



Metodika stanovení dynamického chování pružně uložených cementobetonových desek při užití numerických simulací

Metodika vznikla v rámci řešení projektu TAČR TA01031805
Cementobetonové vozovky na mostech.

V Brně, srpen 2014

OBSAH

1. Cíl metodiky

2. Vlastní popis metodiky

2.1. Metodický postup pro splnění cílů zadání z hlediska obecné formulace

2.2. Vlastní popis metodiky aplikovaný na cementobetonové desky

A1. Popis konstrukcí a výpočtové modely

A1.1. Konstrukce mostu Lanžhot a výpočtový model

A1.2. Popis konstrukce mostu areál Skanska a výpočtový model

A1.3. Model měkké vrstvy pod cementobetonovým krytem

A2. Dynamická odezva na mostech – rázové zkoušky

A2.1 Popis experimentů

A2.2. Předběžné výpočty – vynucené teplotní deformace a dotvarování

A2.3 Materiálové vlastnosti modelu

A3. Výpočet odezvy v časové oblasti

A3.1. Zatížení

A3.2 Výpočty a výsledky výpočtu

A4. Závěry z dynamické odezva na mostech při užití rázové zkoušky

B. Studie vlivu polohy svislých kotev na napětí teplotně zatížené zkušební konstrukce cementobetonové vozovky

B1. Úvod

B2. Popis konstrukce

B3. Popis modelu a výpočtu

B3.1. Okrajové podmínky

B3.2. Materiálové vlastnosti

B3.3. Body pro vyhodnocení přetvoření desky

B3.4. Nastavení výpočtu a zatížení

B4. Vyhodnocení výsledků

B4.1. Výpočty a měření

B4.2. Studie polohy kotev

B5. Závěry ze studie polohy kotev

C Frekvenční analýza na mostech

C1. Úvod

C2. Sledovaná konstrukce mostu a místa měření

C3. Vybrané výsledky měření

C4. Vybrané výsledky výpočtů

C4.1. Výpočtový model

C4.2. Výpočet vlastního kmitání

C5. Porovnání výpočtů s výsledky měření

C6. Závěry z porovnání výpočtů s výsledky měření

3. Srovnání „novosti postupů“

4. Popis uplatnění certifikované metodiky

5. Ekonomické aspekty

6. Seznam použité literatury

1. Cíl metodiky

Cíl navrhované certifikované metodiky je dokumentovat matematickými simulacemi metodou konečných prvků chování cementobetonové desky na mostech. Takto lze provést řadu speciálních analýz pro detailnější určení sledovaných parametrů uložení desek ovlivněné teplotním polem a libovolným zatížením. Simulace dovolují získat doplňující informace o přemístěních, deformacích a napjatostích v deskách a ve vrstvách pod nimi. Nerozhodují tvary a ani rozměry desek. Na základě znalostí chování desek lze rozhodnout, zda a kde je nutno desky přikotvit nebo vyztužit.

2. Vlastní popis metodiky

2.1 Metodický postup pro splnění cílů zadání z hlediska obecné formulace

Při řešení problému je zásadním požadavkem dosáhnout toho, aby konstrukce byla navržena a realizována tak, že po dobu své životnosti, na kterou byla projektována, plnila spolehlivě své funkce. Konstrukce musí splňovat podmínky bezpečnosti, použitelnosti a trvanlivosti.

Konstrukce musí být navržena tak, aby po dobu předpokládané životnosti s příslušným stupněm spolehlivosti a hospodárnosti vyhověla požadovanému účelu a odolala všem zatížením a vlivům při provádění a při provozu.

Spolehlivá predikce chování konstrukce se zřetelem na vlivy prostředí v různých návrhových situacích je základní podmínkou provozní spolehlivosti konstrukce. U většiny těchto konstrukcí má podstatný význam spolehlivá charakteristika chování konstrukce daná podrobným popisem jejího pohybu v závislosti na časově proměnných mechanických vlivech prostředí.

a) V současně používané formulaci inženýrské mechaniky jde o stanovení odezvy definované konstrukce nebo její části na zadané časově proměnné mechanické zatížení.

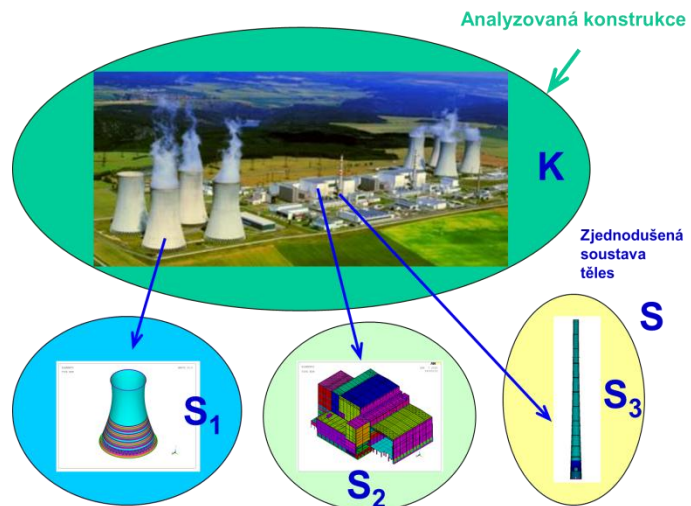
b) Požadovanými odezвовými veličinami nutnými pro posouzení mezních stavů únosnosti a použitelnosti konstrukce jsou přemístění a napětí, resp. veličiny odtud odvozené.

c) Základním prostředkem stanovení odezvy konstrukce je výpočet.

První etapou početního řešení statické, dynamické a teplotní odezvy konstrukce pro výše uvedené účely obecně je vytvoření výpočtového modelu analyzovaného procesu. Až na výjimky se zde se zřetelem k současné úrovni spolehlivosti relevantních vstupních dat volí deterministický přístup s využitím empirických poznatků.

V současné inženýrské praxi se zásadně vytváří výpočtový model „konstrukce“ a výpočtový model „zatížení“.

Při vytváření fyzikálního výpočtového modelu analyzované konstrukce jde v podstatě o nahrazení dané reálné, tvarově složité, materiálově nehomogenní a strukturně členité konstrukce (**K**) zjednodušenou soustavou (**S**) takových jednoznačně geometricky a fyzikálně definovatelných těles, jejichž pohyb vzhledem k dané základní inerciální vztahné soustavě (k nehybnému základu) lze s použitím prostředků inženýrské mechaniky na přiměřené úrovni popisovat.

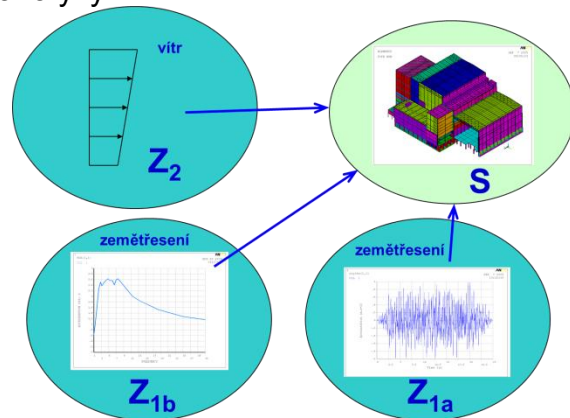


K vytvoření výpočtového modelu konstrukce vhodného pro její pevnostní a tuhostní analýzu se v současné praxi zpravidla používá metoda konečných prvků s omezením matematického aparátu daným vybraným výpočtovým programem.

Až na speciální případy řešení odezvy se výpočtový model vytváří jako lineární.

Je žádoucí rozsah soustavy (**S**) co nejvíce omezit, v ideálním případě pouze na tu část konstrukce, která je vlastním objektem analýzy.

Všechny objekty vně soustavy (**S**) (tj. vně myšlené kontrolní plochy (**S**)) vytvářejí v zobecněném smyslu její prostředí (**P**). Mechanický vliv prostředí (**P**) na soustavu (**S**) se popisuje obecně jako zatížení (**Z**) konstrukce. Korektní popis vlivů prostředí (např. popis účinků větru, seizmického zatížení, popis tlaků kapaliny na konstrukce apod.), je v technické praxi velmi složitý. Při jakékoliv dokonalosti popisu, principiálně vždy půjde o více či méně hrubou aproximaci reality. Vytváří se proto výpočtový model zatížení (**Z**)

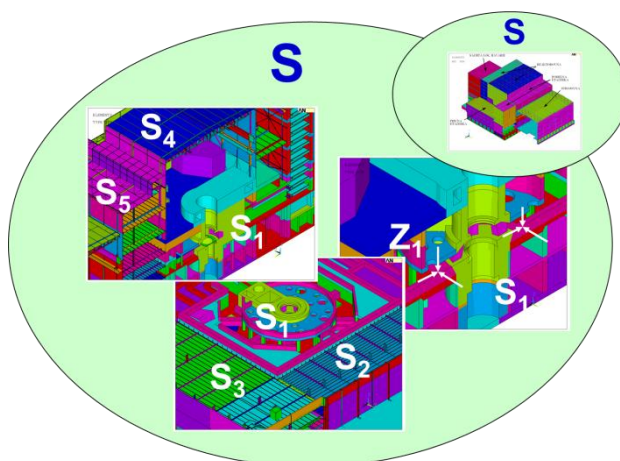


vyjadřující pouze podstatné vlivy prostředí, které dle teoretických a empirických předpokladů rozhodují o odezvě (**S**) v dané konkrétní úloze. S omezením na danou problematiku, výpočtový model zatížení (**Z**) může být vytvořen pouze s použitím pojmů síla a přemístění, resp. pojmů odvozených (např. rychlost, zrychlení, zatížení objemové, povrchové, liniové).

Pohyby jednotlivých objektů uvnitř i vně soustavy (**S**) se obecně vzájemně ovlivňují, dochází k mechanickým interakcím, důsledkem je právě pohyb vlastní vyšetřované konstrukce. Znalost fyzikální podstaty interakcí umožňuje popsat pohyb konstrukce. Úroveň popisu podstatných interakcí v zásadě určuje spolehlivost popisu pohybu konstrukce. Pro popis interakcí za pohybu konstrukce ve styku s prostředím může být výhodné volit soustavu (**S**) tak, že nebude zahrnovat pouze analyzovanou konstrukci, ale že její část bude tvořit i prostředí ve vymezené oblasti.

Rozsah soustavy (**S**) nutno ale volit tak, aby zahrnovala pouze takové objekty, jejichž vzájemné interakce (tj. vnitřní interakce soustavy) lze korektně popsat.

Z hlediska praxe je tedy omezení volby (**S**) dáno pouze možnostmi vybraného systému výpočtových programů. Při volbě (**S**) je nutné současně podrobně posoudit i vnější interakce mezi soustavou (**S**) a prostředím (**P**), z nichž se odvozuje (**Z**). Vhodnou volbou rozsahu soustavy (**S**) tak, aby interakce (**S**, **P**) byla buď spolehlivě popsatelná, nebo zanedbatelná, lze příznivě ovlivnit spolehlivost popisu pohybu konstrukce.



Numerické řešení konkrétních úloh stavební mechaniky má tři fáze

Fáze 1: příprava výpočtu – sestavení výpočtového modelu a modelu zatížení

- ☞ výpočtový model procesu - o co jde
 - fyzikálně pochopit a popsat děje při návrhových/reálných situacích
 - analyzovat dostupné poznatky z praxe relevantní pro daný problém
 - formulovat fyzikální úlohu v termínech disponibilního softwaru
- ☞ výpočtový model konstrukce
 - získat projekční a konstrukční dokumentaci
 - racionálně doplnit chybějící informace o konstrukci
- ☞ vytvořit fyzikální výpočtový model konstrukce
 - soustava vázaných těles
 - definování vazeb
- ☞ výpočtový model zatížení - akcelerogramy, spektra, budící síly popisující dynamické účinky (rázy, teplotní změny, výbuch apod.)

Fáze 2: řešení MKP – *nutná rutinní znalost programu*

sestavení a řešení rovnic (matematický model) - omezení použitým software a hardware

Fáze 3: vyhodnocení výpočtu – posouzení podle norem – *vysoká odborná znalost řešené problematiky.*

kontrola výsledků – zda mají smysl
extrapolace výsledků na původní model
posouzení podle norem

Vlastní popis metodiky aplikované na cementobetonové desky

Uváděná metodika je využita pro modelování desek včetně podkladních vrstev metodou konečných prvků. Podkladem mohou být i konstrukce mostů, propustků, speciální uložení v tunelech a pod. Samozřejmě se předpokládá, že uvedené podkladní konstrukce jsou součástí modelů. Výpočtové (matematické) modely se vytvářejí převážně z prostorových konečných prvků. Při řešení projektu se ukázalo, že použití méně sofistikovaných modelů nedává patřičné výsledky. Jednalo se například o výpočty na modelech sestavených z plošných prvků.

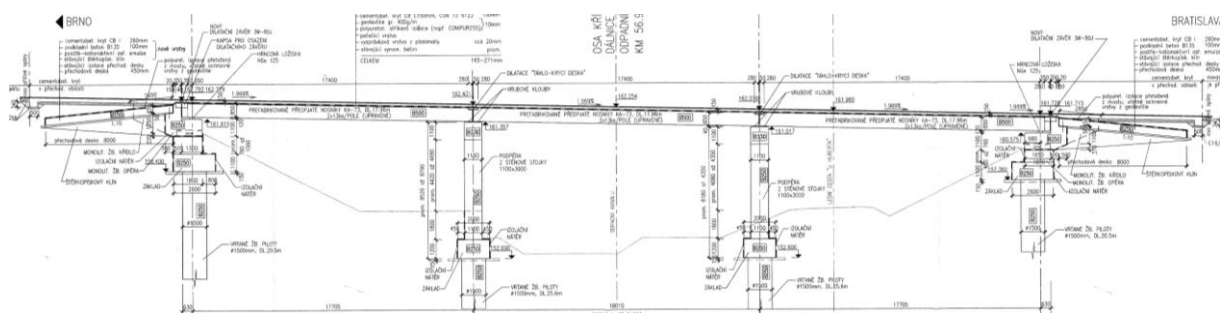
Vstupní informace o mechanických vlastnostech desek jsou přebírány z experimentů, popřípadě norem. Průběhy teplot okolí lze jednoduše zavést do výpočtu teplotního pole v konstrukci desky a podkladních vrstvách. Zohledňuje se vliv interakce jednotlivých vrstev pomocí kontaktních prvků s třením. Teplotní pole lze do výpočtu jednoduše zavést, neboť modely pro výpočet mechanické odezvy a nestacionární teplotní odezvy se geometricky neliší. Výsledky představují hodnoty dynamické odezvy v libovolně vybraných bodech, deformace a napětí v libovolném místě modelu. Lze získat doplňkové veličiny, jakými jsou rychlosti a zrychlení kmitání desky. Tímto postupem lze doplnit výsledky získané ze zkoušek. Lze užít nelineární materiálové modely betonu a oceli. Nakonec je nutno zmínit, že lze jednoduše využít metody subkonstrukcí a podle potřeb přejít na lokálně detailní analýzu.

A1. Popis konstrukcí a výpočtové modely

K modelování mechanického chování nosných mostních konstrukcí se sestavují prostorové výpočtové modely z konečných prvků v programu ANSYS [1]. Při modelování se vychází z výkresové dokumentace. V následujícím textu je uveden příklad modelování vozovky na mostě a vozovky na tuhém podkladu.

A1.1. Konstrukce mostu Lanžhot a výpočtový model

Dispozice (včetně podélného a příčného sklonu mostovky) a konstrukční detaily výpočtového modelu vychází z dodaných podkladů [2].

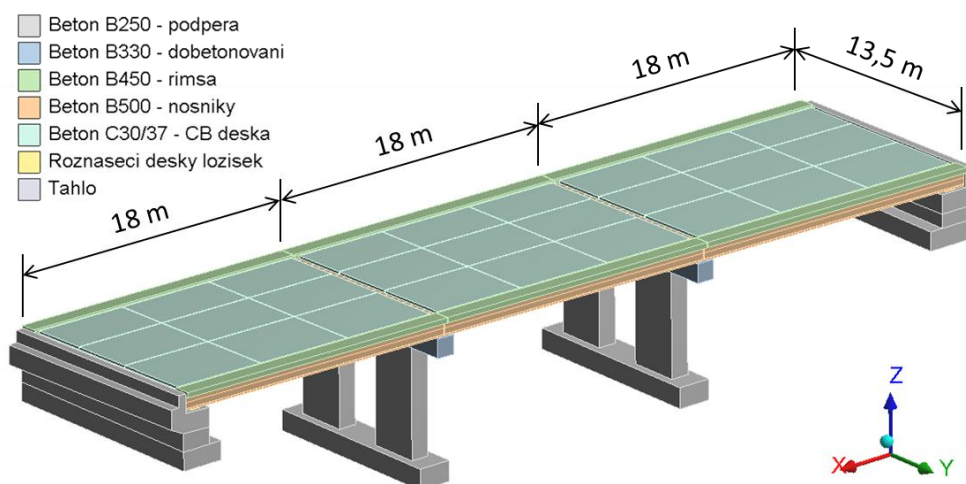


Obr. A1 Podélný řez – most Lanžhot



Obr. A2 Fotografie mostu – pohled na sledovanou část mostu

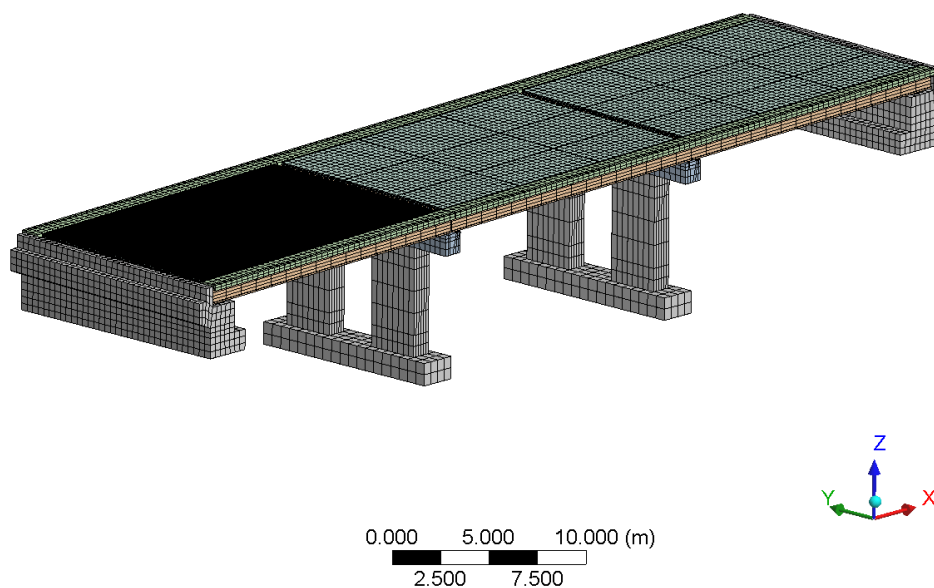
Nosná konstrukce ŽB mostu o třech polích je sestavena z prostě uložených prefabrikovaných nosníků, kdy na jedno pole jich bylo použito 13. Prefabrikované předepnuté železobetonové komorové nosníky KA-73 dl. 17,96 m (beton B500) jsou vzájemně spojeny dobetonováním svíslé spáry (beton B330). Přenos sil do středních mostních podpěr je zajištěn vrubovými klouby, do krajních podpěr hrncovými ložisky. Střední podpěry jsou tvořeny spojitým nosníkem (beton B330) rámově uloženým na dvojici sloupů (beton B250). Založení mostu je řešeno základovými bloky a vrtanými pilotami (beton B250).



Obr. A3 Geometrický model mostu Lanžhot

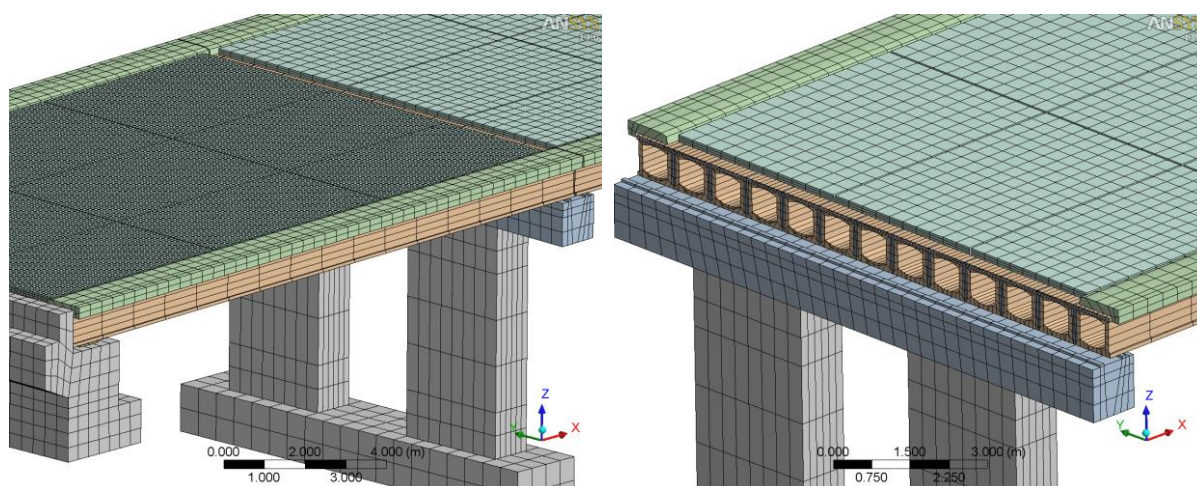
Skladba vozovky:

- Cementobetonový kryt CBI tl. 150 mm,
- Geotextilie 400 g.m^{-2} ,
- Polyuretanová stříkaná izolace tl. 10 mm,
- Pečetící vrstva,
- Vyrovnávací vrstva z plastmalty,
- Železobetonové komorové mostní nosníky KA-73.



Obr. A4 Sít' konečných prvků – most Lanžhot

Prostorový výpočtový model byl sestaven z objemových konečných prvků ve tvaru osmi uzlových hexaedrů SOLID185 [1]. Modelovány jsou základové bloky, podpěry, vrubové klouby, hrncová ložiska, prefabrikované nosníky, táhla mezi nosníky, CB desky vozovky a římsy. Vzhledem k opakovaným náročným dynamickým výpočtům byla zvolena relativně hrubá síť konečných prvků pro model mostní konstrukce a okolních CB desky. Na CB desky v místě zatížení byla použita jemnější síť. Detailnost modelu ilustruje obrázek A5.



Obr. A5 Detailnost modelu – dělení na prvky

Hrncová ložiska jsou modelována pomocí horní a spodní ocelové roznášecí desky (objemové prvky SOLID185). Desky jsou vzájemně spojeny svislým pomocným prutem (BEAM188). Spojení prutu s deskou je zajištěno vazebnými rovnicemi, které jsou sestaveny tak, aby se ložisko chovalo jako dokonalý všesměrný kloub s možností posunutí v podélném směru mostu.

Model měkké izolační vrstvy mezi CB deskami a podkladní deskou je modelován pomocí kontaktních prvků a je popsán v části. A1.3.

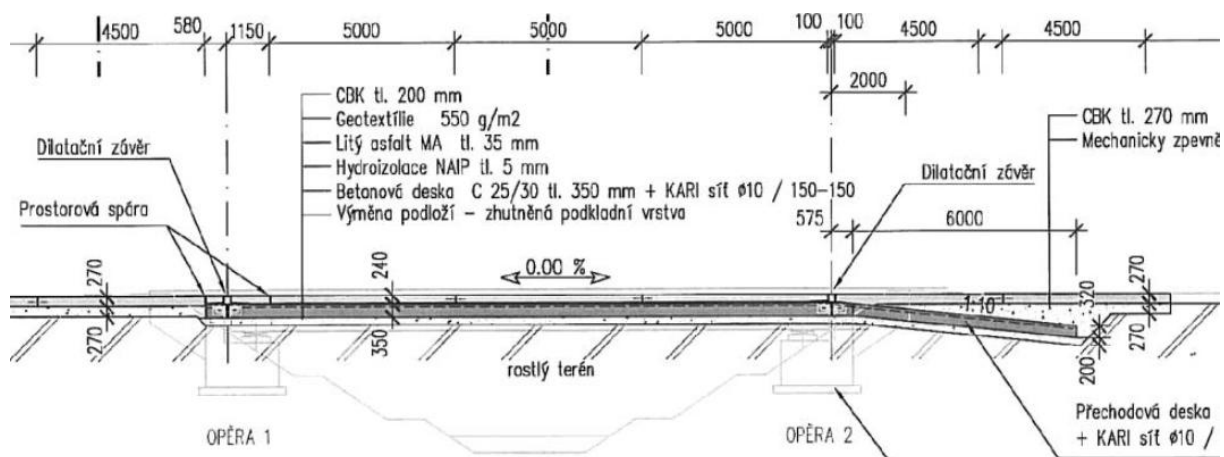
Orientace x osy globálního souřadnicového systému odpovídá směru dálnice na Brno, orientace z osy odpovídá svislému směru.

Uzlům, které přísluší spodním plochám základových bloků, byly odebrány všechny stupně volnosti (vetknutí).

CB desky jsou modelovány jednotlivě tak, aby byly respektovány dilatační spáry. Kluzné trny a kotvy spojující CB desky v dilatačních spárách jsou modelovány pomocí přídatných rovnic CP (Coupling equations) [1], pomocí kterých bylo dvojicím uzlů v místě kotev a trnů předepsáno shodné svislé posunutí. Tím je zajištěn svislý přenos sil mezi jednotlivými CB deskami. Ohybová poddajnost trnů a kotev je zanedbána. Třecí síly ve směru kluzných trnů jsou zanedbány.

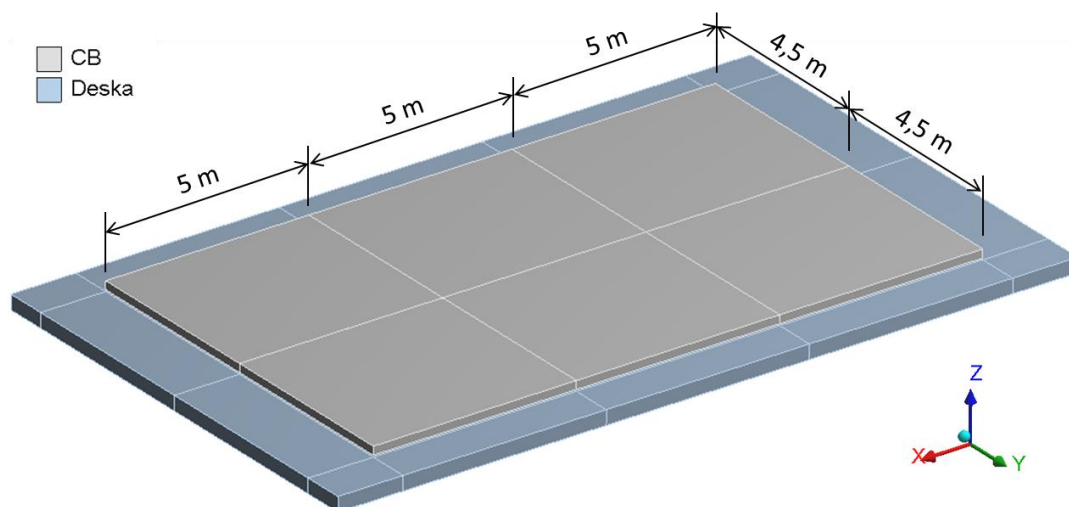
A1.2. Popis konstrukce mostu areál Skanska a výpočtový model

Pro experimentální zkoušení byl sestaven model vozovkového krytu na fiktivním mostu v areálu Skanska a.s. ve Starém Městě. Nosná mostní konstrukce je v experimentálním modelu nahrazena ztuhnutou podkladní vrstvou a betonovou deskou. Na obr. A6 je znázorněn podélný řez projektované konstrukce fiktivního mostu.



Obr. A6 Podélný řez – most areál Skanska

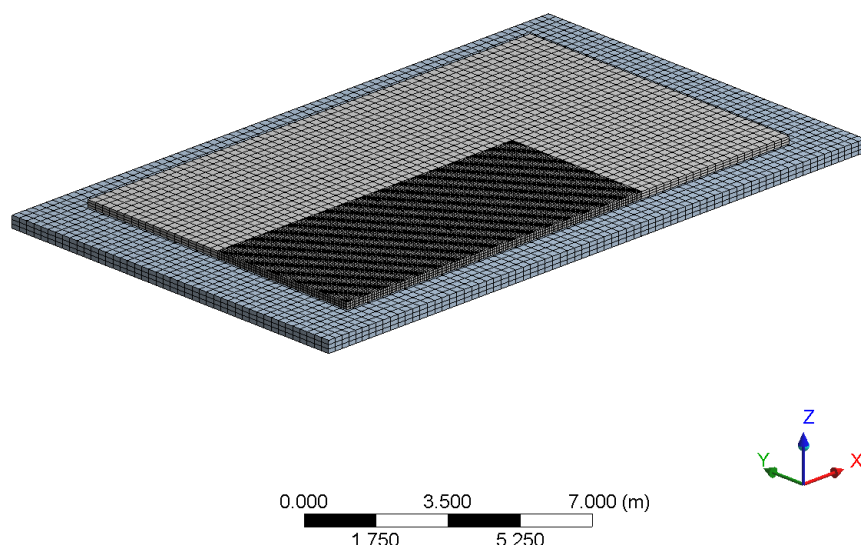
Umístění zkoušky bylo z důvodu technických, logistických a dalších zvoleno do areálu firmy Skanska, závod Betonové a speciální technologie ve Starém Městě. V místě zkoušky je plocha areálu zpevněna betonovými panely o rozměrech 3 x 1 m a na východní straně je nezpevněná plocha z navážky. Situační umístění a další technické detaily jsou uvedeny v [3] a [4]. Podkladní vyztužená betonová deska je vybetonována o mocnosti 350 mm z betonu třídy C25/30.



Obr. A7 Geometrický model mostu areál Skanska

Skladba v místě vozovky:

- Cementobetonový kryt CBK tl. 200 mm, C30/37,
- Geotextilie 550 g.m⁻²,
- Litý asfalt tl. 35 mm,
- Hydroizolace z NAIP tl. 5 mm,
- Betonová deska C25/30 tl. 350 mm (vyztužená kari-sítěmi),
- Zhutněná podkladní vrstva.



Obr. A8 Síť konečných prvků – most areál Skanska

Prostorový výpočtový model byl sestaven z objemových konečných prvků ve tvaru osmi uzlových hexaedrů SOLID185 [1]. Modelovány jsou CB desky a podkladní železobetonová deska. Vzhledem k opakovaným náročným dynamickým výpočtům byla zvolena relativně hrubá síť konečných prvků podkladní vrstvy a okolních CB desek. Na CB desky v místě zatížení byla použita jemnější síť. Obrázky modelu jsou uvedeny ve zprávě [22]. Detailnější model s jemnější sítí prvků byl použit při statických výpočtech [29].

Model měkké izolační vrstvy mezi CB deskami je popsán v části. A1.3.

Podloží pod podkladní deskou bylo modelováno zjednodušeně pomocí Winklerova modelu podloží. Tuhostní konstanta byla zvolena $500 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{-1}$. Bližší informace o mocnostech jednotlivých vrstev podloží nebyly při tvorbě modelu známy. Hmotnost kmitající zeminy spolu s betonovými deskami není ve výpočtu uvažována.

CB desky jsou modelovány jednotlivě tak, aby byly respektovány dilatační spáry. Model kluzných trnů a kotev je shodný, jako je tomu v modelu mostu Lanžhot.

A3.3. Model měkké vrstvy pod cementobetonovým krytem

Oba případy modelovaných mostů obsahují měkkou geotextilii, izolační vrstvu mezi CB deskami a betonovou nosnou konstrukcí. Tyto měkké vrstvy zásadně ovlivňují odezvu při dynamickém zatížení CB desek. U mostu Lanžhot byla použita GTX 2 mm a stříkaná vrstva polyuretanu o mocnosti 10 mm. U mostu areálu Skanska byla použita GTX 2 mm a lité asfalt o mocnosti 35 mm. Z mechanického hlediska se jedná o podobné měkké uložení CB desek, proto byl zvolen u obou modelů shodný model této vrstvy. Vzhledem k nedostatku podkladů k chování těchto vrstev bylo zvoleno modelování vrstvy kontaktními prvky CONTA174 a TARGE170 [1]. Nastavení těchto kontaktních prvků bylo Frictional Contact [1] s algoritmem Pure Penalty [1]. Jsou zavedeny předpoklady:

- Mezi CB deskami a tuhým podkladem je pouze tlaková interakce, tahové síly jsou zanedbány.
- Tlakové stlačení měkké vrstvy je přímo úměrné (lineární) vůči tlakovým silám. Tuhostní konstanta je stejná ve všech místech pod CB deskou. To znamená, že v tlakových oblastech je aplikována konečná tuhost mezi CB deskou a podkladní tuhou konstrukcí.

- Smykové chování je opět přímo úměrná závislost mezi smykovou deformací a smykovými silami. Při překročení součinitele tření může dojít ke smykovému prokluzu.
- Hmotnost a tlumení této vrstvy je zanedbáno.
- Dotvarování (např. dlouhodobé, teplotní) je zanedbáno.

Zavedením těchto předpokladů se podařilo mechanické chování měkké vrstvy zjednodušit na matematický popis, kdy je třeba určit pouze 3 parametry: plošná tlaková a smyková tuhost, součinitel tření. Předpokládá se, že nejvýznamnějším parametrem vzhledem k aplikovanému zatížení je plošná tlaková tuhost. Orientačně lze tuto hodnotu vypočítat (při zanedbání příčné kontrakce) $k_n = E/t$, kde E je modul pružnosti a t je tloušťka vrstvy. Pro polyuretan s modulem pružnosti 5 až 30 MPa je výsledná plošná tuhost 500 až 3000 MPa.m⁻¹. Pro litý asfalt s modulem pružnosti 500 až 10000 MPa je výsledná plošná tuhost 14000 až 280000 MPa.m⁻¹. Návrhová hodnota modulu pružnosti dle [18] je 7500 MPa, což odpovídá tuhosti 215000 MPa.m⁻¹.

Obdobně lze stanovit smykovou tuhost. Vzhledem k nedostatku podkladů a menšího vlivu na dynamické chování při svislém rázovém zatížení byla smyková tuhost zjednodušeně zvolena jako 1/10 tlakové tuhosti. Obdobně nejsou dostupné podklady o součiniteli tření, zvolena byla hodnota 0,30.

A2. Dynamická odezva na mostech – rázové zkoušky

Veškeré výpočty byly verifikovány srovnáním vypočtených veličin s provedenými experimenty in situ. Výsledky měření byly porovnány s provedenými numerickými simulacemi metodou konečných prvků. Pro výpočet byl využit certifikovaný programový systém ANSYS verze 13.0 [1].

A2.1 Popis experimentů

Experimenty byly provedeny pomocí rázového zařízení (FWD), kde silový pulz je vyvozen pádem zatížení přes pryžové tlumiče. Dynamický ráz byl vyvozen závažím o hmotnosti 588 kg, puštěným ze stanovené výšky. V každém zkoušeném místě byl experiment opakován pro různé výšky volného pádu závaží s razníkem. Maximální dosažené síly se pohybovaly v rozmezí od 115 do 300 kN v závislosti na výšce volného pádu.

Zkoušená místa CB desek byla:

- uprostřed desek, označení: S
- na hraně desky, označení: H
- v rohu desky, označení: ROH

Odezva při experimentech byla zaznamenána v časové oblasti ve dvanácti místech (geofonech) na povrchu CB desky. Výsledkem byly průběhy posunutí ve svislém směru v závislosti na svislé síle mezi razníkem a závažím, to jest v závislosti na aplikovaném zatížení.

Souběžně byly dlouhodobě sledovány teploty ve vybraných místech na CB vozovkách. Cílem těchto měření bylo získat informace o teplotních změnách v závislosti na klimatických podmínkách. Pro výpočet byly důležité údaje o teplotních spádech pro stanovení teplotních deformací CB desek a zakřivení podkladních vrstev.

Rázové experimenty byly provedeny při různých teplotních spádech a tedy při různých křivostech desek a podkladu.

Analyzováno bylo 6 dynamických rázových zkoušek, viz [5]. Jedná se o 2 zkoušky na mostě Lanžhot a 4 zkoušky na mostě areál Skanska. Volba analyzovaných zkoušek na mostě Lanžhot byla učiněna dle poskytnutých výsledných časových průběhů průhybů během zkoušky (Lan-9S a Lan-3H). Volba analyzovaných zkoušek most areál Skanska byly zvoleny dle poskytnutých měřených teplot (Ska-2S a Ska-3H) a dle poskytnutých výsledných časových průběhů průhybů během zkoušek (Ska-E1B1 a Ska-E1B2). Označení zkoušeného bodu E1B1 značí etalon 1 bod 1, dle poskytnutých podkladů [6].

Teplotní rozdíl na CB desce na mostě areál Skanska byl odečten ze záznamů měření teplot CB desek [7] a [8]. Odečteny byly teploty z horního povrchu CB desky a ze spodního povrchu. Byl získán teplotní rozdíl, jehož hodnota byla zpracována formou tabulky [9].

Teplotní rozdíl na CB desce na mostě Lanžhot byl odhadnut z teplotních rozdílů uvedených ve zprávě [7] k měření teplot na mostě. Teploty přesně ze dne měření nebyly k dispozici.

A2.2. Předběžné výpočty - vynucené teplotní deformace a dotvarování

Předběžnými výpočty bylo ověřeno, že rozložení kontaktního tlaku, respektive plocha, kterou CB deska dosedá na prostřednictvím měkké izolační vrstvy na podklad, je významný faktor ovlivňující dynamické chování CB desky při svislém rázovém zatížení. S velikostí a tvarem kontaktní plochy úzce souvisí mocnost a rozložení vůle, která může vzniknout mezi CB deskou a měkkou izolační vrstvou.

Rozložení tlaku/vůle ovlivňuje geometrický tvar:

- křivost CB desky,
- lokální mocnost měkké izolační vrstvy,
- křivost tuhé podkladní konstrukce.

Deformace (křivost) jednotlivých částí může být zapříčiněna:

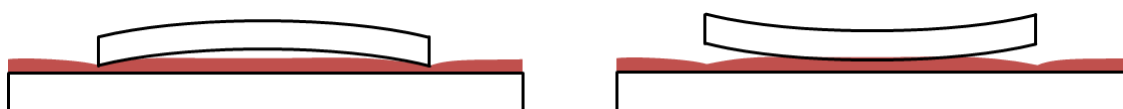
- vynucenou teplotní deformací,
- trvalé deformace od dlouhodobého a teplotního dotvarování.



Obr. A9 Příklady křivostí CB desky a podkladní konstrukce

Vynucené teplotní deformace lze očekávat především u CB desky, která je osluněna. Ale i teplotní deformace podkladní konstrukce nemusí být zanedbatelná.

Trvalé deformace vlivem dlouhodobého a teplotního dotvarování lze očekávat především na měkké izolační vrstvě, kdy např. asfalt při vysokých teplotách se velice snadno a rychle lokálně dotvaruje dle aktuální křivosti CB desky, ale do původního tvaru se nevrací, to znamená, že kumulace dotvarování vytvoří trvalou křivost podkladu odpovídající maximálním teplotním deformacím. Jiné chování vykáže tenká polyuretanová izolace, která pokud by se výrazně dotvarovala, pak je to spojeno s porušením této vrstvy se ztrátou hydroizolačních schopností. Na této izolaci bude převažovat účinek GTX, její nasáknutí vodou, nečistotami, prachem a pískem.



Obr. A10 Příklad dotvarování měkké izolační vrstvy, různá křivost CB desky

Přesné rozložení kontaktního tlaku a vůle v době experimentů není známo. Proto ve výpočtech bylo přijato výrazné zjednodušení. Aplikován byl pouze teplotní spád na CB desce tak, aby byla dosažena počáteční křivost pro dynamické výpočty. Z uvedeného je zřejmé, že nelze očekávat přesné rozložení kontaktního tlaku a vůle při aplikaci teplotního rozdílu +10 až +12 °C, který vychází z měření. Proto hodnota teplotního rozdílu horního a spodního povrchu CB desky je pouze orientační a je jedním z hledaných parametrů.

A2.3 Materiálové vlastnosti modelu

V tabulce A1 je uvedeno užití jednotlivých materiálů betonu a převod označení dle neplatné ČSN 73 2001 [10] na označení dle ČSN EN 206-1 [11]. Hodnoty statických modulů pružnosti E_{cm} byly převzaty z ČSN 1992-1-1 [17] s přihlédnutím k ČSN 73 0032 [12] byly zvětšeny na hodnoty E_{dyn} .

Tabulka A1 Materiálové vlastnosti betonů – most Lanžhot

ČSN 73 2001:1970	ČSN EN 206-1	Použití	E_{cm} [GPa]	E_{dyn} / E_{cm} [-]	E_{dyn} [GPa]
B250	C16/20	Základy, podpěry	29	1,19	35
B330	C25/30	Dobetonování mezi nosníky, vodorovné nosníky podpěr	31	1,16	36
B450	C30/37	Římsy, CB desky	32	1,15	37
B500	C35/45	Prefabrikované nosníky	34	1,14	39

Hodnoty modulů pružnosti u CB desky a podkladní betonové desky u mostu areál Skanska byly ověřovány měřením, viz podklady: [13] a [14]. Průměrný statický modul pružnosti z těchto podkladů je pro CB desku zhruba 36 GPa a pro podkladovou desku 31 GPa. Ve výpočtu byly použity dynamické moduly pružnosti, viz tab. A2.

Tabulka A2 Materiálové vlastnosti betonů – most areál Skanska

ČSN 73 2001:1970	ČSN EN 206-1	Použití	E_{cm} [GPa]	E_{dyn} / E_{cm} [-]	E_{dyn} [GPa]
B330	C25/30	Podkladní betonová deska	31	1,16	36
B450	C30/37	CB desky	32	1,15	38

A3. Výpočet odezvy v časové oblasti

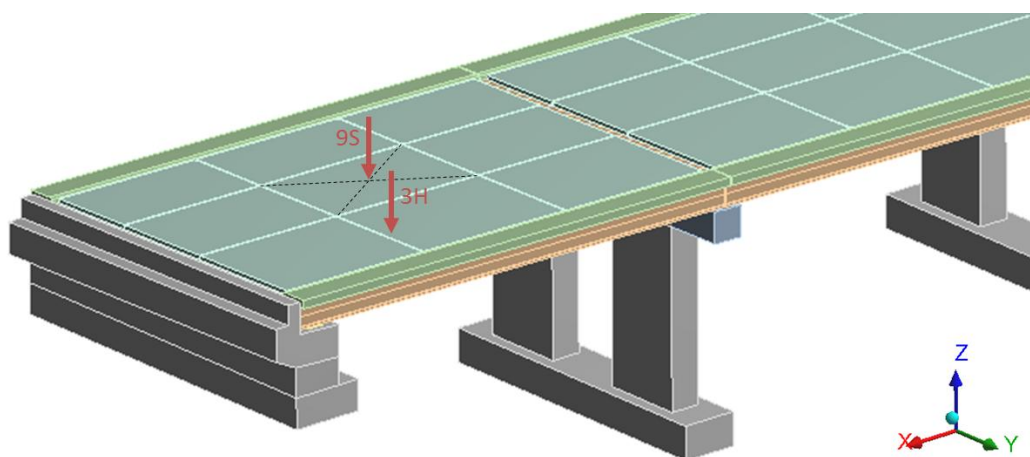
Na výpočtových modelech sestavených z konečných prvků byly provedeny dynamické nelineární výpočty v časové oblasti v programu ANSYS (*Transient Analysis*) [1]. Odezva v časové oblasti byla řešena plnou integrací pohybových rovnic (implicitně). Změna matice tuhosti během výpočtu vlivem kontaktní nelinearity si vyžádala iterační hledání rovnováhy v každém integračním kroku. Užita byla *Newton Raphsonova* iterační metoda [1].

V prvních krocích výpočtu bylo postupně aplikováno statické zatížení vlastní tíhou a vynucenou deformací od aplikovaných teplot. V těchto krocích byla vypnutá numerická integrace, předpokládáno bylo statické chování. Následně bylo aplikováno rázové silové zatížení během jednotlivých kroků numerické integrace v časové oblasti. Řešena byla časová oblast o délce 80 ms s integračním krokem 1 ms. Výsledkem výpočtu jsou pole posunutí, deformací a napjatosti pro každý časový krok výpočtu.

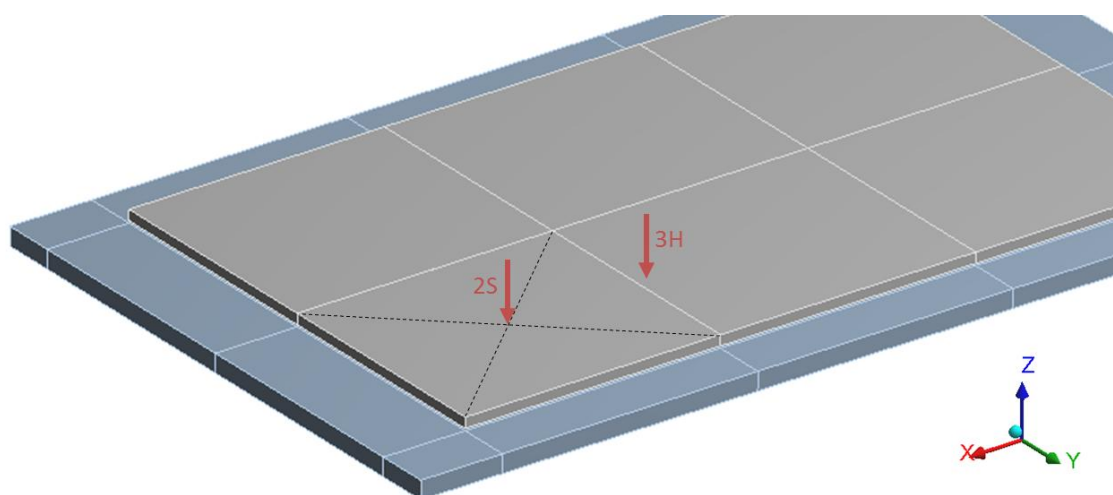
Ve výpočtech bylo předpokládáno poměrné tlumení o hodnotě 5 %. Přesnější hodnoty tlumení nejsou známy. Tlumící síly byly do výpočtu aplikovány pomocí násobitele matice tuhosti (tzv. beta tlumení). Hodnota beta tlumení byla vypočítána na základě nejnižší vlastní frekvence mostu Lanžhot, která je přibližně 2,9 Hz, viz zpráva [21].

A3.1. Zatížení

Na obr. A11 a A122 jsou vykresleny polohy aplikovaných sil pro jednotlivé varianty výpočtu. Síly s označením S působí přesně uprostřed CB desky. Síly s označením H působí 300 mm od hrany desky. Časový průběh velikosti aplikovaných sil vycházel z měření síly na razníku mostu Lanžhot [15]. Obdobně byl použit průběh zatížení uvedený z měření síly na razníku mostu areálu Skanska [16] při experimentech Ska-E1B1 a Ska-E1B2. Stejný časový průběh sil byl předpokládán i výpočtu mostu areálu Skanska při výpočtech Ska-2S a Ska-3H, protože zde nebyly k dispozici data o průběhu. Síly byly rovnoměrně rozloženy na uzly v okruhu o průměru 150 mm, což je předpokládaná tlačná plocha razníku.



Obr. A11 Poloha sil při výpočtech Lan-9S a Lan-3H



Obr. A12 Poloha sil při výpočtech Ska-2S a Ska-3H

Počáteční rozložení tlakového kontaktního napětí CB desky bylo dosaženo pomocí vynucení teplotní deformace CB desky. Na CB desce bylo nastaveno teplotní pole tak, že spodní líc CB desky měl teplotu 0 °C. Horní líc CB desky měl teplotu danou konkrétní variantou výpočtu. Přejchod teplot byl předpokládán lineární. Ostatní části modelů měly teplotu nastavenou na 0 °C, což byla i hodnota referenční teploty.

A3.2 Výpočty a výsledky výpočtu

Výpočet v časové oblasti byl opakován pro různé hodnoty teplot horního povrchu a různé hodnoty tuhosti kontaktu modelující měkkou izolační vrstvu. Konkrétní užití hodnoty jsou uvedeny v tabulce A3, A4 a A5.

Tabulky A3, A4 a A5 obsahují výsledné maximální relativní posunutí během výpočtu v časové oblasti $\Delta u_{z,max}$. Kladná hodnota značí posunutí svisle dolů. Posunutí jsou vztaženy k posunutí při zahájení dynamického výpočtu. To znamená, že statická složka posunutí (vlastní tíha a teplotní deformace) je již odečtena.

Tabulka A3 Variantní výpočet – most Lanžhot

N	Tuhost [MPa.m ⁻¹]	ΔT [°C]	$\Delta u_{z,max}$ [μm]		Poznámka
			Lan-9S	Lan-3H	
...	
10	200	7	954,9	588,8	
11	400	7	877,3	514,9	
12	500	6	710,8	463,8	Grafické výsledky v [xx]
13	1 000	6	692,6	442,1	
14	500	5	568,5	435,7	
...	
26	500	0	264,0	333,7	
27	1 000	0	264,5	317,4	
28	3 000	0	251,0	310,9	Grafické výsledky v [xx]
29	10 000	0	224,4	273,2	Dokonalá soudržnost
30	100 000	0	213,6	251,7	Dokonalá soudržnost
Měření při experimentu			866	393	

Tabulka A4 Variantní výpočet – most areál Skanska – experimenty Ska-9S a Ska-3H

N	Tuhost [MPa.m ⁻¹]	ΔT [°C]	$\Delta u_{z,max}$ [μm]		Poznámka
			Ska-9S	Ska-3H	
...	
14	30 000	3	84,4	96,3	
15	60 000	3	80,7	93,4	
16	120 000	3	78,6	92,3	Grafické výsledky v [22]
17	200 000	3	77,5	91,6	
18	280 000	3	77,1	91,2	
...	
Měření při experimentu			88	100	

Tab. A5 Variantní výpočet – most areál Skanska – experimenty Ska-E1B1 a Ska-E1B2

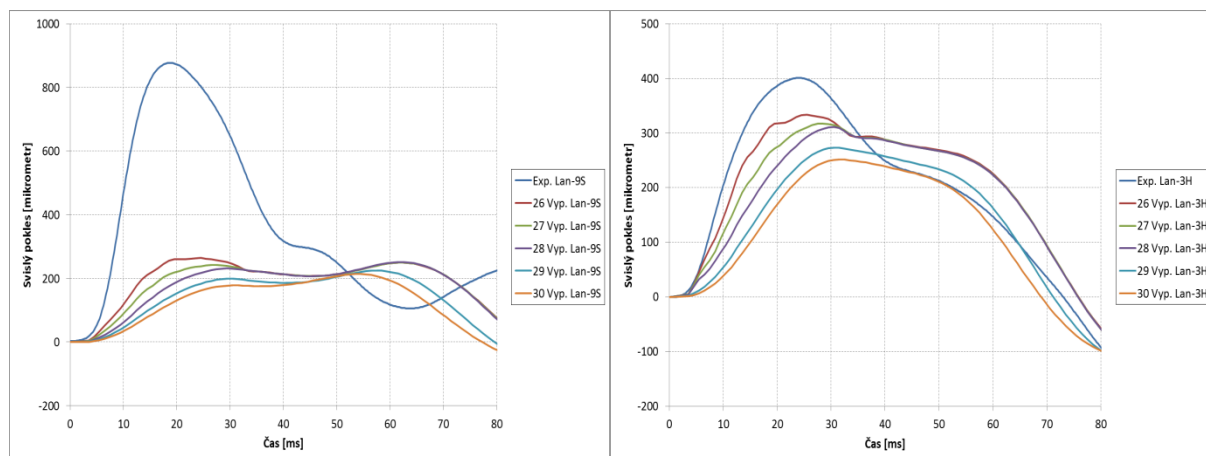
N	Tuhost [MPa.m ⁻¹]	ΔT [°C]	$\Delta u_{z,max}$ [μm]		Poznámka
			Ska-E1B1	Ska-E1B2	
24	30 000	0	209,1	204,0	
25	60 000	0	199,9	196,0	Grafické výsledky v [22]
27	120 000	0	193,7	190,3	
Měření při experimentu			219,6	189,0	

Výpočty 26 až 30 v tabulce A3 byly provedeny bez teplotního rozdílu, tedy při rovnoměrném počátečním kontaktním tlaku. Protože se nepovedlo dosáhnout konvergence u velkých kontaktních tuhostí u výpočtu 29 a 30, bylo změněno kontaktní chování na dokonalou všesměrnou soudržnost. Ostatní výpočty 1 až 28 byly provedeny s jednostrannou kontaktní vazbou.

V přílohách zprávy [22] jsou uvedeny výsledné průběhy průhybů z vybraného výpočtu 12 a z výpočtů 26 až 30. Příklad pole průhybů, kdy bylo dosaženo maximální výchylky je na obr. A15

Výpočty v tabulce A5 byly provedeny bez teplotního rozdílu, tedy při rovnoměrném počátečním kontaktním tlaku. Výpočty v tabulce A4 byly provedeny s různým teplotním rozdílem. Všechny výpočty v tabulkách A4 a A5 byly provedeny s užitím jednostranné kontaktní vazby. Podrobnosti viz [22]. Z vypočítaných variant modelů byly vybrány 4 reprezentativní výpočty, podbarveno v tabulkách A3 až A5.

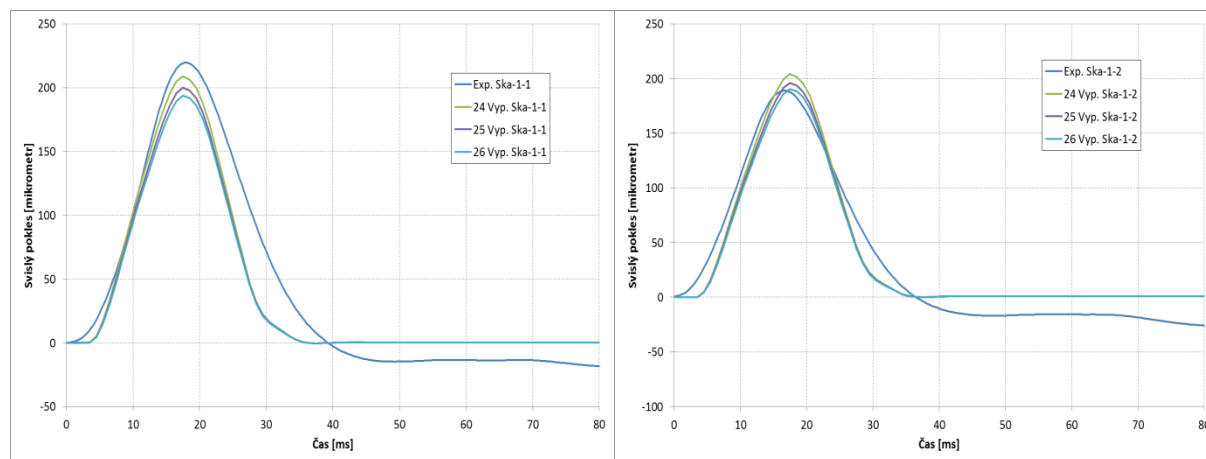
Na obrázku A13 je ukázán nesoulad mezi měřením a výpočtem staré konstrukce desky na mostu Lanžhot. Při výpočtech odezvy desek mostu Skanska se výsledky měření a výpočtu prakticky shodují, viz obr. A14.



a) – Lan-9S – var. 26-30

b) Lan-3H – var. 26-30

Obr. A13 Průběhy relativního svislého poklesu v místě razníku – Lanžhot



a) Ska-E1B1

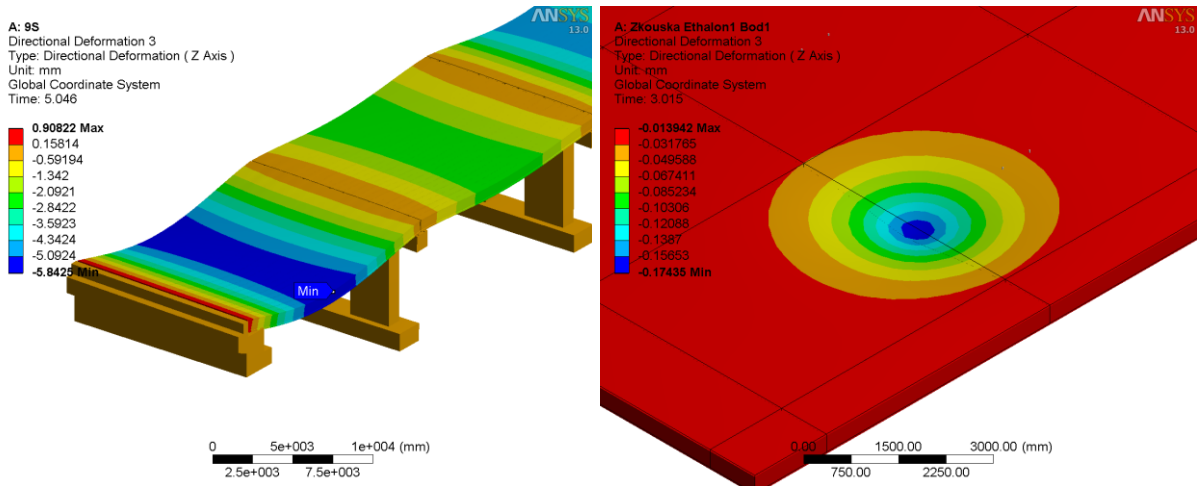
b) Ska-E1B2

Obr. A14 Průběh relativního svislého poklesu v místě razníku – Skanska

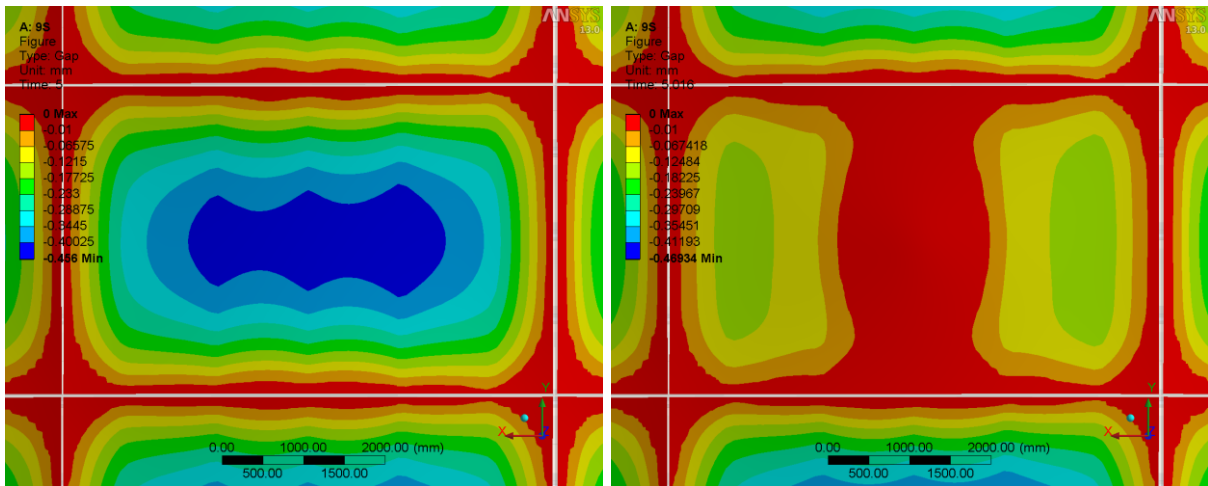
V přílohách [22] jsou vykresleny grafické výstupy z výsledků těchto výpočtů. Postupně jsou vykresleny rozložení vůle a kontaktního tlaku pod CB deskou z jednotlivých výpočtů. Nejprve je vždy vykreslena počáteční rozložení vůle před zahájením dynamického výpočtu (staticky aplikované teploty a vlastní tíha). Na následujícím obrázku je vykresleno rozložení vůle v čase, kdy bylo dosažen maximální pokles pod razníkem, viz obr. A16 a A17. Následně je vykresleno rozložení kontaktního tlaku počáteční a při maximálním poklesu.

Dále jsou vykresleny časové průběhy svislého poklesu CB desky v místě zatížení razníkem. Vypočítané hodnoty výpočtů mostu Lanžhot jsou srovnány s naměřenými hodnotami. Měření mostu areál Skanska nebyly k dispozici.

Výsledky výpočtů uvedené v tabulce A3 byly počítány na výpočtovém modelu s hrubší sítí na geometrii CB desky, než je uváděno v přílohách. Časová náročnost nelineárních dynamických výpočtů vyžadovala maximální úsporu vzhledem k počtu sestavených rovnic. Vybraná varianta modelu byla následně přepočítána s jemnější sítí a výsledky výpočtů jsou shrnuty také v přílohách zprávy [22].

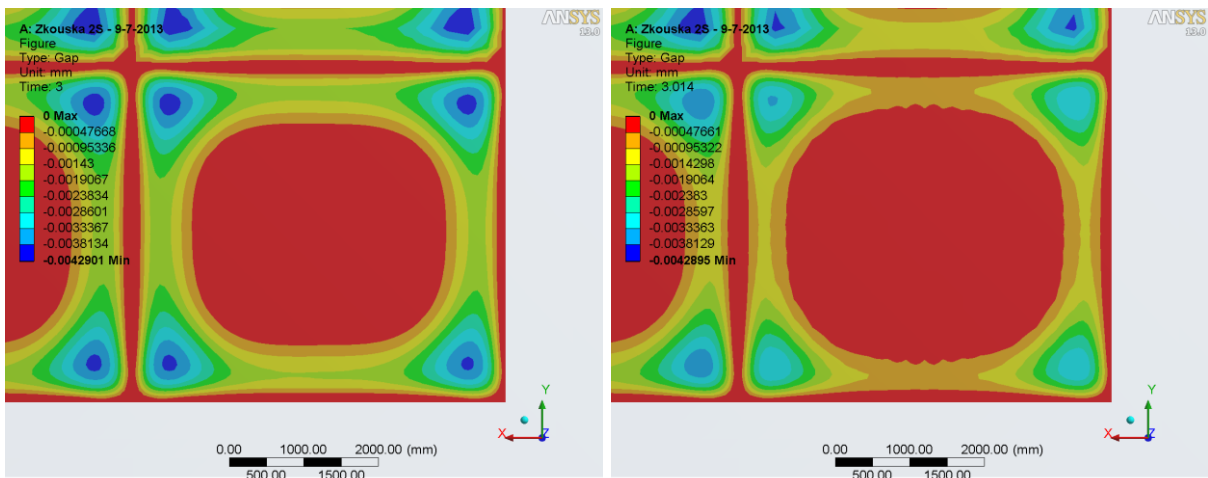


a) Lan-9S – var. 28 – (čas 46 ms) b) Ska-E1B1 – var. 25 – (čas 15 ms)
 Obr. A15 Extrémní svislý pokles mostovky Lanžhot a Skanska



a) Počáteční vůle (čas 0 ms) b) Vůle pod CB deskou při max. poklesu (čas 16 ms)

Obr. A16 Vůle pod CB deskou Lanžhot – výpočet Lan-9S – var. 12



a) Počáteční vůle (čas 0 ms) b) Vůle pod CB deskou při max. poklesu (čas 14 ms)

Obr. A17 Vůle pod CB deskou Skanska – výpočet Ska-2S – var. 16

A4. Závěry z dynamické odezva na mostech při užití rázové zkoušky

Metodou konečných prvků v programu ANSYS byly provedeny desítky nelineárních dynamických výpočtů simulujících rázovou zkoušku cementobetonových (CB) desek vozovkového krytu na mostech. Řešení v časové oblasti bylo provedeno přímou integrací pohybových rovnic.

Zavedením zjednodušujících předpokladů výpočtu bylo možné vztáhnout počáteční kontaktní tlak a vůli pod CB deskou do jednoho parametru, a to do teplotního rozdílu povrchů desky. Tuhost kontaktního modelu měkké izolační vrstvy byla druhým neznámým parametrem výpočtů. Byly provedeny citlivostní výpočty s různými hodnotami parametrů. Výsledky výpočtů byly srovnány s měřenými hodnotami při experimentech.

Výsledky výpočtů ve srovnání s měřenými hodnotami při experimentech ukázaly, že rozložení počátečního kontaktního tlaku pod CB deskou neodpovídá teplotnímu spádu podle měření teplot a tedy odpovídající křivosti CB desce. Pravděpodobně trvalé deformace měkké izolační vrstvy a změny v geotextilii (suchá, mokrá nebo zpevněná prachem a pískem) pod CB deskou jsou jedním z nejvýznamnějších faktorů, které ovlivňují kontaktní tlak. Idealizace předpisem teplotního pole na CB desku pro dosažení nerovnoměrného počátečního kontaktního tlaku není přesná. V takovémto případě CB deska je v kontaktu pouze lokálně, což je výrazně v nesouladu se skutečným podepřením desky. Proces dlouhodobého dotvarování, betonu, měkké izolační vrstvy a změny v geotextilii vytváří složité a těžko popsatelné rozdělení kontaktního tlaku. Toto platí pro chování mostní konstrukce Lanžhot tak i most v areálu Skanska.

Při výpočtech bez počáteční vůle (bez teplot), bylo dosaženo lepších výsledků z hlediska časových průběhů průhybů. U mostu areál Skanska vypočítané průběhy téměř identicky odpovídají měřeným průběhům při experimentu.

U mostu Lanžhot průhyby výrazně ovlivňuje kmitání celé mostovky v zatěžovaném poli mostu. Toto kmitání se povedlo postihnout velmi přesně. Už ale hůře sedí počáteční fáze průhybu, kdy dochází k lokální deformaci CB desky ovlivněné zřejmě ztrátou podepření částí desky. Ztráta podepření může být také kromě vlivu dotvarování betonu a změnám izolace a geotextilie vyvolána erozí (mechanickou a chemickou) spodní části desek, počáteční vůli a lokálním posunům desky u dlouhodobě užívaných vozovek. Protože most Lanžhot byl už delší dobu v provozu, jsou díky těmto možným jevům vstupní údaje pro výpočet značně nejisté.

Z důvodu nejasnosti uložení desek a neidentifikovanému jejich prostorovému pohybu vyvolanému teplotními změnami a dopravou, je logickým důsledkem doporučení použití kotev pro fixaci desek na mostní konstrukci. Ukotvení desek zabrání pohybům ve vodorovném směru a významně ovlivní zdvih rohů desek. Umístění kotev je analyzováno ve „Studii vlivu polohy svislých kotev na napětí teplotně zatížení zkušební konstrukce cementobetonové vozovky“.

Počítačová numerická analýza zkušební konstrukce cementobetonové vozovky simuluje část cementobetonové vozovky na mostě, kde most je nahrazen železobetonovou deskou ležící na zemní pláni. Konstrukce byla postavena v areálu firmy Skanska ve Starém Městě u Uherského Hradiště. Některé z cementobetonových desek jsou kotveny pomocí svislých kotev do železobetonové desky teoretického mostu, pro omezení přetvoření desek od změn teploty.

Cílem analýzy je získat představu o přetvoření a napětí kotvené CB desky zatížené teplotou a kontaktními silami vozidla a nalézt nejvhodnější rozmístění kotev pro omezení napětí cementobetonové vozovky.

Za tímto účelem byla provedena parametrická studie se třemi případy polohy čtyř ocelových kotev a zatížením desek vlastní tíhou a změnou teploty, popř. kontaktními

silami vozidla. V těchto případech a v případě bez kotev byly vyhodnoceny svislé posunutí středu a rohů desky a vybraná napětí v cementobetonových deskách. Před studií umístění kotev byl proveden výpočet s teplotním zatížením desek pro srovnání s výsledky měření a ověření platnosti modelu.

B Studie vlivu polohy svislých kotev na napětí teplotně zatížené zkušební konstrukce cementobetonové vozovky

B1. Úvod

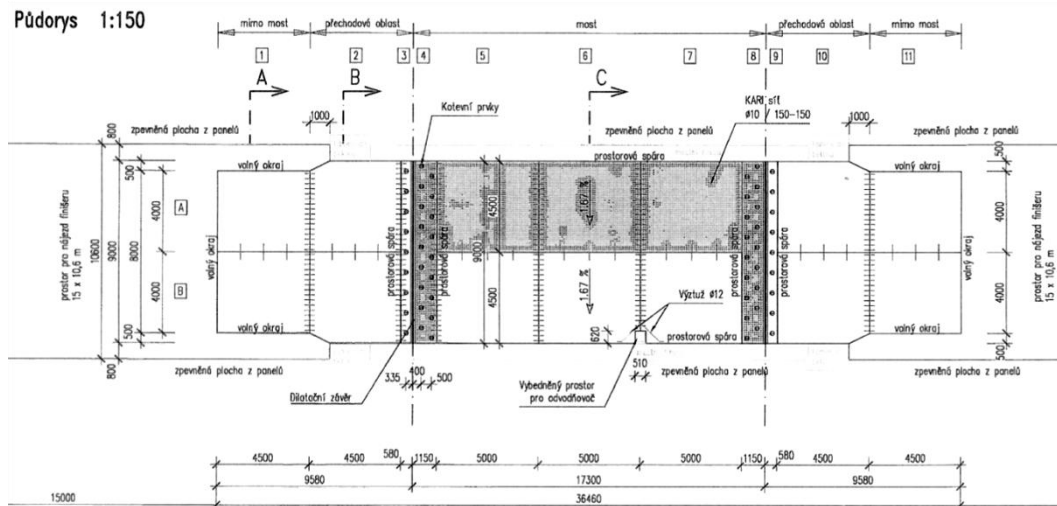
Byla provedena počítačová numerická analýza zkušební konstrukce cementobetonové vozovky. Sledovala se konstrukce v areálu firmy Skanska viz část A. Některé z cementobetonových desek jsou kotveny pomocí svislých kotev do železobetonové desky teoretického mostu, pro omezení přetvoření desek od změn teploty.

Cílem analýzy je získat představu o přetvoření a napětí kotvené CB desky zatížené teplotou a kontaktními silami vozidla a nalézt nejvhodnější rozmístění kotev pro omezení napětí cementobetonové vozovky.

Za tímto účelem byla provedena parametrická studie se třemi případy polohy čtyř ocelových kotev a zatížením desek vlastní tíhou a změnou teploty, popř. kontaktními silami vozidla. V těchto případech a v případě bez kotev byly vyhodnoceny svislé posunutí středu a rohů desky a vybraná napětí v cementobetonových deskách. Před studií umístění kotev byl proveden výpočet s teplotním zatížením desek pro srovnání s výsledky měření a ověření platnosti modelu.

B2. Popis konstrukce

Zkušební konstrukce se skládá ze tří základních částí, z části na mostě, části mimo most a přechodové části, podrobnosti v části A.



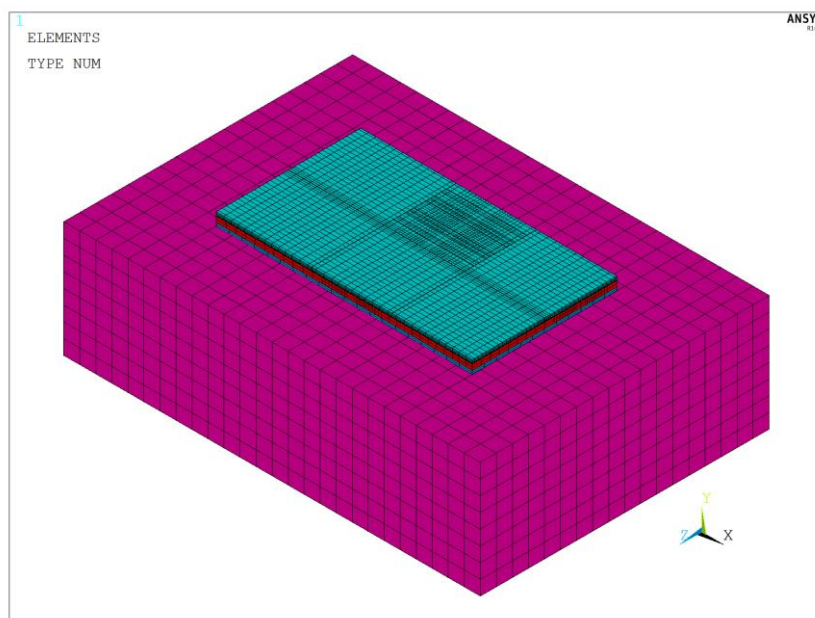
Obr. B1 Půdorys zkušební konstrukce

B3. Popis modelu a výpočtu

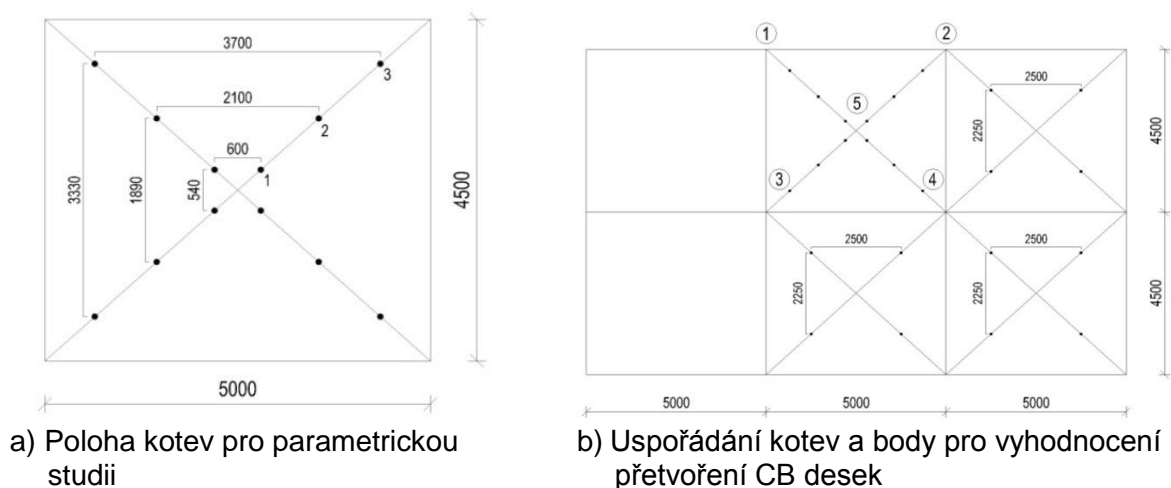
Prostorový výpočtový model je sestaven metodou konečných prvků z objemových prvků ve tvaru osmiuzlových šestistěnů SOLID185 a pomocí prutových prvků BEAM188 ve výpočtovém programu ANSYS. Model je pro zjednodušení tvořen pouze šesti deskami mostní části experimentální konstrukce, vynechány jsou římsy, dilatační závěr a vrstva podloží na úrovni konstrukčních vrstev. Modelovány jsou cementobetonové desky, příčné a podélné trny, svislé kotvy desek, vrstva litého asfaltu, betonová deska simulující mostní konstrukci, vrstva vyměněného podloží a blok samotného podloží. Jednotlivé vrstvy jsou vzájemně spojeny pomocí kontaktů. Kontakt mezi cementobetonovými deskami a podkladní vrstvou litým asfaltem je řešen pomocí rozšířené Lagrangeovy metody, součinitel tření byl odhadnut na 0,15. Tenké vrstvy geotextilie a izolace jsou zahrnuty do vrstvy asfaltu. Ostatní kontakty mají podobu vazebných rovnic. Kotvy a trny jsou modelovány prutovými prvky, spojenými s objemovými prvky desek.

Analyzován je případ, kdy jsou ve čtyřech ze šesti desek rozmístěny vždy čtyři svislé kotvy. Kotvy v půdoryse tvoří vrcholy obdélníka se shodným stranovým poměrem jako příslušná deska. U jedné z desek jsou řešeny postupně tři případy umístění kotev, viz obr. B3a, aktuální návrh kotev je určován jejich vzájemnou vzdáleností v podélném směru teoretického mostu. V ostatních deskách je vzdálenost neměnná s hodnotou 2500 mm, obr. B3 b). Další zobrazení částí modelu jsou na obr. B4 a obr. B5. V reálném uspořádání jsou desky kotveny pouze dvěma kotvami ve středu desky (600 mm od sebe vzdálenými).

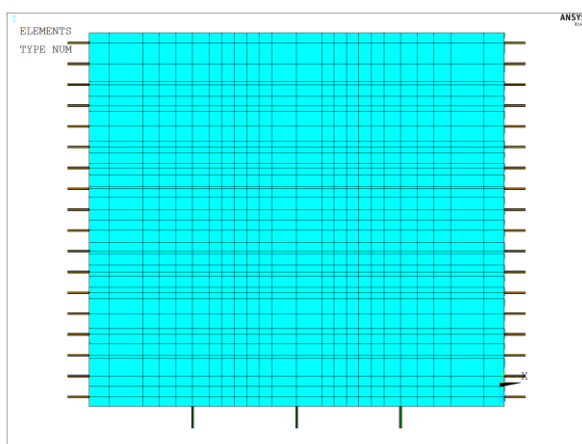
Orientace osy x globálního systému souřadnic odpovídá podélnému směru teoretického mostu, orientace osy z příčnému směru a orientace osy y odpovídá svislému směru.



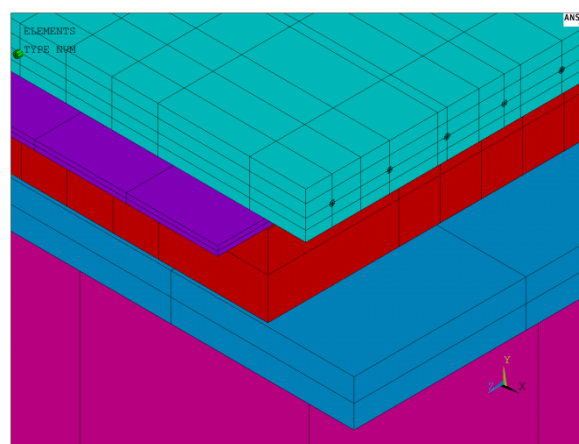
Obr. B2 MKP model



Obr. B3 Poloha kotev ve studii a body vyhodnocení



Obr. B4 Deska s kotvami a trny



Obr. B5 Jednotlivé vrstvy

B3.1. Okrajové podmínky

Uzlům na spodních plochách bloku podloží byl odebrán svislý stupeň volnosti, na bočních plochách byl pak odebrán vždy jeden stupeň volnosti kolmo k ploše. Všem prutům sloužícím k modelování kotev a trnů byl odebrán rotační stupeň volnosti okolo osy prutu.

B3.2 Materiálové vlastnosti

Vlastnosti betonu a materiálů podloží byly převzaty z provedených zkoušek, kde byly určovány moduly pružnosti jednotlivých vrstev. Pro výpočet byl uvažován průměr těchto hodnot tabulka 3.2.1. Modul pružnosti litého asfaltu zahrnující v sobě vliv viskózní dlouhodobé deformace (dotvarování) byl identifikován podle výsledků měření na hodnotu $2 \cdot 10^4$ Pa pro teplotní zatížení. Pro krátkodobé zatížení vozidlem byla uvažována hodnota $5 \cdot 10^6$ Pa. Součinitel teplotní délkové roztažnosti pro materiál desek byl pak uvažován hodnotou $10 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Pro kotvy a trny byly použity standardní normové hodnoty materiálových charakteristik oceli.

Tabulka 3.2.1 Moduly pružnosti vrstev konstrukce a podloží

Použití	E
CB desky	36,1 GPa
Litý asfalt	$2 \cdot 10^4$ a $5 \cdot 10^6$ Pa
ŽB deska	30,7 GPa
Vrstva vyměněného podloží	0,217 GPa
Podloží	0,742 GPa

B3.3 Body pro vyhodnocení přetvoření desky

Pro hodnocení přetvoření desky jsou hodnoty svislých posunutí ve všech čtyřech rozích (body 1 až 4) a uprostřed analyzované desky bod 5 (viz obr. B3). Tyto body se uvažují na horním povrchu desky. Pro srovnání s výsledky měření jsou získána posunutí na kotvené a nekotvené desce ležící vedle sebe. Sledují se posunutí středu a rohů desky.

B3.4 Nastavení výpočtu a zatížení

Statický výpočet se skládá ze dvou kroků, v prvním je model zatížen vlastní tíhou zavedenou pomocí svislého zrychlení o hodnotě $9,81 \text{ ms}^{-2}$. Druhým krokem je změna teploty cementobetonových desek, změna je konstantní po ploše desek, mění se pouze po výšce, lineárně mezi horním a dolním povrchem. Průběh změn teploty, je tedy určen teplotou horního T_{hor} a dolního povrchu T_{dol} a referenční (původní) teplotou T_{ref} před změnou. Pro každý případ polohy trnů jsou počítány dvě varianty změny teplot. První varianta odpovídá nerovnoměrnému oteplení desky, kdy by volně uložená deska měla vypouklý, konvexní tvar se středem výše než okraje a druhá varianta odpovídá nerovnoměrnému ochlazení desky, kdy by volně uložená deska měla vydutý, konkávní tvar se zvednutím okrajů desky oproti středu. Ve výpočtech byly uvažovány tyto teploty:

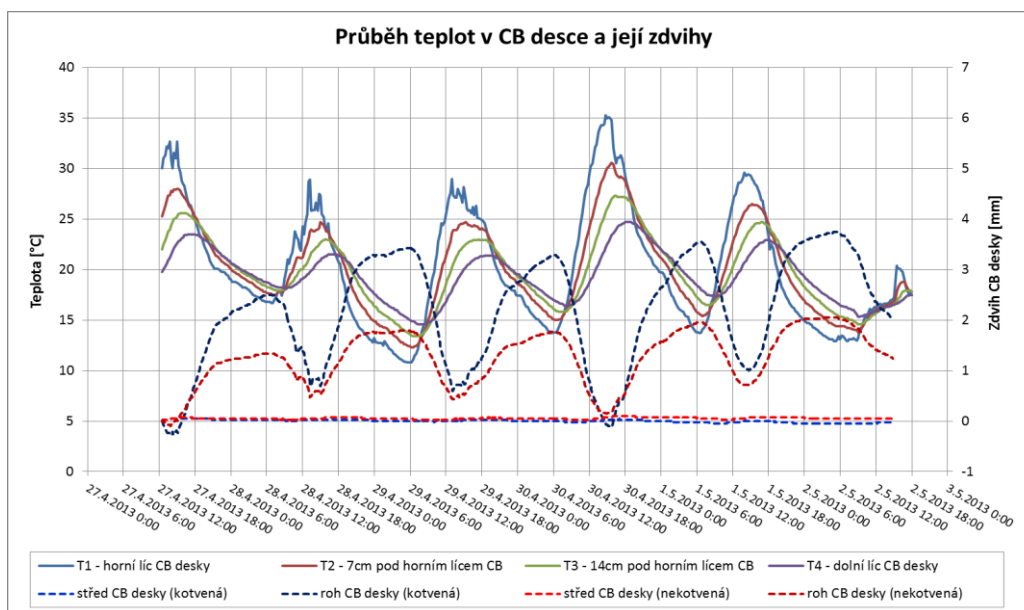
1. varianta - konvexní

$$\begin{aligned}T_{hor} &= 27 \text{ }^\circ\text{C}, \\T_{dol} &= 15 \text{ }^\circ\text{C}, \\T_{ref} &= 15 \text{ }^\circ\text{C}.\end{aligned}$$

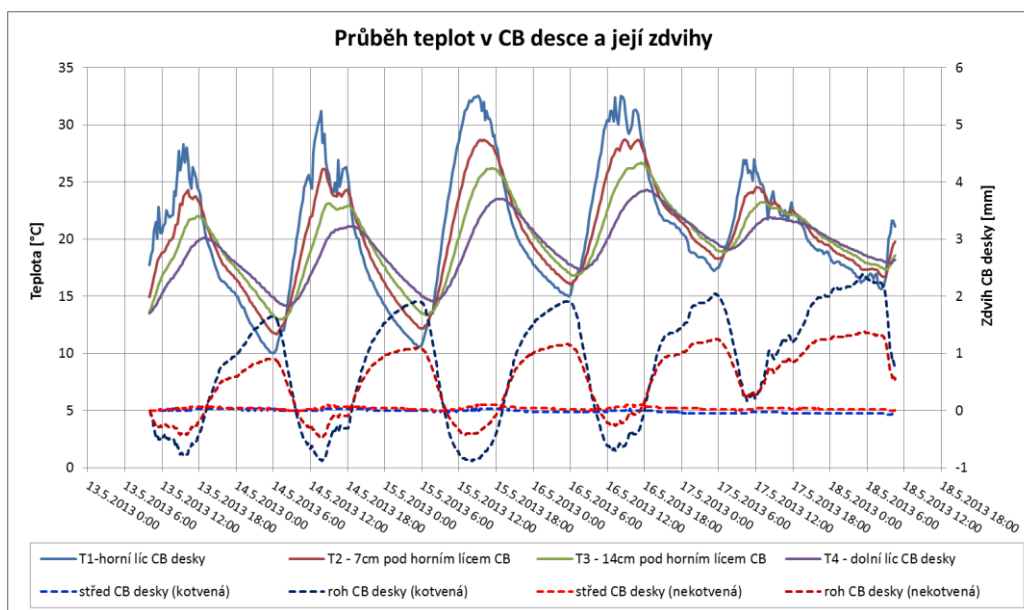
2. varianta - konkávní

$$\begin{aligned}T_{hor} &= 10 \text{ }^\circ\text{C}, \\T_{dol} &= 15 \text{ }^\circ\text{C}, \\T_{ref} &= 15 \text{ }^\circ\text{C}.\end{aligned}$$

Výběr teplotních spádů byl určen na základě měření. Vyhodnocení průběhů teplot ve třech různých obdobích je provedeno formou grafů, viz obr. B6 až obr. B8. Na každém z grafů jsou průběhy teplot ve čtyřech vrstvách desek a dále změny zdvihů středů a rohů desek.



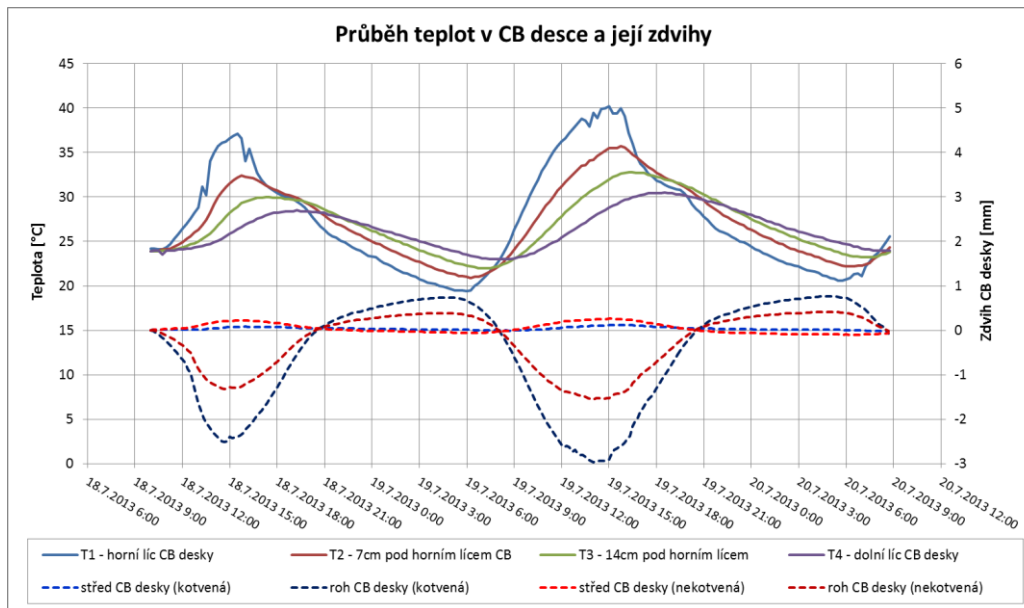
Obr. B6 Grafy průběhů teplot a zdvihů desky – období 27. 4. až 2. 5. 2013



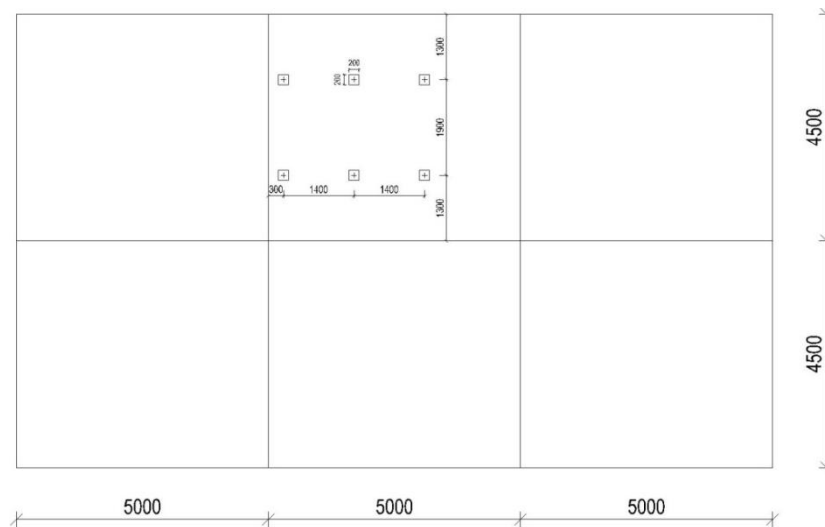
Obr. B7 Grafy průběhů teplot a zdvihů desky – období 13. 5. až 18. 5. 2013

Z grafů je patrné, že zdvih středů desek je výrazně menší než rohů desek. Dále lze vysledovat neustálé vyrovnávání desek od doby realizace. Z uvedených grafů lze usuzovat, že desky jsou ovlivněny počátečním smrštěním. To znamená, že mají konkávní tvar a rohy jsou výrazně zvednuty než střed desky (obr. B6). Postupně se křivost desek mění, viz obr. B8 odpovídající stavu v 7. měsíci roku 2013. Betonáž vozovky a její nařezání na desky byla provedena koncem roku 2012. V letním období, tj. asi po 200 cyklech se rohy desek vlivem teplot již významně boří do měkkých podkladních vrstev, popřípadě kopírují jejich trvalé deformace. Lze předpokládat, že mezera mezi kraji desek a měkkými podkladními vrstvami se neustále zvětšuje. Toto chování není jednoduché ve výpočtu postihnout, neboť není dostupná řada údajů (např. údaje o počátečním tvaru desek, o historii dotvarování

asfaltové vrstvy v závislosti na teplotách a času). Z tohoto důvodu je výpočet vztažen ke stavu, kdy se předpokládá deska, že je před působením zatížení rovinná. Uvedené teplotní spády jsou odvozeny z grafu na obr. B8.



Obr. B8 Grafy průběhů teplot a zdvihů desky – období 18. 7. až 20. 7. 2013



Obr. B9 Umístění kontaktních ploch (kol) vozidla na CB desce

Dalším uvažovaným zatížením jsou kontaktní síly od vozidla, konkrétně 6 sil po 40 kN působící na plochách 200 mm x 200 mm, viz obr. B9. Síly jsou aplikovány na desce s uvažovaným různým rozmístěním kotev. Výpočet s vozidlem je opět tvořen dvěma kroky, v prvním je aplikována vlastní tíha, ve druhém pak vlastní tíha a kontaktní síly vozidla.

Cílem výpočtu je získat přibližnou shodu výpočtu s měřením a ve studiích kotev pak zhodnotit velikosti napětí desek při zatížení teplotou a vozidlem, pro různé varianty kotev.

Úloha je nelineární z důvodu uvažování kontaktů mezi CB deskami a vrstvou litého asfaltu. Řešení je iterační využívající při řešení rovnic Newton-Raphsonovu metodu. Pro zatížení teplotou jsou řešeny vždy dvě varianty teplotních rozdílů, pro studii jsou pak uvažovány 4 varianty výpočtu, bez kotev a postupně se třemi variantami rozmístění kotev.

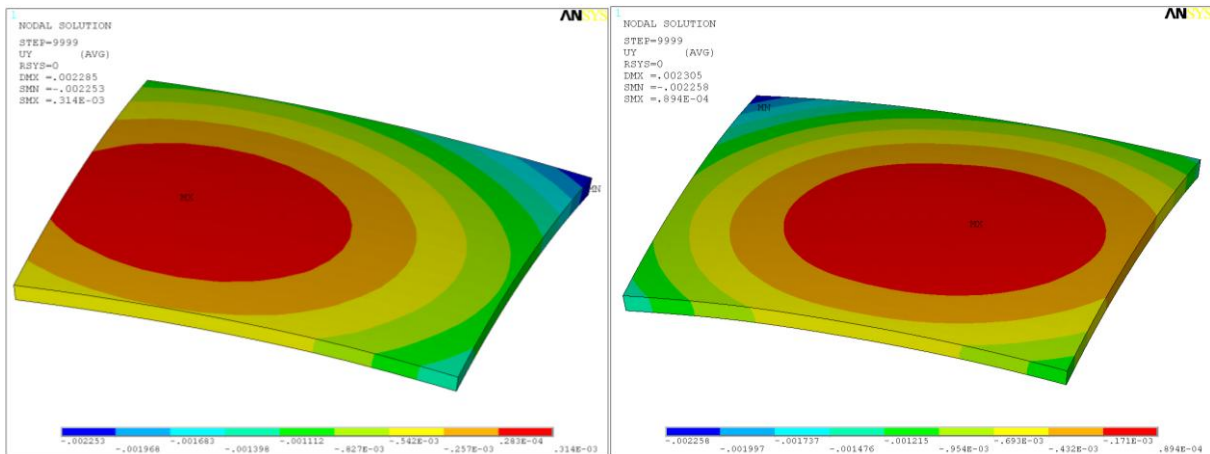
B4. Vyhodnocení výsledků

Výsledkem řešení jsou pole posunutí, deformací a napětí. Z rozsáhlé databáze výsledků jsou uváděny pouze vybrané hodnoty posunutí a napětí.

Výsledky výpočtů lze rozdělit do dvou skupin. Výpočet pro porovnání s měřením a výpočty pro studii vlivu polohy kotev.

B4.1. Výpočty a měření

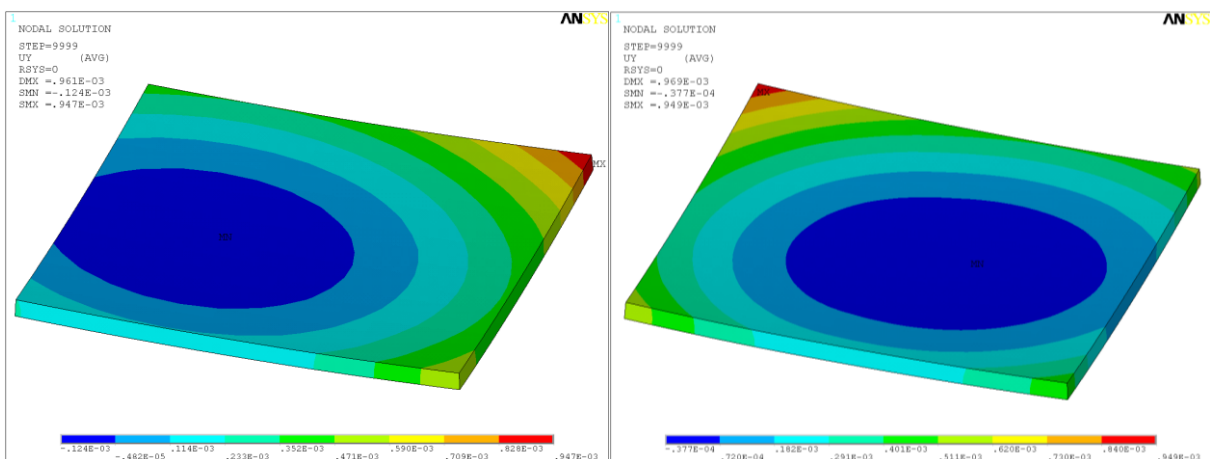
Na obrázcích B10 a B11 jsou uvedeny pole svislých posunutí u_y obou variant zatížení teplotou a vlastní tíhou jak pro desku nekotvenou, tak i pro desku kotvenou.



a) Nekotvená deska

b) Kotvená deska

Obr. B10 Varianta 1 – teplotního zatížení desek $\Delta t = 12\text{ }^{\circ}\text{C}$ – pole svislých posunutí u_y



a) Nekotvená deska

b) Kotvená deska

Obr. B11 Varianta 2 – teplotního zatížení desek $\Delta t = -5\text{ }^{\circ}\text{C}$ – pole svislých posunutí u_y

V tabulkách B1 a B2 jsou uvedeny svislá posunutí středů a rohů od teplotního zatížení nekotvené a kotvené desky. Výpočtem získané výsledky jsou uvedeny společně s výsledky měření.

Z tabulek je patrná dobrá shoda vyčíslených a naměřených hodnot posunutí u_y středů a rohů sledovaných míst desek. Změnou modulů tuhosti měkkých podkladních vrstev ve výpočtovém modelu lze dosáhnout větší shody. Toto však není smyslem výpočtu. Výpočet ukazuje na fakt, že na krajích desky jsou mezi deskou a měkkými podkladními vrstvami mezery. Výpočet má smysl zpřesňovat pouze po zaměření trvalých deformací podkladu a rovinnosti desek. Odpovídající „náhradní“ (sečný) modul asfaltové vrstvy zahrnující dotvarování minimálně po 200 teplotních cyklech a mezeru mezi deskou a asfaltovou vrstvou je ve výpočtu uvažován pouze $2 \cdot 10^4$ Pa. Tato hodnota modulu asfaltové vrstvy byla dále použita ve studii rozmístění kotev.

Tabulka B1 Nekotvená deska – porovnání výpočtu a měření

Nekotvená deska		Svislé posunutí [mm]	
		Střed	Roh
$\Delta t = 12 \text{ }^\circ\text{C}$	Výpočet	0,156	-0,994
	Měření	0,2	-1,5
$\Delta t = -5 \text{ }^\circ\text{C}$	Výpočet	-0,060	0,414
	Měření	-0,05	0,4

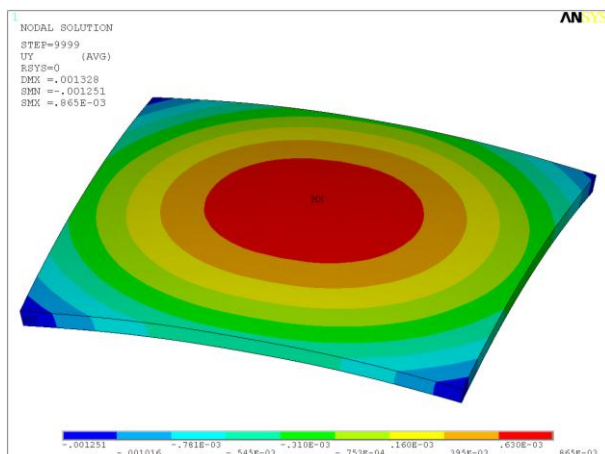
Tabulka B2 Kotvená deska – porovnání výpočtu a měření

Nekotvená deska		Svislé posunutí [mm]	
		Střed	Roh
$\Delta t = 12 \text{ }^\circ\text{C}$	Výpočet	0,0537	-2,25
	Měření	0,1	-3,0
$\Delta t = -5 \text{ }^\circ\text{C}$	Výpočet	-0,023	0,944
	Měření	0,0	0,7

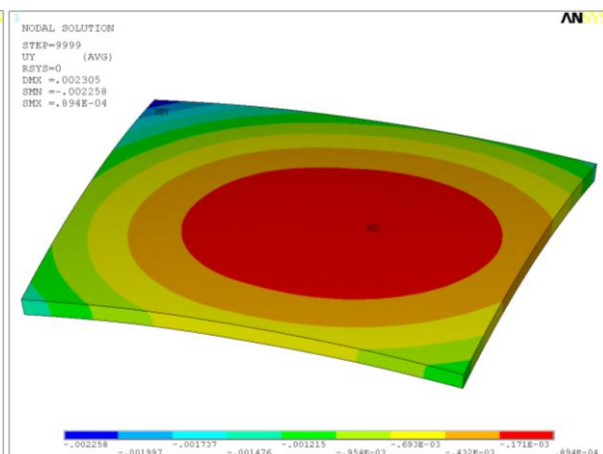
B4.2. Studie polohy kotev

Pole posunutí a napětí desek pro obě varianty teplotního zatížení a zatížením vozidlem včetně vlastní tíhy bylo sledováno pomocí obrázků a číselně formou tabulek. Sledují se případy nekotvené desky a desky se čtyřmi kotvami ve vzdálenostech 600 mm, 2100 mm a 3700 mm od středu desky. Sledovala se varianta teplotního zatížení se zdviháním středu desky $\Delta t = 12 \text{ }^\circ\text{C}$, teplotního zatížení se zdviháním rohů desky $\Delta t = -5 \text{ }^\circ\text{C}$ a zatížení vozidlem. Pro ilustraci jsou na obrázcích B12 až B15 uvedeny pole svislých posunů desky průběhy se zdviháním středu desky. Odlišné hodnoty posunutí rohů je zapříčiněno různými podmínkami na okraji sledovaných desek.

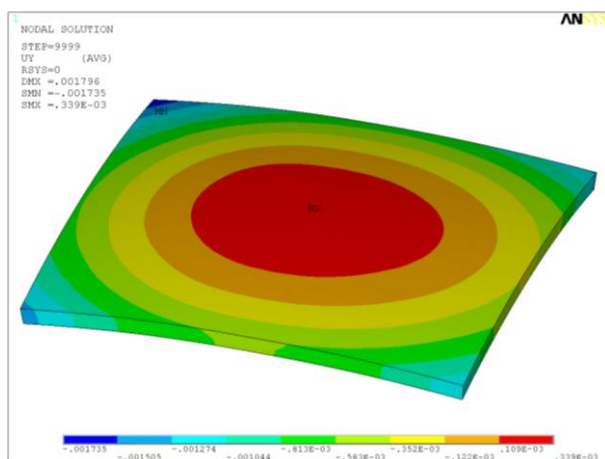
Další obrázky vztahující se k teplotním polím jsou uvedeny ve zprávě [23].



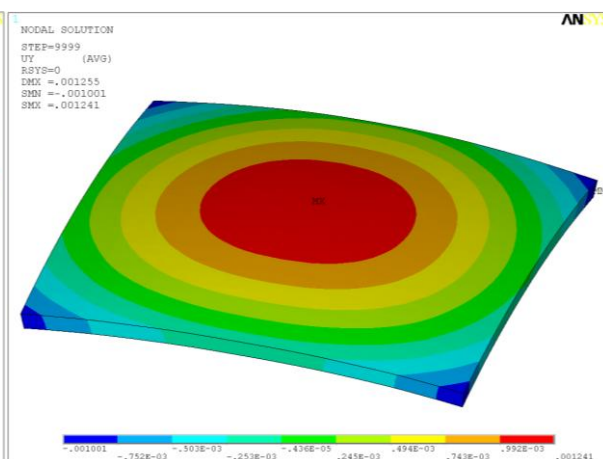
Obr. B12 Nekotvená deska – pole posunutí u_y



Obr. B13 Kotvená deska – kotvy 600 mm – pole posunutí u_y

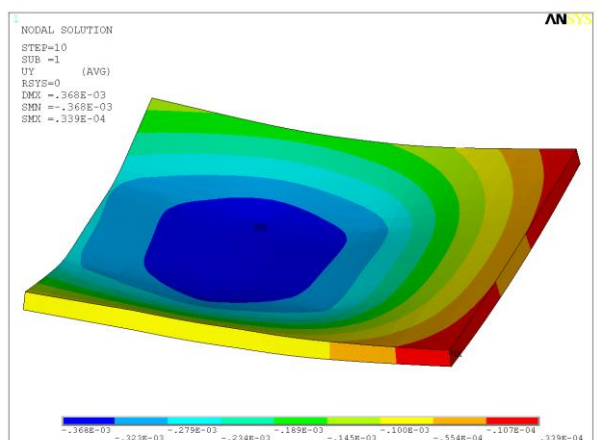


Obr. B14 Kotvená deska – kotvy 2100 mm – pole posunutí u_y

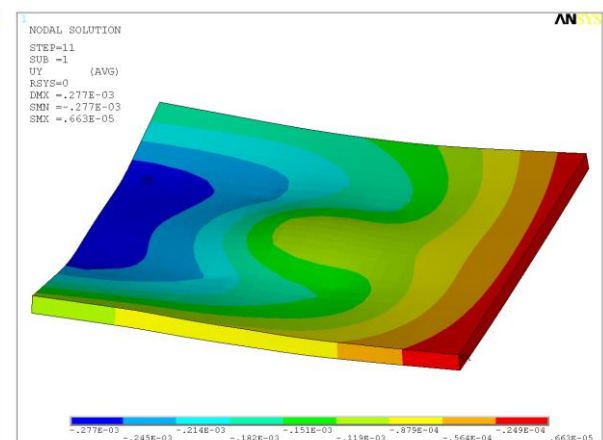


Obr. B15 Kotvená deska – kotvy 3700 mm – pole posunutí u_y

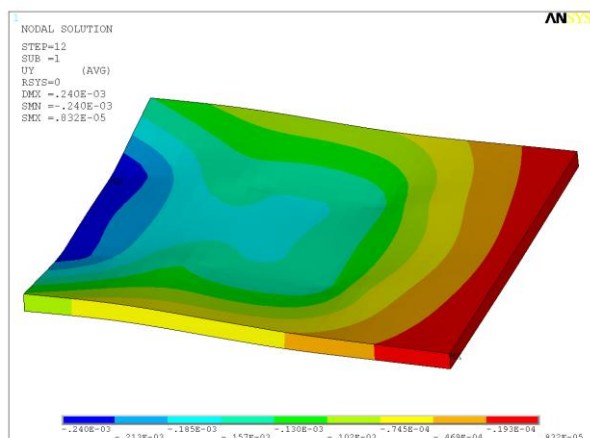
Odezva při zatížení vozidlem má odlišný charakter, viz např. obrázky B16 až B19, na kterých jsou zobrazena pole svislých posunutí od vlastní tíhy a zatížení vozidlem.



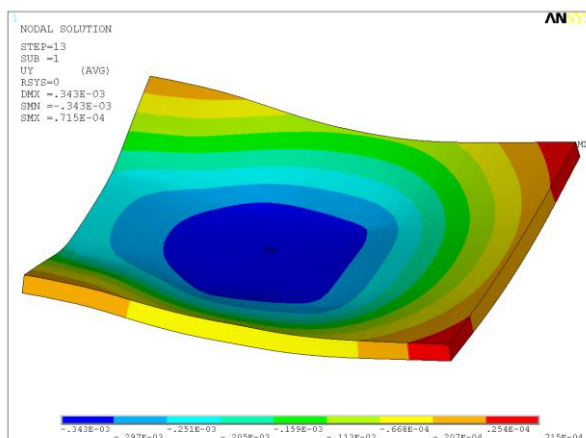
Obr. B16 Nekotvená deska – pole posunutí u_y



Obr. B17 Kotvená deska – kotvy 600 mm – pole posunutí u_y



Obr. B18 Kotvená deska – kotvy 2100 mm – pole posunutí u_y



Obr. B19 Kotvená deska – kotvy 3700 mm – pole posunutí u_y

Průběhy polí napětí pro jednotlivé varianty jsou uvedeny ve zprávě [23]. Výsledky porovnání jednotlivých výpočtů jsou shrnuty v tabulkách B3 až B6.

Tabulka B3 Vliv polohy kotev na svislý posun středů a rohů desek pro teplotní zatížení

Uspořádání kotev	Svislé posunutí [mm]									
	$\Delta t = 12 \text{ }^\circ\text{C}$					$\Delta t = -5 \text{ }^\circ\text{C}$				
	Střed	Rohy				Střed	Rohy			
		1	2	3	4		1	2	3	4
Bez kotev	0,86	-1,2	-1,1	-1,2	-1,2	-0,36	0,50	0,48	0,52	0,50
Kotvy 600 mm	0,05	-2,2	-1,3	-1,4	-1,1	-0,02	0,94	0,54	0,59	0,48
Kotvy 2100 mm	0,34	-1,7	-1,3	-1,4	-1,2	-0,14	0,73	0,55	0,58	0,51
Kotvy 3700 mm	1,2	-0,96	-0,99	-0,89	-0,93	-0,52	0,40	0,41	0,37	0,39

Z tabulky je patrné, že nejmenší vzájemný posun středu a rohů desky nastává v případě, kdy jsou kotvy od sebe vzdáleny 3700 mm pro variantu s oteplením $12 \text{ }^\circ\text{C}$. Ve variantě s ochlazením o $5 \text{ }^\circ\text{C}$ jsou relativní posunutí ve všech případech malé. V případě, kdy kotvy jsou od sebe vzdáleny 3700 mm, jsou posunutí prakticky stejné jako u desky nekotvené.

Maximální a minimální hodnoty normálových napětí od teplotního zatížení pro různé případy rozmístění kotev jsou v tabulce B4.

Teplotní namáhání desek bez kotev a kotvami pro obě varianty se pohybuje v rozmezí od -3,19 po -0,87 MPa v tlaku a od 0,91 po 3,17 MPa v tahu. V případě s kotvami ve vzdálenosti 3700 mm je napjatost srovnatelná s napjatostí desky bez kotev. Nejméně vhodný případ z hlediska napjatosti je případ s kotvami vzdálenými od sebe 600 mm.

Tabulka B4 Vliv polohy kotev na normálové napětí ve směru x a z pro teplotní zatížení

Uspořádání kotev	$\Delta t = 12 \text{ }^{\circ}\text{C}$				$\Delta t = -5 \text{ }^{\circ}\text{C}$			
	σ_x [MPa]		σ_y [MPa]		σ_x [MPa]		σ_y [MPa]	
	max	min	max	min	max	min	max	min
Bez kotev	2,60	-2,82	1,99	-2,19	1,17	-1,08	0,91	-0,83
Kotvy 600 mm	3,17	-3,19	2,75	-2,89	1,33	-1,32	1,20	-1,14
Kotvy 2100 mm	2,87	-2,88	2,62	-2,54	1,20	-1,20	1,06	-1,09
Kotvy 3700 mm	2,75	-3,00	2,10	-2,22	1,25	-1,15	0,92	-0,87

Svislý posun středů a rohů desek pro zatížení vozidlem v závislosti na uspořádání kotev je uveden v tabulce B5.

Tabulka B5 Vliv polohy kotev na svislý posun středů a rohů desek pro zatížení vozidlem

Uspořádání kotev	Svislé posunutí [mm]				
	Střed	Rohy			
		1	2	3	4
Bez kotev	-0,34	-0,12	0,032	-0,082	0,034
Kotvy 600 mm	-0,097	-0,15	-0,00041	-0,11	0,0066
Kotvy 2100 mm	-0,16	-0,13	0,0082	-0,10	0,0083
Kotvy 3700 mm	-0,33	0,021	0,071	0,024	0,065

Hodnoty posunutí od simulovaného zatížení vozidlem jsou výrazně menší než posunutí od změny teplot. Z hodnot v tabulce lze usuzovat, že asi nejvhodnějším případem rozmístění kotev je případ s kotvami vzdálenými od sebe 3700 mm. V tomto případě je vzájemný posun rohů nejmenší. Zatlačení středu desky odpovídá případu desky bez kotev. Stanovit jednoznačně, který z řešených případů je nejvhodnější je těžké, neboť hodnoty posunutí jsou malé a prakticky nevýznamné ve srovnání s teplotními posunutími.

Maximální a minimální hodnoty normálových napětí od zatížení vozidlem pro různé případy řešení kotvení jsou v tabulce B6.

Tabulka B6 Vliv polohy kotev na normálové napětí ve směru x a z pro zatížení vozidlem

Uspořádání kotev	σ_x [MPa]		σ_z [MPa]	
	max	min	max	min
Bez kotev	0,659	-0,535	1,01	-0,887
Kotvy 600 mm	0,504	-0,668	0,941	-0,844
Kotvy 2100 mm	0,766	-0,957	0,802	-0,686
Kotvy 3700 mm	0,732	-0,594	1,07	-0,900

Z hlediska velikosti napjatosti vznikající od zatížení vlastní tíhou a vozidlem, lze na základě výpočtu konstatovat, že vypočtená normálová napětí jsou výrazně menší než od zatížení změnou teploty. Ve všech řešených případech jsou hodnoty tahových i tlakových napětí hodně blízké. Pro zajímavost lze uvést, že v případě kotev 3700 mm od sebe vzdálených jsou napětí o něco málo větší, ale prakticky shodná s případem desky bez kotvení.

B5. Závěry ze studie polohy kotev

Metodou konečných prvků byly provedeny výpočty odezvy cementobetonových desek na působení teplotních změn a na zatížení vozidlem. Prostorový výpočtový model zahrnuje část konstrukce realizované v areálu firmy Skanska ve Starém Městě u Uherského Hradiště. Některé z cementobetonových desek jsou kotveny pomocí svislých kotev do železobetonové desky teoretického mostu, pro omezení přetvoření desek od změn teploty.

Modelováno je šest CB desek spojených mezi sebou kotvami a trny. Úloha je nelineární, předpokládá se možnost zdvihu desek vůči podkladu.

Byly provedeny dvě sady výpočtů. Výpočet pro porovnání s měřením a výpočty pro studii vlivu polohy kotev.

V případě porovnání výpočtů s měřením se vycházelo z údajů měření ze 7. měsíce 2013. Z grafů je patrné, že zdvih středů desek je výrazně menší než rohů desek. Při porovnání starších záznamů lze vyzorovat neustálé vyrovnávání desek od doby realizace. Lze usuzovat, že desky jsou ovlivněny počáteční smršťováním. V letním období, tj. asi po 200 cyklech od doby realizace se rohy desek vlivem teplot již významně boří do měkkých podkladních vrstev, popřípadě kopírují jejich trvalé deformace. Lze předpokládat, že mezera mezi kraji desek a měkkými podkladními vrstvami se neustále zvětšuje.

Výpočet je vztažen ke stavu, kdy se předpokládá, že deska je před působením zatížení rovinná a teplotní spády jsou odvozeny z měření.

Při porovnání vyčíslených a naměřených hodnot posunutí u_y středů a rohů sledovaných míst desek, lze konstatovat, že vyčíslené hodnoty vystihují chování sledované desky. Poměry zdvihů středu desky a rohů jsou ve stejných poměrech. Změnou modulů tuhosti měkkých podkladních vrstev ve výpočtovém modelu lze dosáhnout větší ještě shody v posunutích. To však není smyslem výpočtu. Výpočet ukazuje na fakt, že na krajích desky jsou mezi deskou a měkkými podkladními vrstvami mezery.

Byla provedena parametrická studie bez kotev a se třemi případy polohy čtyř ocelových kotev při zatížení desek vlastní tíhou a změnou teploty, popř. kontaktními silami vozidla. Teplotní zatížení se uvažuje ve dvou variantách. S předpokládaným zdvihem středu desky $\Delta t = 12\text{ }^\circ\text{C}$ a se zdvihem rohů desky $\Delta t = -5\text{ }^\circ\text{C}$.

Z výpočtu vyplynulo, že nejmenší vzájemný posun středu a rohů desky nastává v případě, kdy jsou kotvy od sebe vzdáleny 3700 mm pro variantu s oteplením $12\text{ }^\circ\text{C}$. Ve variantě s ochlazením o $5\text{ }^\circ\text{C}$ jsou relativní posunutí ve všech případech malé. V případě, kdy kotvy jsou od sebe vzdáleny 3700 mm, jsou posunutí prakticky stejné jako u desky nekotvené.

Teplotní namáhání desek bez kotev a kotvami pro obě varianty se pohybuje v rozmezí od -3,19 po -0,87 MPa v tlaku a od 0,91 po 3,17 MPa v tahu. V případě s kotvami ve vzdálenosti 3700 mm je napjatost srovnatelná s napjatostí desky bez kotev. Nejméně vhodný případ z hlediska napjatosti je případ s kotvami vzdálenými od sebe 600 mm.

Z hlediska velikosti napjatosti vznikající od zatížení vlastní tíhou a vozidlem, lze na základě výpočtu konstatovat, že vypočtená normálová napětí jsou výrazně menší než od zatížení změnou teploty. Ve všech řešených případech jsou hodnoty tahových i tlakových napětí hodně blízké.

Výsledky řešení jsou velmi citlivé na volbu poddajnosti podkladní vrstvy bezprostředně pod deskami. Ve výpočtech bylo nutno uvažovat rozdílnou tuhost pro řešení dlouhodobých účinků zatížení teplotním polem a při krátkodobém zatížení vozidlem.

Ukazuje se, že vliv teploty daleko výrazněji ovlivňuje deformace i následně napjatost v deskách ve srovnání se zatížením vozidlem.

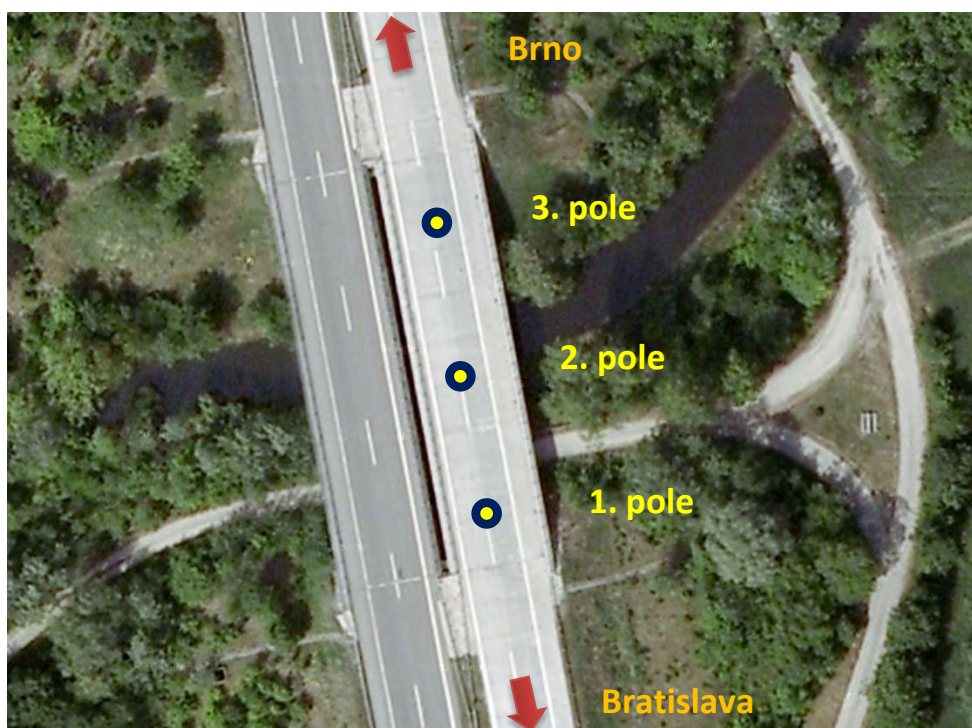
Vhodným způsobem kotvení CB desek ve svislém směru může potlačit zvedání rohů, a tím zmenšit mezery mezi deskou a podkladní vrstvou.

C Frekvenční analýza na mostech

C1. Úvod

Dynamické zatížení a výpočty pomocí numerické analýzy byly také ověřeny srovnáním naměřeného kmitání vozovky mostů.

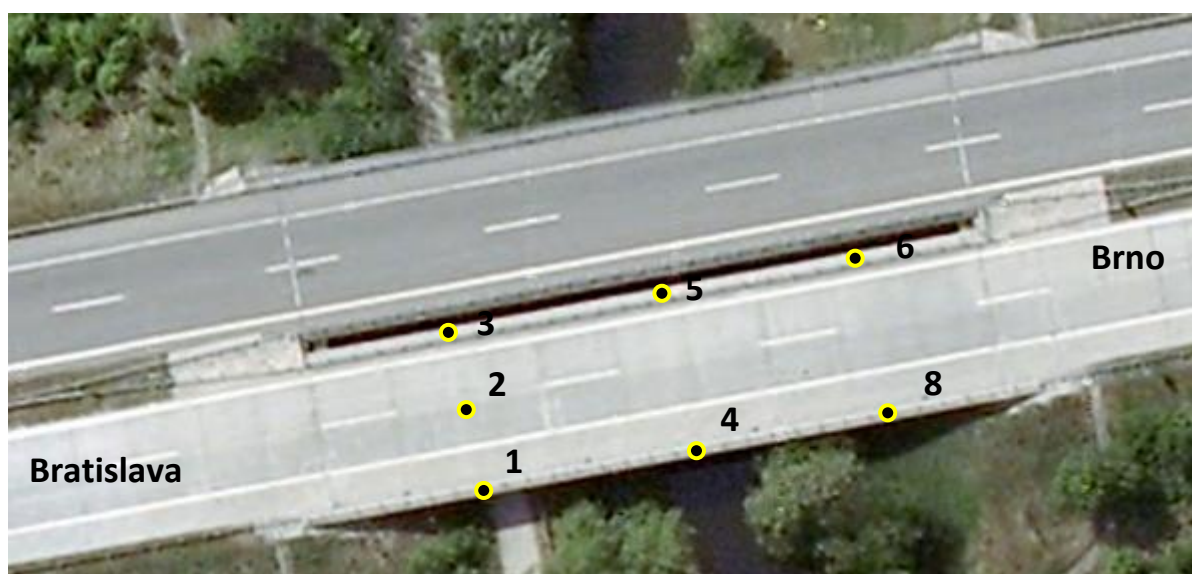
Podrobnosti o způsobu měření a výsledky jsou uvedeny ve zprávě [24]. Výstupem měření jsou hodnoty vlastních frekvencí a jsou podkladem pro verifikaci výpočtů frekvencí a tvarů kmitů uvedené konstrukce. Měření mělo také ukázat možnosti použité měřicí aparatury pro další měření mostu, tentokrát již se zaměřením na časovou odezvu vybraných míst na nosné konstrukci mostu a cementobetonových desek na působení vybraných detailně sledovaných vozidel přejíždějících most.



Obr. C1 Satelitní pohled na levou a pravou část přemostění

C2. Sledovaná konstrukce mostu a místa měření

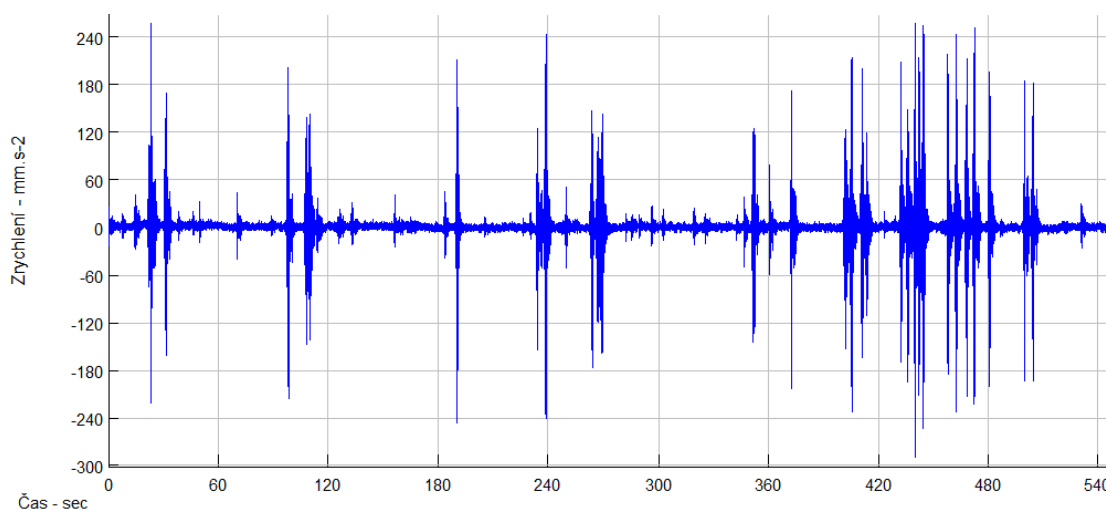
Nosná konstrukce ŽB mostu je popsána v části A. Sledovaná část mostu je patrna z obrázků C1 a C2. Jako první pole mostu o třech polích je vybráno první pojížděné ve směru na Brno. Druhé pole je střední a třetí nejbliže k Brnu. Na mostu bylo umístěno 7 snímačů pro získání záznamu zrychlení při průjezdu vozidla. Rozmístění snímačů je na obr. C2. V prvním poli jsou tři snímače. Dva snímače č. 1 a č. 3 na horním líci říms a snímač č. 2 na spodní ploše prefabrikovaného nosníku. V poli 2 jsou pouze dva snímače č. 4 a č. 5 umístěné na horním líci říms. Snímač ve středu pole nebylo možné z technických důvodů umístit, a bylo upuštěno od jeho umístění. Ve třetím poli jsou rovněž pouze dva snímače číselované 6 a 8 umístěné na římsách. Snímač č. 7 uprostřed třetího pole se nepodařilo zdárně upevnit.



Obr. C2 Umístění a čísla snímačů

C3. Vybrané výsledky měření

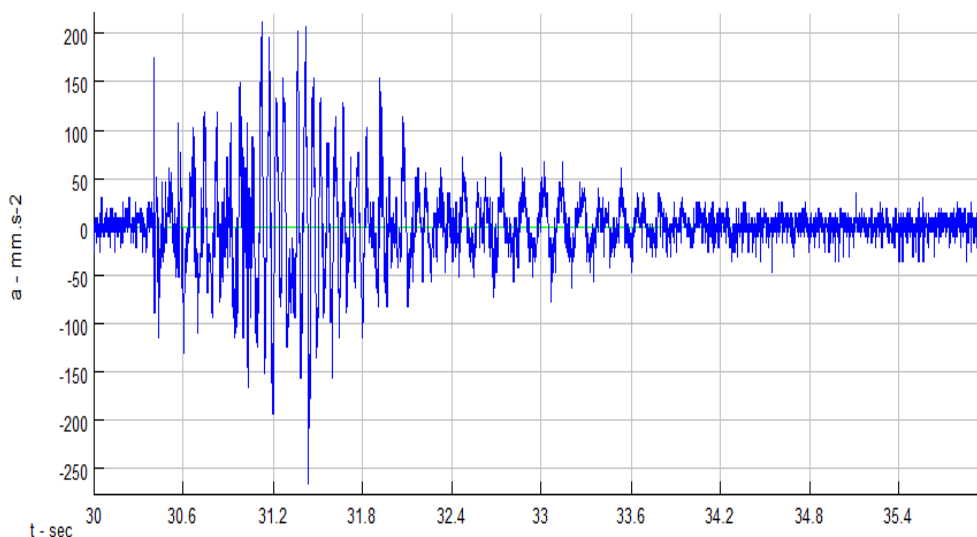
Z databáze záznamů měření byly zpracovány dva signály pro 1. a 2. pole. Výsledky jsou převzaty z [24]. Jako ukázka naměřeného signálu před zpracováním je na obr. C3.



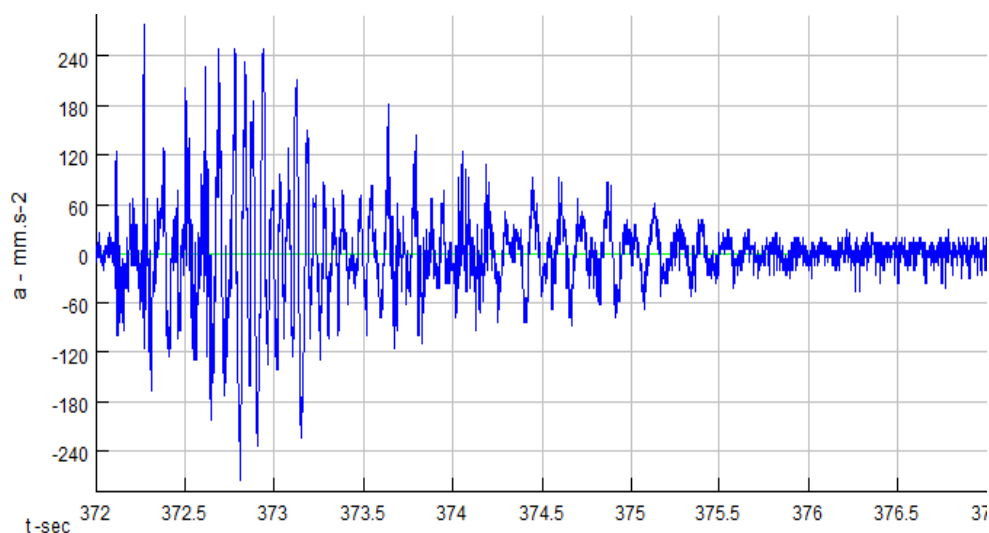
Obr. C3 Naměřený blok dat – zrychlení

Vybraný časový záznam pojezdu vozidla po mostu byl analyzován s cílem získat frekvenční charakteristiky obsažené v signálu. Na obrázcích C4 a C5 jsou záznamy zrychlení ve svislém směru od působení vozidla označeného 1 a 2. Vozidla byla vybrána pro první a druhé pole. Záznamy vztažené k vozidlu označeného 3 jsou uvedeny ve zprávě [24].

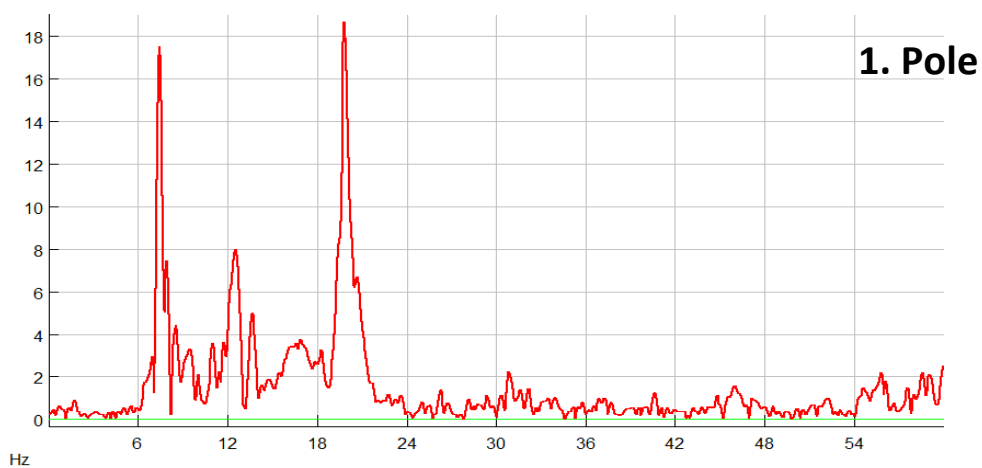
Byly vytvořeny amplitudo-frekvenční záznamy pro jednotlivá místa prvního a druhého pole. Vybrané záznamy jsou na obrázcích C6 až C10. Pod obrázky je popis, ke kterému poli a snímači uvedený záznam patří.



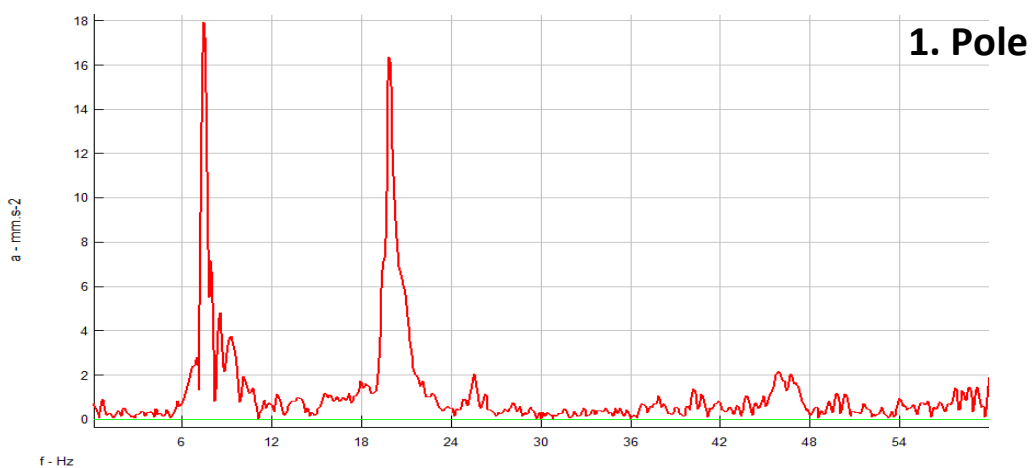
Obr. C4 Vozidlo 1 – celý záznam



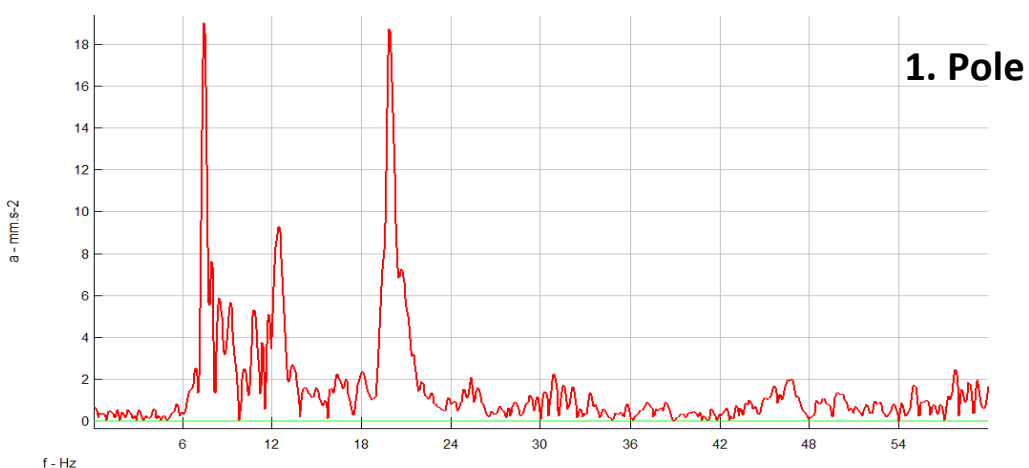
Obr. C5 Vozidlo 2 – celý záznam



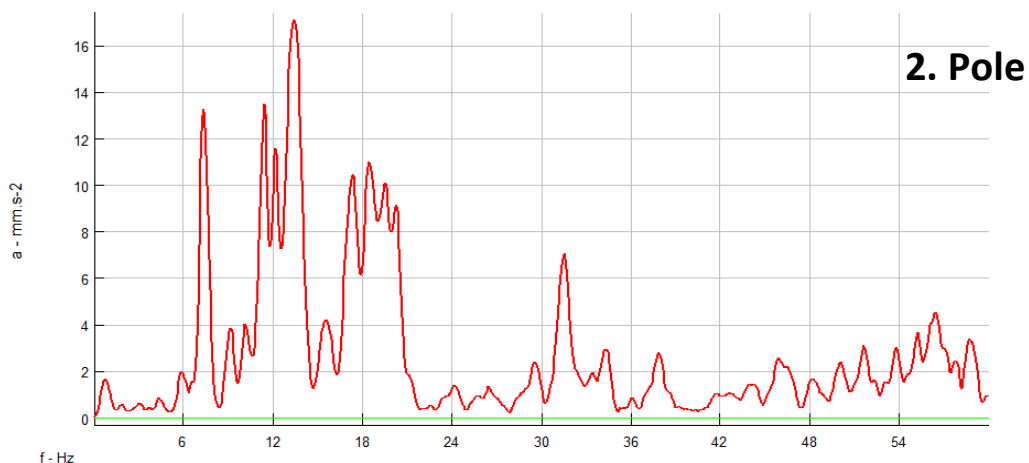
Obr. C6 První pole – vozidlo 1 – snímač č. 1



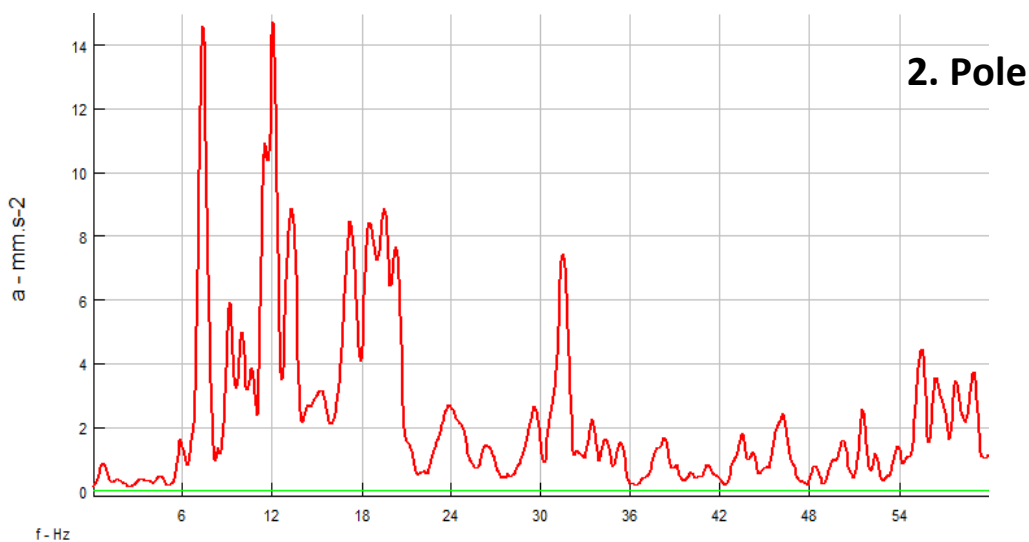
Obr. C7 První pole – vozidlo 1 – snímač č. 2



Obr. C8 První pole – vozidlo 1 – snímač č. 3

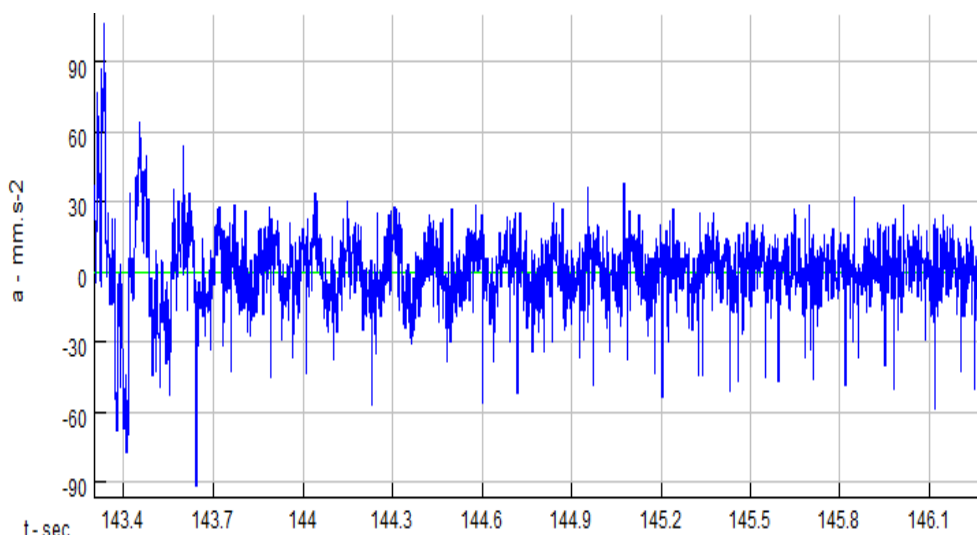


Obr. C9 Druhé pole – vozidlo 2 – snímač č. 4

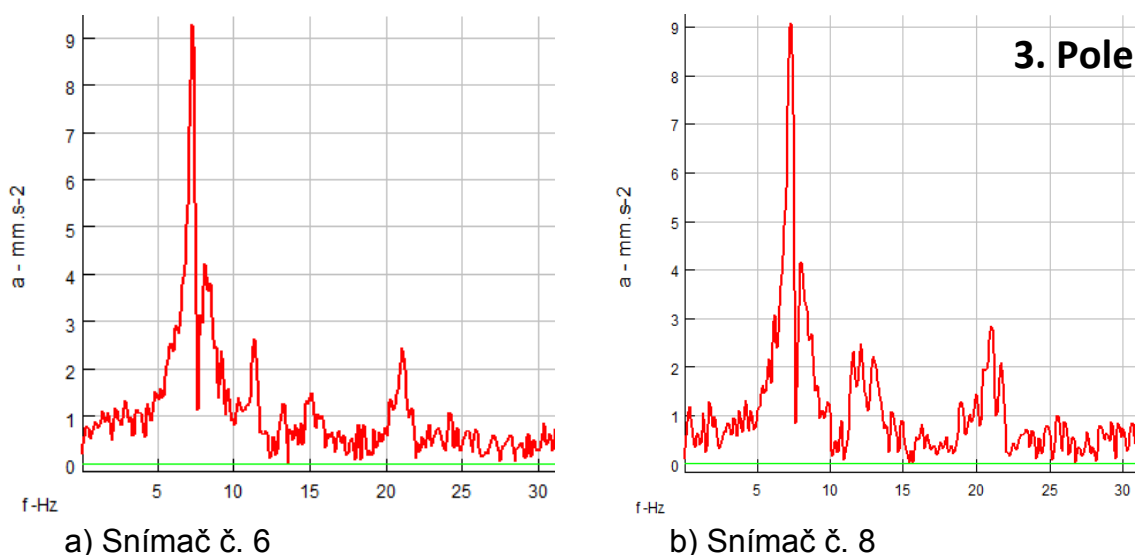


Obr. C10 Druhé pole – vozidlo 2 – snímač č. 5

Pro doplnění se uvádí na obr. C11 koncový záznam zrychlení odezvy ve svislém směru od působení vozidla označeného 3, kdy konstrukce přechází na volné kmitání. Koncová část byla použita pro upřesnění vlastního kmitání. Amplitudo-frekvenční závislosti odpovídající záznamům „volného“ kmitání“ analýzou signálů z čidel č. 6 a č. 8 jsou zobrazeny na obr. C12



Obr. C11 Vozidlo 3 – přechod na volné kmitání

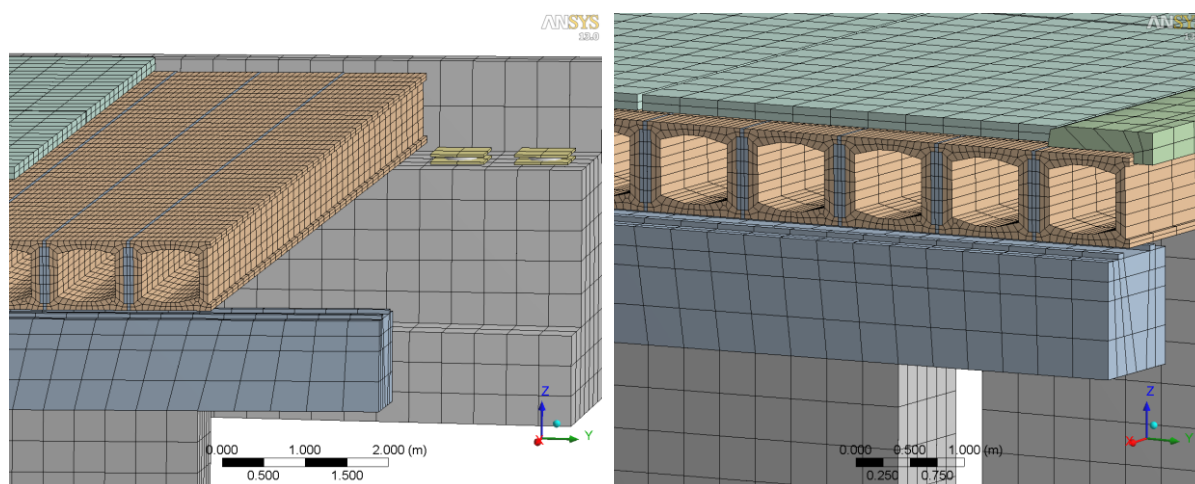


Obr. C12 Třetí pole – vozidlo 3

C4. Vybrané výsledky výpočtů

C4.1. Výpočtový model

V programovém systému ANSYS byl metodou konečných prvků sestaven výpočtový model mostu, viz obr. C13 [20]. Jedná se o levý z dvojice mostů, který přenáší konstrukci vozovky jízdních pruhů ve směru na Brno. Výpočtový model mostu je vhodný pro řešení dynamické odezvy na pojezd vozidla. V první fázi byly vypočteny vlastní frekvence a vlastní tvary kmitu nosné mostní konstrukce mostu včetně cementobetonové vozovky.



Obr. C13 Detailnost modelu – dělení na prvky

C4.2. Výpočet vlastního kmitání

Vyčísleno bylo 50 nejnižších vlastních frekvencí a tvarů kmitu blokovou Lanczosovou metodou [1]. Výpočet byl proveden s maticí tuhosti „stress stiffening matrix“, která je vypočtena z aktuálního stavu napjatosti. Pole napjatosti modelovaných částí bylo vypočítáno za předpokladu statického zatížení vlastní tíhou a předpětím a za předpokladu postupné montáže:

- předepnutí prefabrikovaných nosníků (ekvivalentní zatížení od předpětí),
- montáž nosníků na podpěry (vnesení zatížení vlastní tíhou),
- aktivace prvků modelující nad podporové táhla mezi nosníky,
- aktivace prvků modelující CB desku a římsy.

Aktivace prvků byla provedena v aktuální poloze s nulovou napjatostí. V tabulce C12 [20] je uvedeno prvních 20 vlastních frekvencí modelu a efektivní kmitající hmota z hlediska rovnoměrného buzení zrychlením (setrvačnými silami). Odpovídající vlastní tvary jsou uvedeny ve zprávě [20].

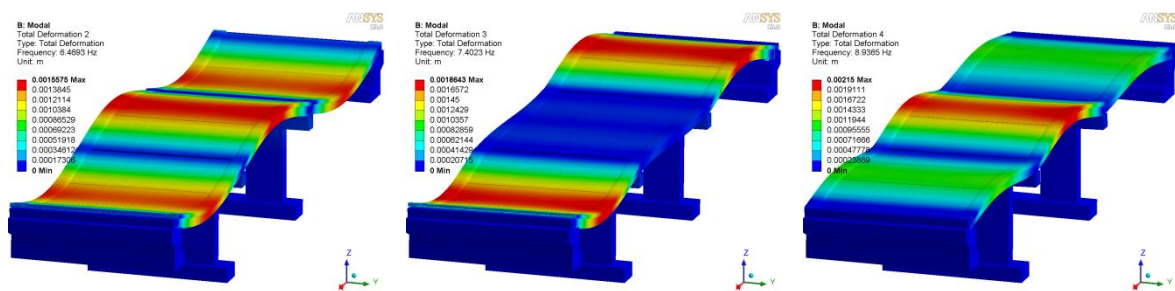
Tabulka C1 Vlastní frekvence modelu a efektivní hmotnosti

N	f [Hz]	$M_{eff,x}$ [kg]	$M_{eff,y}$ [kg]	$M_{eff,z}$ [kg]
1	2,9	1 164 920	0	25
2	6,5	107	23	65 542
3	7,4	5 859	0	4
4	8,9	0	1 041	689 119
5	10,8	0	262 373	405
6	11,2	0	163 295	165
7	11,6	1	248	0
8	14,4	0	502 271	192
9	21,5	1	432	0
10	23,4	2 787	0	1
11	24,4	16	19	4 946
12	25,4	0	1	30
13	25,5	1	0	2
14	25,9	0	5	40
15	26,0	0	0	1
16	28,2	0	1	0
17	28,5	9	3	5 250
18	29,4	0	9 412	1
19	30,0	0	12	0
20	36,9	0	112 406	36

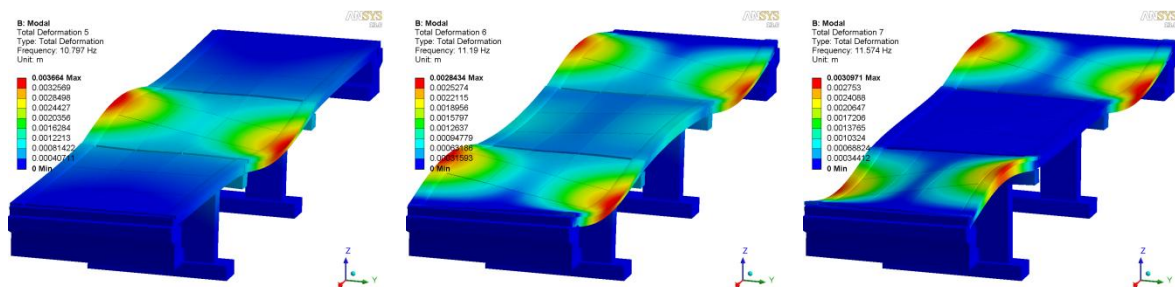
C5. Porovnání výpočtů s výsledky měření

Vzájemná identifikace vypočtených frekvencí a naměřených frekvencí z údajů podle [24] je značně komplikovaná. Z tohoto důvodu je uváděno pouze 12 naměřených frekvencí a jim odpovídající tvary kmitů

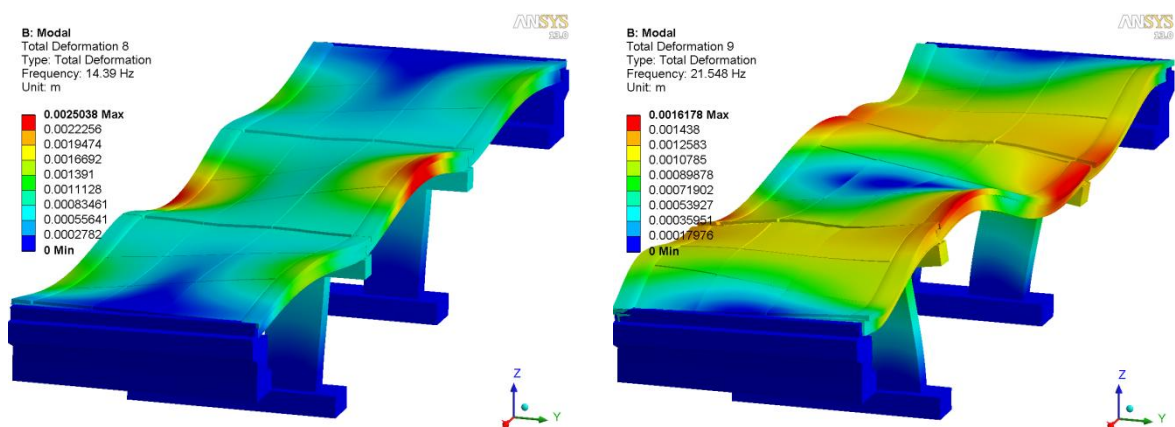
Výpočtem získané frekvence lze rozdělit do několika skupin v závislosti na tvarech kmitů. Nejnižší vlastní frekvence 2,92 Hz odpovídá podélnému kmitu s posunutím desky a ohybem podpěr. První významná skupina frekvencí odpovídá prvním ohybovým kmitům tří částečně sprážených polí. Jsou to frekvence v oblasti 6,5 až 8,9 Hz, viz obr. C14. Další skupinou jsou tři frekvence v rozsahu 10,8 až 11,6 Hz odpovídající prvním torzním tvarům kmitů, obr. C15. Frekvence 14,4 Hz a 21,5 Hz odpovídají tvarům s kmitající deskou i s kmitajícími vnitřními podpěrami, obr. C16. Skupina druhých ohybových tvarů kmitů je na obr. C17 a odpovídá frekvencím 23,4 a 24,4 Hz. Další 12. frekvence 25,4 Hz odpovídá příčnému ohybovému tvaru kmitu.



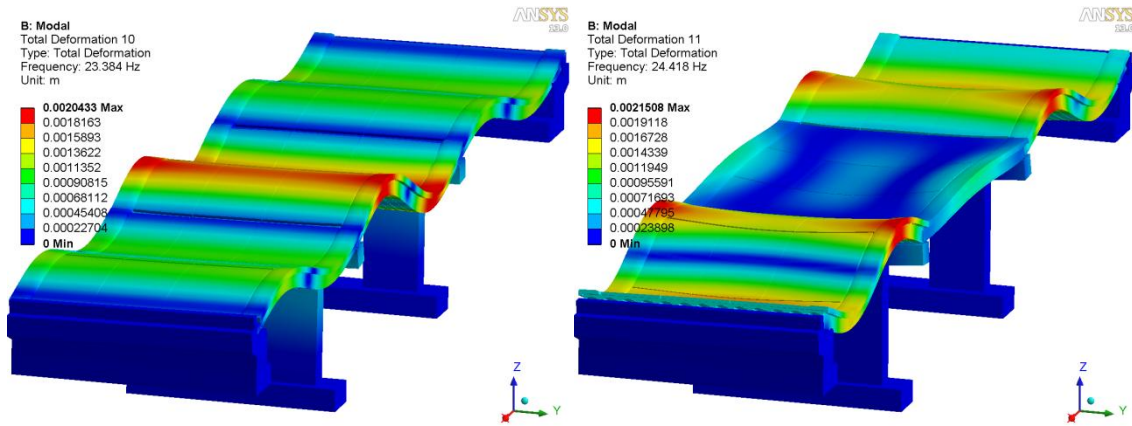
Obr. C14 Skupina 1. ohybových tvarů kmitů



Obr. C15 Skupina 1. torzních tvarů kmitů



Obr. C16 Samostatné tvary kmitů



Obr. C17 Skupina 2. ohybových tvarů kmitů

Porovnání výsledků výpočtu a měření je shrnuto v tabulkách C2 až C7. Porovnávají se naměřené frekvence a vypočtené. Jsou průměrovány hodnoty převzaté z [24] přílohy P1. Hodnoty v tabulkách odpovídají převážně výsledkům získaných z celých záznamů. Výběr hodnot není jednoduchý. Chybí analýza pohybu míst v čase, kde byly snímače umístěny.

Tabulka C2 Porovnání frekvencí 1. pole – první skupina

Vozidlo	Frekvence		Frekvence		Frekvence	
	f [Hz]	a_v [mm.s ⁻²]	f [Hz]	a_v [mm.s ⁻²]	f [Hz]	a_v [mm.s ⁻²]
1	6,99	2,83	7,47	17,40	8,54	4,40
	6,95	2,79	7,44	17,93	8,54	4,78
	6,96	2,53	7,45	18,99	8,48	5,86
2			7,41	11,66		
			7,35	11,64	8,67	3,46
			7,41	12,81	8,57	4,52
Průměr	6,96		7,42		8,56	
Výpočet	6,47		7,40		8,94	

Tabulka C3 Porovnání frekvencí 1. pole – druhá skupina

Vozidlo	Frekvence		Frekvence		Frekvence	
	f [Hz]	a_v [mm.s ⁻²]	f [Hz]	a_v [mm.s ⁻²]	f [Hz]	a_v [mm.s ⁻²]
1	11,02	3,57	11,75	3,56	12,53	7,93
	11,35	3,74	11,78	5,11	12,39	9,28
2			11,81	16,30	12,48	10,65
	10,22	3,23	11,44	2,94	12,14	3,04
	10,37	5,90	11,63	13,68	12,32	8,23
Průměr	10,74		11,68		12,37	
Výpočet	10,80		11,19		11,57	

Tabulka C4 Porovnání frekvencí 2. pole – první skupina

Vozidlo	Frekvence		Frekvence		Frekvence	
	f [Hz]	a_v [mm.s ⁻²]	f [Hz]	a_v [mm.s ⁻²]	f [Hz]	a_v [mm.s ⁻²]
1	6,29	2,55	7,45	16,75	9,34	5,15
			7,51	18,15	9,45	9,46
2			7,38	13,26	9,18	3,85
			7,38	14,56	9,22	5,87
Průměr			7,43		9,30	
Výpočet	6,47		7,40		8,94	

Tabulka C5 Porovnání frekvencí 1. pole – druhá skupina

Vozidlo	Frekvence		Frekvence		Frekvence	
	f [Hz]	a_v [mm.s ⁻²]	f [Hz]	a_v [mm.s ⁻²]	f [Hz]	a_v [mm.s ⁻²]
1	11,11	2,93	11,78	6,64	12,75	11,63
	10,62	5,10	11,47	6,48	12,39	11,42
2	10,16	4,02	11,41	13,42	12,18	11,61
	10,62	3,82	11,57	10,88	12,14	14,55
Průměr	10,63		11,56		12,37	
Výpočet	10,80		11,19		11,57	

Tabulka C6 Porovnání frekvencí 3. pole – první skupina

Vozidlo	Frekvence		Frekvence		Frekvence	
	f [Hz]	a_v [mm.s ⁻²]	f [Hz]	a_v [mm.s ⁻²]	f [Hz]	a_v [mm.s ⁻²]
3			7,17	22,95		
			7,69	23,95		
			7,20	13,19		
			7,72	15,65		
			7,32	9,28	8,18	4,20
	6,22	3,06	7,32	9,09	8,06	4,16
Průměr			7,45		8,12	
Výpočet	6,47		7,40		8,94	

Tabulka C7 Porovnání frekvencí 3. pole – druhá skupina

Vozidlo	Frekvence		Frekvence		Frekvence	
	f [Hz]	a_v [mm.s ⁻²]	f [Hz]	a_v [mm.s ⁻²]	f [Hz]	a_v [mm.s ⁻²]
3	9,61	4,05	11,44	19,25		
	9,61	4,35	11,32	17,88	12,21	8,54
Průměr	9,61		11,38			
Výpočet	10,80		11,19		11,57	

Jako pomocné hodnoty byly brány výsledky analýzy ze zkrácených záznamů měření, které zahrnují „volné kmitání“, viz tab. C6 – zeleně podbarvené řádky. Významnost (intenzita) odezvy je vázána na hodnotu zrychlení ve svislém směru. Podélné a příčné kmitání při pojezdu vozidel nebylo zkoumáno.

Vyčíslená hodnota frekvence 14,4 Hz pravděpodobně odpovídá naměřeným hodnotám kolem 13,3 Hz, obdobně vyčíslená hodnota frekvence 21,5 Hz odpovídá naměřeným hodnotám kolem 19,5 Hz. Pro jednoznačnou odpověď je třeba navrhnout postup měření tak, aby bylo možné identifikovat současně s frekvencí i tvar kmitu.

C6. Závěry z porovnání výpočtů s výsledky měření

Analýzou naměřených záznamů zrychlení byly vyčísleny amplitudo-frekvenční závislosti pro určení vlastních frekvencí kmitání železobetonové nosné konstrukce mostu. Výsledky odezvy získané ze záznamů pojezdu tří vozidel jsou uspořádány v tabulkách, jsou převzaty ze zprávy [21]. Získané závislosti jsou výrazně ovlivněny výběrem záznamu a jeho zpracováním.

Výstupem měření jsou hodnoty vlastních frekvencí a jsou podkladem pro verifikaci výpočtů frekvencí a tvarů kmitů uvedené konstrukce.

Výpočet vlastních frekvencí a tvarů kmitů byl proveden metodou konečných prvků v programovém systému ANSYS. Byl sestaven podrobný výpočtový model konstrukce mostu včetně CB desek. Geometrie modelu je v souladu s výkresovou dokumentací. Materiálové vlastnosti odpovídají návrhových charakteristikám.

Bylo vypočteno 50 vlastních frekvencí a tvarů kmitů. Z hlediska rozsahu a detailnosti výsledků měření bylo sledováno 12 vypočtených frekvencí s naměřenými hodnotami. Výsledky porovnání výpočtu a měření jsou zpracovány ve formě tabulek. Ukazuje se velmi dobrá shoda výsledků měření a výpočtu. Sestavený výpočtový model lze použít pro výpočty odezvy konstrukce v časové oblasti.

Měření prokázalo, že použitou měřicí aparaturu lze použít pro další měření mostu, tentokrát již se zaměřením na časovou odezvu vybraných míst na nosné konstrukci mostu a cementobetonové vozovky. Předpokládá se odezva na působení vybraných detailně sledovaných vozidel přejíždějících most.

Výpočty odezev na dynamické účinky vozidel jsou podkladem pro posouzení chování CB desek na mostech. Výsledky výpočtů budou zahrnuty do posouzení CB desek z hlediska jejich přemístění, deformací a napjatosti. Sestavený komplexní prostorový model mostní konstrukce bude současně využit pro sledování namáhání CB od působení změn teplot v nosné konstrukci mostu a CB deskách. Vypočtené teplotní pole v nosných prvcích mostu bude verifikováno s naměřenými hodnotami a použito jako zatížení CB desek a nosných konstrukcí mostu. Získané výsledky přemístění, přetvoření a napjatosti budou detailně analyzovány z hlediska možného vzniku poruch v CB deskách.

Srovnání „novosti postupů“

Novost postupů ve srovnání s předchozími postupy je v tom, že běžně používané postupy nemohou vystihnout komplexnost řešené problematiky. Vyžaduje se řešení, kdy se využívají prostorové velmi detailně propracované lineární i nelineární modely vozovek včetně podkladních vrstev a podpůrných nosných konstrukcí, např. mostů. Je možné jednoduše zohlednit rozhodující tvarovou různorodost konstrukcí se všemi detaily. Běžně aplikované postupy toto nedovedou. Tato skutečnost byla ověřena při řešení projektu srovnáním s výpočty na modelech sestavených z plošných prvků.

Popis uplatnění certifikované metodiky

Metodiku lze bezproblémově uplatnit pro simulaci speciálních analýz při sledování a analýze vozovek. Matematické modelování s využitím certifikovaných programových systémů, ke kterým programový systém ANSYS zajišťuje komplexnost a úplnost řešení definovaných úloh praxe. Lze určit statickou a dynamickou odezvu vozovek na působení různých typů zatížení. Využití uvedené metodiky dovoluje doplnit, popřípadě nahradit praktické zkoušky. Popsaný postup lze aplikovat pro nový návrh konstrukcí vozovek, detailní posouzení návrhu detailů a inovativních prvků v konstrukci vozovek.

Ekonomické aspekty

Pro zdárné využití je potřeba použít vhodný software na bázi MKP (ANSYS, ABACUS, ADINA, LS-Dyna apod.) s podmínkou rutinní znalosti programu uživatelem. Vyžaduje se vysoká odborná znalost řešené problematiky. Z tohoto se odvíjejí náklady na uplatnění metodiky.

Na druhé straně metodika byla ověřena a umožňuje nahradit experimenty podobného typu, jako proběhly v rámci řešení projektu, na nichž byla metodika ověřena. Tím se proces vhodného návrhu konstrukcí a detailů stává ekonomickým.

Seznam literatury a norem

- [1] SAS IP, Inc., Release 13.0: Documentation for ANSYS. 2010.
- [2] DOSING Dopravoprojekt Brno group, s.r.o.: Rekonstrukce mostu ev.č. D2-055 přes lesní cestu a kanál „Hakalovská“, levý most. Výkresová dokumentace, únor 2009.
- [3] Link projekt s.r.o.: Pilotní projekt zkoušky betonáže CBK. Brno, 2012.
- [4] Link projekt s.r.o.: Pilotní projekt – projektová dokumentace. Brno, 2012.
- [5] Excel tabulky s průběhy sil a posunutí během experimentů: 3H.xlsx, 9S.xlsx
- [6] Excel tabulky s průběhy sil a posunutí během experimentů: Etalon 1 a body 1-2-101-102-201-202, Etalon 2 (předepjatý) a body 1-2-3-4, z předvánočního měření 2013 na Etalonech v areálu Skanska Staré Město.
- [7] Excel tabulka: Průběh teplot na pokusném poli při měření FWD.xlsx
- [8] Excel tabulka: Průběh teplot na pokusném poli při měření FWD 9. 7. 2013.xlsx
- [9] Skanska a.s.: Cementobetonové vozovky na mostech, příloha PP1: Souhrnná roční zpráva měření teplot na mostě D2-055. Výzkumný projekt TA01031805, 2013.
- [10] ČSN 73 2001: Navrhování betonových konstrukcí. 1970.
- [11] ČSN EN 206-1 Beton - výroba, specifikace a shoda. 2001.
- [12] ČSN 73 0032: Výpočet stavebních konstrukcí zatížených dynamickými účinky strojů. Únor 1977.
- [13] Excel tabulka: FWD Moduly_09_07_Skanska_STREDY.xlsx
- [14] Excel tabulka: FWD Moduly_20_05_SkanskaSTREDY.xlsx

- [15] Excel tabulky s průběhy sil a posunutí během experimentů: 3H.xlsx, 9S.xlsx
- [16] Excel tabulky s průběhy sil a posunutí během experimentů: Etalon 1 a body 1-2-101-102-201-202, Etalon 2 (předepjatý) a body 1-2-3-4, z předvánočního měření 2013 na Etalonech v areálu Skanska Staré Město.
- [17] ČSN 1992-1-1 Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby. Prosinec 2006.
- [18] Ministerstvo dopravy, Obor silniční infrastruktury: Navrhování vozovek pozemních komunikací, technické podmínky. Dodatek TP 170, 2010
- [19] Salajka, V., Čada, Z. Výpočet statického působení CD desky na dálničním mostě. Část P3 Cementobetonové vozovky na mostech, Výzkumný projekt TA01031805, 2011, 14 stran
- [20] Salajka, V., Čada, Z. Výpočet vlastních frekvencí a tvarů kmitů dálničního mostu před Lanžhotem směr Brno. Část P4 Cementobetonové vozovky na mostech, Výzkumný projekt TA01031805, 2011, 16 stran
- [21] Salajka, V., Čada, Z. Porovnání výsledků měření a vypočtených vlastních frekvencí dálničního mostu před Lanžhotem směr Brno. Část PP3 Cementobetonové vozovky na mostech, Výzkumný projekt TA01031805, 2012, 24 stran.
- [22] Salajka, V., Čada, Z. Numerická analýza chování cementobetonových desek při rázových zkouškách na mostech. Výzkumná zpráva, VUT, FAST Brno, Výzkumný projekt TA01031805, 2013, 50 stran
- [23] Salajka, V., Hanzlík, T. Studie vlivu polohy svíslých kotev na napětí teplotně zatížení zkušební konstrukce cementobetonové konstrukce. Výzkumná zpráva, VUT, FAST Brno, Výzkumný projekt TA01031805, 2013, 19 stran
- [23] Spies, K. Odezva mostu na dopravní zatížení - Zpracování a frekvenční analýza naměřených signálů zrychlení, Stradis, s.r.o., Projekt TA 01031562 Technologie úprav povrchu cementobetonových krytů pro zvýšení bezpečnosti a snížení hlučnosti silničního provozu, 2012, 18 stran

Dedikace na projekt

Metodika vznikla v rámci projektu TAČR TA01031805 Cementobetonové vozovky na mostech (2011-2013, TA0/TA).

Vypracovali: doc. Ing Vlastislav Salajka, CSc.
prof. Ing. Jan Kudrna, CSc.