



Dynamická analýza Trojské lávky – poznatky z analýzy možnosti včasné detekce jejího porušení

Pavel Ryjáček, Vladimír Příbramský, Alexey Tretyakov, Tomáš Plachý
(Fakulta stavební ČVUT v Praze)



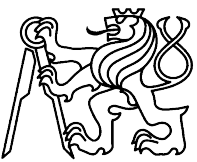
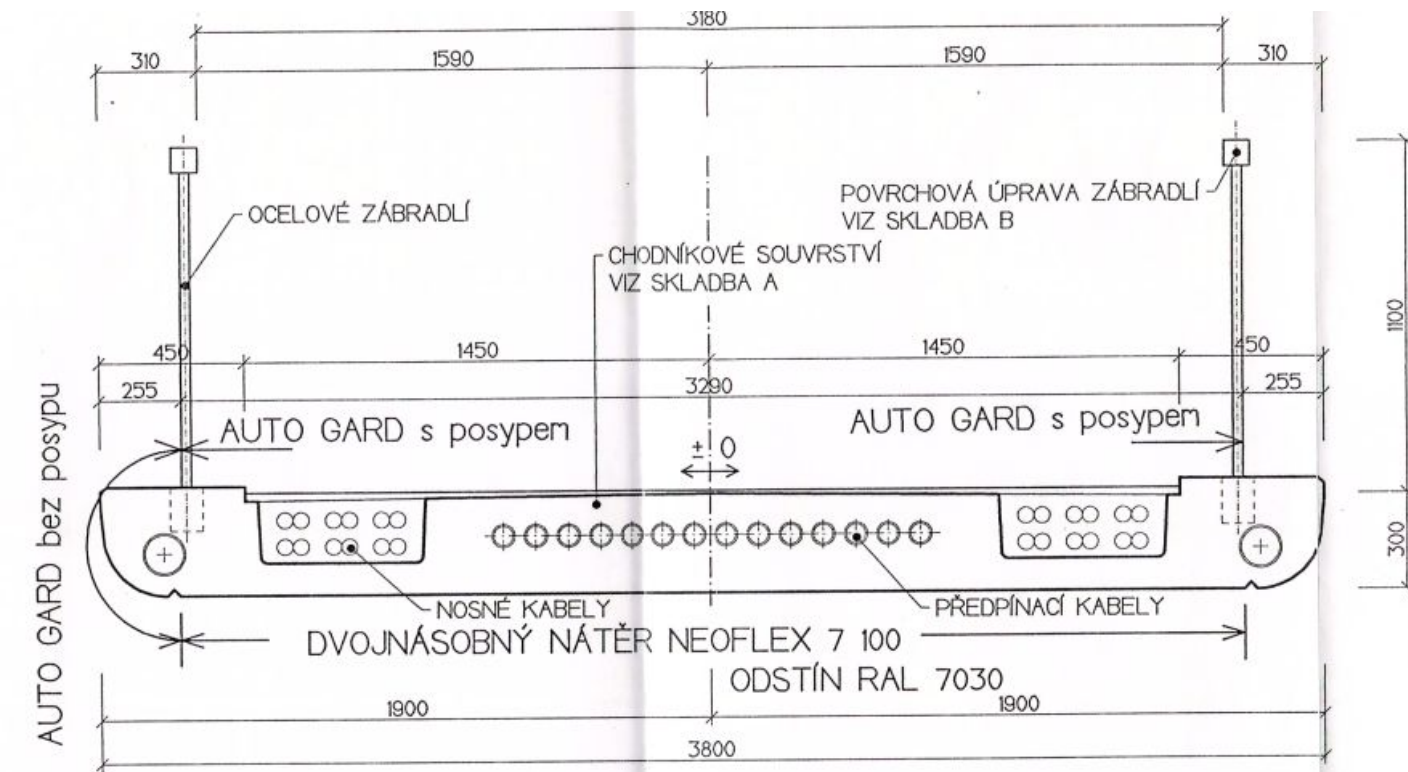
Úvod

- Presentace výsledků expertízy, která byla prováděna pro TSK Praha. Cílem bylo:
- Zjištění způsobu a velikosti projevu poruch v konstrukci Trojské lávky, které přispěly k pádu konstrukce, na dynamické odezvě lávky.
- Porovnání těchto projevů s projevy jiných, nefatálních poruch lávky a jejího příslušenství a vybavení či dalších vlivů prostředí (teplota, sedání atd..).
- Zjištění, zda provedené dynamické zkoušky metodou modální analýzy mohly odhalit vzniklou poruchu v daném či jiném uspořádání.



Popis lávky

- Lávka z roku 1984.
- Předpjatý pás z prefabrikovaných segmentů
- Rozpětí polí bylo 85,50 m + 96,00 m + 67,50 m
- V sobotu 2. prosince 2017 se lávka zřítila a čtyři lidé byli při pádu zraněni.



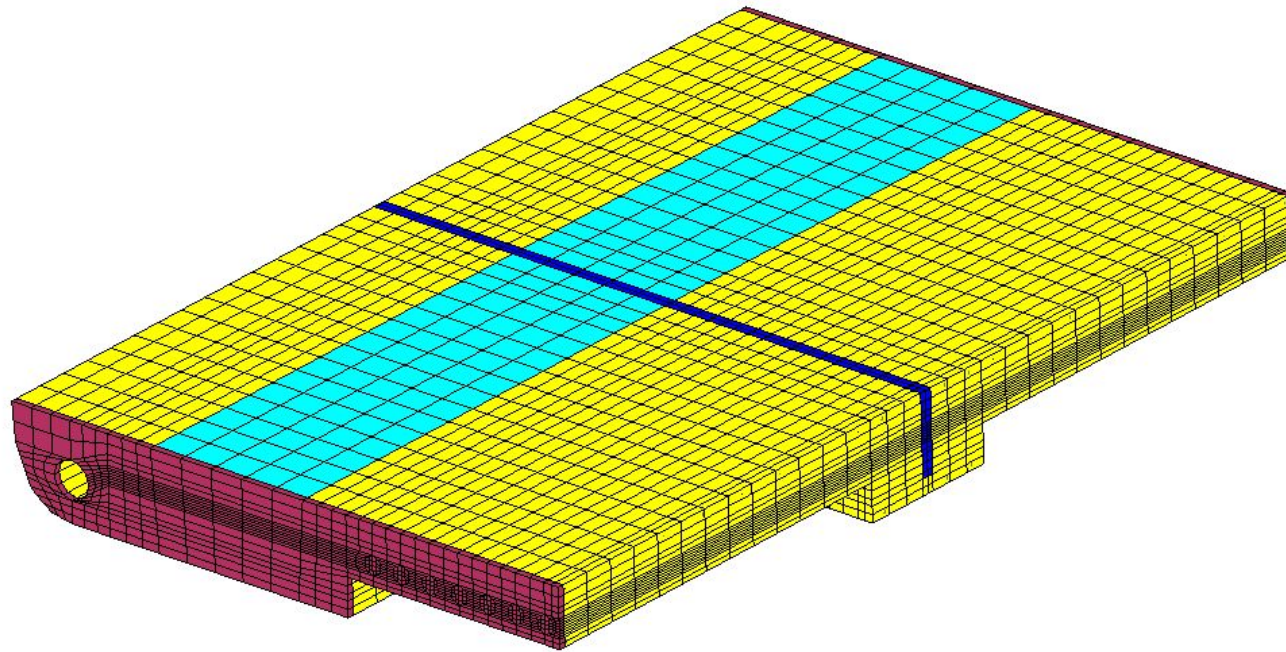
Analýza podkladů a zbytků lávky

- Analýza existujících podkladů, výsledky geodetického sledování, monitoringu a statických a dynamických měření.
- Dále analyzováno:
 - kaverny v dobetonávce kabelů Alfa,
 - koroze předpínacích kabelů Alfa,
 - nezainjektované kanálky kabelů Beta a jejich koroze
 - separace dobetonávky kanálku pro kabely Alfa,
 - změna teploty konstrukce,
 - vliv zatuhnutí zábradelních dílců,
 - zanesení ložisek - vliv tuhosti podepření koncových segmentů,
 - vliv nerovnoměrného sedání pilířů.



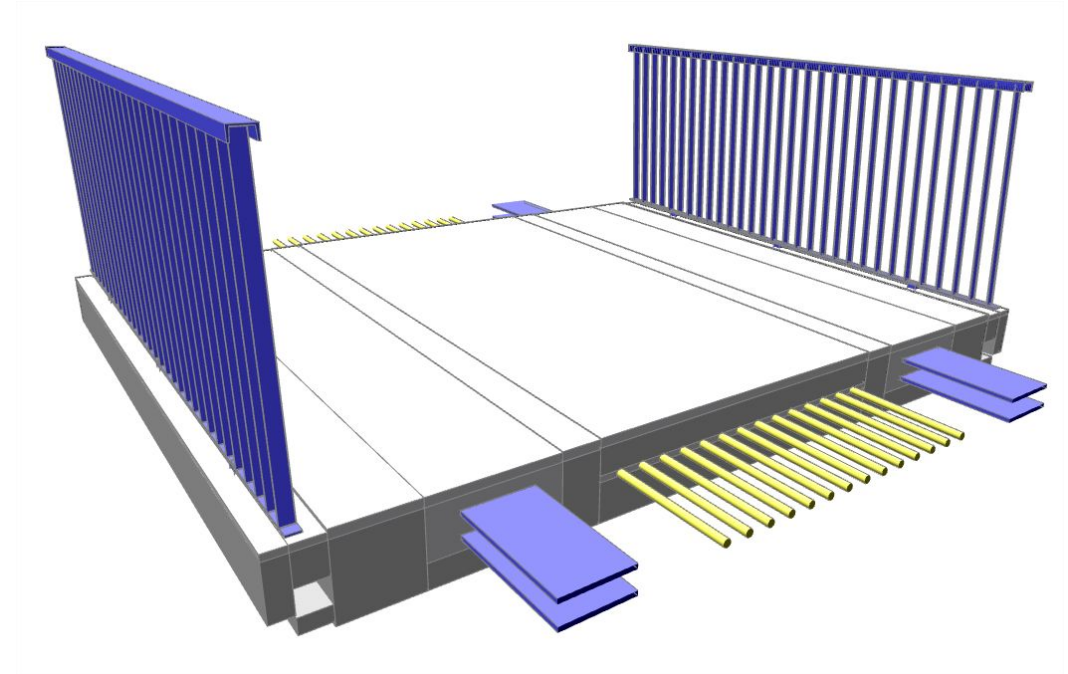
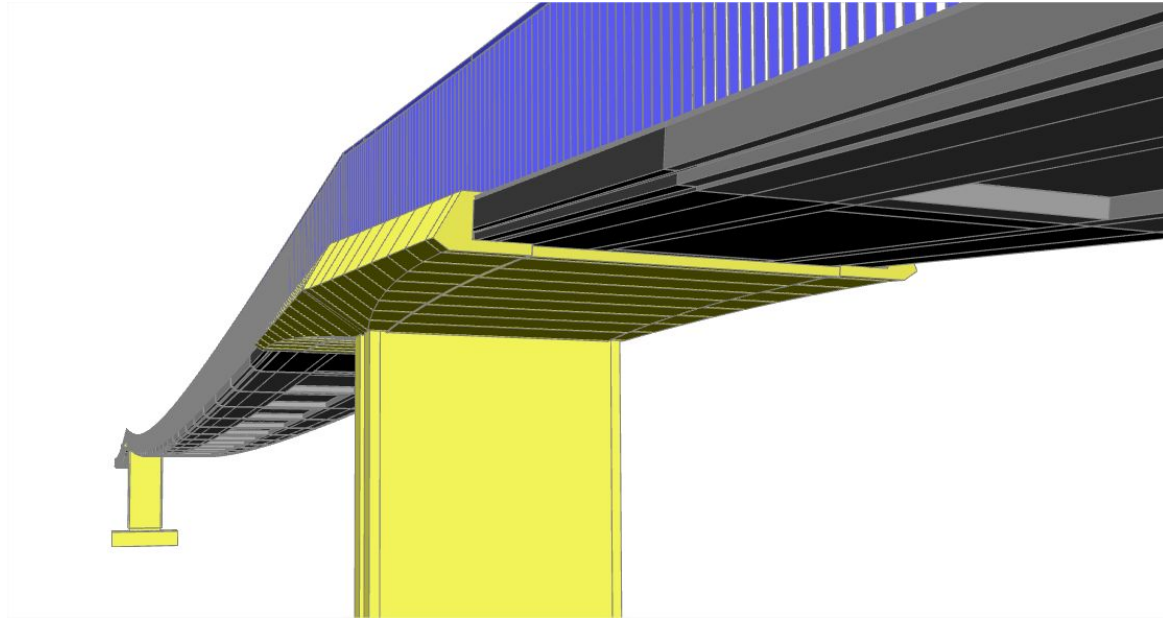
Pokročilý model výseku lávky

- Pokročilý MKP model byl proveden ve výpočetním software ATENA. Model sloužil pro analýzu vlivu poruch Alfa a Beta lan na tuhost spojů jednotlivých segmentů mostu.
- Výpočtem byly stanoveny hodnoty rozevření spár použité v globálním modelu pro různé varianty korozního úbytku lan, které pak byly implementovány do globálního modelu lávky.



3D podrobný model lávky

- 3D desko-stěnovým model s prutovými prvky, teorie 3. řádu v programu Scia Engineer.
- Sendvičový model desky
- Zábradlí, předpětí vneseno počátečním napětím



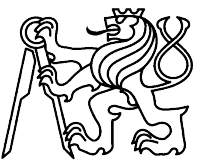
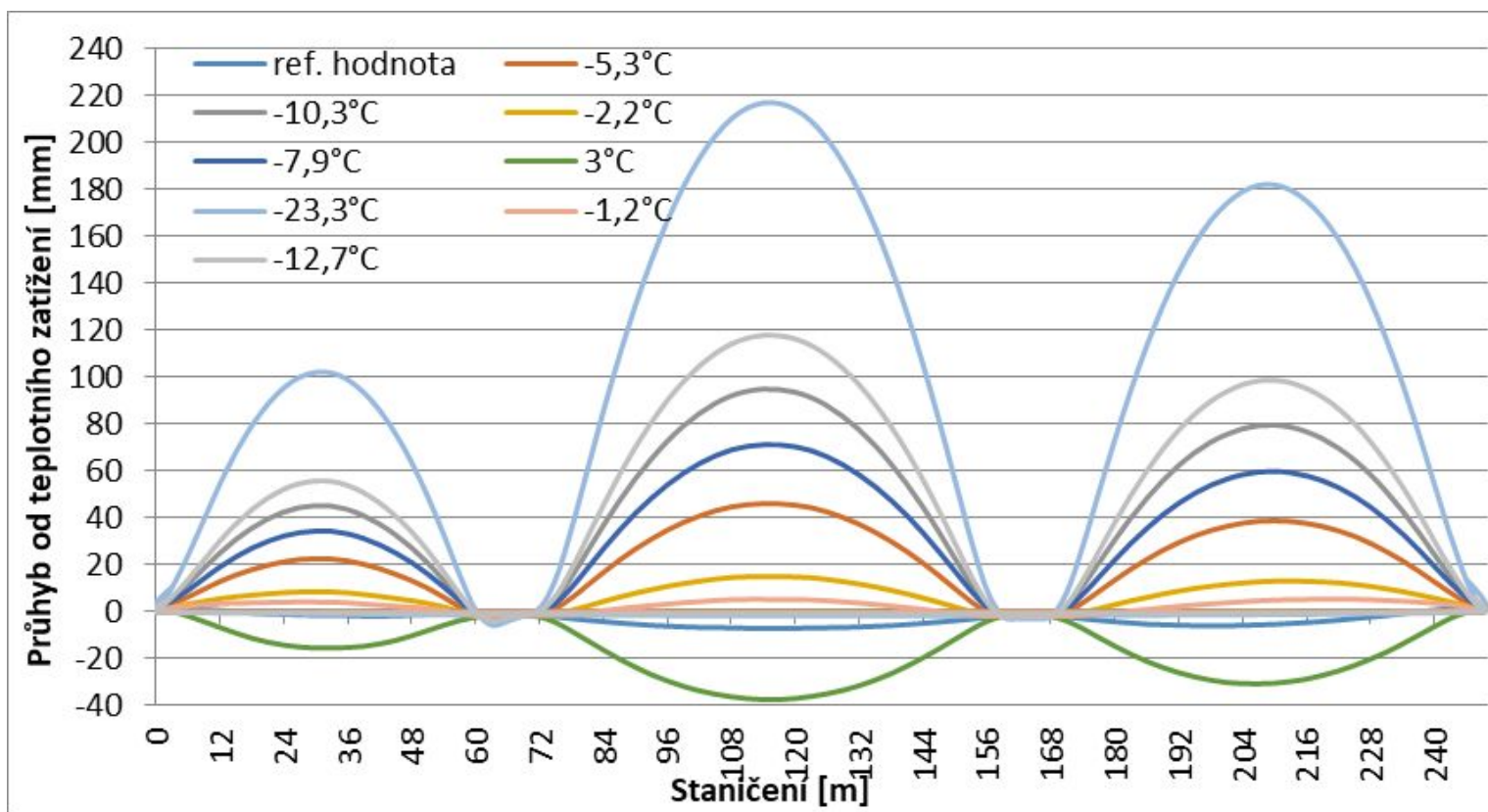
Analýza výsledků na základě změny vlastních tvarů a frekvencí

- Analýzu vlastních tvarů a frekvencí.
- Změna křivosti tvarů vlastního kmitání označovaná CAMOSUC(j),x (Change of mode surface curvature).
- Změna odpovídajících diagonálních členů matice modální poddajnosti $[\delta]$, tedy změnu průhybů konstrukce vyvolanou fiktivní jednotkovou silou působící v bodě r.
- Druhá derivace změny matice modální poddajnosti
- Dvě sítě bodů – v řezu dva body
- V podélném směru
 - 86 bodů po 3 m - odpovídá délce prefabrikátu
 - 24 bodů - z počáteční dynamické zkoušky po dokončení lávky.



Vliv teploty na deformace lávky

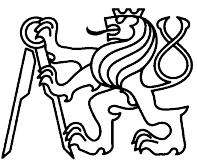
- Od roku 2012 probíhala na lávce v pravidelných intervalech přesná nivelace. V průběhu nivelace byla měřena teplota vzduchu a nosné konstrukce lávky.
- Výsledná přetvoření mostu jsou zobrazena na grafu níže, je patrná extrémní citlivost na teplotu a vysoké deformace.



Závislost vlastních tvarů a frekvencí na teplotě

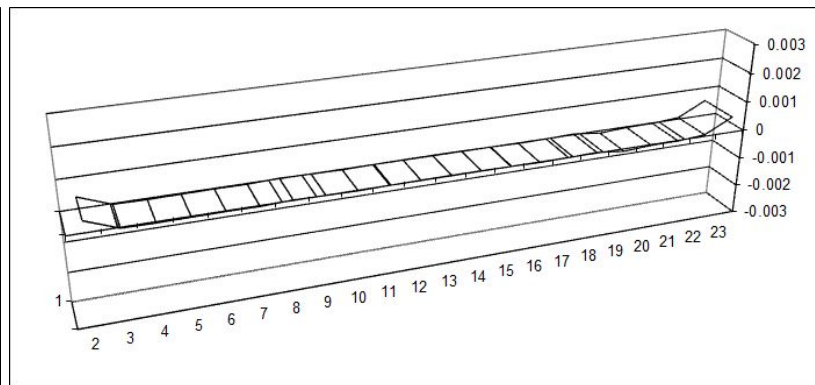
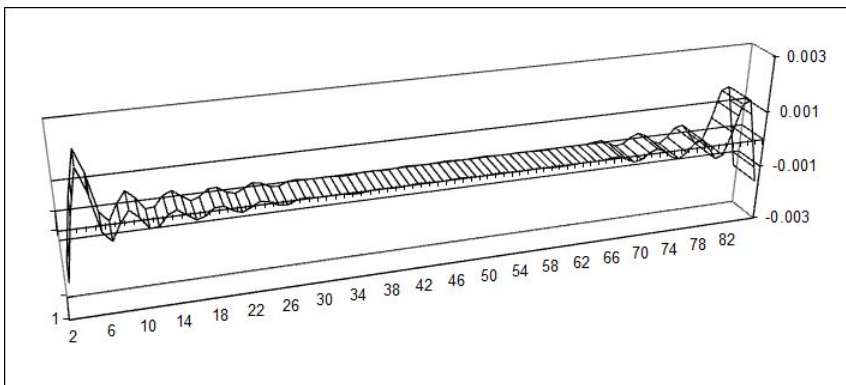
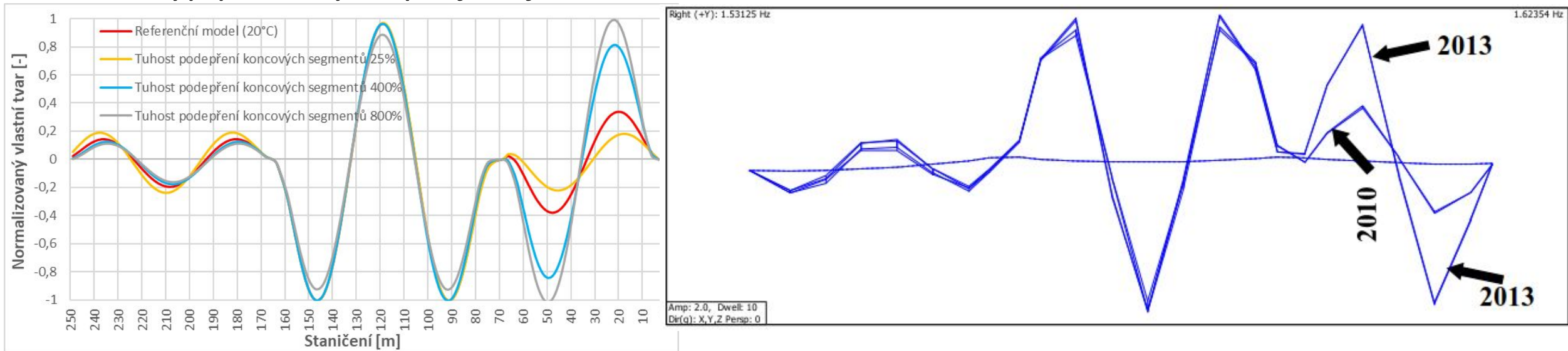
- 3. vlastní frekvence - při zvyšující se teplotě stoupá. Kolem teploty 32-36 °C dochází k shodné frekvenci pro 3. a 4. vlastní tvar a při dále rostoucí teplotě se pořadí vlastních tvarů prohodí.
- Při dynamické zkoušce v roce 2013 - teplota vzduchu 35 °C. Tato závislost vysvětluje některé anomálie, zjištěné při dynamické zatěžovací zkoušce – nikoliv projev poškození lávky.
- Nejistota - 0,3 % za každý 1 °C. Dále vliv změny teploty při měření.

Pořadové číslo tvaru	Vlastní frekvence pro rovnoměrně ochlazení konstrukce			Vlastní frekvence Ref. model (20°C)	Vlastní frekvence pro rovnoměrně oteplení konstrukce		
	T -15°C	T -10°C	T -5°C		T +5°C	T +10°C	T +15°C
	[Hz]	[Hz]	[Hz]		[Hz]	[Hz]	[Hz]
1. vlastní tvar svislého kmitání	6.35%	4.17%	1.98%	0.00%	-1.98%	-3.77%	-5.56%
2. vlastní tvar svislého kmitání	4.64%	3.09%	1.55%	0.00%	-1.39%	-2.94%	-4.48%
3. vlastní tvar svislého kmitání	-2.12%	-1.59%	-0.35%	0.00%	1.06%	2.23%	3.18%
4. vlastní tvar svislého kmitání	5.82%	3.88%	1.84%	0.00%	-1.75%	-3.49%	-4.75%
5. vlastní tvar svislého kmitání	5.79%	3.77%	1.84%	0.00%	-1.75%	-3.42%	-5.00%
6. vlastní tvar svislého kmitání	5.16%	3.33%	1.63%	0.00%	-1.63%	-3.13%	-4.57%
7. vlastní tvar svislého kmitání	5.37%	3.50%	1.75%	0.00%	-1.62%	-3.19%	-4.62%
8. vlastní tvar svislého kmitání	5.15%	3.36%	1.68%	0.00%	-1.57%	-3.02%	-4.48%
9. vlastní tvar svislého kmitání	4.79%	3.13%	1.52%	0.00%	-1.48%	-2.86%	-4.21%
10. vlastní tvar svislého kmitání	4.49%	2.94%	1.43%	0.00%	-1.39%	-2.65%	-3.92%
11. vlastní tvar svislého kmitání	4.58%	2.99%	1.47%	0.00%	-1.39%	-2.71%	-3.98%
12. vlastní tvar svislého kmitání	4.26%	2.79%	1.36%	0.00%	-1.29%	-2.52%	-3.68%
13. vlastní tvar svislého kmitání	4.01%	2.59%	1.27%	0.00%	-1.21%	-2.38%	-3.47%



Vliv tuhosti podepření koncových segmentů

- Měněna tuhost podepření koncových segmentů ve svislém směru.
- Stárnutí elastomeru ložisek - zvyšování jeho modulu pružnosti, v důsledku povodní zanesení úzké spáry u ložisek (viz prohlídka z 10.6.2013)
- Tento typ poruchy se projevuje ve změně 6. a 7. tvaru svislého kmitání konstrukce.

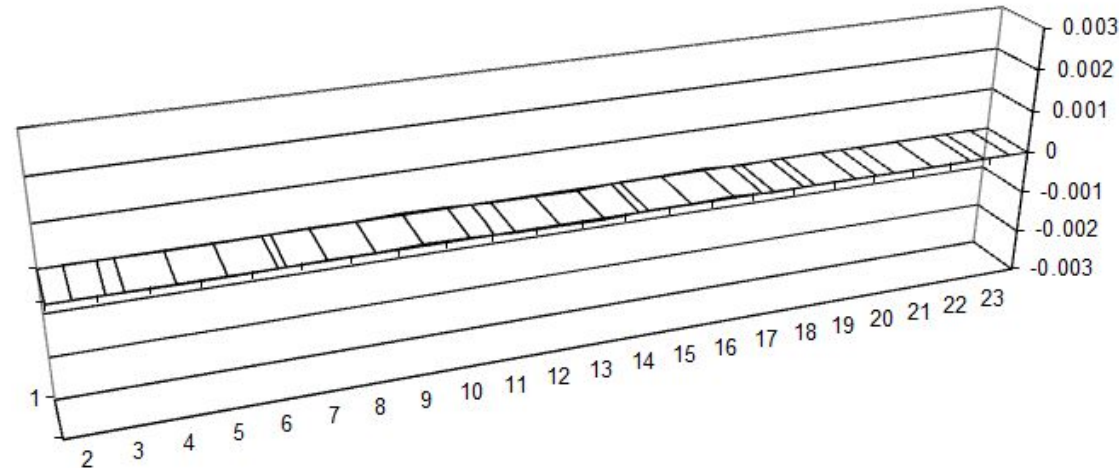
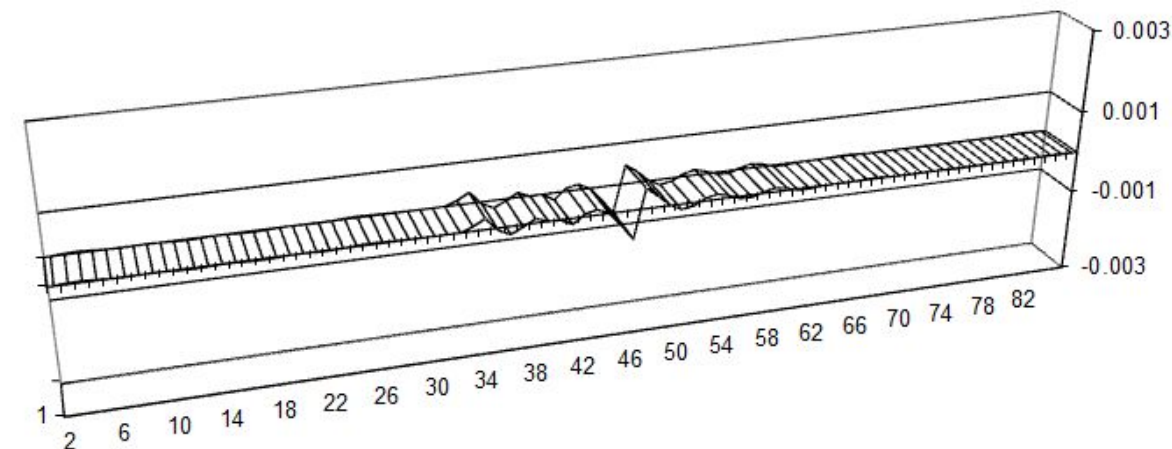


Druhá derivace změny
diag. členů matice
modální poddajnosti



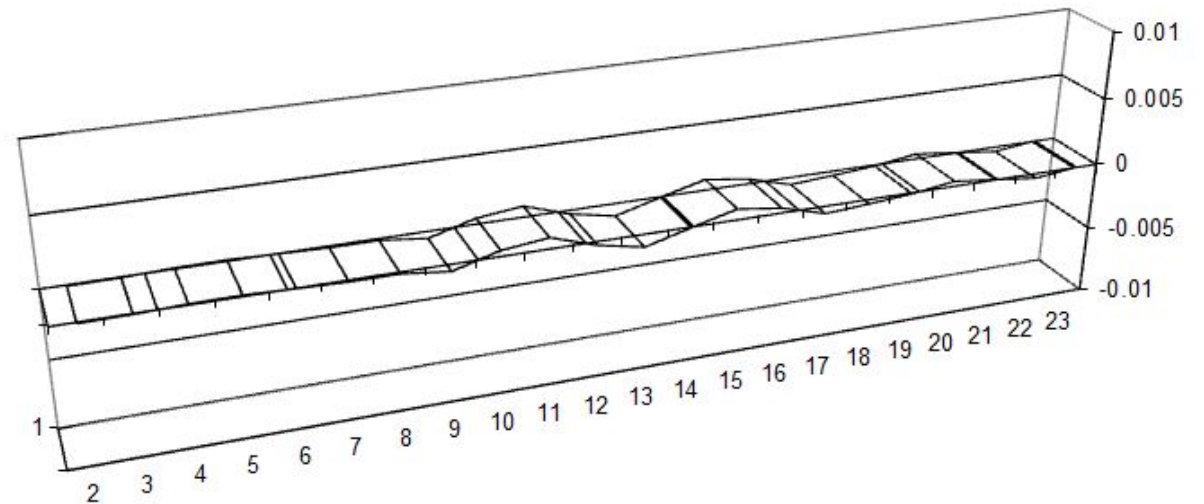
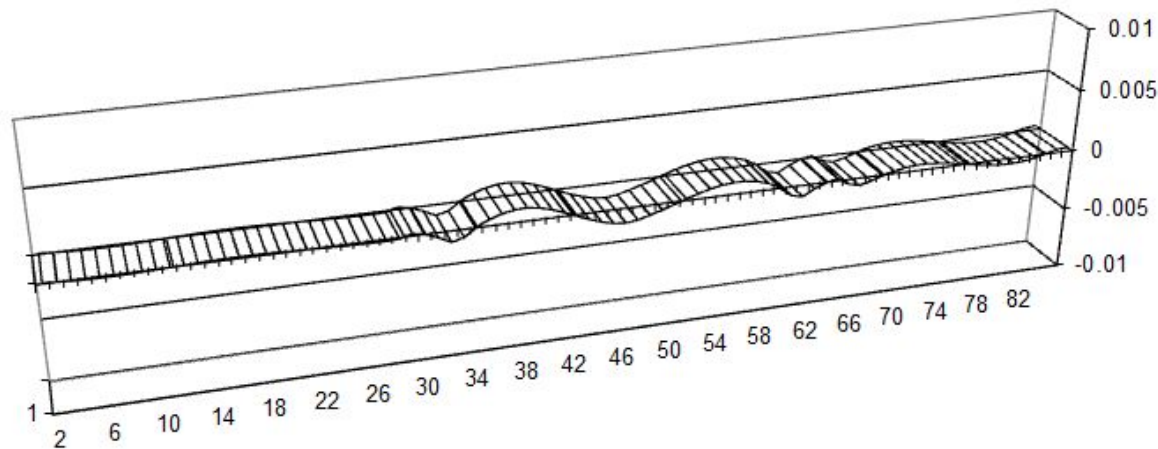
Vliv koroze hlavních nosných lan (typ Alfa)

- Koroze hlavních nosných lan se projevila nárůstem poddajnosti.
- Metoda druhé derivace změny diag. členů matice modální poddajnosti lokalizovala poruchu konstrukce v okolí řezů č. 46 a 47 pro model s 86 příčnými řezy.
- Při použití modelu s 24 řezy, není možné poruchu lokalizovat.



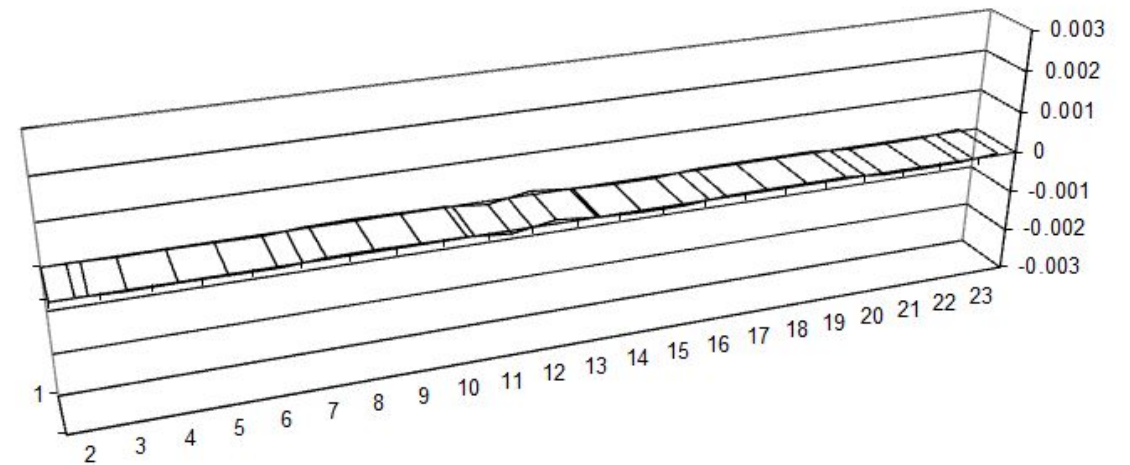
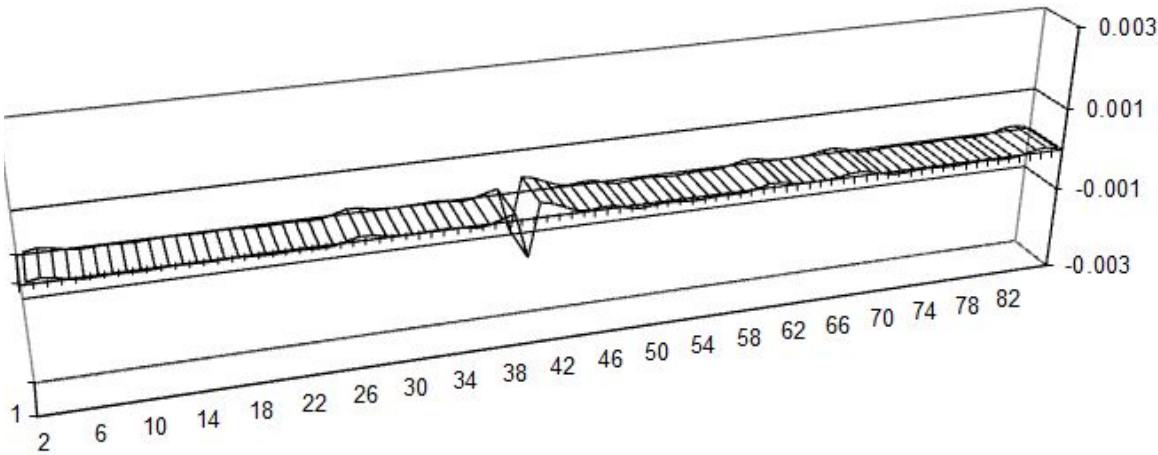
Vliv absence injektáže v hlavním poli a koroze kabelů Beta

- Simulováno i korozní oslabení předpínacích kabelů Beta až o 80 %.
- Porucha velké části předpínacích lan vedla na celkové změkčení konstrukce, a tedy i ke snížení vlastních frekvencí, avšak méně, než je nejistota měření.
- Náznakem polohy poškození by mohlo být nerovnoměrné rozložení nárůstu poddajnosti a také hodnoty CAMOSUC(j),x. pro některé vyšší tvary.



Kombinovaný vliv koroze předpínacích a nosných lan

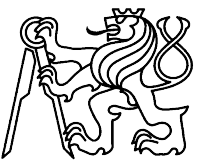
- Kombinace současného porušení hlavních nosných lan, absence injektáže předpínacích lan a významný korozní úbytek předpínacích lan.
- Pro model s 86 příčnými řezy je možné pomocí všech tří metod lokalizovat poruchu v okolí řezu č. 39.
- Naopak pro model s 24 příčnými řezy nelze tuto poruchu lokalizovat.



Kombinovaný vliv koroze předpínacích a nosných lan

- Zjednodušeně - princip superpozice, tedy kumulace efektu jednotlivých poruch na vlastní frekvence.
- Kombinace porušení hlavních nosných lan, absenci injektáže předpínacích lan a významný korozní úbytek předpínacích lan - „Alfa + Beta“. Vpravo i s vlivem zatuhnutí na opěře.
- Pokud by most trpěl pouze kombinací poruch nosných a předpínacích kabelů, by tento efekt byl teoreticky v omezené míře zjistitelný. Zvýšení tuhosti svislého podepření koncových segmentů - vliv zcela opačný. Výsledné chování je zcela komplexní

Pořadové číslo tvaru	Neporušený model	Alfa + Beta			Alfa + Beta + Tuhost podepření koncových segmentů 400%			Rozšířená nejistota měření frekvence 0.02
	Vlastní frekvence	Vlastní frekvence	Rozdíl oproti neporušenému modelu		Vlastní frekvence	Rozdíl oproti neporušenému modelu		
	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[%]	[Hz]	[Hz]	[%]	
1. vlastní tvar svislého kmitání	0.504	0.499	-0.005	-0.99%	0.504	0.000	0.00%	3.97%
2. vlastní tvar svislého kmitání	0.647	0.641	-0.006	-0.93%	0.655	0.008	1.24%	3.09%
3. vlastní tvar svislého kmitání	0.943	0.946	0.003	0.32%	0.950	0.007	0.74%	2.12%
4. vlastní tvar svislého kmitání	1.031	1.024	-0.007	-0.68%	1.025	-0.006	-0.58%	1.94%
5. vlastní tvar svislého kmitání	1.140	1.127	-0.013	-1.14%	1.151	0.011	0.96%	1.75%
6. vlastní tvar svislého kmitání	1.532	1.516	-0.016	-1.04%	1.554	0.022	1.44%	1.31%
7. vlastní tvar svislého kmitání	1.601	1.593	-0.008	-0.50%	1.600	-0.001	-0.06%	1.25%
8. vlastní tvar svislého kmitání	1.787	1.769	-0.018	-1.01%	1.808	0.021	1.18%	1.12%
9. vlastní tvar svislého kmitání	2.234	2.223	-0.011	-0.49%	2.232	-0.002	-0.09%	0.90%
10. vlastní tvar svislého kmitání	2.450	2.428	-0.022	-0.90%	2.504	0.054	2.20%	0.82%
11. vlastní tvar svislého kmitání	2.510	2.487	-0.023	-0.92%	2.548	0.038	1.51%	0.80%
12. vlastní tvar svislého kmitání	2.935	2.929	-0.006	-0.20%	2.933	-0.002	-0.07%	0.68%
13. vlastní tvar svislého kmitání	3.317	3.291	-0.026	-0.78%	3.375	0.058	1.75%	0.60%



Zhodnocení výsledků

- Varianty s korozním poškozením hlavních nosných a předpínacích kabelů korozi neodhalily spolehlivě měřitelné změny vlastních frekvencí, ani vlastních tvarů.
- Bez vysoce přesné znalosti teploty nosné konstrukce a eliminace jejích vlivů s pomocí numerického modelu nelze vliv koroze nosných kabelů odhalit.
- Další výsledky vychází z analýzy metodami CAMOSUC(j),x, změny odpovídajících diagonálních členů matice modální poddajnosti a změny její druhé derivace
- Lze konstatovat, že vliv značného poškození lan Alfa a Beta korozi na dynamické vlastnosti lávky je poměrně malý a menší, než zjištěný vliv nejistoty v měření teploty nosné konstrukce, vliv zjištěného zatuhnutí koncových částí lávky v uložení a rozšířené nejistoty měření. Tyto efekty tak překrývají projev poškození lan Alfa a Beta, vzájemně se slučují a prakticky znemožňují jejich detekci a identifikaci na takto složité a teplotně citlivé konstrukci.
- Lepší výsledky v detekci poškození lze získat, pokud by bylo měření na lávce provedeno v hustším rastru 86 řezů. Podmínkou však je, aby v tomto rastru bylo provedeno měření prvotní, na nepoškozené konstrukci.

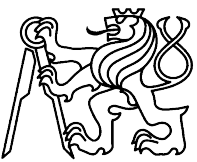


Závěrečná doporučení

- Provést předem analýzu **vlivu poškození na dynamické charakteristiky**, pro stanovení polohy snímačů, **rozsahu a hustoty senzorického pole**, a i citlivosti na teplotu. Měření bez znalosti chování konstrukce na numerickém modelu může vést k **nepoužitelným výsledkům**.
- Je potřeba, aby osoba, požadující například při HMP provedení zatěžovací zkoušky (statické či dynamické) si byla významu numerického modelu vědoma a požadovala zkoušku doplnit **odpovídající numerickou analýzou**.
- **Nehodnotit primárně vlastní frekvence a tvary**, jejich změna nemusí být výsledkem poškození, ale zcela jiných vlivů.
- Naopak, používat **pokročilé detekční techniky** spojené se znalostí skutečného působení lávky a projevů poruch, zjištěných na numerickém modelu. Jejich citlivost ale závisí na počtu snímačů, **malé počty výrazně snižují jejich vypovídající schopnost**.
- Provádět velmi **přesně měření teploty**, a současně eliminovat vliv teploty provedením měření v konstantních teplotních podmínkách.

Poděkování

Příspěvek byl vypracován v rámci řešení projektu „Provedení dynamické výpočetní analýzy konstrukce Trojské lávky, Praha 7“, podpořeném TSK Praha.



Děkuji za pozornost

