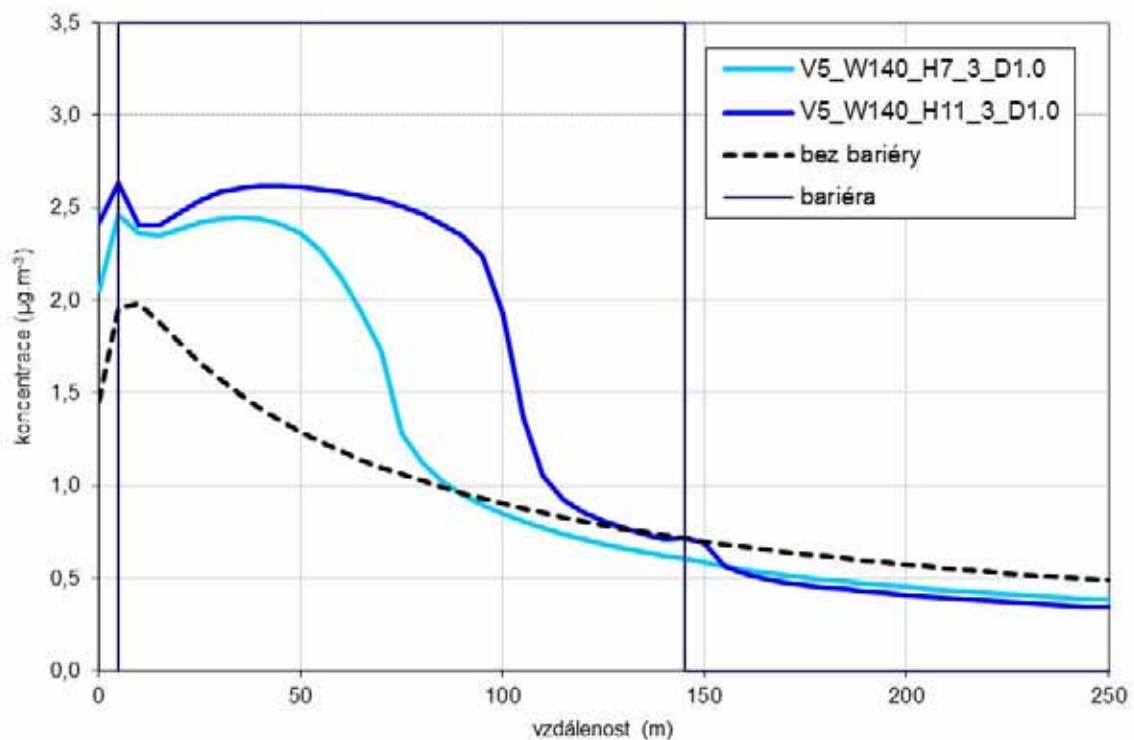
Obr. 4.34. Průběh koncentrací částic PM<sub>10</sub> od silnice pro hustotu bariéry D = 1, šířku bariéry W = 110 m a různé výšky bariéry H = 3, 7 a 11 m, referenční hl. 6 m



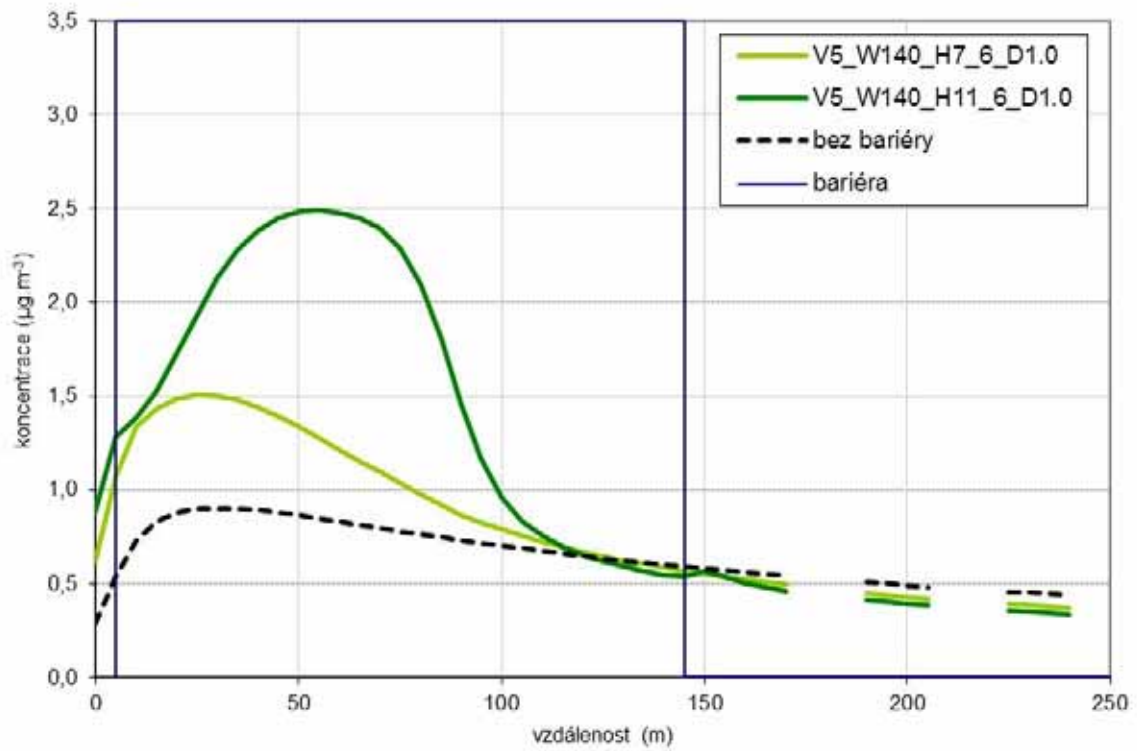
Obr. 4.35. Průběh koncentrací částic  $PM_{10}$  od silnice pro hustotu bariéry  $D = 1$ , šířku bariéry  $W = 140$  m a různé výšky bariéry  $H = 3, 7$  a  $11$  m, referenční hl.  $1,5$  m



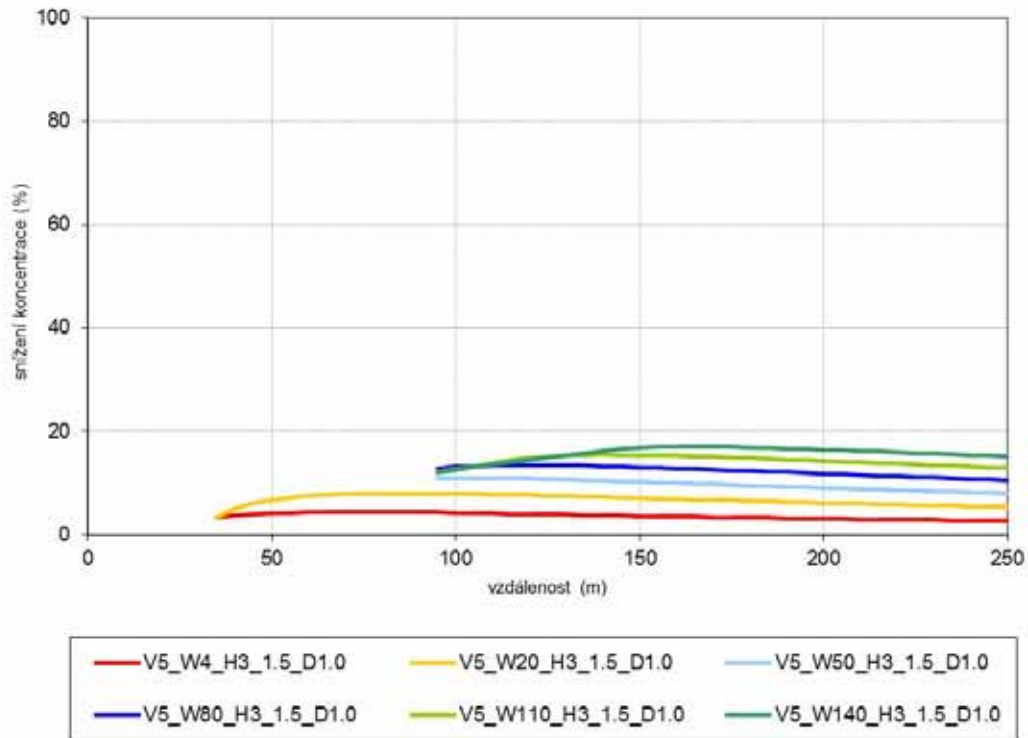
Obr. 4.36. Průběh koncentrací částic  $PM_{10}$  od silnice pro hustotu bariéry  $D = 1$ , šířku bariéry  $W = 140$  m a různé výšky bariéry  $H = 3, 7$  a  $11$  m, referenční hl.  $3$  m



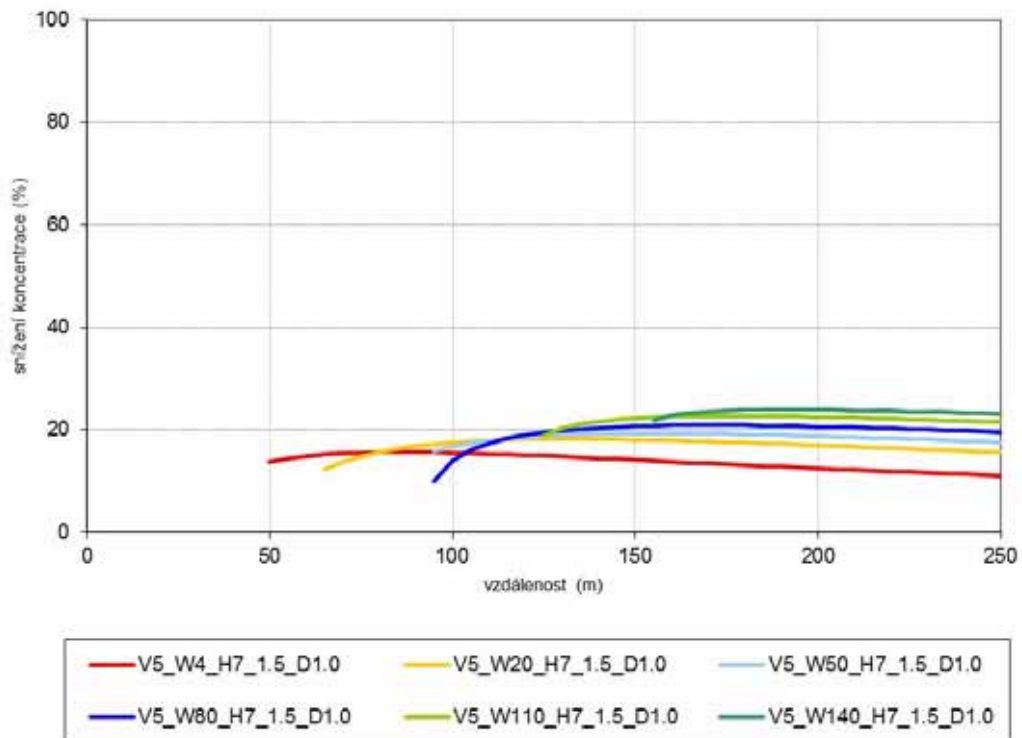
**Obr. 4.37. Průběh koncentrací částic PM<sub>10</sub> od silnice pro hustotu bariéry D = 1, šířku bariéry W = 140 m a různé výšky bariéry H = 3, 7 a 11 m, referenční hl. 6 m**



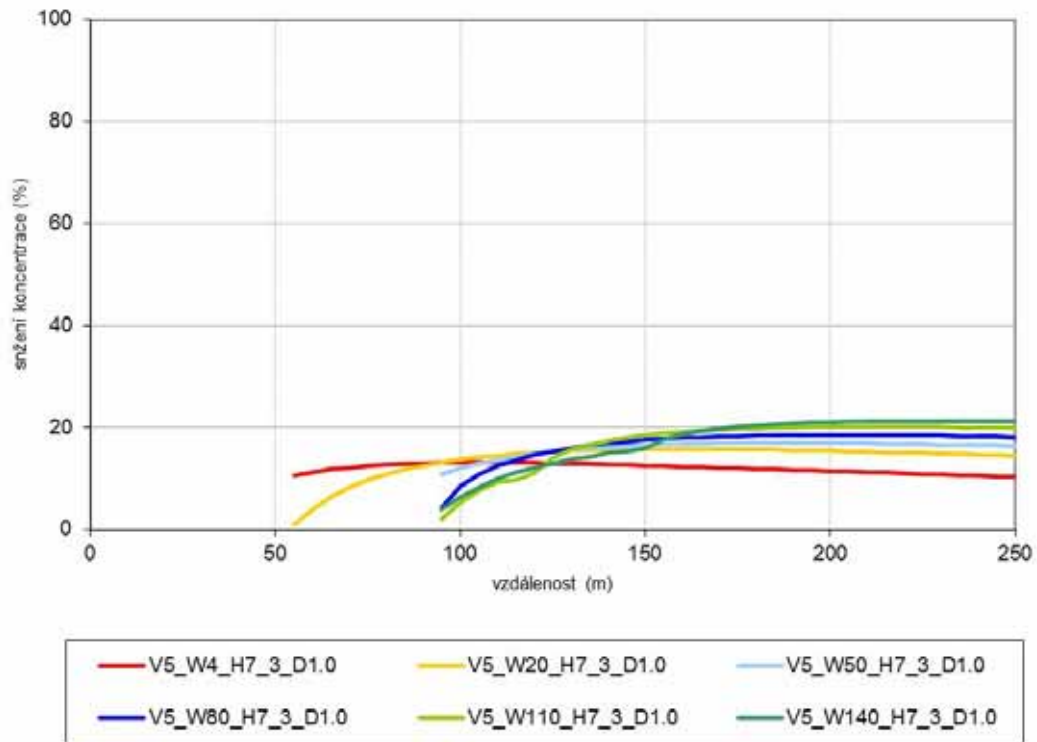
**Obr. 4.38. Průběh snížení koncentrací částic PM<sub>10</sub> se vzdáleností od silnice vlivem šířky bariéry (W), výška bariéry H = 3 m, hustota D = 1, referenční hl. 1,5 m**



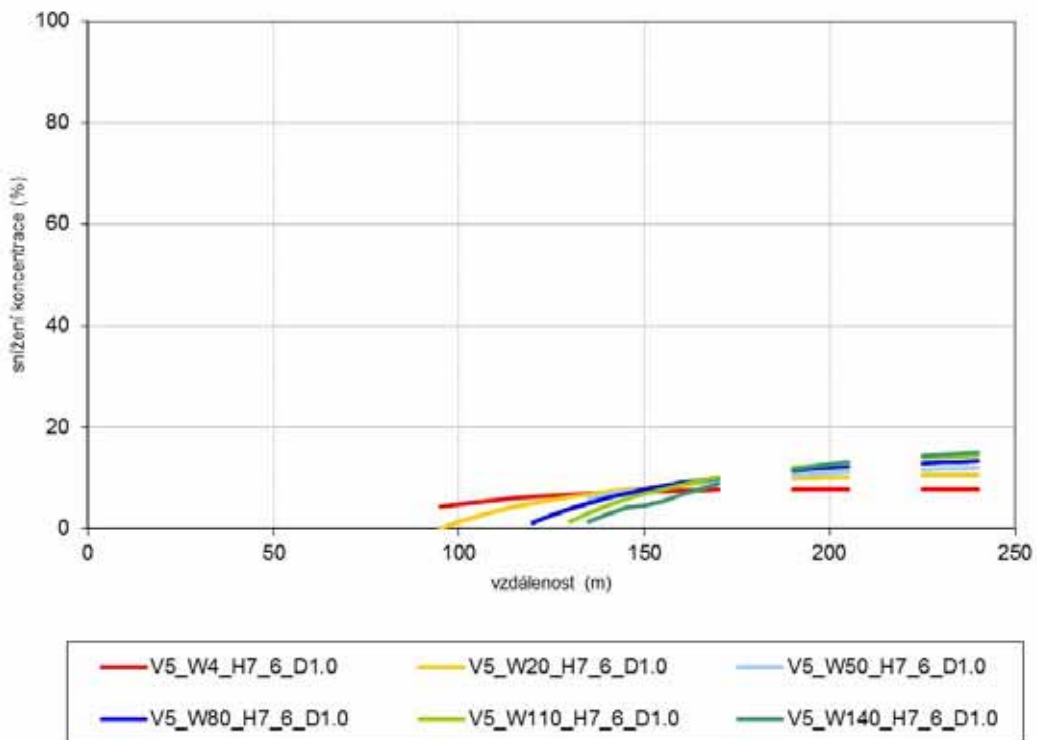
**Obr. 4.39. Průběh snížení koncentrací částic PM<sub>10</sub> se vzdáleností od silnice vlivem šířky bariéry (W), výška bariéry H = 7 m, hustota D = 1, referenční hl. 1,5 m**



**Obr. 4.40. Průběh snížení koncentrací částic PM<sub>10</sub> se vzdáleností od silnice vlivem šířky bariéry (W), výška bariéry H = 7 m, hustota D = 1, referenční hl. 3 m**

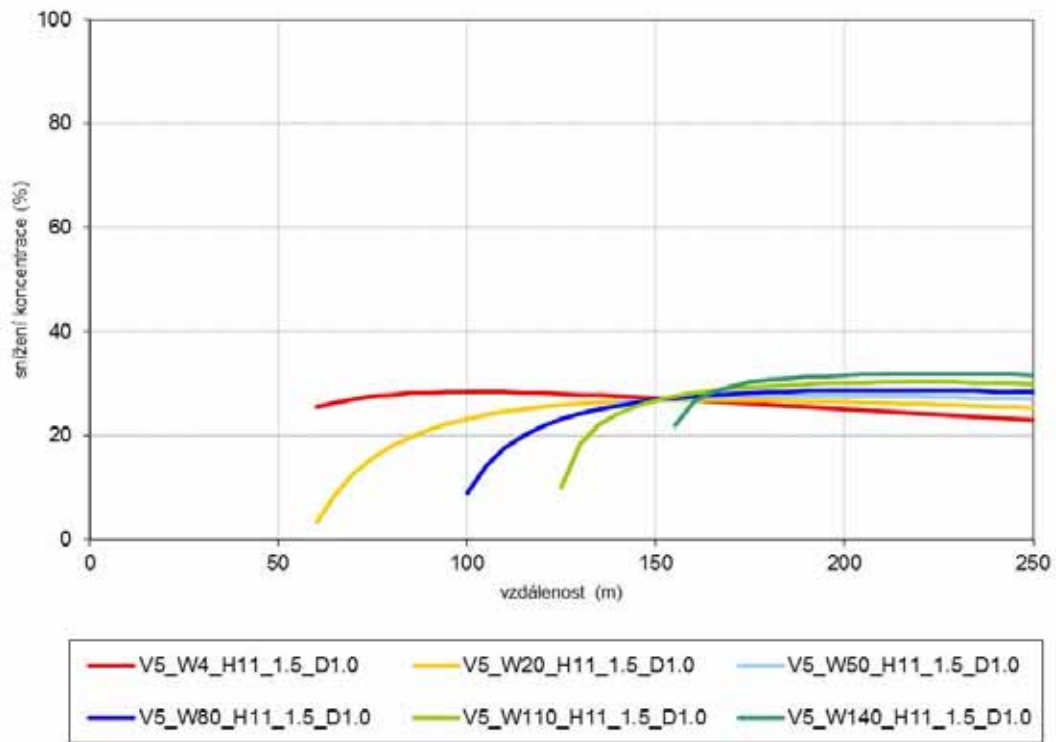


**Obr. 4.41. Průběh snížení koncentrací částic PM<sub>10</sub> se vzdáleností od silnice vlivem šířky bariéry (W), výška bariéry H = 7 m, hustota D = 1, referenční hl. 6 m**

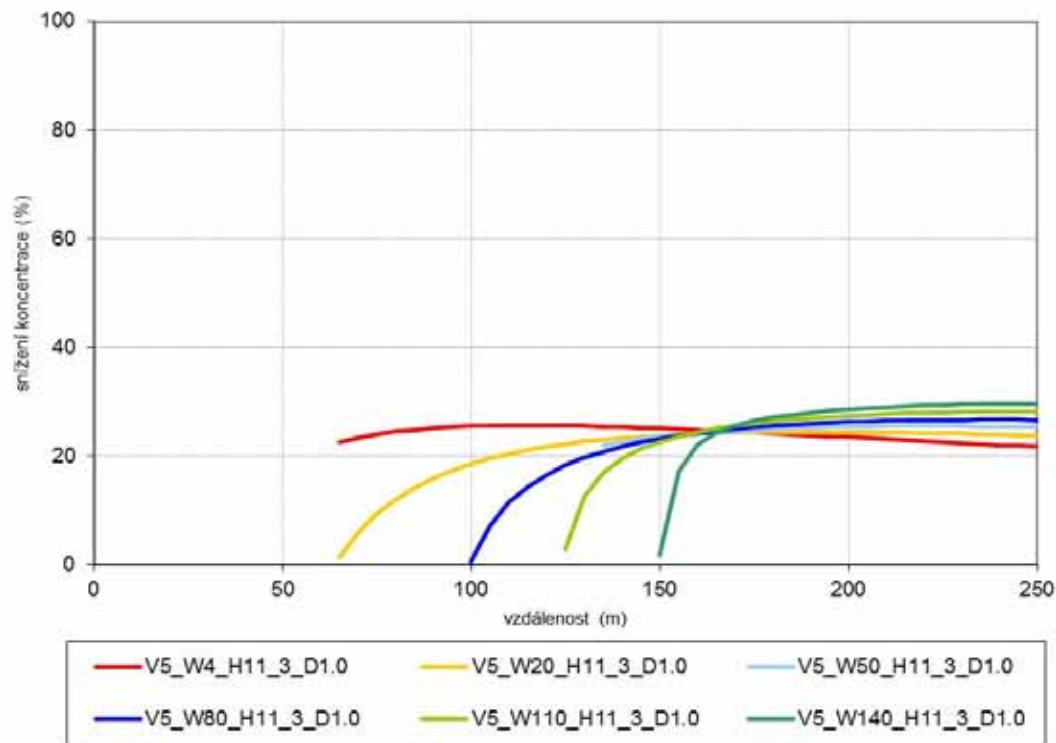




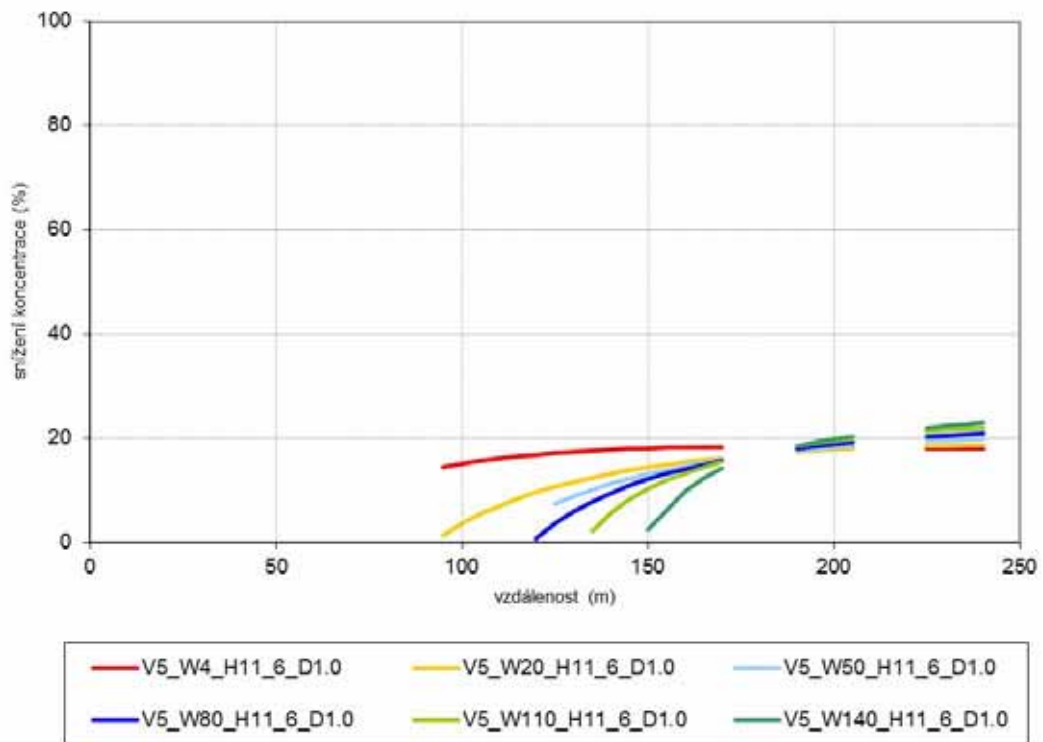
**Obr. 4.42. Průběh snížení koncentrací částic PM<sub>10</sub> se vzdáleností od silnice vlivem šířky bariéry (W), výška bariéry H = 11 m, hustota D = 1, referenční hl. 1,5 m**



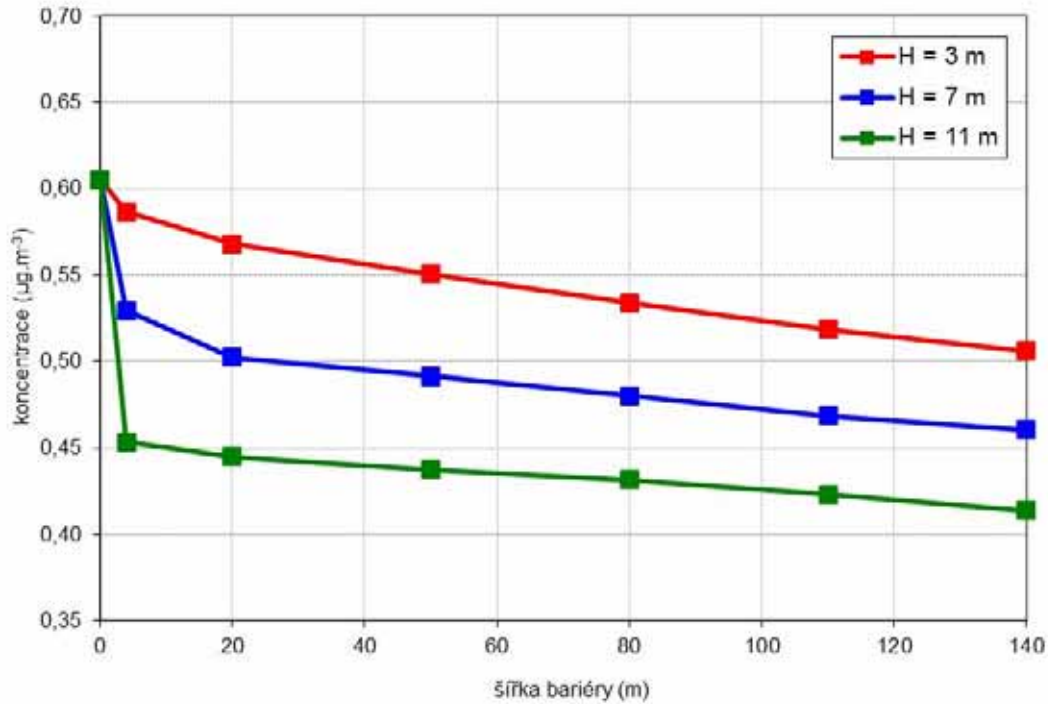
**Obr. 4.43. Průběh snížení koncentrací částic PM<sub>10</sub> se vzdáleností od silnice vlivem šířky bariéry (W), výška bariéry H = 11 m, hustota D = 1, referenční hl. 3 m**



**Obr. 4.44. Průběh snížení koncentrací částic PM<sub>10</sub> se vzdáleností od silnice vlivem šířky bariéry (W), výška bariéry H = 11 m, hustota D = 1, referenční hl. 6 m**

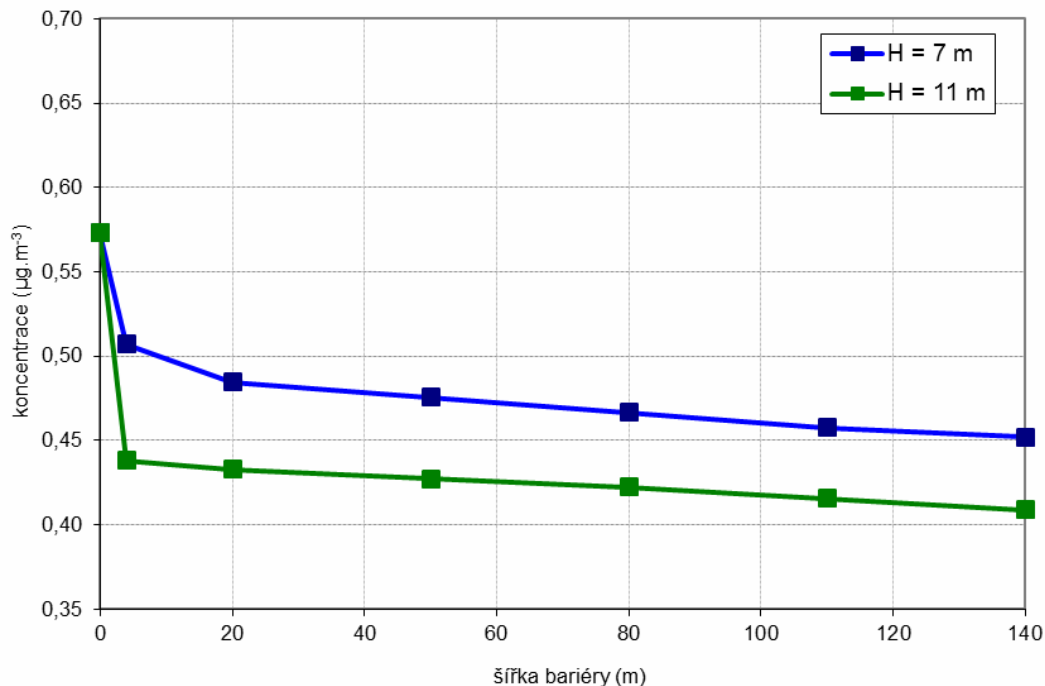


**Obr. 4.45. Hodnoty koncentrací částic PM<sub>10</sub> pro jednotlivé šířky a výšky bariéry ve vzdálenosti 200 m od hranice komunikace, referenční hl. 1,5 m**



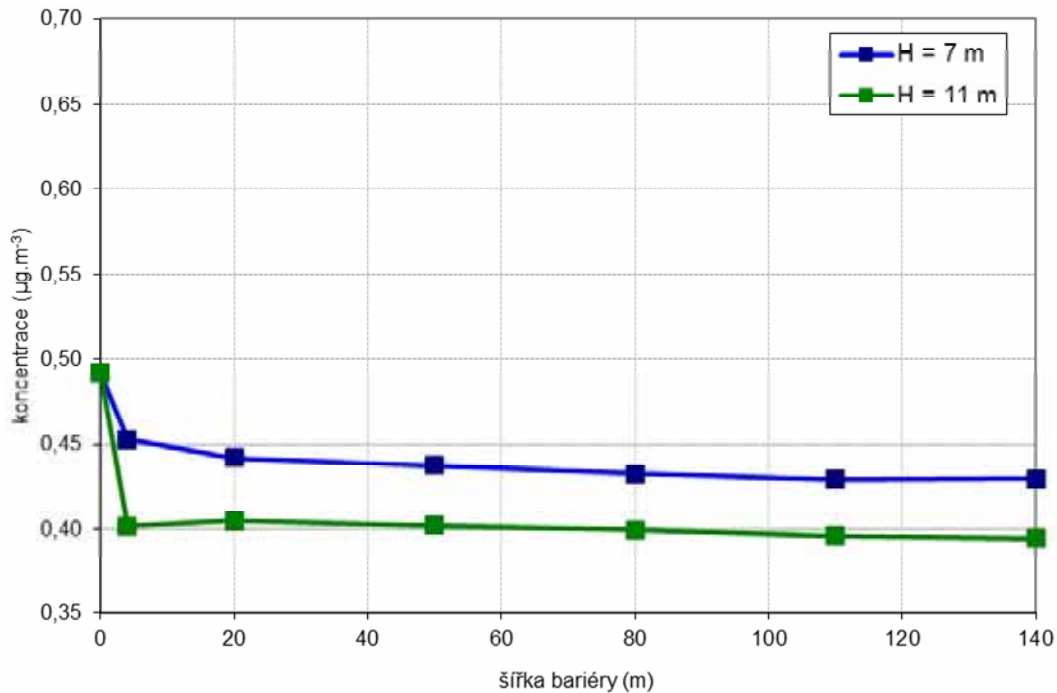
Pozn. Výchozí hodnota koncentrace (u hranice komunikace) je 3 µg.m<sup>-3</sup>; 0 = bez bariéry

**Obr. 4.46. Hodnoty koncentrací částic PM<sub>10</sub> pro jednotlivé šířky a výšky bariéry ve vzdálenosti 200 m od hranice komunikace, referenční hl. 3 m**



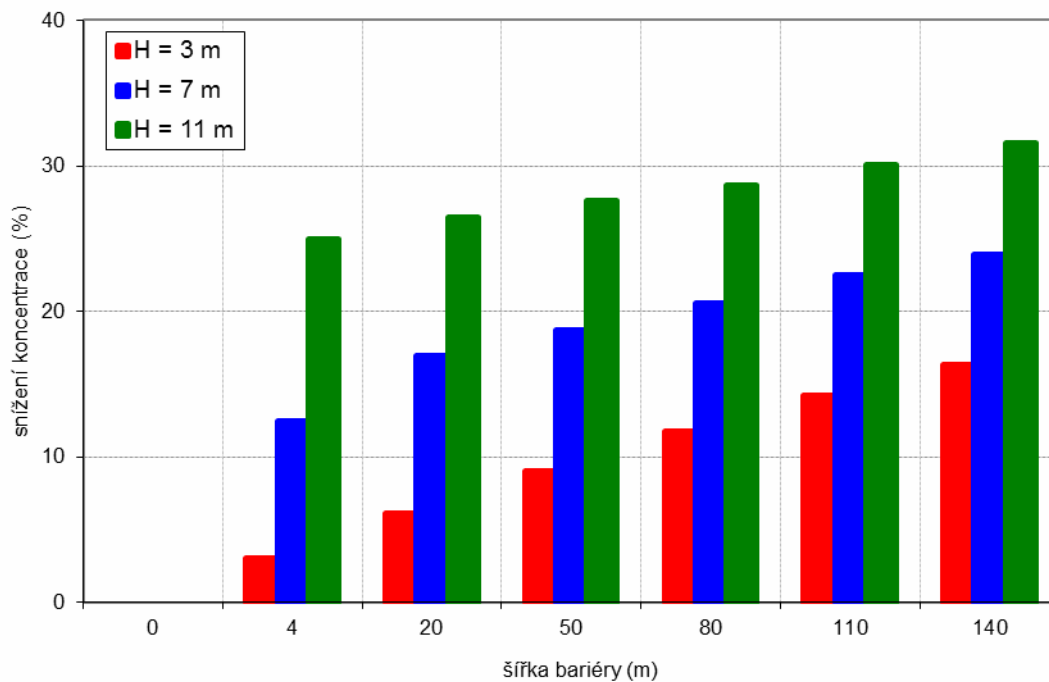
Pozn. Výchozí hodnota koncentrace (u hranice komunikace) je 3 µg.m<sup>-3</sup>; 0 = bez bariéry

**Obr. 4.47. Hodnoty koncentrací částic PM<sub>10</sub> pro jednotlivé šířky a výšky bariéry ve vzdálenosti 200 m od hranice komunikace, referenční hl. 6 m**



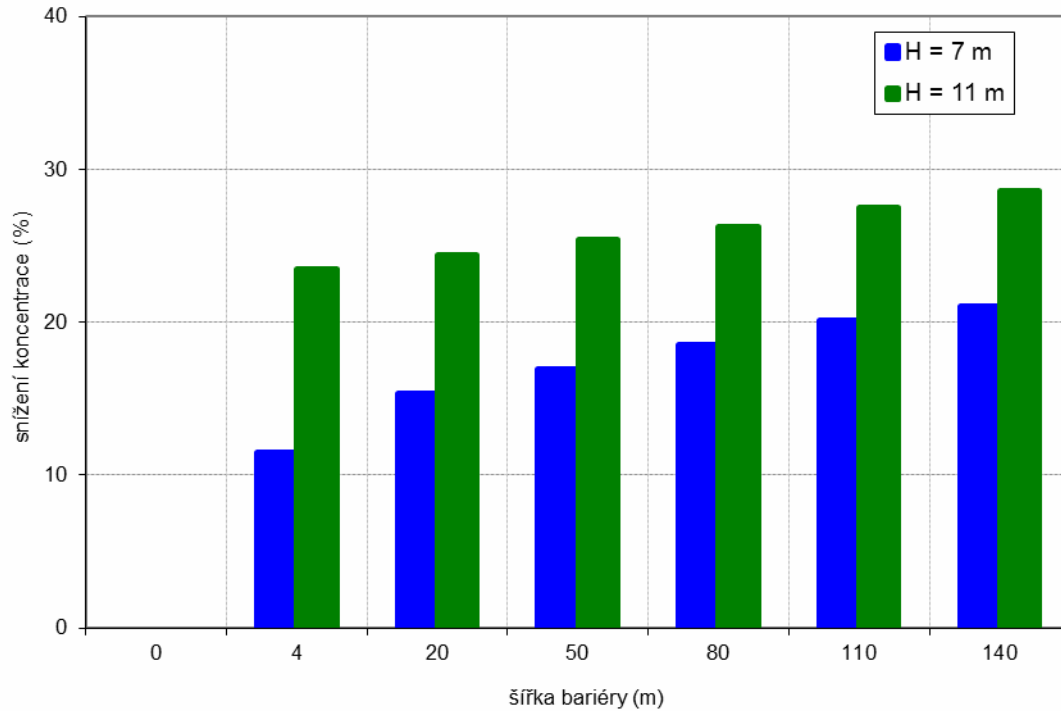
Pozn. Výchozí hodnota koncentrace (u hranice komunikace) je 3 µg.m<sup>-3</sup>; 0 = bez bariéry

**Obr. 4.48. Snížení koncentrací částic PM<sub>10</sub> vlivem šířky a výšky bariéry ve vzdálenosti 200 m od hranice komunikace, referenční hl. 1,5 m**



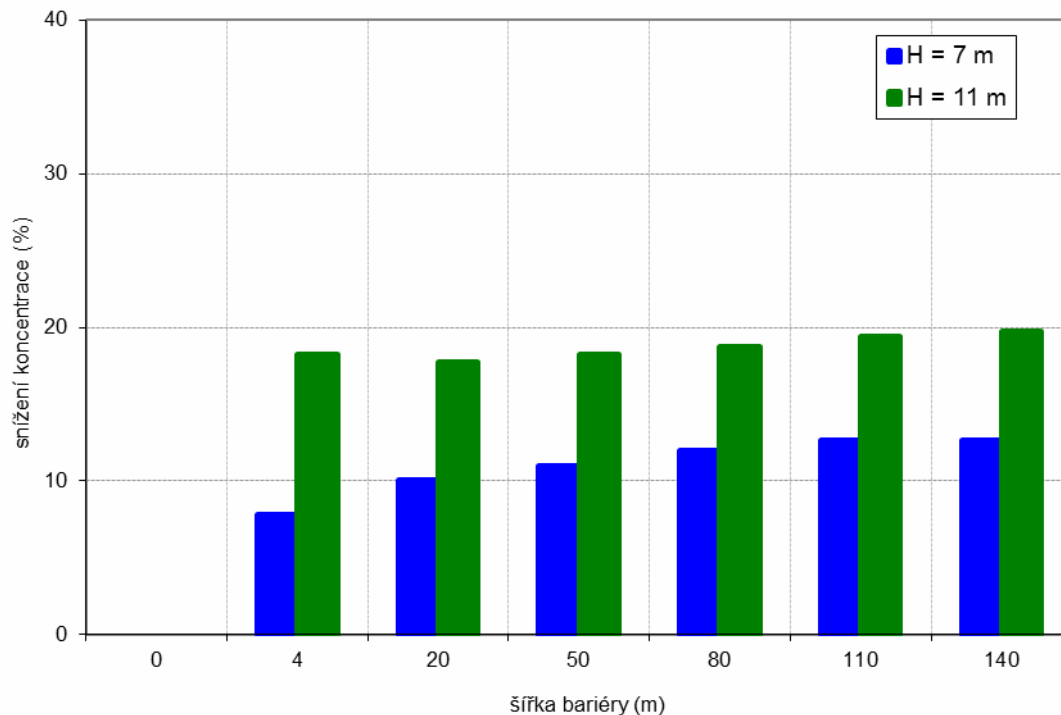
Pozn. Procentuelní snížení koncentrací částic ve stavu s bariérou v porovnání se stavem bez bariéry

**Obr. 4.49. Snížení koncentrací částic PM<sub>10</sub> vlivem šířky a výšky bariéry ve vzdálenosti 200 m od hranice komunikace, referenční hl. 3 m**



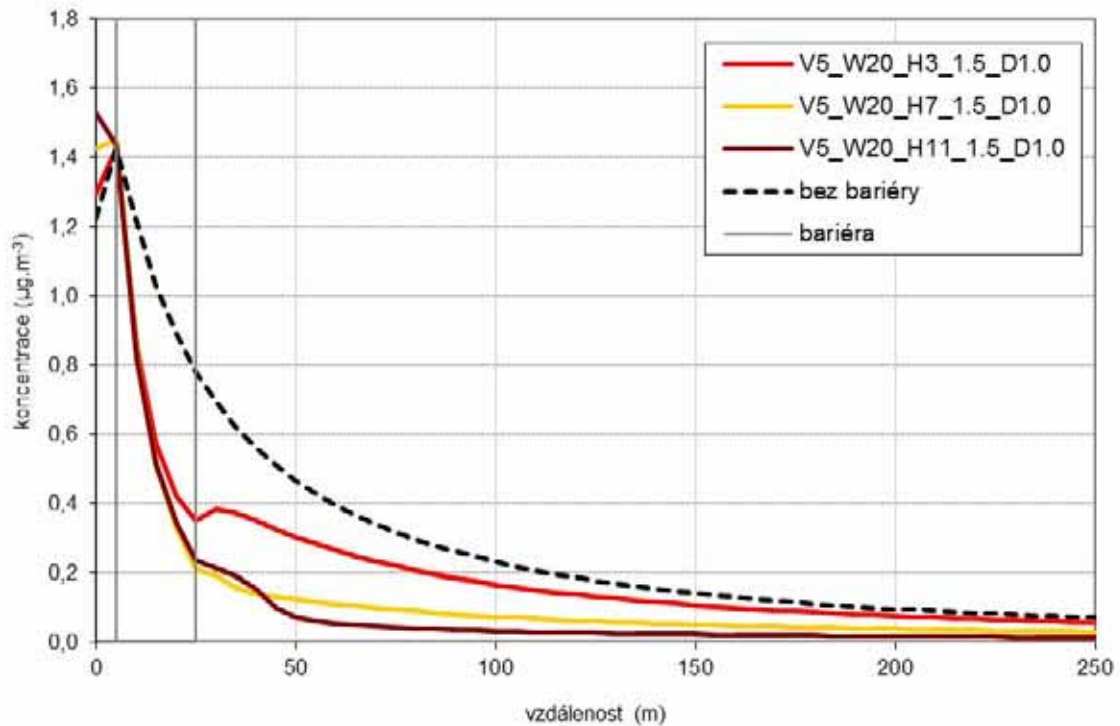
Pozn. Procentuelní snížení koncentrací částic ve stavu s bariérou v porovnání se stavem bez bariéry

**Obr. 4.50. Snížení koncentrací částic PM<sub>10</sub> vlivem šířky a výšky bariéry ve vzdálenosti 200 m od hranice komunikace, referenční hl. 6 m**

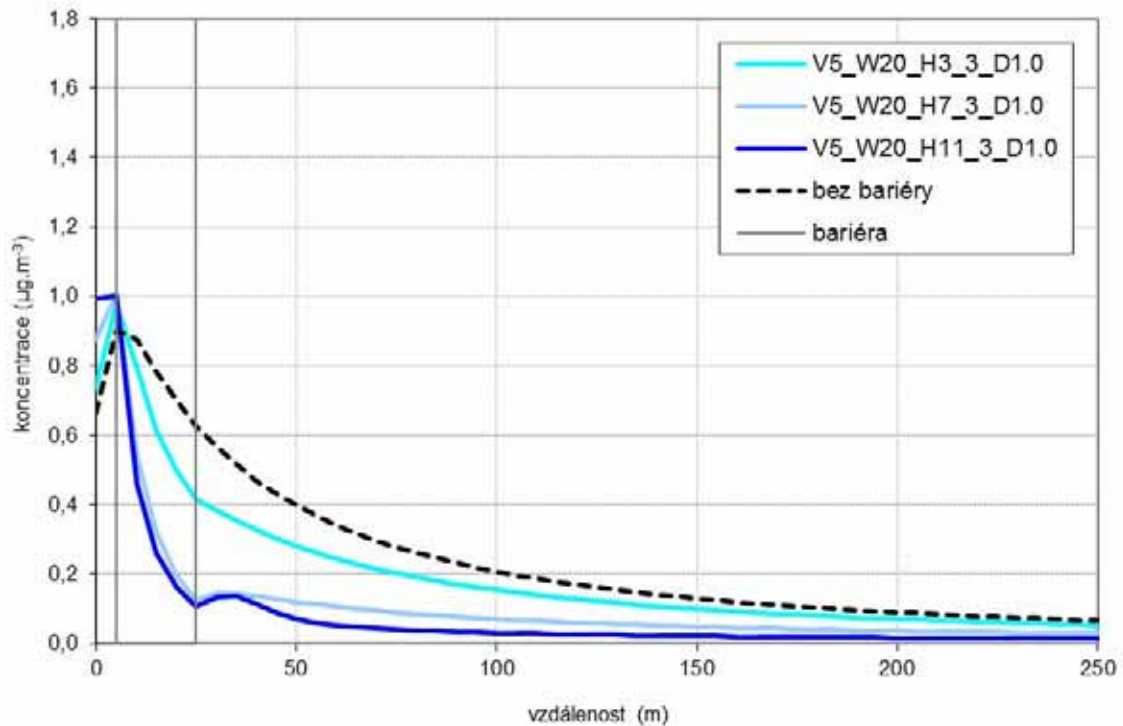


Pozn. Procentuelní snížení koncentrací částic ve stavu s bariérou v porovnání se stavem bez bariéry

Obr. 4.51. Průběh koncentrací částic PM<sub>75</sub> od silnice pro hustotu bariéry D = 1, šířku bariéry W = 20 m a různé výšky bariéry H = 3, 7 a 11 m, referenční hl. 1,5 m

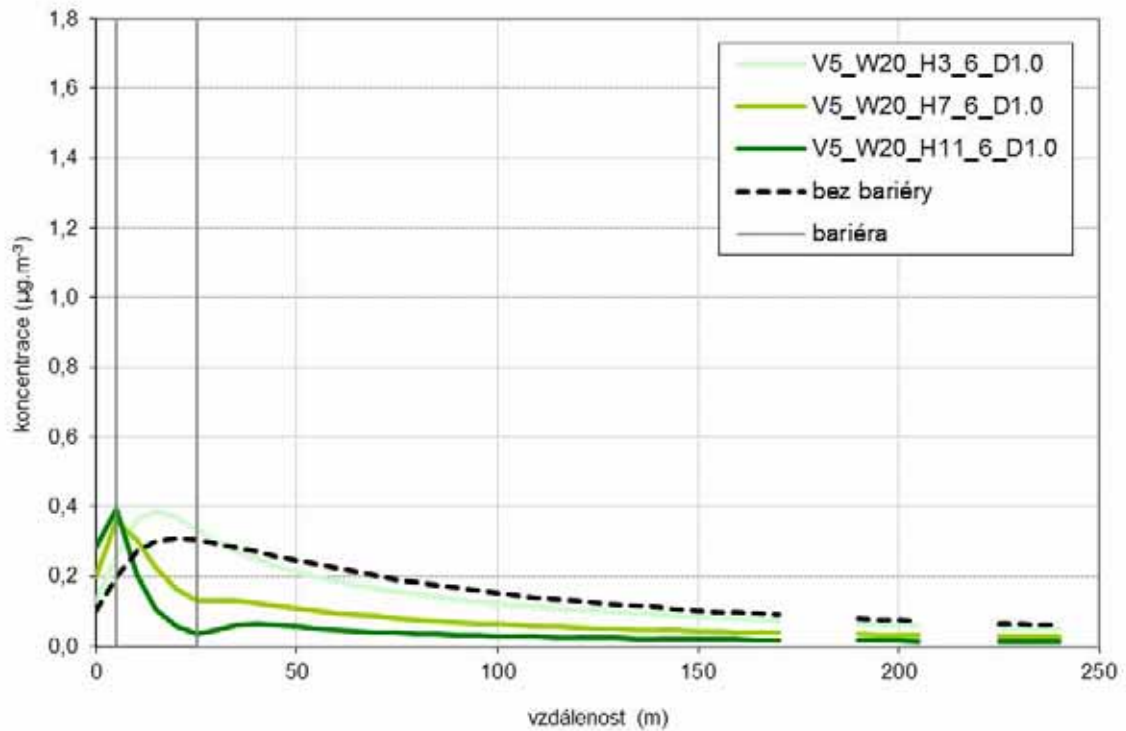


Obr. 4.52. Průběh koncentrací částic PM<sub>75</sub> od silnice pro hustotu bariéry D = 1, šířku bariéry W = 20 m a různé výšky bariéry H = 3, 7 a 11 m, referenční hl. 3 m

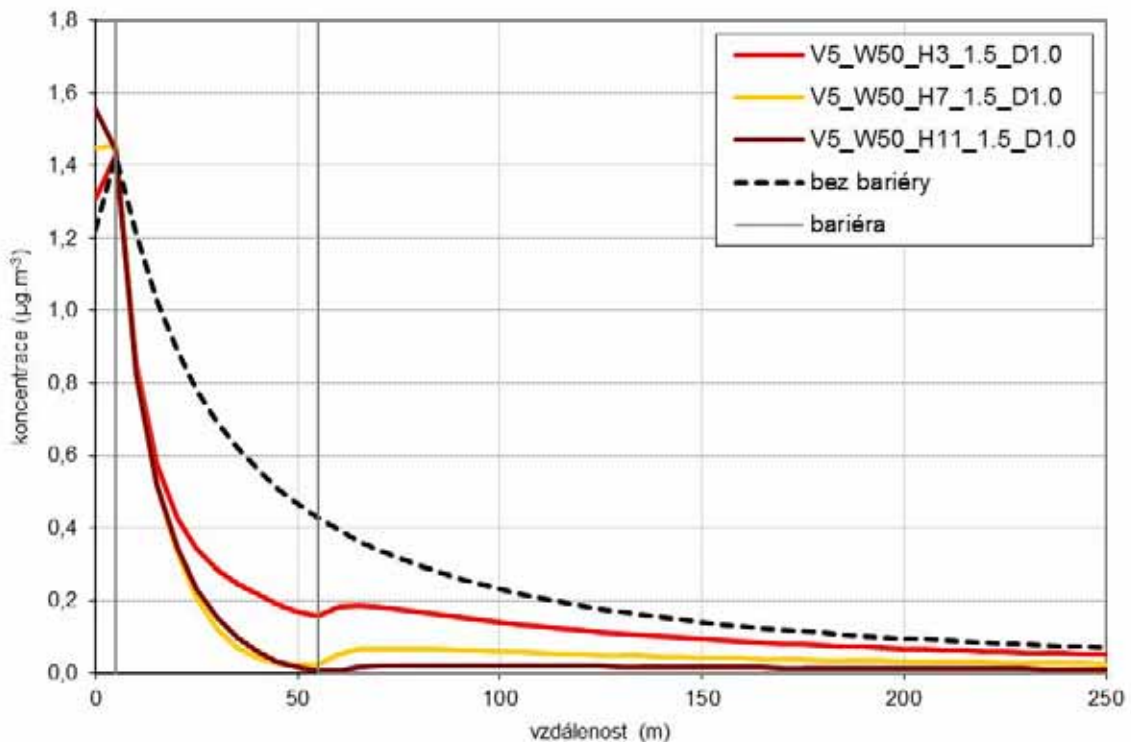




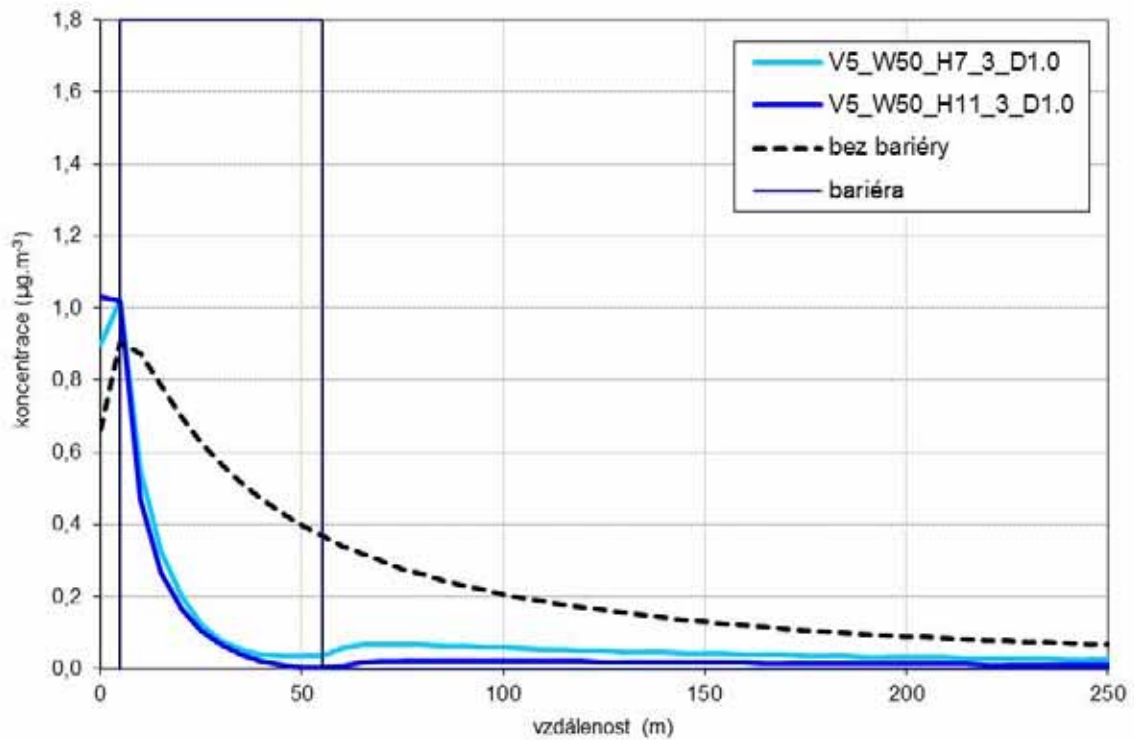
**Obr. 4.53. Průběh koncentrací částic PM<sub>75</sub> od silnice pro hustotu bariéry D = 1, šířku bariéry W = 20 m a různé výšky bariéry H = 3, 7 a 11 m, referenční hl. 6 m**



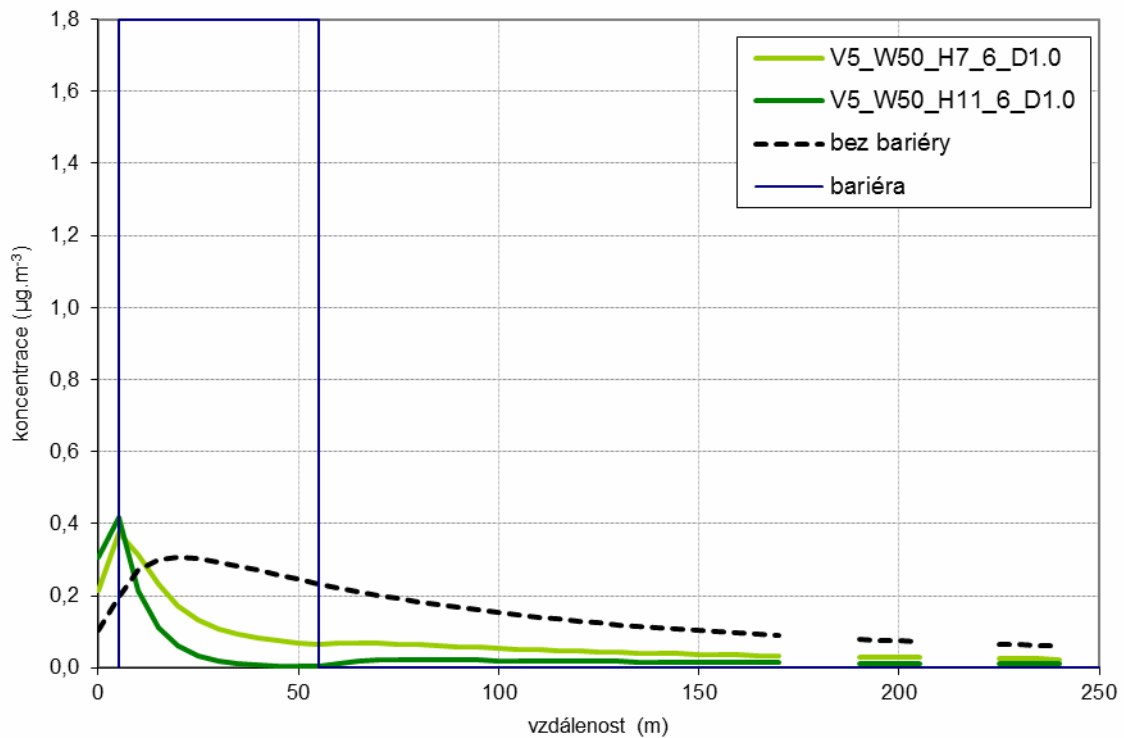
**Obr. 4.54. Průběh koncentrací částic PM<sub>75</sub> od silnice pro hustotu bariéry D = 1, šířku bariéry W = 50 m a různé výšky bariéry H = 3, 7 a 11 m, referenční hl. 1,5 m**



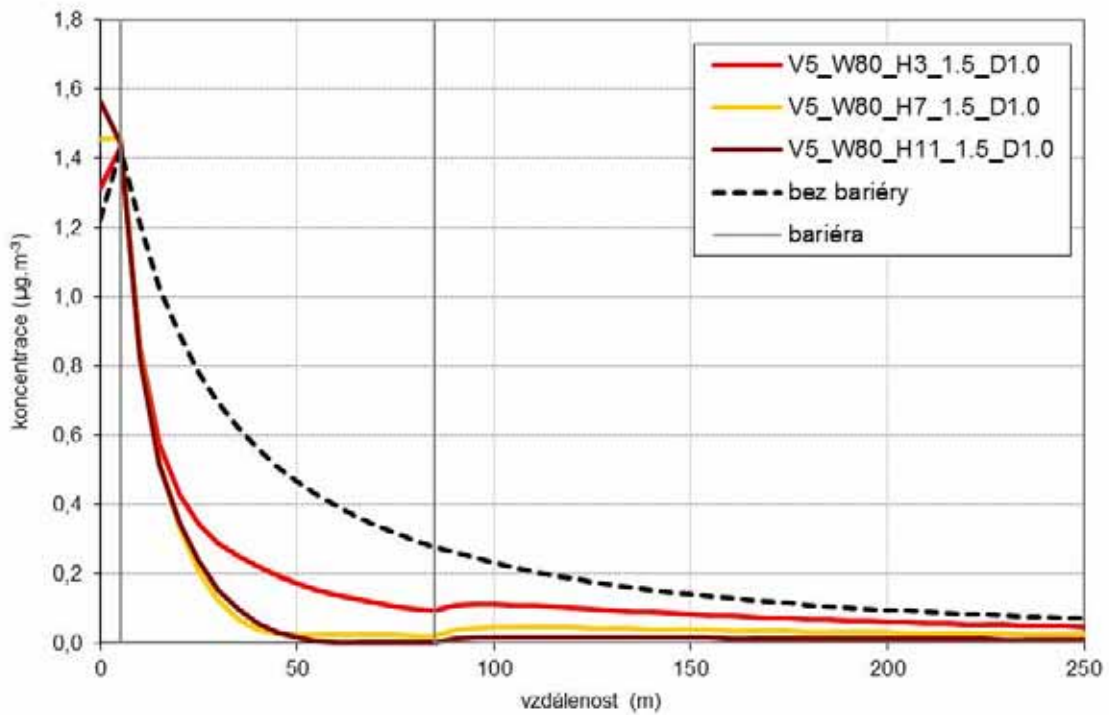
Obr. 4.55. Průběh koncentrací částic  $PM_{75}$  od silnice pro hustotu bariéry  $D = 1$ , šířku bariéry  $W = 50$  m a různé výšky bariéry  $H = 3, 7$  a  $11$  m, referenční hl.  $3$  m



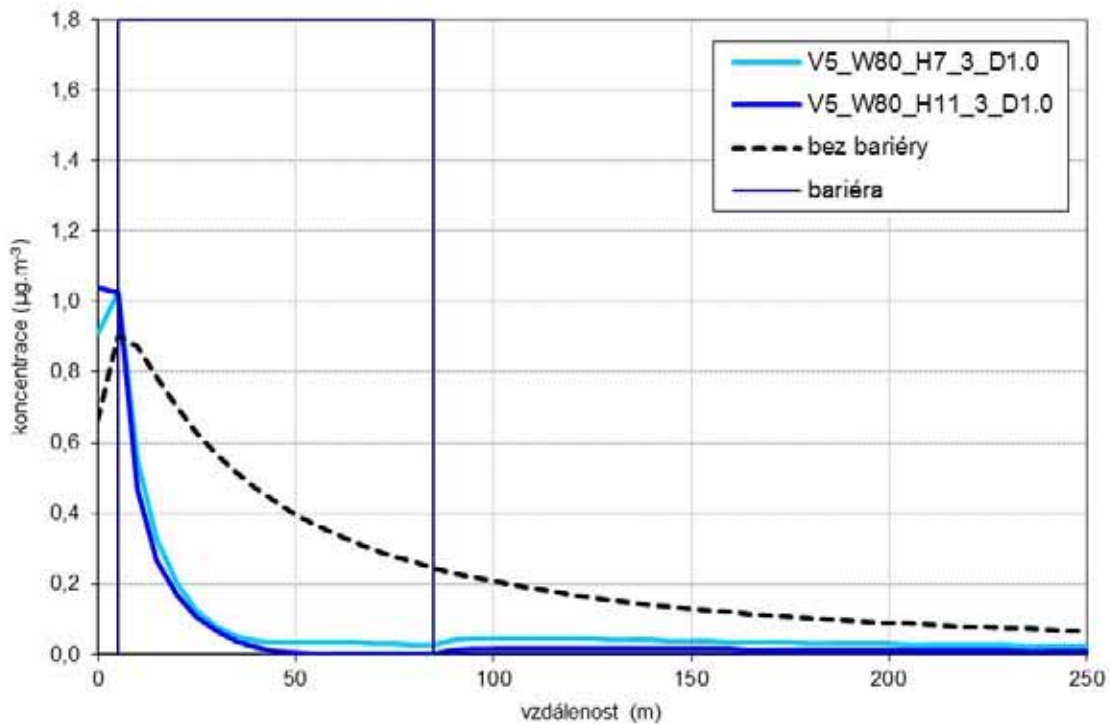
Obr. 4.56. Průběh koncentrací částic  $PM_{75}$  od silnice pro hustotu bariéry  $D = 1$ , šířku bariéry  $W = 50$  m a různé výšky bariéry  $H = 3, 7$  a  $11$  m, referenční hl.  $6$  m



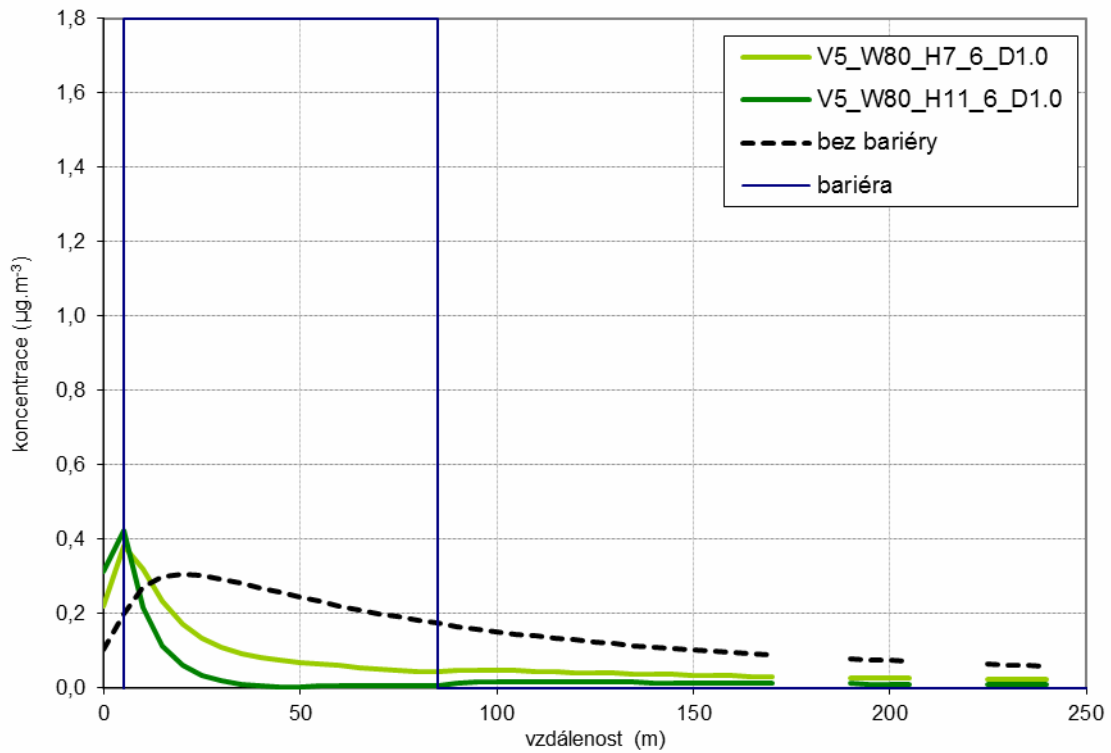
Obr. 4.57. Průběh koncentrací částic PM<sub>75</sub> od silnice pro hustotu bariéry D = 1, šířku bariéry W = 80 m a různé výšky bariéry H = 3, 7 a 11 m, referenční hl. 1,5 m



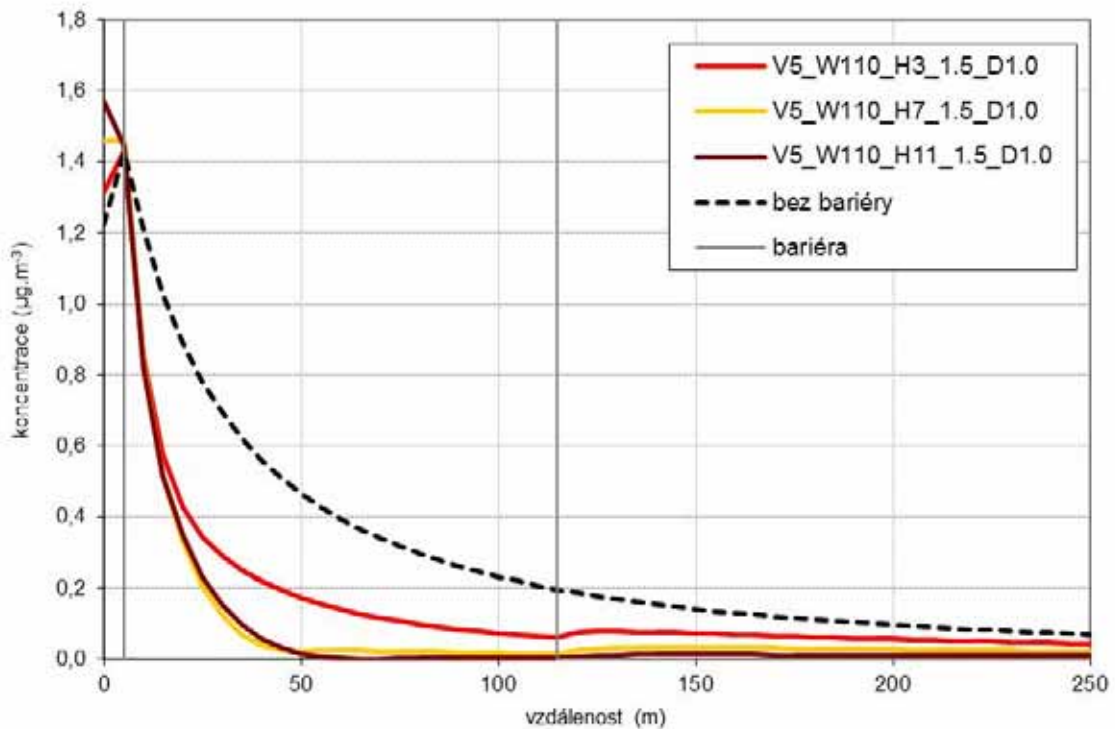
Obr. 4.58. Průběh koncentrací částic PM<sub>75</sub> od silnice pro hustotu bariéry D = 1, šířku bariéry W = 80 m a různé výšky bariéry H = 3, 7 a 11 m, referenční hl. 3 m



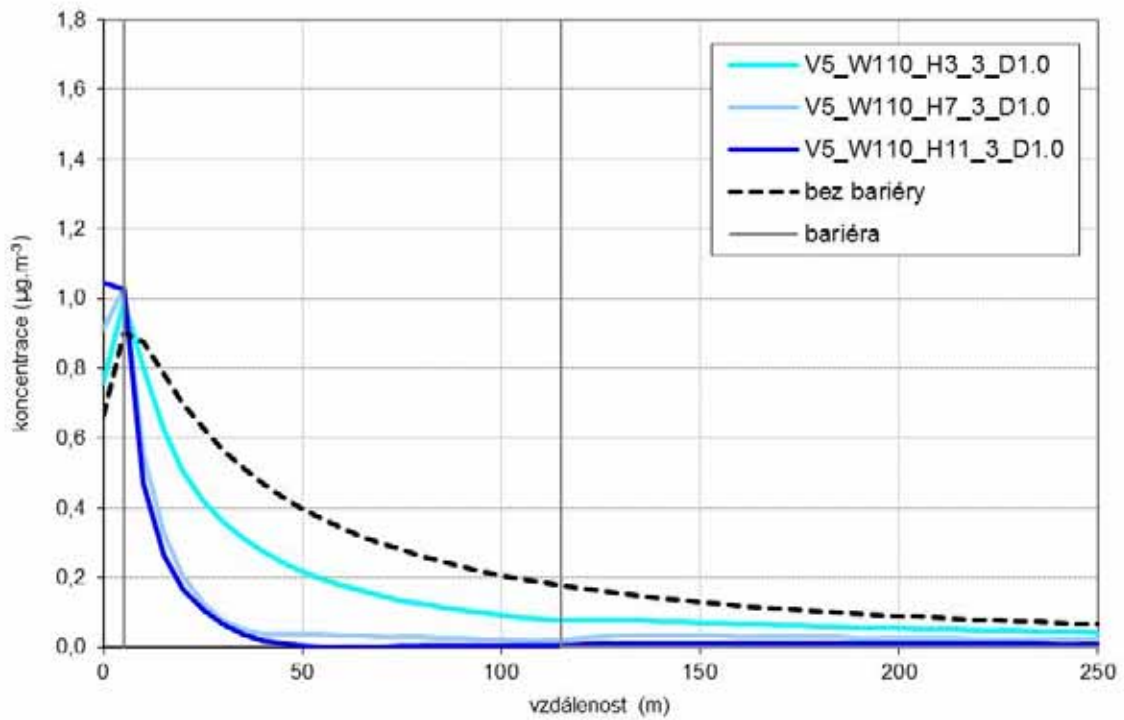
**Obr. 4.59. Průběh koncentrací částic PM<sub>75</sub> od silnice pro hustotu bariéry D = 1, šířku bariéry W = 80 m a různé výšky bariéry H = 3, 7 a 11 m, referenční hl. 6 m**



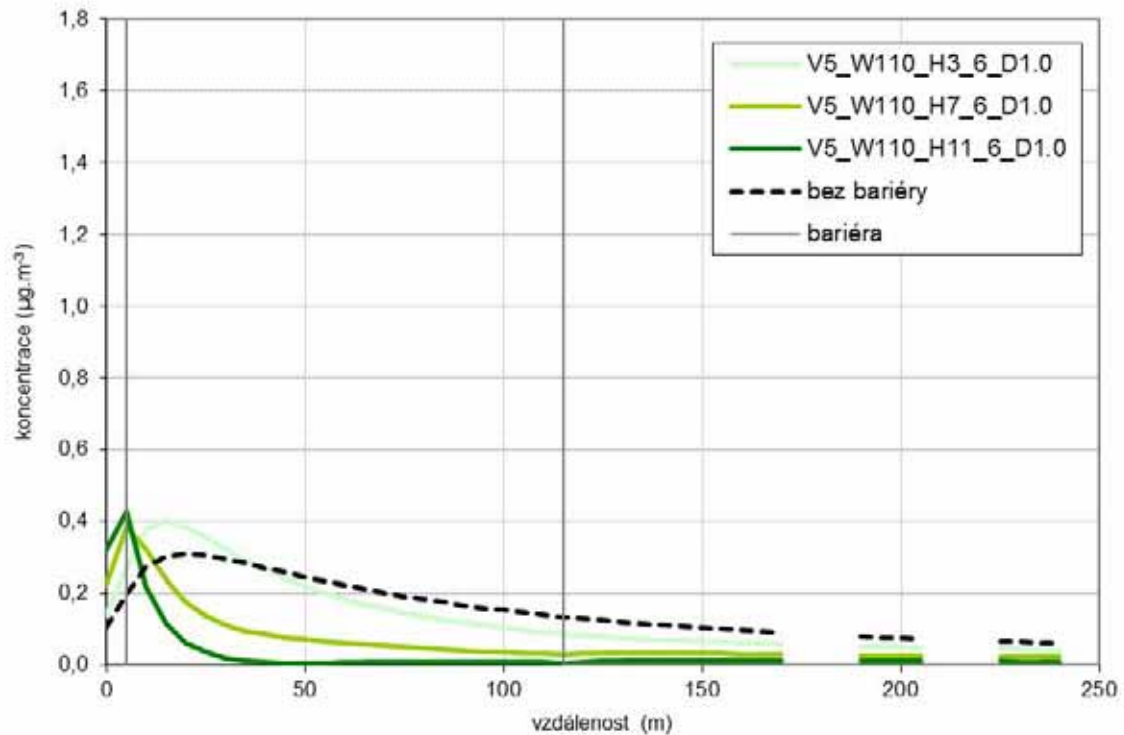
**Obr. 4.60. Průběh koncentrací částic PM<sub>75</sub> od silnice pro hustotu bariéry D = 1, šířku bariéry W = 110 m a různé výšky bariéry H = 3, 7 a 11 m, referenční hl. 1,5 m**



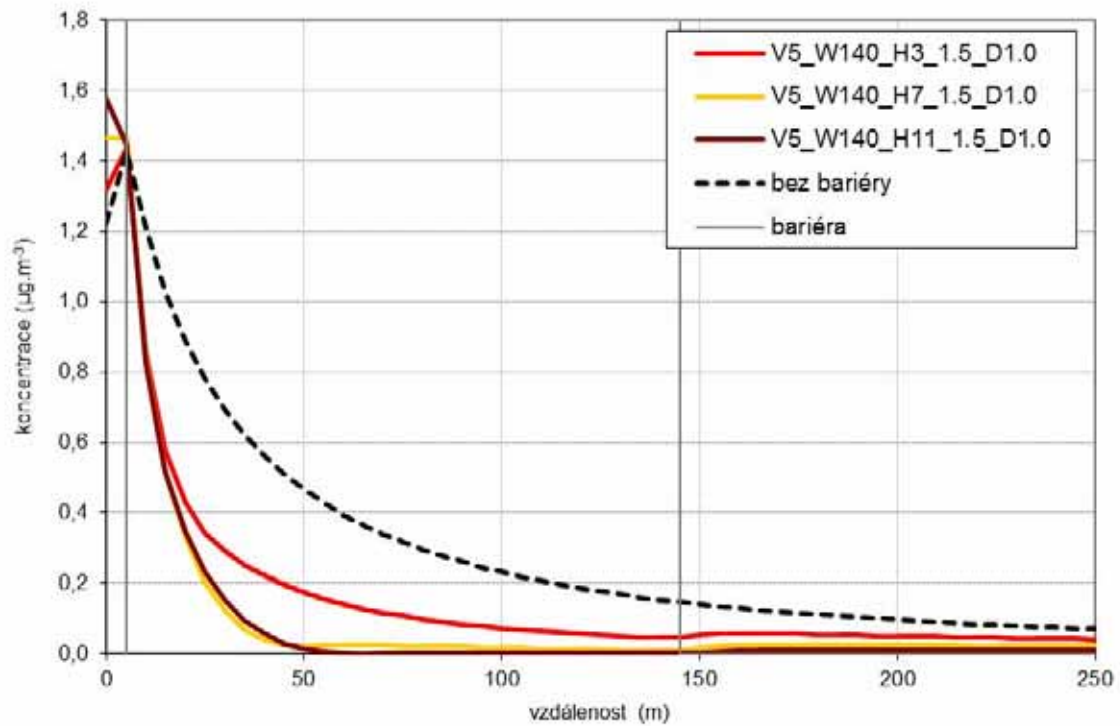
**Obr. 4.61. Průběh koncentrací částic PM<sub>75</sub> od silnice pro hustotu bariéry D = 1, šířku bariéry W = 110 m a různé výšky bariéry H = 3, 7 a 11 m, referenční hl. 3 m**



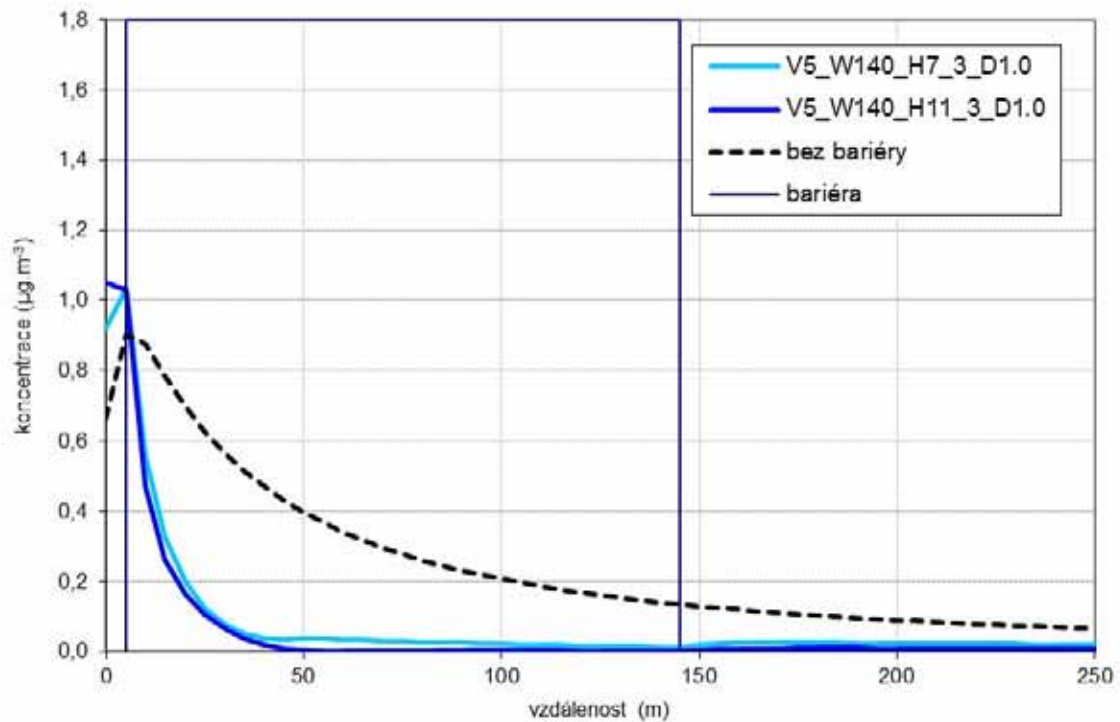
**Obr. 4.62. Průběh koncentrací částic PM<sub>75</sub> od silnice pro hustotu bariéry D = 1, šířku bariéry W = 110 m a různé výšky bariéry H = 3, 7 a 11 m, referenční hl. 6 m**



**Obr. 4.63.** Průběh koncentrací částic  $PM_{75}$  od silnice pro hustotu bariéry  $D = 1$ , šířku bariéry  $W = 140$  m a různé výšky bariéry  $H = 3, 7$  a  $11$  m, referenční hl.  $1,5$  m

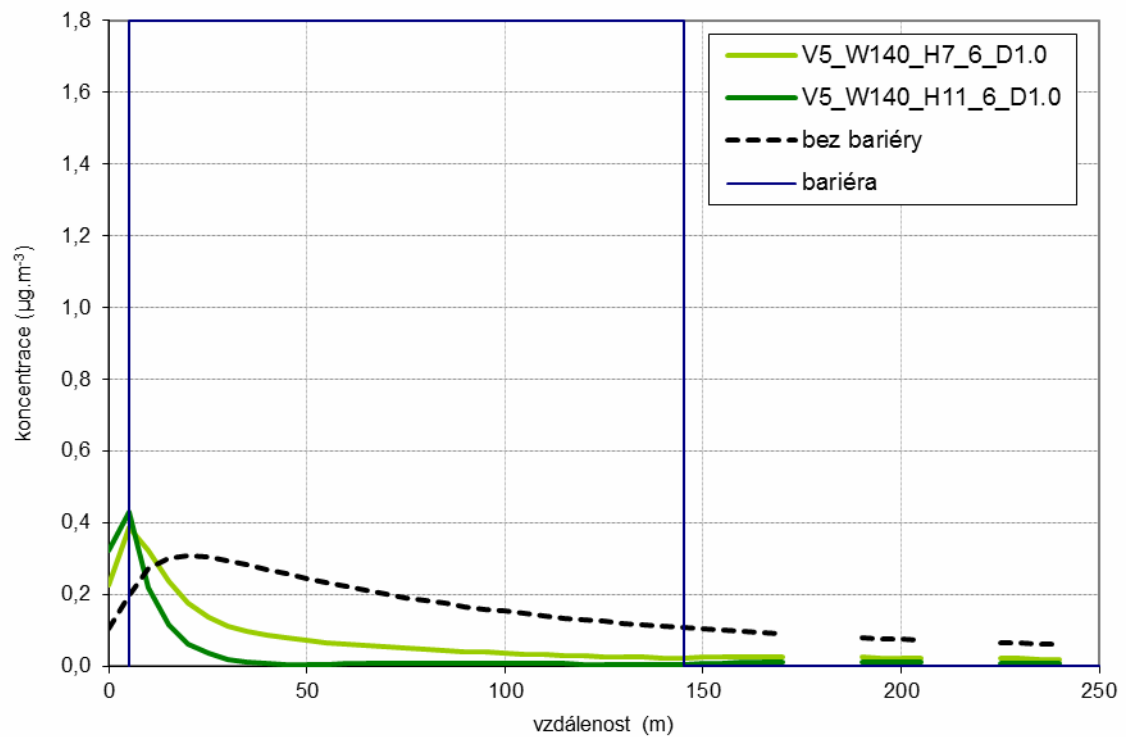


**Obr. 4.64.** Průběh koncentrací částic  $PM_{75}$  od silnice pro hustotu bariéry  $D = 1$ , šířku bariéry  $W = 140$  m a různé výšky bariéry  $H = 3, 7$  a  $11$  m, referenční hl.  $3$  m

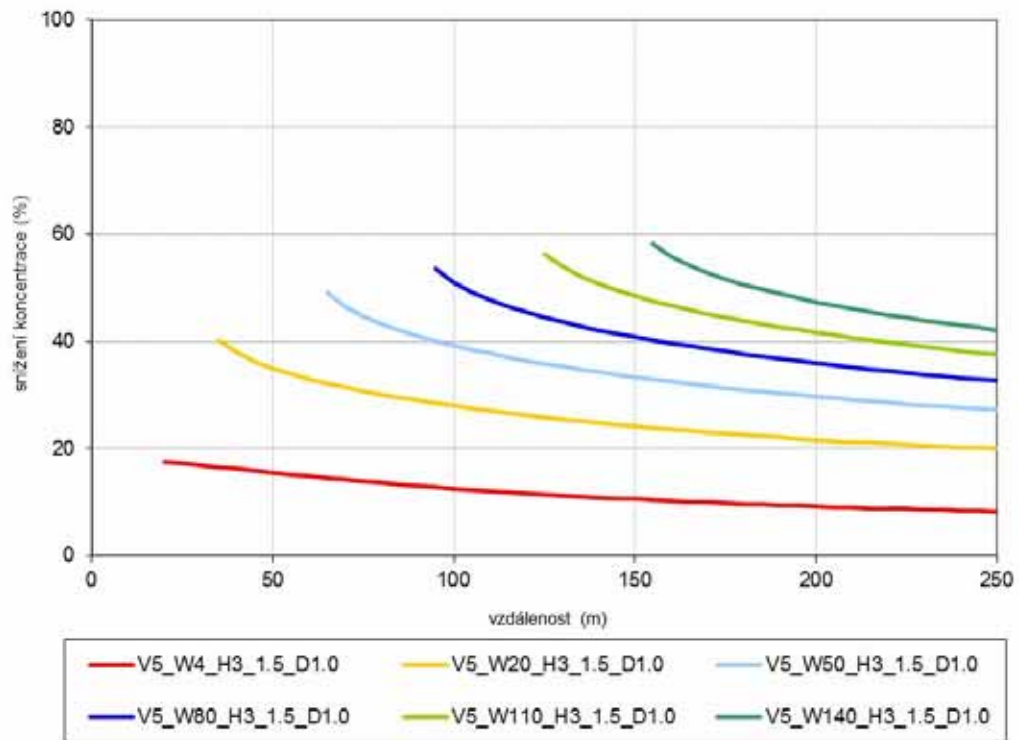




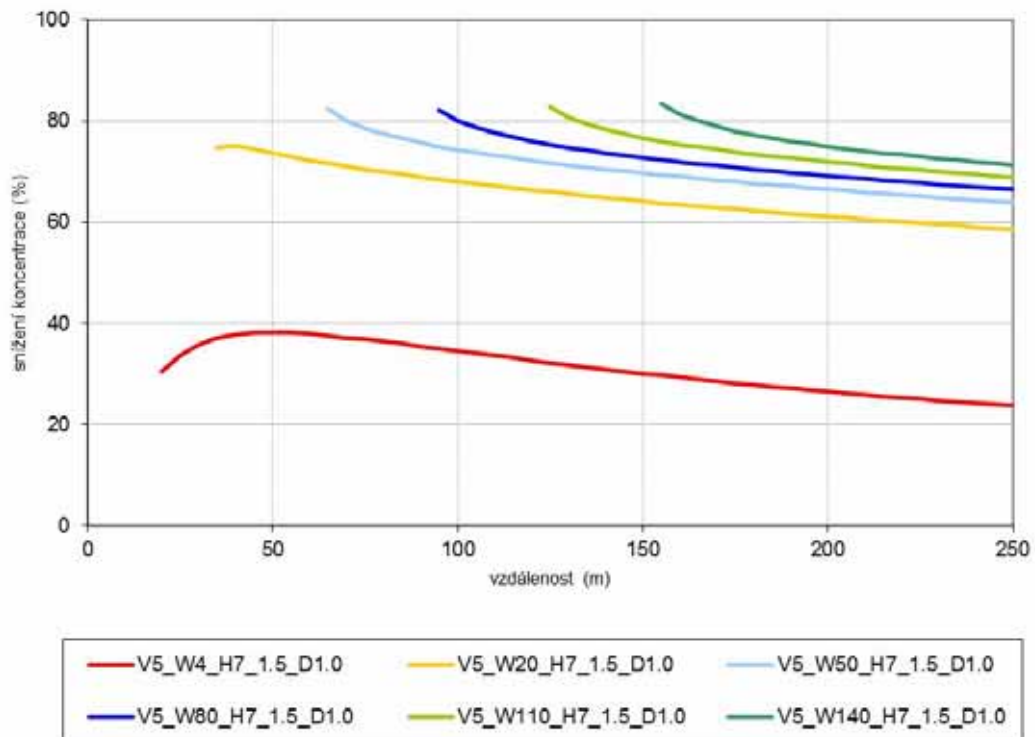
**Obr. 4.65. Průběh koncentrací částic PM<sub>75</sub> od silnice pro hustotu bariéry D = 1, šířku bariéry W = 140 m a různé výšky bariéry H = 3, 7 a 11 m, referenční hl. 6 m**



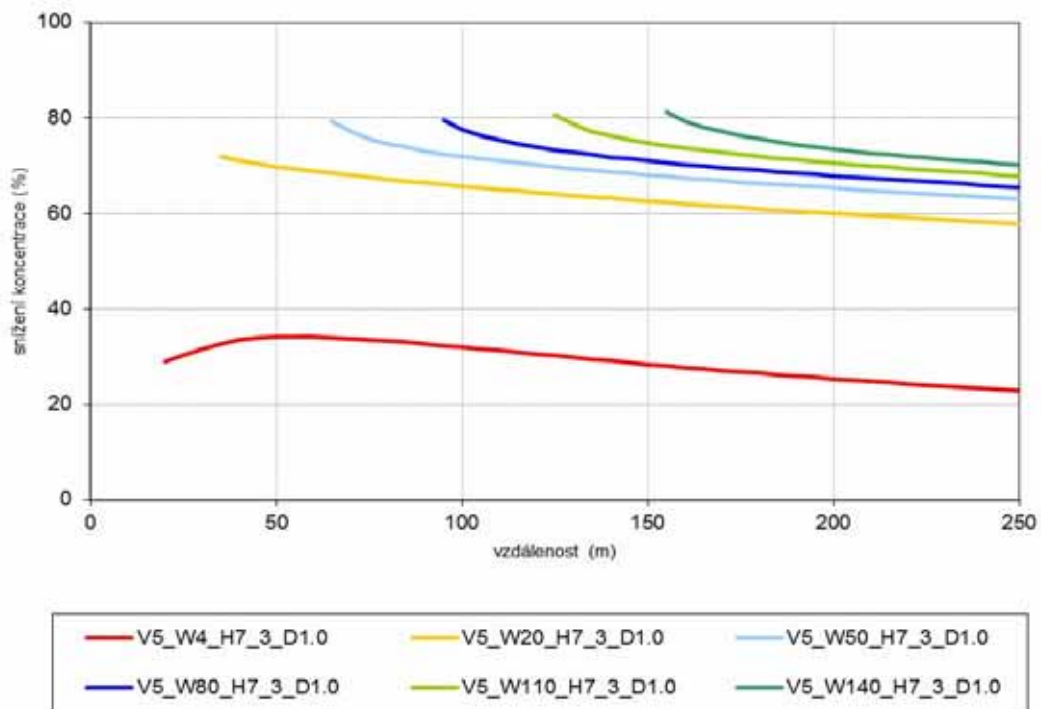
**Obr. 4.66. Průběh snížení koncentrací částic PM<sub>75</sub> se vzdáleností od silnice vlivem šířky bariéry (W), výška bariéry H = 3 m, hustota D = 1, referenční hl. 1,5 m**



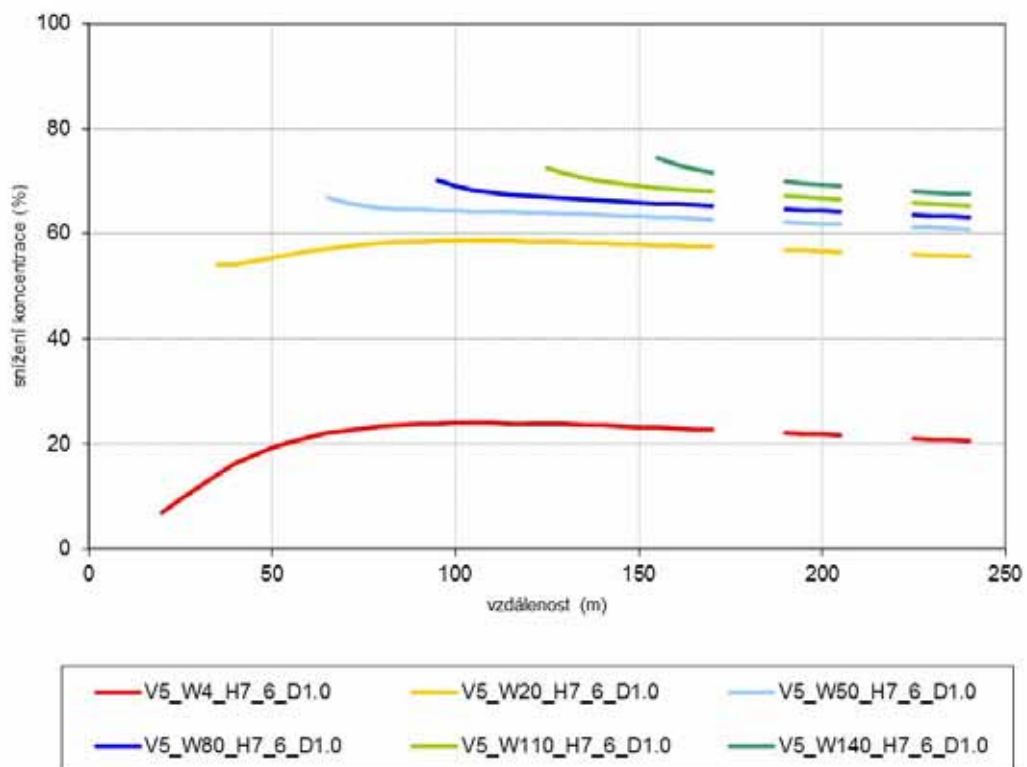
**Obr. 4.67. Průběh snížení koncentrací částic PM<sub>75</sub> se vzdáleností od silnice vlivem šířky bariéry (W), výška bariéry H = 7 m, hustota D = 1, referenční hl. 1,5 m**



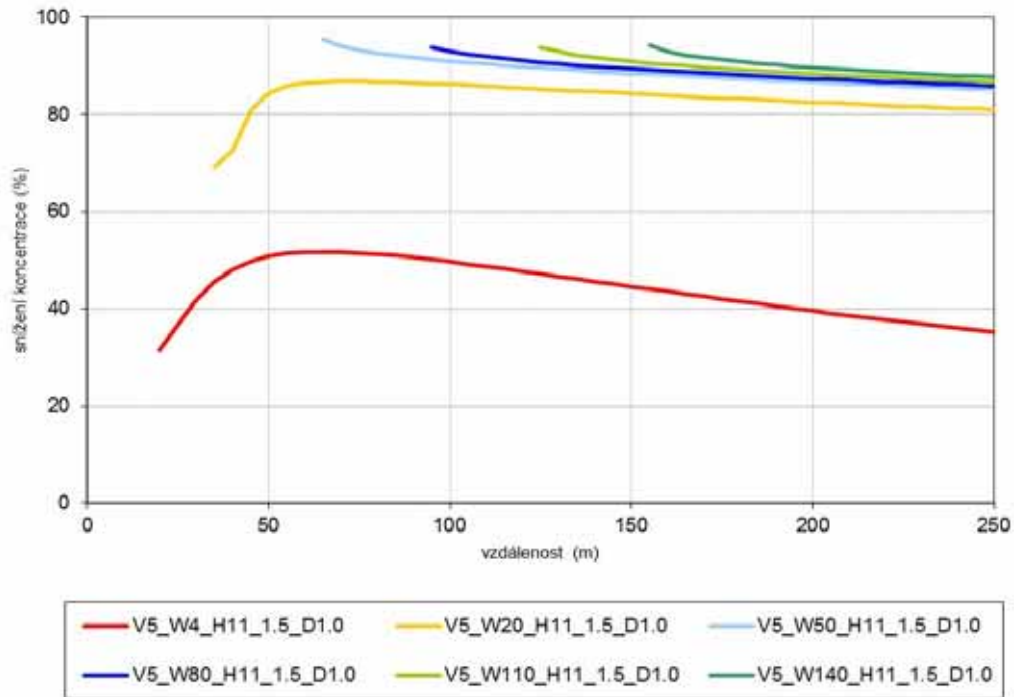
**Obr. 4.68. Průběh snížení koncentrací částic PM<sub>75</sub> se vzdáleností od silnice vlivem šířky bariéry (W), výška bariéry H = 7 m, hustota D = 1, referenční hl. 3 m**



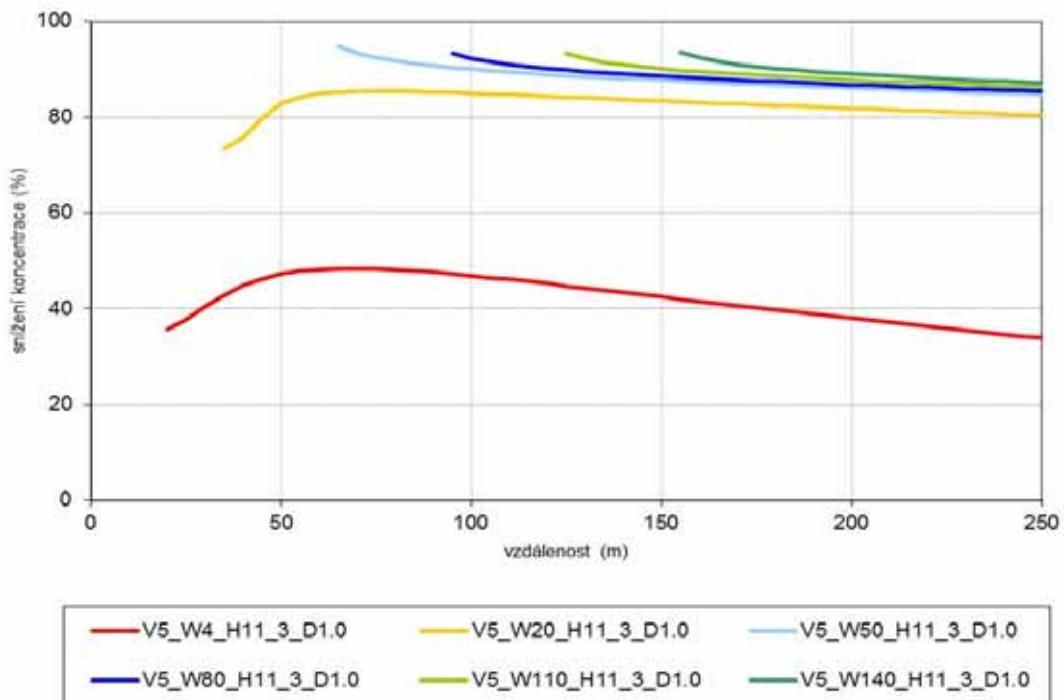
**Obr. 4.69. Průběh snížení koncentrací částic PM<sub>75</sub> se vzdáleností od silnice vlivem šířky bariéry (W), výška bariéry H = 7 m, hustota D = 1, referenční hl. 6 m**



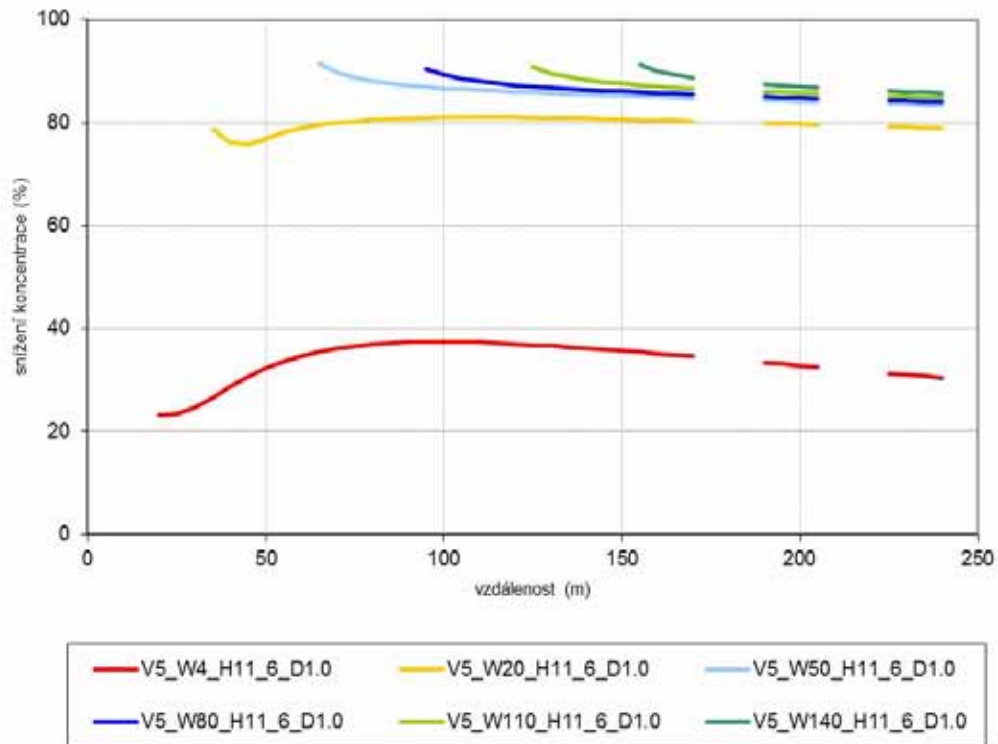
**Obr. 4.70. Průběh snížení koncentrací částic PM<sub>75</sub> se vzdáleností od silnice vlivem šířky bariéry (W), výška bariéry H = 11 m, hustota D = 1, referenční hl. 1,5 m**



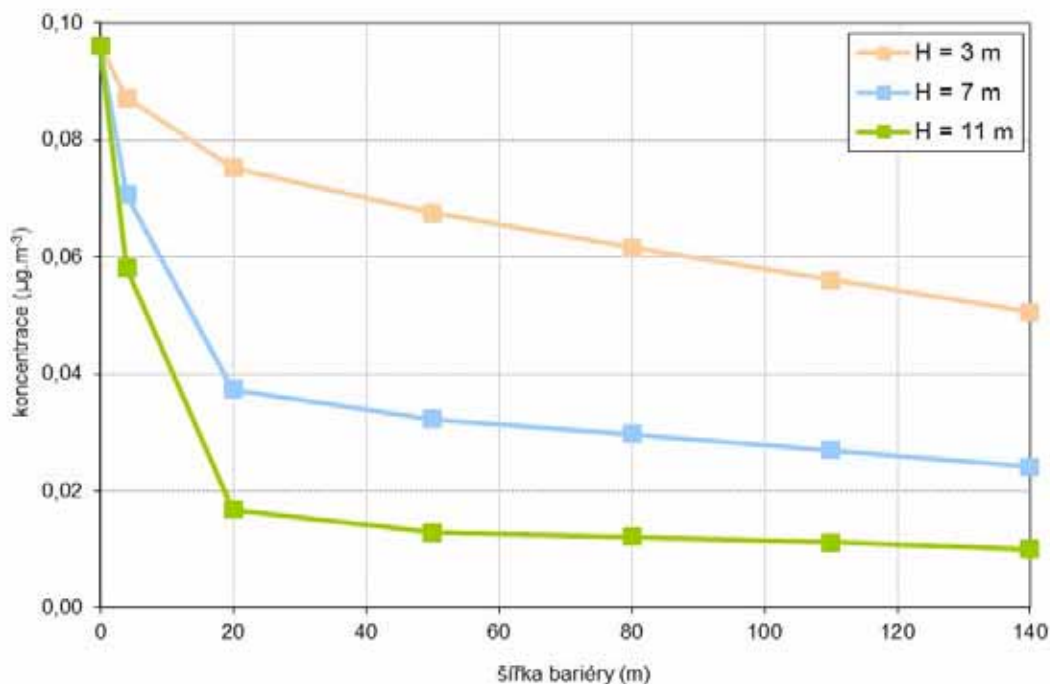
**Obr. 4.71. Průběh snížení koncentrací částic PM<sub>75</sub> se vzdáleností od silnice vlivem šířky bariéry (W), výška bariéry H = 11 m, hustota D = 1, referenční hl. 3 m**



**Obr. 4.72. Průběh snížení koncentrací částic PM<sub>75</sub> se vzdáleností od silnice vlivem šířky bariéry (W), výška bariéry H = 11 m, hustota D = 1, referenční hl. 6 m**

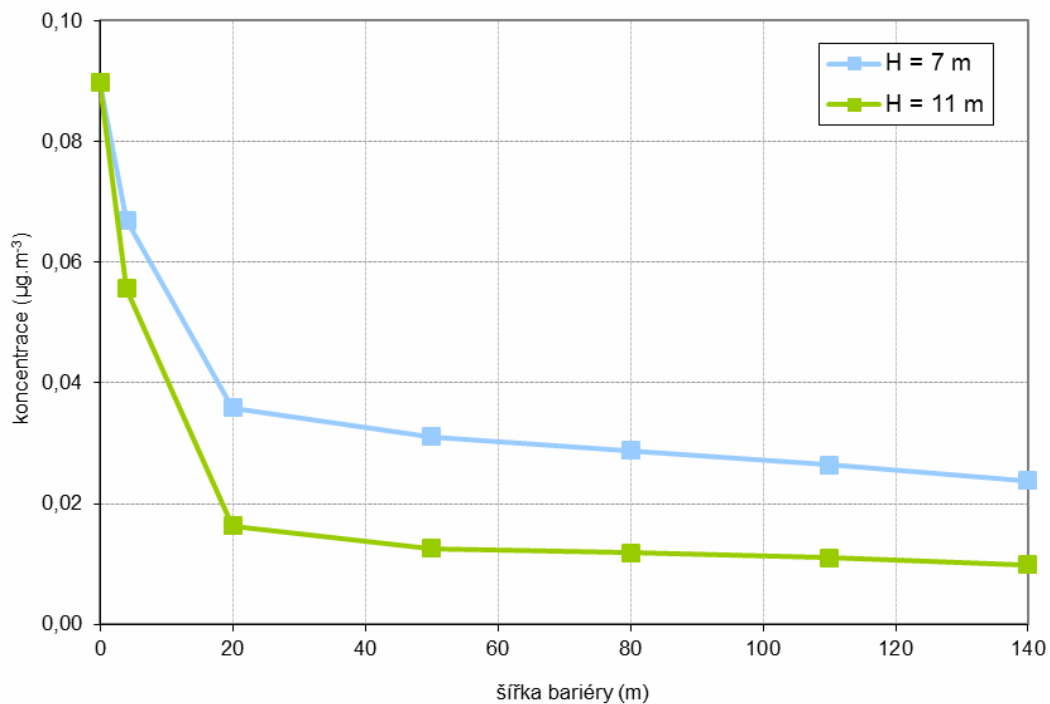


**Obr. 4.73. Hodnoty koncentrací částic PM<sub>75</sub> pro jednotlivé šířky a výšky bariéry ve vzdálenosti 200 m od hranice komunikace, referenční hl. 1,5 m**



Pozn. Výchozí hodnota koncentrace (u hranice komunikace) je 3 µg.m<sup>-3</sup>; 0 = bez bariéry

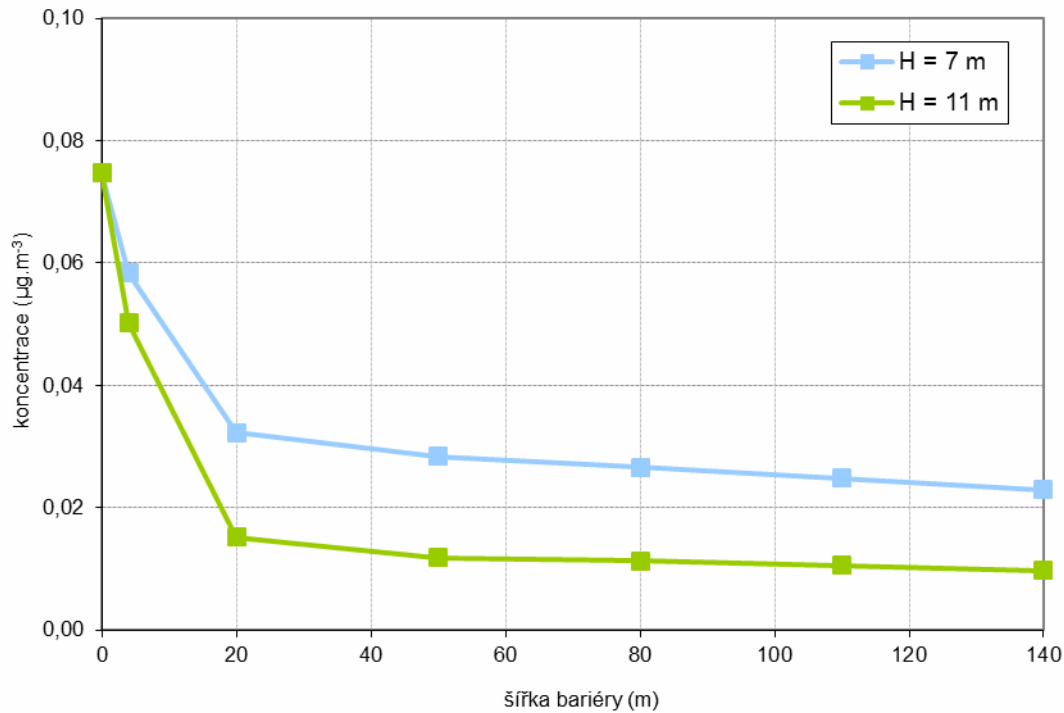
**Obr. 4.74. Hodnoty koncentrací částic PM<sub>75</sub> pro jednotlivé šířky a výšky bariéry ve vzdálenosti 200 m od hranice komunikace, referenční hl. 3 m**



Pozn. Výchozí hodnota koncentrace (u hranice komunikace) je 3 µg.m<sup>-3</sup>; 0 = bez bariéry

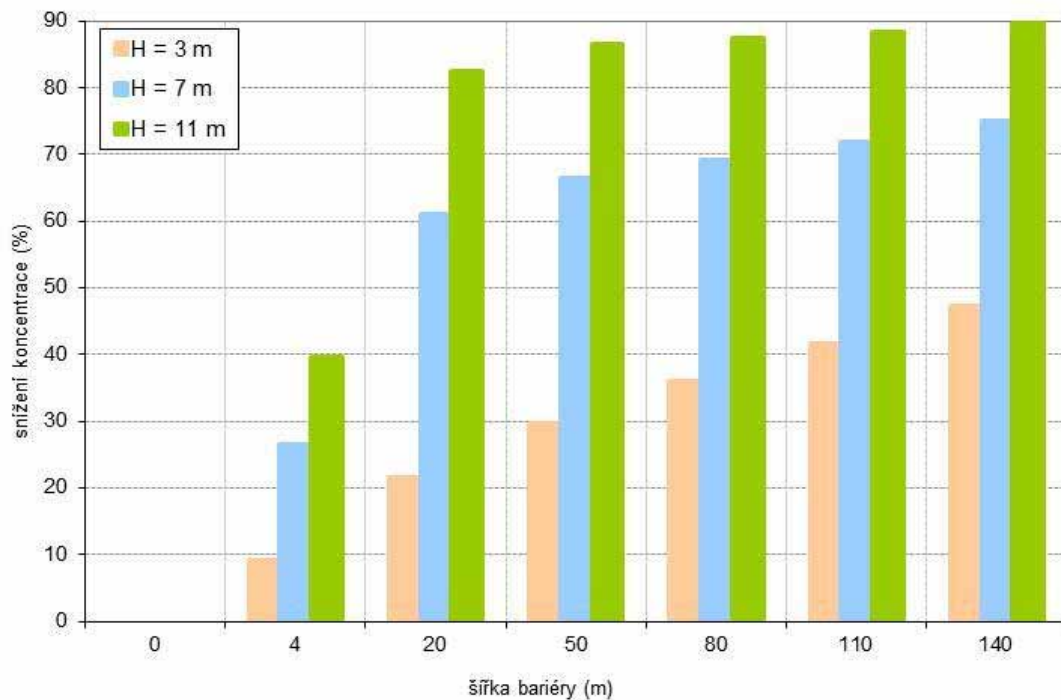


**Obr. 4.75. Hodnoty koncentrací částic PM<sub>75</sub> pro jednotlivé šířky a výšky bariéry ve vzdálenosti 200 m od hranice komunikace, referenční hl. 6 m**



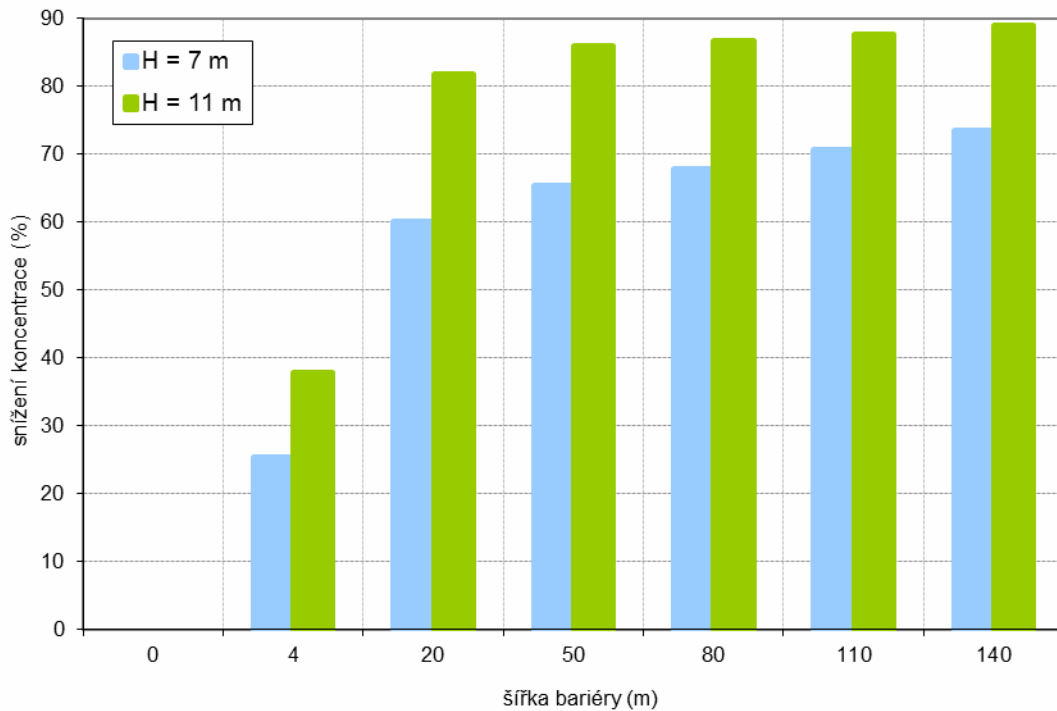
Pozn. Výchozí hodnota koncentrace (u hranice komunikace) je 3 µg.m<sup>-3</sup>; 0 = bez bariéry

**Obr. 4.76. Snížení koncentrací částic PM<sub>75</sub> vlivem šířky a výšky bariéry ve vzdálenosti 200 m od hranice komunikace, referenční hl. 1,5 m**



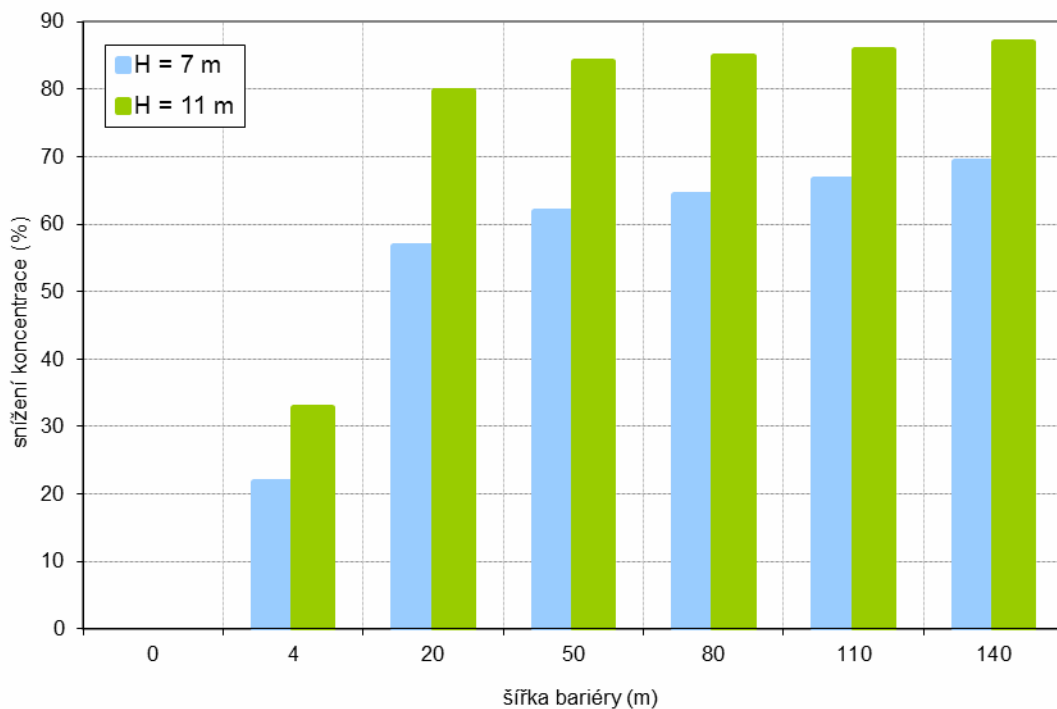
Pozn. Procentuelní snížení koncentrací částic ve stavu s bariérou v porovnání se stavem bez bariéry

**Obr. 4.77. Snížení koncentrací částic PM<sub>75</sub> vlivem šířky a výšky bariéry ve vzdálenosti 200 m od hranice komunikace, referenční hl. 3 m**



Pozn. Procentuelní snížení koncentrací částic ve stavu s bariérou v porovnání se stavem bez bariéry

**Obr. 4.78. Snížení koncentrací částic PM<sub>75</sub> vlivem šířky a výšky bariéry ve vzdálenosti 200 m od hranice komunikace, referenční hl. 6 m**



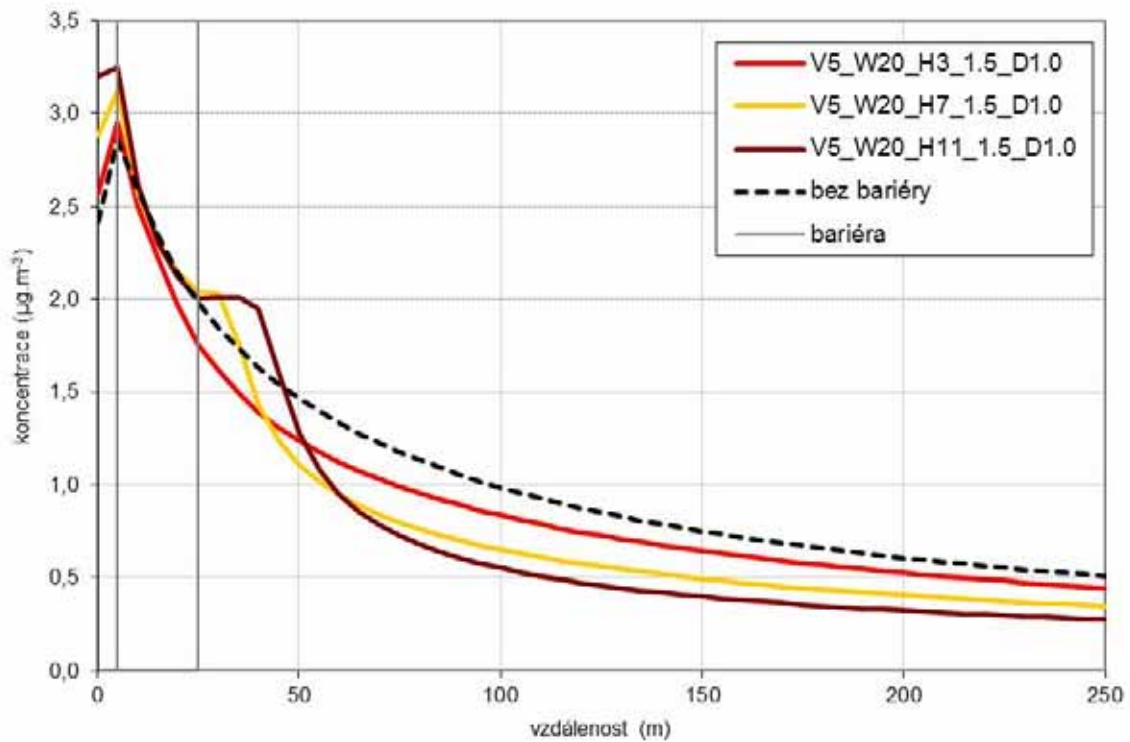
Pozn. Procentuelní snížení koncentrací částic ve stavu s bariérou v porovnání se stavem bez bariéry

## 4.6.2 Grafické výstupy – jehličnaté stromy

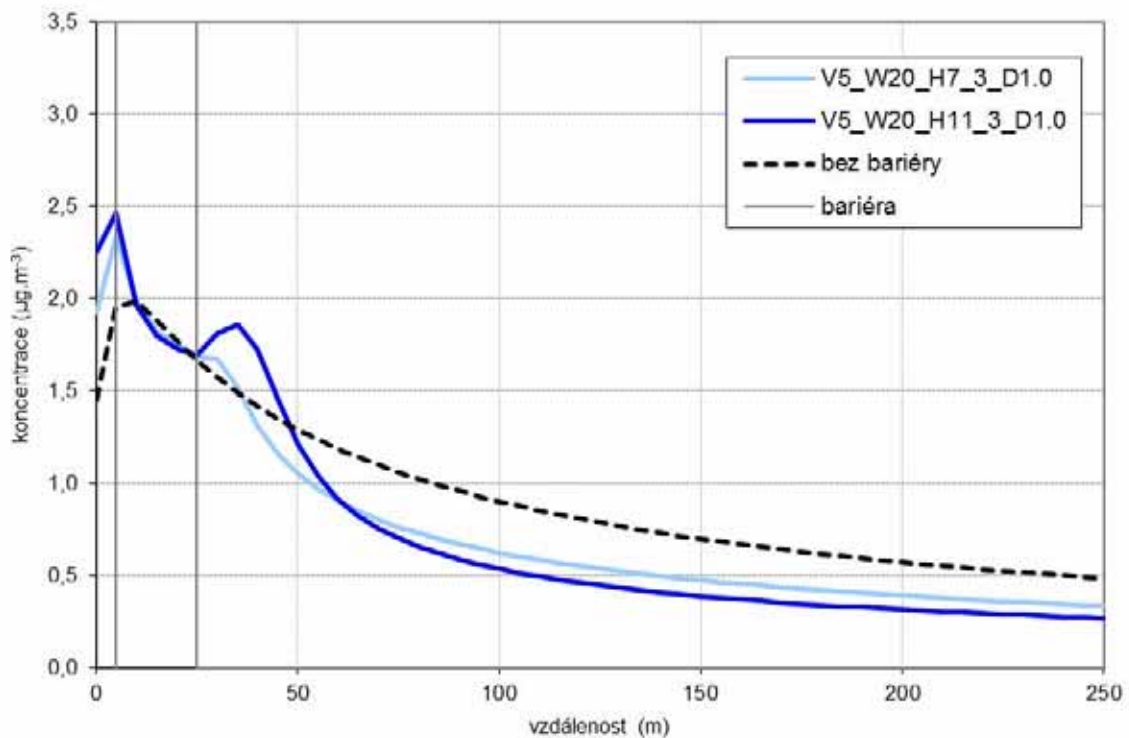
Zpracované výsledky modelování pro kombinace výšky (3, 7 a 11 m) a šířky (20 a 80 m) vegetační bariéry o hustotě  $D = 1$  složené z **jehličnatých stromů** a varianty referenční hladiny (1,5; 3 a 6 m) prezentují následující grafy:

- průběh koncentrací částic  $PM_{10}$  se vzdáleností od komunikace (Obr. 4.79. – 4.84.)
- průběh účinnosti bariéry vůči znečištění  $PM_{10}$  – vyjádřené jako procentuelní snížení koncentrací částic ve stavu s bariérou v porovnání se stavem bez bariéry (tj. bez bariéry = 100 %) – se vzdáleností od komunikace (Obr. 4.85. – 4.91.)
- hodnoty koncentrací částic  $PM_{10}$  ve vzdálenosti 200 m od hranice komunikace (Obr. 4.92. – 4.94.) % snížení koncentrací částic  $PM_{10}$  ve vzdálenosti 200 m od hranice komunikace (Obr. 4.95. – 4.97.)
- průběh koncentrací částic  $PM_{75}$  se vzdáleností od komunikace (Obr. 4.98. – 4.103.)
- průběh účinnosti bariéry vůči znečištění  $PM_{75}$  – vyjádřené jako procentuelní snížení koncentrací částic ve stavu s bariérou v porovnání se stavem bez bariéry (tj. bez bariéry = 100 %) – se vzdáleností od komunikace (Obr. 4.104. – 4.110.)
- hodnoty koncentrací částic  $PM_{75}$  ve vzdálenosti 200 m od hranice komunikace (Obr. 4.111 – 4.113.) % snížení koncentrací částic  $PM_{75}$  ve vzdálenosti 200 m od hranice komunikace (Obr. 4.114. – 4.116.)

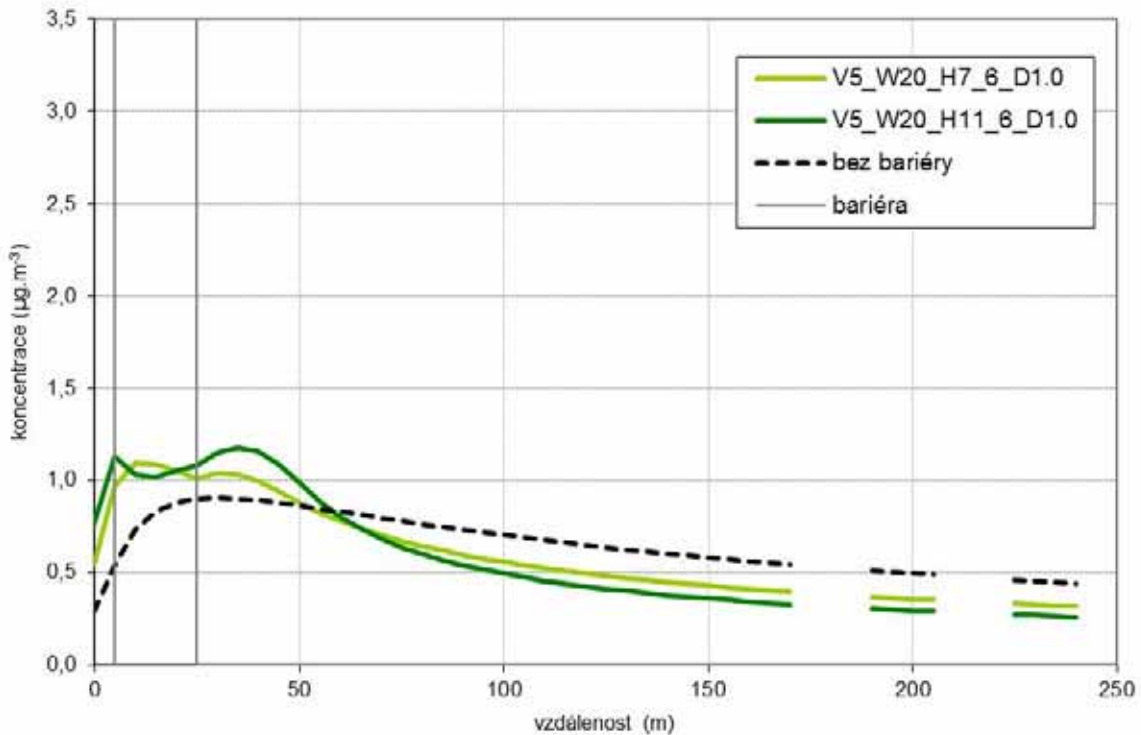
**Obr. 4.79. Průběh koncentrací částic PM<sub>10</sub> od silnice pro hustotu bariéry D = 1, šířku bariéry W = 20 m a různé výšky bariéry H = 3, 7 a 11 m, referenční hl. 1,5 m**



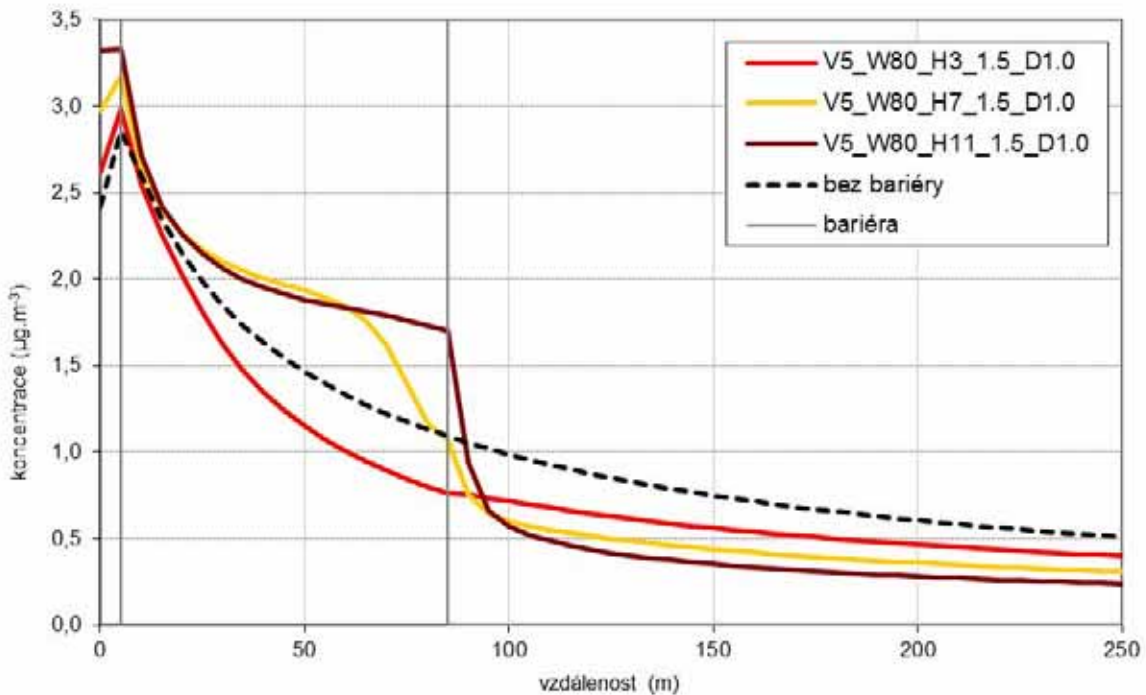
**Obr. 4.80. Průběh koncentrací částic PM<sub>10</sub> od silnice pro hustotu bariéry D = 1, šířku bariéry W = 20 m a různé výšky bariéry H = 3, 7 a 11 m, referenční hl. 3 m**



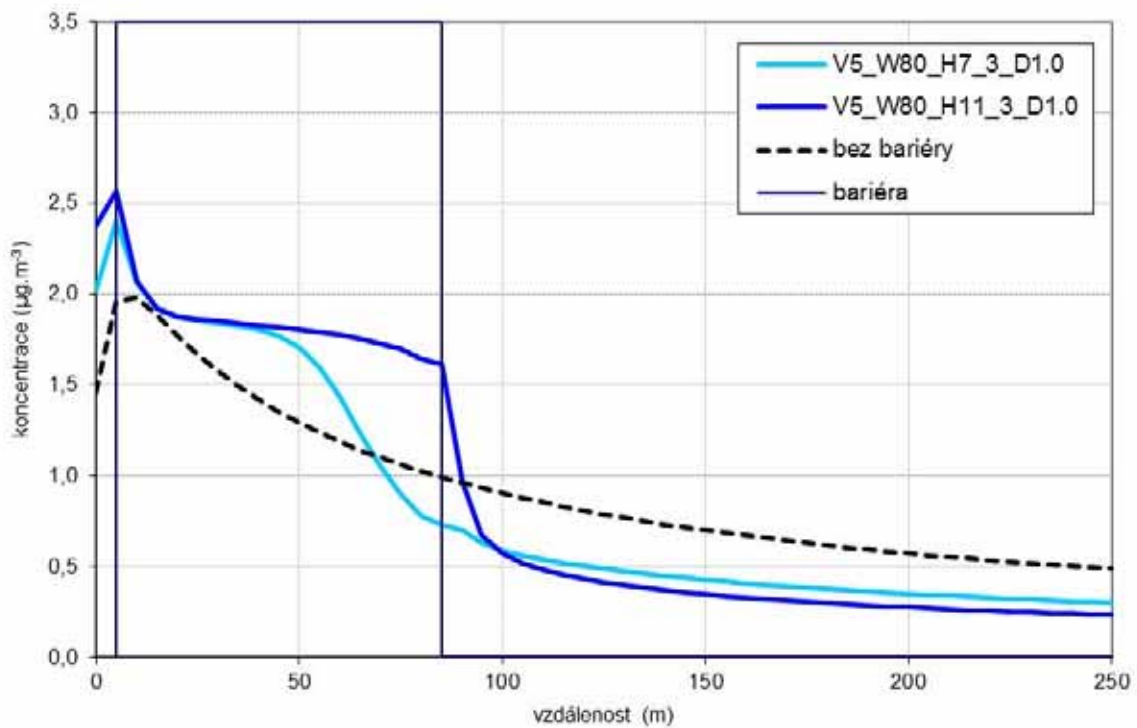
**Obr. 4.81. Průběh koncentrací částic PM<sub>10</sub> od silnice pro hustotu bariéry D = 1, šířku bariéry W = 20 m a různé výšky bariéry H = 3, 7 a 11 m, referenční hl. 6 m**



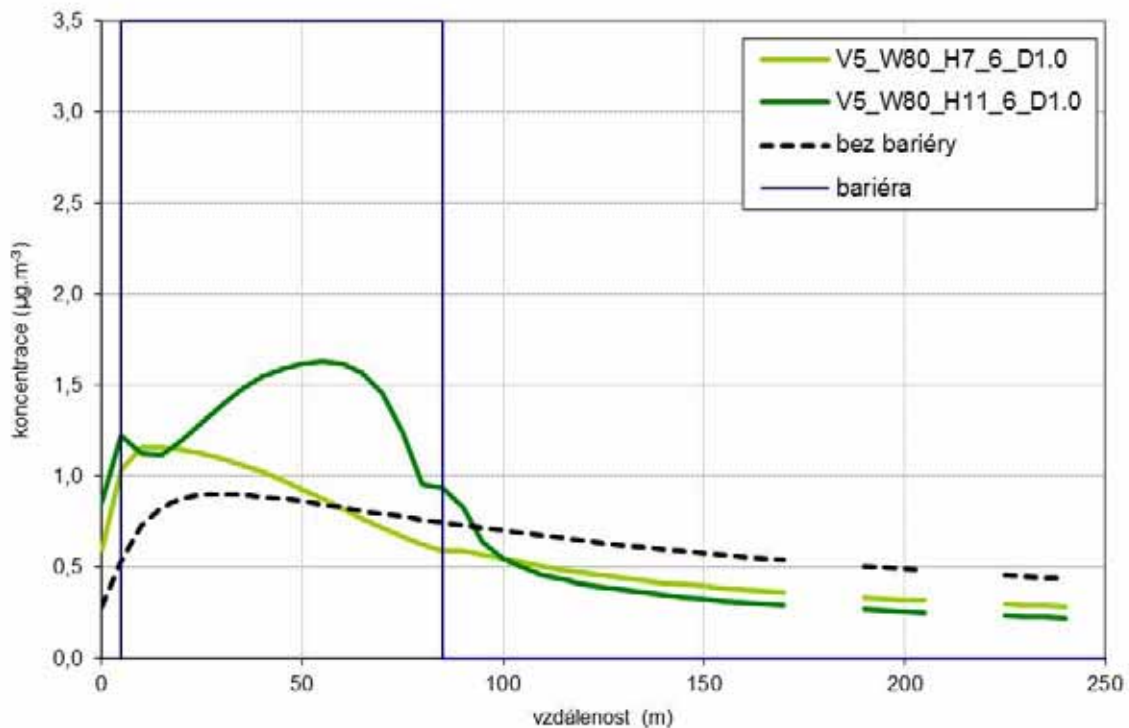
**Obr. 4.82. Průběh koncentrací částic PM<sub>10</sub> od silnice pro hustotu bariéry D = 1, šířku bariéry W = 80 m a různé výšky bariéry H = 3, 7 a 11 m, referenční hl. 6 m**



**Obr. 4.83.** Průběh koncentrací částic PM<sub>10</sub> od silnice pro hustotu bariéry D = 1, šířku bariéry W = 80 m a různé výšky bariéry H = 3, 7 a 11 m, referenční hl. 3 m

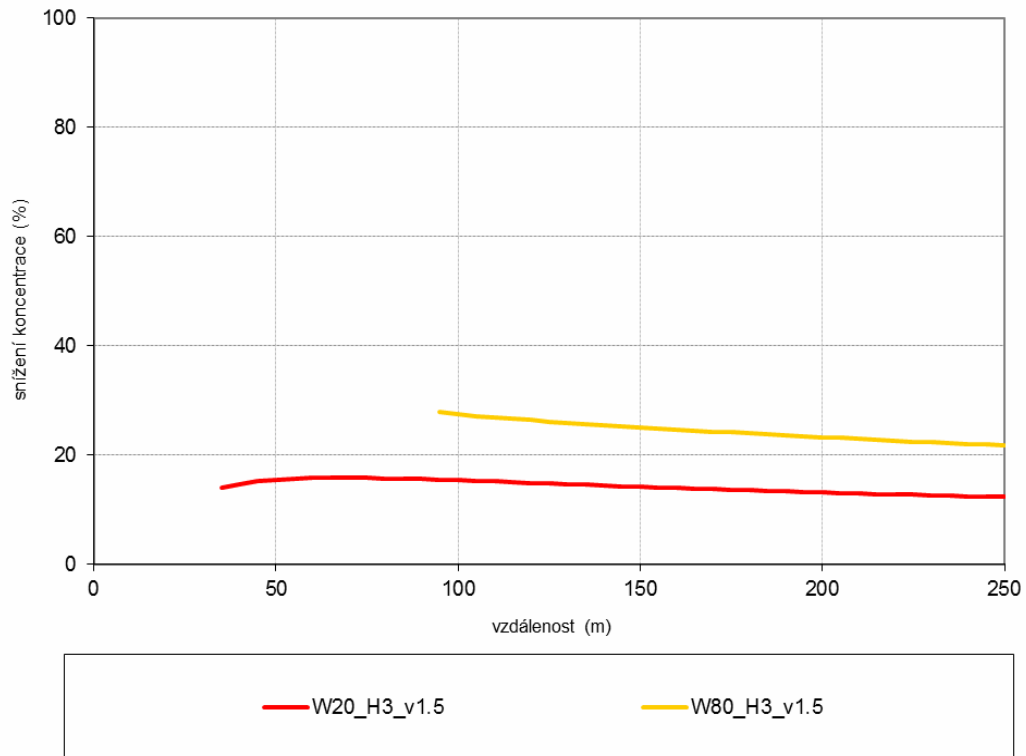


**Obr. 4.84.** Průběh koncentrací částic PM<sub>10</sub> od silnice pro hustotu bariéry D = 1, šířku bariéry W = 80 m a různé výšky bariéry H = 3, 7 a 11 m, referenční hl. 6 m

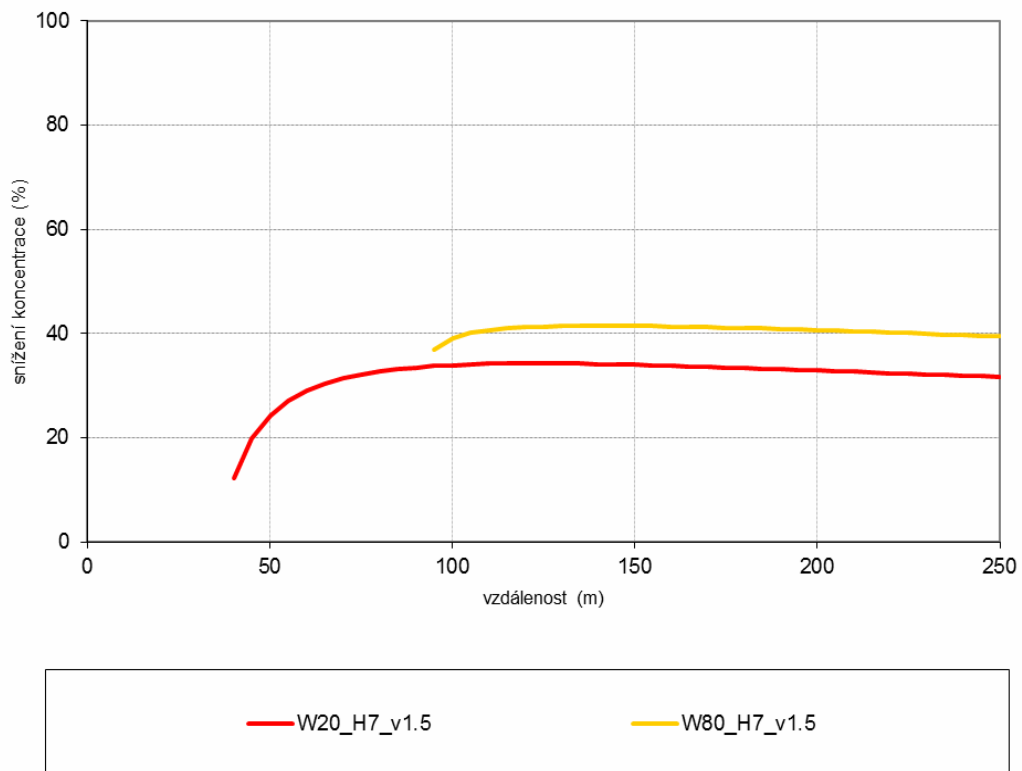




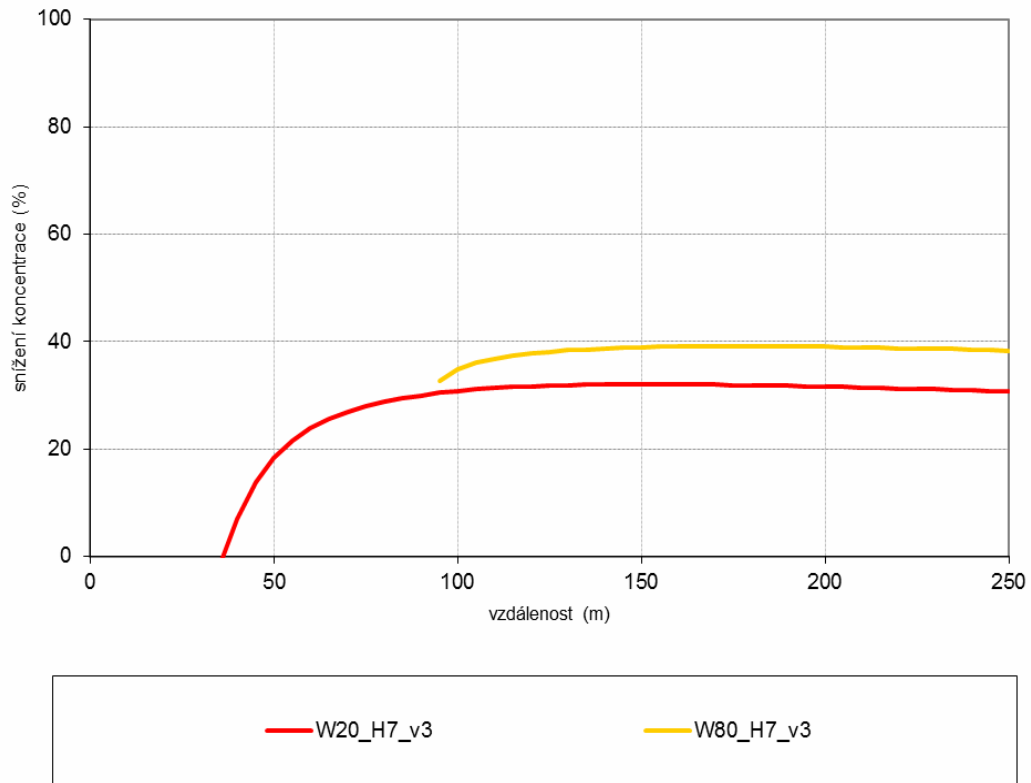
**Obr. 4.85. Průběh snížení koncentrací částic PM<sub>10</sub> se vzdáleností od silnice vlivem šířky bariéry (W), výška bariéry H = 3 m, hustota D = 1, referenční hl. 1,5 m**



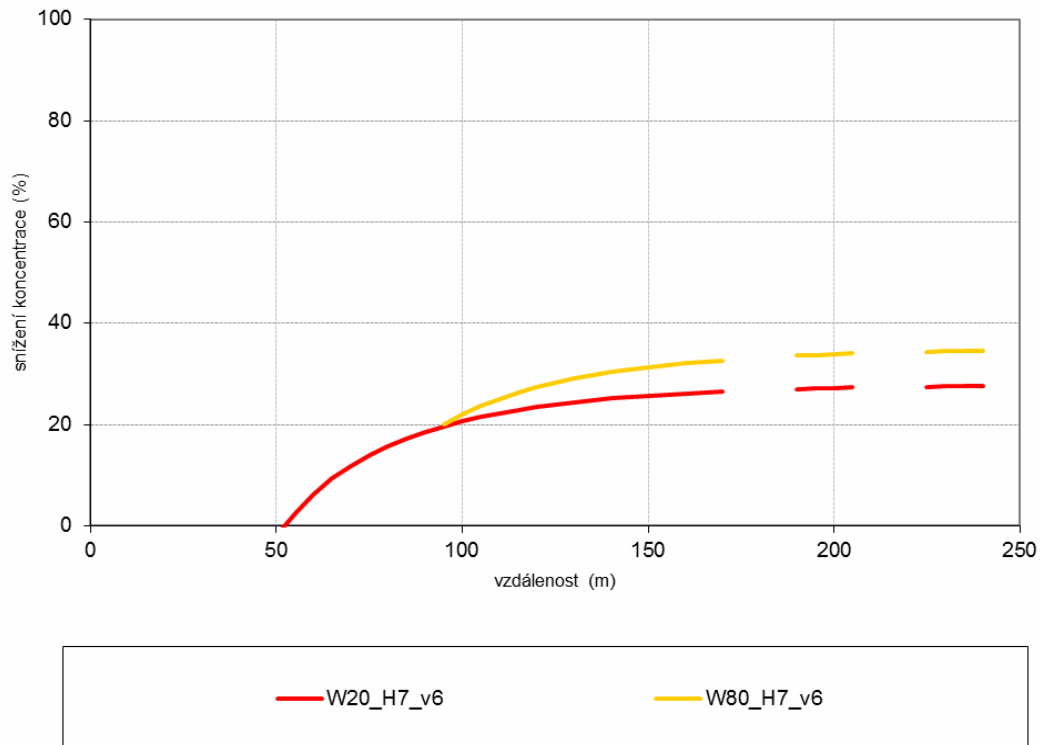
**Obr. 4.86. Průběh snížení koncentrací částic PM<sub>10</sub> se vzdáleností od silnice vlivem šířky bariéry (W), výška bariéry H = 7 m, hustota D = 1, referenční hl. 1,5 m**



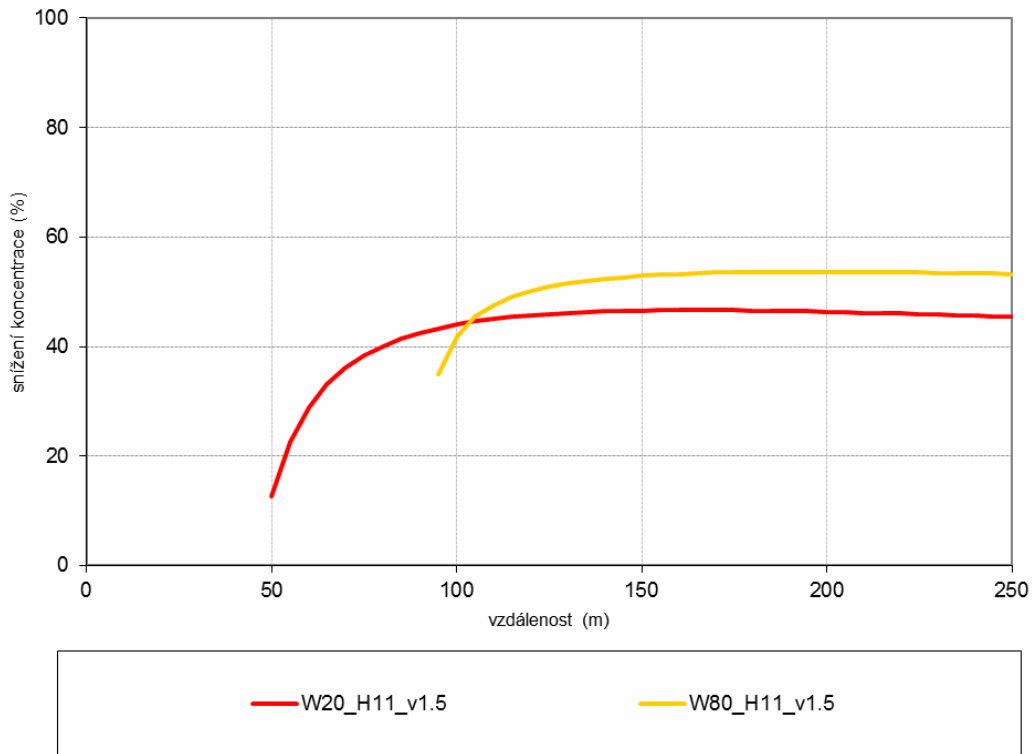
**Obr. 4.87. Průběh snížení koncentrací částic PM<sub>10</sub> se vzdáleností od silnice vlivem šířky bariéry (W), výška bariéry H = 7 m, hustota D = 1, referenční hl. 3 m**



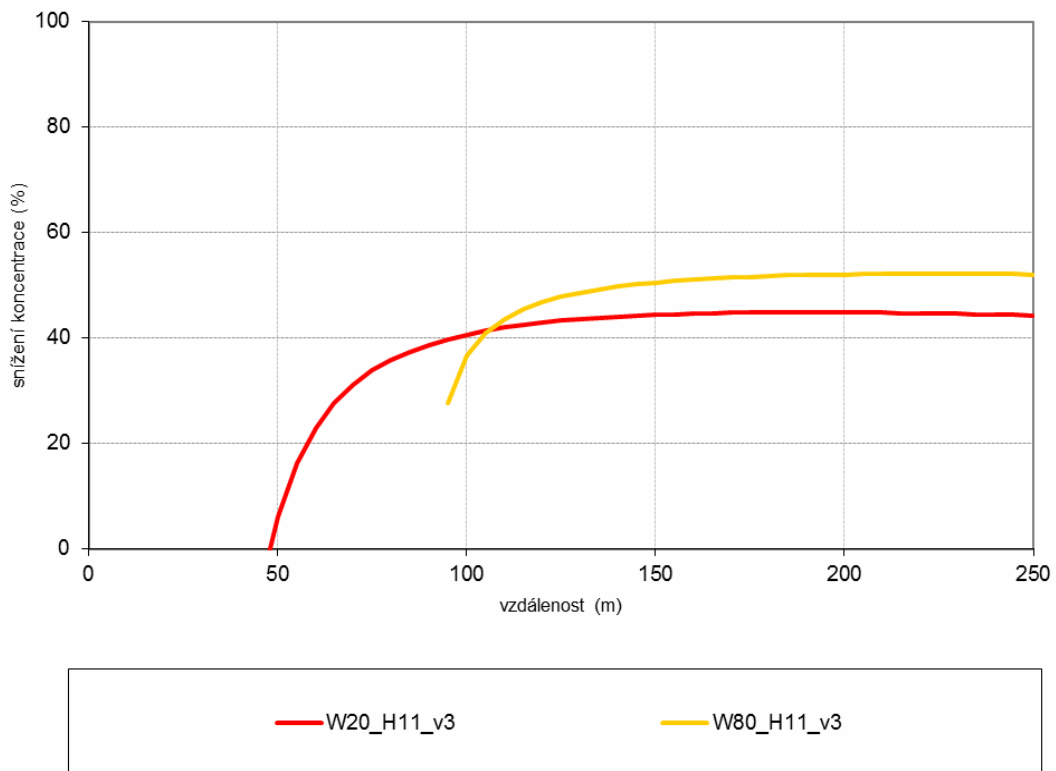
**Obr. 4.88. Průběh snížení koncentrací částic PM<sub>10</sub> se vzdáleností od silnice vlivem šířky bariéry (W), výška bariéry H = 7 m, hustota D = 1, referenční hl. 6 m**



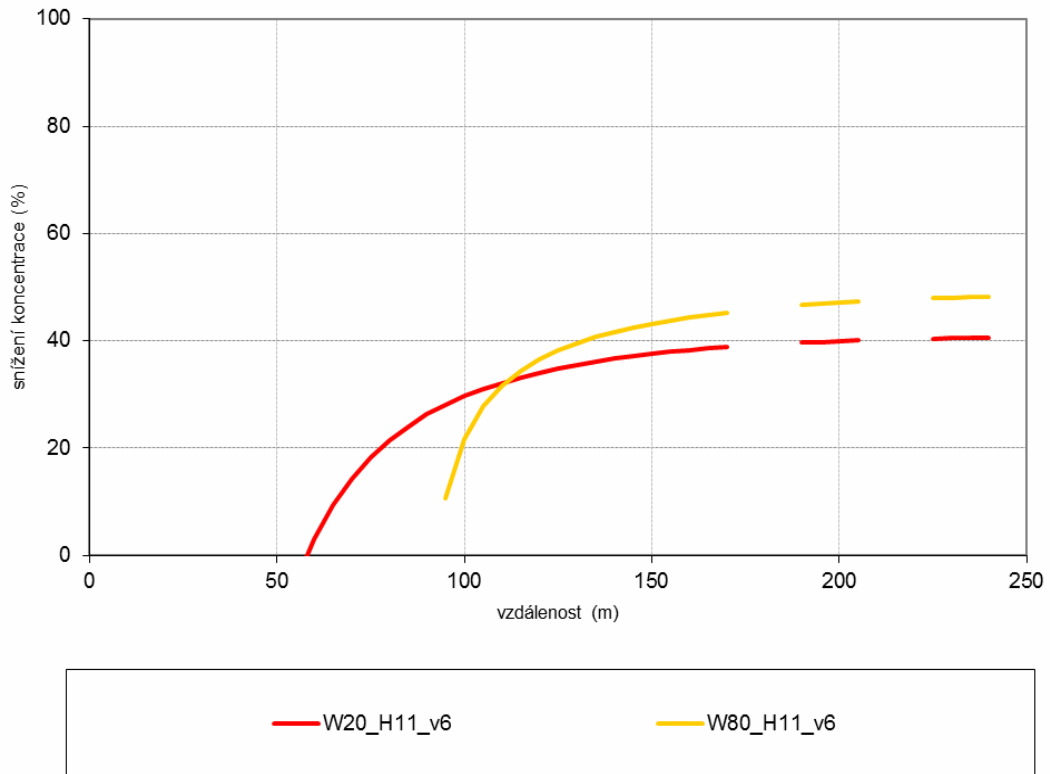
**Obr. 4.89. Průběh snížení koncentrací částic PM<sub>10</sub> se vzdáleností od silnice vlivem šířky bariéry (W), výška bariéry H = 11 m, hustota D = 1, referenční hl. 1,5 m**



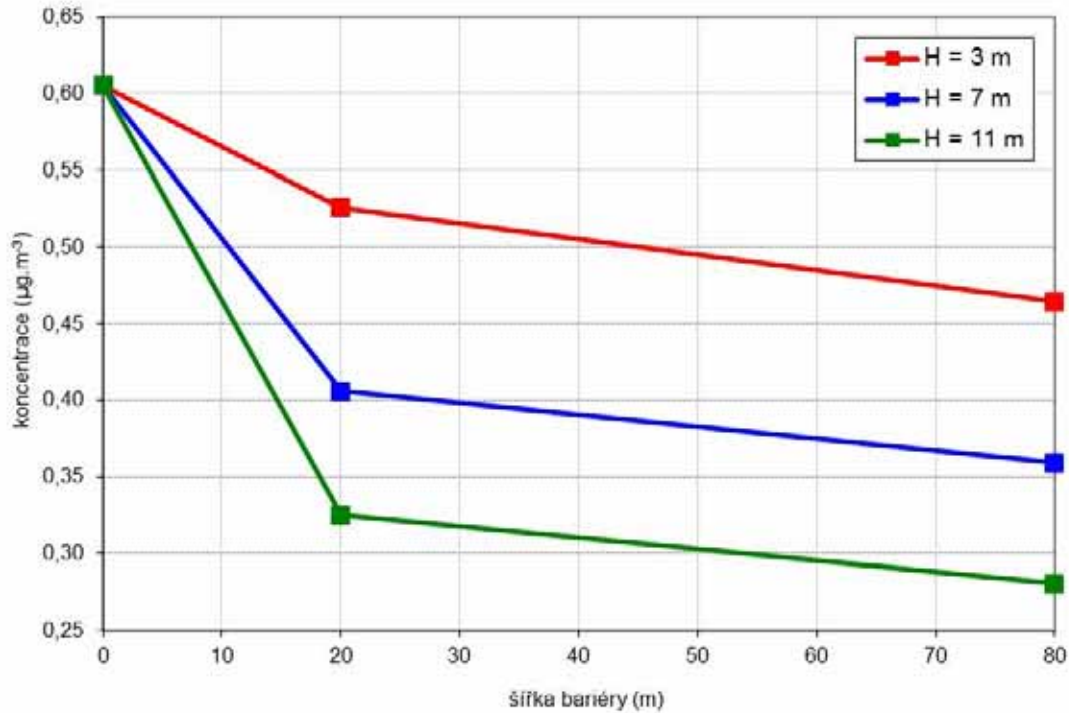
**Obr. 4.90. Průběh snížení koncentrací částic PM<sub>10</sub> se vzdáleností od silnice vlivem šířky bariéry (W), výška bariéry H = 11 m, hustota D = 1, referenční hl. 3 m**



**Obr. 4.91. Průběh snížení koncentrací částic PM<sub>10</sub> se vzdáleností od silnice vlivem šířky bariéry (W), výška bariéry H = 11 m, hustota D = 1, referenční hl. 6 m**

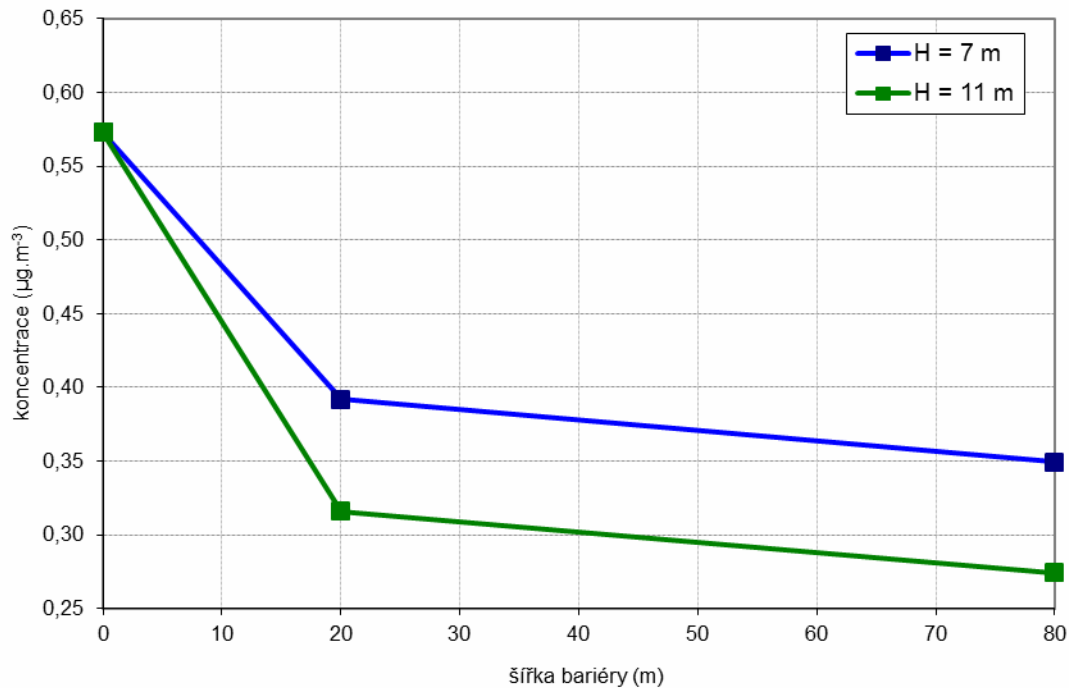


**Obr. 4.92. Hodnoty koncentrací částic PM<sub>10</sub> pro jednotlivé šířky a výšky bariéry ve vzdálenosti 200 m od hranice komunikace, referenční hl. 1,5 m**



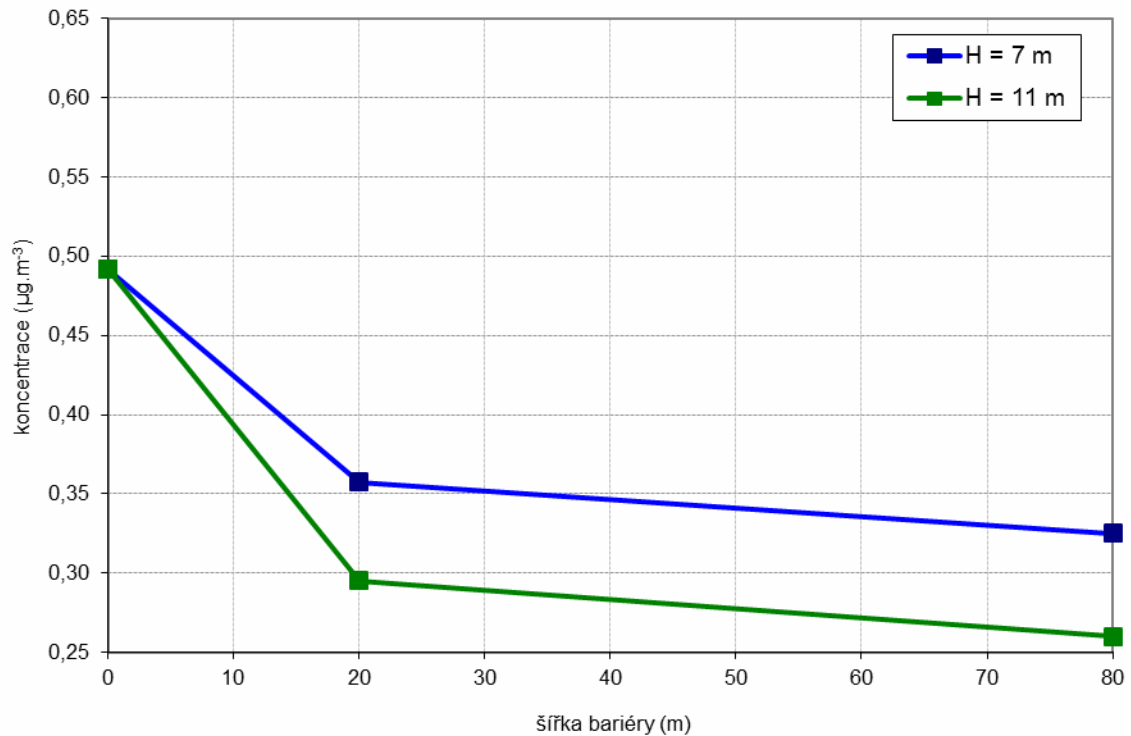
Pozn. Výchozí hodnota koncentrace (u hranice komunikace) je 3 µg.m<sup>-3</sup>; 0 = bez bariéry

**Obr. 4.93. Hodnoty koncentrací částic PM<sub>10</sub> pro jednotlivé šířky a výšky bariéry ve vzdálenosti 200 m od hranice komunikace, referenční hl. 3 m**



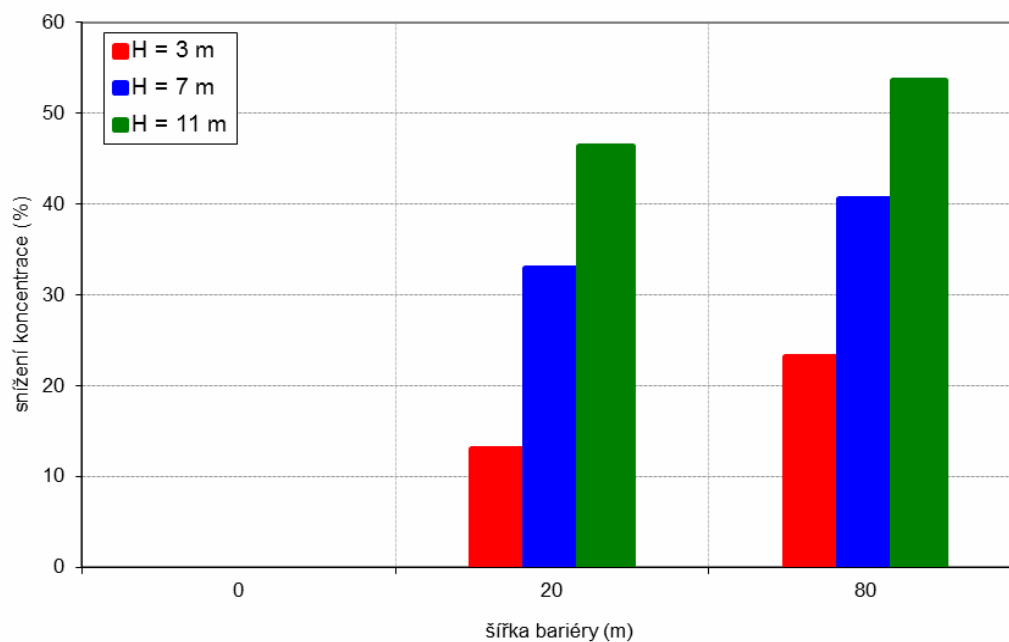
Pozn. Výchozí hodnota koncentrace (u hranice komunikace) je 3 µg.m<sup>-3</sup>; 0 = bez bariéry

**Obr. 4.94. Hodnoty koncentrací částic PM<sub>10</sub> pro jednotlivé šířky a výšky bariéry ve vzdálenosti 200 m od hranice komunikace, referenční hl. 6 m**



Pozn. Výchozí hodnota koncentrace (u hranice komunikace) je 3 µg.m<sup>-3</sup>; 0 = bez bariéry

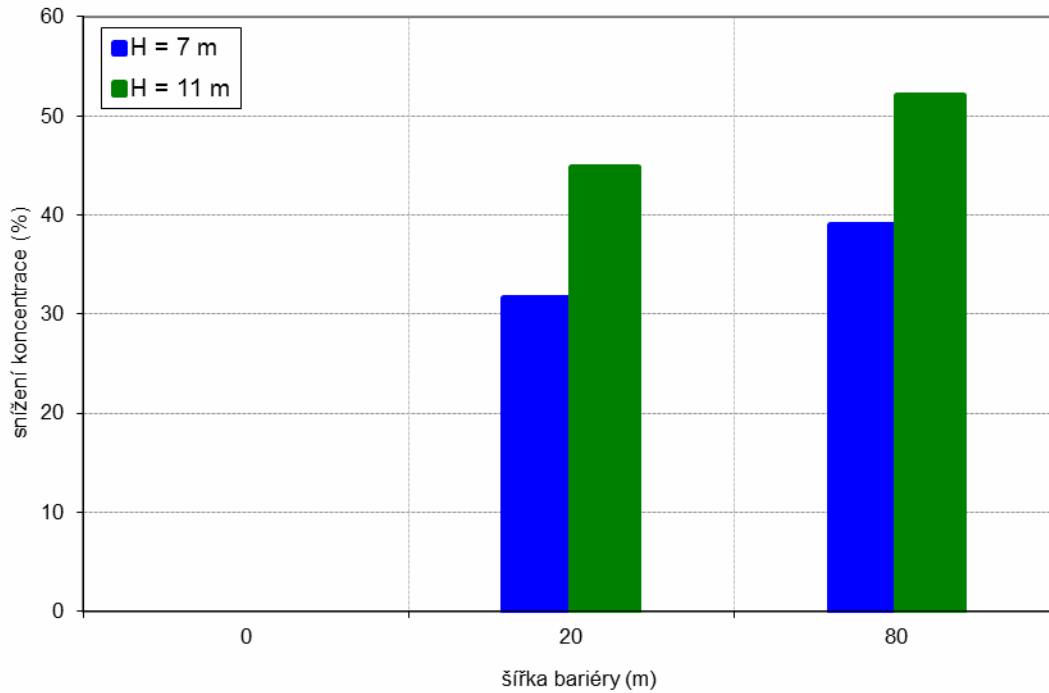
**Obr. 4.95. Snížení koncentrací částic PM<sub>10</sub> vlivem šířky a výšky bariéry ve vzdálenosti 200 m od hranice komunikace, referenční hl. 1,5 m**



Pozn. Procentuelní snížení koncentrací částic ve stavu s bariérou v porovnání se stavem bez bariéry

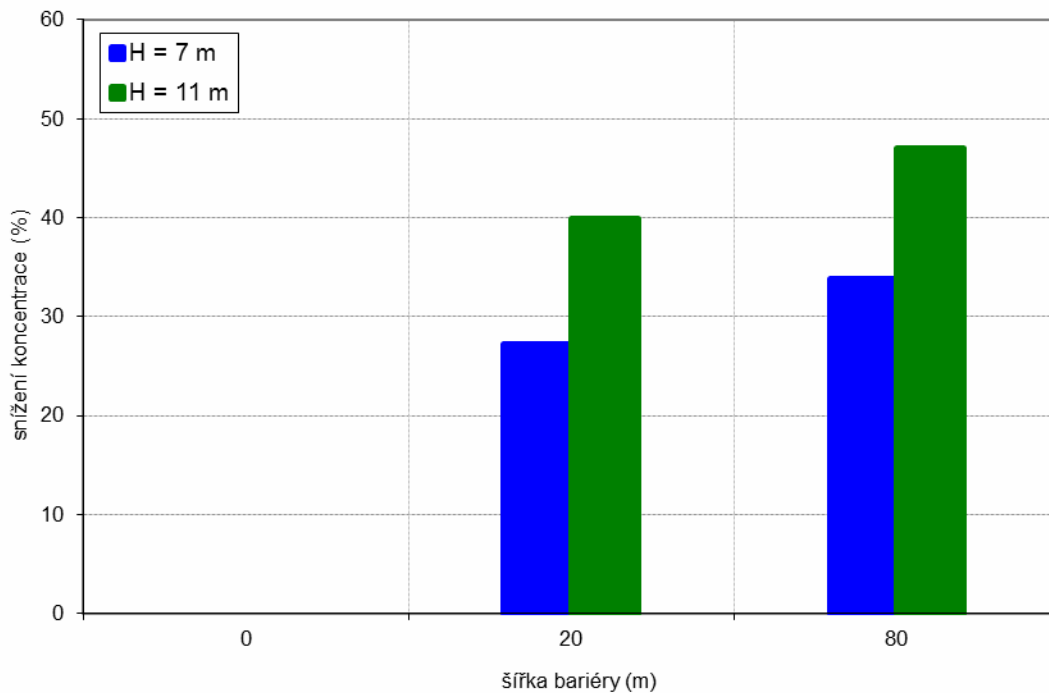


**Obr. 4.96. Snížení koncentrací částic PM<sub>10</sub> vlivem šířky a výšky bariéry ve vzdálenosti 200 m od hranice komunikace, referenční hl. 3 m**



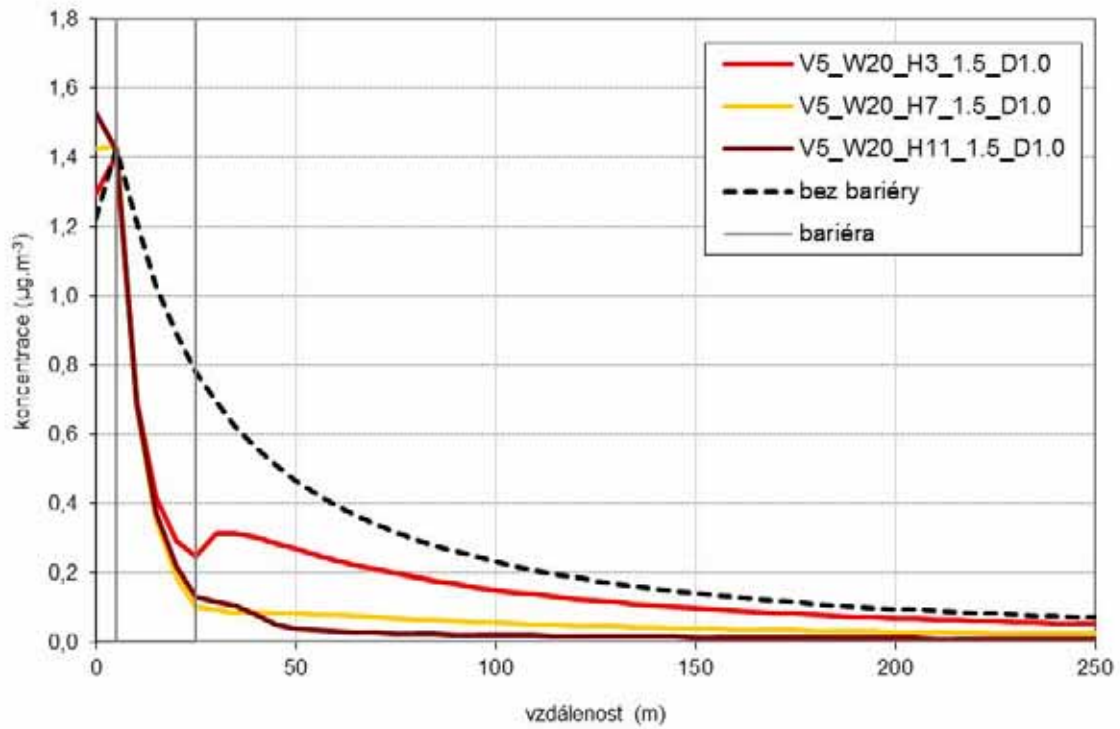
Pozn. Procentuelní snížení koncentrací částic ve stavu s bariérou v porovnání se stavem bez bariéry

**Obr. 4.97. Snížení koncentrací částic PM<sub>10</sub> vlivem šířky a výšky bariéry ve vzdálenosti 200 m od hranice komunikace, referenční hl. 6 m**

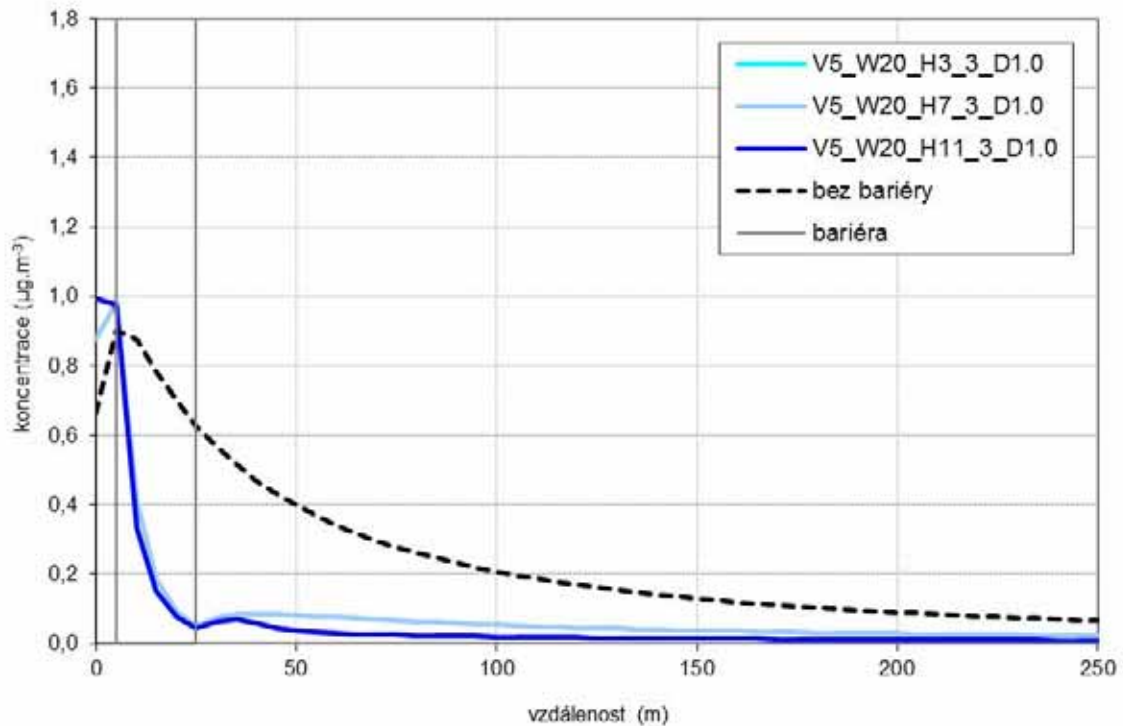


Pozn. Procentuelní snížení koncentrací částic ve stavu s bariérou v porovnání se stavem bez bariéry

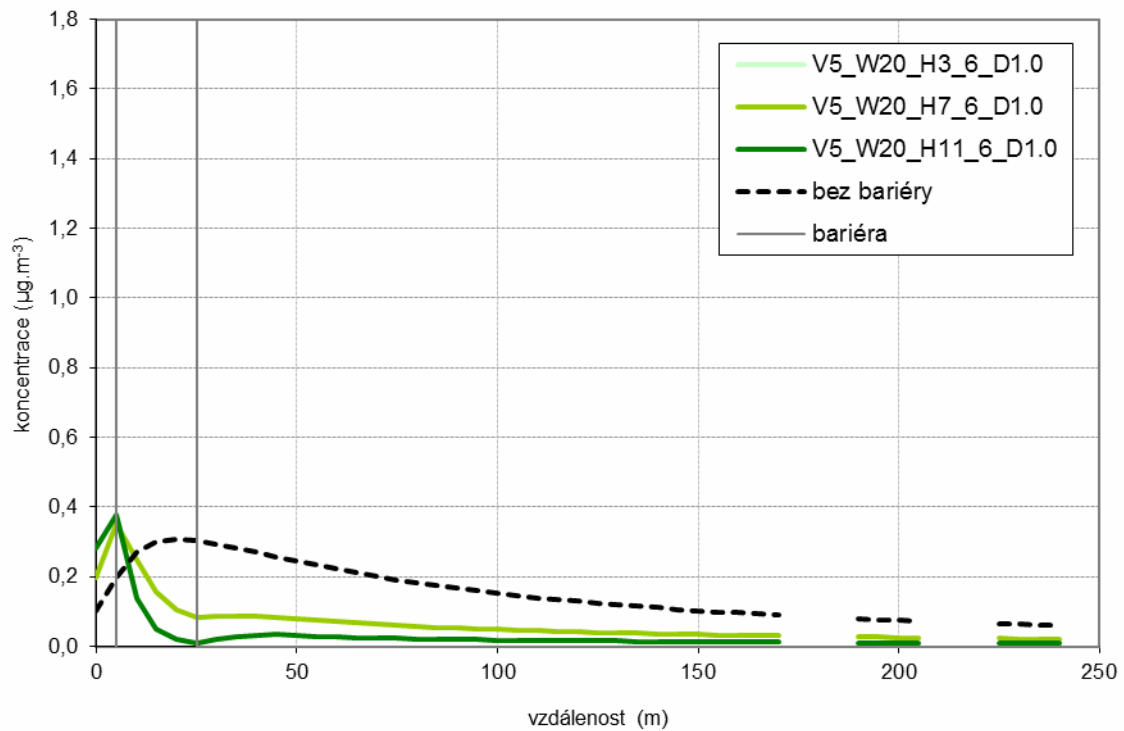
Obr. 4.98. Průběh koncentrací částic PM<sub>75</sub> od silnice pro hustotu bariéry D = 1, šířku bariéry W = 20 m a různé výšky bariéry H = 3, 7 a 11 m, referenční hl. 1,5 m



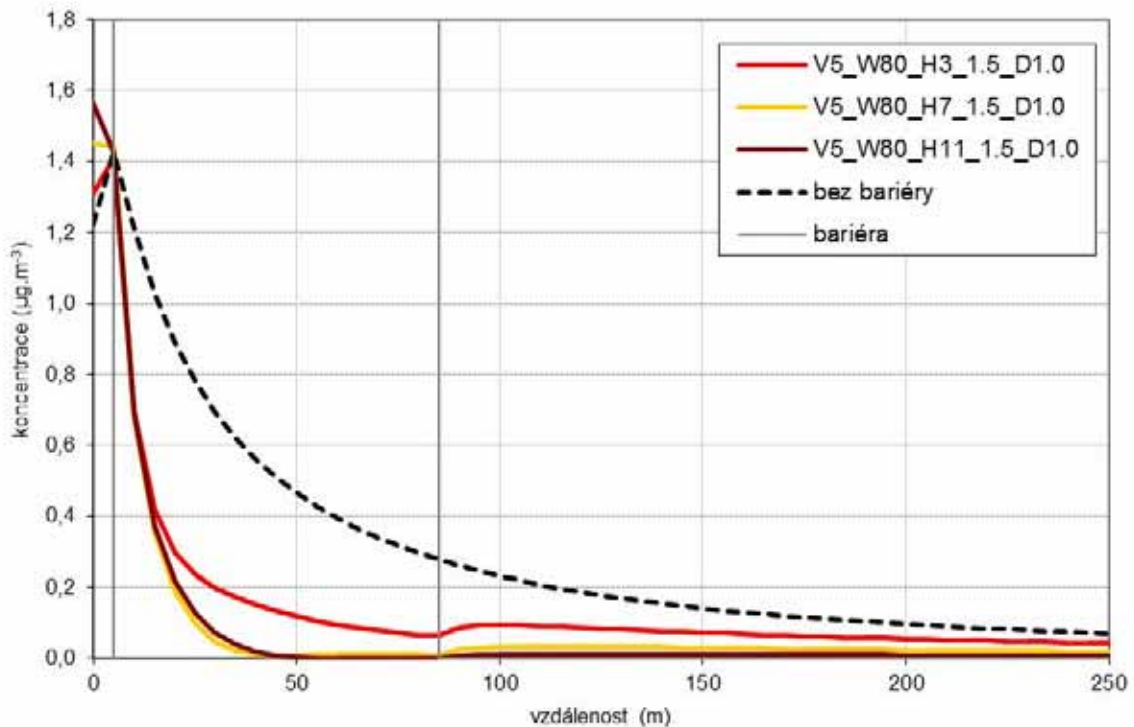
Obr. 4.99. Průběh koncentrací částic PM<sub>75</sub> od silnice pro hustotu bariéry D = 1, šířku bariéry W = 20 m a různé výšky bariéry H = 3, 7 a 11 m, referenční hl. 3 m



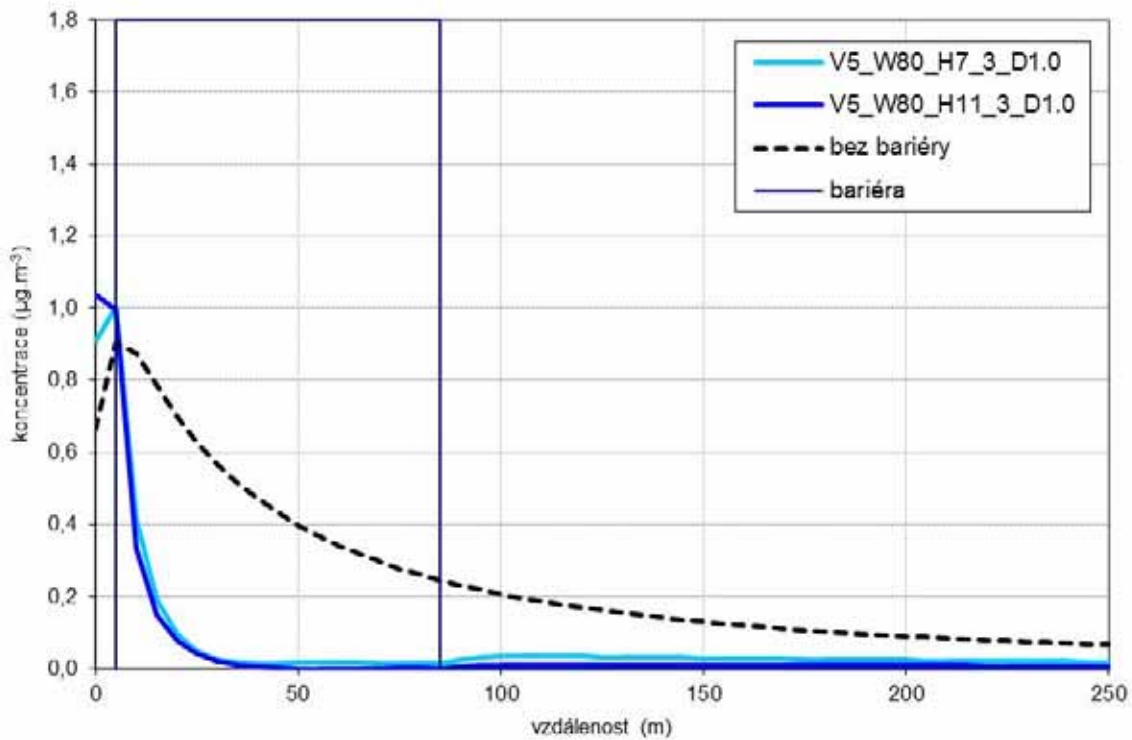
**Obr. 4.100. Průběh koncentrací částic PM<sub>75</sub> od silnice pro hustotu bariéry D = 1, šířku bariéry W = 20 m a různé výšky bariéry H = 3, 7 a 11 m, referenční hl. 6 m**



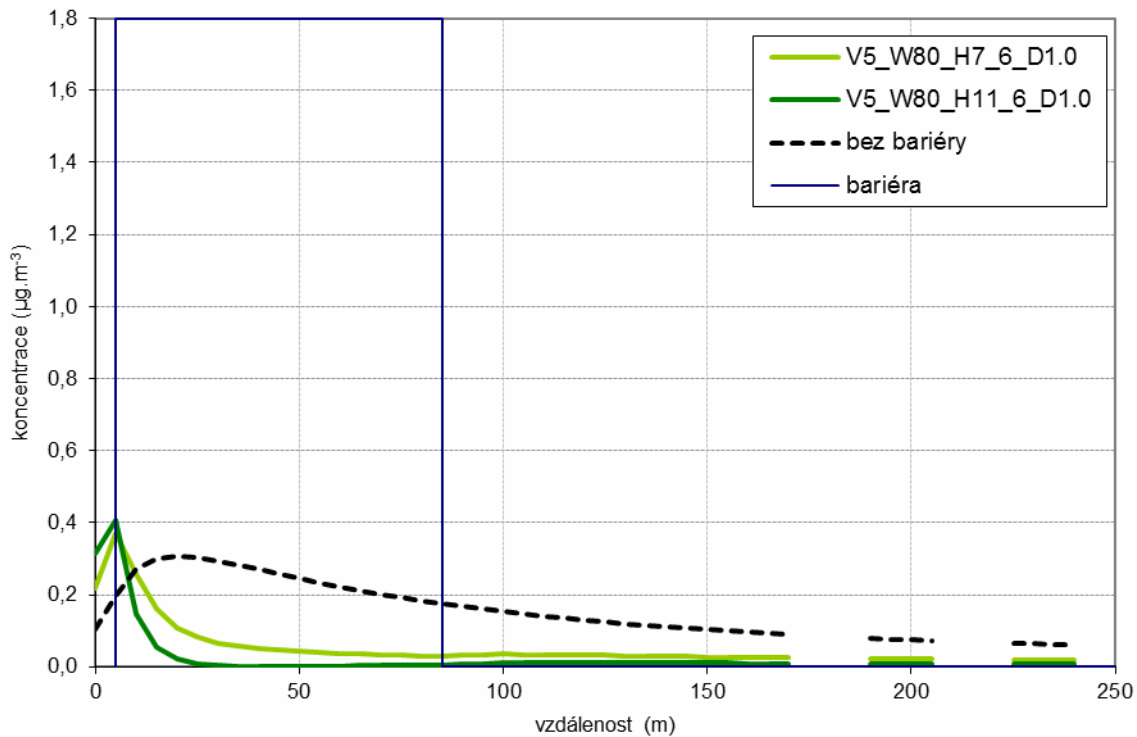
**Obr. 4.101. Průběh koncentrací částic PM<sub>75</sub> od silnice pro hustotu bariéry D = 1, šířku bariéry W = 80 m a různé výšky bariéry H = 3, 7 a 11 m, referenční hl. 1,5 m**



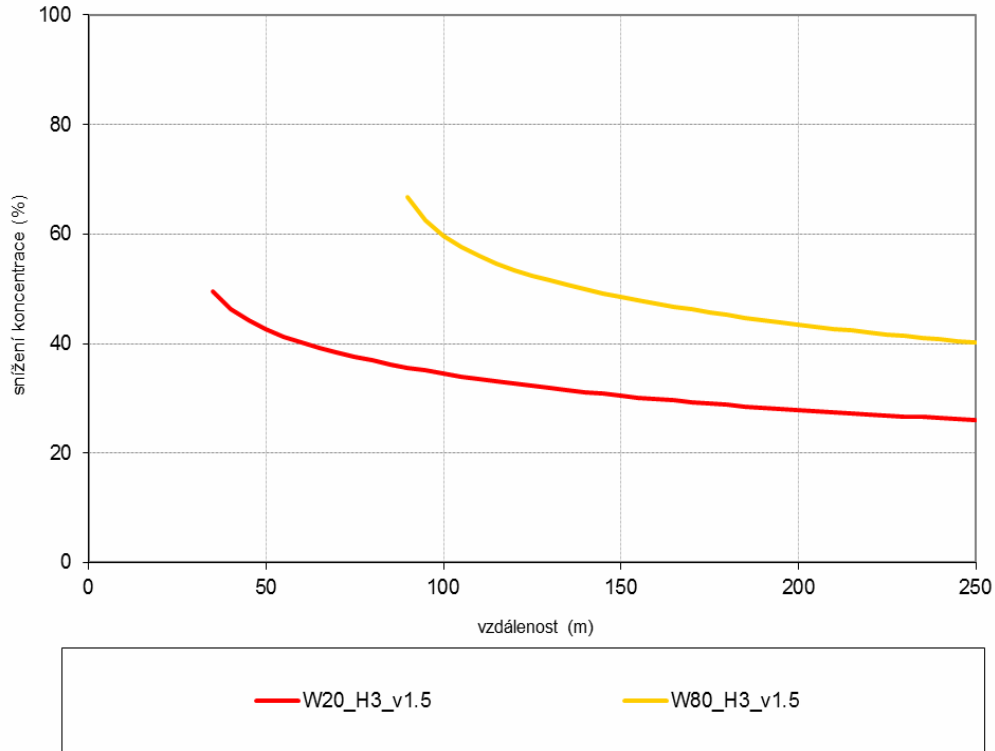
**Obr. 4.102. Průběh koncentrací částic PM<sub>75</sub> od silnice pro hustotu bariéry D = 1, šířku bariéry W = 80 m a různé výšky bariéry H = 3, 7 a 11 m, referenční hl. 3 m**



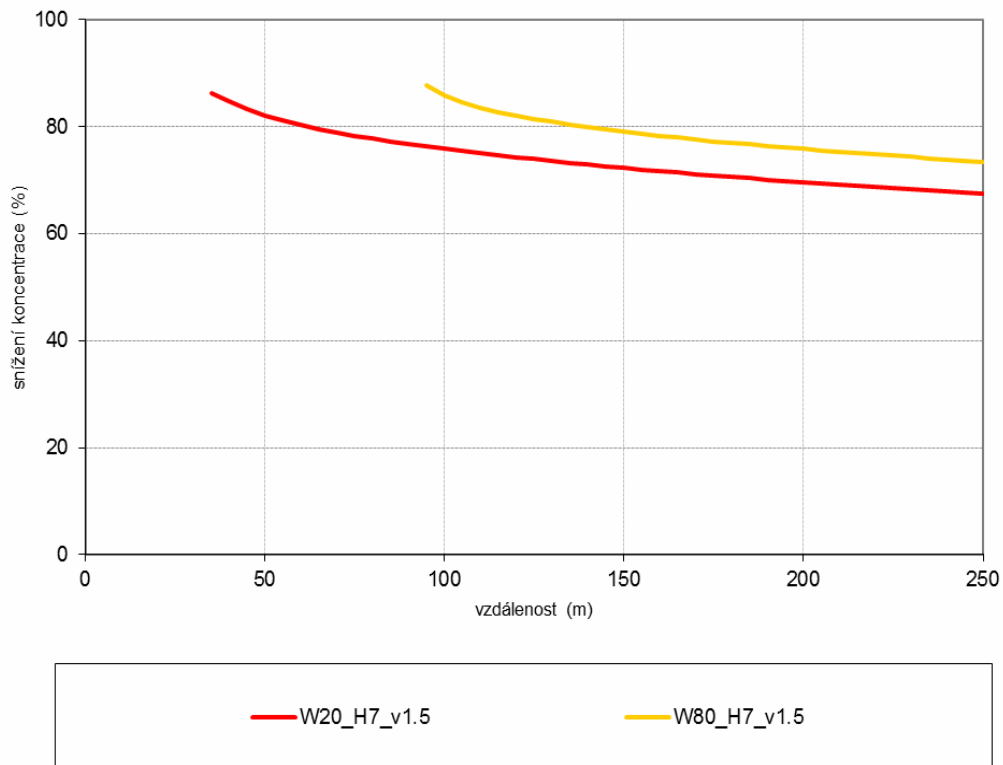
**Obr. 4.103. Průběh koncentrací částic PM<sub>75</sub> od silnice pro hustotu bariéry D = 1, šířku bariéry W = 80 m a různé výšky bariéry H = 3, 7 a 11 m, referenční hl. 6 m**



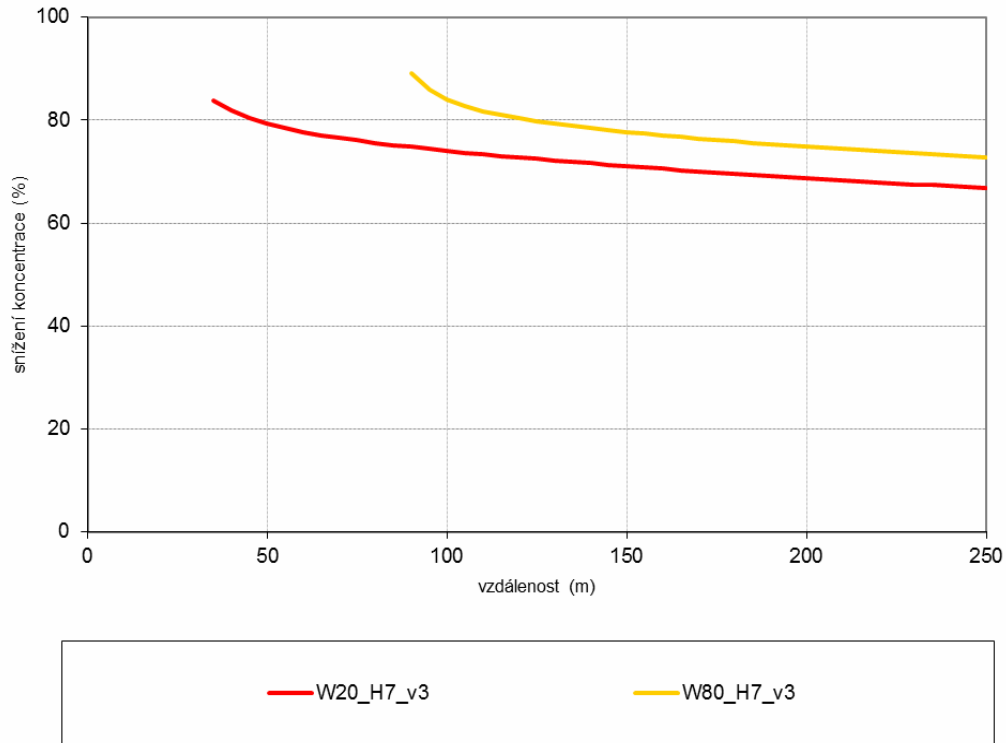
**Obr. 4.104. Průběh snížení koncentrací částic PM<sub>75</sub> se vzdáleností od silnice vlivem šířky bariéry (W), výška bariéry H = 3 m, hustota D = 1, referenční hl. 1,5 m**



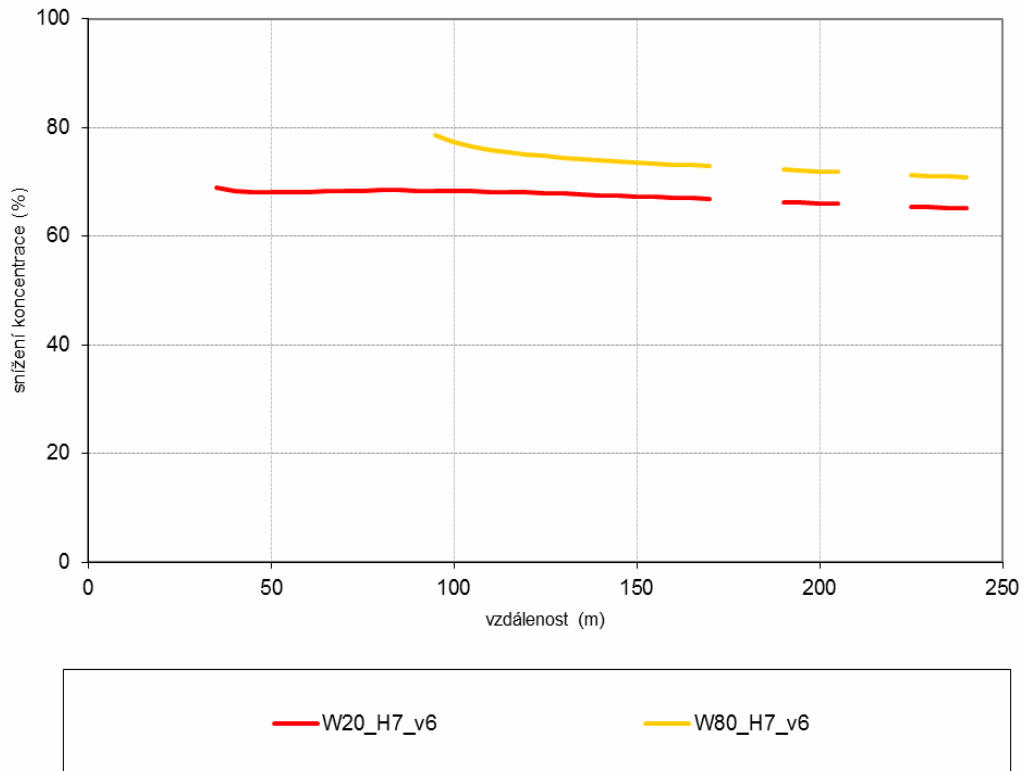
**Obr. 4.105. Průběh snížení koncentrací částic PM<sub>75</sub> se vzdáleností od silnice vlivem šířky bariéry (W), výška bariéry H = 7 m, hustota D = 1, referenční hl. 1,5 m**



**Obr. 4.106. Průběh snížení koncentrací částic PM<sub>75</sub> se vzdáleností od silnice vlivem šířky bariéry (W), výška bariéry H = 7 m, hustota D = 1, referenční hl. 3 m**

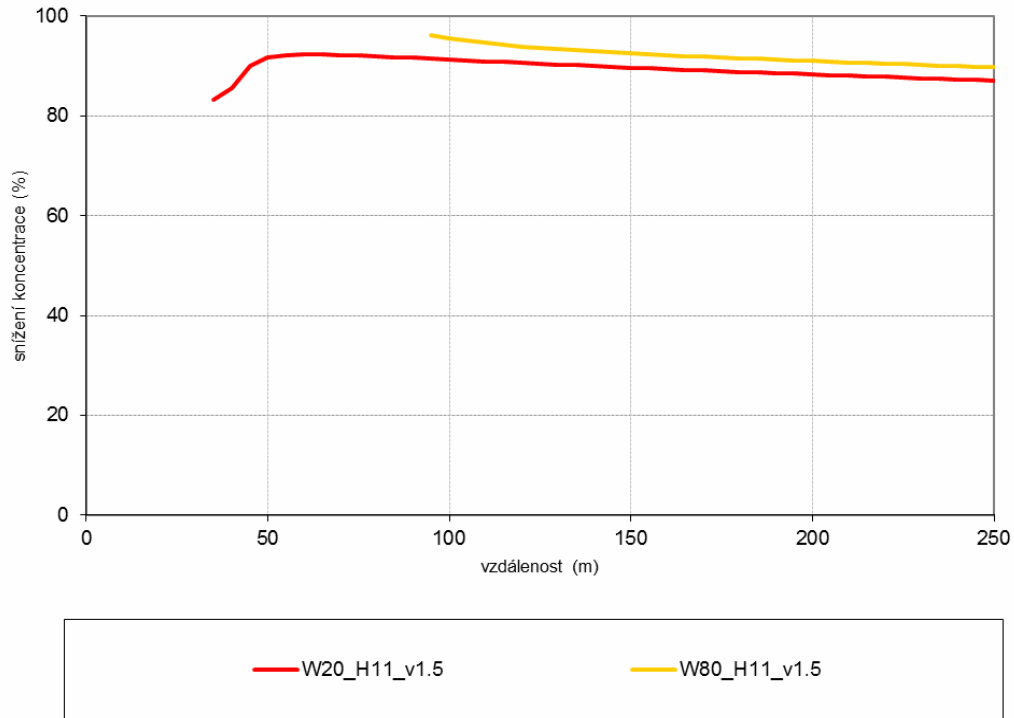


**Obr. 4.107. Průběh snížení koncentrací částic PM<sub>75</sub> se vzdáleností od silnice vlivem šířky bariéry (W), výška bariéry H = 7 m, hustota D = 1, referenční hl. 6 m**

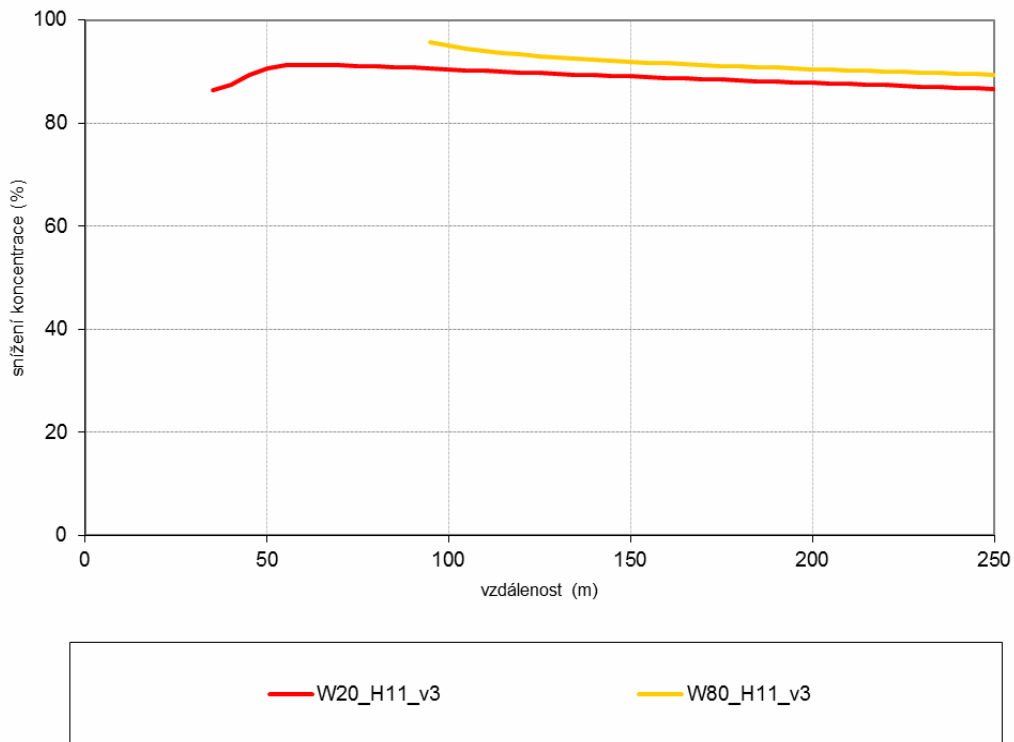




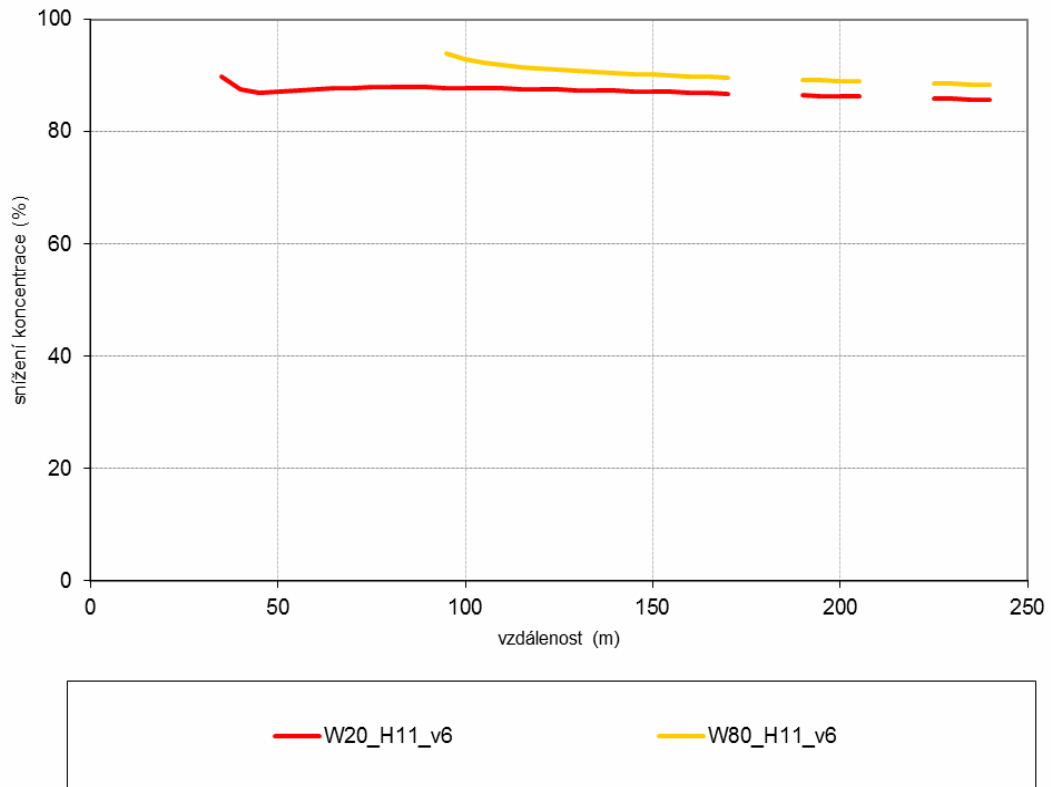
**Obr. 4.108. Průběh snížení koncentrací částic PM<sub>7.5</sub> se vzdáleností od silnice vlivem šířky bariéry (W), výška bariéry H = 11 m, hustota D = 1, referenční hl. 1,5 m**



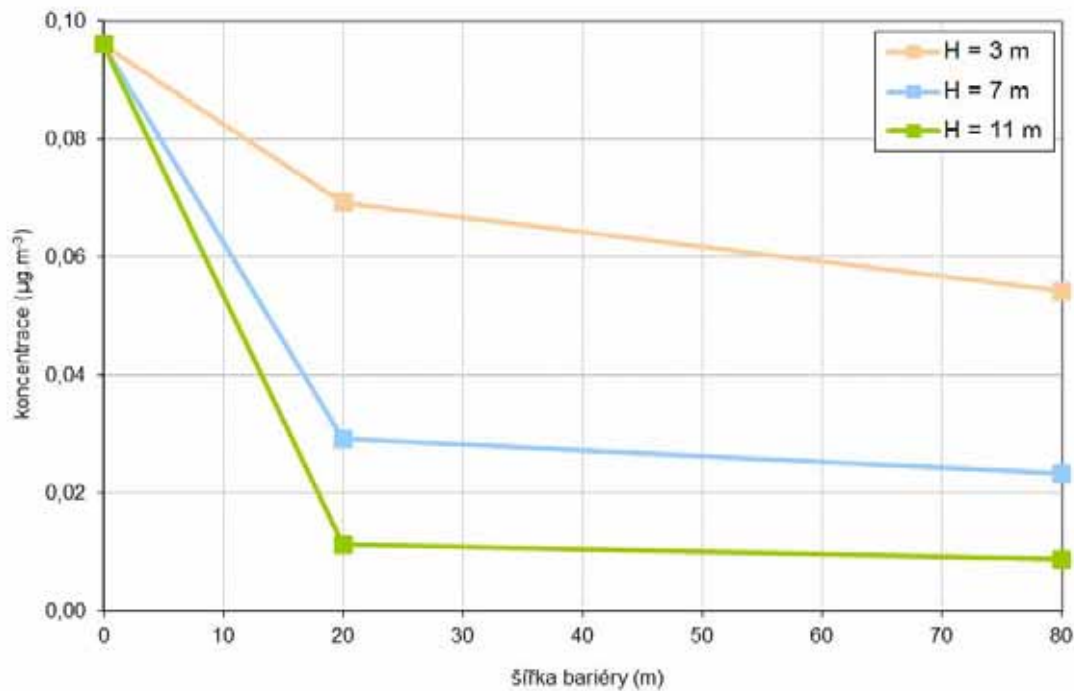
**Obr. 4.109. Průběh snížení koncentrací částic PM<sub>7.5</sub> se vzdáleností od silnice vlivem šířky bariéry (W), výška bariéry H = 11 m, hustota D = 1, referenční hl. 3 m**



**Obr. 4.110. Průběh snížení koncentrací částic PM<sub>7.5</sub> se vzdáleností od silnice vlivem šířky bariéry (W), výška bariéry H = 11 m, hustota D = 1, referenční hl. 6 m**

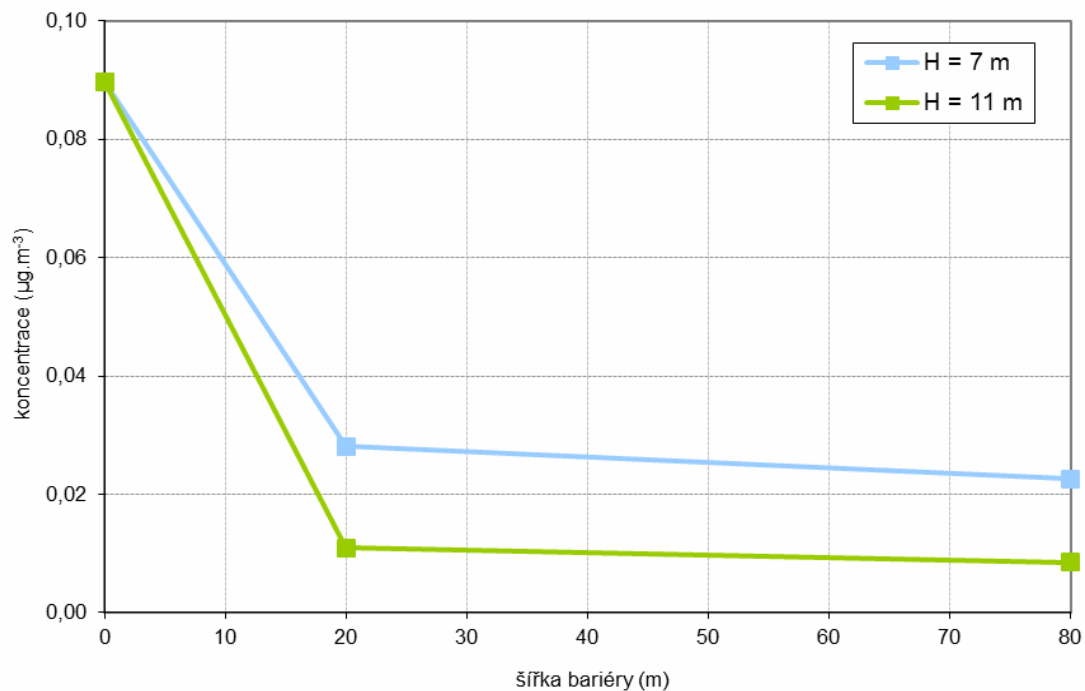


**Obr. 4.111. Hodnoty koncentrací částic PM<sub>75</sub> pro jednotlivé šířky a výšky bariéry ve vzdálenosti 200 m od hranice komunikace, referenční hl. 1,5 m**



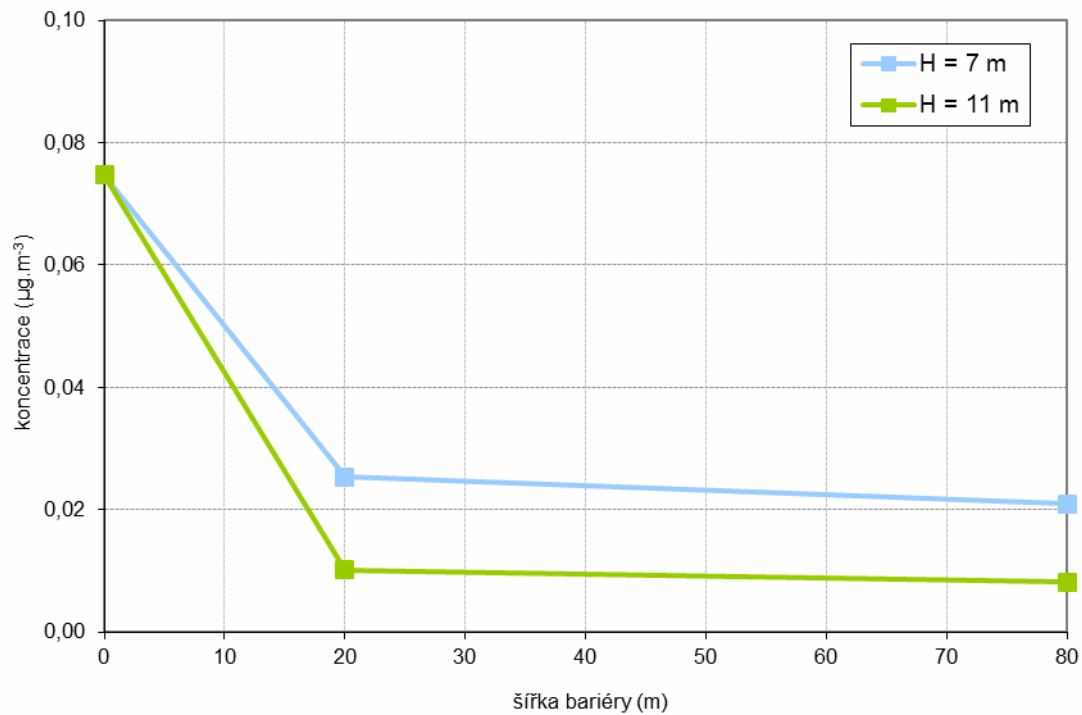
Pozn. Výchozí hodnota koncentrace (u hranice komunikace) je 3 µg.m<sup>-3</sup>; 0 = bez bariéry

**Obr. 4.112. Hodnoty koncentrací částic PM<sub>75</sub> pro jednotlivé šířky a výšky bariéry ve vzdálenosti 200 m od hranice komunikace, referenční hl. 3 m**



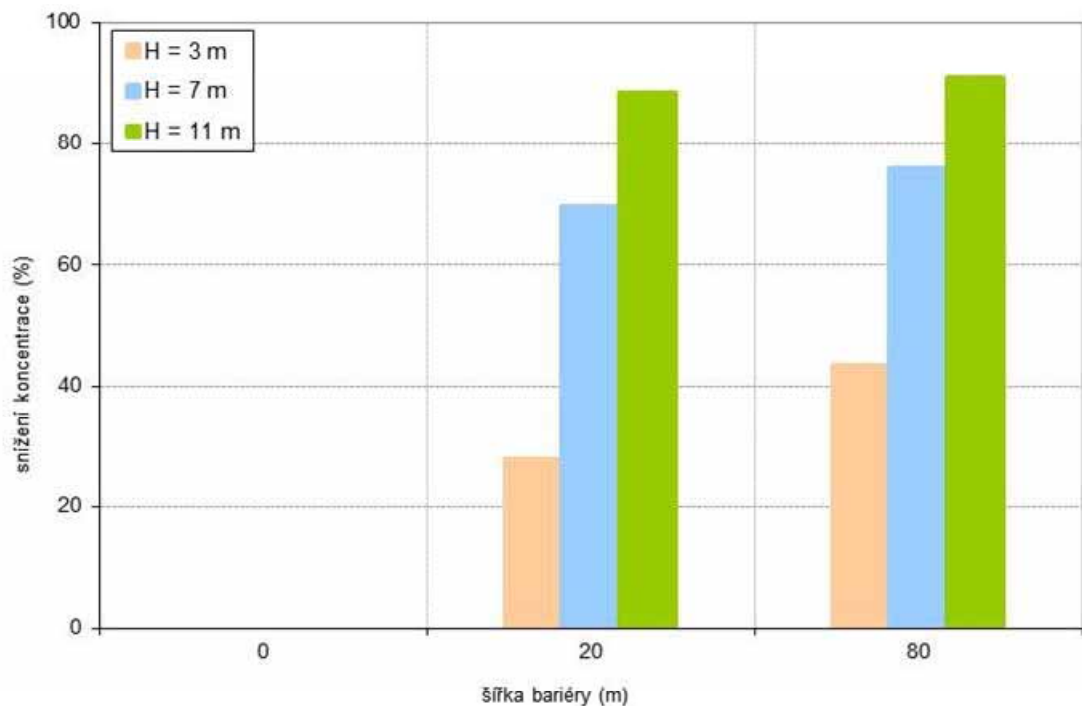
Pozn. Výchozí hodnota koncentrace (u hranice komunikace) je 3 µg.m<sup>-3</sup>; 0 = bez bariéry

**Obr. 4.113. Hodnoty koncentrací částic PM<sub>75</sub> pro jednotlivé šířky a výšky bariéry ve vzdálenosti 200 m od hranice komunikace, referenční hl. 6 m**



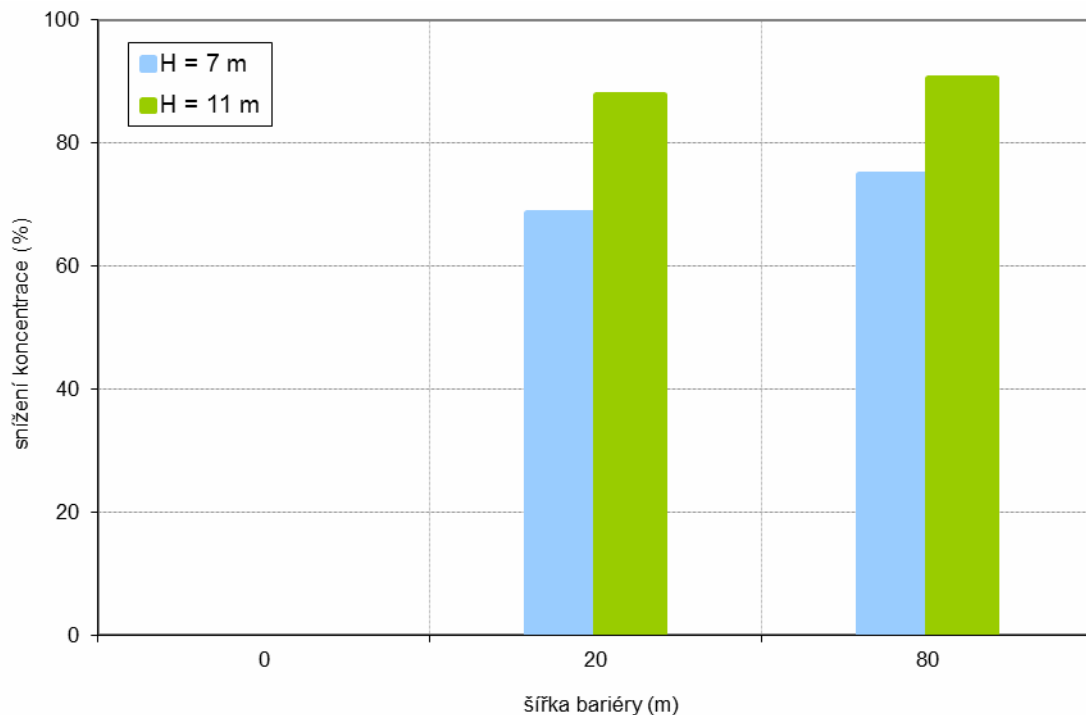
Pozn. Výchozí hodnota koncentrace (u hranice komunikace) je 3 µg.m<sup>-3</sup>; 0 = bez bariéry

**Obr. 4.114. Snížení koncentrací částic PM<sub>75</sub> vlivem šířky a výšky bariéry ve vzdálenosti 200 m od hranice komunikace, referenční hl. 1,5 m**



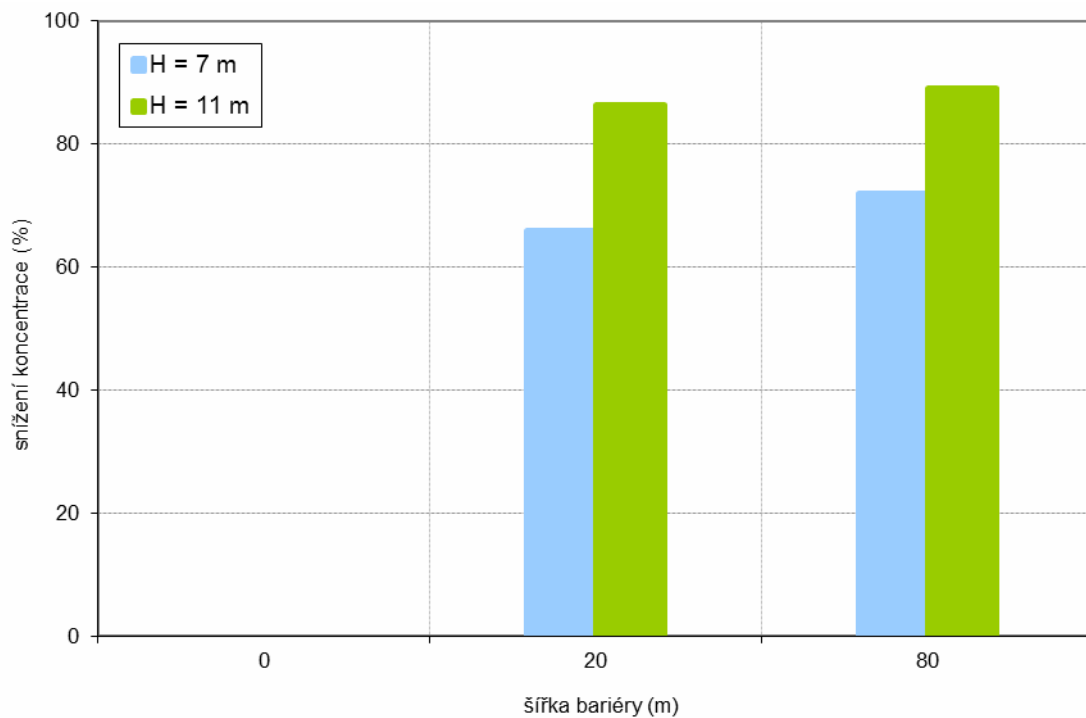
Pozn. Procentuelní snížení koncentrací částic ve stavu s bariérou v porovnání se stavem bez bariéry

**Obr. 4.115. Snížení koncentrací částic PM<sub>75</sub> vlivem šířky a výšky bariéry ve vzdálenosti 200 m od hranice komunikace, referenční hl. 3 m**



Pozn. Procentuelní snížení koncentrací částic ve stavu s bariérou v porovnání se stavem bez bariéry

**Obr. 4.116. Snížení koncentrací částic PM<sub>75</sub> vlivem šířky a výšky bariéry ve vzdálenosti 200 m od hranice komunikace, referenční hl. 6 m**



Pozn. Procentuelní snížení koncentrací částic ve stavu s bariérou v porovnání se stavem bez bariéry

### 4.6.3 Shrnutí výstupů modelových výpočtů

Z grafů týkajících se **průběhu koncentrací se vzdáleností od komunikace** (Obr. 4.23. – 4.37., 4.51. – 4.65., 4.79. – 4.84., 4.98. – 4.103.) je patrné, že:

- vliv bariéry složené z listnatých i jehličnatých stromů na záchyt částic  $PM_{10}$  je poměrně malý oproti velkému vlivu na záchyt částic  $PM_{75}$
- vliv bariéry složené z jehličnatých stromů na záchyt částic  $PM_{10}$  a  $PM_{75}$  je vyšší než bariéry z listnatých stromů
- těsně za bariérou složené z listnatých i jehličnatých stromů vzniká recirkulační zóna, kde dochází k nárůstu koncentrací. Tento efekt se více projevuje u užších bariér, s šířkou bariéry klesá. Také je mnohem výraznější u  $PM_{10}$  než u  $PM_{75}$ , kde je převážen efektem odstraňování prachu.

Za nejvýznamnější lze považovat grafy týkající se **průběhu účinnosti bariéry** (% snížení koncentrací ve stavu s bariérou proti stavu bez bariéry) se vzdáleností od komunikace (Obr. 4.38. – 4.44., 4.66. – 4.72., 4.85. – 4.91., 4.104. – 4.109.). Tyto grafy vyjadřují vlastní účinnost vegetační bariéry a jsou z nich patrné následující závěry:

- se zvyšující se výškou bariéry dochází k výraznému snížení koncentrací, oproti tomu zvyšující se šířka bariéry má na snížení koncentrací méně významný vliv
- předpoklad o limitující hranici, nad níž už další rozšiřování bariéry nemá potřebný efekt, se projevuje zejména u částic  $PM_{75}$ , v případě  $PM_{10}$  lze pozorovat zvyšování účinku i při vyšších šířkách bariéry
- hodnota účinnosti může být v některých případech v oblasti blízko za bariérou i záporná, tj. v této oblasti dochází k navýšení koncentrací částic oproti stavu bez bariéry, a to v důsledku zpomalení proudění vzduchu, které se projeví omezením rozptylu částic. Ve větších vzdálenostech pak vždy převládá kladný efekt.

Z výsledků pro vegetační bariéry (šířky  $W = 4 - 140$  m) složené z **listnatých stromů** (Obr. 4.38. – 4.44., 4.65. – 4.72.) vyplývá, že:

- účinnost vegetační bariéry u částic  $PM_{10}$  dosahuje pro výšku  $H = 11$  m až 32 %,  $H = 7$  m až 24 % a  $H = 3$  m až 17 %
- účinnost vegetační bariéry u částic  $PM_{75}$  dosahuje pro výšku  $H = 11$  m až 95 %,  $H = 7$  m až 80 % a  $H = 3$  m až 60 %



Vzhledem k tomu, že vegetační bariéry složené z **jehličnatých stromů** nebyly modelovány pro všechny šířkové varianty, je možné účinnost listnatých a jehličnatých bariér porovnat jen pro šířku 20 a 80 metrů (Obr. 4.85. – 4.91., 4.104. – 4.109.). Z výsledků je patrná vyšší účinnost záchytu částic PM<sub>75</sub> oproti částicím PM<sub>10</sub> a dále pak vyšší účinnost jehličnatých stromů oproti listnatým. Orientační hodnoty maximální účinnosti pro obě modelované šířky jsou uvedeny v následující tabulce.

**Tab. 4.3. Porovnání maximální účinnosti vegetačních bariér (%)**

		částice PM <sub>10</sub>		částice PM <sub>75</sub>	
		W = 20	W = 80	W = 20	W = 80
H = 3 m	listnaté	8	13	40	54
	jehličnaté	16	28	50	67
H = 7 m	listnaté	18	21	75	82
	jehličnaté	34	41	86	89
H = 11 m	listnaté	27	29	87	94
	jehličnaté	46	54	92	96

Grafy, které znázorňují **hodnoty a snížení koncentrací**, uvádějí procentuální snížení vypočtené oproti hodnotě koncentrací ve stavu bez bariéry, a to **ve vzdálenosti 200 metrů od komunikace**, která je výrazně nižší než výchozí hodnota koncentrace (3 µg.m<sup>-3</sup>) u komunikace. Z výsledků pro bariéry složené z **listnatých stromů** (Obr. 4.45. – 4.50., 4.73. – 4.78.) je patrné, že:

- se zvyšující se výškou bariéry dochází ve všech případech k výraznému snížení koncentrací PM<sub>10</sub> i PM<sub>75</sub>. Koncentrace částic PM<sub>10</sub> se snižují v průměru o 2,2 % na 1 metr výšky se zvyšující se výškou bariéry, u částic PM<sub>75</sub> se jedná o snížení v průměru o 5,3 % na 1 m výšky.
- oproti tomu zvyšující se šířka bariéry má na snížení koncentrací PM<sub>10</sub> a PM<sub>75</sub> méně významný vliv a v případě částic PM<sub>10</sub> je patrný i mírný nárůst koncentrací se zvyšující se šířkou bariéry. Z grafů, je patrné, že v případě částic PM<sub>10</sub> dochází k výraznějšímu snížení koncentrací již pro šířku bariéry 4 metry oproti stavu bez bariéry, se zvyšující se šířkou pak snížení roste pozvolna. Pro výšku:
  - H = 11 m se jedná o snížení koncentrací o 18 – 25 % pro šířku bariéry 4 metry oproti stavu bez bariéry a se zvyšující se šířkou pak snížení roste v průměru o 0,6 – 1 % na 30 metrů šířky
  - H = 7 m se jedná o snížení koncentrací o 8 – 12 % pro šířku bariéry 4 metry oproti stavu bez bariéry a se zvyšující se šířkou pak snížení roste v průměru o 1 – 2 % na 30 metrů šířky

- H = 3 m se jedná o snížení koncentrací o 3,1 % pro šířku bariéry 4 metry oproti stavu bez bariéry a se zvyšující se šířkou pak snížení roste v průměru o 2,5 – 2,9 % na 30 metrů šířky
- co se týká částic PM<sub>75</sub>, je vliv bariéry šířky 4 metry méně významný a k výraznějšímu snížení koncentrací dochází až pro šířku bariéry 20 metrů oproti stavu bez bariéry, se zvyšující se šířkou pak snížení roste pozvolna. Pro výšku:
  - H = 11 m se jedná o snížení koncentrací o 80 – 83 % pro šířku bariéry 20 metrů oproti stavu bez bariéry a se zvyšující se šířkou pak snížení roste v průměru o 0,8 – 0,9 % na 30 metrů šířky
  - H = 7 m se jedná o snížení koncentrací o 57 – 61 % pro šířku bariéry 20 metrů oproti stavu bez bariéry a se zvyšující se šířkou pak snížení roste v průměru o 2,4 – 2,7 % na 30 metrů šířky
  - H = 3 m se jedná o snížení koncentrací o 22 % pro šířku bariéry 20 metrů oproti stavu bez bariéry a se zvyšující se šířkou pak snížení roste v průměru o 5,7 – 6,2 % na 30 metrů šířky

Z výsledků pro bariéry složené z **jehličnatých stromů** (Obr. 4.92. – 4.97., 4.111. – 4.116.) je pak patrné, že:

- obdobně jako u listnatých stromů se zvyšující se výškou bariéry dochází ve všech případech ke snížení koncentrací PM<sub>10</sub> i PM<sub>75</sub>. Koncentrace částic PM<sub>10</sub> se snižují v průměru o 3,6 % na 1 metr výšky se zvyšující se výškou bariéry, u částic PM<sub>75</sub> se jedná o snížení v průměru o 6,8 % na 1 m výšky. Tyto hodnoty jsou tak vyšší než u listnatých stromů.
- obdobně zvyšující se šířka bariéry má na snížení koncentrací PM<sub>10</sub> a PM<sub>75</sub> méně významný vliv. V případě jehličnatých stromů nebyly modelovány všechny šířkové varianty bariér, ale jen šířka 20 a 80 metrů. Snížení koncentrací částic PM<sub>10</sub> je pro jednotlivé výšky následující:
  - pro H = 11 m se jedná o snížení koncentrací o 40 – 46 % pro šířku bariéry W = 20 m oproti stavu bez bariéry, pro šířku bariéry W = 80 m se pak jedná o snížení koncentrací o 47 – 54 %
  - pro H = 7 m se jedná o snížení koncentrací o 27 – 33 % pro šířku bariéry W = 20 m oproti stavu bez bariéry, při šířce bariéry W = 80 m se koncentrace sníží o 34 – 41 %
  - pro H = 3 m se jedná o snížení koncentrací o 13 % pro šířku bariéry W = 20 m oproti stavu bez bariéry, pro šířku bariéry W = 80 m se pak jedná o snížení koncentrací o 23 %
- v případě částic PM<sub>75</sub> je snížení koncentrací oproti částicím PM<sub>10</sub> výrazně vyšší. Snížení koncentrací částic PM<sub>75</sub> je pro jednotlivé výšky následující:

- pro  $H = 11$  m se jedná o snížení koncentrací o 86 – 88 % pro šířku bariéry  $W = 20$  m oproti stavu bez bariéry, pro šířku bariéry  $W = 80$  m se pak jedná o snížení koncentrací o 89 – 91 %
- pro  $H = 7$  m se jedná o snížení koncentrací o 66 – 70 % pro šířku bariéry  $W = 20$  m oproti stavu bez bariéry, při šířce bariéry  $W = 80$  m se koncentrace sníží o 72 – 76 %
- pro  $H = 3$  m se jedná o snížení koncentrací o 28 % pro šířku bariéry  $W = 20$  m oproti stavu bez bariéry, pro šířku bariéry  $W = 80$  m se pak jedná o snížení koncentrací o 44 %

## 5. ODVOZENÍ ROVNIC PRO KVANTIFIKACI ÚČINKU VEGETAČNÍCH BARIÉR

Výsledky modelových výpočtů byly podrobeny detailní analýze za účelem odvození vztahů mezi vstupními veličinami a výslednou účinností vegetační bariéry. Cílem bylo vytvořit podklad ve formě sestavy matematických vztahů (parametrizací) pro tvorbu výpočetní metodiky, která by umožnila stanovit účinnost bariéry bez nutnosti aplikace časově i finančně náročného CFD modelování pro každý jednotlivý případ.

Jako modelovaná výstupní hodnota byla zvolena účinnost vegetační bariéry, vyjádřená jako snížení koncentrace suspendovaných částic v prostoru za bariérou v procentech oproti stavu bez bariéry.

V prvním kroku byly analyzovány vzájemné vazby vstupních faktorů, ovlivňujících průběh výstupní veličiny v prostoru za bariérou. Byly zjištěny následující základní skutečnosti:

- změny v rozložení koncentrací vlivem bariéry – tj. rozložení hodnot účinnosti bariéry v ose kolmé na komunikaci, která je zdrojem emisí částic – se významně liší pro hrubší částice (celkový prach, modelovaný jako frakce  $PM_{75}$ ) a pro částice jemnějších frakcí. Pro frakce  $PM_{10}$  a  $PM_{2,5}$  jsou však již průběhy obdobné, liší se jen absolutní hodnota účinnosti.
- průběh účinnosti bariéry se vzdáleností od komunikace se liší pro různé referenční hladiny (výška referenčních bodů nad terénem), jejich vzájemná vazba je poměrně komplikovaná
- hodnota účinnosti může být v některých případech v oblasti blízko za bariérou i záporná, tj. v této oblasti dochází k navýšení koncentrací částic oproti stavu bez bariéry, a to v důsledku zpomalení proudění vzduchu, které se projeví omezením rozptylu částic. Ve větších vzdálenostech pak vždy převládá kladný efekt.
- průběh procentuelního snížení koncentrací je různý pro různé šířky a výšky bariéry, přičemž vliv obou proměnných působí ve vzájemné kombinaci (jsou závislé), a to v různé míře pro různé vzdálenosti od komunikace.
- naproti tomu vliv hustoty bariéry vykazuje jen velmi slabou interakci s ostatními vstupními proměnnými. Lze konstatovat, že vliv hustoty bariéry je prakticky nezávislý na ostatních vstupních hodnotách.
- vliv druhové skladby na průběh účinnosti bariéry je poměrně komplexní. V modelových výpočtech byly pro zjednodušení uvažovány pouze dvě základní skladebné varianty, a to bariéra složená z listnatých a jehličnatých dřevin, bez bližšího upřesnění druhů. Průběh hodnot účinnosti vegetační bariéry v ose kolmé na komunikaci se vzdáleností od komunikace se sice na první pohled jeví jako obdobný, při detailním porovnání se však

prokázaly podstatné rozdíly. Vztah účinnosti listnatých a jehličnatých dřevin tak nelze vyjádřit např. poměrovou konstantou či jednoduchou funkcí.

- uvažovanou zjednodušenou parametrizaci nelze aplikovat na situaci před bariérou, uvnitř bariéry a těsně za bariérou.

Na základě provedeného vyhodnocení byly formulovány následující závěry pro další postup, který byl nejprve uplatněn pro zvolenou základní sadu dat – vegetační bariéru složenou z listnatých stromů, frakci částic  $PM_{10}$  a referenční hladina 1,5 m nad terénem:

- parametrizace je provedena pouze pro oblast začínající ve vzdálenosti nejméně 10 m za vegetační bariérou a zakončenou ve vzdálenosti 250 m od komunikace
- odvozeny jsou hodnoty procentuelní účinnosti na ose kolmé ke komunikaci, přičemž je uvažována vegetační bariéra umístěná těsně u komunikace (ve vzdálenosti do 5 m) a rovnoběžná s komunikací
- nejsou uvažovány vlivy obtékání okrajů bariéry, tj. uvažována je bariéra natolik dlouhá, aby se obtékání okrajů neprojevovalo
- parametrizace je provedena pro nejtýpistiější meteorologické podmínky, kterými jsou (v členění podle standardní typizace Bubník - Koldovský): 2. třída rychlosti větru (třídní rychlost  $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) a III. třída stability atmosféry, a to pro směr proudění kolmý na komunikaci i vegetační bariéru.
- v souladu se zadáním je primárně hodnocen vliv na záchyt suspendovaných částic frakce  $PM_{10}$ , dále pak vliv na záchyt jemných částic  $PM_{2,5}$  s tím, že tento vliv je vyjádřen poměrem k záchytu částic  $PM_{10}$
- vliv hustoty bariéry je vyjádřen samostatnou funkcí nezávislou na ostatních proměnných
- vliv vzdálenosti od komunikace a šířky a výšky bariéry je parametrizován pomocí funkcí zohledňujících jejich vzájemnou interakci

Klíčovou částí řešení byla parametrizace vlivu šířky a výšky bariéry v závislosti na vzdálenosti od komunikace. Pro tuto analýzu byl použit osvědčený software Table Curve 3D a Table Curve 2D, oba vyvinuté společností SigmaPlot (nyní Systat Software Inc.). Z provedeného hodnocení vyplynulo, že účinnost bariéry se mění se vzdáleností od komunikace (resp. od bariéry) a jak celková hodnota účinnosti, tak i její průběh se vzdáleností je ovlivňován současně výškou i šířkou bariéry, přičemž ani u jedné veličiny nelze její vliv vyjádřit konstantním poměrem nebo funkcí, jejíž průběh by byl shodný pro všechny hodnoty druhé vstupní veličiny. Výsledná hodnota účinnosti je tedy určena jako funkce všech tří vstupních proměnných. Použitý software umožňuje zohlednit na straně vstupů pouze dvě proměnné, což však není v principu chyba – ani

při použití jiného nástroje by kompletní parametrizace se třemi vstupními proměnnými nebyla prakticky proveditelná vzhledem k obtížím při odladění takových funkcí.

Parametrizaci všech tří vstupních proměnných proto bylo nutné provést pomocí několika složených 3D funkcí. Na základě dalších analýz bylo určeno, že poměr účinků pro dvě bariéry o různé výšce se významně mění s šířkou bariéry, ale podstatně méně – byť nezanedbatelně – se mění v různých vzdálenostech od komunikace. To znamená, že významného přiblížení lze dosáhnout již při použití jednotné funkce, vyjadřující závislosti účinnosti bariéry na její výšce při různých šířkách.

Byly stanoveny samostatné funkce pro každou z modelovaných výšek bariéry ( $H = 3, 7$  a  $11$  m), mezi nimi je již možné interpolovat vypočtené hodnoty lineárně bez rizika významnější odchylky od reálného stavu. Co se týká vlastního vlivu výšky bariéry na její účinnost, ukázalo se, že nejpřesnějšího vyjádření lze docílit pomocí kombinace dvou funkcí, z nichž jedna je platná pro úsek v malé vzdálenosti od bariéry a druhá pro oblast vzdálenější. Přejed mezi oběma funkcemi je označen jako „lomový bod“, jehož vzdálenost od komunikace je závislá na šířce bariéry.

Ve výsledku tedy bylo použito intervalové řešení, kdy:

- nejprve jsou samostatně určeny 3D funkce  $f(d, W)$  pro každou z modelovaných výšek ( $H = 3, 7$  a  $11$  m). Pro každou z nich jde o dvě funkce, z nichž jedna platí pro interval začínající ve vzdálenosti  $W + H + 5$  metrů za vegetační bariérou a končící ve vzdálenosti určené jako lomový bod, platnost druhé začíná v lomovém bodě a končí ve vzdálenosti 250 m od komunikace.
- hodnoty účinnosti v jednotlivých intervalech výšky bariéry ( $3 - 7$  m,  $7 - 11$  m) jsou lineárně interpolovány
- pro výšku bariéry nad 11 m byla provedena extrapolace až do hodnoty  $H = 20$  m. Extrapolace je provedena tak, že v případě, že výsledná funkce nabývá záporných hodnot (tj. koncentrace za bariérou je větší, než by byla bez bariéry – k tomu dochází v prostoru krátce za bariérou), je použita jednotná přepočtená funkce shodná jako pro výšku  $H = 11$  m. V oblasti, kde je výsledná účinnost bariéry kladná, je účinnost zvýšena pomocí aditivní funkce.

Následně byl parametrizován účinek vegetačních bariér sestávajících z jehličnatých dřevin. Vzhledem k tomu, že pro ně byl k dispozici jen omezený počet výstupů modelových výpočtů, byl v tomto případě zvolen následující postup:

- výpočet je odvozen z provedené parametrizace pro listnaté dřeviny, základní charakter průběhu účinnosti se vzdáleností je tak zachován, avšak hodnoty jsou přepočítávány pomocí komplexu transformačních funkcí tak, aby maximálně odpovídaly účinnosti vypočtené pro zadané kombinace vstupů pro jehličnaté dřeviny



- nejprve jsou samostatně určeny 3D funkce  $f(d, H)$  pro obě modelované šířky bariéry ( $W = 20$  a  $80$  m). Jako základní je určena funkce pro  $W = 20$  m, funkce pro  $W = 80$  m je z ní odvozena pomocí přepočtové funkce (tj.  $f_{W=80m} = f_{W=20m} \times f_{W80/20m}$ ). Obě tyto funkce jsou platné pro celý definiční rozsah vstupních hodnot výšky bariéry  $H$ , tj. od 3 do 20 m.
- hodnoty účinnosti v jednotlivých intervalech šířky bariéry (3 – 20 m, 20 – 80 m, 80 – 140 m) jsou pak interpolovány a extrapolovány

Tento postup, tj. aplikace základních přepočtetních funkcí na konstantní šířku bariéry  $W$  s následnou interpolací je při daném rozsahu dostupných dat vhodnější, neboť jím lze dosáhnout větší přesnosti výsledku, než kdyby základní funkce byly primárně stanoveny pro výšky bariéry  $H$  jako u listnatých dřevin.

Jak se ukázalo, průběh takto odvozených hodnot účinnosti bariéry z jehličnatých dřevin vykazoval poměrně významnou odchylku od vstupních dat, a to zejména v počátečním úseku blízko za bariérou, kde funkce velmi strmě roste. Důvodem byla skutečnost, že počátek nárůstu funkce je u listnatých a jehličnatých dřevin odlišný, při transformaci z listnatých dřevin na jehličnaté bylo proto prakticky nemožné dosáhnout shody jen prostou transformací výsledných hodnot. Řešením byla transpozice vstupní hodnoty vzdálenosti, tzn. posun vzdálenosti, v níž dochází k nástupu účinku. Protože tento posun je u různých bariér odlišný, je vyjádřen funkcí, závislou na hodnotách výšky a šířky bariéry. To znamená, že po uplatnění této korekce je celý výpočet aplikován na vstupní hodnotu vzdálenosti od komunikace upravenou o příslušnou korekci. Pro dosažení souladu s výsledky CFD modelování je pak uplatněna ještě další korekční aditivní funkce, upravující výsledek v závislosti na šířce a výšce bariéry.

Výpočet účinnosti bariéry složené z listnatých a jehličnatých dřevin pak lze dle předpokladu provést váženým průměrem na základě jejich zastoupení.

Výsledná soustava rovnic má tedy základní tvar:

$$U = U_L \times (\text{podíl listnatých}) + U_J \times (1 - \text{podíl listnatých})$$

$$U_L = k \times f(p) \times f_L(d, W, H)$$

$$U_J = k \times f(p) \times (f_L(d - f_{kor1}, W, H) \times f_{J/L}(d - f_{kor1}, W, H) - f_{kor2})$$

kde:

- $U$  = celková účinnost vegetační bariéry (%)
- $U_L$  = účinnost vegetační bariéry složené z listnatých dřevin (%)
- $U_J$  = účinnost vegetační bariéry složené z jehličnatých dřevin (%)
- $k$  = koeficient velikosti suspendovaných částic

- $p$  = optická porosita vegetační bariéry
- $d$  = vzdálenost od hranice komunikace (m)
- $W$  = šířka vegetační bariéry (m)
- $H$  = výška vegetační bariéry (m)
- $f(p)$  = funkce porosity vegetační bariéry
- $f_L$  = transformační funkce pro určení vlivu vzdálenosti od komunikace a výšky a šířky bariéry u listnatých dřevin
- $f_{J/L}$  = poměrová funkce pro přepočítání mezi účinnostmi bariér složených z listnatých a jehličnatých dřevin
- $f_{kor1}$  = korekční funkce aplikovaná na vstupní hodnotu vzdálenosti  $d$  při výpočtu účinnosti bariéry složené z jehličnatých dřevin
- $f_{kor2}$  = korekční funkce použitá pro upřesnění při výpočtu účinnosti bariéry složené z jehličnatých dřevin

Poměr účinnosti pro částice velikostních frakcí  $PM_{10}$  a  $PM_{2,5}$  byl odvozen kombinací vstupních parametrizací CFD modelu a údajů získaných rešerší odborné literatury. Ze studií (Beckett et al., 2000, Freer-Smith et al., 2003) byl převzat přepočítání mezi procentuelní účinností bariéry a depoziční rychlostí, ze vstupních parametrů modelu pak poměr depozičních rychlostí pro částice  $PM_{10}$  a  $PM_{2,5}$ . Výsledný poměr účinnosti zachytu částic  $PM_{2,5}$  vůči zachytu částic  $PM_{10}$  činí pro listnaté dřeviny 0,44 a pro jehličnaté dřeviny 0,24.

Pro určení funkce  $f(p)$  se na základě provedených analýz ukázalo jako nevhodnější provést odvození na základě rešerše odborné literatury, konkrétně ze studie Raupach et al. (2001). Tato studie určuje vztah mezi účinností vegetačního pásu a jeho optickou porositou, vstupní hodnotou je tedy přímo optická porosita, kterou lze určit pozorováním v terénu nebo na základě fotografických snímků vegetační bariéry. Pro účely parametrizace byly hodnoty přepočteny do relativní stupnice, s maximem v bodě odpovídajícím modelové hodnotě hustoty porostu  $D = 1$ . Celkový tvar funkce je znázorněn na obr. 3.13. v rešerši v kap. 3.3., matematický zápis je pro  $PM_{10}$  uveden v kap. 6.1.1. a pro  $PM_{75}$  v kap. 6.2.1.

Následně byla odvozena sada výpočetních rovnic pro referenční hladiny (tj. výšku referenčních bodů nad terénem) 3 a 6 m. Parametrizace byla provedena tak, že bylo zachováno kompletní modelové schéma, konstruované pro hladinu 1,5 metru, avšak byly nově určeny 3D funkce  $f(d, W)$  pro jednotlivé výšky bariéry ( $H = 3, 7$  a  $11$  m). Tyto funkce byly určeny tak, že k původní funkci pro úroveň 1,5 m byla přičtena hodnota aditivní funkce, vyjadřující rozdíl mezi účinností bariéry na úrovních 1,5 a 3 resp. 6 m.

Na základě zkušeností z přípravy předchozí sady rovnic byla vyvinuta snaha o omezení počtu IF-THEN funkcí, určených lomovým bodem. V některých případech se podařilo nahradit tento postup aplikací složené korekční aditivní funkce, která v určitém úseku upravuje vypočtenou hodnotu a ve zbývající části má hodnotu nulovou. Potom je výpočet účinnosti bariéry v úrovni 3 a 6 m proveden tak, že k původní funkci pro úroveň 1,5 m se přičítá jak „základní“ aditivní funkce, tak i funkce korekční. Charakteristický tvar rovnice potom je

$$f_{L\_V3m}(d, W) = f_{L\_V1,5m}(d, W) + f_{LDIFF\_V3-1,5m}(d, W) + f_{kor}(d, W)$$

kde  $f_{L\_V3m}$  je výsledná funkce pro zadanou výšku bariéry (3, 7, 11 m) v úrovni 3 m (obdobně 6 m),  $f_{LDIFF\_V3-1,5m}$  je rozdílová funkce a  $f_{kor}$  je funkce korekční.

V některých případech však bylo pro dosažení shody s výstupy CFD modelu nutné uplatnit rozdělení funkcí podle lomového bodu i přes uplatnění korekční funkce.

Další odlišnost se týká výpočtu účinnosti bariér složených z jehličnatých dřevin, kdy po zkušenostech z předešlé části bylo přistoupeno k následujícím změnám:

- přepočtové funkce jsou aplikovány jako aditivní, tj. daná funkce nenásobí vypočtenou účinnost pro listnaté dřeviny, ale přičítá k ní určitou hodnotu. Tento přístup poskytuje lepší možnosti přesného odladění funkce a také potlačuje nutnost korekce vstupního parametru  $d$ .
- rovnice pro šířky bariéry 20 a 80 metrů jsou stanoveny samostatně, tzn. funkce pro  $W = 80$  metrů není odvozena přepočtem z funkce pro  $W = 20$  m jako u hladiny 1,5 m

Následný postup interpolace a extrapolace hodnot na celý rozsah šířek bariéry je již shodný s postupem u úrovně 1,5 metru. Určení účinnosti bariéry složené z jehličnatých dřevin má tedy u hladin 3 a 6 m jednodušší tvar:

$$U_J = k \times f(p) \times (f_L(d, W, H) + f_{JLDIFF}(d, W, H))$$

kde  $f_{JLDIFF}$  je funkce vyjadřující rozdíl mezi listnatými a jehličnatými stromy, význam ostatních členů rovnice je stejný jako v předešlém případě.

V případě celkového prachu, modelovaného jako frakce  $PM_{75}$ , bylo u všech tří hladin (1,5, 3 a 6 m) již postupováno shodně jako v případě  $PM_{10}$  u hladin 3 a 6 m.

Výsledné rozložení hodnot účinnosti je pro vybrané kombinace vstupních parametrů prezentováno na grafech uvedených v příloze této metodiky. Matematický zápis odvozených funkcí je pak uveden v následující kapitole.

## 6. NÁVRH VÝPOČETNÍ METODIKY

Návrh metodiky vychází z provedených rešerší, analýzy výsledků CFD modelování a z nich odvozených parametrizací, prezentovaných v předcházející kapitole. Platnost metodiky je následující:

- vegetační bariéra je rovnoběžná s komunikací a je umístěna ve vzdálenosti do 5 m od ní
- proudění vzduchu je kolmé na komunikaci a tedy i vegetační bariéru a je orientováno ve směru od komunikace přes bariéru do prostoru za ní
- jsou uvažovány meteorologické podmínky zhruba odpovídající průměrné rychlosti proudění  $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  a III. třídě stability atmosféry
- nejsou uvažovány vlivy obtékání okrajů bariéry, tj. uvažována je bariéra natolik dlouhá, aby se obtékání okrajů neprojeвило
- šířka bariéry  $W$  v intervalu  $\langle 4 \text{ m}, 140 \text{ m} \rangle$
- výška bariéry  $H$  v intervalu  $\langle 3 \text{ m}, 20 \text{ m} \rangle$
- vzdálenost od komunikace  $d$  v intervalu  $\langle W + H + 5 \text{ m}, 250 \text{ m} \rangle$ , pro  $d > 250 \text{ m}$  je uvažována účinnost bariéry konstantní
- optická porosita bariéry v intervalu  $\langle 0, 1 \rangle$ , kde hodnota 1 odpovídá stavu bez bariéry, hodnota 0 odpovídá zcela neprůsvitné vegetaci
- znečišťující látky: celkový prach (posuzovaný jako frakce  $\text{PM}_{75}$ ), suspendované částice  $\text{PM}_{10}$  a  $\text{PM}_{2,5}$ , benzo(a)pyren, těžké kovy – As, Cd, Ni, Pb
- druhové složení: listnaté nebo jehličnaté dřeviny

### 6.1. VÝPOČET ÚČINNOSTI VEGETAČNÍ BARIÉRY - ČÁSTICE $\text{PM}_{10}$ A $\text{PM}_{2,5}$ , BENZO(A)PYREN, TĚŽKÉ KOVY

Výchozí funkce pro výpočet účinnosti vegetační bariéry je dána následující rovnicí:

$$U = U_L \times (\text{podíl listnatých}) + U_J \times (1 - \text{podíl listnatých})$$

### 6.1.1 Výpočet účinnosti vegetační bariéry složené z listnatých dřevin pro referenční hladinu 1,5 m

Výchozí funkce pro výpočet účinnosti vegetační bariéry složené z listnatých dřevin je dána následující rovnicí:

$$U_L = k \times f(p) \times f_L(d, W, H)$$

kde:

- $U_L$  = účinnost vegetační bariéry složené z listnatých dřevin (%)
- $k$  = koeficient velikosti suspendovaných částic (pro  $PM_{10}$  je  $k = 1$ ; pro ostatní polutanty s výjimkou celkového prachu je uveden v tab. 6.1.)
- $p$  = optická porosita vegetační bariéry
- $d$  = vzdálenost od hranice komunikace (m)
- $W$  = šířka vegetační bariéry (m)
- $H$  = výška vegetační bariéry (m)

**Tab. 6.1. Stanovení koeficientu  $k$**

Znečišťující látka	Listnaté dřeviny	Jehličnaté dřeviny
částice $PM_{2,5}$	0,440	0,240
benzo(a)pyren	0,445	0,26
arsen	0,499	0,320
kadmium	0,499	0,320
nikl	0,593	0,447
olovo	0,496	0,316

Funkce vlivu optické porosity vegetační bariéry je dána následující rovnicí:

$$f(p) = a + b \times p + c \times p^2 + e \times p^3 + f \times p^4$$

kde:

- $p$  = optická porosita v relativní stupnici od 0 do 1 (0 = 0 % porosita, 1 = 100 % porosita, tj. stav bez bariéry)
- konstanty:
  - $a = 1,0709$
  - $b = 0,0121$
  - $c = -3,9267$
  - $e = 5,05$
  - $f = -2,2063$

Dále je rozhodovací podmínkou určeno, zda je vzdálenost od hranice komunikace ( $d$ ) větší, příp. menší než vzdálenost lomového bodu transformační funkce od komunikace. Vzdálenost lomového bodu od komunikace je vyjádřena následující rovnicí:

$$d_{LB\_L} = a + b \times W + c \times W^2 + e \times W^3$$

kde:

- $d_{LB\_L}$  = vzdálenost lomového bodu od hranice komunikace pro listnaté dřeviny
- $W$  = šířka vegetační bariéry (m)
- konstanty:
  - $a = 40,6602512414157$
  - $b = 1,34072920791303$
  - $c = -9,24150593473535 \times 10^{-3}$
  - $e = 3,67707576265142 \times 10^{-5}$

Dále je zvolena transformační funkce  $f_L$  ( $d$ ,  $W$ ,  $H$ ) v závislosti na vzájemné poloze hodnot  $d$  a  $d_{LB\_L}$  a výšce bariéry  $H$ , přičemž:

- $d$  = vzdálenost výpočtového bodu od hranice komunikace
- $W$  = šířka vegetační bariéry (m)
- $H$  = výška vegetační bariéry (m)



## 1) Pro výšku bariéry od 3 do 7 m

### a) pro $d < d_{LB}$

$$f_L(d, W, H) = (0,25 \times H - 0,75) \times f_{L1}(d, W) + (1,75 - 0,25 \times H) \times f_{L2}(d, W)$$

$$f_{L1}(d, W) = a + b \times (4 \times \exp(-(d - c) / i) / ((1 + \exp(-(d - c) / i)) \times (1 + \exp(-(d - c) / i)))) + (e \times 4 \times \exp(-(W - f) / g) / ((1 + \exp(-(W - f) / g)) \times (1 + \exp(-(W - f) / g))))$$

- konstanty:  $a = 17,6353351595907$   
 $b = 68,7407674716568$   
 $c = 8,63157069887546$   
 $e = 5,69766052106519$   
 $f = 138,13338944752$   
 $g = 25,7113267279885$   
 $h = -4104,38121996487$   
 $i = 13,3668921755346$

$$f_{L2}(d, W) = a + \text{Ln}(d) \times (b + \text{Ln}(d) \times (k + \text{Ln}(W) \times g) + \text{Ln}(W) \times (c + \text{Ln}(W) \times (e + \text{Ln}(W) \times h) + \text{Ln}(d) \times \text{Ln}(W) \times f + (\text{Ln}(W) \times i + \text{Ln}(d) \times j)))$$

- konstanty:  $a = -44,8457289571096$   
 $b = 32,9353496269573$   
 $c = -20,314162723709$   
 $e = -5,16515115871787$   
 $f = 14,6063881533062$   
 $g = 0,737001710062348$   
 $h = 0,351252304045662$   
 $i = 0,537883883501109$   
 $j = -1,79362460332396$   
 $k = -8,62010421614687$

**b) pro  $d > d_{LB}$**

$$f_L(d, W, H) = (0,25 \times H - 0,75) \times f_{L3}(d, W) + (1,75 - 0,25 \times H) \times f_{L2}(d, W)$$

$$f_{L3}(d, W) = a + \text{Ln}(d) \times (b + \text{Ln}(d) \times (k + \text{Ln}(d) \times g)) + \text{Ln}(W) \times (c + \text{Ln}(W) \times (e + \text{Ln}(W) \times h)) + \text{Ln}(d) \times \text{Ln}(W) \times (f + \text{Ln}(W) \times i + \text{Ln}(d) \times j)$$

- konstanty:  $a = -247,721548003948$   
 $b = 181,117912501909$   
 $c = -89,6177044028403$   
 $e = -9,21808880399155$   
 $f = 43,9361252582829$   
 $g = 3,10760378680867$   
 $h = 0,464873716043899$   
 $i = 0,960797615716364$   
 $j = -4,60334585735803$   
 $k = -41,8324293126117$

**2) Pro výšku bariéry od 7 do 11 m**

**a) pro  $d < d_{LB}$**

$$f_L(d, W, H) = (0,25 \times H - 1,75) \times f_{L4}(d, W) + (2,75 - 0,25 \times H) \times f_{L1}(d, W)$$

$$f_{L4}(d, W) = a + b \times (4 \times \exp(-(d - c) / i) / ((1 + \exp(-(d - c) / i)) \times (1 + \exp(-(d - c) / i)))) + (e \times 4 \times \exp(-(W - f) / g) / ((1 + \exp(-(W - f) / g)) \times (1 + \exp(-(W - f) / g))))$$

- konstanty:  $a = 25,4090969392375$   
 $b = 211,579193244186$   
 $c = 7,32643489514902$   
 $e = 1,6857938841149$   
 $f = 140,105819272113$   
 $g = 29,1854284160032$   
 $h = -6402,72774620873$   
 $i = 14,5436370532245$

**b) pro  $d > d_{LB}$**

$$f_L(d, W, H) = (0,25 \times H - 1,75) \times f_{L5}(d, W) + (2,75 - 0,25 \times H) \times f_{L3}(d, W)$$

$$f_{L5}(d, W) = a + \text{Ln}(d) \times (b + \text{Ln}(d) \times (k + \text{Ln}(d) \times g)) + \text{Ln}(W) \times (c + \text{Ln}(W) \times (e + \text{Ln}(W) \times h)) + \text{Ln}(d) \times \text{Ln}(W) \times (f + \text{Ln}(W) \times i + \text{Ln}(d) \times j)$$

- konstanty:  $a = -343,328708145358$   
 $b = 259,280359704892$   
 $c = -165,956191714588$   
 $e = -10,0193804269879$   
 $f = 70,212238922066$   
 $g = 4,22681556508239$   
 $h = 0,265152385218422$   
 $i = 1,49303476260108$   
 $j = -7,11512801431879$   
 $k = -58,4064865223893$

**III) Pro výšku bariéry nad 11 m**

**a)  $f_L(d, W, H_{>11m}) \leq 0$**

$$f_L(d, W, H) = f_L(d, W, H_{11m})$$

kde:

- $f_L(d, W, H_{>11m})$  = hodnota funkce  $f_L(d, W, H)$  pro výšku bariéry nad 11 m
- $f_L(d, W, H_{11m})$  = hodnota funkce  $f_L(d, W, H)$  pro výšku bariéry 11 m

**b)  $f_L(d, W, H_{>11m}) > 0$**

$$f_L(d, W, H) = f_L(d, W, H_{11m}) + f_{L6}(d, W) \times (H - 11)$$

kde:

- $f_L(d, W, H_{>11m})$  = hodnota funkce  $f_L(d, W, H)$  pro výšku bariéry nad 11 m
- $f_L(d, W, H_{11m})$  = hodnota funkce  $f_L(d, W, H)$  pro výšku bariéry 11 m

$$f_{Lb}(d, W) = a + (1/d) \times (b + (1/d) \times (k + (1/d) \times g)) + (\ln(W)) \times (c + (\ln(W)) \times (e + (\ln(W)) \times h)) + (1/d) \times (\ln(W)) \times (f + (\ln(W)) \times i + (1/d) \times j)$$

- konstanty:  $a = 5,88666188823775$   
 $b = -415,914166590817$   
 $c = -3,23925309106938$   
 $e = 0,638602299074285$   
 $f = 262,347001643682$   
 $g = -50254,0674729276$   
 $h = -4,16608946034767 \times 10^{-2}$   
 $i = -31,6388349723643$   
 $j = -6824,5687618811$   
 $k = 13104,6280566738$

### 6.1.2 Výpočet účinnosti vegetační bariéry složené z jehličnatých dřevin pro referenční hladinu 1,5 m

Funkce pro výpočet účinnosti vegetační bariéry složené z jehličnatých dřevin ( $U_J$ ) vychází z rovnice pro výpočet účinnosti vegetační bariéry složené z listnatých dřevin ( $U_L$ ), resp. z transformační funkce  $f_L$ , poměrové funkce použité pro přepočet účinnosti mezi jehličnatými a listnatými dřevinami a dvou korekčních funkcí. Pro určení účinnosti vegetační bariéry složené z jehličnatých dřevin je ve výpočtu vzdálenost od hranice komunikace ( $d$ ) snížena o hodnotu korekční funkce ( $f_{kor1}$ ). Druhá korekční funkce je aditivní a je použita pro dosažení lepší shody s podkladovými daty ( $f_{kor2}$ ).

Výsledná funkce pro výpočet účinnosti vegetační bariéry složené z jehličnatých dřevin je pak dána následující rovnicí:

$$U_J = k \times f(p) \times (f_L(d - f_{kor1}, W, H) \times f_{J/L}(d - f_{kor1}, W, H) - f_{kor2})$$

$$f_{J/L}(d - f_{kor1}, W, H) = f_J(d - f_{kor1}, H) \times i(d - f_{kor1}, H, W)$$

kde:

- $U_J$  = účinnost vegetační bariéry složené z jehličnatých dřevin (%)
- $d$  = vzdálenost od hranice komunikace (m)
- $W$  = šířka vegetační bariéry (m)

- $H$  = výška vegetační bariéry (m)
- $f_{kor1}$  = korekční funkce aplikovaná na vstupní hodnotu vzdálenosti  $d$  při výpočtu účinnosti bariéry složené z jehličnatých dřevin
- $f_{kor2}$  = korekční funkce použitá pro upřesnění při výpočtu účinnosti bariéry složené z jehličnatých dřevin

Nejprve je nutno určit hodnotu funkce  $f_{kor1}$ , která vstupuje do dalších funkcí, neboť je o ni transponována vstupní hodnota vzdálenosti výpočtového bodu od hranice komunikace.

$$f_{kor1}(H, W) = a \times (2 \times e \times (\ln(\exp((H + c / 2) / e) + \exp(b / e)) - \ln(\exp((b + c / 2) / e) + \exp(H / e))) + c) / (2 \times c)$$

- konstanty:  $a = 48,5575423507154$   
 $b = 9,25716696786534$   
 $c = -0,0164574744081364$   
 $e = 2,92805649945261$

Následně je určena hodnota  $f_L$ , tj. transformační funkce pro listnaté dřeviny. Postup jejího určení je popsán výše, jediným rozdílem spočívá v tom, že pro její výpočet je použita vstupní hodnota vzdálenosti od komunikace upravená o hodnotu  $f_{kor1}$ , tedy místo  $d$  se použije  $(d - f_{kor1})$ .

V dalším kroku je určena hodnota poměrové funkce  $f_{J/L}$ , vyjadřující vlastní přepočít mezi listnatými a jehličnatými dřevinami. Ta je součinem dvou funkcí:

- transformační funkce  $f_j$ , vyjadřující závislost účinnosti zachytu na výšce bariéry a vzdálenosti od hranice komunikace při konstantní hodnotě  $W$  (20 m)
- interpolační funkce  $i$ , použité pro přepočít na skutečnou šířku bariéry

V případě transformační funkce  $f_j$  je podobně jako v případě listnatých dřevin nejprve rozhodovací podmínkou určeno, zda je vzdálenost od hranice komunikace ( $d$ ) větší, příp. menší než vzdálenost lomového bodu transformační funkce od komunikace. Vzdálenost lomového bodu od komunikace pro jehličnaté dřeviny je vyjádřena následující rovnicí:

$$(d_{LB\_J} - f_{kor1}) = (a + b \times \ln(W) + c \times \ln(H)) / (1 + f \times \ln(W) + e \times \ln(H))$$

kde:

- $d_{LB\_J}$  = vzdálenost lomového bodu od hranice komunikace pro jehličnaté dřeviny
- $W$  = šířka vegetační bariéry (m)
- konstanty:
  - $a = -10,1901479922751$
  - $b = 1,85208107243903$
  - $c = 25,4306926741682$
  - $e = 0,175534042681116$
  - $f = -0,202627458728721$

Dále je vypočtena hodnota vlastní transformační funkce  $f_j$  ( $d$ ,  $H$ ), platné pro  $W = 20$  v závislosti na vzájemné poloze hodnot  $d$  a  $d_{LB\_J}$ , přičemž:

- $d$  = vzdálenost výpočtového bodu od hranice komunikace
- $H$  = výška vegetační bariéry (m)

#### a) pro $d < d_{LB}$

$$f_j(d, H) = a + b \times \exp(-0,5 \times (\ln((d - f_{kor1}) / c) / i) \times (\ln((d - f_{kor1}) / c) / i)) + e \times \exp(-0,5 \times ((H - f) / g) \times ((H - f) / g)) - h \times \exp(-0,5 \times (\ln((d - f_{kor1}) / c) / i) \times (\ln((d - f_{kor1}) / c) / i)) \times \exp(-0,5 \times ((H - f) / g) \times ((H - f) / g))$$

- konstanty:
- $a = -1,53239396189378$
  - $b = 5,20464774065829$
  - $c = 18,3222413293435$
  - $e = 1,6058851282208$
  - $f = 9,31133519761584$
  - $g = 1,83603959963728$
  - $h = 0,423574349649399$
  - $i = 1,42520300720763$

**b) pro  $d > d_{LB}$**

$$f_j(d, H) = a + (1 / (d - f_{kor1})) \times (b + (1 / (d - f_{kor1})) \times (k + (1 / (d - f_{kor1})) \times g)) + \text{Ln}(H) \\ \times (c + \text{Ln}(H) \times (e + \text{Ln}(H) \times h)) + (1 / (d - f_{kor1})) \times \text{Ln}(H) \times (f + \text{Ln}(H) \times i \\ + (1 / (d - f_{kor1})) \times j)$$

konstanty:	$a = 1,45498005453778$
	$b = -7,90873698298786$
	$c = 2,1607868911371$
	$e = -1,04760157295397$
	$f = -177,26286824371$
	$g = -54422,2865470309$
	$h = 0,125529109661085$
	$i = 40,7308571126055$
	$j = 6502,77156707907$
	$k = 696,419279884783$

Podoba interpolační funkce funkce  $i$  ( $d$ ,  $H$ ,  $W$ ) pro přepočítání transformační funkce vytvořené pro  $W = 20$  na libovolné  $W$ , přičemž:

- $d$  = vzdálenost od hranice komunikace (m)
- $W$  = šířka vegetační bariéry (m)
- $H$  = výška vegetační bariéry (m)

$$i(d, H, W) = ((W - 20) / 60) \times ((a + (d - f_{kor1}) \times (b + (d - f_{kor1}) \times (c + (d - f_{kor1}) \times k))) \\ + (H \times (e + H \times f))) / ((1 + (d - f_{kor1}) \times (g + (d - f_{kor1}) \times (h + (d - f_{kor1}) \times i))) + (H \times j)) \\ + (1 - ((W - 20) / 60))$$

konstanty:	$a = 1,82031054389586$
	$b = -2,33077776399265 \times 10^{-2}$
	$c = 1,40986536285466 \times 10^{-4}$
	$e = 1,44146753028784 \times 10^{-2}$
	$f = -1,64090413220255 \times 10^{-3}$
	$g = -8,89156190000584 \times 10^{-3}$
	$h = 7,09086597833061 \times 10^{-5}$
	$i = -1,23742034974438 \times 10^{-7}$
	$j = -2,51579127802562 \times 10^{-2}$



$$k = -2,39075917940547 \times 10^{-7}$$

V posledním kroku je určena hodnota aditivní korekce  $f_{kor2}$ , která se odčítá od výsledné hodnoty účinnosti bariéry před jejím vynásobením funkcí porosity  $f(p)$  a koeficientem  $k$ , tj. od součinu  $f_j \times f_{j/L}$ .

$$f_{kor2}(d-W, H, W) = (a / (1 + \exp(-(H - b) / c))) \times (e + f / (1 + ((d-W) / g)^h)) \\ \times (\exp((i + j \times (\ln(W)) - k \times (\exp(-W)))) + ((a / (1 + \exp(-(H - b) / c))) - 1) \times (-1) \\ \times ((l + m \times (d-W) + (n / (d-W)) + (o \times (d-W)^2) + (p / (d-W)^2) + (q \times (d-W)^3) \\ + (r / (d-W)^3) + (s \times (d-W)^4) + (t / (d-W)^4) + (u \times (d-W)^5) + (v / (d-W)^5)) \\ \times (\exp((a_1 + b_1 \times (\text{Sqr}(W) \times \ln(W)) - c_1 \times (\exp(-W))))))$$

konstanty:	$a = 1,00567754355977$
	$b = 48,6204608853552$
	$c = -5,676562149912$
	$e = -0,122781568580989$
	$f = 95,9209833782237$
	$g = 23,1764245001673$
	$h = 2,99628147598348$
	$i = -1,43703801579522$
	$j = 0,615044208656273$
	$k = 2261,66096363868$
	$l = -40,5017508887956$
	$m = 0,353321594753077$
	$n = 2463,00102091717$
	$o = -1,00639327405425 \times 10^{-3}$
	$p = -56508,1182575519$
	$q = 2,54341384343144 \times 10^{-6}$
	$r = 872459,963277487$
	$s = -3,95188397882931 \times 10^{-8}$
	$t = -7154066,54404225$
	$u = 8,84452813744781 \times 10^{-11}$
	$v = 25225548,7308622$
	$a_1 = -0,56053385659977$
	$b_1 = 7,21040037886159 \times 10^{-2}$
	$c_1 = 772,582297020063$

### 6.1.3 Výpočet účinnosti vegetační bariéry složené z listnatých dřevin pro referenční hladinu 3 m

Funkce pro výpočet účinnosti vegetační bariéry složené z listnatých dřevin ( $U_{L\_v3}$ ) pro referenční hladinu 3 m vychází z rovnice pro výpočet účinnosti vegetační bariéry složené z listnatých dřevin ( $U_{L\_v1,5}$ ) pro referenční hladinu 1,5 m.

Výsledná funkce pro výpočet účinnosti vegetační bariéry složené z listnatých dřevin pro danou referenční hladinu je pak dána následující rovnicí:

$$U_{L\_v3} = U_{L\_v1,5} + f_{H3,7,11\_v3}(d, W)$$

kde:

- $U_{L\_v3}$  = účinnost vegetační bariéry složené z listnatých dřevin pro výškovou hladinu 3 m (%)
- $d$  = vzdálenost od osy komunikace (m)
- $W$  = šířka vegetační bariéry (m)
- $H$  = výška vegetační bariéry (m)
- $f_{H3,7,11\_v3}(d, W)$  = funkce pro přepočítání na výškovou hladinu 3 m

Funkce  $f_{H3,7,11\_v3}(d, W)$  se přičítá k rovnici  $U_{L\_v1,5}$  a je stanovena pro výšky 3, 7 a 11 m.

#### 1) Pro výšku bariéry od 3 do 7 m

$$f_L(d, W, H) = (0,25 \times H - 0,75) \times f_{L1}(d, W) + (1,75 - 0,25 \times H) \times f_{L2}(d, W) + f_{H3\_v3}(d, W)$$

$$f_{H3\_v3}(d, W) = ((a + \ln(d) \times (b + \ln(d) \times (c + \ln(d) \times j))) + (\ln(W) \times e)) / ((1 + \ln(d) \times f) + (\ln(W) \times (g + \ln(W) \times (h + \ln(W) \times i))))$$

- konstanty:  $a = -4,65020687995303$   
 $b = 9,93716396631553 \times 10^{-2}$   
 $c = 0,372356742918134$   
 $e = -3,11622382035727 \times 10^{-3}$

$$f = 3,56638566743978 \times 10^{-2}$$

$$g = -0,505521669029035$$

$$h = 9,64267010687461 \times 10^{-2}$$

$$i = -7,89551619707934 \times 10^{-3}$$

$$j = -4,39186163765165 \times 10^{-2}$$

## 2) Pro výšku bariéry od 7 do 11 m

$$f_L(d, W, H) = (0,25 \times H - 1,75) \times f_{L4}(d, W) + (2,75 - 0,25 \times H) \times f_{L1}(d, W) + f_{H7\_v3\_c2}(d, W)$$

$$f_{H7\_v3\_c2}(d, W) = ((a + d \times b) + (\ln(W) \times (c + \ln(W) \times (h + \ln(W) \times e)))) / ((1 + d \times f) + (\ln(W) \times g)) + f_{kor\_H7\_v3}(d, W)$$

- konstanty:  $a = 0,30952111381839$   
 $b = 1,07988553266603 \times 10^{-2}$   
 $c = -6,33822496071762$   
 $e = -0,235143583835032$   
 $f = 1,01725846178596 \times 10^{-2}$   
 $g = -0,267386898784003$   
 $h = 2,14819070741417$

$$f_{kor\_H7\_v3}(d, W) = ((a + c \times d + e \times d^2 + g \times d^3) / (1 + b \times d + k \times d^2 + f \times d^3 + h \times d^4)) \times (i \times \exp(-W/j))$$

- konstanty:  $a = 8,73165639633691$   
 $b = -9,37982374103826 \times 10^{-3}$   
 $c = -0,362892447045071$   
 $e = 4,65861261341068 \times 10^{-3}$   
 $f = 1,33149209743079 \times 10^{-6}$   
 $g = -2,45967840826285 \times 10^{-5}$   
 $h = -1,4217787216047 \times 10^{-10}$   
 $i = 4,52726326246725$   
 $j = 2,64848146740809$   
 $k = 1,15595121290744 \times 10^{-4}$

### 3) Pro výšku bariéry nad 11 m

a)  $f_L(d, W, H_{>11m}) \leq 0$

$$f_L(d, W, H) = f_L(d, W, H_{11m})$$

b)  $f_L(d, W, H_{>11m}) > 0$

$$f_L(d, W, H) = f_L(d, W, H_{11m}) + f_{L6}(d, W) \times (H - 11) + f_{H11\_v3}(d, W)$$

$$f_{H11\_v3}(d, W) = (((a + d \times b) + (\ln(W) \times (c + \ln(W) \times (h + \ln(W) \times e)))) / ((1 + d \times f) + (\ln(W) \times g))) + f_{kor\_H11\_v3}(d, W)$$

- konstanty:  $a = -0,623942924549755$   
 $b = 2,74836099943071 \times 10^{-3}$   
 $c = -3,87114864803919$   
 $e = -0,14136781608039$   
 $f = 7,13348117897973 \times 10^{-3}$   
 $g = -0,330808317268328$   
 $h = 1,39162434645938$

$$f_{kor\_H11\_v3}(d, W) = a + \ln(d) \times (b + (\ln(d)) \times (k + (\ln(d)) \times g)) + W \times (c + W \times (e + W \times h)) + \ln(d) \times W \times (f + W \times i + \ln(d) \times j) + \exp(l + m \times ((d - W)^2) \times \text{Sqr}((d - W))) + n \times (\exp(-(d - W))) \times (o + q \times W + s \times W^2 + u \times W^3 + a_I \times W^4 + c_I \times W^5) / (1 + p \times W + r \times W^2 + t \times W^3 + v \times W^4 + b_I \times W^5)$$

- konstanty:  $a = 537,350834666341$   
 $b = -337,735250352697$   
 $c = -21,7337405039866$   
 $e = -0,029672975873726$   
 $f = 8,87015912433767$   
 $g = -4,95466518328351$   
 $h = -4,82013097544497 \times 10^{-6}$   
 $i = 5,72275498422922 \times 10^{-3}$   
 $j = -0,898460468791369$   
 $k = 70,8575381620049$

$$\begin{aligned}
 l &= 3,52699974217961 \\
 m &= -1,54461582757374 \times 10^{-3} \\
 n &= 5305,13515175659 \\
 o &= 0,651482807663151 \\
 p &= -0,073127786231115 \\
 q &= -3,34176838642158 \times 10^{-2} \\
 r &= 1,0748926554746 \times 10^{-3} \\
 s &= 6,50829356533092 \times 10^{-4} \\
 t &= 6,56543380780735 \times 10^{-5} \\
 u &= -6,04358921553782 \times 10^{-6} \\
 v &= -2,47713163444762 \times 10^{-6} \\
 a_l &= 2,68967713064694 \times 10^{-8} \\
 b_l &= 2,36957357440072 \times 10^{-8} \\
 c_l &= -4,61250492466442 \times 10^{-11}
 \end{aligned}$$

#### 6.1.4 Výpočet účinnosti vegetační bariéry složené z listnatých dřevin pro referenční hladinu 6 m

Funkce pro výpočet účinnosti vegetační bariéry složené z listnatých dřevin ( $U_{L\_v6}$ ) pro referenční hladinu 6 m vychází z rovnice pro výpočet účinnosti vegetační bariéry složené z listnatých dřevin ( $U_{L\_v1,5}$ ) pro referenční hladinu 1,5 m.

Výsledná funkce pro výpočet účinnosti vegetační bariéry složené z listnatých dřevin pro danou referenční hladinu je pak dána následující rovnicí:

$$U_{L\_v3} = U_{L\_v1,5} + f_{H7,11\_v6}(d, W)$$

kde:

- $U_{L\_v3}$  = účinnost vegetační bariéry složené z listnatých dřevin pro výškovou hladinu 6 m (%)
- $d$  = vzdálenost od osy komunikace (m)
- $W$  = šířka vegetační bariéry (m)
- $H$  = výška vegetační bariéry (m)
- $f_{H7,11\_v6}(d, W)$  = funkce pro přepočtení na výškovou hladinu 6 m

Funkce  $f_{H7,II\_v6}(d, W)$  se přičítá k rovnici  $U_{L\_v1,5}$  a je stanovena pro výšky 7 a 11 m.

Dále je rozhodovací podmínkou určeno, zda je šířka bariéry větší, příp. menší než šířka/vzdálenost lomového bodu přepočtové funkce od komunikace. Vzdařenost lomového bodu od komunikace je vyjádřena následující rovnicí:

$$d_{LB\_H7\_v6} = a + b \times W + c \times (Sqr(W) \times Ln(W)) + f \times (Ln(W) \times Ln(W)) + e \times (W / Ln(W))$$

- konstanty:  $a = 3467,52621715422$   
 $b = 185,07714555275$   
 $c = 473,36144580022$   
 $e = -1992,69061832691$   
 $f = -18,0864712722481$

## 1) Pro výšku bariéry od 3 do 7 m

### a) pro $d < d_{LB}$

#### I. pro $d < d_{LB\_H7\_v6}$

$$f_L(d, W, H) = (0,25 \times H - 0,75) \times f_{L1}(d, W) + (1,75 - 0,25 \times H) \times f_{L2}(d, W) + f_{H7\_v6\_c1}(d, W)$$

$$f_{H7\_v6\_c1}(d, W) = a + b \times d + c \times (\exp(d / j)) + l \times (Sqr(d) \times Ln(d)) + e \times (d / Ln(d)) + f \times (\exp(W / k)) + g \times (Ln(W) \times Ln(W)) + h \times (W / Ln(W)) + i \times (Sqr(W)) + f_{kor\_H7\_v6}(d, W)$$

- konstanty:  $a = -605275,826762213$   
 $b = -8872,59635739266$   
 $c = 61530,098102211$   
 $e = 92969,4243189518$   
 $f = 367195,163755232$   
 $g = -4063,31874299056$   
 $h = -5184,9563519815$   
 $i = 18451,2450048302$

$$j = 574,6242679975$$

$$k = 1196,92861936234$$

$$l = -21376,9757804922$$

$$f_{kor\_H7\_v6}(d, W) = (a + c \times d + f \times d^2 + h \times d^3 + j \times d^4 + l \times d^5) / (1 + b \times d + e \times d^2 + g \times d^3 + i \times d^4 + k \times d^5) \times m \times \exp(-W/n)$$

- konstanty:  $a = -1,45883712970984$   
 $b = -6,64660419287503 \times 10^{-2}$   
 $c = 0,176980989227789$   
 $e = 1,63572221467951 \times 10^{-3}$   
 $f = -6,80628430813606 \times 10^{-3}$   
 $g = -1,46282847352821 \times 10^{-5}$   
 $h = 1,07683021445298 \times 10^{-4}$   
 $i = 8,42575948434414 \times 10^{-8}$   
 $j = -8,18550727590136 \times 10^{-7}$   
 $k = -2,26692593240788 \times 10^{-10}$   
 $l = 2,1723116443158 \times 10^{-9}$   
 $m = 4,52726326246725$   
 $n = 2,64848146740809$

## II. pro $d > d_{LB\_H7\_v6}$

$$f_L(d, W, H) = (0,25 \times H - 0,75) \times f_{L1}(d, W) + (1,75 - 0,25 \times H) \times f_{L2}(d, W) + f_{H7\_v6\_c2}(d, W)$$

$$f_{H7\_v6\_c2}(d, W) = ((a + d \times (b + d \times c)) + (Ln(W) \times (e + Ln(W) \times (f + Ln(W) \times g)))) / ((1 + d \times (h + d \times i)) + (Ln(W) \times (j + Ln(W) \times (k + Ln(W) \times l)))) + f_{kor\_H7\_v6}(d, W)$$

- konstanty:  $a = -9,11781810195426$   
 $b = 0,111446045491071$   
 $c = -1,9949937633621 \times 10^{-4}$   
 $e = -16,7760881633569$   
 $f = 5,77642349820278$   
 $g = -0,641657847547513$



$$h = 6,19237712925431 \times 10^{-3}$$

$$i = 1,31045740434214 \times 10^{-8}$$

$$j = -0,27280580362776$$

$$k = 1,51477481207161 \times 10^{-2}$$

$$l = 3,92328549813131 \times 10^{-6}$$

**b) pro  $d > d_{LB}$**

**I. pro  $d < d_{LB\_H7\_v6}$**

$$f_L(d, W, H) = (0,25 \times H - 0,75) \times f_{L3}(d, W) + (1,75 - 0,25 \times H) \times f_{L2}(d, W) + f_{H7\_v6\_c1}(d, W)$$

**II. pro  $d > d_{LB\_H7\_v6}$**

$$f_L(d, W, H) = (0,25 \times H - 0,75) \times f_{L3}(d, W) + (1,75 - 0,25 \times H) \times f_{L2}(d, W) + f_{H7\_v6\_c2}(d, W)$$

**2) Pro výšku bariéry od 7 do 11 m**

**a) pro  $d < d_{LB}$**

**I. pro  $d < d_{LB\_H7\_v6}$**

$$f_L(d, W, H) = (0,25 \times H - 1,75) \times f_{L4}(d, W) + (2,75 - 0,25 \times H) \times f_{L1}(d, W) + f_{H7\_v6\_c1}(d, W)$$

**II. pro  $d > d_{LB\_H7\_v6}$**

$$f_L(d, W, H) = (0,25 \times H - 1,75) \times f_{L4}(d, W) + (2,75 - 0,25 \times H) \times f_{L1}(d, W) + f_{H7\_v6\_c2}(d, W)$$

**b) pro  $d > d_{LB}$**

**I. pro  $d < d_{LB\_H7\_v6}$**

$$f_L(d, W, H) = (0,25 \times H - 1,75) \times f_{L5}(d, W) + (2,75 - 0,25 \times H) \times f_{L3}(d, W) + f_{H7\_v6\_c1}(d, W)$$

## II. pro $d > d_{LB\_H7\_v6}$

$$f_L(d, W, H) = (0,25 \times H - 1,75) \times f_{L5}(d, W) + (2,75 - 0,25 \times H) \times f_{L3}(d, W) + f_{H7\_v6\_c2}(d, W)$$

### 3) Pro výšku bariéry nad 11 m

a)  $f_L(d, W, H_{>11m}) \leq 0$

$$f_L(d, W, H) = f_L(d, W, H_{11m})$$

b)  $f_L(d, W, H_{>11m}) > 0$

$$f_L(d, W, H) = f_L(d, W, H_{11m}) + f_{L6}(d, W) \times (H - 11) + f_{H11\_v6}(d, W)$$

$$f_{H11\_v6}(d, W) = 1 / (a + b \times d + c \times d \times \ln(d) + e \times d^2 + f \times d^2 \times \ln(d) + g \times d / \ln(d) + h \times \ln(W))$$

- konstanty:  $a = 6,35084433848936$   
 $b = 1,76774772678945$   
 $c = -0,200098859937716$   
 $e = 1,71749468928193 \times 10^{-3}$   
 $f = -2,16498774081819 \times 10^{-4}$   
 $g = -4,52566540855095$   
 $h = 1,37389798084756 \times 10^{-2}$

### 6.1.5 Výpočet účinnosti vegetační bariéry složené z jehličnatých dřevin pro referenční hladinu 3 m

Funkce pro výpočet účinnosti vegetační bariéry složené z jehličnatých dřevin ( $U_{J\_v3}$ ) vychází z rovnice pro výpočet účinnosti vegetační bariéry složené z listnatých dřevin ( $U_{L\_v3}$ ) pro referenční hladinu 3 m.

Výsledná funkce pro výpočet účinnosti vegetační bariéry složené z jehličnatých dřevin je pak dána následující rovnicí:

$$U_{J\_v3} = k \times f(p) \times (f_L(d, W, H) + f_{JLDiff}(d, W)) + f_{H3,7,11\_v3}(d, W)$$

$$f_{JLDiff}(d, W) = (((f_{JLDiff\_w80} - f_{JLDiff\_w20}) / 60)) \times W + f_{JLDiff\_w20} - (((f_{JLDiff\_w80} - f_{JLDiff\_w20}) / 60)) \times 20$$

kde:

- $U_{J\_v3}$  = účinnost vegetační bariéry složené z jehličnatých dřevin pro výškovou hladinu 3 m (%)
- $d$  = vzdálenost od osy komunikace (m)
- $W$  = šířka vegetační bariéry (m)
- $H$  = výška vegetační bariéry (m)
- $f_{JLDiff}(d, W)$  = funkce pro přepočtení listnatých dřevin na jehličnaté

Funkce  $f_{JLDiff}(d, W)$  vstupuje do těla rovnice pro  $U_{L\_v3}$ , je stanovena pro výšky 3, 7 a 11 m a představuje interpolační funkci mezi 2 rovnicemi:

- $f_{JLDiff\_w80}$  a  $f_{JLDiff\_w20}$  které, vyjadřují závislost účinnosti zachytu na výšce bariéry a vzdálenosti od komunikace při konstantní hodnotě  $W$  (80 m, 20 m)

#### a) pro výšku bariéry menší než 7 m

$$f_{JLDiff\_H3\_v3}(d, W)$$

$$J_{LDiff\_H3\_v3} = (((f_{JLDiff\_w80} - f_{JLDiff\_w20}) / 60)) \times W + f_{JLDiff\_w20} - (((f_{JLDiff\_w80} - f_{JLDiff\_w20}) / 60)) \times 20$$

$$f_{JLDiff\_w20} = ((a + c \times d + e \times d^2) / (1 + b \times d + g \times d^2 + f \times d^3))^2$$

- konstanty:  $a = 1,95968014584784$   
 $b = -9,53697167049082 \times 10^{-2}$   
 $c = -0,195699873014362$   
 $g = 3,24284490552936 \times 10^{-3}$   
 $e = 8,24398882896695 \times 10^{-3}$   
 $f = -1,41447697106805 \times 10^{-7}$

$$f_{JLdiff\_w80} = (a_1 + c_1 \times d + e_1 \times d^2 + g_1 \times d^3 + i_1 \times d^4 + k_1 \times d^5) / (1 + b_1 \times d + d_1 \times d^2 + f_1 \times d^3 + h_1 \times d^4 + j_1 \times d^5)$$

- konstanty:  $a_1 = -0,165462182078184$   
 $b_1 = -6,04342797879825 \times 10^{-2}$   
 $c_1 = 0,22707149127409$   
 $d_1 = 3,21751706695025 \times 10^{-3}$   
 $e_1 = 1,45334442390637 \times 10^{-2}$   
 $f_1 = -6,26390301855328 \times 10^{-5}$   
 $g_1 = -4,83518275437257 \times 10^{-4}$   
 $h_1 = 4,2764369110399 \times 10^{-7}$   
 $i_1 = 3,94415721938818 \times 10^{-6}$   
 $j_1 = -4,72509993237601 \times 10^{-10}$   
 $k_1 = -4,19442899550665 \times 10^{-9}$

## b) pro výšku bariéry menší než 11 m

$$f_{JLdiff\_H7\_v3}(d, W)$$

$$J_{Ldiff\_H7\_v3} = (((f_{JLdiff\_w80} - f_{JLdiff\_w20}) / 60)) \times W + f_{JLdiff\_w20} - (((f_{JLdiff\_w80} - f_{JLdiff\_w20}) / 60)) \times 20$$

$$f_{JLdiff\_w20} = (a + c \times d + e \times d^2 + g \times d^3) / (1 + b \times d + i \times d^2 + f \times d^3 + h \times d^4)$$

- konstanty:  $a = 0,794670409216982$   
 $b = -7,79217149755448 \times 10^{-2}$   
 $c = 4,88567565600051 \times 10^{-2}$   
 $i = 2,13536576465604 \times 10^{-3}$   
 $e = 2,43134762320778 \times 10^{-2}$   
 $f = 1,8493451417577 \times 10^{-5}$   
 $g = 3,12343386369813 \times 10^{-4}$   
 $h = -2,45650782072296 \times 10^{-9}$

$$f_{JLdiff\_w80} = (a_1 + c_1 \times d + e_1 \times d^2 + g_1 \times d^3 + i_1 \times d^4 + k_1 \times d^5) / (1 + b_1 \times d + d_1 \times d^2 + f_1 \times d^3 + h_1 \times d^4 + j_1 \times d^5)$$

- konstanty:  $a_1 = -0,461283196581115$   
 $b_1 = -4,66485936792722 \times 10^{-2}$   
 $c_1 = 0,892423231428177$   
 $d_1 = 1,45052796175882 \times 10^{-3}$   
 $e_1 = -9,28317202460739 \times 10^{-3}$   
 $f_1 = -1,94800146877817 \times 10^{-5}$   
 $g_1 = -5,28629727191558 \times 10^{-5}$   
 $h_1 = 8,76396515498378 \times 10^{-8}$   
 $i_1 = 4,69369571932825 \times 10^{-7}$   
 $j_1 = 6,3145211178858 \times 10^{-11}$   
 $k_1 = 3,05239805331543 \times 10^{-9}$

### c) pro výšku bariéry větší než 11 m

$$f_{JLdiff\_H11\_v3}(d, W)$$

$$J_{Ldiff\_H11\_v3} = (((f_{JLdiff\_w80} - f_{JLdiff\_w20}) / 60)) \times W + f_{JLdiff\_w20} - (((f_{JLdiff\_w80} - f_{JLdiff\_w20}) / 60)) \times 20$$

$$f_{JLdiff\_w20} = a + b \times \ln(d) + c / \ln(d) + g \times (\ln(d))^2 + e / (\ln(d))^2 + f \times (\ln(d))^3$$

- konstanty:  $a = 1271,3163311088$   
 $b = -239,586433426732$   
 $c = -2533,28526673751$   
 $g = 13,8446181163816$   
 $e = 1691,3384290745$   
 $f = 0,31970591019466$

$$f_{JLDiff\_w80} = (a_1 + c_1 \times d + e_1 \times d^2 + g_1 \times d^3) / (1 + b_1 \times d + d_1 \times d^2 + f_1 \times d^3 + h_1 \times d^4)$$

- konstanty:  $a_1 = 3,08565953813262 \times 10^{-2}$   
 $b_1 = -0,014683118467176$   
 $c_1 = 0,366410416268123$   
 $d_1 = 4,01222779313626 \times 10^{-5}$   
 $e_1 = -4,52863417199991 \times 10^{-3}$   
 $f_1 = 2,81437500451665 \times 10^{-7}$   
 $g_1 = 1,67381299617708 \times 10^{-5}$   
 $h_1 = -4,97534212203198 \times 10^{-10}$

### 6.1.6 Výpočet účinnosti vegetační bariéry složené z jehličnatých dřevin pro referenční hladinu 6 m

Funkce pro výpočet účinnosti vegetační bariéry složené z jehličnatých dřevin ( $U_{J\_v6}$ ) vychází z rovnice pro výpočet účinnosti vegetační bariéry složené z listnatých dřevin ( $U_{L\_v6}$ ) pro referenční hladinu 6 m.

Výsledná funkce pro výpočet účinnosti vegetační bariéry složené z jehličnatých dřevin je pak dána následující rovnicí:

$$U_{J\_v6} = k \times f(p) \times (f_L(d, W, H) + f_{JLDiff}(d, W)) + f_{H3,7,11\_v3}(d, W)$$

$$f_{JLDiff}(d, W) = (((f_{JLDiff\_w80} - f_{JLDiff\_w20}) / 60)) \times W + f_{JLDiff\_w20} - (((f_{JLDiff\_w80} - f_{JLDiff\_w20}) / 60)) \times 20$$

kde:

- $U_{J\_v6}$  = účinnost vegetační bariéry složené z jehličnatých dřevin pro výškovou hladinu 6 m (%)
- $d$  = vzdálenost od osy komunikace (m)
- $W$  = šířka vegetační bariéry (m)
- $H$  = výška vegetační bariéry (m)
- $f_{JLDiff}(d, W)$  = funkce pro přepočtení listnatých dřevin na jehličnaté

Funkce  $f_{JLDiff}(d, W)$  vstupuje do těla rovnice pro  $U_{L_{v6}}$  je stanovena pro výšky 7 a 11 m a představuje interpolační funkci mezi 2 rovnicemi:

- $f_{JLDiff_{w80}}$  a  $f_{JLDiff_{w20}}$  které, vyjadřují závislost účinnosti záchyty na výšce bariéry a vzdálenosti od komunikace při konstantní hodnotě  $W$  (80 m, 20 m)

#### a) pro výšku bariéry menší než 11 m

$$f_{JLDiff_{H7_{v6}}}(d, W)$$

$$J_{LDiff_{H7_{v6}}} = (((f_{JLDiff_{w80}} - f_{JLDiff_{w20}}) / 60)) \times W + f_{JLDiff_{w20}} - (((f_{JLDiff_{w80}} - f_{JLDiff_{w20}}) / 60)) \times 20$$

$$f_{JLDiff_{w20}} = (a + c \times d + e \times d^2 + g \times d^3 + i \times d^4) / (1 + b \times d + j \times d^2 + f \times d^3 + h \times d^4)$$

- konstanty:  $a = -0,421104297410989$   
 $b = -7,33714984535151 \times 10^{-2}$   
 $c = 0,752187862532288$   
 $j = 2,96489938663518 \times 10^{-3}$   
 $e = 2,47404373664112 \times 10^{-2}$   
 $f = -7,6711522698936 \times 10^{-6}$   
 $g = -2,75719336180753 \times 10^{-5}$   
 $h = -8,40076163730947 \times 10^{-8}$   
 $i = -1,54726902031811 \times 10^{-6}$

$$f_{JLDiff_{w80}} = (a_1 + c_1 \times d + e_1 \times d^2 + g_1 \times d^3 + i_1 \times d^4 + k_1 \times d^5) / (1 + b_1 \times d + d_1 \times d^2 + f_1 \times d^3 + h_1 \times d^4 + j_1 \times d^5)$$

- konstanty:  $a_1 = -0,341986469282053$   
 $b_1 = -7,05795132266279 \times 10^{-2}$   
 $c_1 = 0,902748852561416$   
 $d_1 = 3,46925330649486 \times 10^{-3}$   
 $e_1 = 1,89300961245225 \times 10^{-2}$



$$f_l = -6,34050403011532 \times 10^{-5}$$

$$g_l = -7,99121206287608 \times 10^{-4}$$

$$h_l = 4,61677952744532 \times 10^{-7}$$

$$i_l = 7,53650703530609 \times 10^{-6}$$

$$j_l = -8,77217923704777 \times 10^{-10}$$

$$k_l = -1,54064789308995 \times 10^{-8}$$

## b) pro výšku bariéry větší než 11 m

$$f_{JLdiff\_H11\_v6}(d, W)$$

$$J_{Ldiff\_H11\_v6} = (((f_{JLdiff\_w80} - f_{JLdiff\_w20}) / 60)) \times W + f_{JLdiff\_w20} - (((f_{JLdiff\_w80} - f_{JLdiff\_w20}) / 60)) \times 20$$

$$f_{JLdiff\_w20} = (a + c \times d + e \times d^2 + g \times d^3) / (1 + b \times d + h \times d^2 + f \times d^3)$$

- konstanty:  $a = 0,852786111146807$   
 $b = -5,92778042587963 \times 10^{-2}$   
 $c = 1,04157462274051$   
 $h = 1,64096107534626 \times 10^{-3}$   
 $e = 2,09969532093828 \times 10^{-2}$   
 $f = 8,73241692654414 \times 10^{-6}$   
 $g = 2,14939741350271 \times 10^{-4}$

$$f_{JLdiff\_w80} = (a_l + c_l \times d + e_l \times d^2 + g_l \times d^3 + i_l \times d^4) / (1 + b_l \times d + d_l \times d^2 + f_l \times d^3 + h_l \times d^4 + j_l \times d^5)$$

- konstanty:  $a_l = -0,495572217889221$   
 $b_l = -0,050998212564362$   
 $c_l = 1,95401965801639$   
 $d_l = 1,66471046574275 \times 10^{-3}$   
 $e_l = -3,02505595684277 \times 10^{-2}$

$$f_l = -2,52294655594209 \times 10^{-5}$$

$$g_l = 7,27896224605835 \times 10^{-6}$$

$$h_l = 1,47787223065752 \times 10^{-7}$$

$$i_l = 1,37768211573851 \times 10^{-6}$$

$$j_l = -1,28359809833232 \times 10^{-10}$$

## 6.2. VÝPOČET ÚČINNOSTI VEGETAČNÍ BARIÉRY - CELKOVÝ PRACH (ČÁSTICE FRAKCE PM<sub>7.5</sub>)

Výchozí funkce pro výpočet účinnosti vegetační bariéry je dána následující rovnicí:

$$U = U_L \times (\text{podíl listnatých}) + U_J \times (1 - \text{podíl listnatých})$$

### 6.2.1 Výpočet účinnosti vegetační bariéry složené z listnatých dřevin pro referenční hladinu 1,5 m

Výchozí funkce pro výpočet účinnosti vegetační bariéry složené z listnatých dřevin je dána následující rovnicí:

$$U_L = f_{PM7.5}(p) \times f_L(d, W, H)$$

kde:

- $U_L$  = účinnost vegetační bariéry složené z listnatých dřevin (%)
- $p$  = optická porosita vegetační bariéry
- $d$  = vzdálenost od hranice komunikace (m)
- $W$  = šířka vegetační bariéry (m)
- $H$  = výška vegetační bariéry (m)

Funkce vlivu optické porosity vegetační bariéry je dána následující rovnicí:

$$f_{PM7.5} = (a \times p^6 + b \times p^5 + c \times p^4 + q \times p^3 + e \times p^2 + f \times p + g) / h - i$$

kde:

- $p$  = optická porosita v relativní stupnici od 0 do 1 (0 = 0 % porosita, 1 = 100 % porosita, tj. stav bez bariéry)

- konstanty:  $a = -15,089$   
 $b = 48,174$   
 $c = -59,159$   
 $q = 35,679$   
 $e = -11,796$   
 $f = 1,7921$   
 $g = 0,3999$   
 $h = 0,497258721234375$   
 $i = 2,01102556335714 \times 10^{-3}$

Postup výpočtu je obdobný jako v případě částic PM<sub>10</sub>, tj. jsou interpolovány hodnoty funkcí  $f_L$  (d, W, H) stanovených pro jednotlivé výšky bariéry H = 3, 7 a 11 m. Jednotlivé funkce jsou uvedeny v následujícím přehledu.

**a) výška bariéry H = 3 metry, referenční hladina 1,5 metru**

$$f_{PM75\_H3\_y15}(d, W) = (a \times d^b \times W^c) + (a_l + (\text{Ln}(d)) \times (b_l + (\text{Ln}(d)) \times (q_l + (\text{Ln}(d)) \times g_l)) + W \times (c_l + W \times (e_l + W \times h_l)) + (\text{Ln}(d)) \times W \times (f_l + W \times i_l + (\text{Ln}(d)) \times j_l))$$

- konstanty:  $a = 44,93570441113405$   
 $b = -0,4201939089019263$   
 $c = 0,4645622158574857$   
 $a_l = -58,12570840766438$   
 $b_l = 22,9047814909078$   
 $c_l = 2,9895241651443$   
 $q_l = -1,813453429584507$   
 $e_l = 0,009597691757391915$   
 $f_l = -1,338256142589342$   
 $g_l = -0,08191933436656783$   
 $h_l = 1,170464451104779 \times 10^{-5}$   
 $i_l = -0,002248379526364273$   
 $j_l = 0,14938174627861$

**b) výška bariéry H = 7 metrů, referenční hladina 1,5 metru**

$$f_{PM75\_H7\_v15}(d, W) = (a + (\text{Ln}(d)) \times (b + (\text{Ln}(d)) \times (q + (\text{Ln}(d)) \times g)) + (\text{Ln}(W)) \times (c + (\text{Ln}(W)) \times (e + (\text{Ln}(W)) \times h)) + (\text{Ln}(d)) \times (\text{Ln}(W)) \times (f + (\text{Ln}(W)) \times i + (\text{Ln}(d)) \times j)) + (a_1 + (\text{Ln}(d)) \times (b_1 + (\text{Ln}(d)) \times (q_1 + (\text{Ln}(d)) \times g_1)) + W \times (c_1 + W \times (e_1 + W \times h_1)) + (\text{Ln}(d)) \times W \times (f_1 + W \times i_1 + (\text{Ln}(d)) \times j_1))$$

- konstanty:
  - $a = -263,8050744510161$
  - $b = 137,7894060689703$
  - $c = 95,53204799727245$
  - $q = -25,98545095300958$
  - $e = -13,66556198427822$
  - $f = -11,52964726338555$
  - $g = 1,283910435038421$
  - $h = 2,525071563607371$
  - $i = -2,629737425406253$
  - $j = 2,500576182631873$
  - $a_1 = 27,39640754434914$
  - $b_1 = -23,91299256956558$
  - $c_1 = 1,503432750345914$
  - $q_1 = 6,598864084755537$
  - $e_1 = 0,005887962867457847$
  - $f_1 = -0,722026667898485$
  - $g_1 = -0,5804336013821358$
  - $h_1 = 2,865268244963156 \times 10^{-6}$
  - $i_1 = -0,001239001184980192$
  - $j_1 = 0,08414389002681849$

### c) výška bariéry H = 11 metrů, referenční hladina 1,5 metru

V případě této funkce je nutno uplatnit lomový bod, tj. nejprve je stanovena funkcí  $f_{PM75\_H11\_v15\_ifthenbod}(W)$  hodnota lomového bodu LB a následně je volena buď funkce  $f_{PM75\_H11\_v15\_cast1a}(d, W)$  resp.  $f_{PM75\_H11\_v15\_cast1b}(d, W)$  (pro vzdálenost  $d < LB$  a zadanou šířku bariéry, viz níže) nebo funkce  $f_{PM75\_H11\_v15\_cast2}(d, W)$  (pro vzdálenost  $d > LB$ ).

- určení polohy LB:

$$f_{PM75\_H11\_v15\_ifthenbod}(W) = 1 / (a + b \times W + c \times W^2 + q \times W^3 + e \times W^4) - 1$$

- konstanty:  $a = 6,03870770491445 \times 10^{-3}$   
 $b = 4,10070204127216 \times 10^{-4}$   
 $c = 1,03905301128586 \times 10^{-6}$   
 $q = -5,38511491186428 \times 10^{-8}$   
 $e = 3,8793644007879 \times 10^{-10}$

Pro vzdálenost  $d < LB$  jsou pak zadány dvě funkce, z nichž první ( $f_{PM75\_H11\_v15\_cast1a}(d, W)$ ) je platná pro šířku bariéry  $W < 20$  m, druhá ( $f_{PM75\_H11\_v15\_cast1b}(d, W)$ ) platí pro bariéry o šířce nad 20 m.

- část 1a (pro vzdálenost  $d < LB$  a šířku bariéry  $W < 20$  m)

$$f_{PM75\_H11\_v15\_cast1a}(d, W) = a + b \times d + c \times (\ln(W)) + k \times d^2 + e \times (\ln(W))^2 + f \times d \times (\ln(W)) + g \times d^3 + h \times (\ln(W))^3 + i \times d \times (\ln(W))^2 + j \times d^2 \times (\ln(W))$$

- konstanty:  $a = 125,0784995148879$   
 $b = -0,6697670605116575$   
 $c = -132,8124738011868$   
 $e = 40,26389245671762$   
 $f = 1,908227895606842$   
 $g = 3,610958840217185 \times 10^{-5}$   
 $h = -2,68670479138696$   
 $i = -0,3341406511829547$   
 $j = -0,002786136267195837$   
 $k = -0,008954372341426583$

- část 1b (pro vzdálenost  $d < LB$  a šířku bariéry  $W \geq 20$  m)

$$f_{PM75\_H11\_v15\_cast1b}(d, W) = a + d \times (b + d \times (q + d \times g)) + (Ln(W)) \times (c + (Ln(W)) \times (e + (Ln(W)) \times h)) + d \times (Ln(W)) \times (f + (Ln(W)) \times i + d \times j)$$

- konstanty:  $a = 23,2218041782111$   
 $b = 0,126554929052168$   
 $c = 8,194447574278095$   
 $q = -0,01323829485504014$   
 $e = -22,37010646877558$   
 $f = 1,312951694238155$   
 $g = 6,322132019203931 \times 10^{-5}$   
 $h = 6,199699274838754$   
 $i = -0,1835509751732576$   
 $j = -0,003538392258512909$

- část 2 (pro vzdálenost  $d > LB$ )

$$f_{PM75\_H11\_v15\_cast2}(d, W) = (a + (Ln(d)) \times (b + (Ln(d)) \times (q + (Ln(d)) \times g)) + (Ln(W)) \times (c + (Ln(W)) \times (e + (Ln(W)) \times h)) + (Ln(d)) \times (Ln(W)) \times (f + (Ln(W)) \times i + (Ln(d)) \times j)) + (a_1 + (1/d) \times (b_1 + (1/d) \times (q_1 + (1/d) \times g_1)) + W \times (c_1 + W \times (e_1 + W \times h_1)) + (1/d) \times W \times (f_1 + W \times i_1 + (1/d) \times j_1))$$

- konstanty:  $a = -306,0095967377846$   
 $b = 175,2743230216485$   
 $c = 44,69709143610564$   
 $q = -33,02301132007668$   
 $e = -10,80749057468347$   
 $f = 4,833823446248997$   
 $g = 1,568316923483799$   
 $h = 2,26685961212666$   
 $i = -3,179309922718155$   
 $j = 1,551044326846467$   
 $a_1 = -5,28236770086408$   
 $b_1 = 1162,532563260682$   
 $c_1 = 0,2637285929858157$   
 $q_1 = -56071,95991461285$

$$e_l = -0,001424400941500553$$

$$f_l = -58,47368237633284$$

$$g_l = 787479,7718335865$$

$$h_l = 2,573897207076983 \times 10^{-6}$$

$$i_l = 0,1689684590009873$$

$$j_l = 2648,047553576363$$

Pro výšku bariéry nad 11 m je dále použita pro oba intervaly vzdálenosti od lomového bodu následující funkce:

$$f_{PM75\_nad\_H11\_v15} = ((f_{PM75\_H11\_v15\_cast1,2} - f_{PM75\_H7\_v15}) / 4 \times (H - 11))^{1/3}$$



## 6.2.2 Výpočet účinnosti vegetační bariéry složené z jehličnatých dřevin pro referenční hladinu 1,5 m

Postup výpočtu účinnosti vegetační bariéry složené z jehličnatých dřevin je následující:

- je určena hodnota funkce  $f_L(d, W, H)$  pro vegetační bariéru složenou z listnatých dřevin pro příslušnou výšku bariéry ( $H = 3, 7$  nebo  $11$  m)
- tato hodnota je korigována přičtením funkce  $JL_{diff}$  pro příslušnou výšku bariéry
- jsou interpolovány hodnoty mezi jednotlivými výškami bariéry (shodně jako v předešlých případech)

Funkce  $JL_{diff}$  pro příslušnou výšku bariéry je pak stanovena lineární interpolací a extrapolací dvou funkcí, odvozených pro šířku bariéry 20 a 80 m, tj. vždy se interpolují dvě funkce, označené W20 a W80.

### a) výška bariéry $H = 3$ metry, referenční hladina 1,5 metru

$f_{JL_{diff\_PM75\_H3\_v15}}(d, W)$

$$f_{JL_{diff\_PM75\_H3\_v15}}(d, W) = ((f_{JL_{diff\_W80}} - f_{JL_{diff\_W20}}) / 60) \times W + f_{JL_{diff\_W20}} - ((f_{JL_{diff\_W80}} - f_{JL_{diff\_W20}}) / 60) \times 20$$

$$f_{JL_{diff\_W20}} = a + b \times \ln(d) + c / \ln(d) + q \times (\ln(d))^2 + e / (\ln(d))^2 + f \times (\ln(d))^3 + g / (\ln(d))^3$$

- konstanty:  $a = -2550,31126487295$   
 $b = 342,321545405532$   
 $c = 8673,38297752925$   
 $q = -14,6157525409977$   
 $e = -13496,36693413$   
 $f = -0,371388273472019$   
 $g = 7761,14169958273$

$$f_{JLdiff\_w80} = a_1 + b_1 \times \ln(d) + c_1 / \ln(d) + q_1 \times (\ln(d))^2 + e_1 / (\ln(d))^2 + f_1 \times (\ln(d))^3 + g_1 / (\ln(d))^3$$

- konstanty:  $a_1 = -194,602927103376$   
 $b_1 = 9,56654424259648$   
 $c_1 = 1078,75578469169$   
 $q_1 = 0,445555128814617$   
 $e_1 = -2075,71721014777$   
 $f_1 = 3,73135085949049 \times 10^{-3}$   
 $g_1 = 1295,34627060334$

**b) výška bariéry H = 7 metrů, referenční hladina 1,5 metru**

$$f_{JLdiff\_PM75\_H7\_y15}(d, W) = ((f_{JLdiff\_w80} - f_{JLdiff\_w20}) / 60) \times W + f_{JLdiff\_w20} - ((f_{JLdiff\_w80} - f_{JLdiff\_w20}) / 60) \times 20$$

$$f_{JLdiff\_w20} = (a + c \times d + e \times d^2 + g \times d^3 + i \times d^4) / (1 + b \times d + q \times d^2 + f \times d^3 + h \times d^4)$$

- konstanty:  $a = -0,135883444859073$   
 $b = -0,123387028212204$   
 $c = 0,180642643391451$   
 $q = 5,66838433305413 \times 10^{-3}$   
 $e = 1,31902054262942 \times 10^{-2}$   
 $f = -1,80200490842652 \times 10^{-5}$   
 $g = 1,70688439151939 \times 10^{-4}$   
 $h = -2,54678125450405 \times 10^{-7}$   
 $i = -3,05919755197759 \times 10^{-6}$

$$f_{JLdiff\_w80} = a_1 + b_1 \times (\ln(d)) + c_1 / (\ln(d)) + q_1 \times (\ln(d))^2 + e_1 / (\ln(d))^2 + f_1 \times (\ln(d))^3 + g_1 / (\ln(d))^3 + h_1 \times (\ln(d))^4 + i_1 / (\ln(d))^4 + j_1 \times (\ln(d))^5 + k_1 / (\ln(d))^5$$

- konstanty:  $a_1 = -147942,286140878$   
 $b_1 = 25054,5193125353$

$$\begin{aligned}
 c_1 &= 524807,685591914 \\
 q_1 &= -2359,26041485247 \\
 e_1 &= -1136463,05036869 \\
 f_1 &= 96,9657751867604 \\
 g_1 &= 1459600,32099934 \\
 h_1 &= 3,11959618565169 \times 10^{-2} \\
 i_1 &= -1011314,96258373 \\
 j_1 &= -4,36192987892278 \times 10^{-2} \\
 k_1 &= 287206,255259682
 \end{aligned}$$

**c) výška bariéry H = 11 metrů, referenční hladina 1,5 metru**

$$\begin{aligned}
 f_{JLdiff\_PM75\_H11\_v15}(d, W) &= (((f_{JLdiff\_w80} - f_{JLdiff\_w20}) / 60)) \times W + f_{JLdiff\_w20} \\
 &\quad - (((f_{JLdiff\_w80} - f_{JLdiff\_w20}) / 60)) \times 20
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 f_{JLdiff\_w20} &= a + b \times \text{Ln}(d) + c / \text{Ln}(d) + q \times \text{Ln}(d)^2 + e / (\text{Ln}(d))^2 + f \\
 &\quad \times (\text{Ln}(d))^3 + g / (\text{Ln}(d))^3 + h \times (\text{Ln}(d))^4
 \end{aligned}$$

- konstanty:  $a = 17444,1469768245$   
 $b = -3937,13719672219$   
 $c = -40866,0219272628$   
 $q = 434,191929916617$   
 $e = 48637,0298082669$   
 $f = -15,452510820556$   
 $g = -23133,8782157351$   
 $h = -0,421762314226576$

$$\begin{aligned}
 f_{JLdiff\_w80} &= a_1 + b_1 \times \text{Ln}(d) + c_1 / \text{Ln}(d) + q_1 \times \text{Ln}(d)^2 + e_1 / (\text{Ln}(d))^2 + f_1 \\
 &\quad \times (\text{Ln}(d))^3 + g_1 / (\text{Ln}(d))^3 + h_1 \times (\text{Ln}(d))^4 + i_1 / (\text{Ln}(d))^4 + j_1 \times (\text{Ln}(d))^5
 \end{aligned}$$

- konstanty:  $a_1 = 416257,369565581$   
 $b_1 = -101869,135489332$   
 $c_1 = -1045012,81088903$   
 $q_1 = 14788,9229736879$   
 $e_1 = 1582930,47579343$

$$f_l = -1122,29809960963$$

$$g_l = -1327318,82772305$$

$$h_l = 26,3089406864161$$

$$i_l = 472807,572685561$$

$$j_l = 0,883214021602138$$

Pro výšku bariéry nad 11 m je dále použita pro oba intervaly vzdálenosti od lomového bodu následující funkce:

$$f_{JLdiff\_PM75\_nad\_H11\_v15} = ((f_{PM75\_H11\_v15\_cast1,2} + f_{JLdiff\_PM75\_H11\_v15} - f_{PM75\_H7\_v15} - f_{JLdiff\_PM75\_H7\_v15}) / 4 \times (H - 11))^{1/3}$$

### 6.2.3 Výpočet účinnosti vegetační bariéry složené pro referenční hladiny 3 a 6 m (listnaté a jehličnaté dřeviny)

Postup stanovení účinnosti bariéry pro hladiny 3 a 6 m je shodný jako v případě stanovení účinnosti v hladině 1,5 m. V následujícím přehledu uvádíme odvození jednotlivých funkcí, a to pro jednotlivé hladiny, výšky bariéry a druhu dřevin.

#### a) Listnaté dřeviny, referenční hladina 3 metry

##### 1) výška bariéry H = 3 metry

$$f_{PM75\_H3\_v3}(d, W) = (a + d \times b + (Ln(W)) \times (c + (Ln(W)) \times (q + (Ln(W)) \times e))) / (((1 + d \times (f + d \times (g + d \times h))) + ((Ln(W)) \times i)) + (a_1 + d \times (b_1 + d \times (c_1 + d \times (q_1 + d \times (e_1 + d \times f_1)))) + W \times (g_1 + W \times (h_1 + W \times (i_1 + W \times j_1)))) + (a_2 + d \times (b_2 + d \times (c_2 + d \times (q_2 + d \times (e_2 + d \times f_2)))) + ((Ln(W)) \times (g_2 + (Ln(W)) \times h_2)))$$

- konstanty:  $a = -0,635905514615562$   
 $b = -1,25600719760842 \times 10^{-2}$   
 $c = 10,5459746058714$   
 $q = -2,26707601752168$   
 $e = 8,96959749821644 \times 10^{-2}$   
 $f = 5,23423105363527 \times 10^{-4}$   
 $g = 2,25087551445006 \times 10^{-6}$   
 $h = -1,13790106205965 \times 10^{-8}$   
 $i = -0,203677227989992$   
 $a_1 = -13,47451898196916$

$$\begin{aligned}
 b_1 &= 0,8127227330272956 \\
 c_1 &= -0,01542637886926877 \\
 q_1 &= 0,0001187196055970586 \\
 e_1 &= -3,986286501256322 \times 10^{-7} \\
 f_1 &= 4,851470907256911 \times 10^{-10} \\
 g_1 &= 0,1409413098389976 \\
 h_1 &= -0,003534631729421993 \\
 i_1 &= 3,715236464247947 \times 10^{-5} \\
 j_1 &= -1,352837045185762 \times 10^{-7} \\
 a_2 &= 12,80312119755537 \\
 b_2 &= -0,6481974061939972 \\
 c_2 &= 0,01255241550939281 \\
 q_2 &= -9,694431025915971 \times 10^{-5} \\
 e_2 &= 3,242231585246404 \times 10^{-7} \\
 f_2 &= -3,915057599081818 \times 10^{-10} \\
 g_2 &= -2,228026638953724 \\
 h_2 &= 0,2900596923592988
 \end{aligned}$$

## 2) výška bariéry H = 7 metrů

$$\begin{aligned}
 f_{PM75\_H7\_v3}(d, W) &= (a + (\text{Ln}(d)) \times (b + (\text{Ln}(d)) \times (q + (\text{Ln}(d)) \times g)) + (\text{Ln}(W)) \\
 &\quad \times (c + (\text{Ln}(W)) \times (e + (\text{Ln}(W)) \times h)) + (\text{Ln}(d)) \times (\text{Ln}(W)) \times (f + (\text{Ln}(W)) \\
 &\quad \times i + (\text{Ln}(d)) \times j)) + (a_1 + b_1 \times \exp(-d / c_1) \times \exp(-W / q_1)) + f_{PM75\_H7\_v3\_korekce}(d, W)
 \end{aligned}$$

- konstanty:
  - $a = -92,67068755681322$
  - $b = -0,6394027600787202$
  - $c = 134,0890260831443$
  - $q = 9,549907870059567$
  - $e = -8,262042483738936$
  - $f = -32,73222166091058$
  - $g = -1,679868878829496$
  - $h = 2,734936337648308$
  - $i = -4,032617551386072$
  - $j = 5,338753712936473$
  - $a_1 = -0,1892714812406387$
  - $b_1 = 53,97709877517663$

$$c_1 = 3,296209899853018$$

$$q_1 = -3,198287008940567$$

$$f_{PM75\_H7\_v3\_korekce}(d, W) = (a + b \times d + c / d + q \times d^2 + e / d^2 + f \times d^3 + g / d^3 + h \times d^4 + i / d^4) \times (a_1 \times \exp(-W / b_1))$$

- konstanty:  $a = -16,3460282906802$   
 $b = 0,117561280044153$   
 $c = 813,265679657332$   
 $q = -5,35972050307471 \times 10^{-4}$   
 $e = -30798,8775619851$   
 $f = 1,63690623826666 \times 10^{-6}$   
 $g = 532359,498827207$   
 $h = -1,91640421047444 \times 10^{-9}$   
 $i = -2893406,18230903$   
 $a_1 = 4,52726326246725$   
 $b_1 = 2,64848146740809$

### 3) výška bariéry H = 11 metrů

V případě této funkce je u výšky 11 metrů opět nutné uplatnit lomový bod, tj. nejprve je stanovena funkcí  $f_{PM75\_H11\_v3\_ifthenbod}(W)$  hodnota lomového bodu LB a následně je volena buď funkce  $f_{PM75\_H11\_v3\_cast1}(d)$  (pro vzdálenost  $d < LB$ ) nebo funkce  $f_{PM75\_H11\_v3\_cast2}(d, W)$  (pro vzdálenost  $d > LB$ )

- určení polohy LB:

$$f_{PM75\_H11\_v3\_ifthenbod}(W) = a + b \times W + c \times W^2 + q \times W^3 + e \times W^4 + f \times W^5$$

- konstanty:  $a = 7,33659427885023$   
 $b = 0,795121787080783$   
 $c = -1,55547835643142 \times 10^{-3}$   
 $q = 9,76344235716595 \times 10^{-5}$   
 $e = -8,42631057902487 \times 10^{-7}$   
 $f = 2,08752988477753 \times 10^{-9}$

- část 1 (pro vzdálenost  $d < LB$ )

$$f_{PM75\_H11\_v3\_cast1}(d) = (a + c \times \ln(d) + e \times (\ln(d))^2 + g \times (\ln(d))^3 + i \times (\ln(d))^4) / (1 + b \times \ln(d) + q \times (\ln(d))^2 + f \times (\ln(d))^3 + h \times (\ln(d))^4)$$

- konstanty:  $a = -117,630499932072$   
 $b = -1,08154899145317$   
 $c = 70,3242648070144$   
 $q = 0,752350924704673$   
 $e = 20,3346505758719$   
 $f = -0,240941634482473$   
 $g = -16,5231256783346$   
 $h = 0,026701878494882$   
 $i = 2,26983273095627$

- část 2 (pro vzdálenost  $d > LB$ )

$$f_{PM75\_H11\_v3\_cast2}(d, W) = a + \ln(d) \times (b + \ln(d) \times (q + \ln(d) \times g)) + \ln(W) \times (c + \ln(W) \times (e + \ln(W) \times h)) + \ln(d) \times \ln(W) \times (f + \ln(W) \times i + \ln(d) \times j)$$

- konstanty:  $a = -27,3816820152312$   
 $b = 8,03746744586901$   
 $c = 59,8349292313385$   
 $q = 5,38850849088702$   
 $e = 8,6521678565468$   
 $f = -24,448207429744$   
 $g = -1,40581170107697$   
 $h = 1,38220746539815$   
 $i = -4,93721819125231$   
 $j = 5,32249537522975$

Pro výšku bariéry nad 11 m je dále použita pro oba intervaly vzdálenosti od lomového bodu následující funkce:

$$f_{PM75\_nad\_H11\_v3} = ((f_{PM75\_H11\_v3\_cast1,2} - f_{PM75\_H7\_v3}) / 4 \times (H - 11))^{1/3}$$



## b) Jehličnaté dřeviny, referenční hladina 3 metry

### 1) výška bariéry H = 3 metry

$$f_{JLdiff\_PM75\_H3\_v3}(d, W) = (((f_{JLdiff\_W80} - f_{JLdiff\_W20}) / 60)) \times W + f_{JLdiff\_W20} - (((f_{JLdiff\_W80} - f_{JLdiff\_W20}) / 60)) \times 20$$

$$f_{JLdiff\_W20} = a + b \times \ln(d) + c / \ln(d) + q \times \ln(d)^2 + e / (\ln(d))^2 + f \times (\ln(d))^3 + g / (\ln(d))^3 + h \times (\ln(d))^4$$

- konstanty:  $a = -552,730083180994$   
 $b = -23,1949884474182$   
 $c = 3134,1397117985$   
 $q = 16,3963108915586$   
 $e = -6054,69318640548$   
 $f = -1,08794518636287$   
 $g = 3931,45236988474$   
 $h = -2,39137354501206 \times 10^{-2}$

$$f_{JLdiff\_W80} = a_1 + b_1 \times \ln(d) + c_1 \times (\ln(d))^2 + q_1 \times (\ln(d))^3 + e_1 \times (\ln(d))^4$$

- konstanty:  $a_1 = -44,3914063116157$   
 $b_1 = 41,9356745369821$   
 $c_1 = -9,7233477603005$   
 $q_1 = 0,617251179710928$   
 $e_1 = 1,38809383631764 \times 10^{-2}$

## 2) výška bariéry H = 7 metrů

$$f_{JLdiff\_PM75\_H7\_v3}(d, W) = (((f_{JLdiff\_w80} - f_{JLdiff\_w20}) / 60)) \times W + f_{JLdiff\_w20} - (((f_{JLdiff\_w80} - f_{JLdiff\_w20}) / 60)) \times 20$$

$$f_{JLdiff\_w20} = (a + c \times d + e \times d^2 + g \times d^3 + i \times d^4) / (1 + b \times d + q \times d^2 + f \times d^3 + h \times d^4)$$

- konstanty:  $a = -0,135883444859073$   
 $b = -0,123387028212204$   
 $c = 0,180642643391451$   
 $q = 5,66838433305413 \times 10^{-3}$   
 $e = 1,31902054262942 \times 10^{-2}$   
 $f = -1,80200490842652 \times 10^{-5}$   
 $g = 1,70688439151939 \times 10^{-4}$   
 $h = -2,54678125450405 \times 10^{-7}$   
 $i = -3,05919755197759E \times 10^{-6}$

$$f_{JLdiff\_w80} = a_1 + b_1 \times (\ln(d)) + c_1 / (\ln(d)) + q_1 \times (\ln(d))^2 + e_1 / (\ln(d))^2 + f_1 \times (\ln(d))^3 + g_1 / (\ln(d))^3 + h_1 \times (\ln(d))^4 + i_1 / (\ln(d))^4 + j_1 \times (\ln(d))^5 + k_1 / (\ln(d))^5$$

- konstanty:  $a_1 = -147942,286140878$   
 $b_1 = 25054,5193125353$   
 $c_1 = 524807,685591914$   
 $q_1 = -2359,26041485247$   
 $e_1 = -1136463,05036869$   
 $f_1 = 96,9657751867604$   
 $g_1 = 1459600,32099934$   
 $h_1 = 3,11959618565169 \times 10^{-2}$   
 $i_1 = -1011314,96258373$   
 $j_1 = -4,36192987892278 \times 10^{-2}$   
 $k_1 = 287206,255259682$

### 3) výška bariéry H = 11 metrů

$$f_{JLdiff\_PM75\_H11\_v3}(d, W) = (((f_{JLdiff\_w80} - f_{JLdiff\_w20}) / 60)) \times W + f_{JLdiff\_w20} - (((f_{JLdiff\_w80} - f_{JLdiff\_w20}) / 60)) \times 20$$

$$f_{JLdiff\_w20} = a + b \times \ln(d) + c / \ln(d) + q \times \ln(d)^2 + e / (\ln(d))^2 + f \times (\ln(d))^3 + g / (\ln(d))^3 + h \times (\ln(d))^4$$

- konstanty:  $a = -3603,74180871216$   
 $b = 715,431730064659$   
 $c = 9583,38355414604$   
 $q = -70,0373203827999$   
 $e = -12542,041655206$   
 $f = 2,22199129239673$   
 $g = 6313,80743233556$   
 $h = 6,38300212526094 \times 10^{-2}$

$$f_{JLdiff\_w80} = a_1 + b_1 \times \ln(d) + c_1 / \ln(d) + q_1 \times \ln(d)^2 + e_1 / (\ln(d))^2 + f_1 \times (\ln(d))^3 + g_1 / (\ln(d))^3 + h_1 \times (\ln(d))^4$$

- konstanty:  $a_1 = 2279,25825158866$   
 $b_1 = -671,103898238542$   
 $c_1 = -3697,050337225$   
 $q_1 = 90,2575723989969$   
 $e_1 = 2751,60599413981$   
 $f_1 = -3,84353265690608$   
 $g_1 = -743,234021453232$   
 $h_1 = -9,77385304295268 \times 10^{-2}$

Pro výšku bariéry nad 11 m je dále použita pro oba intervaly vzdálenosti od lomového bodu následující funkce:

$$f_{JLdiff\_PM75\_nad\_H11\_v3} = ((f_{PM75\_H11\_v3\_cast1,2} + f_{JLdiff\_PM75\_H11\_v3} - f_{PM75\_H7\_v3} - f_{JLdiff\_PM75\_H7\_v3}) / 4 \times (H - 11))^{1/3}$$

## c) Listnaté dřeviny, referenční hladina 6 metrů

### 1) výška bariéry H = 7 metrů

$$f_{PM75\_H7\_v6}(d, W) = a + b \times (\ln(d)) + c \times (\ln(W)) + q \times (\ln(d))^2 + e \times (\ln(W))^2 + f \times (\ln(d)) \times (\ln(W)) + g \times (\ln(d))^3 + h \times (\ln(W))^3 + i \times (\ln(d)) \times (\ln(W))^2 + j \times (\ln(d))^2 \times (\ln(W))$$

- konstanty:  $a = -184,067193559982$   
 $b = 27,5771800144532$   
 $c = 127,471892875847$   
 $q = 5,96652437067561$   
 $e = -13,0320916961957$   
 $f = -24,5225320184773$   
 $g = -1,38161903831784$   
 $h = 2,42331091119586$   
 $i = -2,61814429146479$   
 $j = 3,76938610294571$

### 2) výška bariéry H = 11 metrů

$$f_{PM75\_H11\_v6}(d, W) = a + (\ln(d)) \times (b + (\ln(d)) \times (k + (\ln(d)) \times g)) + (\ln(W)) \times (c + (\ln(W)) \times (e + (\ln(W)) \times h)) + (\ln(d)) \times (\ln(W)) \times (f + (\ln(W)) \times i + (\ln(d)) \times j)$$

- konstanty:  $a = 61,8172057864096$   
 $b = -164,240493376986$   
 $c = 197,590315869424$   
 $e = -10,8639506757759$   
 $f = -52,5894833887994$   
 $g = -5,47917934855388$   
 $h = 2,66300871374597$   
 $i = -3,98590205873429$   
 $j = 7,49024732809795$   
 $k = 54,5744374309239$

Pro výšku bariéry nad 11 m je dále použita následující funkce:

$$f_{PM75\_nad\_H11\_v6} = ((f_{PM75\_H11\_v6} - f_{PM75\_H7\_v6}) / 4 \times (H - 11))^{1/3}$$

#### d) Jehličnaté dřeviny, referenční hladina 6 metrů

##### 1) výška bariéry H = 7 metrů

$$f_{JLdiff\_PM75\_H7\_v6}(d, W) = (((f_{JLdiff\_W80} - f_{JLdiff\_W20}) / 60)) \times W + f_{JLdiff\_W20} - (((f_{JLdiff\_W80} - f_{JLdiff\_W20}) / 60)) \times 20$$

$$f_{JLdiff\_W20} = a + b \times \ln(d) + c / \ln(d) + q \times \ln(d)^2 + e / (\ln(d))^2 + f \times (\ln(d))^3 + g / (\ln(d))^3 + h \times (\ln(d))^4$$

- konstanty:  $a = -10326,8703896475$   
 $b = 2131,98802591503$   
 $c = 26671,2280921682$   
 $q = -217,851155556993$   
 $e = -34553,0215547199$   
 $f = 7,22504615567941$   
 $g = 17508,6219842652$   
 $h = 0,203415179255788$

$$f_{JLdiff\_W80} = a_1 + b_1 \times \ln(d) + c_1 / \ln(d) + q_1 \times \ln(d)^2 + e_1 / (\ln(d))^2 + f_1 \times (\ln(d))^3 + g_1 / (\ln(d))^3 + h_1 \times (\ln(d))^4$$

- konstanty:  $a_1 = -13294,5861616973$   
 $b_1 = 2682,18962777999$   
 $c_1 = 34973,9980530967$   
 $q_1 = -266,529062493569$   
 $e_1 = -46057,3247566381$   
 $f_1 = 8,483623908073$   
 $g_1 = 23701,6751408402$   
 $h_1 = 0,243136991157509$

## 2) výška bariéry H = 11 metrů

$$f_{JLdiff\_PM75\_H11\_v6}(d, W) = ((f_{JLdiff\_w80} - f_{JLdiff\_w20}) / 60)) \times W + f_{JLdiff\_w20} - ((f_{JLdiff\_w80} - f_{JLdiff\_w20}) / 60)) \times 20$$

$$f_{JLdiff\_w20} = a + b \times \ln(d) + c / \ln(d) + q \times \ln(d)^2 + e / (\ln(d))^2 + f \times (\ln(d))^3 + g / (\ln(d))^3 + h \times (\ln(d))^4$$

- konstanty:  $a = 8110,19620040873$   
 $b = -1698,25304623898$   
 $c = -20769,4940472179$   
 $q = 175,317304558261$   
 $e = 27533,2399362685$   
 $f = -5,78652664396438$   
 $g = -14689,021850154$   
 $h = -0,163104493707755$

$$f_{JLdiff\_w80} = a_1 + b_1 \times \ln(d) + c_1 / \ln(d) + q_1 \times \ln(d)^2 + e_1 / (\ln(d))^2 + f_1 \times (\ln(d))^3 + g_1 / (\ln(d))^3 + h_1 \times (\ln(d))^4$$

- konstanty:  $a_1 = -15786,6647584062$   
 $b_1 = 3273,80186159147$   
 $c_1 = 39932,7386561652$   
 $q_1 = -330,559216084642$   
 $e_1 = -50223,4383154745$   
 $f_1 = 10,5766905553608$   
 $g_1 = 24650,1859439558$   
 $h_1 = 0,302156622611667$

Pro výšku bariéry nad 11 m je dále použita následující funkce:

$$f_{JLdiff\_PM75\_nad\_H11\_v6} = ((f_{PM75\_H11\_v6} + f_{JLdiff\_PM75\_H11\_v6} - f_{PM75\_H7\_v6} - f_{JLdiff\_PM75\_H7\_v6}) / 4 \times (H - 11))^{1/3}$$

## 7. ANALÝZA ZÁCHYTU ZÁSTUPCŮ PAH A TĚŽKÝCH KOVŮ

V rámci projektu MŽP (Karel et al., 2015b) byla řešena též otázka zachytu těžkých kovů a polycyklických aromatických uhlovodíků, vázaných na suspendované částice, pomocí vegetačních bariér.

- polycyklické aromatické uhlovodíky (PAH) je skupina látek tvořených vodíkem a uhlíkem ve formě benzenových jader. Patří k běžným polutantům a vznikají jak přírodní tak antropogenní cestou pyrolýzou při nedokonalém spalování. Jejich zdrojem v městském prostředí jsou zejména: automobilová doprava, topeniště, tabákový kouř a prach ze silnic. Prachové částice mohou být transportovány na velké vzdálenosti a mohou vstupovat do dalších složek životního prostředí prostřednictvím suché a vlhké depozice. Některé polycyklické aromatické uhlovodíky jsou známé svojí toxicitou a karcinogenitou, proto patří ke sledovaným polutantům v rámci monitorovací sítě. Jedním z nejlépe popsáných a nejvíce toxických je benzo(a)pyren, který je používán jako indikátor pro PAH a je pro něj stanoven imisní limit. V rámci předkládaného hodnocení je sledován právě benzo(a)pyren (dále B(a)P) a dále celkové koncentrace PAH.
- rovněž těžké kovy mohou zejména při dlouhodobé expozici působit toxicky na zdraví obyvatel. Navíc snadno přecházejí do dalších složek prostředí (půda, voda, vegetace), kde mohou přetrvávat dlouhou dobu. Nejčastějšími antropogenními zdroji emisí těžkých kovů je doprava, průmyslové činnosti, energetika a stavebnictví. V případě dopravních emisí se kromě složek výfukových plynů jedná též o částice vzniklé opotřebením pneumatik a brzdových destiček, opotřebením povrchu silnic a zviřením silničního prachu. V této studii jsou hodnoceny zejména kovy, pro něž je platnou legislativou stanoven imisní limit, tj. arsen, kadmium, nikl a olovo.

Jak polycyklické aromatické uhlovodíky, tak i těžké kovy jsou vázány na částice různých velikostních frakcí. Účinnost jejich zachytu vegetační bariérou pak závisí právě na tom, na jakou frakci prachu je daná zdravotně riziková složka emisí vázána. Proto byla ve studii soustředěna pozornost na určení podílu jednotlivých velikostních frakcí částic, charakteristických pro dané látky, v okolí silničních komunikací.

Existuje řada studií, které se zabývají chemickým složením prachových částic a jejich velikostními frakcemi. Liší se od sebe typem lokalit pro odběr vzorků a použitými metodami. Z hlediska místa odběru vzorků je hlavní rozdíl mezi odebíráním vzorků v tunelu (Zechmeister et al., 2006, Oliveira et al., 2011, Pio et al., 2013, Alves et al., 2016, Ny et Lee, 2011, Lawrence et al., 2013), nebo v otevřeném prostoru poblíž komunikací (Samara et Voutsas, 2005, Alves et al., 2016, Manoli et al., 2001, Chen, 2013). Některé studie používají k odběru chemické filtry (Oliveira et al., 2011,



Pio et al., 2013, Krzemińska-Flowers et al., 2006), jiné využívají biomonitoringu pomocí mechu (Zechmeister et al., 2006).

## 7.1. STUDIE SE VZORKY Z OTEVŘENÉHO PROSTORU

V otevřeném prostoru měřil Harrison et al. (2001), který vzorky odebíral na dvou místech v Centrální Anglii (Castlemorton Common a mezi Brownfields a Lichfield) a na jednom ve Skotsku (Auchencorth Moss) v roce 1999. Z každého místa byly vzorky rozděleny do různého množství velikostních frakcí a následně interpolovány. Sledováno bylo 13 kovů (Mn, Ni, Cu, Zn, Cd, Sn, Hg, Pb, Fe, Co, Se, Sr, Ba). Celkové průměrné koncentrace z jednotlivých lokalit shrnuje následující tabulka.

**Tab. 7.1. Geometrický průměr koncentrací a geometrická standardní odchylka podle lokality (ng.m<sup>-3</sup>)**

Stanoviště	Parametr	Mn	Ni	Cu	Zn	Cd	Sn	Hg	Pb	Fe	Co	Se	Sr	Ba
Castlemorton	$\bar{x}$	1,7	1,3	1,1	11	0,14	0,27	0,12	7,9	78	0,06	1,1	0,71	1
	<i>s</i>	2,1	1,8	2,2	2	2,5	2,5	1,9	2,2	2,5	1,4	1,3	1,4	1,8
Brownfields	$\bar{x}$	6,2	1,8	13	63	0,62	3,7	0,1	30	260	0,11	1,2	1,2	6,9
	<i>s</i>	1,6	1,3	1,8	1,8	1,7	2,1	1,4	1,6	13	1,4	1,4	1,7	1,4
Auchencorth	$\bar{x}$	1,5	0,8	1,1	5,2	0,05	nd	nd	10	nd	nd	nd	0,41	0,97
	<i>s</i>	1,2	1,3	1,2	1,2	1,1			1,9				1	1,5

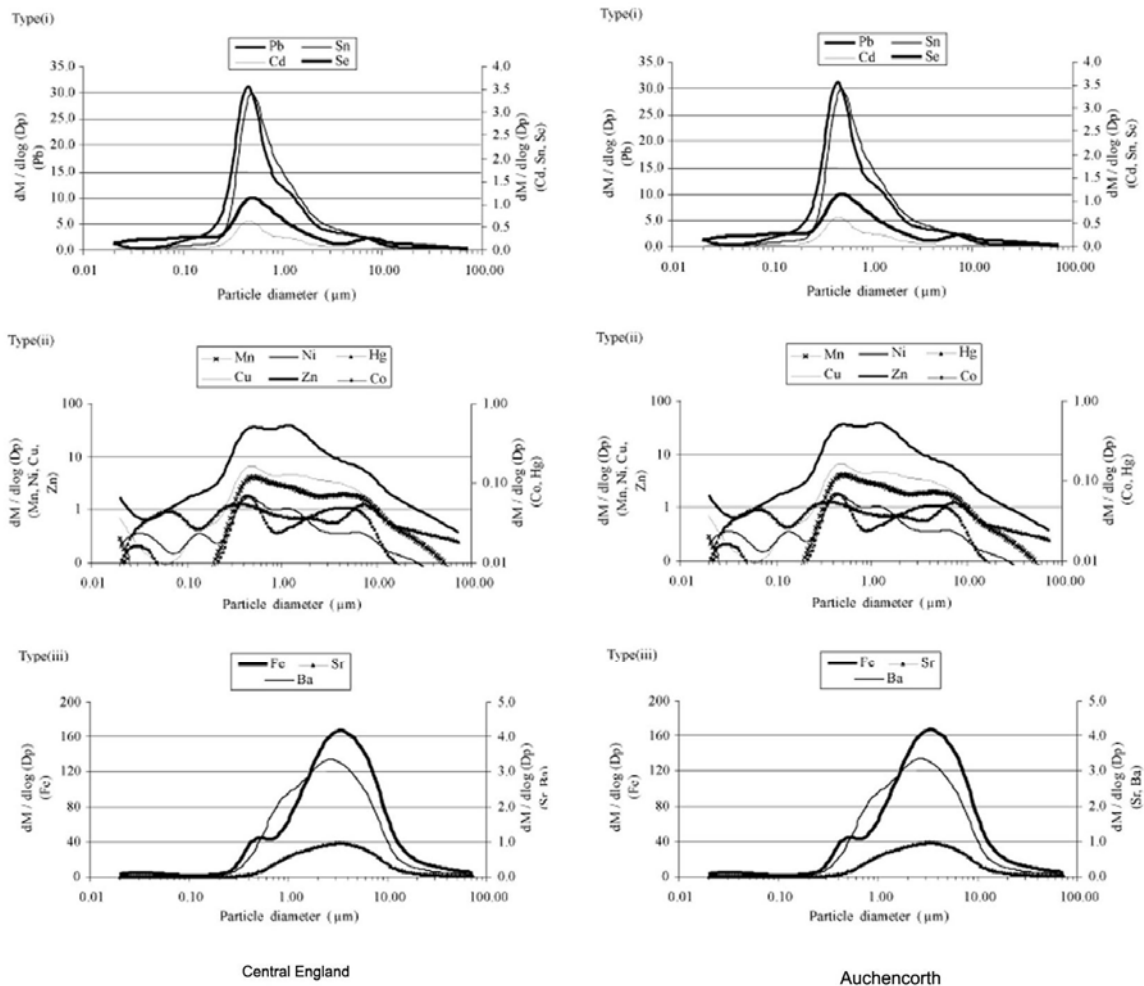
$\bar{x}$  - geometrický průměr, *s* - geometrická standardní odchylka, nd – nebylo zaznamenáno

Z hlediska velikostních frakcí byly kovy seskupeny do 3 kategorií (tučně zvýrazněné jsou kovy, které mají stanovený imisní limit):

- Silné zastoupení hrubých částic nebo okolí hodnot 0,5  $\mu\text{m}$ : **Cd, Sn, Pb, Se**
- Rovnoměrnější rozložení napříč frakcemi nebo větší zastoupení ve více velikostních frakcích: **Ni, Zn, Cu, Co, Mn, Hg**
- Silné zastoupení v okolí hodnot 3 – 4  $\mu\text{m}$ : Fe, Sr, Ba

Rozložení hodnot dle velikostních frakcí pro lokality Centrální Anglie a Skotska pro jednotlivé látky znázorňují následující obrázky.

## Obr. 7.1. Rozložení těžkých kovů podle velikosti částic

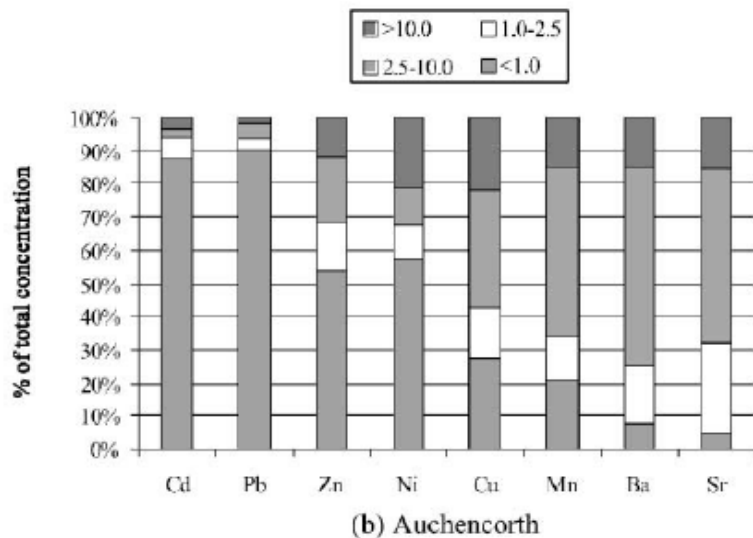
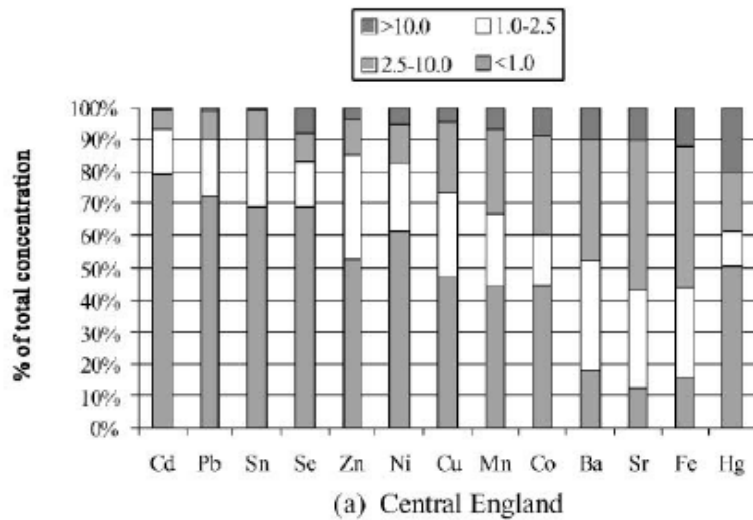


Hodnoty byly následně přerozděleny pro velikostní frakce  $PM_{1}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $PM_{10}$ :

- u první skupiny kovů (i) se v lokalitě Centrální Anglie nejméně 70 % koncentrace vyskytovalo na částicích  $PM_{1}$  a téměř 90 % ve frakci částic  $PM_{2.5}$  (s výjimkou Se), v lokalitě Auchencorth šlo o 90 % zastoupení ve frakci částic  $PM_{1}$
- u druhé skupiny (ii) měly kovy 43 – 62 % svého obsahu ve frakci částic  $PM_{1}$  v Centrální Anglii, ale pouze 20 – 27 % v případě Auchencorth, což bylo způsobeno především větším výskytem částic nad 10  $\mu m$  než částic  $PM_{2.5}$
- třetí skupina (iii) nepřekročila 20 % zastoupení částic  $PM_{1}$  v lokalitě Centrální Anglie a 10 % zastoupení v lokalitě Auchencorth.

Procentuální podíl jednotlivých velikostních frakcí pro jednotlivé kovy je zobrazen v grafu na obrázku 7.2. Pro vybrané kovy jsou uvedeny číselné hodnoty v tabulce 7.2.

Obr. 7.2. Rozdělení jednotlivých kovů podle velikostí



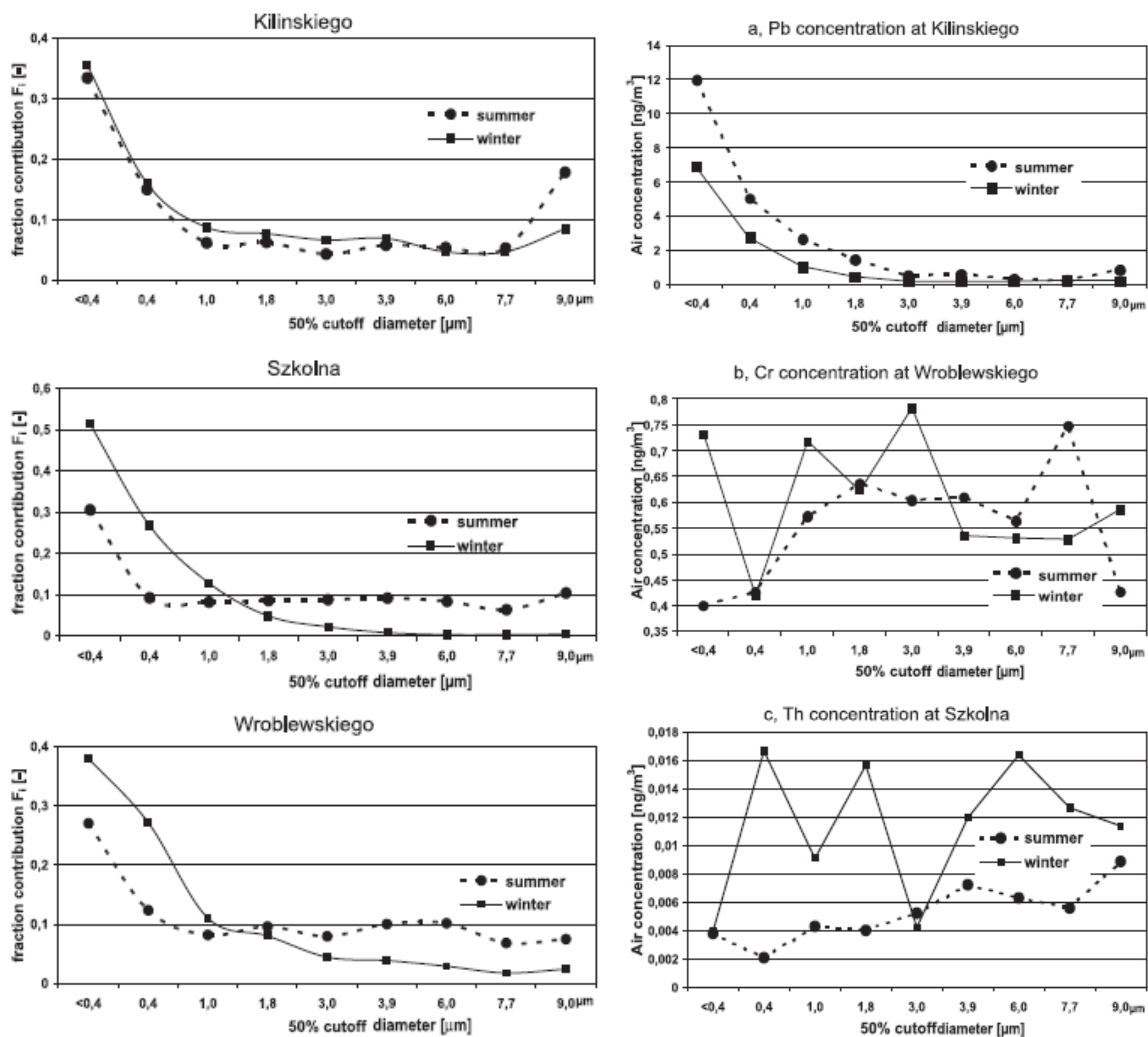
Tab. 7.2. Průměrný podíl zastoupení kovů pro různou velikost částic v lokalitách centrální Anglie a Auchencorth (%)

	> PM <sub>10</sub>	PM <sub>2,5-10</sub>	PM <sub>1-2,5</sub>	< PM <sub>1</sub>
<b>Centrální Anglie</b>				
<b>Cd</b>	1	6	14	79
<b>Pb</b>	2	8	18	72
<b>Ni</b>	5	13	22	61
<b>Auchencorth</b>				
<b>Cd</b>	4	3	5	88
<b>Pb</b>	2	5	3	90
<b>Ni</b>	22	11	10	57

Studie s podobnými závěry byla realizována na Lodžské univerzitě v letech 2001 až 2003 (Krzemińska-Flowers et al., 2006). Kromě analýzy prachových částic z hlediska složení a jejich velikosti hodnotili autoři i zdroje prachových částic, a to především vliv místních elektráren. Vzorky prachových částic byly odebrány ve 3 lokalitách Lodže a to v ulici Kilinskiego – *silný provoz v centru města*, ulici Wroblewskiego – *menší zatížení dopravy mimo centrum a poblíž velké elektrárny* a ulici Szkolna – *bez dopravy, vyšší emise z topenišť v zimě*. Autoři rozčleňují těžké kovy také do 3 skupin podle velikostního rozložení prachových částic.

- koncentrace látek silně klesá s rostoucím poloměrem prachových částic (Cd, Pb, Sb, V, Zn) Obr. 7.3a
- nevykazuje žádný výrazný vzorec rozvrstvení (Ag, As, Co, Cr, Mn, Ni) Obr. 7.3b
- nárůst koncentrace látek pro částice nad 5  $\mu\text{m}$  (U, Th) Obr. 7.3c

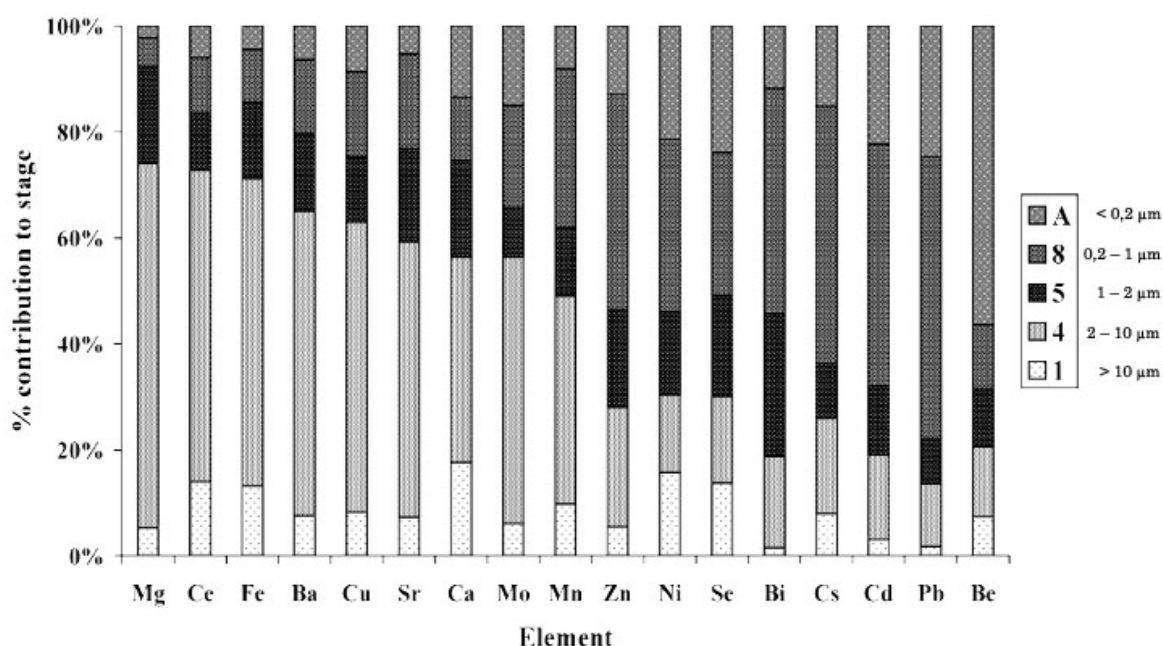
**Obr. 7.3. Rozložení prachových částic podle velikosti (vlevo), typické rozložení koncentrací těžkých kovů podle velikosti (vpravo)**



U první skupiny považují autoři za hlavní zdroj automobilovou dopravu, u druhé spalování uhlí, a to především v lokalitě Wroblewskiego, kde je v blízkosti umístěna elektrárna. Detailnější výsledky rozložení kovů dle velikosti částic byly uvedeny pouze pro popel unikající z elektrárny a popel vznikající z nízkoemisního spalování uhlí, výsledky pro dopravu jako zdroj nebyly v detailu uvedeny.

V další studii autoři Harrison et al. (2003) odebrali 30 vzorků podél čtyřproudé frekventované komunikace A38 s intenzitou 43 000 vozidel za den v období od října 2000 do ledna 2001. Vzorky odebírali s pomocí mobilní laboratoře ve vzdálenosti 9 m od komunikace a ve výšce 4 m nad terénem. Pro určení chemického složení byly použity všechny vzorky, pro analýzu PAH pouze 4. Vzorky byly analyzovány pro velikostní frakce PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub>, PM<sub>1</sub>, PM<sub>0,2</sub>. Průměrné hodnoty vybraných složek celkového PM<sub>10</sub> byly následující: PM<sub>10</sub> – 18,8 μm, PM<sub>2,5</sub> – 12,8 μm, PM<sub>1</sub> – 9,8 μm, PM<sub>0,2</sub> – 4,7 μm, Cd – 0,51 ng.m<sup>-3</sup>, Pb – 27,4 ng.m<sup>-3</sup>, Ni – 2,5 ng.m<sup>-3</sup>, B(a)P – 0,57 ng.m<sup>-3</sup>. Podíl jednotlivých prvků podle velikostní frakce na celkové koncentraci znázorňuje následující obrázek. V tabulce 7.3. jsou uvedeny číselné hodnoty pro vybrané prvky.

**Obr. 7.4. Jednotlivé prvky a jejich podíly ve velikostních frakcích**



**Tab. 7.3. Průměrný podíl zastoupení kovů pro různou velikost částic podél komunikace A38 (%)**

	> PM <sub>10</sub>	PM <sub>2-10</sub>	PM <sub>1-2</sub>	< PM <sub>1</sub>
<b>Cd</b>	2	16	14	68
<b>Pb</b>	1	12	9	78
<b>Ni</b>	16	15	16	53

Studie z řeckého Thessaloniki se zabývaly určením podílu PAH a těžkých kovů ze vzorků prachových částic (Manoli et al., 2001, Samara et Voutsas, 2005). Starší studie nasbírala 45 vzorků v rezidenčně komerční oblasti poblíž šestiproudé komunikace o intenzitě 2 800 vozidel za den v letech 1994 až 1995 a zjišťovala podíly PAH i těžkých kovů (Manoli et al., 2001). Novější studie pak analyzovala 32 vzorků ze stejné oblasti s intenzitou dopravy 22 824 vozidel za den v letech 1999 – 2000 a věnovala se pouze těžkým kovům (Samara et Voutsas, 2005).

U starší studie byly výsledky rozčleněny do dvou velikostních frakcí, a to PM o velikosti menší než 3 µm a PM o velikosti 3 – 10 µm. Z výsledků vyplynulo, že cca 76 % veškerých aerosolů bylo zastoupeno ve velikostní frakci menší než 3 µm. Z hlediska těžkých kovů byla tato frakce zastoupena přibližně z 50 % u Fe a Mn a až 95 % u Zn. PAH byly v této frakci zastoupeny mezi 95 a 99 % pro všechny druhy. V případě sezónního rozložení byla jemnější frakce zastoupena u celkového množství aerosolů a také u PAH o něco více v zimním období, zatímco u stopových prvků bylo dominantnější letní období. Výsledky jsou číselně shrnuty v následujících tabulkách.

**Tab. 7.4. Koncentrace prachových částic (µg.m<sup>-3</sup>) a těžkých kovů (ng.m<sup>-3</sup>) v jemné (< 3 µm) a hrubé (3-10 µm) frakci**

Prvek	Jemná frakce (N=45)				Hrubá frakce (N=45)				
	Průměr	Median	Min	Max	Průměr	Median	Min	Max	r <sup>2</sup>
<b>PM</b>	97	102	15	174	30	32	6	62	0,699**
<b>As</b>	1,5	1,5	0,4	2,8	0,61	0,52	0,33	1,12	0,366*
<b>Cr</b>	4,8	3,6	1,2	18,8	2,9	1,9	0,4	21	0,184
<b>Cd</b>	0,87	0,7	0,15	3,9	0,11	0,1	0,05	0,4	0,429*
<b>Cu</b>	168	142	45	542	90	92	39	160	0,256
<b>Mn</b>	23	21	8	42	24	15	1	110	0,26
<b>Pb</b>	127	108	32	386	29	30	7	58	0,104
<b>Zn</b>	521	441	227	1 631	25	24	4	56	0,167
<b>Fe</b>	297	300	80	529	291	306	52	568	0,431*
<b>Ni</b>	17	15	3,2	42	6,1	5	1,9	13	0,497*
<b>V</b>	41	27	3	116	6,9	5,2	1,3	27	-0,024

\* hladina významnosti 0,05

\*\* hladina signifikance 0,01



**Tab. 7.5. Koncentrace těžkých kovů a PAH (ng.m<sup>-3</sup>) v jemné (< 3 μm) a hrubé (3 – 10 μm) frakci**

Prvek	Jemná frakce (N=45)				Hrubá frakce (N=45)				
	Průměr	Median	Min	Max	Průměr	Median	Min	Max	r <sup>2</sup>
PM	1,81	1,49	0,46	7,54	0,08	0,06	0,01	0,24	0,376*
An	0,3	0,24	0,04	1,17	0,01	0,01	0,05	0,06	0,561**
Fl	6,15	5,02	1	17,24	0,12	0,1	0,02	0,27	0,574**
Pv	10,87	7,98	0,99	48,04	0,18	0,17	0,02	0,51	0,634**
B[a]An	1,85	1,41	0,25	5,97	0,02	0,01	0,05	0,08	0,748**
Chry	3,12	2,43	0,45	15,31	0,05	0,04	0,01	0,27	0,722**
B[c]Py	9,67	5,56	1,79	74	0,17	0,13	0,02	1,14	0,664**
B[b]Fl	2,77	2,4	0,53	8,96	0,04	0,03	0,01	0,14	0,696**
B[k]Fl	1,28	1,02	0,18	5	0,02	0,01	0,01	0,08	0,692**
B(a)Py	2,91	1,88	0,35	20,61	0,03	0,02	0,01	0,27	0,720**
dB[2,h]An	0,67	0,47	0,1	3,82	0,01	0,01	0,05	0,04	0,675**
B[ghi]Pc	6,58	5,11	1,23	26	0,1	0,08	0,01	0,36	0,734**
I[1,2,3-cd]Py	2,53	2,1	0,5	9,66	0,04	0,03	0,01	0,18	0,768*** <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Spearmanův koeficient korelace mezi jemnými a hrubými částicemi

\* hladina signifikance 0,05

\*\* hladina signifikance 0,01

U novější studie byly výsledky rozčleněny do 5 intervalů podle velikosti prachových částic, a to < 0,8 μm, 0,8 – 1,3 μm, 1,3 – 2,7 μm, 2,7 – 6,7 μm a > 6,7 μm. Z výsledků studie vyplynulo, že celkové množství PM bylo z 52 % zastoupeno v nejjemnější frakci (< 0,8 μm) a dalších 20 % naopak v hrubé frakci (> 6,7 μm). Těžké kovy se v zastoupení mezi frakcemi lišily podle druhu. Pb a Cd převažovaly v jemnějších frakcích, Ni, Cu a Mn napříč jemnými a hrubými frakcemi a Fe v hrubé frakci. Výsledky shrnuje následující tabulka.

**Tab. 7.6. Koncentrace PM a těžkých kovů podle velikostních frakcí**

	< 0,8 μm	0,8 - 1,3 μm	1,3 - 2,7 μm	2,7 - 6,7 μm	> 6,7 μm
PM (μm <sup>-3</sup> )	54,2 ± 22,2	6,59 ± 6,79	5,68 ± 3,37	16,7 ± 9,34	23,0 ± 14,3
Pb (ng m <sup>-3</sup> )	22,9 ± 9,90	4,19 ± 3,77	5,07 ± 3,10	8,35 ± 4,39	6,65 ± 4,10
Cd (ng m <sup>-3</sup> )	0,15 ± 0,08	0,06 ± 0,07	0,04 ± 0,03	0,06 ± 0,05	0,05 ± 0,04
Cr (ng m <sup>-3</sup> )	0,72 ± 0,68	0,15 ± 0,15	0,23 ± 0,14	0,68 ± 0,64	0,68 ± 0,46
Ni (ng m <sup>-3</sup> )	1,51 ± 1,02	0,44 ± 0,42	0,41 ± 0,26	0,70 ± 0,51	0,70 ± 0,49
V (ng m <sup>-3</sup> )	3,66 ± 2,05	1,18 ± 0,81	1,13 ± 0,67	1,47 ± 0,87	1,49 ± 0,72
Mn (ng m <sup>-3</sup> )	5,17 ± 3,24	1,31 ± 1,14	2,09 ± 1,27	4,58 ± 2,53	4,50 ± 2,47
Cu (ng m <sup>-3</sup> )	88,0 ± 91,8	26,9 ± 45,7	33,6 ± 28,6	62,5 ± 59,5	37,4 ± 35,1
Fe (ng m <sup>-3</sup> )	77,7 ± 68,4	23,7 ± 29,4	47,0 ± 29,7	137 ± 78,9	120 ± 78,9

N = 32



Ve studii od Ny et Lee (2011) probíhalo měření po čtyři sezóny v obytné zóně průmyslového města Jižní Koreje. Bylo analyzováno 13 kovů, které byly rozděleny opět do tří skupin.

- těžké kovy (Cd, Zn, Mn, Ni a Cr), které byly zastoupeny ve frakci do  $2,1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , částečně ve frakci  $0,4$  až  $0,7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$
- lehké kovy (Na, Ca, K a Al) a Fe, které měly vyšší koncentrace v hrubých částicích
- a ostatní těžké kovy (Pb, Mg, a Cu), které měly vyšší koncentrace v částicích frakce vyšší než  $5,8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

Jedním z výstupů jsou koncentrace těžkých kovů pro 8 frakcí v prachových částicích  $\text{PM}_{10}$ .

**Tab. 7.7. Průměrné koncentrace pro vybrané těžké kovy**

Velikost ( $\mu\text{m}$ )	Koncentrace kovů ( $\text{ng}/\text{m}^3$ ) ve velikostní frakci							
	0,4 - 0,7	0,7 - 1,1	1,1 - 2,1	2,1 - 3,3	3,3 - 4,7	4,7 - 5,8	5,8 - 9,0	9 - 10
<b>Cd</b>	62,57	41,21	21,29	6,42	6,21	6,42	7,69	7,86
<b>Ni</b>	58,59	47,33	28,52	5,97	6,74	7,57	5,61	7,37
<b>Mn</b>	153,10	79,69	57,81	13,82	14,44	10,61	7,31	21,72
<b>Pb</b>	30,49	31,52	35,07	34,41	32,80	29,20	19,69	16,48

Měření v industriální oblasti poté provedla Chen s kolektivem v roce 2013. Jednalo se o program, který měl za cíl nalézt hlavní prvky znečištění v částicích prachu v prostředí průmyslového parku na území centrálního Taiwanu. Studie ukázala jak velký vliv na měření koncentrací mají meteorologické podmínky a topografické členění lokality. Součástí projektu bylo také porovnání naměřených hodnot s dalšími projekty obdobného rozsahu, Studie se zaměřila na množství těžkých kovů ve dvou frakcích, a to  $\text{PM}_{2,5}$  a  $\text{PM}_{2,5-10}$ . Chemická data z 22 analyzovaných vzorků pořízených během vzorkovací periody mezi roky 2008 a 2011 jsou shrnuty v tabulkách 7.8. a 7.9. Průměrné koncentrace  $\text{PM}_{2,5}$  a  $\text{PM}_{2,5-10}$  byly  $75,31 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  a  $25,79 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , resp. průměrný poměr  $\text{PM}_{2,5}/\text{PM}_{10}$  byl cca 0,74.

**Tab. 7.8. Množství těžkých kovů v částicích frakce PM<sub>2,5-10</sub> (ng.m<sup>-3</sup>)**

Kov	Tato studie	Lu et al. (2012) Shanghai	Mamane et al. (2008) Ashdod	Hueglin et al.(2005)				Manoli et al. (2002) Thessaloniki
				Bern	Zurich-Kaserne	Basel	Chaumont	
As	0,94 ±0,76	5,95	0,39	0,42	0,10	0,11	0,02	0,61
Cd	1,30 ±1,23	-	0,87	0,08	0,03	0,04	0,00	0,11
Cr	4,40 ±2,82	1,73	4,45	-	-	-	-	2,90
Cu	18,23 ±17,59	20,07	4,92	68,00	12,00	3,40	0,30	90,00
Mn	5,61 ±5,41	6,92	10,80	20,00	5,10	5,30	1,20	24,00
Ni	8,16 ±5,23	0,84	5,19	1,90	0,11	0,46	0,04	6,10
Pb	9,32 ±10,48	16,77	3,95	22,00	5,90	4,40	0,80	29,00

**Tab. 7.9. Množství těžkých kovů v částicích frakce PM<sub>2,5</sub> (ng.m<sup>-3</sup>)**

Kov	Tato studie	de la Camp a etal. (2010)	Storni et al. (2009)	Moreno et al. (2006)					Vecchi et al. (2004)
		Bailen	Venice Lagoon	Tarragona	Barcellona	Huelva	Alcobendas	Llodio	Milan
As	3,73 ±3,71	0,73	3,58	0,50	1,10	4,20	0,60	1,50	2,00
Cd	2,02 ±2,05	0,21	3,51	0,20	0,60	0,80	0,30	1,00	—
Cr	6,15 ±5,25	2,52	-	2,20	2,90	0,90	1,10	15,80	3,33
Cu	50,29 ±25,76	28,40	-	31,70	31,70	32,90	23,70	29,10	11,33
Mn	13,14 ±5,28	7,07	5,22	2,80	9,60	3,20	4,30	39,20	10,33
Ni	11,93 ±24,51	13,10	12,15	3,50	5,20	3,00	2,20	20,80	4,33
Pb	33,57 ±22,85	22,00	18,08	17,50	40,30	26,90	19,00	76,50	30,00

Jak je z tabulek patrné, mezi nejvýznamnější těžké kovy patří Cu a Pb, které jsou poměrově nejvíce zastoupeny jak v hrubé tak jemné frakci. Zbytek prvků v pořadí Mn, Ni, Cr, Cd a As jsou poté obdobně jako Cu a Pb více zastoupeny v jemné frakci PM<sub>2,5</sub>.

## 7.2. STUDIE SE VZORKY Z TUNELU

V Portugalsku vznikly 3 studie s použitím filtru z křemenných vláken, které vychází ze vzorků odebraných v Lisabonském tunelu Marquês de Pombal v říjnu 2008 (Oliveira et al., 2011, Pio et al., 2013, Alves et al., 2016).

První z nich hodnotí kromě vzorků nasbíraných ze vzduchu i vzorky silničního prachu odebrané ze stěn tunelu (Oliveira et al., 2011). Prachové částice byly sledovány ve 4 velikostních frakcích, a to 2,5 – 10  $\mu\text{m}$ , 0,95 – 2,5  $\mu\text{m}$ , 0,49 – 0,95  $\mu\text{m}$  a  $< 0,49 \mu\text{m}$ . Následující tabulka shrnuje průměrné koncentrace celkových PAH pro různé velikostní frakce.

**Tab. 7.10. Průměrná koncentrace prachových částic a celkových PAH podle velikosti částic**

	Velikost částic ( $\mu\text{m}$ )	Koncentrace PMX		Celkové koncentrace PAH	
		( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) <sup>a</sup>	(%)	( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) <sup>a</sup>	(%)
1	2,5-10,0	140 $\pm$ 63	19,9	6 $\pm$ 3	1,8
2	0,95-2,5	103 $\pm$ 55	14,7	22 $\pm$ 9	4,7
3	0,49-0,95	95 $\pm$ 78	13,6	35 $\pm$ 11	9,7
4	<0,49	364 $\pm$ 138	51,8	286 $\pm$ 92	83,4

<sup>a</sup> Průměr  $\pm$  standardní odchylka

Studie hodnotila i průměrné koncentrace jednotlivých PAH pro různé velikostní frakce. Hodnoty pro B(a)P a celkové PAH jsou shrnuty v následující tabulce.

**Tab. 7.11. Průměrné koncentrace B(a)P a celkových PAH pro různou velikost částic ( $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$ )**

	PM <sub>0,49</sub>	PM <sub>0,49-0,95</sub>	PM <sub>0,95-2,5</sub>	PM <sub>2,5-10</sub>
B(a)P	6,98	0,350	0,167	0,185
celkové PAH	286,2	33,2	16,0	6,01

Koncentrace B(a)P zjištěné v této studii potvrzují, že nejvyšší koncentrace jsou v nejmenší velikostní frakci (90 %) a klesají směrem k větším velikostním frakcím.

Druhá ze zmiňovaných studií porovnává výsledky s paralelním měřením vně tunelu, které probíhalo 600 m od tunelu Marquês de Pombal a zároveň analyzuje i chemické složení vzorků z hlediska těžkých kovů (Pio et al., 2013). Koncentrace PM<sub>10</sub> uvnitř tunelu se výrazně lišily podle intenzity provozu (541 – 1 340  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  během pracovních dnů a 251 – 374  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  o víkendu) a byly při porovnání s externím měřením cca 20 krát vyšší. Hodnoty naměřené v tunelu studie porovnává i s hodnotami

v jiných tunelech, kde byly hodnoty také výrazně nižší. Autoři rozdíl zdůvodňují rozdílnou morfologií tunelu (výrazné brždění při klesání a zrychlování při stoupání v tunelu) a intenzitami dopravy. Výsledky analýzy chemického složení v tunelu shrnuje následující tabulka.

**Tab. 7.12. Průměrné koncentrace (C) a standardní odchylka (SD) PM<sub>10</sub> v ppm (w/w z PM<sub>10</sub>) a procentuální rozdělení hmoty pro jednotlivé chemické prvky podle velikosti. Průměr z 12 vzorků.**

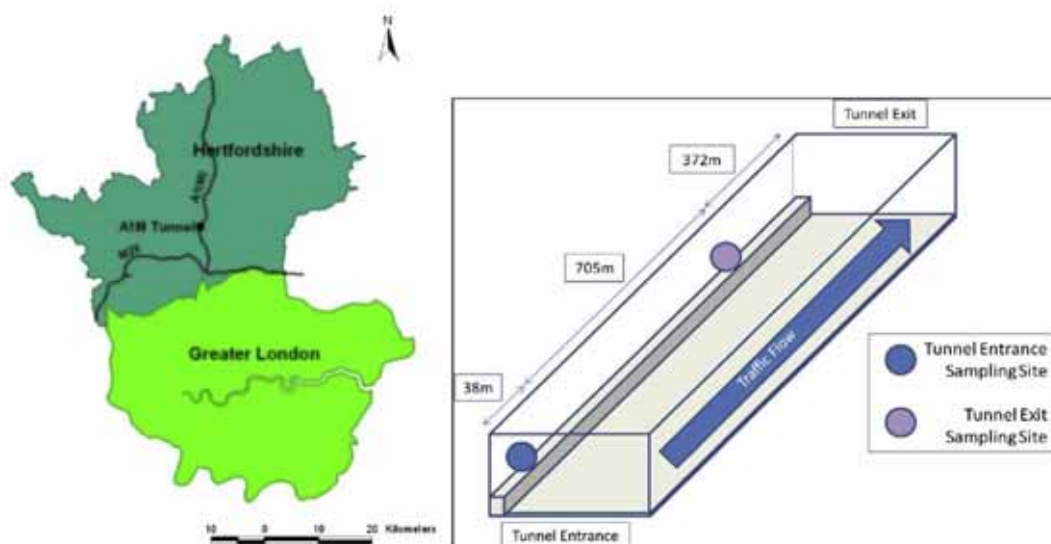
	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2,5-10</sub>	PM <sub>1-2,5</sub>	PM <sub>0,5-1</sub>	PM <sub>0,5</sub>
	C ± SD ppm	C±SD%	C±SD%	C±SD%	C±SD%
<b>Total mass</b>	702 ±310(μg.m <sup>-3</sup> )	20 ±2	15 ±3	13±5	53 ±7
<b>OC</b>	106 000 ± 30 000	14 ±5	15 ±7	10 ±3	61 ± 12
<b>EC</b>	276 000 ± 99 000	1,7 ±2	5 ±5	10 ±5	83 ± 10
<b>SumPAH</b>	537 ± 176	2±1	5±3	10±4	84 ±6
<b>POI~</b>	8 200 ± 5 800				100 ±-
<b>Na+</b>	7 500 ± 4 200				90 ± 14
<b>Mg<sup>2+</sup></b>	353 ± 111	27 ± 11	18 ±7	6±4	50 ± 18
<b>Ca<sup>2+</sup></b>	6 400 ± 2 760	25 ±8	18 ±7	12±3	44 ± 14
<b>Cl<sup>-</sup></b>	920 ± 830	61 ± 14	26 ±9	11 ±5	2 ±-
<b>NO<sub>3</sub></b>	6 130 ± 2 680	19 ±8	24 ± 12	12±4	46 ± 13
<b>SO<sub>2</sub><sup>-4</sup></b>	4 920 ± 1 240	14 ±4	14 ±6	12±3	60 ± 10
<b>NH<sub>3</sub></b>	1 550 ±416	3 ±2	8±4	14 ±5	75 ±9
<b>K+</b>	467 ± 254	21 ± 15	12 ±4	10±3	56 ± 15
<b>V</b>	23 ± 7,2	39 ± 11	23 ±7	9,7 ±4	28 ± 14
<b>Cr</b>	463 ± 146	52 ±6	32 ±4	13 ±3	3 ±2
<b>Mn</b>	521 ± 179	56 ±7	32 ±5	9±2	4±4
<b>Cu</b>	4 450 ± 1 850	57 ±5	31 ±5	8 ±2	3 ±2
<b>Zn</b>	1 570 ±451	38 ± 10	22 ±5	7 ±3	33 ± 15
<b>Zr</b>	449 ± 161	54 ± 10	33 ±7	7 ±5	6±-
<b>Sn</b>	1 030 ± 558	60 ±6	31 ±5	6±2	3 ±2
<b>Sb</b>	429 ± 201	57 ±5	32 ±4	7 ±2	4±2
<b>Ba</b>	1 670 ± 378	41 ± 10	22 ±7	4±2	32 ± 16
<b>Bi</b>	50 ±25	55 ±7	33 ±6	10 ±2	2 ±3
<b>Fe</b>	70 000 ± 27 700	58 ±6	31 ±5	8 ±2	2 ±1
<b>Pb</b>	84 ±21	34 ±6	25 ±4	14 ±4	28 ±6
<b>Na</b>	52 100 ± 16 000	18 ± 13	15± 11	18 ± 13	49 ±22
<b>Sr</b>	69 ±23	36 ±9	25 ±8	12±4	27 ± 14
<b>La</b>	6±2	35 ±5	29 ±5	20 ±3	16 ±6
<b>Ce</b>	20 ±5	30 ±3	24 ±5	16±2	30 ±7
<b>Al</b>	21 000 ± 5510	28 ±7	26 ±6	22 ±5	24 ± 12
<b>Ca</b>	37 000 ± 10 200	32 ±9	20 ±5	17±5	30 ± 13
<b>K</b>	6 110 ± 1 570	24 ±7	21 ±5	19±6	36 ± 12
<b>Mg</b>	9 290 ± 2 350	30 ±9	25 ±6	21 ±6	25 ± 11
<b>Ga</b>	6,3 ± 1	31 ±6	26 ±4	19±4	25 ±9
<b>S</b>	6 170 ± 1 130	17 ±6	17±4	14 ±4	51 ±9

	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2,5 - 10</sub>	PM <sub>1 - 2,5</sub>	PM <sub>0,5-1</sub>	PM <sub>0,5</sub>
Sm	2± 1	26 ±5	23 ±5	18±4	32 ±8
Gd	6± 1	31 ±6	20 ±4	17±3	41 ±3 8
Rb	14 ±4	28 ±8	23 ±7	17±4	33 ± 15
Cd	4,9±1	24 ±4	21 ±6	16±7	40 ±13

Třetí studie se věnovala porovnání alifatických prachových částic dle velikosti naměřených v tunelu, vně tunelu a na lokalitách městského pozadí (Alves et al., 2016).

Kombinaci obou měřících postupů (měření v tunelu a v otevřeném prostoru) provedl Lawrence ve Velké Británii (Lawrence et al., 2013). Měření v tunelu Hatfield bylo koncipováno tak, aby byly pokryty oba režimy vzorkování. První stanoviště bylo na začátku tunelu, druhé po 705 metrech uvnitř jednosměrného tunelu. Schéma měření ukazuje následující obrázek.

**Obr. 7.5. Umístění měřících sond v tunelu**



Měření probíhalo po 5 týdnů (listopad – prosinec 2006). Koncentrace PM<sub>10</sub> byly v průběhu měření na koncovém úseku zaznamenány v rozsahu od 37,6 do 116,8  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  a koncentrace PM<sub>2,5</sub> v rozsahu od 17,3 do 68,4  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . V průměru byl podíl koncentrací PM<sub>2,5</sub> ku PM<sub>10</sub> roven 66 %. Koncentrace naměřených 23 prvků ve vzorcích se pohybovaly od 3,9 % do 96,7 % s průměrem 27,0 %. Koncentrace měřených organických látek (18 PAU a benzothiazol) představuje jen malý podíl ve frakci PM<sub>10</sub>, které se pohybovaly od 0,03 % do 3,75 % s průměrem 1,21 %. Souhrnné tabulky zaznamenaných koncentrací jsou uváděny pouze pro celkové koncentrace v PM<sub>10</sub>.

**Tab. 7.13. Koncentrace kovů v PM<sub>10</sub> na vstupu a výstupu z tunelu (ng.m<sup>-3</sup>)**

Prvky	Vjezd				Výjezd			
	Průměr	SH	Min	Max	Průměr	SE	Min	Max
Ca <sup>a</sup>	2177,9	437,2	65,2	15536,5	3115,1	417,9	202,2	14880,6
Na <sup>a</sup>	6178,6	757,0	189,9	37206,9	13215,3	1885,1	1562,0	81795,3
Mg <sup>a</sup>	722,2	71,4	150,2	2007,3	962,2	95,0	254,0	4353,1
Ka	373,6	66,6	14,8	2141,8	774,6	169,2	13,8	8428,8
Fe	865,9	73,1	240,3	3033,7	3624,5	243,9	1367,7	8183,0
Al <sup>a</sup>	883,1	133,3	64,6	4971,9	1527,6	215,1	137,5	6513,9
B	863,3	84,5	120,3	2477,5	960,7	80,5	127	2352,7
Ba <sup>a</sup>	71,2	9,1	2,4	398,5	224,1	20,3	57,4	897,9
Cd	0,3	0,0	0,1	1,0	1,9	0,5	0,1	17,5
Co	0,2	0,0	0,1	0,5	0,5	0,1	0,1	1,9
Cr <sup>a</sup>	14,6	2,6	1,1	71,7	37,5	2,7	4,7	84,8
Cu	49,4	4,0	16,9	175,1	189,5	13,0	72,8	471,0
Li	0,8	0,1	0,1	3,3	0,9	0,1	0,1	2,9
Mn	8,0	0,7	2,5	32,7	33,1	2,3	12,7	81,9
Ni	0,9	0,1	0,1	3,2	3,2	0,3	0,2	8,1
Pb	7,8	0,7	1,1	29,9	14,8	1,0	5,4	38,4
Sr	3,0	0,5	2,7	11,4	4,8	0,8	0,7	17,1
Ti	9,6	1,4	0,1	55,5	29,8	2,5	5,9	83,3
V	0,5	0,1	0,1	2,8	1,3	0,2	0,1	4,8
Y	0,2	0,0	0,1	0,8	0,2	0,0	0,1	1,2
Zn	42,4	6,5	0,4	134,7	124,7	14,2	5,7	527,1
Zr <sup>a</sup>	12,5	3,2	1,0	154,8	31,1	2,5	7,1	87,8
Sb	6,0	0,7	2,1	21,7	27,1	2,3	3,8	66,2

Dobrá korelace koncentrací se zaznamenaným dopravním zatížením v průběhu experimentu byla pozorována u Fe, Cu, Mn, Ni, Pb a Sb.

Tab. 7.14. Koncentrace organických látek v PM<sub>10</sub> na vstupu a výstupu z tunelu (ng.m<sup>-3</sup>)

Látka	Vjezd				Výjezd			
	Průměr	SE	Min	Max	Průměr	SE	Min	Max
1-Methylphenanthrene	0,1	0,01	0,01	0,4	0,9	0,1	0,2	1,9
2-Methylphenanthrene	0,2	0,02	0,01	0,7	1,5	0,1	0,3	3,4
Acenaphthene	0,02	0,00	0,0	0,1	0,03	0,003	0,0	0,1
Acenaphthylene	0,01	0,001	0,002	0,03	0,1	0,01	0,01	0,2
Anthracene	0,1	0,01	0,01	0,2	0,6	0,1	0,1	1,6
Benzo[a]anthracene	3,5	0,8	0,7	39,8	10,9	1,0	3,7	40,2
Benzo(a)pyrene	0,3	0,1	0,003	4,3	0,6	0,1	0,1	5,4
Benzo[b]+[k]fluoranthene	0,3	0,1	0,1	2,8	0,6	0,1	0,2	3,1
Benzo[e]pyrene	0,1	0,0	0,04	1,1	0,3	0,03	0,1	1,5
Benzothiazole	0,04	0,0	0,002	0,2	0,1	0,02	0,01	0,5
Benzo[g,h,i]perylene	2,5	0,8	0,03	36,6	4,9	1,2	0,4	52,5
Chrysene	3,6	0,9	0,7	47,5	9,6	1,2	3,3	61,2
Dibenz[a,h]anthracene	3,9	1,7	0,0	69,4	0,4	0,0	0,03	1,1
Fluoranthene	0,9	0,1	0,1	2,3	3,3	0,1	1,1	5,6
Indeno[1,2,3-cd]pyrene	0,1	0,04	0,01	2,1	0,2	0,1	0,01	2,9
Naphthalene	0,03	0,01	0,0	0,2	0,1	0,01	0,0	0,4
Perylene	0,03	0,01	0,0	0,5	0,1	0,01	0,01	0,6
Phenanthrene	0,4	0,03	0,1	0,9	2,1	0,1	0,5	4,4
Pyrene	0,9	0,1	0,1	2,2	3,8	0,2	1,0	6,3

Koncentrace polycyklických aromatických uhlovodíků a jiných organických látek se dle interpretace autorů studie výrazně liší u hodnocených stanovišť (na hranici a uvnitř tunelu). Zejména se jedná o fluoranthen, pyren, benzo(a)pyren, chrysene a benzothiazol.



### 7.3. SHRnutí VÝSLEDKŮ

Z výzkumných prací je patrné, že sledované polutanty jsou emitovány celou řadou zdrojů (dopravní, zemědělské, průmyslové, spalovací, atd.). Vlastní metodika se zabývá redukcí prašnosti podél dopravních zdrojů, proto byly převzaty zejména závěry studií, které hodnotí koncentrace PAH a těžkých kovů v blízkosti dopravních zdrojů v částicích prachu o frakcích PM<sub>10</sub> a PM<sub>2,5</sub>.

Podíl koncentrací těžkých kovů v jednotlivých frakcích PM byl převzat ze studií (Harrison et al., 2003, Harrison et al., 2001), kde byly vyčísleny u jednotlivých prvků podíly pro dílčí frakce (TSP, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub> a PM<sub>1</sub>). Hodnoty byly pro jednotlivé prvky zprůměrovány a výsledné hodnoty pro hodnocené prvky ukazuje tabulka 7.15. Hodnoty pro arsen byly odhadnuty na základě informací ze studie autorů Zereini et al. (2005), kde byl arsen z hlediska rozložení koncentrací mezi velikostní frakce přiřazen do skupiny ke kadmii.

**Tab. 7.15. Podíl jednotlivých frakcí těžkých kovů**

Frakce	Cd	Pb	Ni	As
Frakce < 1 μm	78,3	80,0	57,0	78,3*
Frakce 1 až 2,5 μm	11,0	10,0	15,7	11*
Frakce 2,5 až 10 μm	8,3	8,3	13,0	8,3*
Frakce > 10 μm	2,3	1,7	14,3	2,3*

\* odborný odhad s využitím informací z Zereini et al. (2005)

Pro polycyklické aromatické uhlovodíky (PAH) a jeho hlavní sledovanou složku, benzo(a)pyren, byly dílčí poměry jemných frakcí ve frakci PM<sub>10</sub> stanoveny na základě literatury (Oliveira et al., 2011, Pio et al., 2013).

**Tab. 7.16. Podíl jednotlivých frakcí PAH**

Frakce	PAH	B(a)P
Frakce < 1 μm	92,2	95,2
Frakce 1 až 2,5 μm	5,7	2,2
Frakce 2,5 až 10 μm	1,9	2,4
Frakce > 10 μm	0,2	0,2

Pro odvození podílů jednotlivých polycyklických aromatických uhlovodíků (PAH) mohou být použity jako vodítka výsledky studie Lawrence et al. (2013), které jsou uvedené v tabulce 7.14.

## 8. VZOROVÉ PŘÍKLADY

Pro prezentaci aplikace navrženého výpočetního postupu na reálné situaci byly zvoleny dva příklady, které zahrnují výpočet účinnosti záchytu částic PM<sub>10</sub> a PM<sub>2,5</sub> a benzo(a)pyrenu v referenční hladině 1,5 m:

- úsek dálnice D8 u MČ Praha – Březiněves na severním okraji Prahy, kde se již ve stávajícím stavu nachází pás izolační zeleně – posuzovány jsou efekty existující vegetační bariéry
- úsek dálnice D1 města Velké Meziříčí, kde se v současnosti vegetační bariéra nenachází – posuzován je hypotetický projekt výsadby vegetační bariéry v 6 návrhových variantách

Vstupní hodnoty intenzit dopravy byly v případě dálnice D8 převzaty ze sčítání dopravy Technické správy komunikací hl. m. Prahy za rok 2015, v případě dálnice D8 z Celostátního sčítání dopravy 2010 (ŘSD ČR, 2012), přepočten na rok 2015 byl proveden podle TP 225 Prognóza intenzit automobilové dopravy (Bartoš et al., 2012). Výsledné hodnoty jsou uvedeny v následující tabulce.

**Tab. 8.1. Intenzity dopravy na vybraných profilech dle Celostátního sčítání dopravy – rok 2015**

Profil	Sčítací úsek	Osobní	Lehké nákladní	Těžké nákladní	Autobusy	Celkem
Dálnice D8 – Březiněves	1-6300	39 000	3 360	5 760	480	48 600
Dálnice D1 – Velké Meziříčí	6-8630	27 726	3 070	7 614	425	38 835

Pro výpočty výfukových emisí z automobilové dopravy byl použit model MEFA-13, který obsahuje emisní faktory publikované MŽP ČR. Pro určení emisí částic zvířených projíždějícími automobily (resuspenze) byla použita připravovaná aktualizace metodiky MŽP, která bude vydána v roce 2016 (Karel et al., 2015a). Pro stanovení imisních příspěvků uvedených úseků komunikací byl použit rozptylový model ATEM, který je ve vyhlášce č. 330/2012 Sb. uveden jako jedna z referenčních metod pro imisní modelování. Jedná se o gaussovský disperzní model rozptylu znečištění, který imisní situaci hodnotí na základě podrobných klimatologických a meteorologických údajů (ATEM, 2015).

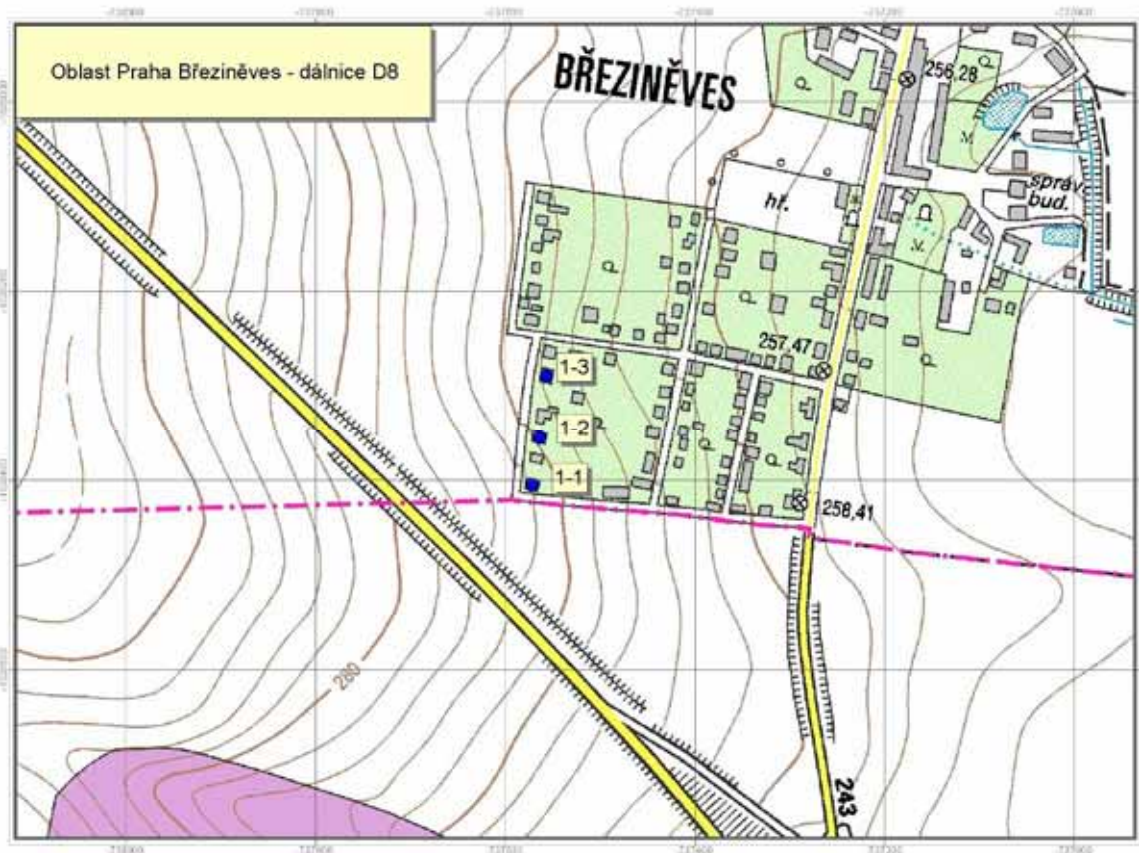
Hodnocena je účinnost vegetační bariéry z hlediska snížení imisních hodnot suspendovaných částic frakcí PM<sub>10</sub> a PM<sub>2,5</sub> a benzo(a)pyrenu.

## 8.1. HODNOCENÍ ÚČINNOSTI STÁVAJÍCÍ VEGETAČNÍ BARIÉRY – LOKALITA BŘEZINĚVES

Praha – Březiněves je městská část na severním okraji Prahy. Jejím územím prochází dálnice D8, která je v místě největšího přiblížení vedena cca 85 m od okraje zástavby. Vypočtená produkce emisí z provozu dálnice činí  $25,4 \text{ t.rok}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ .

Podél dálnice je vysazen pás zeleně o délce 610 metrů. Poloha komunikace vůči zástavbě a umístění posuzované vegetační bariéry jsou patrné z následujícího obrázku.

**Obr. 8.1. Lokalita Praha – Březiněves**



Na obrázku jsou současně vyznačeny tři referenční body v okrajové zástavbě, pro něž byl výpočet proveden. Tabulka 8.2. uvádí vzdálenost referenčních bodů od okraje dálnice a vypočtené hodnoty imisních příspěvků ve stavu bez vegetační bariéry.

**Tab. 8.2. Lokalita Březiněves – imisní příspěvky dálnice D8**

Označení bodu	Vzdálenost od okraje dálnice D8 (m)	Imisní příspěvky dálnice D8 bez vlivu bariéry		
		$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$		$\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$
		PM <sub>10</sub>	PM <sub>2,5</sub>	B(a)P
1-1	85	7,49	1,81	0,090
1-2	125	6,10	1,48	0,073
1-3	175	5,05	1,22	0,061

Pro výpočet účinnosti bariéry je dále nutno znát její výšku, šířku, porositu a zastoupení listnatých a jehličnatých dřevin. První dva parametry byly odvozeny z leteckého snímku a fotografií bariéry a činí:

- výška  $H = 5 \text{ m}$
- šířka  $W = 16 \text{ m}$

Hodnota porosity byla odvozena z následující fotografie vegetační bariéry.

**Obr. 8.2. Lokalita Březiněves – vegetační bariéra**



Pomocí běžného grafického editoru byla určena porosita v prostoru vymezeném červenými čarami na 9,7 %, tj. 0,097.

Poznámka: bariéra je ve skutečnosti v celé délce značně nehomogenní, např. na severním okraji je tvořena zcela řídkým porostem vzrostlých stromů, s výškou přes 8 m a porositou přesahující 50 %, v jižní části se naopak jedná o zcela neprůsvitný nižší keřový porost, nicméně pro modelový příklad byl zvolen úsek uvedený na fotografii.

Následně je stanovena účinnost záchytu PM<sub>10</sub>. Z fotografie je patrné, že bariéra je tvořena výhradně listnatými dřevinami, použije se tedy pouze rovnice pro stanovení účinnosti bariéry z listnatých stromů  $U_L$  (viz kap. 5.1.1.):

$$U_L = k \times f(p) \times f_L(d, W, H),$$

kde  $k = 1$  (frakce  $PM_{10}$ ) a hodnota  $f(p)$  pro  $p = 0,097$  činí 1,0395.

Dále je nutno určit vzdálenost lomového bodu transformační funkce od komunikace  $d_{LB\_L}$ . Pro šířku bariéry 16 metrů činí její hodnota  $d_{LB\_L}$  60 metrů. Všechny tři referenční body jsou umístěny ve větší vzdálenosti.

Dále je určena hodnota transformační funkce  $f_L(d, W, H)$ . Vzhledem k tomu, že  $d > d_{LB\_L}$  a  $H$  činí 6 m, jedná se o interpolační funkci:

$$f_L(d, W, H) = (0,25 \times H - 0,75) \times f_{L3}(d, W) + (1,75 - 0,25 \times H) \times f_{L2}(d, W)$$

V následující tabulce jsou pak určeny hodnoty transformační funkce  $f_L(d, W, H)$  v definovaných vzdálenostech a výsledná účinnost ve vztahu ke koncentracím  $PM_{10}$ .

**Tab. 8.3. Výpočet účinnosti bariéry – částice frakce  $PM_{10}$**

Označení bodu	Vzdálenost od hranice komunikace (m)	$f_L(d, W = 16 \text{ m}, H = 5 \text{ m})$	Snížení $PM_{10}$ (%)
1-1	85	11,99	12,46
1-2	125	12,70	13,20
1-3	175	11,78	12,25

Účinnost ve vztahu k částicím frakce  $PM_{2,5}$  je pak dána poměrovým koeficientem pro listnaté dřeviny ve výši 0,44. Co se týče benzo(a)pyrenu, je účinnost dána jeho poměrným rozdělením mezi frakci  $PM_{2,5}$  a zbývající část do frakce  $PM_{10}$ , tj.  $PM_{2,5-10}$ , kdy pro první část je počítána účinnost podle frakce  $PM_{2,5}$ , druhá část podle frakce  $PM_{10}$ . Jak je uvedeno v kap. 6.3., je 97,4 % benzo(a)pyrenu vázáno na frakce do  $PM_{2,5}$  a 2,6 % na frakce větších částic. Výsledné hodnoty účinnosti vegetační bariéry jsou pak uvedeny v následující tabulce.

**Tab. 8.4. Účinnost vegetační bariéry – lokalita Březiněves**

Označení bodu	Snížení $PM_{10}$ (%)	Snížení $PM_{2,5}$ (%)	Snížení B(a)P (%)
1-1	12,46	5,48	5,66
1-2	13,20	5,81	6,00
1-3	12,25	5,39	5,57

Uvedené hodnoty jsou pak aplikovány na vypočtené imisní příspěvky dálnice D8 (tab. 8.2.). Výsledné snížení imisních příspěvků dálnice, k němuž v dotčené lokalitě dochází díky existenci vegetační bariéry, je uvedeno v následující tabulce.

**Tab. 8.5. Snížení imisních příspěvků dálnice D8 vlivem vegetační bariéry – lokalita Březiněves**

Označení bodu	Snížení PM <sub>10</sub> (µg.m <sup>-3</sup> )	Snížení PM <sub>2,5</sub> (µg.m <sup>-3</sup> )	Snížení B(a)P (ng.m <sup>-3</sup> )
1-1	0,93	0,10	0,0051
1-2	0,81	0,09	0,0044
1-3	0,62	0,07	0,0034

Z provedených výpočtů tedy vyplývá, že existující vegetační bariéra snižuje imisní příspěvky dálnice D8 v okrajové zástavbě Březiněvsi:

- v případě částic PM<sub>10</sub> o 12,3 – 13,2 %, což odpovídá 0,6 – 0,9 µg.m<sup>-3</sup>
- v případě částic PM<sub>2,5</sub> o 5,4 – 5,8 %, tj. o 0,07 – 0,10 µg.m<sup>-3</sup>
- v případě benzo(a)pyrenu o 5,7 – 6,0 %, tj. o 0,0034 – 0,0051 ng.m<sup>-3</sup>

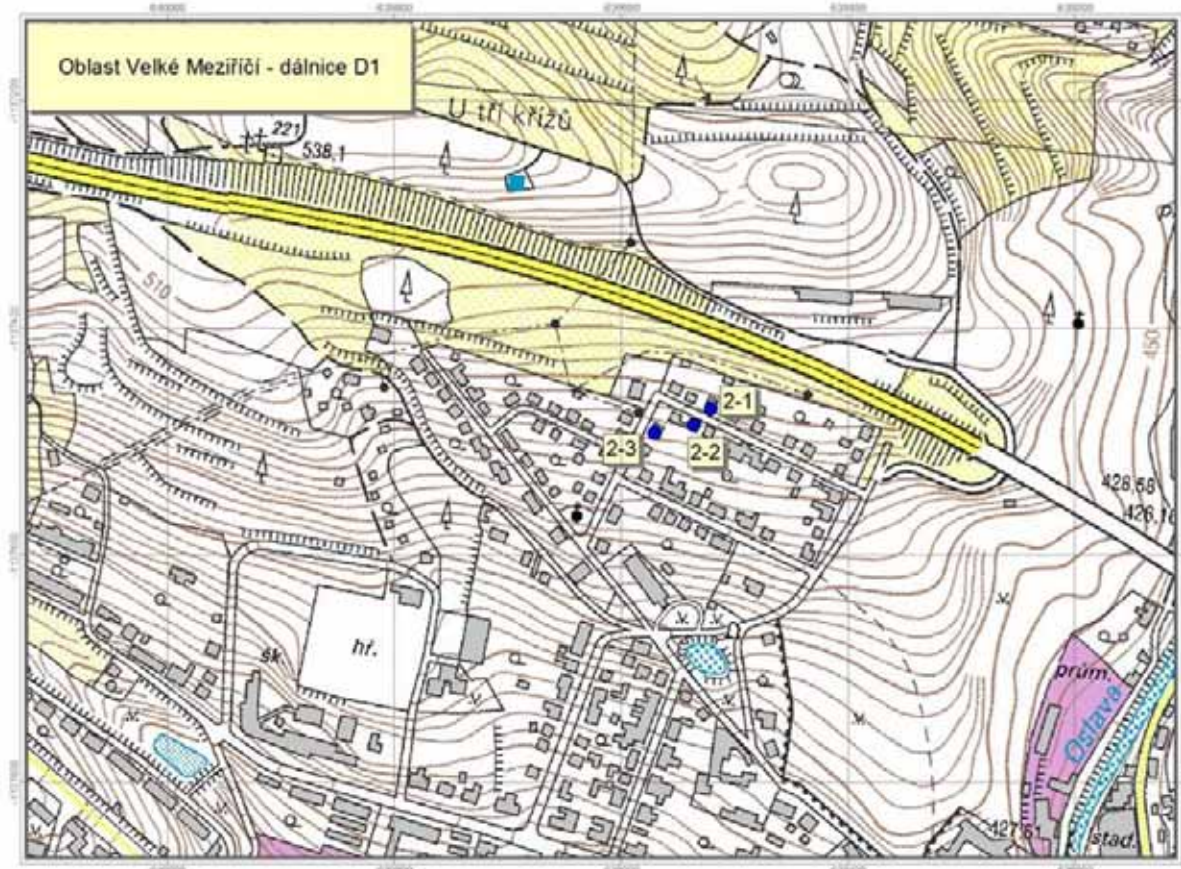
## 8.2. HODNOCENÍ ÚČINNOSTI PROJEKTOVANÉ VEGETAČNÍ BARIÉRY – LOKALITA VELKÉ MEZIŘÍČÍ

Pro prezentaci posouzení navrhovaných variant výsadby vegetačního pásu byla zvolena lokalita na severním okraji města Velké Meziříčí v prostoru ulice Pod Lesem. V této lokalitě je dálnice D1 vedena v těsné blízkosti zástavby rodinných domů, od zástavby je oddělena betonovou protihlukovou stěnou, avšak bez vegetačního pásu, vyskytují se zde jen osamocené skupiny stromů v zahradách. Protihluková stěna nebyla v modelovém příkladu zohledněna.

Vypočtená produkce emisí z provozu dálnice činí 37,8 t.rok<sup>-1</sup>.km<sup>-1</sup>. Poloha komunikace vůči zástavbě a umístění vybraných referenčních bodů jsou uvedeny na následujícím obrázku.



Obr. 8.3. Lokalita Velké Meziříčí



Tabulka 8.6. uvádí vzdálenost referenčních bodů od hranice dálnice a vypočtené hodnoty imisních příspěvků ve stavu bez vegetační bariéry.

Tab. 8.6. Lokalita Velké Meziříčí – imisní příspěvky dálnice D1

Označení bodu	Vzdálenost od hranice dálnice D1 (m)	Imisní příspěvky dálnice D1 bez vlivu bariéry		
		$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$		$\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$
		$\text{PM}_{10}$	$\text{PM}_{2,5}$	B(a)P
2-1	50	8,73	2,11	0,105
2-2	80	7,83	1,89	0,094
2-3	95	7,13	1,73	0,086

Vzhledem k prostorovým možnostem je v návrhu uvažován pás zeleně o šířce 10 m, jedná se o maximální šířku vegetačního pásu, kterou je možné v dané lokalitě uvažovat.



Výška vegetační bariéry je variantně uvažována v hodnotách 5 a 10 metrů.

Druhá skladba je navržena rovněž variantně. Vzhledem ke složení okolních porostů je v lokalitě vhodnější výsadba sestávající výhradně z listnatých dřevin, nicméně pro porovnání účinnosti je uvažována rovněž varianta s 50 % zastoupením jehličnanů a varianta realizace vegetační bariéry s využitím výhradně jehličnatých dřevin.

Modelováno je tedy 6 variant návrhu vegetační bariéry:

- šířka 10 m, výška 5 m, porost výhradně z listnatých dřevin
- šířka 10 m, výška 10 m, porost výhradně z listnatých dřevin
- šířka 10 m, výška 5 m, smíšený porost z 50 % listnatých a 50 % jehličnatých dřevin
- šířka 10 m, výška 10 m, smíšený porost z 50 % listnatých a 50 % jehličnatých dřevin
- šířka 10 m, výška 5 m, porost výhradně z jehličnatých dřevin
- šířka 10 m, výška 10 m, porost výhradně z jehličnatých dřevin

Hustota porostu je ve všech případech uvažována nejvyšší možná, tj. porosita = 0.

Následně je nejprve stanovena účinnost zachytu  $PM_{10}$  vegetační bariérou z **listnatých dřevin** podle rovnice:

$$U_L = k \times f(p) \times f_L(d, W, H),$$

kde  $k = 1$  (frakce  $PM_{10}$ ) a hodnota  $f(p)$  pro  $p = 0$  činí 1,0709.

Dále je určena vzdálenost lomového bodu transformační funkce od komunikace  $d_{LB\_L}$  pro šířku bariéry 10 metrů, jejíž hodnota činí 53 metrů. Referenční bod 2-1 je tedy umístěn blíže ke komunikaci, než činí hodnota lomového bodu, body 2-2 a 2-3 se nacházejí ve větší vzdálenosti.

V následující tabulce jsou pak určeny hodnoty transformační funkce  $f_L(d, W, H)$  v definovaných vzdálenostech pro obě varianty šířky bariéry a výsledná účinnost ve vztahu ke koncentracím  $PM_{10}$ .

**Tab. 8.7. Výpočet účinnosti bariéry z listnatých dřevin – částice frakce PM<sub>10</sub>**

Označení bodu	Vzdálenost od hranice komunikace (m)	Výška bariéry (m)	$f_L$ (d, W = 10 m, H = 5 / 10 m)	Snížení PM <sub>10</sub> (%)
2-1	50	5	8,32	8,91
2-2	80	5	11,69	12,52
2-3	95	5	12,08	12,94
2-1	50	10	10,54	11,29
2-2	80	10	21,80	23,35
2-3	95	10	23,78	25,47

Dále je vypočtena účinnost záchytu PM<sub>10</sub> vegetační bariérou z **jehličnatých dřevin**. Hodnoty k a f(p) jsou shodné jako u listnatých stromů. Účinnost je v tomto případě určena přepočtem vůči účinnosti bariéry z listnatých dřevin, pro výpočet je nutno znát hodnoty korekčních funkcí a hodnotu poměrové funkce  $f_{J/L}$ .

**Tab. 8.8. Parametry pro určení účinnosti bariéry z jehličnatých dřevin – částice frakce PM<sub>10</sub>**

Označení bodu	Vzdálenost (m)	Výška bariéry (m)	$f_{kor1}$	$f_{kor2}$	$f_J$ (d- $f_{kor1}$ , W = 10 m, H = 5 / 10 m)	Snížení PM <sub>10</sub> (%)
2-1	50	5	9,20	13,75	9,33	32,68
2-2	80	5	9,20	2,86	2,71	28,93
2-3	95	5	9,20	1,57	2,49	28,09
2-1	50	10	27,34	13,74	13,70	54,92
2-2	80	10	27,34	2,86	2,41	55,83
2-3	95	10	27,34	1,57	2,25	54,54

Účinnost záchytu PM<sub>10</sub> v případě realizace smíšeného porostu v poměru listnatých a jehličnatých dřevin 50 : 50 je pak určena jako průměr obou stanovených účinností (viz souhrnná tabulka 8.9.).

Účinnost ve vztahu k částicím frakce PM<sub>2,5</sub> je pak odvozena poměrovými koeficienty, které činí pro listnaté dřeviny 0,44, pro jehličnaté dřeviny 0,24 a pro smíšený porost 0,34. Účinnost záchytu benzo(a)pyrenu je následně odvozena jako vážený průměr záchytu částic PM<sub>2,5</sub> (97,4 %) a PM<sub>10</sub> (2,6 %).

Výsledky hodnocení shrnují tabulky 8.9. (účinnost bariéry v %) a 8.10. (snížení koncentrací v  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ).

**Tab. 8.9. Účinnost vegetační bariéry – lokalita Velké Meziříčí**

Označení bodu	Snížení PM <sub>10</sub> (%)	Snížení PM <sub>2,5</sub> (%)	Snížení B(a)P (%)
<b>Listnaté dřeviny, výška bariéry 5 m</b>			
1-1	8,91	3,92	4,05
1-2	12,52	5,51	5,69
1-3	12,94	5,69	5,88
<b>Listnaté dřeviny, výška bariéry 10 m</b>			
2-1	11,29	4,97	5,13
2-2	23,35	10,27	10,61
2-3	25,47	11,21	11,58
<b>Jehličnaté dřeviny, výška bariéry 5 m</b>			
2-1	32,68	7,84	8,49
2-2	28,93	6,94	7,51
2-3	28,09	6,74	7,30
<b>Jehličnaté dřeviny, výška bariéry 10 m</b>			
2-1	54,92	13,18	14,27
2-2	55,83	13,40	14,50
2-3	54,54	13,09	14,17
<b>Smišený porost, výška bariéry 5 m</b>			
2-1	20,80	7,07	7,43
2-2	20,72	7,05	7,40
2-3	20,52	6,98	7,33
<b>Smišený porost, výška bariéry 10 m</b>			
2-1	33,10	11,26	11,82
2-2	39,59	13,46	14,14
2-3	40,00	13,60	14,29

**Tab. 8.10. Snížení imisních příspěvků dálnice D1 vlivem vegetační bariéry – lokalita Velké Meziříčí**

Označení bodu	Snížení PM <sub>10</sub> (µg.m <sup>-3</sup> )	Snížení PM <sub>2,5</sub> (µg.m <sup>-3</sup> )	Snížení B(a)P (ng.m <sup>-3</sup> )
<b>Listnaté dřeviny, výška bariéry 5 m</b>			
1-1	0,78	0,08	0,0042
1-2	0,98	0,10	0,0053
1-3	0,92	0,10	0,0050
<b>Listnaté dřeviny, výška bariéry 10 m</b>			
2-1	0,99	0,10	0,0054
2-2	1,83	0,19	0,0100
2-3	1,82	0,19	0,0099
<b>Jehličnaté dřeviny, výška bariéry 5 m</b>			
2-1	2,85	0,17	0,0089
2-2	2,27	0,13	0,0071
2-3	2,00	0,12	0,0062
<b>Jehličnaté dřeviny, výška bariéry 10 m</b>			
2-1	4,79	0,28	0,0149
2-2	4,37	0,25	0,0136
2-3	3,89	0,23	0,0121
<b>Smišený porost, výška bariéry 5 m</b>			
2-1	1,82	0,15	0,0078
2-2	1,62	0,13	0,0070
2-3	1,46	0,12	0,0063
<b>Smišený porost, výška bariéry 10 m</b>			
2-1	2,89	0,24	0,0124
2-2	3,10	0,26	0,0133
2-3	2,85	0,23	0,0122

Z provedených výpočtů vyplývají následující závěry:

- účinnost záchytu porostu v případě částic  $PM_{10}$  činí 8 – 56 % (v závislosti na typu porostu a jeho výšce), v případě částic  $PM_{2,5}$  to je 3 – 14 % a v případě benzo(a)pyrenu 4 – 15 %.
- nejvyšší účinnost snížení imisních příspěvků dálnice byla zaznamenána při použití jehličnatých dřevin, kde při výšce bariéry 10 metrů dosahuje snížení koncentrací částic  $PM_{10}$  na úrovni okolo 55 %, u částic  $PM_{2,5}$  a benzo(a)pyrenu pak 13 – 15 %.
- nižší účinnost vykazují listnaté dřeviny, kde se účinnost při výšce bariéry 10 metrů pohybuje na úrovni do 25 % u částic  $PM_{10}$  a do 11,5 % u částic  $PM_{2,5}$  a benzo(a)pyrenu.
- v absolutních hodnotách koncentrací dosahuje snížení imisních příspěvků  $PM_{10}$  nejvýše  $4,8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , u částic  $PM_{2,5}$  nejvýše  $0,3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  a v případě benzo(a)pyrenu do  $0,015 \text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$ .

## 9. SROVNÁNÍ „NOVOSTI POSTUPŮ“

Metodika přináší komplexní nástroj pro kvantifikaci účinku vegetačních bariér s prioritní hygienickou funkcí v závislosti na jejich vlastnostech (šířka, výška, hustota, druhová skladba) a vzdálenosti od hranice komunikace. Umožňuje výpočet účinku bariéry, vyjádřeného jako relativní snížení koncentrací znečišťující látky v procentech výchozí koncentrace (resp. imisního příspěvku komunikace), přičemž výchozí koncentrace odpovídá stavu bez vegetační bariéry. Metodika zahrnuje následující znečišťující látky: celkové částice (pro potřeby výpočtu vyjádřené jako frakce  $PM_{75}$ ), suspendované částice frakcí  $PM_{10}$  a  $PM_{2,5}$ , benzo(a)pyrenu a těžké kovy – arsen, kadmium, nikl a olovo. Metodika umožňuje:

- posouzení vlivu stávající vegetační bariéry podél komunikace
- posouzení účinku různých variant navrhované vegetační bariéry

V porovnání se současnou praxí se jedná o zcela nové dílo, neboť přes existenci mnoha dílčích studií dosud není k dispozici komplexní nástroj, který by umožnil kvantifikovat účinky vegetačních bariér ve vazbě na jejich základní vlastnosti.

V současnosti je převažujícím cílem výsadby dřevin zapojení silnice do krajiny a snížení jejího negativního estetického působení, popřípadě i podpora systému ekologické stability v území. S účinkem bariéry na záchyt prachových částic se sice počítá, ale bez bližšího upřesnění.

V některých případech (zejména při určení rozsahu tzv. kompenzačních opatření podle zákona č. 201/2012 Sb., o ochraně ovzduší), je záchyt částic stanovován, ale na základě zastaralých a zjevně silně nepřesných či spíše velmi výrazně nadhodnocených podkladů. Tyto situace jsou známy z posuzovací praxe, předložená metodika však uvedené dosavadní postupy ani nezahrnuje do rešerše, ani nediskutuje, neboť je nelze podložit relevantní literaturou.

Metodika se opírá o dva základní podklady, a to o rozsáhlou analýzu informací získaných rešerší odborné literatury, které jsou uvedeny v přehledu literatury a o provedení speciálních modelových výpočtů prostupu znečištění přes polopropustnou překážku (vegetační bariéru), částečně také o provedená měření koncentrací suspendovaných částic v okolí komunikací. Informace získané rešerší literatury předložená metodika zásadním způsobem rozšiřuje a propojuje do komplexního materiálu, který nebyl dosud publikován.

## 10. POPIS UPLATNĚNÍ CERTIFIKOVANÉ METODIKY

Předpokládá se, že metodika bude standardně uplatňována pro potřeby projektové přípravy a realizaci výsadeb, pro projekty dopravní infrastruktury, pro přípravu projektů k žádostem o dotační podporu a pro rozhodování orgánů veřejné správy. Relevantními uživateli tedy jsou:

- úřady vykonávající státní správu v odvětví ochrany životního prostředí
- úřady vykonávající státní správu v odvětví dopravy
- poskytovatelé dotací na realizaci výsadeb (krajské úřady, SFŽP ČR)
- samosprávné orgány obcí, měst a krajů
- vlastníci a správci komunikací, investoři silničních staveb
- zpracovatelé rozptylových studií
- zpracovatelé posouzení vlivů na životní prostředí (EIA, SEA)
- projektanti vegetačních úprav
- projektanti staveb dopravní infrastruktury
- žadatelé o dotace na realizaci výsadeb vegetace podél komunikací
- zprostředkovatelé dotací z fondů EU a z národních zdrojů
- subjekty zajišťující výsadby zeleně



## 11. EKONOMICKÉ ASPEKTY

Základní předpokládaný přínos uplatnění metodiky spočívá ve zvýšení informovanosti pracovníků projektové přípravy, orgánů státní správy a ostatních zainteresovaných subjektů, a díky němu zlepšení rozhodování o přijatých opatřeních, které se projeví ve snížení imisní zátěže a zdravotních rizik obyvatel v okolí silně dopravně zatížených komunikací.

Tyto efekty se v ekonomické rovině projeví:

- úsporami na straně přípravných prací, kdy jednoznačně daný výpočetní postup usnadní proces projektové přípravy a povolování staveb
- snížením externích nákladů vyvolaných v důsledku expozice obyvatel znečišťujícím látkám

Úspory na straně přípravných prací v této oblasti lze v souhrnu za celé území ČR odhadovat až v řádu stovek tis. Kč ročně.

Snížení externích nákladů ze znečištění ovzduší může být poměrně výrazné vzhledem k tomu, že se předpokládá postupné uplatnění metodiky při stanovování kompenzačních opatření podle zákona č. 201/2012 Sb., o ochraně ovzduší, a tím i k podstatnému zvýšení rozsahu výsadeb, ukládaných v této souvislosti investorům staveb, které jsou zdrojem emisí částic nebo benzo(a)pyrenu. Konkrétní ekonomické vyjádření tohoto efektu je poměrně obtížné a závisí na použité metodice vyčíslení externích nákladů, nicméně v součtu za celé území ČR se může pohybovat až v řádu mil. Kč ročně.

Mezi další přínosy patří optimalizace výsadeb vegetace podél komunikací, které bude dosaženo skloubením požadavků na jejich funkce s cílem využití výsadeb jako účinného opatření ke snížení imisní zátěže suspendovaných částic z dopravy.

## 12. SEZNAM POUŽITÉ SOUVISEJÍCÍ LITERATURY

- Allen A, G., Nemitz E., Shi J, P., Harrison R, M., Greenwood J, C, (2001): Size distribution of trace metals in atmospheric aerosols in the United Kingdom, *Atmospheric Environment*, 35, 4581 – 4591
- Alves, C, A., Oliveira C., Martins N., Mirante F., Caseiro A., Pio C., Matos M., Silva H, F., Oliveira C., Camões F, (2016): Road tunnel, roadside, and urban background measurements of aliphatic compounds in size-segregated particulate matter, *Atmospheric Research* 168, 139 – 148
- ATEM (2013): MEFA 13 – program pro výpočet emisních faktorů pro motorová vozidla, aktualizace 2013. <http://www.atem.cz/mefa.php>
- ATEM (2015): Imisní model ATEM, aktualizace 2015. <http://www.atem.cz/atem.php>
- Bartoš, L. et al. (2012): TP 225 – Prognóza intenzit automobilové dopravy, EDIP, Plzeň.
- Beckett, K. P., Freer-Smith, P. H., Taylor, G. (2000): Particulate pollution capture by urban trees: effect of species and windspeed. *Global Change Biology* 6.
- Bitog, J. P. et al. (2012): Numerical simulation study of a tree windbreak. *Biosystem Engineering* 111.
- Blackadar A. K. (1962): The vertical distribution of wind and turbulent exchange in a neutral atmosphere. *J. Geophys. Res.* 67(8), s. 3095–3102.
- Brantley H. L., Gayle Hagler S.W., Deshmukh P. J., Baldauf R. W. (2014): Field assessment of the effects of roadside vegetation on near-road black carbon and particulate matter. *Science of the Total Environment* 468–469.
- Cavanagh J. E.: Potential of vegetation to mitigate road-generated air pollution. Part I – Review of background information. Landcare Research, New Zealand, 2006.
- Cowherd, Ch. Jr., Muleski, G. (2005): Development of a Removal Term for Dust Particle Disposition on Vegetation. Midwest Research Institute.
- Dostál T. (2007): Protierozní ochrana. Katedra hydromeliorací a krajinného inženýrství, ČVUT v Praze. Dostupné z: <http://storm.fsv.cvut.cz>
- Dufková, J., Rožnovský, J., Středa, T. (2006): Vliv větrolamů na proudění vzduchu. Sborník z konference Bioklimatológia a voda v krajine. Strečno, Slovensko.

Freer-Smith, P. H., El-Khatib, A. A., Taylor, G. (2003): Capture of particulate pollution by trees: A comparison of species typical of semi - arid areas (ficus nitida and eucalyptus globulus) with European and north American species. Forest Research.

Guan, D., Yushu, Z., Tingyao, Z. (2003): A wind-tunnel study of windbreak drag. Agricultural and Forrest Meteorology 118.

Harrison R, M., Tilling R, Romero M, S, C., Harrad S., Jarvis K, (2003): A study of trace metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in the roadside environment, Atmospheric Environment 37, 2391 – 2402

Chaulya, S. K., Chakraborty, M. K., Singh, R. S. (2000): Air pollution modelling for a proposed limestone quarry. Central Mining Research Institute.

Chen H, (2013): Characterization of Particles in the Ambience of the High-Tech Industrial Park of Central Taiwan, Department of Environmental Science and Engineering, Tunghai University, No, 181, Sec, 3, Taichung Port Rd., Xitun Dist., Taichung City 407, Taiwan

Jareš, V., Dufková, J., Mužíková, B. (2011): Windbreak porosity determined from digital photo. Source and Limit of Social Development International Scientific Conference. Topol'čianky, Slovensko.

Karel, J. et al. (2015a): Metodika pro výpočet emisí částic pocházejících z resuspenze ze silniční dopravy. MŽP ČR, Praha.

Karel, J. et al. (2015b): Metodika pro výpočet přínosu výsadby izolační zeleně ke snížení suspendovaných částic PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub> a benzo(a)pyrenu. MŽP ČR, Praha.

Kappis, C. et al. (2007): Studie zum wissenschaftlichen Erkenntnisstand über das Feinstaubfilterungspotential (qualitativ und quantitativ) von Pflanzen. Institut für Agrarund Stadtökologische Projekte an der Humboldt-Universität zu Berlin, Berlin.

Krzemińska-Flowers M., Bem H., Górecka H, (2006): Trace metals concentration in size-fractioned urban air particulate matter in Łódź, Poland, I, Seasonal and site fluctuations, Polish J, of Environ, Stud., 15, 759 – 767

Lawrence a kol, (2013): Source apportionment of traffic emissions of particulate matter using tunnel measurements, Atmospheric Environment 77, 548–557

Litschmann, T., Rožnovský, J. (2005): Optická hustota (porosita) větrolamu a její vliv na charakter proudění. Sborník referátů z mezinárodní vědecké konference „Bioklimatologie současnosti a budoucnosti“. ISBN 80-86690-31-08.

Litschmann, T., Rožnovský, J., Podhrázská, J. (2007): Využití optické porosity ke klasifikaci větrolamů. Bioclimatology and natural hazards. International Scientific Conference, Poľana nad Detvou, Slovensko.

Manoli E., Voutsas D., Samara C, (2001): Chemical characterization and source identification/apportionment of fine and coarse air particles in Thessaloniki, Greece, Atmospheric Environment 36, 949 – 961

Menke, P. et al. (2008): Bäume und Pflanzen lassen Städte atmen - Schwerpunkt – Feinstaub: Forum DIE GRÜNE STADT.

Mitchell, R., Maher, B. A., Kinnersley, R. (2010): Rates of particulate pollution deposition onto leaf surfaces: Temporal and inter-species magnetic analyse. Environmental Pollution.

Muziková, B., Jareš, V. (2010): Seasonal variability of windbreak affectivity and their optical porosity. Sborník příspěvků konference MendelNet.

Ny M., Lee B, (2011): Size Distribution of Airborne Particulate Matter and Associated Metallic Elements in an Urban Area of an Industrial City in Korea, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Ulsan, Ulsan 680-749, Korea

Oliveira C., Martins N., Tovaes J., Pio ., Cerqueira M., Matos M., Silva H., Oliveira C, Camões F, (2011): Size distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in a roadway tunnel in Lisbon, Portugal, Chemosphere, 83, 1588 – 1596

Petroff, A., Mailliat, A., Amielh, M., Anselmet, F. (2008a): Aerosol dry dposition on vegetative canopies. Part I: Review of present knowledge. Atmospheric Environment 42.

Petroff, A., Mailliat, A., Amielh, M., Anselmet, F. (2008b): Aerosol dry dposition on vegetative canopies. Part II: A new modelling approach and applications. Atmospheric Environment 42.

Petroff, A., Zhang, L. (2010): Development and validation of a size-resolved particle dry deposition scheme for application in aerosol transport models. Geoscientific Model Development 3.

Petroff, A., Zhang, L., Pryor, S. C., Belot, Y. (2009): An extended dry deposition model for aerosols onto broadleaf canopies. Aerosol science 40.

Pio C., Mirante F., Oliveira C., Matos M., Caseiro A., Oliveira C., Querol X., Alves C., Martins N., Cerqueira M., Camões F., Silva H., Plana F, (2013): Size-segregated

chemical composition of aerosol emissions in an urban road tunnel in Portugal, *Atmospheric Environment*, 71, 15 – 25

Podhrázská, J., Novotný, I., Rožnovský, J., Hradil, M., Toman, F., Dufková, J., Macků, J., Krejčí, J., Pokladníková, H., Středa, T. (2008): Optimalizace funkcí větrolamů v zemědělské krajině. Metodika. VÚMOP. Praha. ISBN 978–80–904027–1–3

Räsänen, J. V., Holopainen, T., Joutsensaari, J., Ndam, C., Pasanen, P., Rinnan, A., Kivimäenpää, M. (2013): Effects of species-specific leaf characteristics and reduced water availability on fine particle capture efficiency of trees. *Environmental Pollution* 183.

Raupach, M. R., Woods, N., Dorr, G., Leys, J. F., Cleugh, H. A. (2001): The entrainment of particles by windbreaks. *Atmospheric Environment* 35.

ŘSD ČR (2010): Celostátní sčítání dopravy 2010. <http://scitani2010.rsd.cz>

Samara C., Voutsas D, (2005): Size distribution of airborne particulate matter and associated heavy metals in the roadside environment, *Chemosphere* 59, 1197 – 1206

Středa, T., Rožnovský, J., Pokladníková, H. (2007): Vlivy různých typů lesních pásů na proudění vzduchu. *Klima lesa*. Sborník referátů z mezinárodní vědecké konference „Klima lesa“, Křtiny. ISBN 978-80-86690-40-7.

Šíp, V., Řezníček, H., Beneš, L. (2015): Modelování šíření prachu z pozemní komunikace. *Časopis ochrana životního prostředí*. Praha. ISSN: 2336-6753

Vreštiak, P. (1991): Vývoj listovej biomasy v štruktúre sídelnej zelene. Bratislava: VEDA, *Acta dendrobiologica*.

Zechmeister H. G., Dullinger S., Hohenwallner D., Riss A., Haus-Illnar A. and Scharf S. (2006): Pilot study on road traffic emissions (PAHs, Heavy Metals) measured by using mosses in a tunnel experiment in Vienna, Austria, *Environ Sci Pollut Res*, 13, 6, 398 – 4015

Zereini F. et al. (2005): Concentration and distribution of heavy metals in urban airborne particulate matter in Frankfurt am Main, Germany, *Environ. Sci. Technology*, 39, pp 2983 – 2989

### 13. SEZNAM PUBLIKACÍ, KTERÉ PŘEDCHÁZELY METODICE

Předložená metodika vychází z podrobné rešerše odborné literatury, jejíž seznam je uveden v kap. 12. Mimo jiné také navazuje na následující literaturu, publikovanou autory v předešlém období:

- Karel, J. et al. (2011): Možnosti výsadby zeleně pro snížení koncentrací PM<sub>10</sub> a PM<sub>2,5</sub>. ŘSD ČR, Praha.
- Karel, J. et al. (2015): Metodika pro výpočet emisí částic pocházejících z resuspenze ze silniční dopravy. MŽP ČR, Praha.
- Karel, J. et al. (2015): Metodika pro výpočet přínosu výsadby izolační zeleně ke snížení suspendovaných částic PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub> a benzo(a)pyrenu. MŽP ČR, Praha. – jedná se o metodiku, která navazuje na řešení projektu TD020357 v oblasti zachytu prachových částic na vegetaci, avšak navíc je rozšířena o zachyt benzo(a)pyrenu a těžkých kovů (arsen, kadmium, nikl, olovo).

V rámci realizace projektu TD020357 byly dále publikovány dva články, které se věnují problematice řešené v této metodice:

- Karel, J., Smolová, E. (2016): Kvantifikace vlivu vegetační bariéry na šíření prachových částic od komunikace. Dopravní inženýrství 1/2016.
- Šíp, V., Beneš, L. (2016): CFD Optimization of a Vegetation Barrier. Sborník z konference Numerical Mathematics and Advanced Applications - ENUMATH 2015, Turecko.

## 14. JMÉNA OPONENTŮ

RNDr. Jan Macoun, Ph.D., Český hydrometeorologický ústav

Mgr. Jakub Bucek, BUCEK s. r. o.