

Projekt SS02030022 Vodní systémy a vodní hospodářství v ČR v podmínkách změny klimatu - Centrum voda

## Potenciální vliv znečištění okolí silnic na kvalitu vod. Výsledky šetření u Sadské v povodí Výrovky

Ivan Suchara, Julie Sucharová, Marie Holá



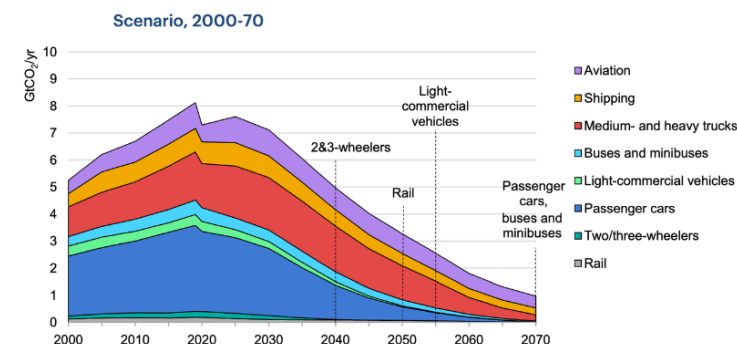
# Silnice – zdroj nejbohatších směsí polutantů

Okolí pozemních komunikací dříve spojováno s kontaminací olovem (Pb aditiva benzínu). Po zákazu distribuce Pb benzinů o zjišťování znečištění jen velmi malý zájem, snad jen o skleníkové plyny a BaP.

Problém znečištění vyřeší provozování elektromobilů?

Provozování komunikace produkuje nejrůznorodější směsi polutantů z mnoho dílčích zdrojů znečišťování (exhaust - EE a non-exhaust emissions NEE):

- **Pohonné hmoty** (přímé úniky, výpar a produkty spalování ve výfukových plynech)
- **Mazadla** (přímé úniky, zbytky spalování ve výfukových plynech)
- **Aditiva** pohonných hmot a mazadel (úniky paliv a mazadel, zbytky ve výfukových plynech)
- **Ztráty kovů z povrchů katalyzátorů**
- **Otěry pohyblivých částí vozidel**
- **Koroze materiálů vozidel**
- **Obrusy pneumatik a povrchů vozovek**
- **Zimních posypové materiály**
- **Opad znečištění z vozidel a úniky přepravovaných nákladů**



Hannah Ritchie (2020) - "Cars, planes, trains"



# Pohonné hmoty a mazadla

**Benzin:** Frakční destilace ropy - alifatické uhlovodíky, bod varu 20 – 220°C.

Typický obsah: 4-8 % alkany; 2-5 % alkeny; 25-40% isoalkany; 3-7 % cykloalkany; 1-4 % cykloalkeny; 20-50% celkem aromatické uhlovodíky (0,5-2,5% benzen). **Biosložka:** 5–10 % (etanol + ethyl terc butyl ether)

**Emise:** - přímý výpar (20–50 % při 70°C), nespálený benzin a výfukové plyny zážeh. motorů: plynné, aerosoly, částice (saze): CO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, etylen, toulen, acetylen, xylen, benzen, propylen, další PAU.....

**Motorová nafta:** Více než 100 uhlovodíků, Frakční destilace ropy – alifatické, aromatické, větvené a nevětvené parafinické uhlovodíky bod varu 150 – 370° C, obsah síry do 5 %°.

**Emise:** přímý výpar, výfukové plyny vznětových motorů: CO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, C-saze, formaldehydy, acetaldehyd, toluen, ketony, styren, naftalen, další PAU více než z benzinů (PY>FL>CHR>BaP)

**Motorové oleje:** 75–90 % ropné, semisyntetické a syntetické oleje C10 and C34 uhlovodíky alifatické, větvené i aromatické a 10–25 % aditiva

„Over 40% of the pollution in America's waterways is from used motor oil“ [California State University, Hayward. Environmental Education Laboratory.](#)



# Aditiva paliv a mazadel

Aditiva (až 970 látek) ke zlepšení spalování a výkonu motoru, antikorozi, prodloužení životnosti motoru, antioxidanty olejů, omezování pění, vynašeče karbonových spalin motorů, antigely, lubrikanty, atd.

Do roku 2000 v ČR antidetonátor tetraalkyly olova a halogenid. vynašeče olova – emise halogenidy  $Pb_xCl_yBr_y$   
Aktuálně: biosložka (5 a 10% etanol, rostlinné oleje), zvýšení oktanového čísla (iso-oktan, alif. alkoholy)

## Typy aditiv paliv:

**Alkoholy** (metanol, n-butanol...),

**Étery** (amyl metyl éter, diisopropyl éter...),

**Antioxidanty** (butyl hydroxytoulen, butylfenoly, etylendiamin),

**Detergenty** (aminy, polybuten amin...),

**Antidetonátory** (ferrocen  $Fe(C_5H_5)_2$ , toluen....),

**Barviva paliv** (sudan, antrachinony....),

**Detergenty** (alkylbenzen, sulfonáty....),

**Urychlovače startování** (étery)



## Aditiva mazadel:

Polární a nepolární: fosforečnany, sulfáty, aminy, mastné kyseliny, alkylsuccinic estery, Al polymery, aromatické aminy, sloučeniny Ag, Al, B, Cu, Mo, Si, Sn, Ti, W, Zn, a další přísady (výrobní tajemství)



# Úniky, koroze a otěry pohyblivých částí vozidel

**Katalyzátory:** od r. 1993 v ČR povinné vybavení automobilů, dnes druhá generace (řízené trojcestné), zahříváním a chladnutím katalyzátorů se z nosičů uvolňují platinové kovy (Pt, Pd, Rh, Ir, Os na částicích  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , popř. další kovy Cr, Ni, Co). Více emisí z naftových motorů, 10–15 % Pt v rozpustných formách z 90 %  $\text{PtOH}^+$ , z 9 %  $\text{Pt}(\text{OH})_2$

**Obrusy brzdového obložení:** frikční bez azbestové komponenty 5–50 % kovové složky. Otěrem se uvolňují částice různé velikosti s obsahem Zr, Si, Al, C, Mo, Sb, S, Ba, ocelová, čedičová, kevlarová (aromatický polyamid) vlákna aj.

**Obrusy pneumatik:** Pneumatiky až 9 vrstev materiálů s různými plnidly, 10–16 % hmotnosti pneumatik se obrousí během 5 let provozu. Různě velké částice přírodní a syntetické pryže, různá aditiva (15 % oleje, saze, Si, těžké kovy) vulkanizační složky (Zn, thiazoly). Emise částic pryže – stovky organických sloučenin, mikro plastů, těžkých kovů (Zn>Cd>Co>Cr>Cu>Hg>Mo...), PAU (PY>BghiP > BaP), N-(1,3-dimethylbutyl)-N'-phenyl-p-phenylenediamin... Zjištěna vysoká toxicita PM pro vodní organismy (*Wagner et al. 2018*). Podíl BaP z pneumatik u silnic jen 2 %.

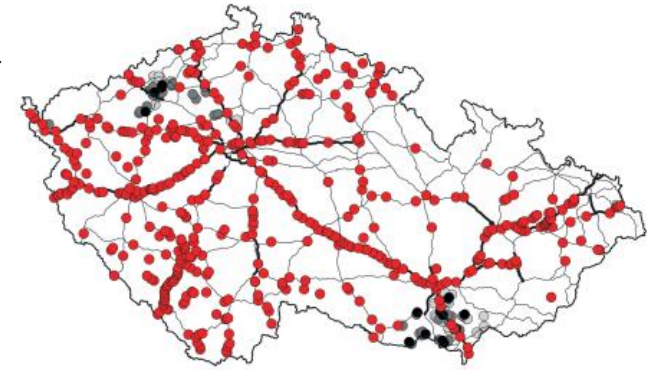
**Obrusy vozovek:** částice živičných směsí s ropnými deriváty, beton, granity, bara značení vozovek (ropné deriváty, S, V, Si, Ca, Mg, Be, Rb, Sr,...)

**Koroze karoserií, kovových částic, akumulátorů:** emise těžkých kovů, pigmentů, vosků a konzervačních přípravků (Fe, Cr, Mn, Ni, Li, B, P, Ti...)



# Zimní posypy vozovek a další znečištění

**Aplikace solí:** NaCl (sůl, solanka), pro nižší teploty  $\text{CaCl}_2$ , dřívě ( $\text{CaCl}_2 + \text{MgCl}_2$ ), přímé rozstřiky a aerosoly solí 3–8 m od vozovky, drenážní systémy odnos vodotečí na velké vzdálenosti. Zasolení zvyšuje rozpustnost a toxicitu některých polutantů. Zasolení půdy zvyšuje pH, E.C., vede ke ztrátě textury půdy, poklesu biodiverzity, hynutí stromů, šíření slanomilných rostlin halofytních rostlin (*Puccinellia distans*, *Spergularia maritima*, *Limonium gmelinii*...)



*Spergula maritima* •původní a •druhotné rozšíření Ducháček a Kúr (2019)

**Aplikace inertních materiálů:** písek, škvára, štěrk 0/8, 4/8, 8/16, různých hornin z okolních lomů. Jarní čištění vozovek rozptýl materiálů více než 10 m od okraje komunikace do polí a lesů. Jiné chemické složení než místní horninové podloží.

**Opad povrchového znečištění vozidel a transport materiálu na vozovky z okolí:** jílovité minerály, silniční prach, humusové částice, mikro plasty, barva značení vozovek, biomasa z opadu listů, popř. splachy zemin na vozovku .....

=====

**Očekávané znečištění provozem elektromobilů:**

- Úniky Li, B, F z autobaterií elektromobilů
- Těžká vozidla budou produkovat větší množství NEE z obrusů a otěrů pneumatik a vozovek (růst konc.  $\text{PM}_{2,5-5}$ )
- Snaha vyrábět karoserie komponenty z lehčích slitin na bázi lanthanoidů – vyšší znečištění REEs



# Znečištění ovzduší kolem vozovek

Emise z dopravy: částice velmi hrubé (mm), jemné  $PM < 2,5$ , ultra jemné  $PM < 2,5 \mu m$  („černý uhlík“). Aerosoly, plynné znečištění. Primární mód emitovaných částic se s časem zvětšuje (koagulace, elektrostatické síly, hygroskopicitá...) – sek. a terc. velikostní mód. Projíždějící vozy resuspenzace částic na vozovce. Nejbohatší koktejl znečišťujících látek ze všech průmyslových zdrojů znečištění podél dlouhých linií v krajině. Zóny znečištění různě široké podle polutantu (Cu, Pb 25 m, Ni 180 m, FLU, ANAPH 25 m, FLY, PYR, BaP 180m...). Sekundárně troposférický  $O_3$ , PANs, fotochemický smog.

Gaussovské a langangerovské modely rozptylu znečištění. Několik desítek modelů pro šíření znečištění z dopravy (hlavně ulice nebo dálnice). Velké množství vstupních dat, různá shoda modelu s terénními šetřeními. Pro kaňony ulic, venkovské silnice, dálnice. Výsledek podle modelů a metodiky instrumentálních měření.

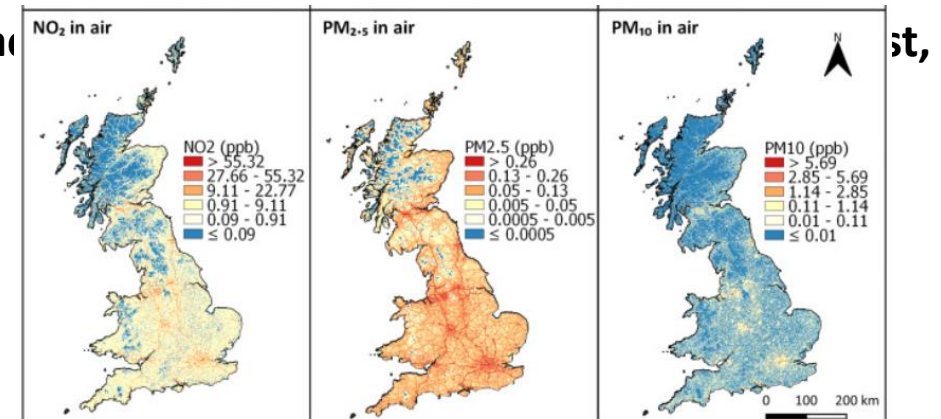
Šířka zón znečištění ovzduší u silnic/dálnic vzhledem ke zdraví (dýchací systém, snížení IQ u dětí, endokrinní disruptory, kancerogenita,.... WHO

Překročení imisních limitů:

Terénní šetření: 5-140 m

Modely obecně: návětrná strana 14-50 m, závětrná strana 90-130 m

Pro zdraví obecně bezpečná vzdálenost od silnic dle *US EPA (2014)*: 500-600 feet (152–183 m)



Modelované znečištění ovzduší z dopravy v U.K.

*Phillips et al. (2021)*



# Depozice polutantů u vozovek

Sedimentace částic (velké částice zákon gravitace, jemné částice zákony aerodynamiky), Stokesův zákon, Fickovy zákony. Laminární a turbulentní proudění vzduchu. Většinou exponenciální pokles znečištění.

Pokud by znečištění bylo vázáno na hrubé částice, pak znečištění u komunikací do malé vzdálenosti, pokud vázáno na jemné částice vzdálenost sedimentace mnohem větší. Nejde generalizovat, vliv mnoha faktorů na rychlost depozice.

## Faktory ovlivňující zóny kontaminace:

**Velikost zdroje:** Intenzita dopravy (jednotková vozidla/24 hod.)

**Složení dopravního proudu:** (osobní, nákladní, motocykly)

**Provoz motorů:** rychlost jízdy, řazení rychlosti, plynulosti provozu)

**Bariéry u okraje vozovky:** výška náspů, betonové či zděné bariéry, vedení vozovky (úrovňové, zahlobení, násep)

**Okolní terén:** rovina, vystupující či klesající k rovině vozovky a typ pokryvu půdy (výška a hustota vegetace, zástavba)

**Orientace vozovky:** vedená osy vozovky k převládajícímu směru a rychlosti proudění přízemního vzduchu

**Počasí:** Rychlost proudění vzduchu, srážky (suchá, mokrá depozice polutantů)

**Hospodaření:** lesní humus, orná půda, TTP

## Zóny znečištění půdy:

Půdní mikroorganismy toxicita (redukce růstu a funkcí, *Aliivrio fisheri* – luminiscenční zhášení) 2–5(10) m

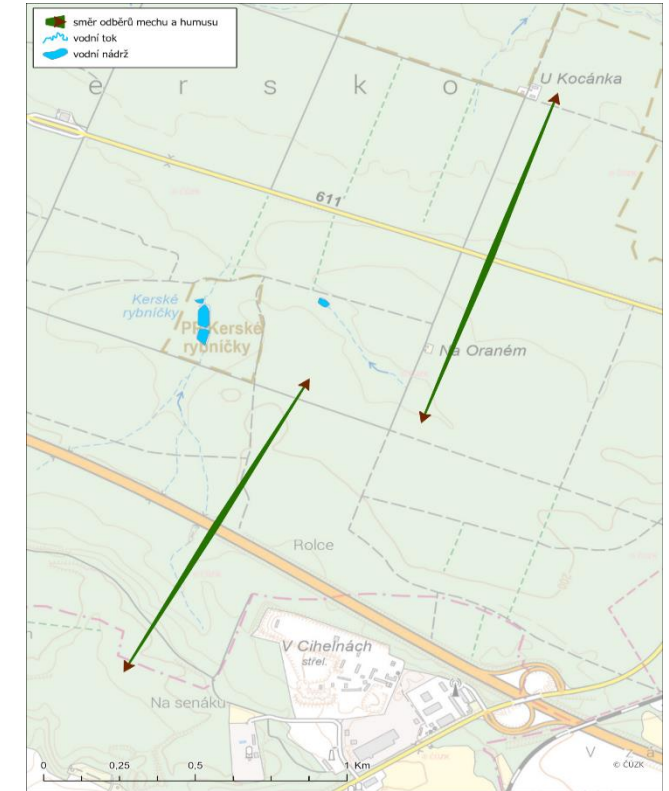
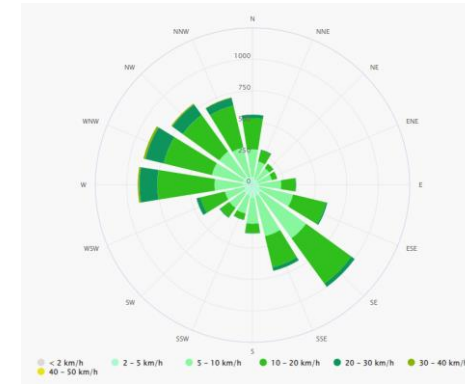
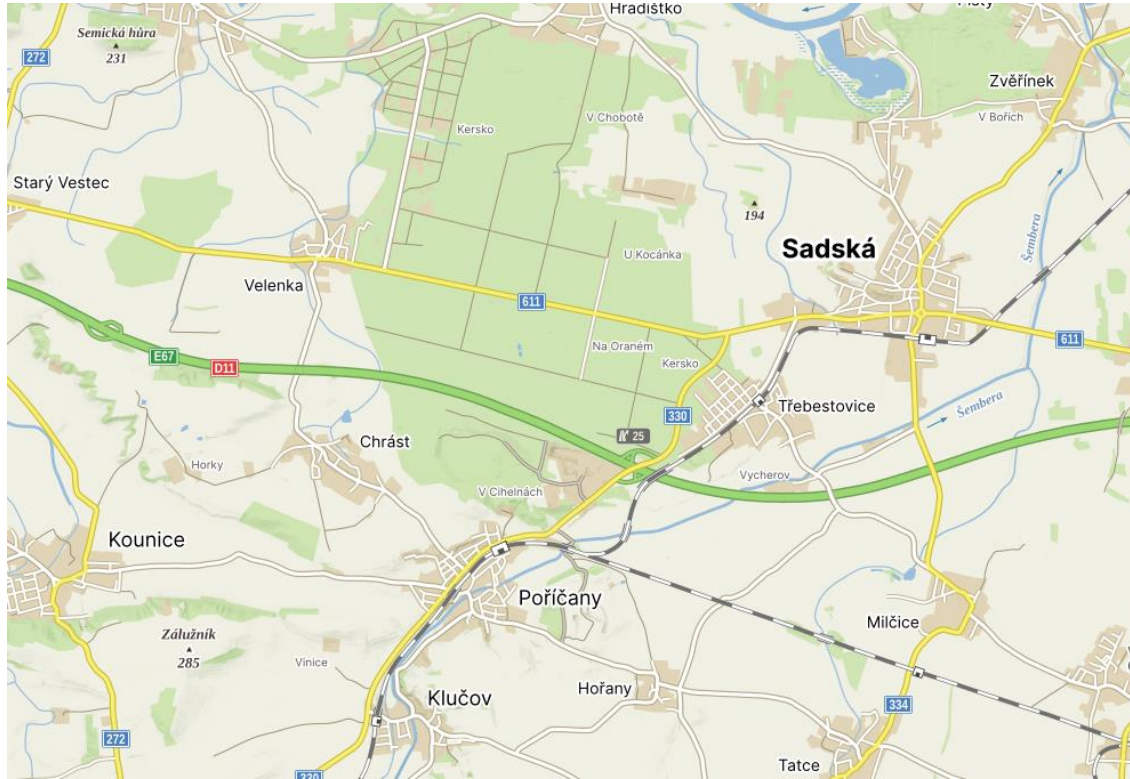
Fytotoxicita (snížená klíčivost, redukce růstu kořenů) 2–7 m

Závadnost zemědělských produktů 10–50 m (listová zelenina > seno > zrní > semena. PAU rozp. v povrchovém vosku)





# Měření znečištění u II/611 a D11 v povodí Výrovky



Výběr částí lesa s jehličnatými stromy a málo porušenou vrstvou humusu

## Intenzity dopravy (2023):

II/611 4 200/24 hod.  
D11 46 000/24 hod.

## Větrná růžice pro Sadská

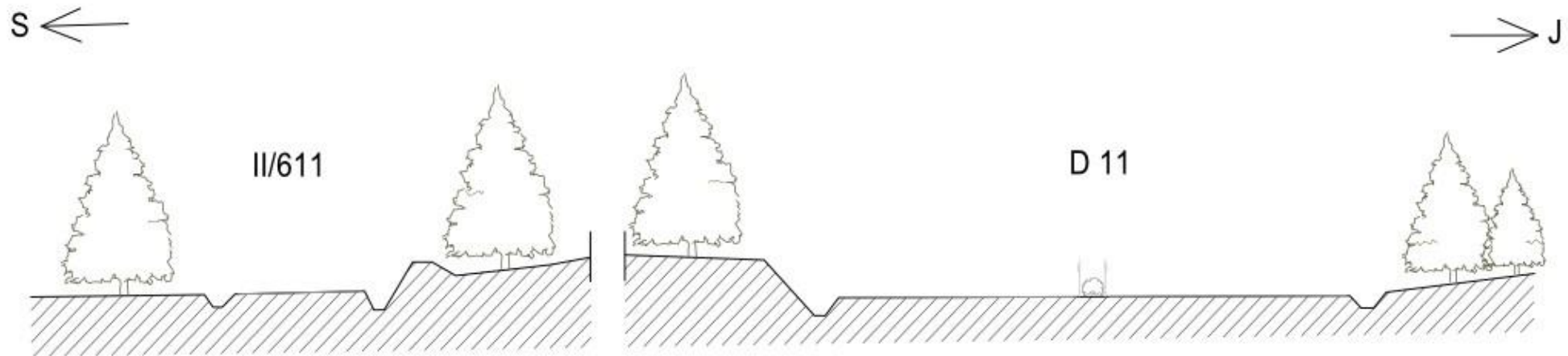
(<https://www.metgeobue.com>)

Odběry mechu a humusu na liniových transektech vedených kolmo na osy komunikací **ve vzdálenostech 5-10-25-50-100-200-500 m** od okraje vozovky. U D11 není humus na pozici sever 5 m, 500 m jih je střelnice, obalovna...



# Bariéry u okrajů vozovek

Silnice II/61 a dálnice E11 (D11)  
u Sadské - okolí vozovky



## II/611

**Severní strana: příkop bez vyššího náspu, terén pozvolna klesá od vozovky**

**Jižní strana: příkop a 1,5 m vysoký násep, terén se postupně od silnice zvyšuje ca 150 m, pak rovina**

## D11

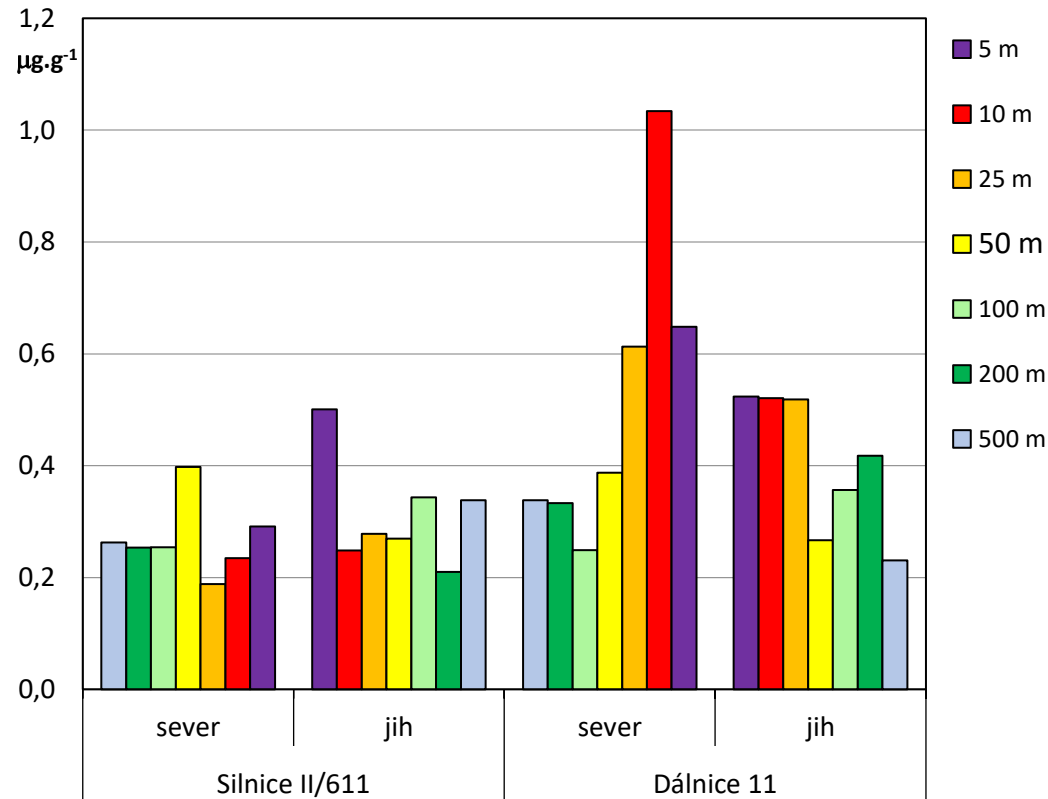
**Severní strana: za příkopem prudký svah 8 m vysoký, dále terén velmi málo stoupá**

**Jižní strana: u příkopu nejsou náspy, terén pozvolna stoupá do vzdálenosti 200 m, pak rovina  
Při stavbě dálnice 5–10 m od okraje vozovky původní lesní humus a půda odstraněny**



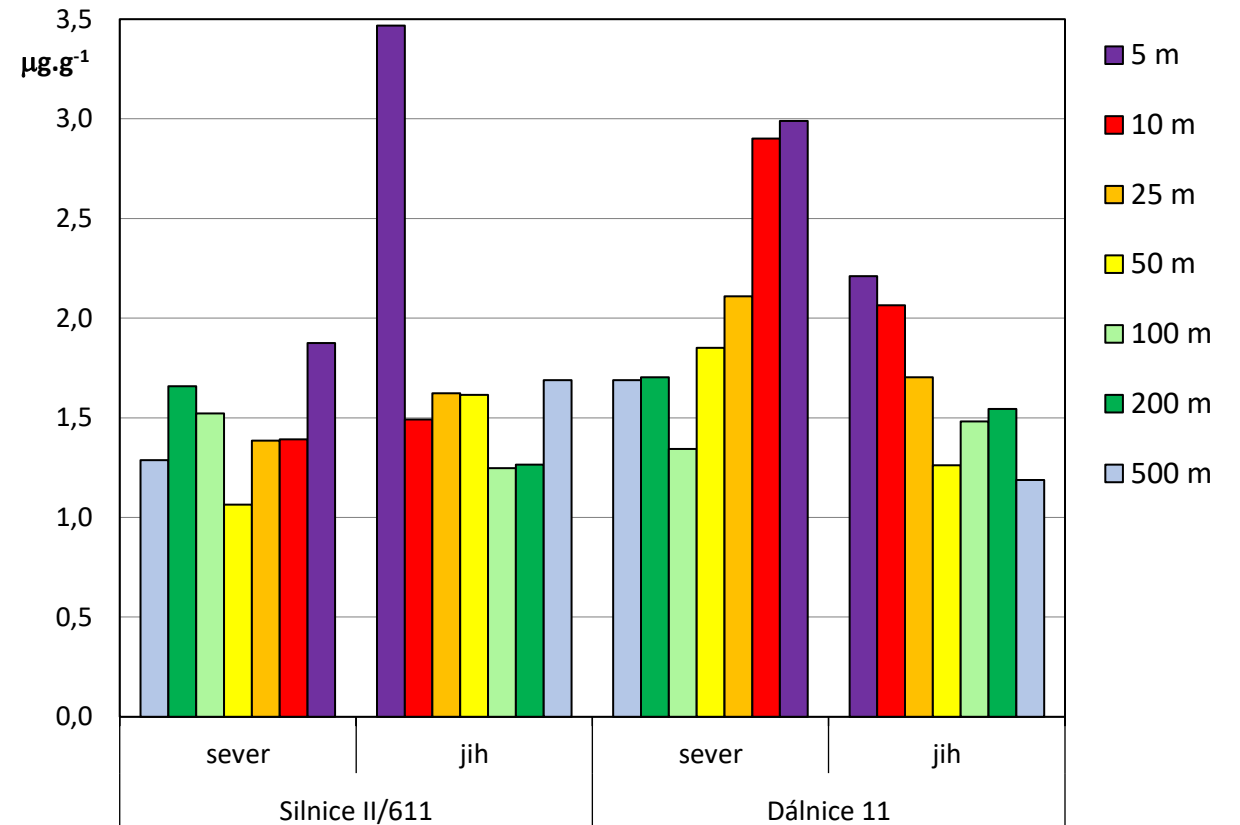
# Obsah prvků v mechu – aktuální úroveň spadu

## Arsen



As: typický zástupce EE z aditiv paliv a mazadel

## Pleurozium schreberi Nikl

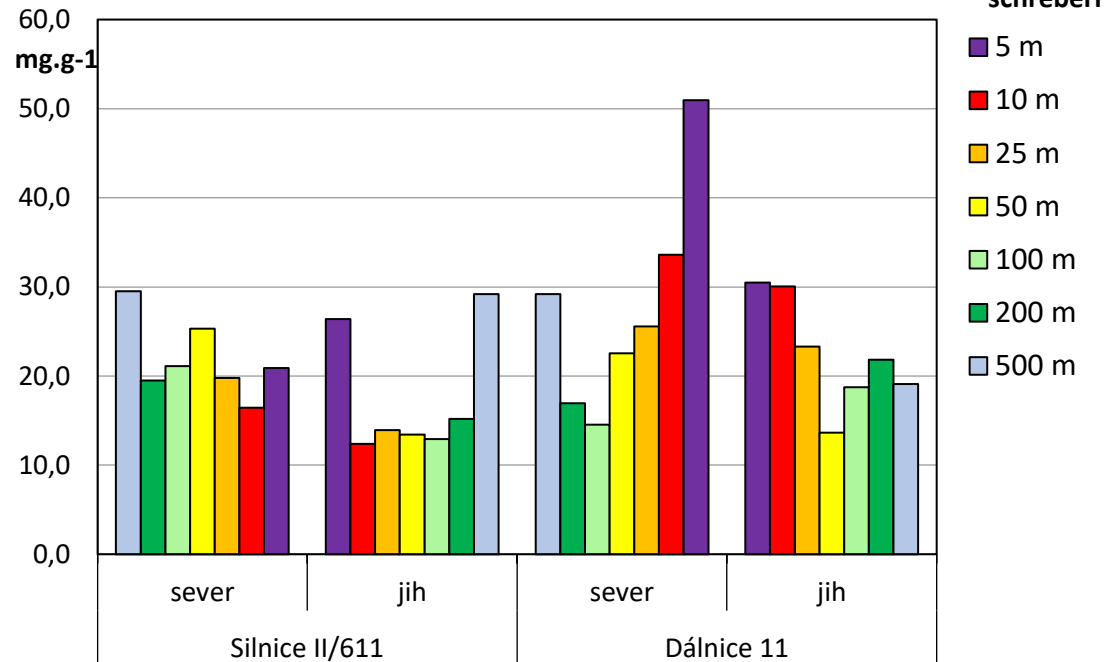


Ni: udává se 80 % EE a 20 % NEE (abraze, eroze)



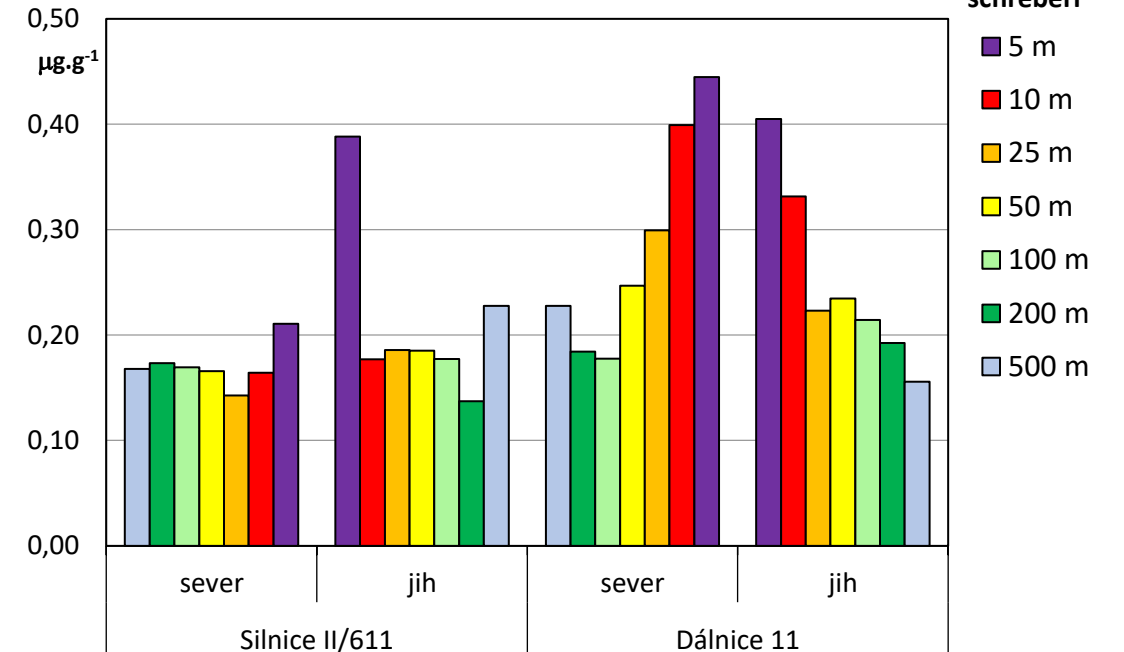
# Obsah prvků v mechu – aktuální úroveň spadu

## Barium



**Ba: typicky v NEE 90 % a 10 % v EE**

## Molybden



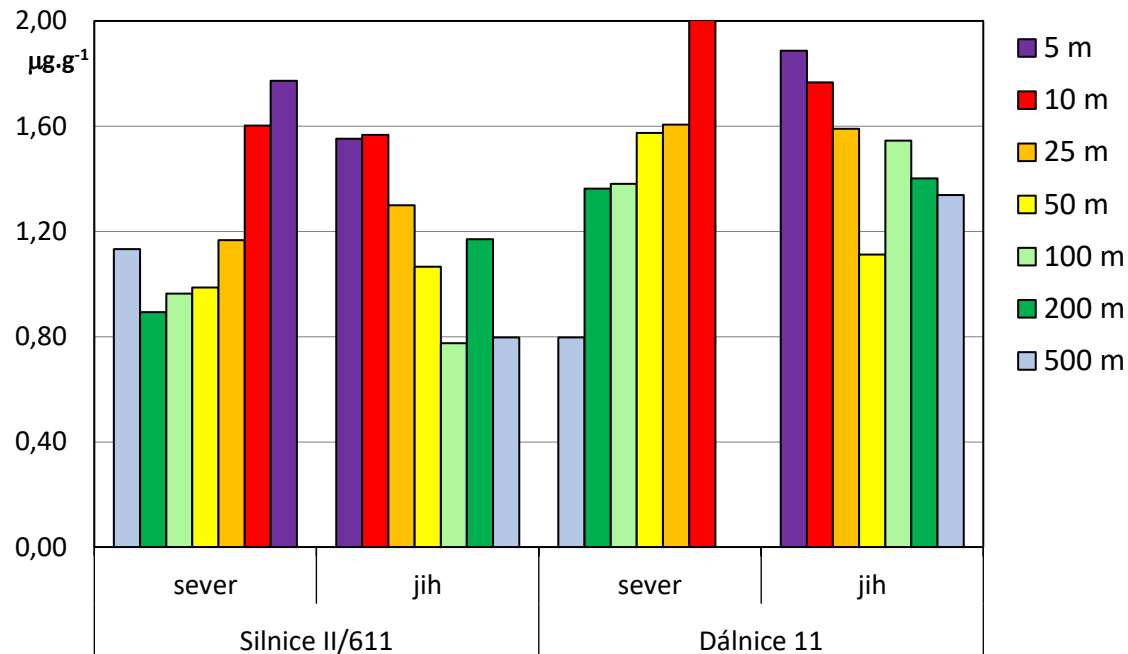
**Mo: aditiva mazadel, tepelně odolná ocel – pístní kroužky**



# Obsah prvků v humusu – dlouhodobé spady

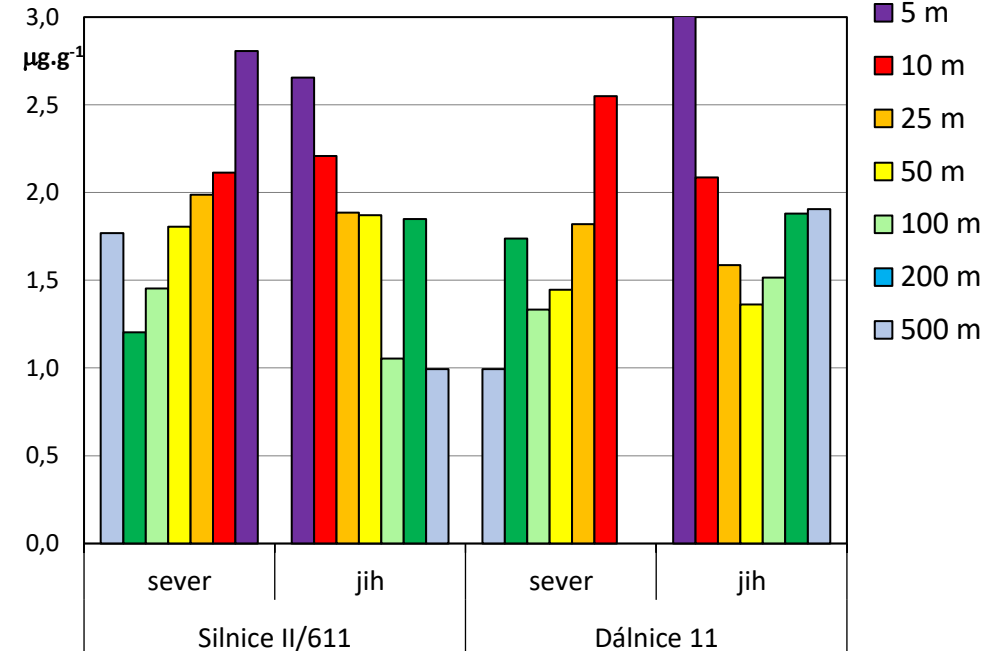
U D11 ve vzdálenosti sever 5 m není žádný humus, do 20 m různě porušený humus při stavbě dálnice

## Antimon



**Sb: spolu s Ba a Sn typický NEE z obrusů brzdového obložení**

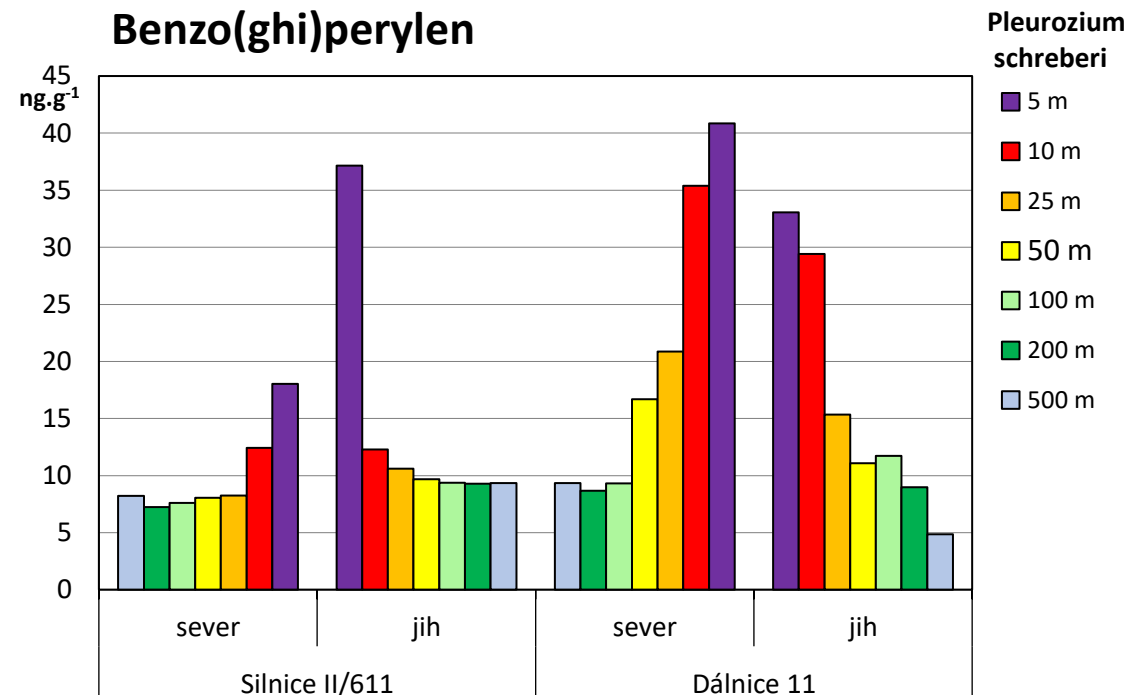
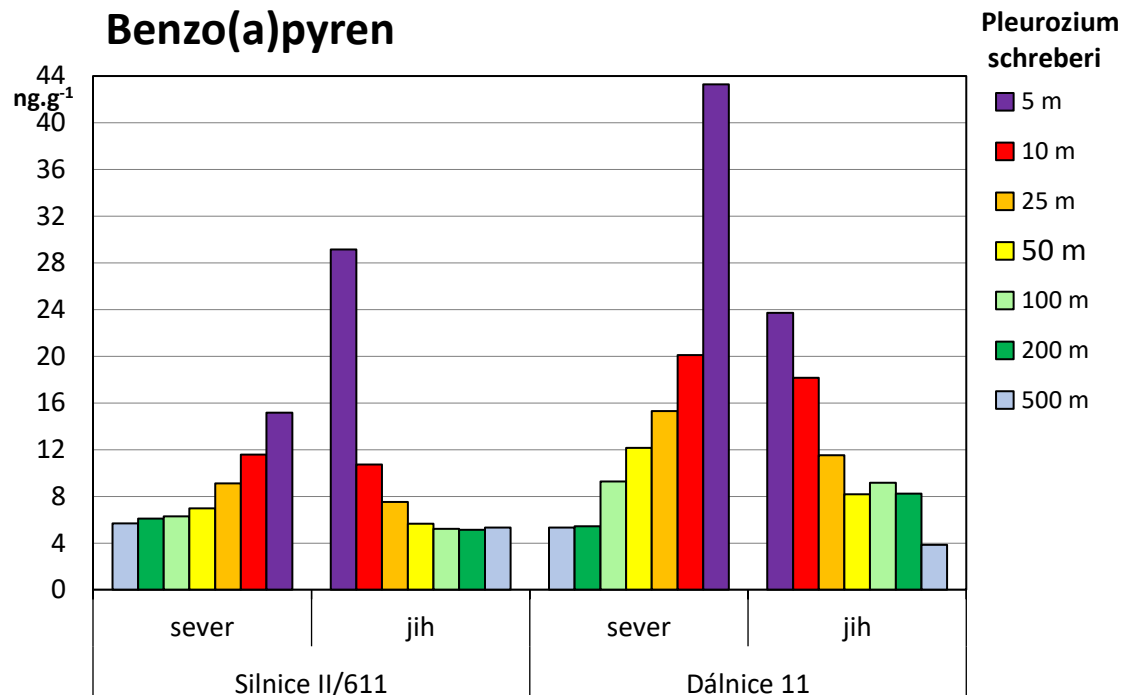
## Kobalt



**Co: hlavně z oděrů pneumatik a pohyblivých částí automobilů**



# PAU v mechu



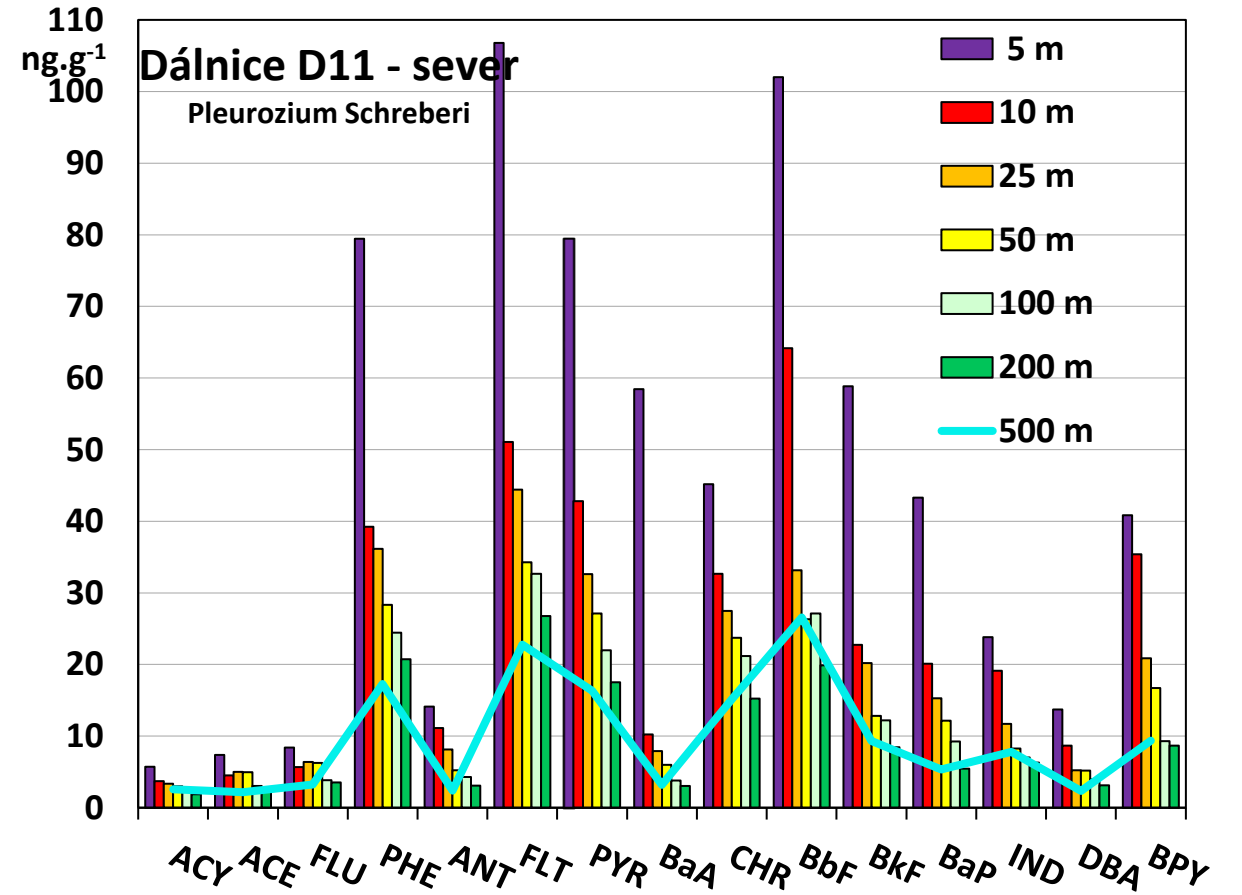
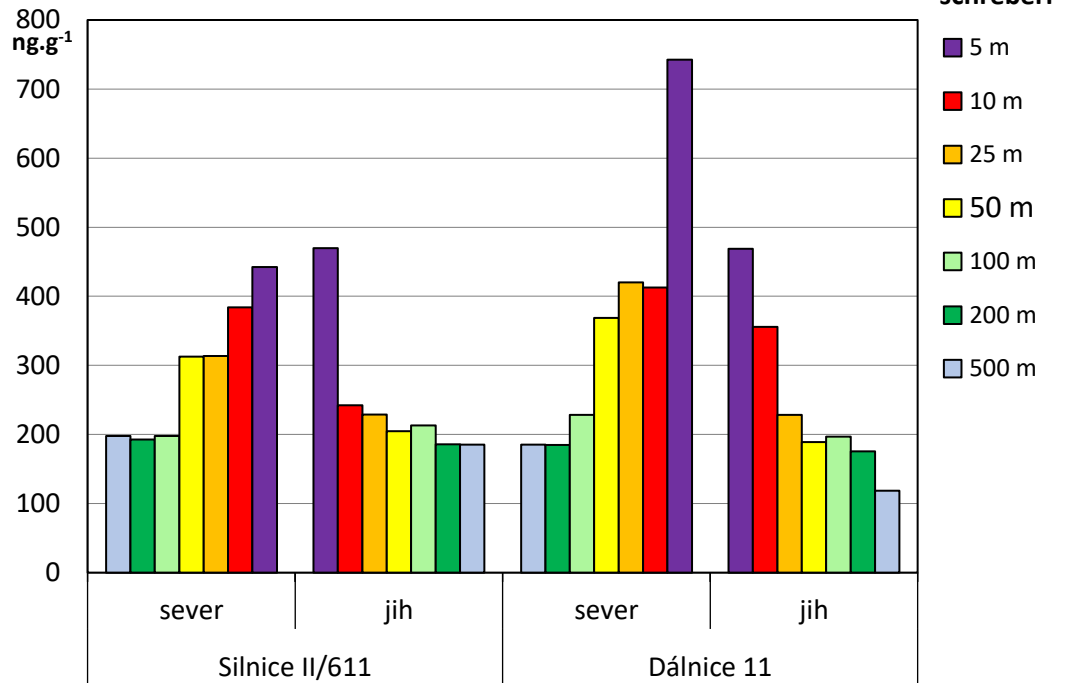
**BaP: 36–40 % v benzínech, 25-40 % živičné směsi, 5 % oleje, 1–2% otěr pneumatik**

**BghiP: 66 % na PM z EE a 22 % na PM z NEE**



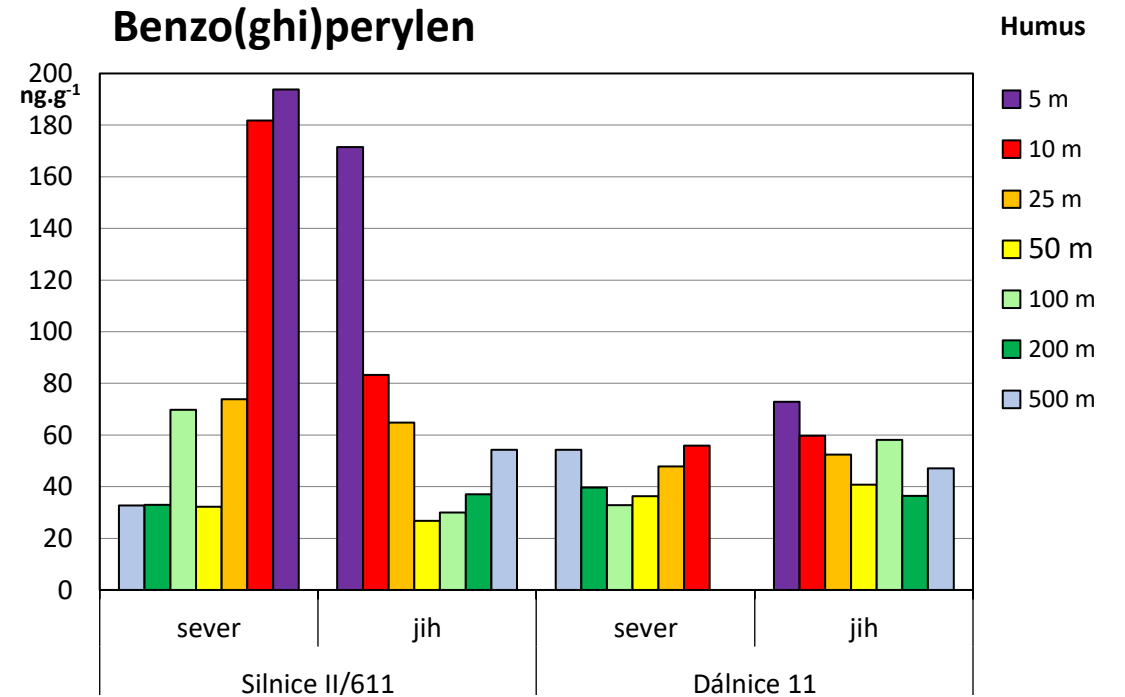
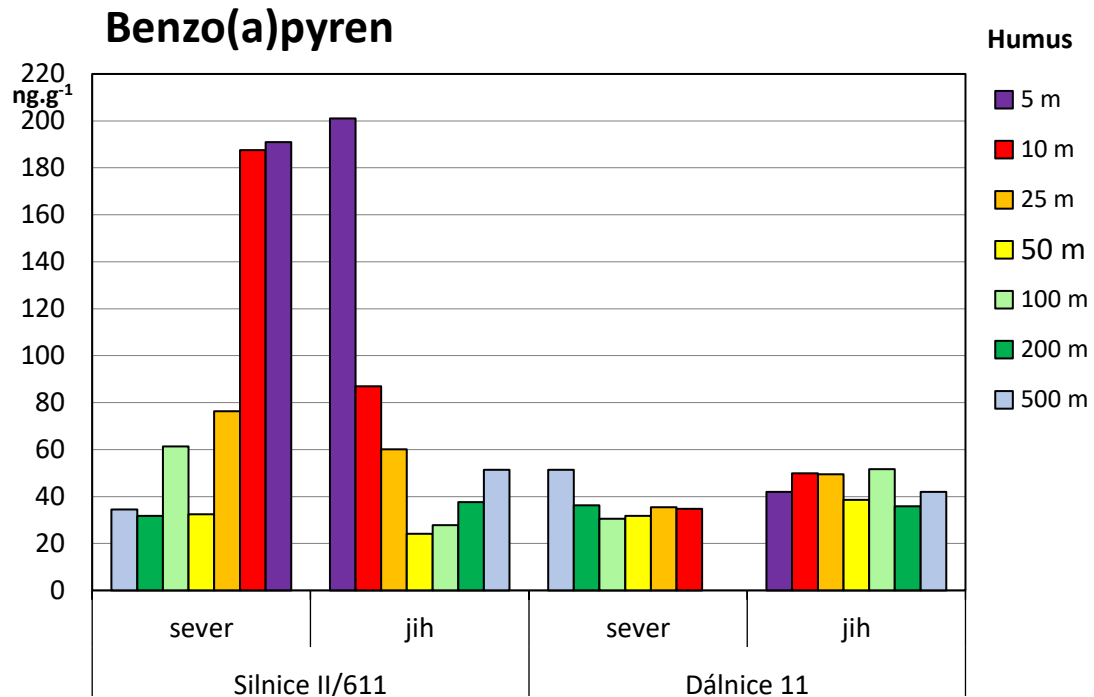
# PAU v mechu

## Suma 16-ti PAHs



# PAU v humusu

Efekt odstranění lesního humusu D11 na výsledek šetření



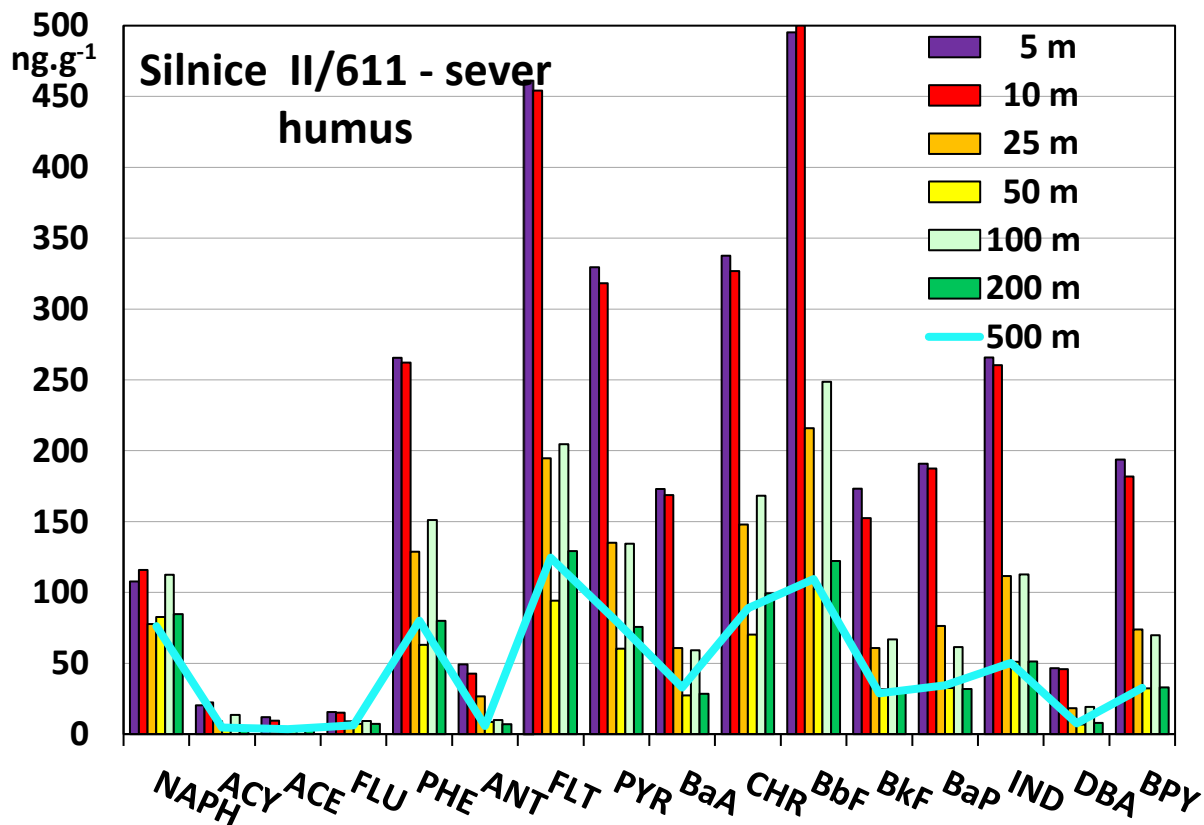
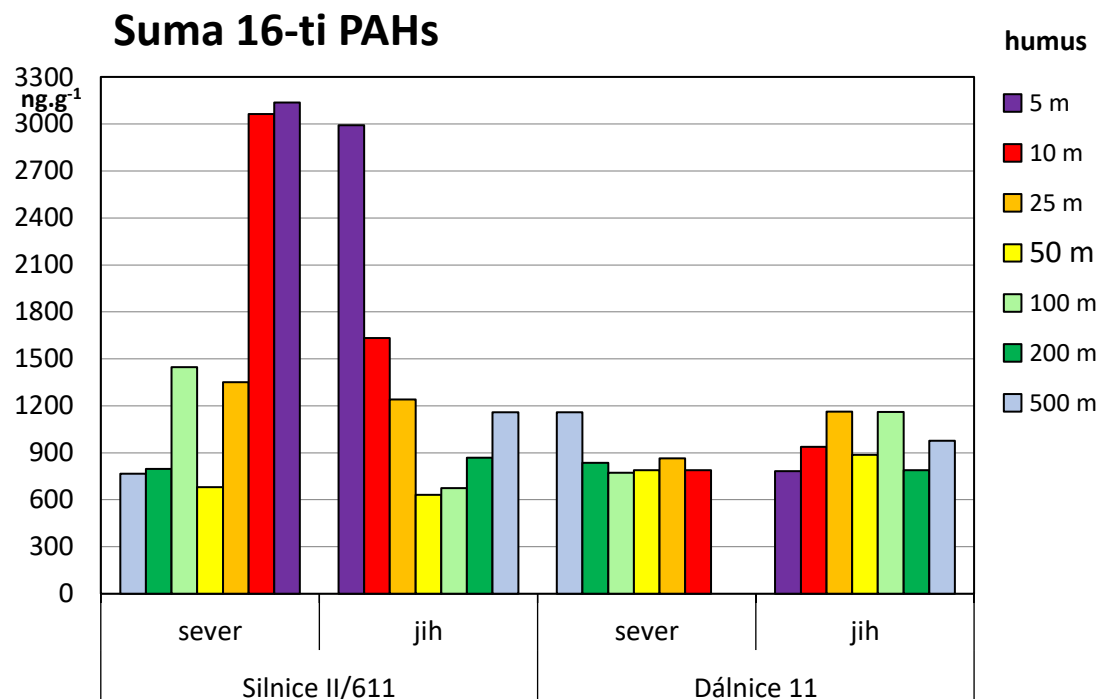
BaP: degradace houbou *Lasiodiplodia theobromae*  
*Wang et al. (2014)*

BghiP: hlavně v PM z asfaltu a EE, bioakumulace



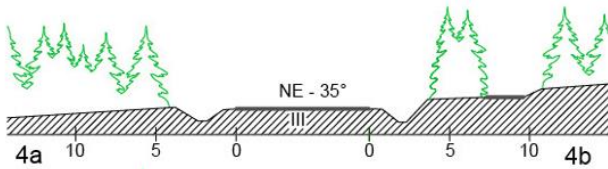
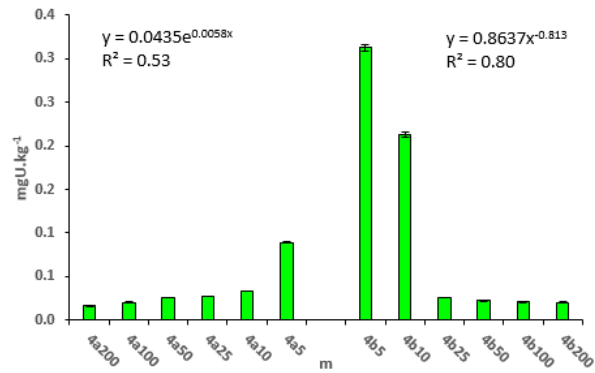
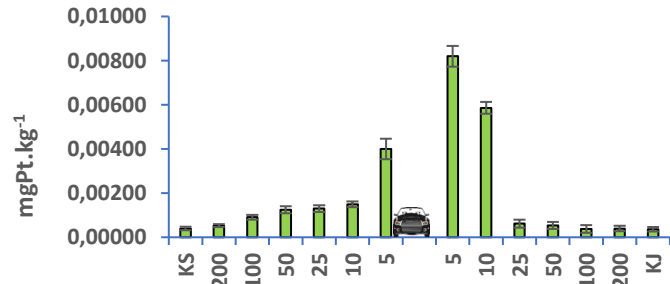


# PAU v humusu

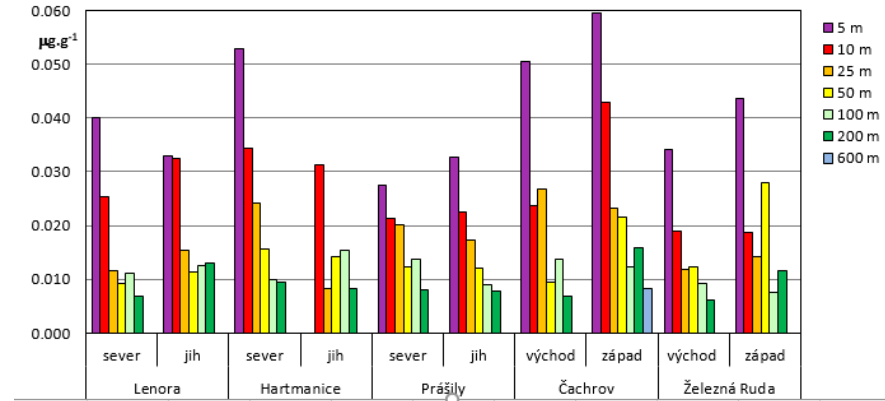


# Prvky v mechu a humusu u silnic Šumava 2020

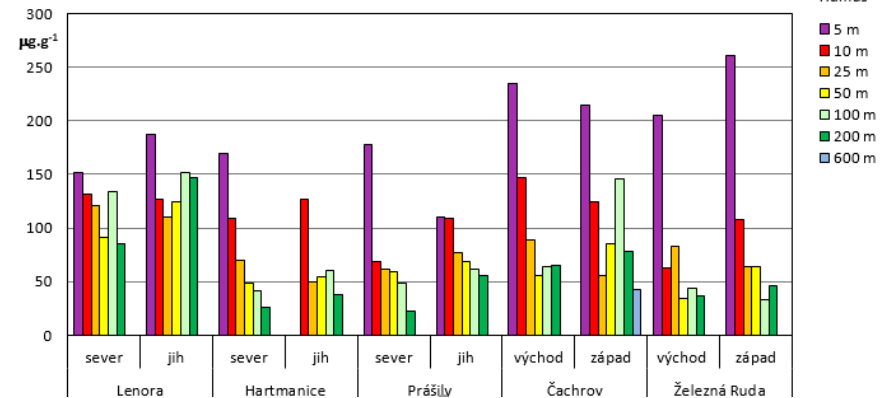
Okolí silnic i nižšího pořadí může být významně znečištěno z dopravy. Velký vliv mají stanoviční poměry



Platina



Barium



# Dosah znečištění u pozemních komunikací

## Prvky:

- Rychlý pokles do 10–25 m: Al, As, Be, Bi, Co, Cr, Fe, Ga, Th, U
- Pozvolnější pokles: přes 50 m: Ag, B, Ba, Cu, Sb, Pt, Zn
- Nepravidelný průběh nebo růst od silnice (mech): biogenní prvky N, K, (Cs), (S), prvky z okapu stromů K,(Cs), Mn

## POPs:

- Pokles 50–100 m: ACY, ACE, FLU, ANT, BbF  
PCB52, PCB28
- Pokles přes 100 m: PHE, FLT, PYR, BaP, DBA, BPY  
PCB138, PCB153, PCB180

## Poškození bioindikátorů ovlivní výsledek:

**Mechový indikátor: možné fyziologické poruchy v 5 (10)m, úpal, vysoušení prouděním vzduchu**

**Humusový indikátor: 10 (20)m odstranění nebo porušení humusové vrstvy při stavbě komunikací**



# Rizika znečištění u silnic pro kvalitu vody

1. Největší riziko: **odtok vod z vozovek a okolních zpevněných povrchů** – dálkový transport koktejl velkého množství polutantů (*Laxen et Harrison 1977*), **široké spektrum účinků na vod. organismy**
1. Menší riziko: odnos povrchových pokryvů půdy do vodotečí ze zóny do 100 m od komunikace během přívalových dešťů
2. Největší riziko **pro spodní (studniční vody) znečištění půdy (píscité) do 50 m od komunikace** (*Wang et al. 2018*): perkolace  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{N-NO}_3^-$ , polutanty na nízkomol. org. sloučeninách (fulváty, výluhy opadu biomasy...), revmatici, kardiaci
3. **Nejmenším rizikem plochy jehličnatých lesů** u silnic: pevná (ad)sorpce humusem, malý horizontální pohyb, málo smáčivý humusu odolný k odplavení (*př. Papierowska et al. 2020*)
4. Úniky provozních kapalin větší riziko než kontaminované půdy spadem emisí
5. Větším rizikem minerální znečištění půd desorpce  $\text{Na}^+$ ,  $\text{H}^+$  ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{HNO}_3$ ) než znečištění POPs (pevnější adsorpce, stabilita, malá rozpustnost....) nejpohyblivější PY, BaP a FLO (např. *Ličbinský et al. 2012*).



Děkuji za Vaši pozornost  
a spolupracovníkům za analýzy vzorků

