Informace k navrhování okružních křižovatek ve Francii a v Německu

Zatížení od těžkých nákladních vozidel při průjezdu okružní křižovatkou namáhá vozovku více než na přímém úseku, působením odstředivé síly. V příspěvku je popsáno, jak je tento problém řešen ve Francii a v Německu.

Úvod

V České republice se okružní křižovatky navrhují podle TP 134 Projektování okružních křižovatek na silnicích a místních komunikacích z roku 2017. V TP 170 pro navrhování vozovek pozemních komunikací jsou v článku 5.5.2 okružní křižovatky zařazeny mezi „extrémně namáhané konstrukce". Na konferenci Projektování pozemních komunikací 2025 byl zajímavý příspěvek [1] o poruchách na okružních křižovatkách a byly popsány některé možnosti, jak poruchám předcházet. Pro projektanty a techniky z oboru může být užitečné vědět, jak je problém s návrhem vozovek na okružních křižovatkách řešen ve francouzských předpisech.

V tomto textu jsou pro lepší porozumění problematice nejprve stručně uvedeny informace z francouzského článku [2]. V něm byly analyzovány rozdíly v působení těžkých nákladních vozidel na přímém úseku vozovky a na okružní křižovatce. Byl v něm také vyhodnocen vliv jednotlivých parametrů. Poté je popsáno, jak byly posuzovány vozovky na okružních křižovatkách ve francouzské normě pro navrhování vozovek NF P98-086 „Dimensionnement structurel des chaussées routières – Application aux chaussées neuves" ve verzi z roku 2011 a jsou posuzovány v novelizované verzi vydané v roce 2019. Stručně jak je zmíněno i to, jak je problematika řešena v německých předpisech.

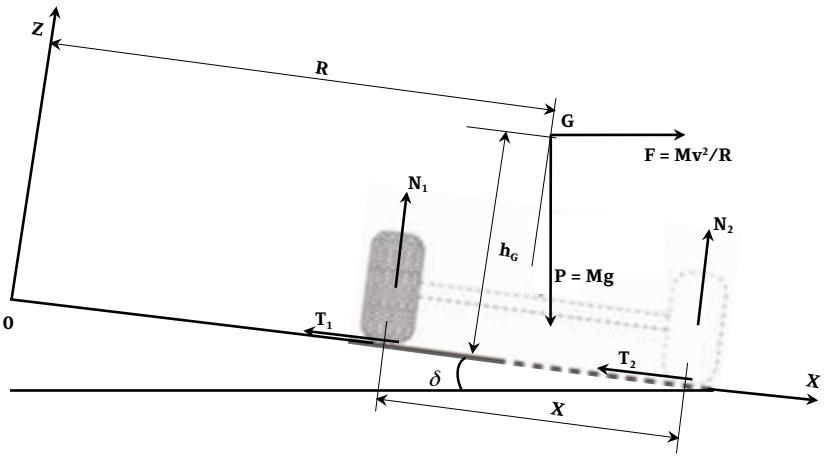
Zatížení vozovky okružní křižovatky projíždějícím těžkým nákladním vozidlem

Síly přenášené na vozovku nápravou vozidla se dvěma samostatnými koly, spolu se vzorcem pro odstředivou sílu, jsou zobrazeny na obrázku 1 převzatém z literatury [2]. Odstředivá síla ***F*** závisí na poloměru kružnicové dráhy vozidla ***R*** (m), rychlosti pohybu v (km/h) a hmotnosti pohybujícího se vozidla. Z rovnováhy sil ve směru kolmo k vozovce a v rovině povrchu vozovky, spolu s rovnováhou momentů k bodu uprostřed pravé zatěžovací plochy, je možné vypočítat síly reakce N_2, T_2 podle vzorců uvedených v literatuře [2].

Tyto síly byly v [2] stanoveny pro rychlosti 20 km/h, 25 km/h a 30 km/h a pro poloměry kružnicové dráhy vozidla 15 m, 20 m a 25 m. Výsledky z [2] jsou zde v tabulce 1. Hodnoty N_2, T_2 a K_a byly přímo převzaty z tabulky v literatuře [2]. Další hodnoty v tabulce 1 jsou z vlastního výpočtu. Pro nejnepříznivější případ v = 30 km a R = 15 m je působící síla N_2 téměř dvojnásobná než na přímém úseku vozovky. Poměr smykové a normálové síly K_a je pro nejnepříznivější případ téměř 0,5, zatímco pro poloměr R = 25 m a rychlost 20 km/hodinu je K_a jen 0,15.

Hodnoty N_1 a T_1, ilustrující velký rozdíl v zatížení kol na obou stranách kamionu, byly pisatelem dopočteny pro předpoklady, pro které mu vyšly hodnoty N_2 a T_2 stejně jako v [2]. Tam je uvedeno, že se při výpočtu použily tyto předpoklady: hmotnost vozidla 13 t, příčný sklon vozovky d = 0,025, x = 2,05 m, h_G = 2,0 m. V textu [2] nebylo uvedeno, jaké rozdělení zatížení na nápravy vozidla se uvažovalo. Uvedené hodnoty N_2, T_2 odpovídají předpokladu, že se uvažovalo vozidlo se dvěma stejně zatíženými nápravami.

Pro jiné vstupní předpoklady a jiné uspořádání náprav by se výsledky v tabulce lišily, ale celkový trend je jasný. Čím větší je hmotnost vozidla či jeho rychlost a zmenšuje se poloměr ***R***, tím je větší zatížení na styku kola s vozovkou na vnější straně okružní křižovatky. Zatížení kola na vnitřní straně může být v někte-



Obrázek 1: Schéma sil působících na nápravu při průjezdu vozidla okružní křižovatkou [2]

Tabulka 1: Síly působící na vozovku na okružní křižovatce pro různé poloměry a rychlosti pohybu vozidla [2]

Zatížení		v = 20 km/h			v = 25 km/h			v = 30 km/h		
	R (m)	25	20	15	25	20	15	25	20	15
	přímá									
N_2 (kN)	32,5	41,81	43,75	46,97	46,16	49,18	54,21	51,47	55,82	63,07
T_2 (kN)	0	6,23	7,87	10,89	10,1	13,17	18,94	15,69	20,96	31,13
K_a	–	0,15	0,18	0,23	0,22	0,27	0,35	0,30	0,38	0,49
N_1 (kN)	32,5	23,2	21,6	18,6	19,4	16,4	10,7	13,9	8,7	*-1,2*
T_1 (kN)	0	3,5	3,9	4,3	4,2	4,4	3,8	4,2	3,3	*-0,6*
Zvýš. N_2 (%)		28,7	34,6	44,5	42,0	51,3	66,8	58,4	71,8	94,1

rých případech velmi malé (pro v = 30 km/h a R = 15 m výpočtem vyšly záporné hodnoty sil N_1, T_1).

Skutečnost, že mezi zatíženími obou kol nápravy při průjezdu okružní křižovatkou je velký rozdíl, ukazují dobře také schémata a ilustrační fotografie na obrázku číslo 6 prezentace [1].

Rozdělení napětí a deformací ve vrstvách vozovky bylo v literatuře [2] stanoveno metodou konečných prvků francouzským programem CAST3M. Tento program umožňuje zadat na povrchu vozovky jak vertikální, tak horizontální konstantní zatížení na obdélníkové ploše. Ta reprezentuje dotykovou plochu pneumatiky. Tím je možné dobře vystihnout účinky vozidla na okružní křižovatce. V literatuře [2] jsou graficky a tabelárně prezentovány výsledky výpočtů pro řadu případů pro různé skladby vozovek.

Zde se omezíme jen na dva ilustrativní příklady z příspěvku [2]. Oba jsou pro extrémní případ okružní křižovatky s poloměrem kružnicové dráhy vozidla R = 15 m a rychlostí v = 30 km/h. Na obrázku 2 jsou podélná protažení na spodním líci asfaltových vrstev a stlačení na povrchu vozovky od zatížení samostatným kolem. Vozovka je určena pro hlavní komunikace (VRS – Voies du Réseau Structurant). Má 3 asfaltové vrstvy (s celkovou tloušťkou 220 mm) na nestmelené podkladní vrstvě. *(V katalogu vozovek v TP 170 by to odpovídalo skladbě na listu D0-A-1 pro TDZ II.)* Na okružní křižovatce je jak protažení na spodním líci asfaltových vrstev, tak stlačení na povrchu vozovky výrazně větší než na přímém úseku. Protažení na spodním líci asfaltových vrstev na okružní křižovatce bylo cca 2,5x větší.

Na obrázku 3 jsou deformace v příčném směru pro nápravu s dvojmontáží pro vozovku pro komunikace lokálního významu s nižším dopravním zatížením (VRNS – Voies du Réseau Non Structurant). *Francouzská návrhová náprava je zatížená silou 130 kN. Na obou koncích nápravy se předpokládají dvě kruhové zatěžovací plochy blízko sebe, obdobně jako v TP 170.*

Vozovka VRNS má dvě asfaltové vrstvy v celkové tloušťce 140 mm. *(V katalogu v TP 170 by to odpovídalo vozovce na listu D1-A-1 pro TDZ IV.)* Na spodním líci asfaltových vrstev byla na okružní křižovatce opět protažení větší. Průběh přetvoření v příčném směru se příliš nelišil od symetrického průběhu na vozovce v přímém směru. Také stlačení na povrchu vozovky bylo na okružní křižovatce větší. Lišil se však průběh stlačení v příčném směru. Pod vnějším kolem dvojmontáže bylo stlačení zřetelně větší, protože se na něm nejvíce projevilo působení odstředivé síly.

Pro cca dvojnásobné protažení na spodním líci asfaltových vrstev by výpočtem dle vzorce P.2.12 v TP 170 vyšel počet cyklů do porušení cca 50x menší. Vozovka navržená na návrhovou životnost 25 let by se tedy mohla porušit dříve než za jeden rok. Pro větší poloměry a menší rychlosti pohybu by byl rozdíl mezi životností okružní křižovatky a přímého úseku menší. Byl by ale stále velmi významný, protože ve vzorci P.2.12 v TP 170 je pátá mocnina (únavový parametr B = 5,0, stejně jako ve francouzské návrhové metodě). Zvýšení přetvoření asfaltových vrstev jen o 32 % by tedy vedlo na čtyřnásobné snížení vypočtených počtu cyklů do porušení. *(V některých návrhových metodách, jako americká nebo německá, se přepokládá při přepočtech různých zatížení na nápravy jen čtvrtá mocnina. Pro ni by bylo snížení počtu cyklů do porušení „jen" trojnásobné.)*

Na základě vyhodnocení různých skladeb vozovek byly v literatuře [2] zpracovány grafy a tabulky korekčních koeficientů A_{gir}, kterými se má na okružní křižovatce (giratoire) zvýšit uvažovaný počet zatížení návrhovou nápravou. Jejich velikost závisí na poloměru křižovatky, skladbě vozovky a rychlosti pohybu. Celkové dopravní zatížení, které by měl projektant uvažovat, se tak může zvýšit až cca 10x. Z hodnot korekčních koeficientů pak byly v článku vypracovány tabulky ekvivalentních skladeb asfaltových vozovek na okružních křižovatkách pro jednotlivé třídy dopravního zatížení, hodnoty ***R*** a ***v*** pro různé druhy materiálů na pláni (PF2 až PF4).

V literatuře [2] byly analyzovány jen vozovky s tloušťkou obrusné vrstvy 60 mm nebo 80 mm. Pravděpodobně to bylo proto, že tenké obrusné vrstvy jsou spíše náchylné k porušení na styku obrusné a ložní vrstvy vlivem vysokých smykových napětí. Ty na okružních křižovatkách působí. Tloušťka obrusné vrstvy 60 mm byla doporučována také ve starším podrobném francouzském dokumentu pro navrhování vozovek na okružních křižovatkách z roku 2000 [5]. V jiném francouzském dokumentu o semináři CEREMA z roku 2014 se konstatovalo, že při tloušťce obrusné vrstvy 40 mm na okružní křižovatce by mohly být problémy na styku obrusné a ložní vrstvy. Nicméně ve francouzské normě

silnice mosty

pro navrhování vozovek z roku 2019 není výslovný požadavek na větší tloušťku obrusné vrstvy vozovky než 40 mm na okružní křižovatce.

Ve francouzském katalogu vozovek ovšem konstrukce s obrusnou vrstvou tloušťky 60 mm existují, takže projektant je může použít, když to považuje za vhodné. Ve Francii se do obrusné vrstvy může, kromě jiných typů směsí, použít i asfaltový beton s označením BBSG, který se pokládá v tloušťkách 50–70 mm. V TP 170 jsou v katalogu asfaltové vozovky jen s tloušťkou obrusné vrstvy 40 mm, takže případná vozovka s tloušťkou obrusné vrstvy 60 mm by musela být v současné době navržena výpočtem návrhovou metodou a toto použití odsouhlaseno investorem, protože obvykle se počítá s maximální tloušťkou obrusné vrstvy 50 mm.

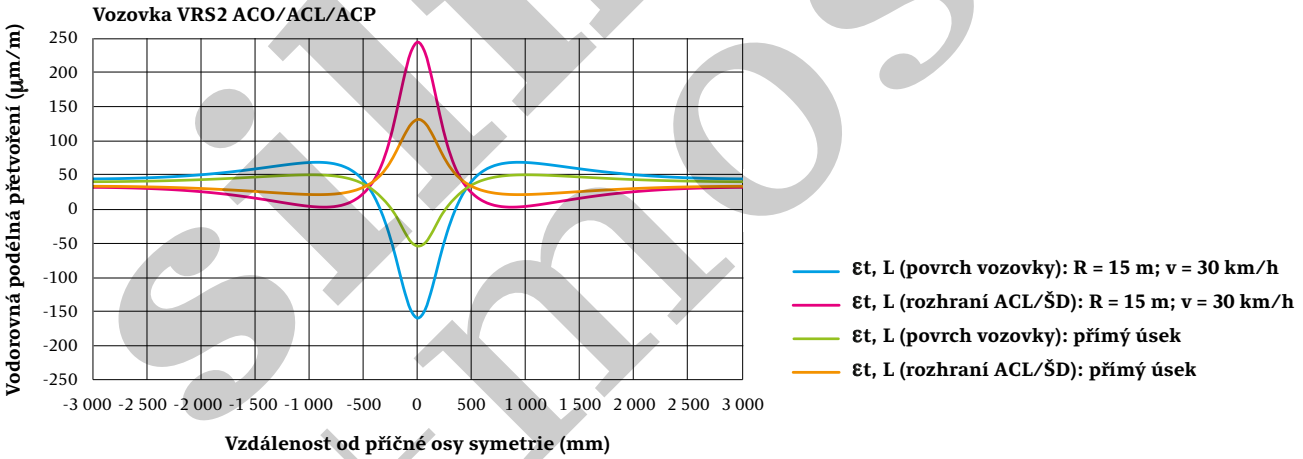
Přetvoření na spodním líci asfaltových vrstev vozovky, vypočtená v [2], by měla odpovídat přetvoření asfaltových vrstev vozovky s menší tloušťkou obrusné vrstvy, ale stejnou celkovou tloušťkou asfaltových vrstev. Různá tuhost jednotlivých asfaltových vrstev má sice vliv na velikost protažení na spodním líci, ale toto protažení hlavně ovlivňuje celková tloušťka asfaltových vrstev. Proto mají výsledky analýz v literatuře [2] platnost i pro vozovky v České republice.

Posuzování vozovek okružních křižovatek v předpisech ve Francii a v Německu

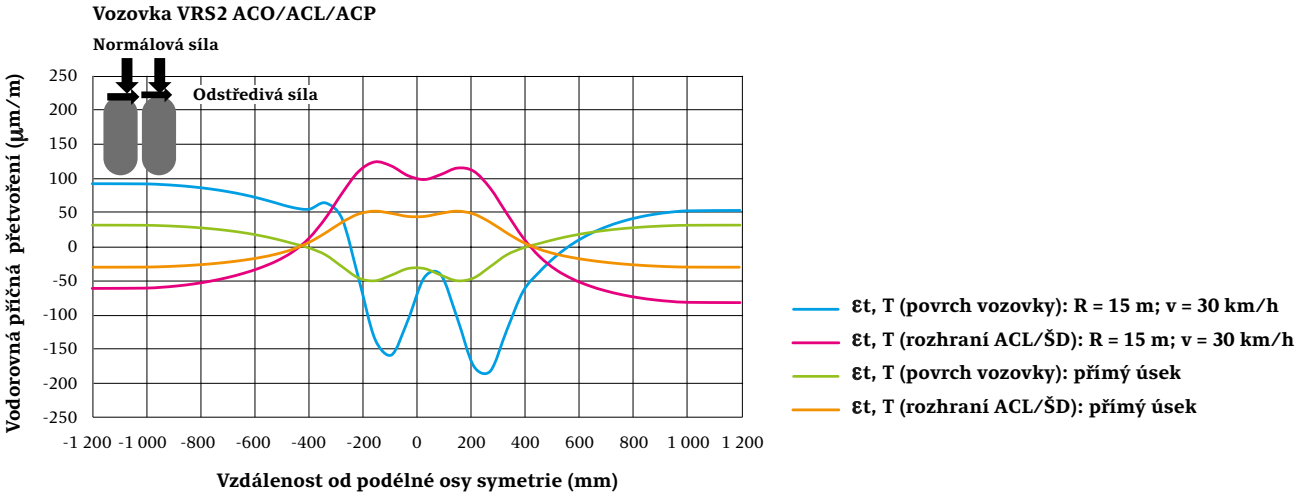
Ve francouzské normě pro navrhování asfaltových vozovek NF P98-086 z roku 2011 byla v příloze C tabulka středního koeficientu agresivity dopravy ***CAM*** („coefficient d'agressivité moyen du trafic). *(Střední koeficient agresivity CAM je koeficient, kterým se ve francouzské návrhové metodě násobí počet těžkých nákladních vozidel ze sčítání dopravy, aby se získal počet návrhových náprav. Má tedy obdobný význam jako koeficienty, kterými se v TP 170 převádí jednotlivé typy vozidel, při stanovení denní intenzity provozu TNV_0 a součinitel vytížení vozidel C_3.)*

Hodnoty ***CAM*** v normě z roku 2011 byly u městských komunikací s těžkými nákladními vozidly (voie principale a traffic lourd) CAM = 0,2 nebo 0,4, ale pro okružní křižovatky (giratoire) byl CAM = 1,0, tj. 2,5x nebo 5x vyšší. To vedlo k tomu, že celková tloušťka asfaltových vrstev na okružní křižovatce vycházela o několik centimetrů větší než na vozovce v přímém směru.

V roce 2019 byla ve Francii vydána nová verze NF P98-086. V ní je pro navrhování okružních křižovatek uveden odlišný postup než v předchozí verzi této normy. Koeficient ***CAM*** se uvažuje stejný jako pro komunikace ústící do okružní křižovatky. Ale počítá se s větším počtem těžkých vozidel a vypočtená skladba vozovky se poté ještě empiricky zesiluje.



Obrázek 2: Vodorovné podélné přetvoření pro nápravu se samostatnými koly [2]



Obrázek 3: Vodorovné příčné přetvoření u nápravy s dvojmontáží [2]

silnice + mosty

Návrhový počet vozidel u okružní křižovatky se má podle posledního odstavce v článku B.1.2.2 přílohy B normy z roku 2019 stanovit takto: „Návrhový počet vozidel se stanoví individuálně ze sčítání dopravy. Informativně je možné použít následující postup. Návrhovou hodnotou je součet počtu těžkých vozidel vjíždějících do křižovatky ze všech jednotlivých větví, dělený dvěma. Použije se, pokud je tato hodnota větší než počet vozidel vjíždějících do křižovatky z vozovky s největším dopravním zatížením. Je-li tato hodnota menší, použije se dopravní zatížení z nejvíce zatížené vozovky."

Pro empirické zesílení tloušťky vozovky okružních křižovatek jsou hodnoty v tabulce B.5 normy. U podkladních vrstev asfaltových je zesílení celkové tloušťky asfaltových vrstev o 15 %, u vrstvy stmelené hydraulickými pojivy je to 10 %. V textu článku B.2.4 se to odůvodňuje tím, že těžká nákladní vozidla působí na okružních křižovatkách větší namáhání vozovky.

Podle článku B.3.3.2.5 se má u okružních křižovatek při návrhu výpočtem uvažovat tzv. koeficient rizika k_r maximálně 5 %. *(Ve Francii se v příloze B.1 normy NF P98-086 rozlišuje podle velikosti dopravního zatížení a druhu konstrukce celkem 6 tříd rizika výpočtu. Pro dálnice se zatížením třídy S (2 000 až 5 000 těžkých vozidel denně v jednom směru) se uvažuje k_r = 1 %. Hodnota 2 % je pro třídu dopravního zatížení T0 (750 –2 000) a pro T1 (300–750) je to 5 %. Pro nejmenší dopravní zatížení třídy T5 je k_r = 30 %.)*

Při návrhu dle TP 170 se má pro komunikace I. třídy uvažovat s návrhovou úrovní porušení D0 (která předpokládá se na konci návrhového období porušení na méně než 1 % plochy). To by mělo být uvažováno i pro okružní křižovatku na této komunikaci. Pro ostatní komunikace se uvažuje s návrhovou úrovní porušení D1 (kde se předpokládá méně než 5 % porušené plochy). V určitých případech by mohl projektant pro okružní křižovatky na těchto komunikacích uvažovat pro bezpečnost též s návrhovou úrovní porušení D0.

Nový způsob výpočtu vozovek na okružních křižovatkách ve Francii dle normy NF P98-086 z roku 2019 je již zohledněn v nové verzi manuálu k programu Alize2® z roku 2020 (poslední verze programu je z roku 2024).

Stručně ještě zmíníme, jak se postupuje v Německu. V německém předpisu pro návrh vozovek podle katalogu RStO 12 se má dle článku 2.5.1 u okružních křižovatek uvažovat nejbližší vyšší třída dopravního zatížení, než je pro nejvíce zatíženou vozovku, která do křižovatky ústí. V anglickém překladu předpisu RStO 12 [4] je to uvedeno na straně 11 vlevo nahoře. („For roundabouts, the next higher load class should be used than that which applies to the most heavily trafficked road that enters the roundabout."). Zvýšení dopravního zatížení o jednu třídu vede v německém katalogu na zvýšení celkového dopravního zatížení 1,8krát až 3,3krát. *(Maximální dopravní zatížení pro jednotlivé třídy v milionech je 0,3 ; 1,0 ; 1,8 ; 3,2 ; 10 ; 32 ; 100).* To vede k zesílení tloušťky asfaltových vrstev o 20 mm nebo 40 mm.

V diskusích v České republice k této problematice se někdy argumentovalo tím, že nepříznivé působení průjezdu těžkých vozidel na okružní křižovatce je v TP 170 dostatečně zohledněno tím, že se u nich při návrhu uvažuje s opatrným koeficientem C_4 = 2,0, protože rychlost vozidla na okružní křižovatce je menší než 50 km/h. V článku [3] bylo na příkladech ukázáno, že při rychlosti vozidel jen o málo menší než 50 km/h, je předpoklad C_4 = 2,0 na straně bezpečnosti. Tato hodnota by odpovídala rychlostem cca 15–20 km/h. To platí pro běžné vozovky. U okružních křižovatek je i při rychlosti 30 km/h vlivem odstředivé síly svislé zatížení na vnější kolo náprav zřetelně vyšší než za normálních podmínek. To způsobí vyšší protažení na spodním líci asfaltových vrstev, které má pak za následek výrazné snížení teoretického počtu přejezdů do porušení vozovky. V praxi se to může projevit kratší životnosti vozovky, z níž může být neoprávněně viněn dodavatel stavby, případně projektant.

Závěr

Analýza problematiky namáhání vozovek v [2] ilustruje, že přesné posouzení účinků přejezdů těžkých nákladních vozidel na okružních křižovatkách je složité. Výstižněji to lze analyzovat metodou konečných prvků (MKP). I přes velkou rychlost dnešních počítačů a uživatelsky přívětivým softwarem, MKP stále zůstává vhodná hlavně pro výzkumné práce, nikoliv pro praktické navrhování vozovek. V praxi je třeba v naprosté většině případů provést návrh rychle, bez podrobných analýz.

Je proto možné postupovat obdobně jako ve francouzské normě pro navrhování vozovek z roku 2019 a vozovky, navržené standardním způsobem návrhovou metodou dle TP 170, poté empiricky zesílit.

Při návrhu jen dle katalogu by bylo možné použít stejný postup jako v německém předpisu pro návrh vozovek podle katalogu RStO 12, tj. uvažovat o třídu vyšší dopravní zatížení. To by v některých případech zvýšilo návrhové dopravní zatížení více než dvojnásobně.

Ing. Jiří Fiedler

Literatura

[1] *Beck M. Navrhování a poruchy na okružních křižovatkách, Konference Projektování pozemních komunikací 2025. Dostupné na: svsweb.cz/konference-projektovani/2025/prezentace/data/13-beck.pdf*

[2] *Ambassa Z., Allou F., Petit Ch., et al. Évaluation de l'agressivité du trafic sur des chaussées bitumineuses en carrefour giratoire, BLPC 2013, n°280–281, pp. 171–188 Available at: www.ifsttar.fr/collections/BLPCpdfs/blpc_280-281_171-188.pdf*

[3] *Fiedler J. Vliv rychlosti pohybu vozidel při navrhování vozovek. Konference Asfaltové vozovky 2023. České Budějovice 28.–29. listopadu 2023*

[4] *Guidelines for the standardisation of pavement structures of traffic areas. Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen RStO 12, 2012. Available at: www.fgsv-verlag.de/pub/media/pdf/499_E_PDF.v.pdf*

[5] *Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement. Conception structurelle d'un giratoire en milieu urbain, CERTU, 2000. Available at: https://doc.cerema.fr/Default/doc/SYRACUSE/14021/conception-structurelle-d-un-giratoire-en-milieu-urbain?_lg=fr-FR*

silnice mosty