



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ

INSTITUTE OF ROAD STRUCTURES

VÝZKUM V OBLASTI KONSTRUKČNÍCH PRVKŮ
A DIMENZOVÁNÍ CEMENTOBETONOVÝCH
KRYTŮ

RESEARCH IN THE FIELD OF CONSTRUCTION ELEMENTS AND DESIGN
OF CONCRETE PAVEMENTS

TEZE DISERTAČNÍ PRÁCE

ANNOTATION OF DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Jiří Grošek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Dr. Ing. MICHAL VARAUS

BRNO 2017

KLÍČOVÁ SLOVA

Cementobetonový kryt, kluzný trn, nedestruktivní metoda, metoda konečných prvků, tenzometr, tahové napětí, poměrná deformace.

KEY WORDS

Concrete pavement, dowel bar, nondestructive method, finite element method, strain gauge, tensile stress, relative deformation.

MÍSTO ULOŽENÍ PRÁCE

Ústav pozemních komunikací a Knihovnické a informační centrum FAST VUT v Brně.

ABSTRACT

Předkládaná disertační práce je zaměřena výzkum v oblasti kluzných trnů a dimenzování cementobetonových krytů pomocí metody konečných prvků. Teoretická část popisuje historii a současný stav techniky ve světě a v České republice. Praktická část práce obsahuje popis návrhových metod pro posouzení, diagnostiku cementobetonových krytů rázovým zařízením FWD a popis laboratorních zatěžovacích zkoušek na trámci s vloženým kluzným trnem. Výsledky měření a modelování jsou ověřeny v reálných provozních podmínkách na testovacích úsecích. Na základě výsledků disertační práce byly navrženy a po jejich následné revizi schváleny změny normy (ČSN 736123-1) týkající se polohy kluzných trnů. Dále byly vypracovány metodické pokyny pro měření polohy kluzných trnů a kotev a diagnostiku rázovým zařízením FWD. Závěr práce shrnuje a vyzdvihuje výsledky disertační práce.

ABSTRAKT

The presented dissertation is focused on research in the field of dowels and design of concrete pavements using the finite element method. The theory part describes the history and the currently used techniques in the world and in the Czech Republic. The practice part of the dissertation contains a description of design methods, diagnostics of concrete pavements by using FWD and a description of laboratory tests on beams with inserted dowels. The results of measurements and modelling are verified on real operating conditions on testing fields. Based on the dissertation results, the amendment of the Czech standard ČSN 73 6123-1 regarding the position of dowels were proposed and approved. In addition, methodological guidelines of the Ministry of Transport regarding the measurements of the dowels and tie bars position and diagnostic by FWD was approved. The conclusion of the work summarizes and emphasizes the results of the dissertation.

OBSAH:

1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY	4
2 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE.....	4
3 SOUČASNÝ STAV POZNATKŮ	5
3.1 REŠERŠE LITERATURY	5
3.1.1 <i>Kluzné trny</i>	5
3.1.2 <i>Dimenzování CB krytů</i>	7
3.2 REŠERŠE PLATNÝCH PŘEDPISŮ	8
3.2.1 <i>Česká republika</i>	8
3.2.2 <i>Slovensko</i>	8
3.2.3 <i>USA</i>	9
3.2.4 <i>Francie</i>	9
3.2.5 <i>Belgie</i>	10
3.2.6 <i>Polsko</i>	10
3.2.7 <i>Německo</i>	10
3.2.8 <i>Rakousko</i>	10
3.3 KRITICKÉ ZHODNOCENÍ SOUČASNÉHO STAVU.....	11
4 METODIKA ŘEŠENÍ.....	12
4.1 TEORETICKÉ METODY	12
4.2 EXPERIMENTÁLNÍ METODY.....	12
5 VÝSLEDKY MODELOVÁNÍ A MĚŘENÍ	12
5.1 MODELOVÁNÍ METODOU KONEČNÝCH PRVKŮ	12
5.2 LABORATORNÍ MĚŘENÍ.....	17
5.2.1 <i>Trámce s vloženým kluzným trnem</i>	17
5.2.2 <i>Vlastnosti povlaků kluzných trnů</i>	21
5.3 MĚŘENÍ IN SITU	23
5.3.1 <i>Měření průhybů rázovým zařízením FWD na tuhých vozovkách</i>	23
5.3.2 <i>Měření deformací cementobetonového krytu pomocí tenzometrů</i>	26
6 ZÁVĚR A SHRNUÍ.....	28
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	33
ŽIVOTOPIS.....	35

1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY

Cementobetonové kryty vozovek jsou navrhovány pro silně zatížené vozovky pozemních komunikací a letišť. S jejich užíváním je spojena celá řada dílčích témat, které je nutno řešit tak, aby tyto kryty dobře plnily svoji funkci po celé návrhové období. Jedním z nich je problematika kluzných trnů umístěných v příčných spárách krytu. Modelování zatížení, vznikajících při přejezdu těžkých nákladních vozidel metodou konečných prvků, poskytuje cenné informace o napjatostním stavu CB desek. Výsledky modelování lze ověřit praktickým měřením za použití tenzometrických snímačů vhodně umístěných do konstrukce vozovky nebo laboratorními zkouškami.

Disertační práce se zaměřuje na řešení výše uvedených témat při použití kluzných trnů umístěných v příčných spárách nevyztužených cementobetonových krytů a stanovení vlivu různých parametrů výztužných prvků na životnost konstrukce. Studie vlivu kvality kluzných trnů, chování v oblasti příčných spár a vývoj nových materiálů umožní nalézt vhodná alternativní řešení za účelem prodloužení provozní způsobilosti a životnosti dopravní infrastruktury na síti dálničních konstrukcí a letištních drahách a plochách.

2 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Hlavním cílem disertační práce je zavedení nových poznatků z technologie výstavby, týkajících se použití alternativních materiálů a rozměrů kluzných trnů, navrhování cementobetonových krytů metodou konečných prvků do podmínek České republiky a možnost využití poznatků v běžné praxi.

Tohoto cíle bude dosaženo následujícími dílčími postupy:

- Sumarizace informací o současném stavu technologie a vlastností kluzných trnů, dimenzování cementobetonových krytů a provedení rešerše odborné literatury týkající se dané problematiky.
- Modelování a dimenzování cementobetonových krytů pomocí metody konečných prvků.
- Optimalizace návrhu nových typů kluzných trnů, popis vlastností a vhodných nenormových zkoušek a dopad použití na životnost konstrukce.
- Využití rázového zařízení FWD pro diagnostiku cementobetonových krytů a využití výsledků pro posouzení konstrukce.
- Formulace návrhu změn normy (ČSN 736123-1) týkající se předepsané polohy, rozměrů a alternativních materiálů kluzných trnů.
- Definování závěrů a doporučení pro další výzkum a využití výsledků v praxi.

Cíle práce byly voleny v souladu se zadáním dizertační práce pro objasnění sledované problematiky. Výzkum a vývoj v této oblasti přispěje k pokroku v dimenzování a realizaci cementobetonových krytů.

3 SOUČASNÝ STAV POZNATKŮ

Technologie výstavby cementobetonových vozovek se datuje od 30. let 20. století, kdy se provádělo betonování CB krytů do pevných bočnic. Od 60. let 20. století byly pevné bočnice nahrazeny kluznými a v tomto období dochází významnému rozvoji výstavby CB krytů. Příčné a podélné spáry však nebyly kotveny výztužnými prvky (kluzné trny, kotvy) a dochází ke vzniku poruch typických pro tuto technologii – vertikálních pohybů na spárách a následný vznik schůdků. Od 90. let 20. století se začíná používat technologie kotvení spár a dvouvrstvého CB krytu. Technologie výstavby nevyztužených cementobetonových krytů s kluznými trny v příčných spárách se v ČR používá od roku 1994. Existuje celá řada článků a zpráv výzkumných projektů k tématu uplatnění kluzných trnů a kotev a dimenzování CB krytů. Níže jsou uvedeny pouze vybrané a nejaktuálnější z nich.

3.1 REŠERŠE LITERATURY

Dimenzování vozovek s cementobetonovým krytem prošlo velmi rychlým vývojem. Současně došlo k rozvoji nových technologických postupů a materiálů, které lze při výstavbě CB krytu použít. Stanovení napjatostního stavu CB krytu pomocí empirických postupů neposkytuje dostatečně přesné výsledky. Vzhledem k rozvoji výpočetní techniky a programů, pracujících na principu metody konečných prvků, je možné detailnější posouzení chování konstrukcí vozovek, které jsou vystaveny dynamickému namáhání od těžké nákladní dopravy. Modelování a studie zahraničních expertů na danou problematiku současně upozorňují na vznik tahových napětí v betonu v okolí kluzných trnů na čele příčné spáry.

3.1.1 Kluzné trny

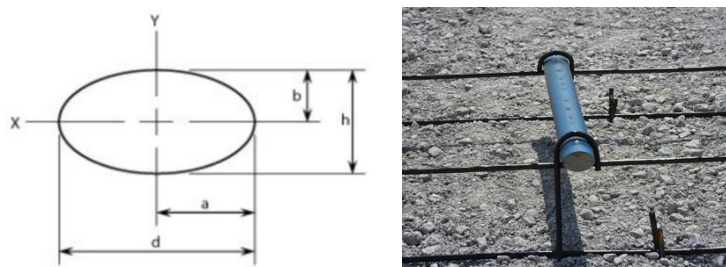
V Evropě se běžně vyrábějí kluzné trny a kotvy ocelové, které se opatřují ochranným povlakem. Vychází se z požadavků EN 13877-1 a EN 13877-3. V USA a dalších zemích se používají také jiné alternativy materiálů a jiné než kruhové průřezy kluzných trnů. Mezi tyto alternativy patří:

- kompozitní materiály bez povlaků (Fiber reinforced polymer FRP a Glass fiber reinforced polymer GFRP),
- ušlechtilé oceli bez povlaků (nerezová ocel apod.)
- ocelové trny, které mají povlak z epoxidových a jiných materiálů.

V zahraniční literatuře se setkáváme s výzkumem možných alternativních materiálů kluzných trnů. Rozsáhlou výzkumnou zprávu zpracovali Roger M. Larson a Kurt D. Smith. Zpráva je zaměřena na srovnání měření spolupůsobení rázovým zařízením FWD na pokusných úsecích s příčnými spárami osazenými různými typy kluzných trnů kruhového průřezu. V podstatě se jedná o zprávu shrnující dosavadní zkušenosti s touto problematikou. Některá měření spolupůsobení byla provedena na starších typech konstrukcí (přibližně 15-30 let) a byla také hodnocena antikorozní ochrana oceli z epoxidových povlaků. [1]

Významnou výzkumnou zprávou je také publikace shrnující výsledky testování eliptických průřezů kluzných trnů, kterou vydal Center for Transportation Research and Education (Iowa, USA). Podle studie by eliptické kluzné trny měly snižovat tahová napětí v oblasti kluzných trnů. [2]

Tento typ byl nainstalován do příčných spár pokusných úseků a dlouhodobě sledován především přenos zatížení (Load Transfer Efficiency - LTE) rázovým zařízením FWD, rozevírání spár a index nerovnosti IRI při teplotním namáhání a také bylo provedeno modelování konstrukce pomocí MKP (obr. 1).



Obr. 1: Eliptický průřez kluzného trnu (vlevo), umístění v příčné spáře na podkladcích (vpravo)

V České republice je používán výhradně jeden typ kluzných trnů s průměrem 25 mm a délkou 500 mm. Tento rozměr trnů se používá jak pro konstrukce CB desek při výstavbě dálničních komunikací, kde jsou desky tloušťek 200-300 mm, tak i pro výstavbu letištních ploch, jejichž tloušťka krytu dosahuje i 400 mm. [3]

V následující tabulce 1 jsou pro porovnání uvedeny požadované rozměry kluzných trnů a horizontální vzdálenost (HV) jejich ukládání v příčné spáře ve vybraných zemích.

Tab. 1 Požadované rozměry a horizontální vzdálenost kluzných trnů [3]

Země	Průměr KT [mm]	Délka KT [mm]	HV KT [mm]	Tloušťka krytu [mm]
ČR	25	500	250	-
Německo	25	500	250	-
Rakousko	25	500	250	-
USA	25	450	300	<200
	32	450		200-250
	38	450		>250
Francie	20	400	300	130-150
	25	450	300	160-200
	30	450	300	210-280
	40	500	400	290-400
	45	550	450	410-500
Polsko	32	520	300-500	260-300
	40	640		300-400
	45	800		>400
Belgie	25	600	300	-
Slovensko	25	500	250-500	≤ 200
	25			≤ 250
	30			> 250

3.1.2 Dimenzování CB krytů

Stávající zahraniční a české metody, používané k výpočtu napjatosti a přetvoření v konstrukcích CB vozovek, mají společný základ ve dvou klasických teoriích vyvinutých Westergaardem a Burmisterem. V ČR se v současné době navrhování CB vozovek provádí podle platných technických podmínek Ministerstva dopravy ČR TP170 „Navrhování vozovek pozemních komunikací“ (dále jen TP170). Návrh tuhé vozovky uživatel buďto provede prostým výběrem z Katalogu vozovek (část A TP170), nebo je nutné vozovku navrhnout a posoudit podle části B TP170 – návrhová metoda. Tato metoda je založena na teorii Kirchhoffovy desky uložené na Winklerově podkladu. Ta ovšem nemusí, vzhledem k mnoha zjednodušením, poskytnout vždy správný výsledek. V některých případech může být tedy výpočtem navržená konstrukce vozovky značně předimenzována a v horším případě pak naopak významně poddimenzována. [4]

V současnosti se tedy uplatňuje navrhování vozovek s CB krytem na základě předpisů, které jsou založeny na teorii ideálně pružného poloprostoru, který je pro výpočet reprezentován modulem pružnosti každé jednotlivé vrstvy, Poissonovým číslem a tloušťkami vrstev. Vychází se přitom z předpokladu, že hmota, která vyplňuje poloprostor, je ideálně pružná, homogenní a izotropní, vrstvy jsou nekonečné v rovině a závislost mezi napětím a přetvořením je lineární, platí tedy Hookův zákon. Mezi běžně používanými programy pro navrhování patří programy Laymed a LayEps a mezi zahraniční např. Alize, Backlay, RoSy Design, Elmod aj. Tento základní předpoklad však nelze aplikovat pro navrhování vozovek s CB krytem, kdy je kritickým místem návrhu z hlediska únavy příčná hrana.

V současnosti tedy neexistují v ČR ani ve světě komplexní programy pro hodnocení únosnosti, výpočet zbytkové životnosti a návrh zesílení vozovky s CB krytem.

Proces návrhu a posouzení nových konstrukcí je možný pouze na základě speciálních programů, převážně pracujících s metodou konečných prvků (ANSYS, SCIA NEXIS apod.).

V zahraničí, především v USA a Francii však existují platné předpisy pro dimenzování tuhých vozovek vycházející z empirických poznatků, praktických zkoušek a sledování pokusných úseků. V současnosti je úkolem provázání empirických poznatků z předpisů, teoretických modelování a praktických zkoušek do uceleného postupu racionálního navrhování konstrukcí vozovek. V některých evropských zemích se používá pro návrh konstrukce tzv. katalogových listů. Z pohledu technického a ekonomického návrhu však toto řešení není vhodné, protože nemohou zohlednit lokální specifika stavby. Katalogy je také navíc nutné neustále aktualizovat vzhledem k novým technologiím a dimenzačním postupům.

3.2 REŠERŠE PLATNÝCH PŘEDPISŮ

V oblasti kluzných trnů a kotev existuje celá řada technických předpisů a norem, z nichž některé se přímo zaměřují na problematiku kluzných trnů a kotev a dimenzování CB krytů. Níže je uveden přehled těch nejdůležitějších, spolu s krátkým popisem jejich obsahu.

3.2.1 Česká republika

Stávající požadavky na kluzné trny upravují v ČR normy ČSN EN 13 877-1 a ČSN EN 13 877-3 a ČSN 73 6123-1.

ČSN EN 13 877-1 definuje:

- kluzný trn (dowel) - kluzný trn z hladké oceli, opatřený povlakem, vloženým v místě spár sousedících desek cementobetonového krytu ke zlepšení přenosu zatížení a zabránění rozdílného poklesu desek. Kluzné trny musí splňovat požadavky EN 13877-3 [5, 8].

Národní příloha ČSN EN 13877-2: 2006 definuje: kluzné trny, používané pro cementobetonové kryty CB I podle musí mít minimální průměr 25 mm a minimální délku 500 mm. Celá délka trnu musí být pokryta tenkým filmem z plastu minimální tloušťky 0,3 mm, který musí zaručit ochranu proti korozi a zároveň umožnit prokluz trnu v betonu. Povlak musí splňovat požadavky zvláštních předpisů (TP 136). Pro CB II může být použit i jiný povlak. [6]

Dle **ČSN EN 13877-3** musí být zajištěna trvanlivost ochranným povlakem provedeným v továrně nebo na staveništi podle národních předpisů, platných v místě použití. Opatření proti korozi má splňovat požadavky národních norem nebo předpisů v místě užití. Pro CB I musí být ochranný povlak na trny nanesen továrensky. Žádné zvláštní měření odolnosti proti korozi trnu opatřeného plastovým povlakem se nepožaduje. Výrobce však musí doložit měření tloušťky plastového povlaku trnu, stejně jako pevnost trnu v tahu, v četnosti 1 na 2 500 trnů. [7]

ČSN 73 6123-1 v článku 6.8 definuje 3 způsoby vkládání Kluzných trnů a kotev.

Pro vkládání kluzných trnů do příčných spár se používá automatizovaný způsob vibračního zatlačování kluzných trnů do ztuhlého čerstvého betonu spodní vrstvy krytu pomocí přídavného účelového stroje. Kotvicí prvky v podélné smršťovací spáře lze též vkládat do ztuhlého čerstvého betonu spodní vrstvy pomocí ručního vibračního přístroje. Kluzné trny a kotvy lze též osazovat v místech budoucích spár před pokládkou čerstvého betonu v koších s pevnou fixací k podkladu.

TP 170 platí pro navrhování vozovek pozemních komunikací a konstrukcí dopravních a jiných ploch, nemotoristických komunikací a zpevněných krajnic zatěžovaných provozem kolových vozidel a klimatickými účinky. [4]

3.2.2 Slovensko

Stávající požadavky na kluzné trny upravuje v SR norma **STN EN 73 6123**. [9]

Technické podmienky - Navrhovanie cementobetónových vozoviek na cestných komunikáciach - specifikují postup při navrhování, výpočtech a posuzování konstrukcí vozovek s cementobetonovým krytem a vozovek, jejichž

konstrukce je možné z hlediska mechaniky posuzovat jako tuhé a jsou určeny pro silniční komunikace a dopravní plochy Stanovují nové požadavky na kluzné trny (rozměry a umístění) a možnost navrhování vozovek metodou konečných prvků v programu Nexis. [10]

3.2.3 USA

Předpis **Guidelines for Dowel Alignment in Concrete Pavements** - výstup projektu NCHRP 10-69 zaměřeného na ověření významu správného osazení kluzných trnů, resp. na důsledky jejich chybného uložení, na základě měření na více než 35 000 trnech v 17 státech, sérii laboratorních zkoušek a modelování metodou konečných prvků. Průvodce se orientuje na následující témata: měření odchylek v uložení trnů; kvantifikace vlivů odchylek na funkci vozovky; určení kritických hodnot odchylek, které mohou zhoršit funkci vozovky; preventivní opatření proti vzniku odchylek; opatření pro zmírnění vlivu odchylek v praxi. [11]

Fiber Reinforced Polymer Dowel Bar Evaluation - zpráva obsahuje srovnávací hodnocení polymerových kluzných trnů (GFRP) s ocelovými trny s epoxidovým povlakem. Důvodem experimentů je skutečnost, že u ocelových trnů s povlakem je pozorována koroze již po 15 až 20 letech, zatímco žádoucí trvanlivost je cca 50 let. Proto u novostaveb ve státě Washington se používají kluzné trny z různých druhů nerezových ocelí (trny z GFRP byly zatím povoleny jen pro experimentální úseky). [12]

Dowel Bar Alignment and Location for Placement by Mechanical Dowel Bar Insertion - zpráva shrnuje tolerance v uložení kluzných trnů podle amerických předpisů NCC 2011, NCPTC 2011, NCHRP 2009, FHWA 2007, stanovuje doporučení týkajících se odchylek a jejich významu na životnost CB krytu. [13]

AASHTO Guide 1993: předpis pro posouzení návrhu tuhých a netuhých vozovek podle vzorců odvozených na základě experimentálních zkoušek realizovaných na dvou pokusných úsecích v USA. **Dodatek č. II AASHTO Guide 1998** obsahuje rozšíření a zpřesnění vstupů dimenzačního procesu. [14,15]

V částech 1.3.1 a 1.3.2 jsou i základní informace o kluzných trnech a kotvách, v částech 4.2.6.1 a 4.2.6.2 pak o pokládce těchto výztužných prvků.

3.2.4 Francie

Ve Francii jsou požadované parametry výztužných prvků v CB krytu vozovky v souladu s normou **NF EN 13877-3** - vyplývají zde doporučení pro návrh kluzných trnů do příčných spár. [16]

NFP 98-086 francouzská norma pro dimenzování vozovek vycházející z technického průvodce pro dimenzování nových konstrukcí z manuálu SCETAROUTE z roku 1994 a z katalogu tuhých vozovek LCPC SETRA z roku 1998. Norma pro dimenzování shrnuje francouzské zkušenosti v oblasti navrhování a posuzování všech typů konstrukcí vozovek. Dimenzování podle tohoto předpisu vychází z kombinace racionální mechaniky a pokusných měření (laboratorní zkoušky, pokusné úseky, kruhová dráha a sledování vozovek za provozu). [17]

3.2.5 Belgie

Pravidla správného postupu při provádění CB krytů vozovek **CRR R 75/05**, nahrazují doporučení CRR R 55/85 z roku 1985. Obsáhlý dokument zahrnuje požadavky na hmoty, na složení směsi a výrobu silničního betonu, pokládku CB krytu vč. jeho ošetření, provádění a těsnění spár, na zvláštní aplikace a na kontrolu kvality. [18]

3.2.6 Polsko

Požadavky definované pro vyztužení spár CB desek jsou uvedeny v polské normě **PN-75 / S- 96015**, týkající se návrhu CB krytu na silnicích a letištích v normě **PN EN 13877-3**. Doporučuje se, aby v případě návrhu příčných spár CB desek na silnicích a letištích a i podélných spár na letištích tloušťky větší než 250 mm byly tyto spáry vyztuženy kluznými trny a podélné spáry na silnicích kotvami. V případě návrhu krytu na plochách, kde je pohyb vozidel více směry se doporučuje používat pouze kluzné trny. Doporučená vzájemná vzdálenost kluzných trnů je 300 mm, přičemž nesmí překročit 500 mm. [19,20]

3.2.7 Německo

Na základě platných německých norem a předpisů **ZTV Beton-StB 07**, **ZTV A-StB 11**, **DIN 187316 VOB** je nezbytné pro zajištění přenosu příčných sil a zvýšení spolupůsobení desek navrhnout do spár kluzné trny o průměru 25 mm a délce 500 mm umístěných ve středu desky. Výztužné prvky v CB krytu vozovky musí splňovat požadavky v souladu s normou DIN EN 13877-3. [21, 22, 23]

Vzájemná vzdálenost kluzných trnů je 250 mm v nejzatíženějším jízdním pruhu silničního komunikace a 500 mm v méně zatížených pruzích silniční komunikace. Kluzné trny musí být vyrobeny z hladké kruhové tyčové oceli s ochranným povlakem, tak aby nebránily pohybu desek vlivem teplotního spádu. V návrhové metodě je uvažováno délka desek 5 m. [24]

3.2.8 Rakousko

V rakouské návrhové normě pro vozovky s CB krytem **RVS 8S.06.32** jsou délky CB desek doporučené navrhnout v rozmezí 5,5 až 6,0 m. Příčné spáry se vyztužují kluznými trny průměru 25 mm a délky 500 mm, jejich vzájemná vzdálenost je menší v stopách vozidel a větší v nezatížených částech desek. [25]

3.3 KRITICKÉ ZHODNOCENÍ SOUČASNÉHO STAVU

Kluzné trny jsou umísťovány do příčných smršťovacích nebo pracovních spár CB krytu (výjimečně také do podélných spár – zejména u širokých ploch) a plní funkci přenosu zatížení mezi jednotlivými deskami. Kluzné trny umožňují horizontální pohyb desek při smršťování v období po betonáži cementobetonového krytu a při teplotních změnách. Současně snižují rozdílné vertikální pohyby a tahová napětí na hranách desek a tvorbu tzv. „schůdků“ po dobu životnosti krytu. Příčné spáry představují kritické místo v konstrukci, kdy jsou kluzné trny i beton v jejich blízkosti nejvíce namáhány za provozu v kombinaci se záporným teplotním spádem na desce. Jedná se o případ, kdy jsou desky konvexně deformovány, a spodní líc desek je v místě příčných spár oddělen od podkladní vrstvy. Umístění, kvalita a nevyhovující rozměry v současnosti používaných kluzných trnů významně ovlivňují provozuschopnost a životnost konstrukce. Především se jedná o vznik tahových napětí v oblasti kluzných trnů. Tomuto tématu je nutné věnovat zvýšenou pozornost a implementovat nové poznatky do praxe.

V podmínkách ČR vzhledem k malému rozsahu staveb (v porovnání se zahraničím) a omezeným finančním zdrojům se vyžaduje úsporný návrh, vycházející z konkrétních podmínek výstavby. Přímý návrh konstrukce zohlední specifické problémy dané stavby. Rozvoj metody konečných prvků umožňuje namodelovat konkrétní případy namáhání a sledovat chování konstrukce. V ČR v současné době používané TP 170, které umožňují návrh tuhých vozovek prostým výběrem z katalogu nebo návrh a posouzení podle Návrhové metody, jsou vzhledem k mnoha zjednodušením nevhodné.

Dimenzování vozovek v současnosti vychází z modelování odezvy konstrukce na statické zatížení. Při reálném přejezdu CB krytu (s/bez kluzných trnů a kotev) však dochází k dynamickému zatížení a to zejména v místech, kde kola nápravy přejíždí přes příčnou spáru. Tento typ namáhání a analýza jeho průběhu není v současnosti zohledněna a je nutné využít programů pracujících na bázi metody konečných prvků s využitím dynamických charakteristik. Výsledky zahraničních odborníků naznačují, že dynamická analýza je nezbytná pro korektní posouzení a ekonomický návrh tuhých vozovek. Sestavení modelu dynamického chování při přejezdu těžkého vozidla vyžaduje praktická měření odezvy vozovky na tento typ namáhání. Pomocí snímačů vhodně umístěných do konstrukce vozovky (příčná hrana a oblast kluzných trnů), lze sledovat průběh deformací. Komplexní sledování pokusných úseků umožní sledovat chování konstrukce vystavené reálnému provozu a teplotně – vlhkostnímu namáhání.

4 METODIKA ŘEŠENÍ

K dosažení stanovených cílů disertační práce bude využito teoretických a experimentálních metod řešení.

4.1 TEORETICKÉ METODY

1. Analýza řešené problematiky zahrnující zejména:
 - rešerše literatury a platných předpisů,
 - experimentální vývoj v zahraničí.
2. Metodika měření a hodnocení průhybů vozovek rázovým zařízením FWD.
3. Modelování v programech pracujících na bázi metody konečných prvků.
4. Definování dílčích závěrů a doporučení pro další výzkum a využití výsledků v praxi.

4.2 EXPERIMENTÁLNÍ METODY

1. Měření průhybů rázovým zařízením FWD na pokusných úsecích s CB krytem.
2. Měření teplotně-vlhkostního režimu cementobetonových desek.
3. Realizace laboratorních zatěžovacích zkoušek.
4. Měření deformací pomocí tenzometrických snímačů umístěných v reálných konstrukcích s CB krytem.

Disertační práce předkládá výsledky projektů Technologické agentury ČR, na nichž se autor podílel jako zástupce hlavního řešitele a člen řešitelského týmu:

- TA02031195: Poloha kluzných trnů a kotev v cementobetonových krytech vozovek a význam jejich správného umístění na chování a životnost krytů,
- TE01020168: Centrum pro efektivní a udržitelnou dopravní infrastrukturu (CESTI) - Pozemní komunikace-inteligentní a trvanlivá technologická řešení s vysokou technikou - WP1, Bezpečnost, spolehlivost a diagnostika konstrukcí - WP6.

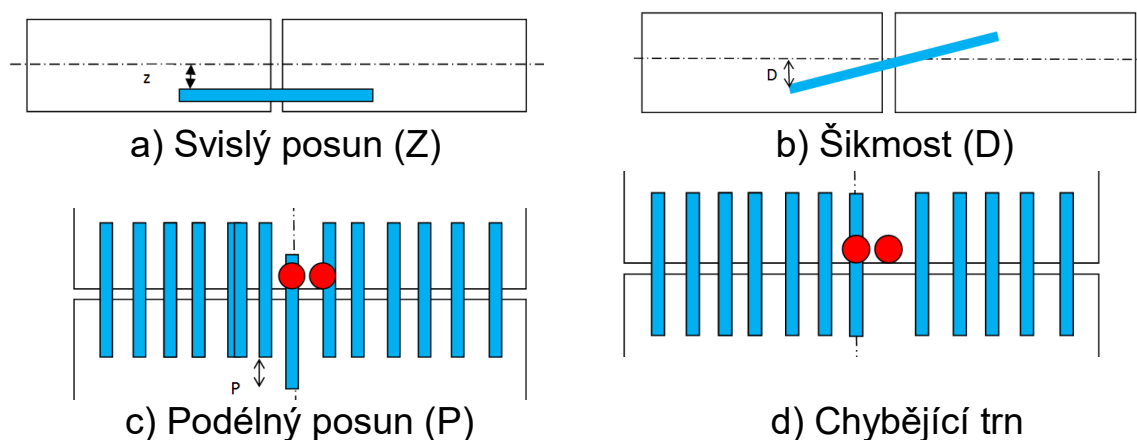
5 VÝSLEDKY MODELOVÁNÍ A MĚŘENÍ

5.1 MODELOVÁNÍ METODOU KONEČNÝCH PRVKŮ

Pro výpočet napětí v cementobetonovém krytu byl použit program pracující na principu metody konečných prvků. V programu ANSYS bylo zahájeno teoretické posouzení vlivu jednoho defektně uloženého kluzného trnu na napjatost betonu (obr. 2). Cílem výpočtu bylo zjistit, zda má nesprávné umístění kluzného trnu v příčné spáře CB krytu vliv na napjatost a případné porušení betonu v oblasti trnu, které bylo popsáno zahraničními odborníky (Larson et al.). Ve výpočtu bylo uvažováno 17 variant „defektního“ umístění kluzného trnu (tab. 2). Na základě dodaných podkladů tyto výpočty zajistil doc. Vlastislav Salajka a Ing. Zdeněk Čada.

Výpočty byly provedeny metodou konečných prvků s využitím detailních prostorových výpočtových modelů. Globální výpočtový model zahrnoval oblast konstrukce vozovky tvořené 3x3 deskami. Detailní zpřesněný model zahrnoval

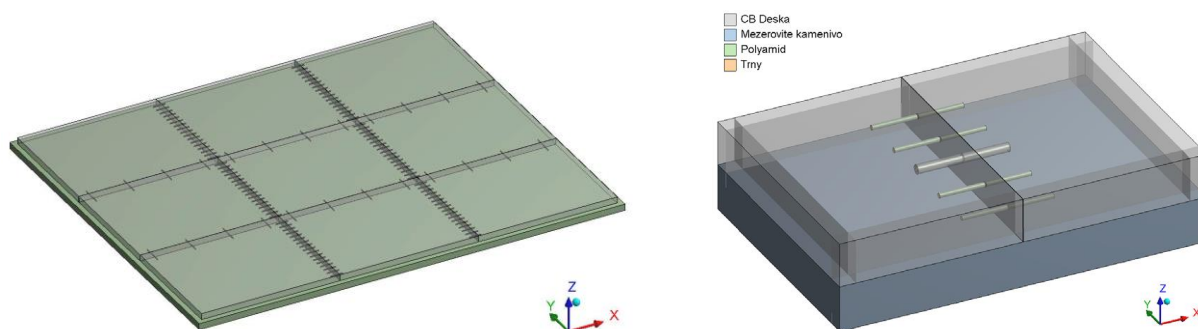
oblast příčné spáry s pěti kluznými trny. Globální výpočtový model poskytuje globální pole posunutí, pole napjatosti a okrajové podmínky pro detailní model. Detailní výpočtový model poskytuje lokální pole posunutí a napjatosti kolem zkoumaného kluzného trnu (obr. 3).



Obr. 2: Uvažované varianty umístění kluzného trnu (umístění dvojmontáže nápravy je znázorněno červenými kolečky)

Tab. 2 Uvažované varianty „defektního“ umístění kluzného trnu

Var.	„Defektní“ umístění trnu				Popis
	Vertikální posun	Šikmost umístění	Vodorovný posun	Chybějících trnů	
	(Z)	(D)	(P)		
	[mm]	[mm]	[mm]	[-]	
(V1)	-	-	-	-	Základní varianta
(V2)	-	-	-	1	Chybějící trn
(V3)	20	-	-	-	Vertikální posun (směrem nahoru)
(V4)	40	-	-		
(V5)	60	-	-		
(V6)	-20	-	-		
(V7)	-40	-	-		Vertikální posun (směrem dolů)
(V8)	-60	-	-		
(V9)	-	20	-		
(V10)	-	40	-		Šikmé umístění (oddálení od síly)
(V11)	-	60	-		
(V12)	-	-20	-		
(V13)	-	-40	-		Šikmé umístění (přiblížení k síle)
(V14)	-	-60	-		
(V15)	-	-	50		
(V16)	-	-	100	Vodorovný posun (oddálení od síly)	
(V17)	-	-	200		



Obr. 3: Globální (vlevo) a detailní (vpravo) výpočtový model - geometrie

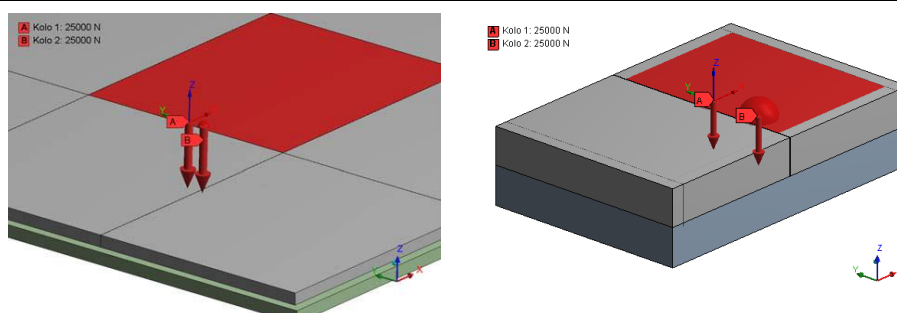
Konstrukce vozovky je složena z mechanicky zpevněného kameniva o mocnosti 250 mm, cementobetonových desek vzájemně spojených kluznými trny a kotvami. Kotvy jsou použity z hřebínkové oceli průměru 20 mm a délce 800 mm, kdy střední část o délce 200 mm je potažena plastem. Kluzné ocelové trny průměru 25 mm a délce 500 mm jsou na povrchu hladké. Kluznost trnů je zajištěna plastovým povlakem o průměrné tloušťce 0,4 mm. Model CB desky tvoří samostatné obdélníkové segmenty o rozměrech 5500 mm x 4500 mm. Tloušťka CB desek je 240 mm. Materiálové charakteristiky jsou patrné z tabulky 3. Horizontální umístění kotev a trnů je takové, že horní líc prvku lícuje se střednicovou rovinou CB desky. Horizontální umístění je symetrické kolem kontrakční spáry. Celkem je takto vloženo 17 trnů (po 250 mm) na jednu příčnou spáru a 4 kotvy (rozteč 1500 mm) na jednu podélnou spáru segmentu.

Tab. 3 Materiálové vlastnosti

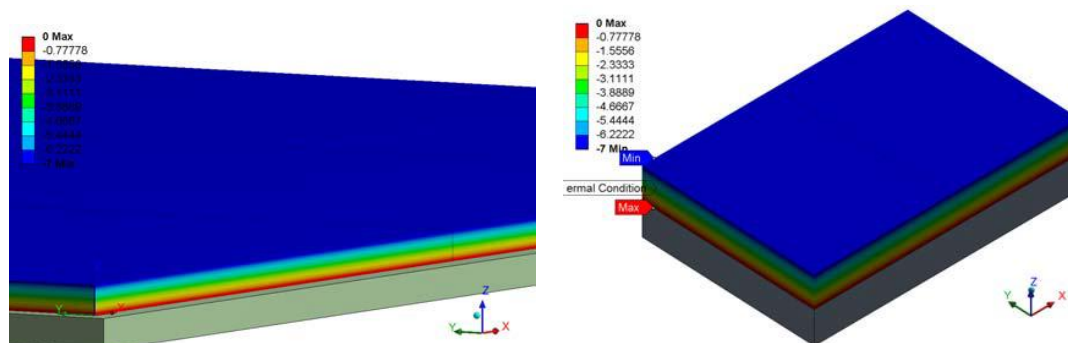
Část výpočtových modelů	Materiálové vlastnosti			
	E [MPa]	ν [-]	ρ [kg.m-3]	αT [°C-1]
Podkladní vrstva z MZK	600	0,25	-	-
Cementobetonová (CB) deska	37 500	0,20	2 200	1,2.10-5
Ocel kluzných trnů a kotev	210 000	0,27	7 850	1,2.10-5
Plastový povlak	200	0,40	-	-

Pro první etapu modelování byly vybrány charakteristiky typické pro nejnejpříznivější kombinaci technologických parametrů s cílem testovat citlivost výpočtové metody na okrajové podmínky. V dalších etapách byly provedeny parametrické výpočty pro různé vstupní hodnoty - odvozené z reálných měření na stavbách.

Do výpočtového modelu, kromě zatížení vlastní tíhou a teplotní deformací, bylo vneseno vnější zatížení dvojmontáže o celkové síle 50 kN. Osa jedné síly protíná osu „defektního“ trnu. Osa druhé síly je vzdálena 344 mm v příčném směru (-y). Průměr dotykových ploch sil je 240 mm. Dotykové plochy kol jsou umístěny těsně u hrany jedné z CB desek. Tedy osy sil jsou vzdáleny 120 mm v podélném směru (+x) od hrany svislé kontrakční spáry (obr. 4 a 5).



Obr. 4: Globální (vlevo) a detailní (vpravo) výpočtový model – zatížení dvojmontáží

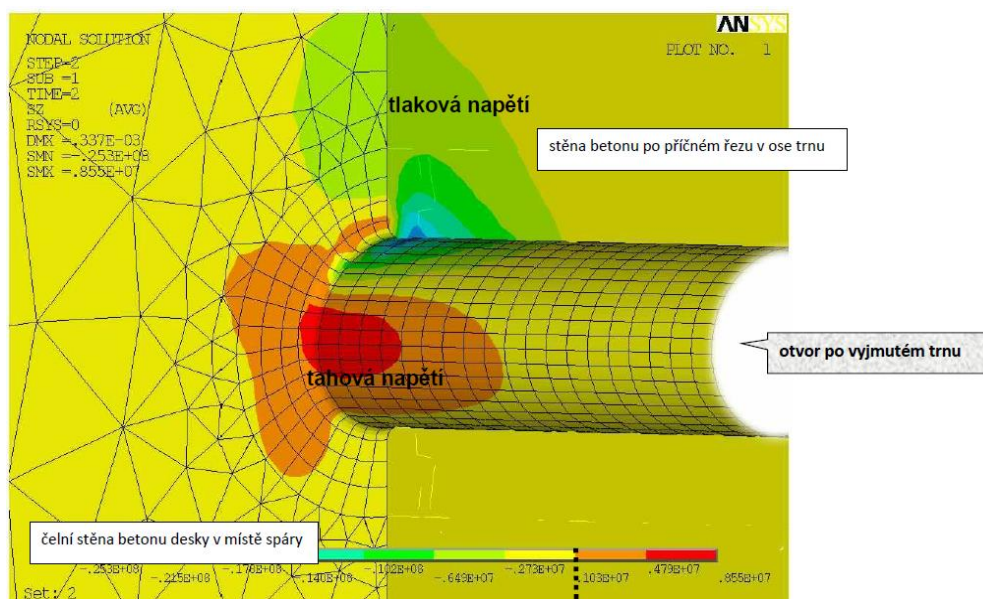


Obr. 5: Globální (vlevo) a detailní (vpravo) výpočtový model – teplotní zatížení

Tab. 4 Extrémní hodnoty napjatosti

Var.	Napětí σ_y [MPa]			Var.	Napětí σ_y [MPa]				uložení kluzného trnu	schéma uložení a zatížení
	Path6				Napětí tlakové		Napětí tahové			
	ZS1	ZS2	ZS2-ZS1		Zatížení dvojmontáží ~ 50 kN					
V1	-0.4275	0.9591	1.3865	V1	-19,0	-26,7	10,1	10,2	ve středu desky	
V2	-0.4278	1.0991	1.5269	V2	-22,3	-30,3	11,5	11,5	chybí	
V3	-0.4268	0.9597	1.3865	V3	-18,1	-26,4	9,2	9,2	20 mm dolů	
V4	-0.4262	0.9607	1.3869	V4	-18,9	-27,0	9,4	9,4	40 mm dolů	
V5	-0.4261	0.9603	1.3863	V5	-18,5	-26,8	9,1	9,0	60 mm dolů	
V6	-0.4285	0.9681	1.3966	V6	-18,7	-26,5	10,8	10,9	20 mm nahoru	
V7	-0.4301	0.9816	1.4116	V7	-25,4	-27,1	11,8	12,0	40 mm nahoru	
V8	-0.4310	0.9942	1.4252	V8	-18,8	-25,1	12,2	12,4	60 mm nahoru	
V9	-0.4284	0.9593	1.3877	V9	-14,8	-23,3	8,9	9,0	20 mm šikmo vlevo	
V10	-0.4303	0.9594	1.3897	V10	-12,2	-17,6	5,6	5,7	40 mm šikmo vlevo	
V11	-0.4330	0.9593	1.3924	V11	-10,8	-14,8	5,4	5,5	60 mm šikmo vlevo	
V12	-0.4266	0.9583	1.3849	V12	-19,1	-23,4	10,1	10,2	20 mm šikmo vpravo	
V13	-0.4262	0.9564	1.3825	V13	-18,1	-25,1	11,4	11,5	40 mm šikmo vpravo	
V14	-0.4258	0.9539	1.3797	V14	-21,9	-26,6	14,1	14,2	60 mm šikmo vpravo	
V15	-0.4205	0.9841	1.4046	V15	-16,8	-23,1	9,6	9,6	50 mm vodorovný posun	
V16	-0.4215	0.9803	1.4018	V16	-18,1	-26,2	9,6	9,7	100 mm vodorovný posun	
V17	-0.4513	1.0274	1.4787	V17	-17,0	-21,2	7,8	8,0	150 mm vodorovný posun	

Červené jsou označeny hodnoty převyšující normové požadavky



Obr. 6: Tahová napětí v oblasti příčné spáry

Z výsledných maximálních hodnot tahového napětí v cementobetonové desce v těsné blízkosti defektního trnu ($\sigma_1 = 5,5$ až 14 MPa) je zřejmé, že je výrazně překročena mez pevnosti v prostém tahu materiálu (orientačně $f_{ct} = 2,3$ MPa - odvozena přepočtem z normové pevnosti v tlaku) a bude docházet k vzniku trhlin (obr. 6). Mez pevnosti v tahu byla překročena u všech variant uložení „defektního“ trnu. Nejnížší hodnoty tahové napjatosti byly vyšetřeny u variant (V10) a (V11), kdy je trn přikloněn směrem k zatížení dvojmontáže. Nejvyšší hodnoty tahové napjatosti byly vyšetřeny u varianty (V14), kdy je trn odkloněn směrem od zatížení dvojmontáže. Lze tedy sledovat největší citlivost tahové napjatosti na šikmosti umístění trnu (tab. 4).

Vypočítané extrémní hodnoty tlakové napjatosti mají podobný trend (vzhledem k variantám), jako je tomu u tahové napjatosti. Tlaková napjatost u žádné z variant ($\sigma_3 = 11$ až 30 MPa) nedosahuje mezi pevnosti materiálu v tlaku ($f_{ct} = 32$ MPa) - podle ČSN EN 13877-1. Nebude docházet k drcení betonového materiálu.

Výsledky výpočtů vodorovného tahového napětí na spodním líci hrany desky pod defektními trny jsou defektním uložením trnu ovlivněny velmi málo a prakticky ve všech případech se pohybují u desky tloušťky 300mm v rozsahu od $0,94$ MPa do $1,05$ MPa a u desky tloušťky 240 mm v rozsahu od $1,2$ do $1,5$ MPa - což jsou nízké hodnoty a při klasickém navýšení o 50% na vliv únavy konstrukce nepřesáhne tahové napětí na spodním líci hrany CB desky (s kluznými trny) normovou hodnotu pevnosti betonu v tahu ohybem - což činí pro CB I $4,5$ MPa.

Pro vybrané varianty „defektního“ umístění trnu byly provedeny výpočty pro různý modul pružnosti podkladní vrstvy, tloušťku desky a teplotní spád CB desek, tzv. parametrické výpočty.

5.2 LABORATORNÍ MĚŘENÍ

V této kapitole jsou popsány experimentální zkoušky, které jsou zaměřeny na porovnání teoreticky získaných poznatků z modelování defektně uložených trnů v programu ANSYS prostřednictvím zatěžovacích zkoušek. V první fázi byly realizovány zkoušky na menších trámcích s cílem zhodnotit vliv defektně uloženého kluzného trnu. V další fázi bylo přistoupeno k měření deformací na trámcích, které svými rozměry reprezentují měřítko reálné konstrukce vozovky. Zkouškami tzv. „supertrámců“ je řešen význam povlaku kluzného trnu, porovnání deformací betonu v okolí kluzných trnů a význam tuhosti povlaku na naměřených hodnotách.

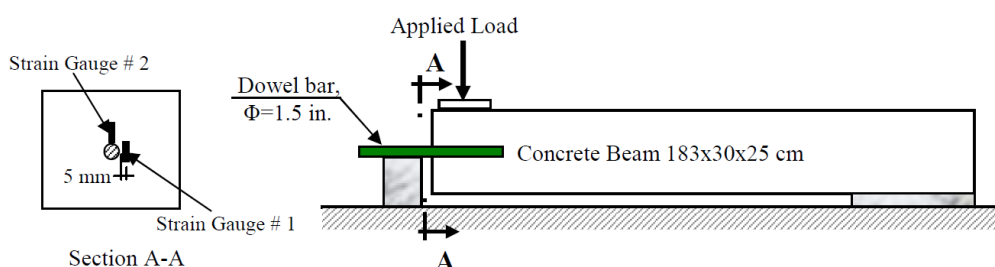
Kvalita povlaků kluzných trnů je dále předmětem výzkumu prostřednictvím experimentálních zkoušek vytržení z betonového trámce a protlačování.

5.2.1 Trámce s vloženým kluzným trnem

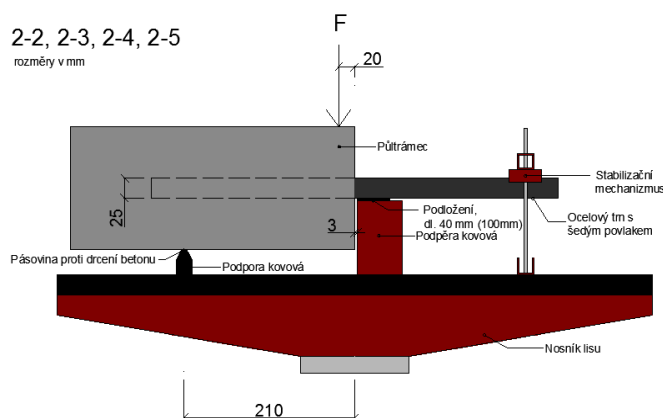
Statické a cyklické zatěžování trámů s defektně uloženými KT

V rámci řešení projektu TA02031195 byly realizovány statické a cyklické zatěžovací zkoušky na betonových trámcích 150x150x350(700) mm s defektním umístěním kluzných trnů. Cílem zkoušek bylo vyšetřit, zda má umístění kluzného trnu v desce vliv na napětí v betonu v blízkosti trnu a vzniká-li porušení betonu.

Zatěžovací schéma zkoušky vychází z americké studie a zkoušek realizovaných na West Virginia university v USA (obr. 7). Ve studii se potvrdil vznik vysokých koncentrátů napětí v betonu v okolí kluzných trnů uložených ve střednicové rovině betonového trámce. Zatěžovací schéma pro zkoušky vytvořené pracovníky CDV Tišnov je patrné na obr. 8. [32]



Obr. 7: Zatěžovací schéma West Virginia university, USA [32]



Obr. 8: Zatěžovací schéma laboratorních zkoušek

Poznatky z amerických zkoušek byly rozšířeny a odzkoušeny byly trámce s „defektním“ uložením kluzného trnu. Vybrány byly ty varianty, u nichž teoretickým výpočtem metodou konečných prvků v programu ANSYS vycházelo napětí v betonu nejvyšší a u nichž poloha zabetonovaného kluzného trnu umožňovala instalaci tenzometrů. Zjišťovány byly naměřené poměrné deformace betonu pomocí lepených tenzometrů při statické a cyklické zkoušce a výsledky byly přepočítány podle Hookova zákona na napětí a porovnávány. Zkoušky byly realizovány na lisu TZÚS Brno.

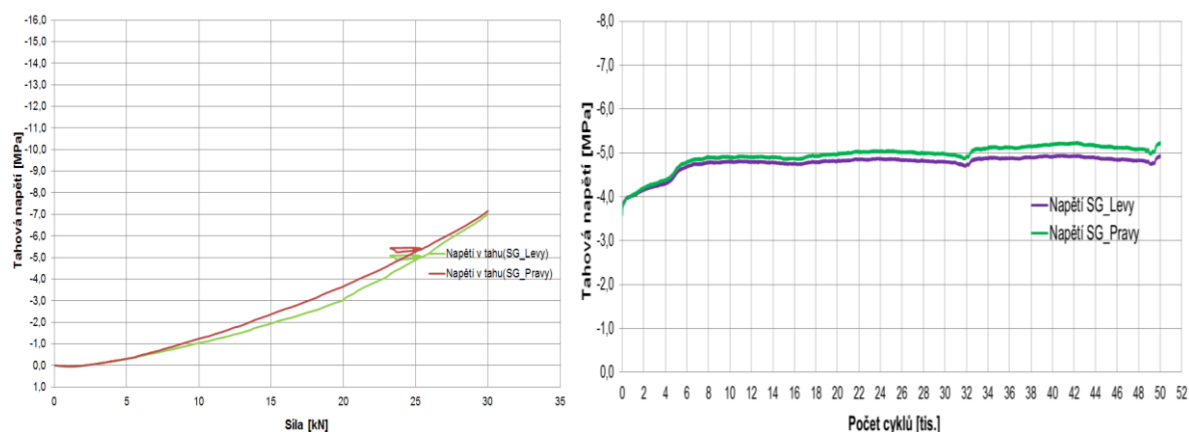
Pro tyto zkoušky byly použity nalepovací odporové tenzometry HBM s označením 1-LY41-20/120 resp. 1-LY41-50/120 (obr. 13), které jsou aplikovány na čistý a rovný podklad čela betonového trámce do míst, kde se nacházejí nejvyšší koncentráty napětí teoreticky stanovené metodou konečných prvků. Čela trámce byla osazena v oblasti tahových napětí tenzometry s rozdílnými délkami 50 a 20 mm. Důvodem je, že tenzometry integrují hodnotu poměrných přetvoření po celé své délce a měření dává rozdílné výsledky, což potvrzují teoretické výpočty i samotná měření (obr. 9).



Obr. 9: Zatěžovací zkouška trámce s nalepenými odporovými tenzometry

Principem statické zkoušky bylo postupné zatěžování trámce silou, aplikovanou prostřednictvím hlavy lisu a umístěnou nad trnem, na maximální hodnotu 30-50 kN. Rychlost zatěžování byla zvolena 50 N/s, byl odečítán průhyb zatěžované hrany digitálními průhyboměry a hodnoty naměřených poměrných deformací na tenzometrech. Takový průběh umožnil přesné stanovení poměrných deformací a průhybů v závislosti na aplikované síle.

Po statické zkoušce ihned následovala zkouška cyklická. Principem zkoušky bylo postupným zatěžováním a odtěžováním trámce simulovat přejezd těžkého vozidla. Zvolená maximální síla při zatížení byla 20 kN a při odtížení byla snaha dosáhnout minimální hodnoty přetížení při zachování přijatelné frekvence zatěžování $f=0,2$ Hz. Počet zatížení byl stanoven na 20 resp. 50 tisíc. Výsledkem je pak průběh poměrných deformací a průhybů v závislosti na počtu cyklů (obr. 10).



Obr. 10: Výsledky statického zatěžování – závislost síla/tahové napětí (vlevo) a cyklického zatěžování – závislost počet cyklů/tahové napětí

Současně byly sledovány rozdíly v napětí pro dva typy kluzných trnů – kluzný trn s povlakem Thermofix a sklolaminátový kluzný trn s vlákny orientovanými v podélném směru, kde byl sledován průhyb hrany na trámcih 150x150x700 mm. Souhrnné výsledky zatěžování jsou zaznamenány v tab. 5 a 6.

Tab. 5 Výsledky napětí a průhybů zatěžované hrany při statické zatěžovací zkoušce

Deformace betonu okolo trnů na trámcih 150*150*350(700) - vyhodnoceno na základě měření tenzometry a průhyboměrů													
značka trámce	CHUP 1-4	CHUP 1-6	sklolaminátový	trámec 1-1	trámec 2-2	trámec 2-3	trámec 2-4	trámec 2-5	trámec 2-6	trámec 2-6(2)	trámec 3-1	trámec 3-1(2)	
povlak	Jeniš PVC	Jeniš PVC	sklolaminát	bez povlaku	Jeniš PVC	Jeniš PVC	Jeniš PVC	Jeniš PVC	Jeniš PVC	Jeniš PVC	sklolaminát	sklolaminát	
umístění trnu	v ose	v ose	v ose	v ose	20 mm pod	20 mm nad	20 mm šikmo k síle	20 mm šikmo od síly	šikmo v půdoryse	šikmo v půdoryse	v ose	v ose	
poznámka			* napětí(průhyb) při síle 16 kN-porušení										
statika	síla (kN)	typ deformace											
	10	1,4	0,4	4,7	-	1,2	-	2,4	-	-	-	-	-
	20	4	2,4	8,1*	-	3,7	-	6,2	-	-	-	-	-
	25	5,7	3,7	-	-	5,3	-	9,9	-	-	-	-	-
	30	7,7	5,4	-	-	7,2	-	14,4	-	-	-	-	-
	MKP/trámec	6,2/5,7	6,2/3,7	-	-	9,2/5,3	-	10,2/9,9	-	-	-	-	-
	10	16,3	15,1	11,4	-	8,6	-	13	-	-	-	-	-
	20	31,8	36	21,2*	-	20,1	-	28,8	-	-	-	-	-
	25	38,8	47,6	-	-	26,8	-	41,6	-	-	-	-	-
	30	45,3	58,4	-	-	34,3	-	54,4	-	-	-	-	-
	MKP/trámec	26,7/38,8	26,7/47,6	-	-	26,4/26,8	-	23,4/41,6	-	-	-	-	-
	10	0,572	0,582	0,874	0,220	0,386	0,412	0,408	0,548	4,036	0,242	0,224	0,192
	20	0,892	0,888	6,220*	0,436	0,630	0,610	0,652	0,986	5,754	0,466	0,432	0,392
	25	1,002	1,030	-	0,538	0,756	0,706	0,762	1,136	5,964	0,572	0,516	0,480
	30	1,148	1,158	-	0,630	0,868	0,792	0,876	1,316	6,194	0,672	0,590	0,566
	35	-	-	-	-	-	0,886	-	1,470	-	-	-	0,712
	40	-	-	-	-	-	0,988	-	1,682	-	-	-	0,938
	45	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,192
	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	MKP/trámec	0,365/1,002	0,365/1,030	-	-	0,365/0,756	-	0,365/0,762	-	-	-	-	-
celkové hodnocení statiky													

Tab. 6 Výsledky napětí a průhybů zatěžované hrany při cyklické zatěžovací zkoušce

Deformace betonu okolo trnů na trámcih 150*150*350(700) - vyhodnoceno na základě měření tenzometry a průhyboměrů													
značka trámce	CHUP 1-4	CHUP 1-6	sklolaminátový	trámec 1-1	trámec 2-2	trámec 2-3	trámec 2-4	trámec 2-5	trámec 2-6	trámec 2-6(2)	trámec 3-1	trámec 3-1(2)	
povlak	Jeniš PVC	Jeniš PVC	sklolaminát	bez povlaku	Jeniš PVC	Jeniš PVC	Jeniš PVC	Jeniš PVC	Jeniš PVC	Jeniš PVC	sklolaminát	sklolaminát	
umístění trnu	v ose	v ose	v ose	v ose	20 mm pod	20 mm nad	20 mm šikmo k síle	20 mm šikmo od síly	šikmo v půdoryse	šikmo v půdoryse	v ose	v ose	
poznámka		* nelze určit											
cyklování	počet cyklů												
	maximum	3,86	2,87	-	-	5,25	-	6,12	-	-	-	-	-
	stabilizace	3,84	2,79	-	-	5,15	-	5,16	-	-	-	-	-
	hodnocení												
	maximum	27,62	35,81	-	-	21,14	-	31,65	-	-	-	-	-
	stabilizace	24,18	*	-	-	20,73	-	29,01	-	-	-	-	-
	hodnocení												
	začátek cyklu	0,810	0,880	-	-	1,524	-	0,676	-	-	-	-	-
celkové hodnocení cyklu	konec cyklu	0,958	1,036	-	-	1,834	-	1,012	-	-	-	-	-

Statické a cyklické zatěžování „supertrámců“

Zkoušky trámů s defektně uloženými trny prokázaly existenci především vysokých tahových napětí. Zatěžovací zkoušky „supertrámců“ o rozměrech 270x270x300 mm měly za cíl ověřit koncentraci poměrných deformací v okolí trnu, kdy byl průřez trámce zvolen tak, aby reprezentoval skutečné rozměry desek CB krytu s ohledem na zatěžovací schéma. Trámce byly osazeny různými typy kluzných trnů uložených ve střednicové rovině betonu a odzkoušeny v laboratorních podmínkách na lisu TZÚS. Měření na osazených tenzometrech umožní vzájemné srovnání hodnot deformací betonu v okolí ocelových kluzných trnů s nově vyvinutými povlaky.

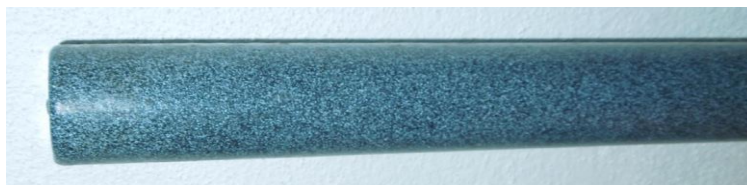
Tab. 7 Výsledky měření deformací na trámech 270x270x300 mm

zkouška	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5
povlak	-	Thermofix	Sklolaminát	Sklolaminát	Thermofix
trnu (druh, průměr v mm)	ocel hladká 25	ocel hladká 25	ocel žebírková 22	ocel hladká 25	ocel hladká 25
umístění trnu	v ose trámce				
pozn.	-	výroba Likal s.r.o. (ČR)	výroba Likal s.r.o. (ČR)	výroba Likal s.r.o. (ČR)	Výroba Brentzel (SRN)
Síla [kN]	Napětí tahová [MPa] na tenzometru dl. 50 (20) mm				
2	0,15 (0,25)	0,15 (0,35)	0,03 (0,10)	0,16 (0,20)	0,26 (0,24)
4	0,36 (0,73)	0,50 (1,19)	0,20 (0,59)	0,45 (0,66)	0,70 (0,94)
6	0,62 (1,31)	0,88 (2,17)	0,38 (1,17)	0,76 (1,14)	1,17 (1,76)
8	0,90 (2,19)	1,26 (3,19)	0,63 (1,96)	1,13 (1,71)	1,70 (2,69)
10	1,23 (3,32)	1,65 (4,22)	0,91 (2,78)	1,55 (2,37)	2,30 (3,93)
Síla [kN]	Napětí tlaková [MPa] na tenzometru dl. 50 mm				
2	1,20	1,11	1,01	0,93	0,71
4	2,51	3,12	2,35	2,40	2,31
6	3,85	5,11	3,69	3,90	4,02
8	5,31	7,04	5,16	5,53	5,73
10	6,82	8,95	6,62	7,28	7,73
Síla [kN]	Průhyb zatěžované hrany [mm]				
2	0,072	0,102	0,036	0,030	0,136
4	0,114	0,154	0,106	0,088	0,210
6	0,150	0,204	0,154	0,128	0,274
8	0,176	0,250	0,198	0,170	0,328
10	0,204	0,288	0,240	0,210	0,366

Z výsledků v tabulce 7 je patrné, že typ povlaku kluzných trnů má významný vliv na napětí v betonu. Kluzný trn s povlakem ze skelného laminátu resp. trn bez povlaku vykazuje nižší hodnoty tahových i tlakových napětí.

5.2.2 Vlastnosti povlaků kluzných trnů

Povlak běžně používaných kluzných trnů v ČR je vyroben z termoplastického prášku Thermofix firmy ICOSA na bázi modifikovaných polyolefinů (obr. 11). V současnosti je v ČR pouze jediný výrobce kluzných trnů s tímto druhem povlaku, LIKAL, s.r.o. sídlící v Brně Maloměřicích. Prášek se nanáší metodou fluidování, tj. zahřátý trn se na několik sekund ponoří do fluidní nádoby, kde se prášek přilepí a roztaví. Následně se trn zahřeje v peci a prášek vytvoří hladký povrch.



Obr. 11: KT firmy LIKAL, s.r.o. – povlak Thermofix

Zatěžovací zkoušky na trámcích s vloženým kluzným trnem prokázaly malou odolnost povlaku trnu na čele trámce (obr. 12). Současně bylo provedeno několik měření spolupůsobení rázovým zařízením FWD na pokusných úsecích. Z výsledků měření byly identifikovány nízké hodnoty spolupůsobení na spárách CB desek, které mohou být způsobeny tím, že povlak na kluzných trnech má velkou tloušťku a je měkký. Měření na pokusných úsecích na dálnici D1 a zkušenosti na dálnici D5 po 10 letech prokázaly, že stávající povlaky trnů nejsou dostatečně tvrdé a umožňují, aby převážná část deformací od zatížení se odehrála v těchto povlacích (viz. kap. 5.3.1).



Obr. 12: Protlačení povlaku trnu THERMOFIX po cyklické zatěžovací zkoušce trámce s vloženým trnem

Z tohoto důvodu bylo nutné vyvinout metodiku zkoušení povlaků kluzných trnů, odzkoušet a vyvinout takový povlak kluzného trnu, který by byl odolný vůči zatlačování betonu do jeho struktury za požadavku, že tento materiál bude dostatečně klzký a nebude bráněno prokluzu kluzného trnu v betonu při teplotních dilatacích CB krytu.

Měření tuhosti povlaků kluzných trnů

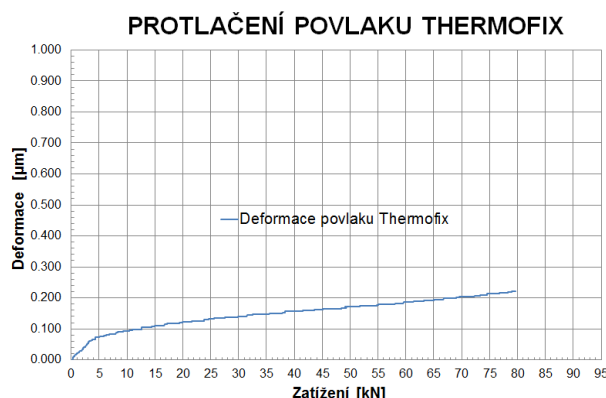
Pro ověření této hypotézy byla vyvinuta nenormová zkouška tuhosti povlaku (tzn. odolnosti proti zatlačování) pro porovnání různých typů povlaků. Do vzorku povlaku naneseném na ocelové podložce byl zatlačován ocelový razník (obr. 13).

Ve spolupráci s firmou Likal, s.r.o. byly vyvinuty nové tvrdší povlaky na bázi termoplastů s označením PHC-AH, sklolaminátový povlak a nový epoxidový povlak s označením Plascoat PP 10, které jsou významně tvrdší než termoplastické povlaky. Tvrdosti sklolaminátového povlaku bylo docíleno polyesterovým laminátem s LP aditivem a se skleněnou obousměrnou výztuží navíjenou na kluzný trn. Typy nových povlaků jsou patrné z obr. 13.



Obr. 13: Zkouška protlačení povlaku - vlevo foto zkoušky v lisu, vpravo foto protlačení různých povlaků (stávající povlak Thermofix, sklolaminátový povlak, povlak Plascoat PP 10)

V roce 2014 byly zkoušce podrobeny povlaky Thermofix a sklolaminátový povlak. Vizuální šetření prokázalo protlačení kovového tělesa do povlaku Thermofix při 30 kN, sklolaminátový odolal zatížení 90 kN. Průběh zkoušky je patrný z odečtených snímačů deformace. Z vizuálního šetření a z průběhu zatěžování na obr. 14 vyplývá, že u povlaku Thermofix vzniká trvalá deformace.



Obr. 14: Zkouška protlačení povlaku – závislost deformace na aplikovaném zatížení

V další fázi řešení projektu TE01020168 se přistoupilo ke zkouškám protlačení povlaku Plascoat PP 10, realizovány byly cyklické zkoušky zatěžování a odlehčení s časovou prodlevou umožňující regeneraci povlaku. Sledován byl průběh zatěžování, typ deformace povlaku a výsledky byly vzájemně porovnávány.

Zkoušky vytržení kluzných trnů z betonu

Důležitým sledovaným parametrem je prokluz trnů v cementobetonovém krytu. Za tímto účelem byly vybetonovány vzorky s různými typy povlaků a výsledky vzájemně porovnány.

Zkušební vzorky byly vybetonovány do forem a po 28 dnech zrání betonu odzkoušeny na trhacím lisu v TZÚS Brno za účelem stanovení velikosti a průběhu síly při vytahování a zatlačování kluzného trnu a závislosti prokluzu na trhací síle

Vzhledem k tomu, že se povlaky neustále vyvíjely, bylo realizováno velké množství těchto zkoušek. Hlavním problémem u sklolaminátů byla hladkost jejich povrchu, kterou se podařilo úspěšně zajistit. Dále byly vyvinuty a odzkoušeny nové typy tvrdých epoxidových povlaků (obr. 15).



Obr. 15: Výroba vzorků – forma s uloženým KT a průběh trhací zkoušky

5.3 MĚŘENÍ IN SITU

5.3.1 Měření průhybů rázovým zařízením FWD na tuhých vozovkách

Průhyb povrchu vozovky při hodnocení tuhosti vozovek s cementobetonovým (dále jen CB) krytem je možné měřit různými zařízeními. Tato zařízení musí umožnit vyvození dostatečně velkého průhybu vzhledem k tloušťce CB krytu. K tomuto účelu se nejčastěji používají rázová zařízení FWD/HWD (z angl. Falling/Heavy Weight Deflectometer), zatěžující vozovku rázem vyvolaným pádem závaží na zatěžovací desku viz obr. 17. Při měření průhybů vozovek s CB krytem je nutné zohlednit chování desek krytu, které se odvíjí od klimatických vlivů, především od teploty a vlhkosti. Také je důležité správné umístění zatěžovací desky a poloha měřicího nosníku s osazenými snímači průhybu.



Obr. 16: Rázové zařízení FWD/HWD RODOS 2012

Podstata metody měření průhybů rázovým zařízením FWD spočívá ve změření a vyhodnocení odezvy vozovky na dopad břemene, simulující dynamický ráz zatížení od dopravy. Dynamický ráz je vyvolán pádem závaží dané hmotnosti z dané výšky přes gumové tlumiče, regulující délku trvání rázového impulsu. Zatížení se přenáší přes zatěžovací desku do konstrukce vozovky a následně se snímá reakce na toto zatížení, kterou je deformace ve svislém směru – průhyb. Během vlastní zkoušky je na povrchu vozovky položena zatěžovací deska a měřicí rám osazený snímači průhybu. Po vyvození zatěžovacího impulsu se měří velikost zatěžovací síly a hodnoty průhybu na jednotlivých snímačích v různých vzdálenostech od osy zatížení. Rázové zařízení FWD umožňuje nastavit parametry zatížení vozovky (velikost zatěžovací síly a dobu působení zatížení) tak, aby se blížily k reálnému zatížení od pohybujících se vozidel.

Měření průhybů vozovek s CB krytem je možné rozdělit na:

- měření průhybů desky (v její středové části),
- měření spolupůsobení desek na spárách přenosem zatížení mezi deskami.

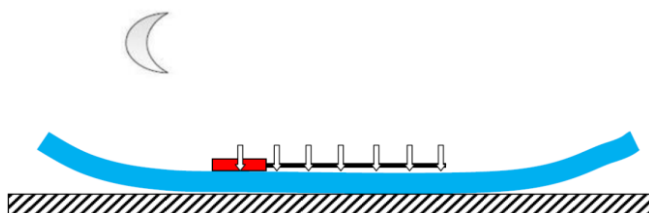
Při měření průhybů na síťové i projektové úrovni se měří teplota vozovky podle ČSN 73 6192, s doplněním o následující údaje (za účelem měření teplotního spádu a průměrné teploty CB desky) minimálně ve 4 hloubkách:

- povrch vozovky
- v hloubce 3 - 4 mm (nejedná se o teplotu horního líce desky),
- 40 a 70 mm,
- 20 mm nad spodním lícem CB desky.

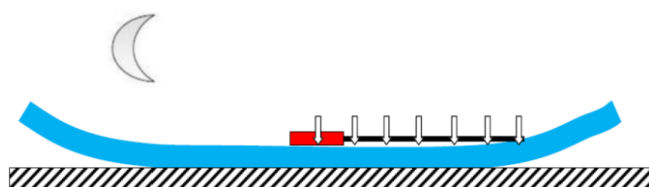
Obvykle se hodnotí průměrná teplota desky jako průměr z teplot měřených ve všech čtyřech hloubkách a teplotní spád CB krytu. Ideální je provádět kontinuální měření teplot během celého měření se záznamem. Pokud není prováděno kontinuální měření, pak musí být teplota měřena minimálně každou hodinu.

Rázová zkouška ve střední části desek

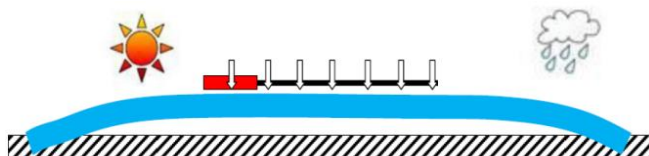
Pro hodnocení tuhosti CB desky za účelem zjištění charakteristik jednotlivých konstrukčních vrstev vozovky se provádí rázová zatěžovací zkouška na střezech desek. Zatěžovací deska nemá být umístěna do geometrického středu CB desky, jak je často praktikováno. Zatěžovací deska a měřicí nosník se snímači průhybu musí být umístěny ve střední části testované CB desky tak, aby zatěžovací deska i poslední snímač průhybu byly vzdáleny od spár a případných trhlin minimálně 0,5 m, lépe 0,75 m. Grafické znázornění správného a nesprávného umístění zatěžovací desky a měřicího nosníku je znázorněno na obr. 17 až 19. Pokud jsou výsledky rázové zkoušky použity při zpětném výpočtu modulů pružnosti jednotlivých vrstev konstrukce, pak musí být CB deska pod měřícím nosníkem a pod zatěžovací deskou bez jakýchkoliv trhlin a spár (pokud během měření záznam průhybové křivky ukáže umístění trhliny v podkladních vrstvách - zlomená průhybová křivka nebo nepřiměřený skokový posun, pak je nutno zkoušku opakovat na další desce).



Obr. 17: Správné umístění zatěžovací desky a měřicího nosníku – nulový, malý záporný teplotní spád (v noci, ráno, večer, při zatažené obloze)



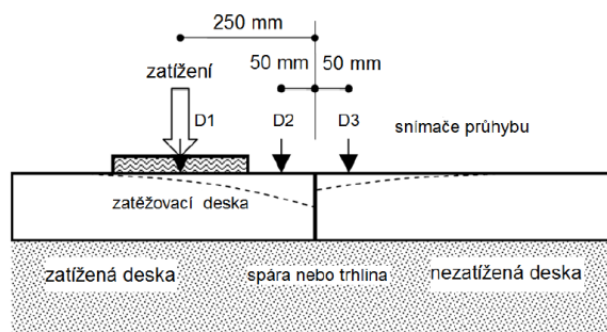
Obr. 18: Nesprávné umístění zatěžovací desky a měřicího nosníku v případě umístění zatěžovací desky do geometrického středu testované CB desky (krajní snímače průhybu se mohou nacházet na nepodporované části CB desky)



Obr. 19: Nesprávné umístění zatěžovací desky a měřicího nosníku v případě kladného teplotního spádu (přes den na slunci, za deště)

Rázová zkouška na hranách desek – přenos zatížení

Při posuzování přenosu zatížení na spárách se rázové zařízení FWD umísťuje tak, aby se měřená spára nacházela mezi snímači průhybu, které jsou umístěny ve vzdálenostech 300 a 200 mm od středu zatěžovací desky (obr. 20). Doporučuje se ověřit umístění kluzných trnů (resp. kotev) ve spárách a posoudit případná defektní uložení těchto prvků.



Obr. 20: Schéma rozmístění zatěžovací desky a snímačů při měření spolupůsobení desek na hranách a trhlinách

Přenos zatížení na spárách sousedících CB desek charakterizuje hodnota *LTE* (z angl. Load Transfer Efficiency), která se vypočítá z podílu průhybů naměřených na hranách nezatížené a zatížené CB desky podle vztahu:

$$LTE = \frac{y_{300}}{y_{200}} \times 100$$

kde: LTE - hodnota přenosu zatížení [%],

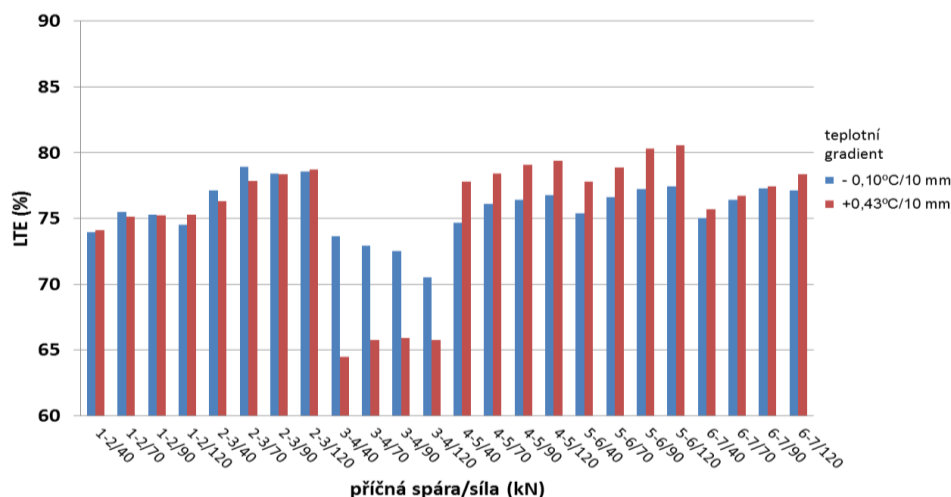
y_{300} - průhyb naměřený na nezatížené CB desce, 300 mm od osy zatížení [μm],

y_{200} - průhyb naměřený na zatížené CB desce, 200 mm od osy zatížení [μm].

LTE je parametr výrazně závislý na teplotně-vlhkostním spádu a zejména průměrné teplotě desky - což prakticky neumožňuje relativní srovnávání naměřených hodnot v různých časových obdobích.

Pokusné úseky

Při měření přenosu zatížení mezi deskami se sleduje průhyb horního líce sousedních desek. Podle zahraničních zkušeností se požadovaný poměr průhybů nevyztuženého CB krytu s kluznými trny pohybuje v rozmezí 0,8-0,9. Měřením na pokusných úsecích bylo dlouhodobým sledováním zjištěno, že se přenos zatížení v tomto rozmezí vždy nepohybuje. Měřením na pokusných úsecích dálnice D1 u Kroměříže a na Pražském okruhu bylo zjištěno, že hodnoty LTE klesají až k hodnotám 0,65 (obr. 21). V rámci doporučení stanoveném v metodice pro Měření průhybů a hodnocení únosnosti vozovek rázovým zařízením FWD je nutno dodržovat podmínky měření a doplňující kontinuální monitorování teplotně-vlhkostního stavu.



Obr. 21: Vyhodnocení přenosu zatížení LTE na příčných spárách šesti desek při nulovém a kladném teplotním spádu a různých hodnotách zatěžovací síly (D1 Kroměříž)

5.3.2 Měření deformací cementobetonového krytu pomocí tenzometrů

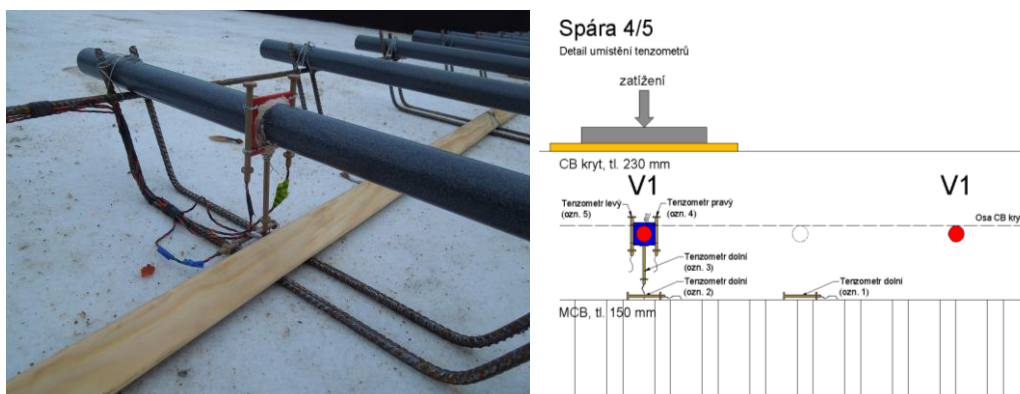
Výsledky modelování bylo nezbytné ověřit praktickým měřením za použití tenzometrických snímačů vhodně umístěných do konstrukce vozovky. Existence tahových napětí na spodním líci CB krytu i v oblasti kluzných trnů byla prokázána teoretickým modelováním konstrukce a laboratorními zkouškami. Výsledky měření

na pokusných úsecích a reálně pojížděných vozovkách umožní srovnání deformací krytu při simulaci rázu zařízením FWD a zatížení vyvozeném reálnými nápravami těžkých nákladních vozidel.

V rámci měření na pokusných úsecích Firesta a Tišnov bylo zkoušeno několik druhů tenzometrických snímačů. Na pokusném úseku Firesta byly instalovány do oblasti příčných spár tenzometry s dlouhou životností, které jsou vhodné pro zabudování před betonáží - typ PMFL-50-2LT (obr. 22 a 23).



Obr. 22: Tenzometr s označením PMFL-50-2LT



Obr. 23: Osazení tenzometrů s označením PMFL-50-2LT v příčné spáře a schéma zatížení rázovým zařízením FWD

Výsledky měření při porovnání deformací vyvozených na spodním líci CB krytu ukazují, že hodnoty napětí řádově odpovídají deformacím modelovaných metodou konečných prvků v programu ANSYS.

6 ZÁVĚR A SHRNUTÍ

Modelování defektně uložených kluzných trnů prokázalo, že vychýlení v žádné z uvažovaných variant nezpůsobí na spodním dimenzačním líci CB krytu zvýšená namáhání. Výsledky tahového napětí σ_y na spodním líci hrany desky pod defektními trny jsou defektním uložením trnu ovlivněny velmi málo a prakticky ve všech případech se pohybují u desky tlusté 300 mm v rozsahu od 0,94 MPa do 1,05 MPa a u desky tlusté 240 mm v rozsahu od 1,30 do 1,50 MPa. Možno stručně konstatovat, že defektní uložení trnů (v mezích uvedených v tab. 2) prakticky nemá významný vliv na namáhání v tahu na spodním líci CB desky od modelovaného zatížení. V tomto rozmezí je možno definovat povolené a mezní tolerance uložení trnů. Toto zjištění podpořilo návrh změn ČSN 73 6123-1 v tolerancích pro uložení kluzných trnů v příčných spárách CB krytu a povolit benevolentnější požadavky na jejich odchýlení od polohy navržené v dokumentaci.

Původní znění:

Poloha kluzných trnů, měřená po zhutnění, se nesmí odchýlit v kterémkoliv bodě od polohy navržené v dokumentaci o více než:

- a) 20 mm vůči horní ploše desky (ve směru vertikálním),
- b) 20 mm vůči podélné ose cementobetonového krytu (ve směru horizontálním)
- c) 50 mm vůči příčné spáře cementobetonového krytu (podélný posun trnů).

Návrh nového znění čl. 5.3.7.2:

Poloha kluzných trnů, měřená po zhutnění, se nesmí odchýlit od polohy navržené v dokumentaci následovně:

- šikmá poloha kluzného trnu vzhledem k délce trnu 500 mm (rozdíl konců trnu v horizontálním a ve vertikálním směru) smí být do 25 mm, přičemž však tato hodnota musí být dodržena u min. 75 % kluzných trnů ve spáře a zbylých max. 25 % kluzných trnů ve spáře smí mít šikmost do 40 mm;
- odchylka uložení vůči horní ploše desky (hloubka uložení) smí být do 30 mm, přičemž však tato hodnota musí být dodržena u min. 75 % kluzných trnů ve spáře a u zbylých max. 25 % kluzných trnů ve spáře tato odchylka smí být do 50 mm;
- odchylka vůči příčné spáře (podélný posun trnu) smí být do 75 mm, přičemž tato hodnota musí být dodržena u min. 75 % kluzných trnů ve spáře a u zbylých max. 25 % kluzných trnů ve spáře tato odchylka smí být do 120 mm.

Pozn.: Nové znění čl. 5.3.7.2 bylo zapracováno v rámci revize ČSN 73 6123-1 dne 1.7.2014.

V rámci modelování však byla identifikována další témata, která jsem musel řešit, aby kluzné trny plnily svoji funkci:

- vysoká tahová napětí v okolí kluzného trnu,
- optimalizace rozmístění kluzných trnů v příčné spáře,
- kvalita povlaků kluzných trnů,
- alternativní materiály kluzných trnů, eliptické průřezy a jejich rozměry.

Existence vysokých tahových napětí byla prokázána na trámčích s vloženým kluzným trnem překračující mez pevnosti betonu, jehož hodnota byla stanovena zkouškou v prostém tahu $RZ=2,25$ MPa a bude docházet ke vzniku mikrotrhlin. Z tohoto důvodu je nutné navrhnout řešení, která by zajistila snížení hodnot tahových napětí a rizika mikrotrhlin. Navrženým řešením je použití dostatečně tuhého povlaku se současným zajištěním dokonalé kluznosti v CB krytu a zvětšením průměru kluzného trnu. Z hlediska vývoje materiálu povlaků kluzných trnů (a kotev) jsem realizoval zkoušky stávajícího povlaku a ve spolupráci s firmou Likal, s.r.o. vyvinul nový odolnější typ na bázi epoxidů. Tento typ povlaku, odolnější vůči mechanickému namáhání na kontaktu cementový beton/kluzný trn, byl zaveden do výroby a je používán v praxi při výstavbě vozovek s CB krytem.

Vývoj kluzných trnů v zahraničí směřuje s ohledem na jejich použití, dopravní význam komunikace a intenzitu dopravního zatížení k uplatnění větších průměrů vzhledem k tloušťce a skupině cementobetonového krytu dle ČSN EN 736123-1. V rámci projektu CESTI je dílčím výstupem optimalizace rozmístění kluzných trnů v příčné spáře. S ohledem na řešení revize TS 0803 Navrhovanie cementobetónových vozoviek na pozemných komunikáciách a vytvoření nových TP 12/2015, na kterých jsem spolupracoval s hlavním řešitelem (Katedra dopravních staveb, Stavební fakulta STU v Bratislavě), doporučuji následující rozmístění a rozměry kluzných trnů a kotev pozemní komunikace s CBK:

Tab. 8: Doporučené rozměry a vzdálenost kluzných trnů v příčných spárách CB krytu

Doporučené nejnižší zařazení do skupiny	Tloušťka CB desky (mm)	Kluzné trny		Vzájemná vzdálenost trnů (mm)
		průměr (mm)	délka (mm)	
CB I	≥ 350	$\varnothing 35$	min. 500	250 (500 ¹⁾)
CB I, CB II	250-350 mm	$\varnothing 30$		
CB I, CB II	200-250 mm	$\varnothing 25$		
CB III	≤ 200 mm	$\varnothing 25$		

¹⁾ v případě odstavného pruhu anebo levého (vnitřního) jízdního pruhu dálnice.

Tab. 9: Doporučené rozměry a vzdálenost kotev v podélných spárách CB krytu

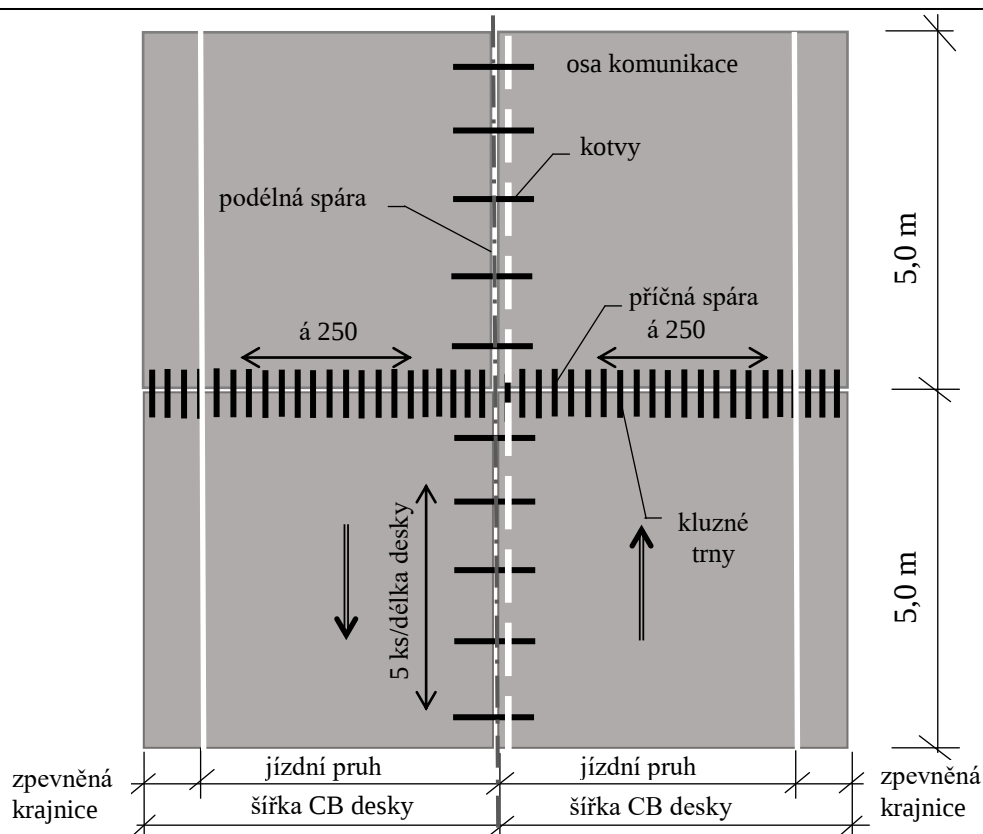
Doporučené nejnižší zařazení do skupiny	Tloušťka CB desky (mm)	Kluzné trny		Vzájemná vzdálenost trnů (mm)
		průměr (mm)	délka (mm)	
CB I, CB II	> 250 mm	$\varnothing 16-18$	min. 800	min. 3 ks (směrově rozdělená PK) min. 5 ks ^{1) 2)} (směrově nerozdělená PK)
CB I, CB II	≤ 250 mm	$\varnothing 14-16$		
CB III	≤ 200 mm	$\varnothing 14$		

¹⁾ v případě směrově rozdělené komunikace do podélné spáry mezi jízdním pruhem a odstavným pruhem

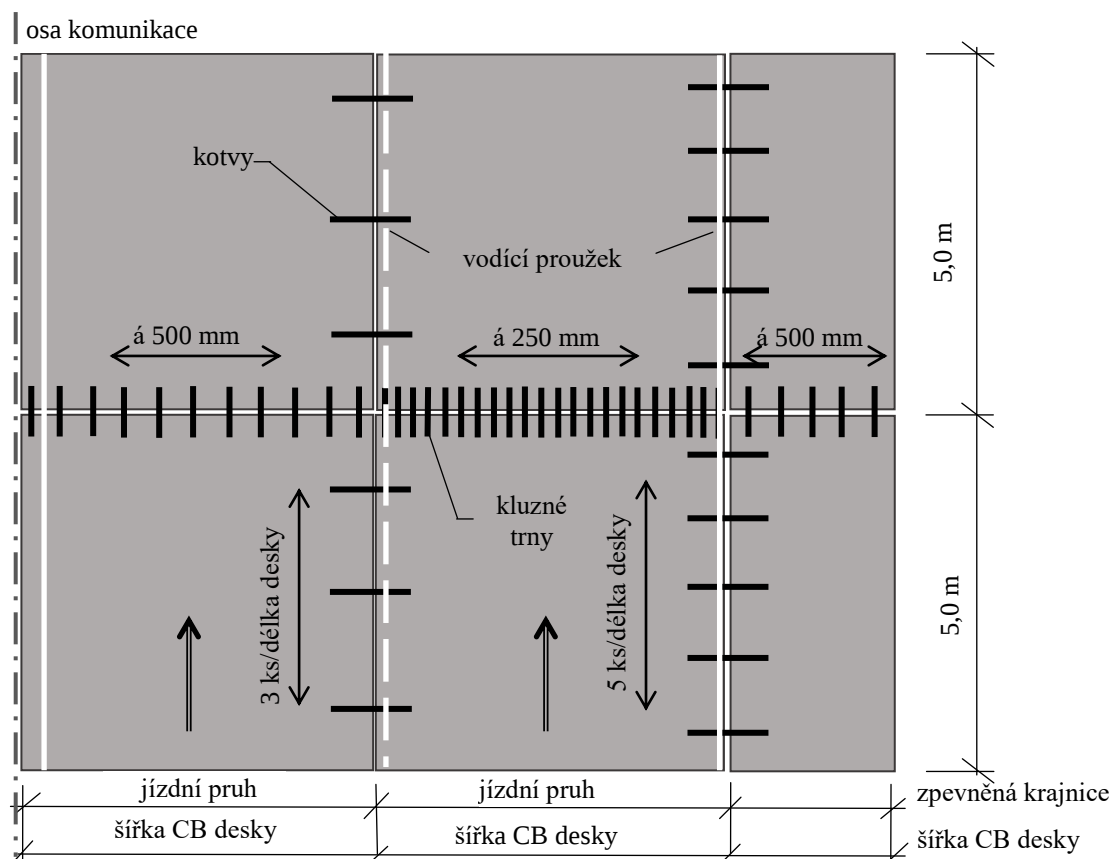
²⁾ v případě směrově nerozdělené komunikace

Pozn: Příčné a podélné spáry vozovek skupin krytu CB I a CB II je třeba vždy vyztužit. V případě vozovek skupiny CB III lze tyto spáry ponechat nevyztužené, kromě dopravních ploch, zatížené vozidly nad 3,5 t. Kluzné ocelové trny a ocelové kotvy musí být uloženy ve středu tloušťky desky v jedné rovině, rovnoběžně s povrchem vozovky a kolmo na spáru v tolerancích, uvedených v ČSN EN 13877-3.

Příčné spáry se vyztužují kluznými trny a podélné spáry kotvami. Vzájemná osová vzdálenost kluzných trnů je 250 mm, na málo zatížených pruzích (bez průjezdů nákladních vozidel) a na krajnici je možné tuto vzdálenost zvýšit, ale maximálně zdvojnásobit. Vzdálenost kluzných trnů od okraje desek nesmí být menší než 250 mm. Schematicky je toto doporučení znázorněno na následujících obrázcích 24 a 25:



Obr. 24: Příklad možného rozmístění kluzných trnů a kotev v příčných spárách směrově nerozdělené pozemní komunikace



Obr. 25: Příklad možného rozmístění kluzných trnů a kotev v příčných spárách směrově rozdělené pozemní komunikace

Využití metody konečných prvků v navrhování a posouzení únosnosti CB krytů představuje modelování v programech ANSYS, SCIA Nexis apod. Nedestruktivní zařízení FWD poskytuje vhodná data pro modelování za dodržení stanovených podmínek pro diagnostiku CB krytu. Provádění rázových zkoušek na CB krytu se řídí platným metodickým pokynem Ministerstva dopravy ČR „Měření průhybů a hodnocení únosnosti vozovek rázovým zařízením FWD“, které vzniklo v rámci projektu Technologické agentury České republiky TA01030464: Optimalizace vyhodnocení výsledků měření rázovým zařízením FWD. Certifikovaná metodika MD ČR obsahuje část zaměřenou na měření únosnosti rázovým zařízením na CB krytech, jejíž jsem autorem.

Výsledky kontinuálního monitorování pomocí zabudovaných tenzometrických snímačů na pokusných úsecích umožní zpřesnění modelování MKP a navrhování CB krytů. Za dobu řešení disertační práce jsem vyvinul metodu uložení snímačů do oblasti kluzných trnů a na spodní líc krytu před betonáží úseků i metodu dodatečného vložení do stávajících krytů a následně provedl prvotní měření. Toto umožní dodatečné vložení na stávající konstrukce s CB krytem a také provázání dat pokročilé techniky monitorování stavu vozovek např. vážení za pohybu (WIM).

Dosavadní realizovaná měření na trámcích je nutné doplnit o dlouhodobá měření na reálných konstrukcích vozovek. Za dobu řešení projektu probíhalo na několika pokusných úsecích měření se zabudovanými snímači (pracoviště Tišnov, Brno – Modřice, aj.). V rámci projektu Dopravní VaV centrum (CZ.1.05/2.1.00/03.0064) bylo vybudováno unikátní laboratorní zkušební pole, kde lze do budoucna provádět měření na zvolených konstrukcích, odpovídajících dálničním popř. letištním standardům (obr. 26).



Obr. 26: Pulzátor a pohled na laboratorní zkušební pole

Stávající dimenzační metody jsou založeny na statickém posouzení konstrukce a odvozeny pomocí výpočetních metod vycházející z teorií vyvinutých Westergaardem a Burmisterem v letech 1926 resp. 1943. Vzhledem k rozvoji výpočetní techniky a programů pracujících na principu MKP je možné jejich využití

aplikovat na posouzení konstrukcí vozovek, které jsou namáhány dynamickým přejezdem těžké dopravy.

Modelování dynamických účinků těžkých vozidel, popř. podvozků letadel, není v současnosti aplikováno při návrhu a posouzení stávajících konstrukcí vozovek. Analýza dynamických účinků je nezbytná pro korektní posouzení a ekonomický návrh tuhých vozovek a v následujících letech doporučuji přistoupit k modelování a posuzování konstrukcí vozovek v programech pracujících s metodou konečných prvků. Problematika posouzení výsledků napjatosti a přetvoření modelovaných MKP bude předmětem řešení v dalších letech výzkumu a vývoje.

Modelování přejezdu pneumatiky těžkého vozidla lze realizovat při stanovení okrajových podmínek např. pomocí experimentálních měření s tenzometry umístěnými na spodním líci CB krytu. Výsledky dynamického modelování a provedených měření poskytnou porovnání mezi teoretickými výpočty a reálně naměřenými hodnotami deformací. Výsledky výzkumné činnosti poskytují nový pohled na problematiku dimenzování vozovek s CB kryty.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] LARSON, R., SMITH, K. (2011) „Evaluation of alternative dowel bar materials and coatings: Final report“
- [2] FHWA (2006) „Field Evaluation of Elliptical Steel Dowel Performance“
- [3] ČSN 73 6123-1: Stavba vozovek – Cementobetonové kryty – Část 1: Provádění a kontrola shody
- [4] TP 170: Navrhování vozovek pozemních komunikací
- [5] ČSN EN 13877-1: Cementobetonové kryty – Část 1: Materiály
- [6] ČSN EN 13877-2: Cementobetonové kryty – Část 2: Funkční požadavky
- [7] ČSN EN 13877-3: Cementobetonové kryty – Část 3: Specifikace pro kluzné trny
- [8] TP 136: Povlakovaná výztuž do betonu
- [9] STN 73 6123 Stavba vozoviek, Cementobetónové kryty, 2010
- [10] TP 12/2015 - Navrhovanie cementobetónových vozoviek na cestných komunikáciach, SSC, Bratislava 2015
- [11] KHAZANOVICH, L.; HOEGH, K.: Guidelines for Dowel Alignment in Concrete Pavements. NCHRP Report 637. Transportation Research Board (TRB), Washington D. C., 2009
- [12] ANDERSON, K. W. et al: Glass Fiber Reinforced Polymer Dowel Bar Evaluation, WSDOT Research Report WA-RD 795.1, Olympia, Washington, September 2012
- [13] Dowel Bar Alignment and Location for Placement by Mechanical Dowel Bar Insertion, ACPA, July 2013
- [15] Supplement to the AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, Part II – Rigid Pavement Design & Rigid Pavement Joint Design, AASHTO 1998
- [16] NF EN 13877-2 Chaussées en béton - Partie 2 : exigences fonctionnelles pour les chaussées en béton, Octobre 2013
- [17] Norme NF P 98-086 : Dimensionnement des structures de chaussées routières, Mars 2011
- [18] Code de bonne pratique pour l'exécution des revêtements en béton, Bruxelles 2005
- [19] PN-75/S-96015: Drogowe i lotniskowe nawierzchnie z betonu cementowego, PKN, Warszawa 2006
- [20] PN EN 13877-3 Nawierzchnie betonowe – Część 3: Wymagania dla dybli stoso-wanych w nawierzchniach drogowych betonowych, PKN, Warszawa 2007
- [21] ZTV A-StB 11 - Additional technical terms of contract and guidelines for excavation in traffic areas, 2011 German Road and Transportation Research Association (FGSV) e. V., Köln 2011
- [22] DIN 187316 VOB, Part C: General technical contract conditions for construction works

- [23] (ATV) - Road construction – superstructure layers with hydraulic binders, Version 2006
- [24] DIN EN 13877-3 Concrete pavements - Part 3: Specifications for dowels to be used in concrete pavements.
- [25] RVS 8S.06.32/RVS 08.17.02, Entwurf 2006: Beton- decken: Deckenherstellung. Österr. Forschungsgesell- schaft Straße-Schiene-Verkehr, Wien.
- [26] STRYK J., CHUPIK V., GROSEK J. et al. (2013) “Závěrečná zpráva projektu TA02031195 - Poloha kluzných trnů a kotev v cementobetonových krytech vozovek a význam jejich správného umístění na chování a životnost krytů“
- [27] Zpráva o řešení projektu TE01020168 (2013) “Centrum pro efektivní a udržitelnou dopravní infrastrukturu”
- [28] STRYK J., HERRMANN P., CHUPÍK V. et al. (2013) „Měření průhybů a hodnocení únosnosti vozovek rázovým zařízením FWD“
- [29] SALAJKA V., ČADA Z. (2014) „Výpočet dynamické odezvy cementobetonové desky vozovky simulující zkoušku pojezdem vozidla“
- [30] ZUZULOVÁ A. (2007) „Vozovky s cementobetónovým krytom. Napätostný stav a spolupôsobenie dosiek“. Dizertačná práca, Bratislava: SvF STU.
- [31] ZUZULOVÁ A. (2014) „Účinnosť klzných trňov v CB kryte vozovky“ XIX. Seminár Ivana Poliačka, Bratislava, 2014, 179-184 p. ISBN 978-80-89565-16-0.
- [32] SHOUKRY S., GERGIS W., MOURAD R. (2011). Application of LS-DYNA in Identifying Critical Stresses Around Dowel Bars, 8th International LS-DYNA Users Conference, 6-45 – 6-51.
- [33] MOSTAFA Y., THAMBIRATMAN D., NATA-ATMADJA A. and BAWEJA D. (2006) „Dynamic Response of Concrete Pavements under Vehicular Loads“.

ŽIVOTOPIS

Osobní a kontaktní údaje

Jméno a příjmení: Ing. Jiří Grošek
Datum narození: 28. 12. 1987
Trvalé bydliště: Družstevní 3823/9, 796 01 Prostějov
Kontaktní údaje: tel.: +420 737 675 579, e-mail: jiri.grosek@cdv.cz

Vzdělání

2014-2016 Vysoké učení technické v Brně
Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací
Doktorandské studium v oboru Konstrukce a dopravní stavby
2015/2016 – předpokládané obhájení disertační práce (titul Ph.D.)
2007-2013 Vysoké učení technické v Brně
Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací
Magisterské studium v oboru Konstrukce a dopravní stavby
2003-2007 SSOŠ Prostějov, s.r.o., obor Stavitelství

Výuka

AR 2015/2016 přednáška a cvičení z předmětu CM51 Diagnostika a management vozovek
AR 2014/2015 přednáška a cvičení z předmětu CM51 Diagnostika a management vozovek

Praxe/zaměstnání

2013 – současnost zaměstnán v Centru dopravního výzkumu, v. v. i. na pozici výzkumného pracovníka v oblasti navrhování, modelování a diagnostiky pozemních komunikací

Jazykové znalosti

Anglický jazyk samostatný uživatel (B1)
Německý jazyk samostatný uživatel (B1)
Francouzský jazyk uživatel základů jazyka (A1)