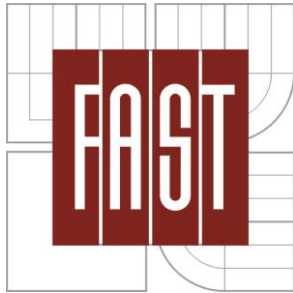


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV STAVEBNÍHO ZKUŠEBNICTVÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF BUILDING TESTING

STATICKÁ ZATĚŽOVACÍ ZKOUŠKA NOSNÉ KONSTRUKCE

STATIC LOAD TEST OF THE SUPPORT STRUCTURE

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. JAN CHYTIL

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. PETR DANĚK, Ph.D.

BRNO 2015



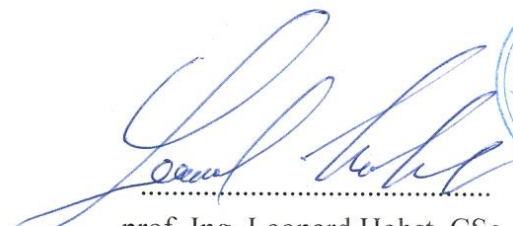
VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T009 Konstrukce a dopravní stavby
Pracoviště	Ústav stavebního zkušebnictví

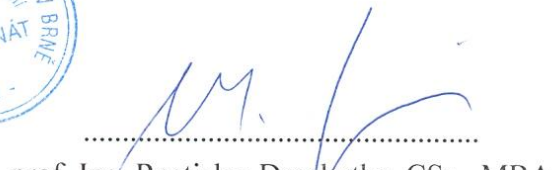
ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Diplomant	Bc. Jan Chytil
Název	Statická zatěžovací zkouška nosné konstrukce
Vedoucí diplomové práce	Ing. Petr Daněk, Ph.D.
Datum zadání diplomové práce	13. 10. 2014
Datum odevzdání diplomové práce	16. 1. 2015

V Brně dne 13. 10. 2014


prof. Ing. Leonard Hobst, CSc.
Vedoucí ústavu




prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

- [1] ČSN 73 2030 Zatěžovací zkoušky stavebních konstrukcí, Společná ustanovení.
- [2] ČSN 73 2031 Zkoušení stavebních objektů, konstrukcí a dílců. Společná ustanovení.
- [3] ČSN ISO 13822 Zásady navrhování konstrukcí - Hodnocení existujících konstrukcí

Zásady pro vypracování (zadání, cíle práce, požadované výstupy)

Diplomová práce bude zaměřena na experimentální ověření únosnosti konstrukce pomocí zatěžovací zkoušky. V teoretické části práce bude proveden rozbor souvisejících předpisů (členění zatěžovacích zkoušek, vyhodnocení, podmínky) a možných technických provedení jak vnesení zatížení, tak i způsobů měření požadovaných veličin. Experimentální část práce bude věnována vlastnímu provedení zatěžovací zkoušky konstrukce a následnému vyhodnocení. Dosažené výsledky zatěžovací zkoušky budou porovnány se statickým výpočtem části zkoumané konstrukce.

Součástí diplomové práce jsou přílohy:
Tabelární a grafické vyhodnocení experimentu
Statický přepoččet konstrukce

Struktura bakalářské/diplomové práce

VŠKP vypracujte a rozdělte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).



.....
Ing. Petr Daněk, Ph.D.
Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

Předmětem diplomové práce je experimentální ověření únosnosti konstrukce zásobníku uhlí pomocí zatěžovací zkoušky. V první části je proveden rozbor druhů zatěžovacích zkoušek a jejich provedení v souvislosti s platnými normovými předpisy. Dále jsou popsány možné varianty vnesení zkušební zátěže a také způsob vyhodnocení statické zatěžovací zkoušky. Druhá část se zabývá rozбором měřících metod, které mohou být využity pro určení požadovaných veličin. Závěrečná část je věnována realizaci a vyhodnocení zatěžovací zkoušky na předmětné konstrukce s následným porovnáním experimentálních hodnot s hodnotami stanovenými na modelu konstrukce vytvořeném ve výpočetním programu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Zatěžovací zkouška, zkušební zatížení, nosná konstrukce, poměrné přetvoření, průhyb, tenzometrie, indukční snímač, potenciometrický snímač.

ABSTRACT

Subject of the thesis is experimental verification of load capacity of construction for storage coal by using load test. In the first part, the analysis of sorts of load tests is made and its execution in causality with standard regulations. Further possible options of bringing test load are described and also the method of evaluation of static load test. Second part looks into the analysis of means of measurement which can be used to determine required quantity. Final part is dedicated to realization and evaluation of the load test on material construction followed by comparison of experimental values with values established on a model of construction created by using computing program.

KEYWORDS

Load test, experimental load, load-bearing structure, strain, sag, strain gages, inductive sensor, potentiometer sensor.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Bc. CHYTIL, Jan. *Statická zatěžovací zkouška nosné konstrukce*. Brno, 2015. 90 s., 37 s. příloh. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví. Vedoucí práce: Ing. Petr Daněk, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 16. 1. 2015

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat především vedoucímu práce Ing. Petru Daňkovi, Ph.D. za odborné vedení a cenné rady při zpracování diplomové práce. Déle patří moje poděkování Ing. Petru Žíttovi a Ing. Davidu Mikoláškoví za poskytnutí potřebných materiálů.

V neposlední řadě děkuji také mojí rodině a všem blízkým za jejich neustálou podporu a ohleduplnost během celého studia.

OBSAH

ÚVOD	11
1 ZATĚŽOVACÍ ZKOUŠKY	13
1.1 Požadavky na zatěžovací zkoušky	13
1.2 Druhy zatěžovacích zkoušek a jejich účel	14
1.3 Příprava zatěžovací zkoušky	16
1.4 Druhy zatížení používaných při zatěžovacích zkouškách	18
1.4.1 Statické zatížení	18
1.4.2 Dynamické zatížení	25
1.5 Realizace zatěžovací zkoušky	26
1.6 Vyhodnocení zatěžovací zkoušky	28
1.6.1 Posouzení mezního stavu únosnosti	29
1.6.2 Posouzení mezního stavu použitelnosti	29
1.7 Výstup zatěžovací zkoušky	30
2 MĚŘENÍ DEFORMACE	32
2.1 Měření průhybů a posunutí	34
2.1.1 Mechanické metody	35
2.1.2 Geodetické metody	37
2.1.3 Elektrické metody	49
2.2 Měření poměrných přetvoření	53
2.2.1 Mechanické tenzometry	54
2.2.2 Strunové tenzometry	55
2.2.3 Extenzometry	56
2.2.4 Optické tenzometry	57
2.2.5 Odporové tenzometry	58
3 ZATĚŽOVACÍ ZKOUŠKA ZÁSOBNÍKU UHLÍ	63

3.1	Popis testované konstrukce	63
3.2	Provedení zatěžovací zkoušky	65
3.2.1	Zkušební zatížení	65
3.2.2	Zatěžovací stavy	67
3.2.3	Měření deformací a posunů	69
3.3	Vyhodnocení zatěžovací zkoušky	72
3.3.1	Svislé deformace	73
3.3.2	Posuny v trhlinách	77
4	STATICKÝ VÝPOČET	79
4.1	Vlastnosti modelu	79
4.2	Materiálové a průřezové charakteristiky	80
4.3	Zatížení	80
4.4	Výsledky	81
	ZÁVĚR	83
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	85
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	91
	SEZNAM PŘÍLOH	93

ÚVOD

Chování každé stavební konstrukce, ať už se jedná o obytné budovy, průmyslové stavby, či mostní konstrukce, je ovlivňováno působením účinků okolního prostředí. Tyto účinky jsou způsobovány vlastnostmi samotné konstrukce (hmotnost, geometrie a uspořádání jednotlivých prvků, předpětí, apod.), vnějšími vlivy (zatížení od dopravy, strojů, zemní tlaky, atd.), nebo klimatickými vlivy (sníh, vítr, teplotní změny). Všem těmto účinkům musí konstrukce bezpečně odolat jak z hlediska únosnosti, tak z hlediska použitelnosti od počátku výroby až do konce její plánované životnosti. Nároky na použitelnost se odvíjí od charakteru zatížení a způsobu využití dané konstrukce. Například u veřejných budov jsou kritéria pro splnění požadavků na použitelnost větší než u budov, jež slouží pouze za účelem skladování různých materiálů. Ne vždy je možné spolehlivě určit pomocí výpočtů předpokládané chování a reakce dané konstrukce při jejím využití v reálném prostředí. V takovém případě přichází na řadu využití zatěžovací zkoušky. V podstatě se jedná o jediný způsob, jak lze s jistotou zjistit předpokládané chování konstrukce v extrémních podmínkách.

Zatěžovací zkoušky tedy slouží pro ověření teoretických předpokladů, jak bude předmětná konstrukce reagovat na účinky zatížení, což se provádí dvěma metodami. První je metoda *in situ*, čili vnesením zatížení a měřením odezvy na reálné konstrukci. Druhý způsob je laboratorní zkoušení, kdy se teoretické chování konstrukce ověřuje na zmenšeném modelu nebo dílčích konstrukčních částech objektu, ze kterých se skládá. Při laboratorní metodě je nutné dbát na vhodně zvolené měřítko jak zatěžované konstrukce, tak zvoleného zatížení, aby zkouška vykazovala hodnoty, které objasní chování skutečné konstrukce.

Výsledek zatěžovací zkoušky je primárně závislý na přesnosti naměřených hodnot deformací v průběhu provádění zkoušky. To může být ovlivněno nepříznivými elementy, jako jsou klimatické podmínky, prostorové uspořádání konstrukce a řada nepřesností závisících na zvolené měřící metodě. Před samotnou realizací zatěžovací zkoušky je třeba důsledně promyslet výběr měřících metod a jejich aplikaci na konstrukci tak, aby negativní ovlivnění výsledků bylo co nejmenší a způsob měření deformací co nejjednodušší a nejefektivnější.

V dnešní době, kdy jsou stále větší ekonomické požadavky na snižování nákladů při realizaci stavby, nebývá pravidlem, že je vždy prováděna zatěžovací zkouška před uvedením konstrukce do provozu. Zatěžovací zkoušky jsou tedy aplikovány pouze v odůvodněných případech. V praxi se s nimi lze setkat u konstrukcí se složitým statickým systémem, jehož předpoklady je třeba ověřit, nebo u konstrukcí s vyššími požadavky na spolehlivost, např. mostní objekty mimořádných rozpětí nebo při jejich výrobě bylo použito nových technologií či materiálů.

V následujícím textu je popsána metodika provádění zatěžovacích zkoušek, jenž vychází z platného normového předpisu *ČSN 73 2030*. Dále se práce zabývá možnými způsoby měření požadovaných veličin. V neposlední řadě je popsáno provedení a vyhodnocení zatěžovací zkoušky na reálné konstrukci s následným porovnáním se statickým výpočtem.

1 ZATĚŽOVACÍ ZKOUŠKY

1.1 Požadavky na zatěžovací zkoušky

Zatěžovací zkoušky prováděné na veškerých stavebních objektech jsou prováděny za účelem ověření spolehlivosti zkoušené konstrukce. Spolehlivost konstrukce ověřovaná zatěžovací zkouškou je úzce spjata se spolehlivostí stanovenou výpočtem podle norem pro navrhování, jelikož se podle těchto norem stanovují součinitelé spolehlivosti materiálu a zatížení. Vzhledem k náročnosti provádění zatěžovacích zkoušek mohou být obstarány pouze takovými odbornými organizacemi, které jsou v daném oboru akreditovány a mají tak oprávnění k provozování dané činnosti.

Rozsah a způsob provedení zatěžovací zkoušky jsou primárně stanoveny příslušnými normovými předpisy, případně projektantem konstrukce nebo objednatelem zkoušky. V případě, že rozsah a provedení nejsou stanoveny jmenovanými způsoby, určuje si je samotná zkušebna, jež zkoušku provádí. Objednatel je povinen zajistit a předložit všechnu dokumentaci potřebnou k provedení zkoušky a následnému posouzení konstrukce. Zkušebna si sama zajišťuje pracovníky a zkušební přístroje potřebné pro vykonání zatěžovací zkoušky. Případné nedostatky v množství pracovní síly a materiálového zaopatření jsou řešeny po dohodě s objednavatelem.

Za bezpečnost osob i majetku během realizace zkoušky je zodpovědná laboratoř, jež zkoušku provádí. V případě zkoušek prováděných in situ je objednatel povinen zajistit veškerá bezpečnostní opatření dle pokynů pověřené zkušebny. Před realizací zkoušky je tedy potřeba vypracovat podrobný plán BOZP v souladu s nařízením vlády o bližších minimálních požadavcích na bezpečnost a ochranu zdraví při práci na staveništích - předpis č. 591/2006 Sb. S bezpečnostním plánem se musí včas seznámit objednatel, aby mohl zajistit všechny požadavky. Není-li možné ze strany objednatele zajistit všechny požadavky na bezpečnost, je třeba zvolit takový způsob zatěžovací zkoušky, při kterém se osoby zainteresované se zkouškou nebudou muset pohybovat v bezprostřední blízkosti konstrukce. Obecně je vzhledem k bezpečnosti při provádění zatěžovací zkoušky nutné pečlivě sledovat průběh deformací způsobených zatěžováním konstrukce a v případě jejího nepředpokládaného chování operativně změnit postup zkoušení, aby se včas zamezilo

vzniku nehody.

1.2 Druhy zatěžovacích zkoušek a jejich účel

Zatěžovací zkoušky lze rozdělit podle více hledisek. Primárně se dělí na zkoušky **statické** a **dynamické**. Rozdíl je v použitém druhu zatížení, na jehož charakteru závisí účinky vyvozované na zkoušené konstrukci. Vzhledem k různé odezvě u statického a dynamického zatížení jsou odlišné i měřené přetvárné veličiny a následné postupy a metody vyhodnocení. Hodnocení konstrukce pomocí dynamické zatěžovací zkoušky je využíváno převážně u vysokých stavebních objektů, konstrukcí velkých rozpětí, konstrukcí skořepinového typu nebo má-li být objekt v budoucnu zatěžován velkým dynamickým zatížením. Platná norma *ČSN 73 2044* dále uvádí, že dynamická zatěžovací zkouška se používá i ve speciálním případě, kdy statická zatěžovací zkouška nahrazuje teoretický výpočet. Dynamické vlastnosti konstrukce nelze získat jiným způsobem nežli provést dynamickou zatěžovací zkoušku. Vždy jí předchází zkouška statická. [9]

Základní dělení statických zatěžovacích zkoušek spočívá v dosaženém stupni zkušebního zatížení a jsou rozděleny na:

- zatěžovací zkoušky prováděné **do dosažení meze únosnosti**,
- zatěžovací zkoušky prováděné **bez dosažení meze únosnosti**.

Toto rozdělení zásadně ovlivňuje způsob provedení a následné vyhodnocení statických zatěžovacích zkoušek. Zatěžovací zkoušky do dosažení meze únosnosti jsou využívány především pro laboratorní testování konstrukčních prvků, jež jsou vyráběny sériově, nebo zmenšených fyzikálních modelů, ať už konstrukčních prvků, či celých stavebních objektů. Zatímco zkoušky bez dosažení meze únosnosti jsou prováděny in situ, čili přímo na předmětné konstrukci, nebo se jich využívá na otestování prefabrikovaných prvků, které nemohou být zkoušeny destruktivně z důvodu vysokých nákladů na jejich výrobu. Jedná se například o dílce komorových mostů.

Vzhledem k zatížení lze zatěžovací zkoušky rozdělit v závislosti na jeho časovém působení následujícím způsobem, jak uvádí [2]:

- krátkodobé – jsou využívány pro ověření okamžitých vlastností,
- dlouhodobé – používají se za účelem studia vývoje přetvárných vlastností při dlouhodobém působení zatížení,

- opakované – slouží pro monitoring změn vybraných charakteristik během provozu stavebního objektu.



*Obrázek 1.1 – zatěžovací zkouška in situ
Sfalassa bridge – bez dosažení meze
únosnosti [29]*



*Obrázek 1.2 – laboratorní zatěžovací zkouška modelu
žebrové betonové desky – s dosažením únosnosti [30]*

Základním cílem zatěžovacích zkoušek je posouzení spolehlivosti zkoušené konstrukce. Provádějí se tedy, je-li třeba posoudit spolehlivost nosné konstrukce nebo jejich dílčích prvků z hlediska mezních stavů použitelnosti, popřípadě únosnosti. Druhým případem je situace, kdy jsou pochybnosti o dostatečné výstižnosti výpočtového modelu vzhledem k reálné konstrukci. Jsou-li pochybnosti o shodě provedení konstrukce s požadavky návrhu (např. nedodržení návrhové pevnosti betonu), taktéž se posuzuje spolehlivost s využitím zatěžovací zkoušky. V neposlední řadě se jedná o případ, kdy nelze s jistotou zjistit všechny potřebné parametry pro teoretický výpočet a spolehlivost se tak musí posoudit experimentálně provedením zatěžovací zkoušky.

Zatěžovací zkoušky lze dále rozdělit z hlediska jejich účelu na:

- průkazní, popř. prototypové – slouží k ověření, zda konstrukce nebo její prvek má vyhovující požadované vlastnosti pro navržený účel použití a může se tedy zahájit výrobní proces,
- kontrolní výrobní zkoušky – jsou prováděny za účelem prověření spolehlivosti v průběhu ne po dokončení výroby,
- ostatní druhy zkoušek – do této kategorie spadají zkoušky, jež se provádí před

uvedením stavebního objektu do provozu, dále jestliže objekt vykazuje poruchy, které by mohly mít vliv na funkčnost nosného konstrukčního systému, nebo dosahuje-li konstrukce návrhové životnosti a je potřeba ověřit, zda může být využívána i nadále.

1.3 Příprava zatěžovací zkoušky

Realizaci jakékoliv zatěžovací zkoušky předchází její pečlivá příprava. Veškeré údaje, jež jsou potřebné pro provedení zkoušky, musí být zpracovány v programu zkoušky, který zpravidla obsahuje tyto náležitosti:

- určení rozsahu zkoušky a účelu, pro který bude provedena,
- základní údaje o současném stavu konstrukce – charakteristiky použitých materiálů, geometrie konstrukce, shoda provedení konstrukce s návrhem, stáří konstrukce, historie užívání, poškození konstrukce, apod.,
- podklady se stanovenými požadavky na konstrukci z hlediska mezních stavů únosnosti a použitelnosti, včetně jejich kontroly nebo doplnění statického a dynamického výpočtu,
- veškeré informace o průběhu zatěžování konstrukce při zkoušce – druh a intenzita zatížení, zatěžovací stupně, časový interval působení zatížení a stanovení polohy zkušebního zatížení,
- údaje podrobně popisující měření – druhy měřených veličin, popis metod jejich snímání včetně informací o použitých přístrojích pro měření i vyhodnocení,
- stanovení způsobu zpracování a vyhodnocení hodnot získaných při zatěžovací zkoušce,
- určení metodiky výběru zkoušených částí konstrukce,
- popis prací souvisejících s přípravou zkoušky, seznam pomocných zařízení a požadavky zkušebny na objednatele zkoušky,
- předpokládaný časový harmonogram zkoušky včetně termínů předání závěrečné či předběžné zprávy o zkoušce, případně plán výluk, jsou-li nezbytně nutné pro realizaci zatěžovací zkoušky. [10]

Obecně zatěžovacím zkouškám předchází průzkum daného stavebního objektu zahrnující všechny jeho konstrukční části. Cílem průzkumu je ověřit, zda skutečný stav objektu koresponduje s projektovou dokumentací. V první řadě se provede vizuální defektoskopická

prohlídka konstrukce. Využívá se při ní například metoda endoskopické defektoskopie, která umožňuje prohlédnout objekt v nepřístupných místech (např. u stropních konstrukcí nebo komorových nosníků), bez toho aniž by bylo třeba provádět destruktivní zásah do konstrukce. Součástí průzkumu je kontrola geometrických rozměrů, stanovení hodnot materiálových charakteristik, zjištění tvarových odchylek, přetvoření částí konstrukce a také zdokumentování poruch, které konstrukce vykazuje. Důležité je také ověřit polohu a množství výztuže, popř. stanovit její rozměry, na což se běžně používá elektromagnetický indikátor výztuže (profometr). Materiálové charakteristiky se většinou zjišťují na jádrových vývrtech, případně pomocí nedestruktivních metod jako špičková či vtiskovací metoda, jež ale bývají z hlediska objektivitě doplněny jádrovými vývrty. Diagnostických metod průzkumu konstrukce je celá řada a od jejich podrobného rozvedení bude vzhledem rozsahu práce upuštěno.

Jsou-li na konstrukci poruchy zasahující do nosného systému, je třeba k tomuto faktu přihlídnout a provést kontrolní statický výpočet, ve kterém jsou při výpočtu uvažovány hodnoty určené na oslabeném průřezu. Mezi poruchy konstrukce patří například trhliny (ohybové, smykové smršťovací), šterková hnízda, vzduchové póry, koroze výztuže a další. Tyto místa je třeba před provedením zkoušky na konstrukci zřetelně označit a také musí být uvedeny do protokolu s programem zkoušky. Vady a poruchy na konstrukcích lze rozdělit dle jejich závažnosti z pohledu na bezpečnost a jakost, viz *tabulka 1.1*. Jestliže jsou při provedené prohlídce zjištěny závady a poruchy spadající do páté kategorie, čili objekt se nachází v havarijním stavu, je nutné okamžitě navrhnout patřičná opatření ke snížení rizika ohrožení veřejnosti.

Tabulka 1.1 – Příklad kvalitativní hodnotící stupnice konstrukčních prvků při vyhodnocení vizuální defektoskopické prohlídky [4]

Kvalitativní hodnotící stupně		Popis
1	Běžné opotřebení	dobrá bezpečnost, dobrá jakost
2	Závada	dobrá bezpečnost, zhoršená jakost
3	Nevýznamná porucha	podstatnější snížení bezpečnosti, mírné zhoršení jakosti
4	Významná porucha	podstatnější snížení bezpečnosti i jakosti, není bezprostřední ohrožení
5	Havarijní porucha	bezpečnost je vážně bezprostředně ohrožena stejně jako jakost

1.4 Druhy zatížení používaných při zatěžovacích zkouškách

Jak již bylo zmíněno, primárně jsou zatěžovací zkoušky rozděleny na statické a dynamické. Od tohoto se odvíjí i dělení typu zatížení. Rozdíl mezi statickým a dynamickým zatížením spočívá v charakteru účinků zatížení, které na konstrukci vyvolávají. Hlavním kritériem pro výběr zkušebního zatížení je požadavek na jeho intenzitu. Volba typu zatížení se odvíjí i od požadavku, na jakou plochu konstrukce má zatížení působit, což lze případně řešit roznášecími deskami. V neposlední řadě má vliv na výběr zkušebního zatížení i jeho manipulační schopnost, jelikož v některých případech je třeba konstrukci zatížit dle jednotlivých zatěžovacích stavů na různých místech konstrukce a navíc i různou intenzitou.

1.4.1 Statické zatížení

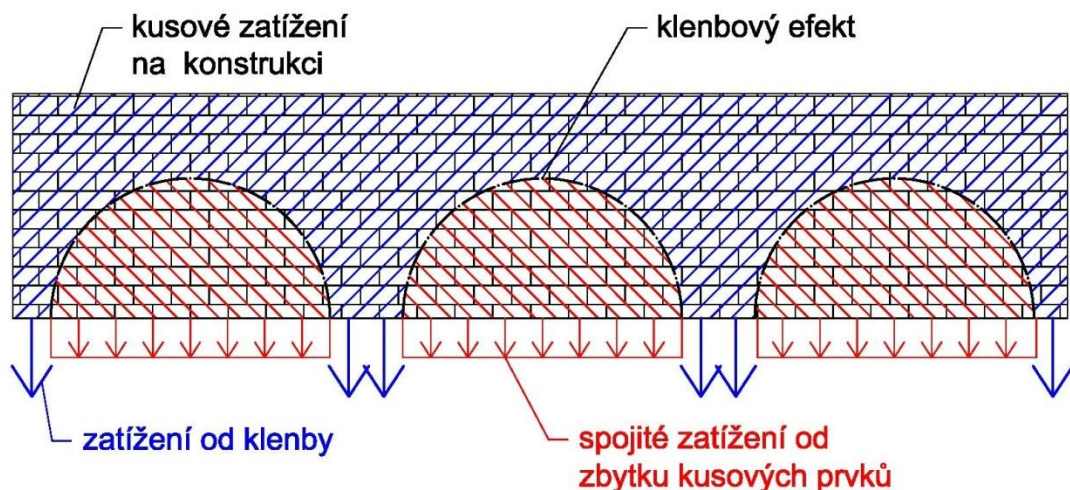
Statickým zatížením je takové, jež se nachází v klidu nebo se pohybuje velmi malou rychlostí, která způsobuje minimální dynamické účinky. Uspořádání zkušebního zatížení se provede na testovaném objektu tak, aby ve vyznačených měřených místech způsobovalo největší možné účinky. Dále se uspořádání zatížení volí tak, aby bylo možné porovnat návrhové statické předpoklady (stupeň vetknutí, spojitost apod.) se skutečným stavem. [10]

V aktuálně platné normě ČSN 73 2030 nejsou uvedeny žádné konkrétní požadavky na druh či formu zkušebního zatížení s jedinou výjimkou a to, že „*odchylka skutečného zatížení od požadované hodnoty zkušebního zatížení nesmí přesáhnout 3% požadované hodnoty zatížení při zkoušce ve zkušebně a 5% při zkoušce in situ*“ [7]. Zatímco předešlá norma pro zatěžovací zkoušky stavebních konstrukcí z roku 1977 obsahuje obecná kritéria pro volbu zkušebního zatížení. Řadí se mezi ně následující doporučení, včetně výše citovaného požadavku z normy aktuální:

- Zátěž musí být na konstrukci uložena v co nejkratší možné době a bez nárazů či otřesů.
- Zvolené náhradní zatížení musí vyvozovat v rozhodujících průřezích konstrukce stejnou napjatost nebo přetvoření jako zatížení skutečné.
- Použitý druh zatížení nesmí funkčně vytvářet samostatný nosný systém (trámy, desky apod.). Dále tato situace může nastat například tehdy, je-li zkušební zatížení tvořeno souborem kusové zátěže (betonové kvádry, cihly, naplněné pytle apod.). Jednotlivé prvky naskládané ve vazbě na sebe by pak mohly ze

statického pohledu pracovat jako klenba a zatížení by na konstrukci nepůsobilo rovnoměrně, viz *obr. 1.3*. Aby se zabránilo tomuto negativnímu efektu, je třeba jednotlivé prvky ukládat do sloupců přiměřených rozměrů a vzdálených od sebe 30 až 50 mm. Také by zatěžovací dílec neměl být větší než 1 metr, nebo svými rozměry přesahovat 1/6 délky rozpětí zkoušené konstrukce.

- Při použití kusových zatěžovacích prvků by se měla hmotnost jednoho dílce od aritmetického průměru lišit maximálně o 5%. Jestliže se použijí pro zatěžování kusové prvky rozdílných rozměrů a hmotností, musí být každý kus řádně označen. Pokud je kusová zátěž větších rozměrů, musí být na konstrukci uložena na podporách jako prosté nosníky, jejichž reakce je třeba přesně určit.
- Použitá zátěž by měla být stejného charakteru, tj. tvar a materiál.
- Silové účinky od zkušebního zatížení musí být přesně stanoveny. Je tedy nutné u použité zátěže znát hmotnost a její rozložení, nebo tyto vlastnosti musí být jednoduše změřitelné.
- Manipulace se zkušebním zatížením by měla být snadná jak pro jeho umístění a odstranění, tak pro jeho případné přemístování během zkoušky.
- Jako zatížení není vhodné používat materiály, které by během zkoušení mohly měnit své vlastnosti (např. hygroskopické).
- Je třeba zabránit samovolnému pohybu zatížení během prováděné zkoušky – týká se např. aplikace zatížení na nakloněnou plochu. [8]



Obrázek 1.3 – Nevhodně uložené kusové prvky – vznik klenbového efektu

Základním typem zatížení, které se používá při statických zatěžovacích zkouškách, je zatížení pomocí již zmíněných **kusových prvků**, respektive jejich soubory. Největšími

výhodami této metody jsou, že ji lze aplikovat na jakoukoliv konstrukci, může se pro ni využít snadno dostupných stavebních materiálů (např. cihly, tvárnice, dlažební kostky a další) a hmotnost jednotlivých prvků je možné jednoduše změřit. Naopak mezi hlavní nevýhody patří časově náročnější manipulovatelnost. Při použití kusového zatížení je důležité zajistit, aby všechny prvky měly co nejmenší hmotnostní a tvarové odchylky, což už bylo zmíněno výše v doporučeních pro volbu zkušebního zatížení. Jako kusové prvky jsou také používány betonová tělesa nebo pytle plněné sypkým materiálem (obr. 1.5). Ty se na zatěžovanou konstrukci skládají, nebo je případně možnost jejich zavěšení ze spodní strany konstrukce (obr. 1.4). Kusové prvky se s oblibou využívají při zatěžovacích zkouškách stropních konstrukcí a taky při zkouškách prováděných v laboratorním prostředí, čili na konstrukčních prvcích a zmenšených modelech objektů či částí konstrukcí. Občas je možné se s tímto typem zatížení setkat při statických zatěžovacích zkouškách menších mostů a lávek.



Obrázek 1.4 – Varianta zatížení – kusové závaží zavěšené – betonové kvádry [27]



Obrázek 1.5 – Varianta zatížení – kusové závaží volně položené – pytle s pískem [24]

Jako druhý typ používaných závaží jsou uvedeny **nádoby naplněné kapalinou**, které částečně spadají i do kategorie kusových prvků. Jako nádoby se využívají pytle, vaky, bazény, barely, kontejnery a další. S výhodou lze tuto metodu použít v blízkosti vodních zdrojů. Nenachází-li se poblíž zkoušeného objektu vodní zdroj, nastává komplikace v podobě zajištění dopravy vody. Může se v takovém případě využít například místního dobrovolného hasičského sboru. Za předpokladu použití výkonných čerpadel se tato metoda stává vcelku efektivní z pohledu rychlosti a jednoduchosti manipulace se zatížením. V cizině existuje více firem (např. Proofload nebo Water Weights Scandinavia), které se specializují na výrobu vodních pytlů a vaků různých velikostí a objemů (obr. 1.7).

Využívají se třeba i pro navýšení hmotnosti zatěžujících dopravních prostředků a jejich výskyt použití při zatěžovacích zkouškách je mnohem častější než v našich končinách. V České republice se při zatěžování pomocí vody v nádobách velmi často improvizuje a využívá se různých zařízení, do kterých je možné nalít určitý objem kapaliny. Je to zřejmé i z příloženého příkladu provedené zatěžovací zkoušky stropní konstrukce v budově jedné z brněnských základních škol, viz *obr. 1.6*.



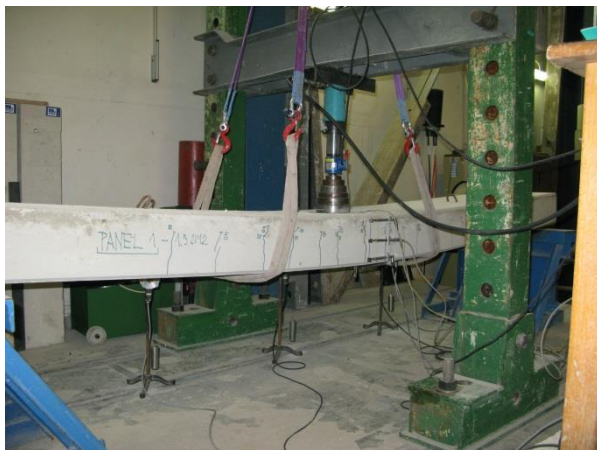
Obrázek 1.6 – Varianta zatížení – popelnice naplněné vodou [18]



Obrázek 1.7 – Varianta zatížení – vodní vaky od firmy Proofload [31]

Třetím druhem zatížení, který se využívá při zatěžovacích zkouškách, je zatěžování pomocí **hydraulických** nebo **pneumatikých lisů**. Lisy jsou děleny na mechanické a elektronické. Jelikož u lisů dochází velmi často k poklesu tlaku, je třeba jeho hodnotu ve válci neustále kontrolovat. U elektronických probíhá tlakování válců průběžně automaticky a píst lisu tak neustále vyvozuje konstantní sílu požadované hodnoty. Mechanický lis je tlakován ruční pumpou a musí se tedy nepřetržitě sledovat, zda tlak ve válci neubývá a případně ho dle potřeby doplňovat. Zatěžovací zařízení je třeba důkladně zabezpečit proti vybočení během provádění zatěžovací zkoušky. Nejčastěji zatěžovací lisy naleznou uplatnění při zkouškách prováděných v laboratorních podmínkách. Výhodou lisu je, že dokáže vyvozovat sílu naprosto přesné hodnoty. Jeho použití je ale značně omezené, jelikož pro vyvození síly na zkoušený objekt potřebuje protizávaží, na které působí stejně velkou silou. V laboratořích bývají lis i zkoušené těleso upnuty v bytelných konstrukcích a jeho

využití je pro tento druh zkoušení velmi výhodné. Lisy jsou používány i při zkouškách in situ, zejména pak pro testování stropních konstrukcí. Avšak zatěžovací zařízení musí být instalováno takovým způsobem, aby v žádném případě neovlivnilo reakce a chování zkoušené konstrukce, což využití této metody zatěžování při zkouškách in situ redukuje na minimum.



Obrázek 1.8 – Ztěžování pomocí hydraulického lisu v laboratoři



Obrázek 1.9 – Zatěžování stropní konstrukce in situ pomocí hydraulických lisů [27]

V další části je rozděleno zatížení, které se obvykle využívá při zatěžovacích zkouškách mostních konstrukcí nebo konstrukcí sloužícím speciálním účelům jako třeba zásobník na uhlí, jenž je předmětem experimentální části této práce. Jedná se o zatížení pomocí různých druhů dopravních prostředků.

U silničních mostů a lávek jsou testované konstrukce zatěžovány různými **kolovými či pásovými vozidly**. Důležité je znát parametry vozidla potřebné pro stanovení sil, jimiž jednotlivá kola působí na konstrukci. Mezi ně se řadí rozvor náprav, hmotnost prázdného vozu a hmotnost nákladu. Všechny parametry potřebné pro určení kolových sil jsou předepsané výrobcem. Jelikož ideální rozložení naloženého materiálu prakticky nelze zajistit, existuje možnost si zatížení jednotlivých kol či náprav před provedením zkoušky ověřit pomocí mobilní nápravové váhy a zajistit si tak naprosto přesné údaje o zkušebním zatížení. V našich končinách se při zatěžovacích zkouškách silničních mostů a lávek nejčastěji využívají nákladní automobily, ať už samotné či ve skupinách, jelikož jsou snadno dostupné jak cenově (pronájem), tak kusově. Dále lze operativně měnit jejich hmotnost přidáváním nebo odebráním nákladu a poskytují vynikající manipulaci v případě potřeby přesunu zatížení. Zajímavá varianta zatížení byla použita pro provedení statické

zatěžovací zkoušky Nuselského mostu v Praze v roce 1970, kdy na hrubou stavbu vjelo 66 tanků typu T-55 (jeden váží 36,6 t), viz *obr. 1.11*. V případě zkoušení lávek může být volba zatížení značně omezena rozměry dané lávky, ale obvykle lze zkoušku vykonat i s pomocí klasických nákladních automobilů.



Obrázek 1.10 – Varianta zatížení – nákladní automobily [32]



Obrázek 1.11 – Varianta zatížení – tanky [33]



Obrázek 1.12 – Varianta zatížení – nadměrná přeprava [34]

Alternativou zatížení mostních konstrukcí je i využití přejezdu **nadměrné přepravy** (*obr. 1.12*), kdy se může jednat o opravdu největší možné zatížení, jež se bude na konstrukci výjimečně vyskytovat. Jak je psáno výše, i u tohoto typu dopravního prostředku lze přesně určit parametry potřebné pro stanovení silových účinků od jednotlivých kol soupravy. Mezi nevýhody se řadí skutečnost, že program zatěžovací zkoušky musí být

striktně stanoven v souladu s plánovanou trasou nadměrného nákladu. Také se zatěžovacím prostředkem není možné manipulovat dle potřeb zkušebny, která zatěžovací zkoušku provádí, až na pár ojedinělých případů, kdy se zkušebně podaří dohodnout přepravcem nadměrného nákladu.

Při zkoušení železničních mostu se jako zkušební zatížení využívají různé druhy **kolejových vozidel**. Jedná se o samotné lokomotivy, celé nákladní vlaky, kolejové jeřáby či tramvajové soupravy. Volba závisí především na skýtajících možnostech blízkých vozových dep. Pokud to situace dovoluje z logistického hlediska, je velmi výhodné použít pro zatěžování zkoušené konstrukce historické parní lokomotivy, jelikož se jedná o jedny z nejtěžších strojů, které se mohou na konstrukci v budoucnu vyskytovat při výjimečných příležitostech. Příklady zatížení pomocí kolejových vozidel jsou uvedeny na *obr. 1.13* a *obr. 1.14*.



Obrázek 1.13 – Varianta zatížení – parní lokomotivy [25]



Obrázek 1.14 – Varianta zatížení – tramvajové soupravy [35]

Speciálním druhem zatížení je zatěžování sledované konstrukce **ohřevem**, ale k jeho použití se přistupuje jen ojediněle v odůvodněných případech. [8]

Je nadmíru jasné, že nejvhodnější zkušební zatížení je takové, které se bude na konstrukci během jejího provozu reálně vyskytovat. To ale není možné vždy zajistit, ať už z hlediska faktoru „nedostatkového zboží“ nebo bezpečnosti a přírodě se také nedá poručit. V případě, kdy přichází na řadu simulace požadovaných účinků náhradním adekvátním zatížením, jeho volba se odvíjí od výše jmenovaných kritérií a v neposlední řadě závisí také na dostupnosti. V praxi je ale obvykle využíváno materiálů, které jsou v danou chvíli k dispozici.

1.4.2 Dynamické zatížení

Dynamické zatěžovací zkoušky nejsou primárním předmětem zájmu této práce a používané typy zatížení při těchto zkouškách budou tedy zmíněny jen okrajově. Zatížení při dynamických zatěžovacích zkouškách svým působením vyvolává pohyb celé konstrukce nebo její dílčí části. Z fyzikálního hlediska se jedná o zrychlení, které je dále ovlivněno setrvačnými silami hmoty konstrukce. Tímto charakteristickým způsobem se bude chovat takové zatížení, jež mění svoji polohu nebo velikost. V praxi dynamická zatížení vyvolávají velké točivé stroje na základy, nárazový vítr na vysoké stavby, rychle jedoucí vozidla, apod. Speciálním druhem dynamického namáhání je potom zatížení seizmicitou ať už přírodní či technickou. Pro co nejpřesnější simulaci dynamických zatížení se při zatěžovacích zkouškách využívají tyto způsoby:

- impulsní budiče – raketové motory, viz *obr. 1.15*
- budiče harmonické síly,
- technologická zařízení, viz *obr. 1.16*,
- přejezd vozidel,
- přejezd silničních vozidel jedoucích určitou rychlostí přes válcovou úseč výšky 60 mm,
- pohyb skupiny osob (speciálně u lávek). [5]



Obrázek 1.15 – Dynamické zatížení Nuselského mostu raketovými motory [36]



Obrázek 1.16 – Dynamické zatížení pilot rázy závažím [37]

1.5 Realizace zatěžovací zkoušky

Text popisující realizaci zatěžovacích zkoušek vychází převážně z [7].

Na výsledek zatěžovací zkoušky mohou mít nepříznivý dopad nežádoucí účinky okolního prostředí, tj. vítr, přímé působení slunečních paprsků, teplotní výkyvy apod. Je tedy třeba zajistit, aby tyto negativní vlivy byly omezeny na minimum a výsledky zkoušky tak nebyly zkreslené. Jestliže nelze nepříznivému působení okolního prostředí zabránit, nebo dostatečně omezit, je nutné v průběhu zkoušky tyto vlivy sledovat a při následném vyhodnocení s nimi musí být uvažováno. Krom působení okolního prostředí mohou být výsledky zkoušky vyšetřovaného prvku ovlivněny i spolupůsobením ostatních nosných či nenosných částí konstrukce. V případě, kdy dochází ke spolupůsobení jiných částí konstrukce, musí se stanovit míra spolupůsobení podle ustanovení příslušných norem pro navrhování stavebních konstrukcí. Pokud to nelze předem určit teoretickým způsobem, je třeba provést ověření experimentálně, nejlépe předběžnou zatěžovací zkouškou.

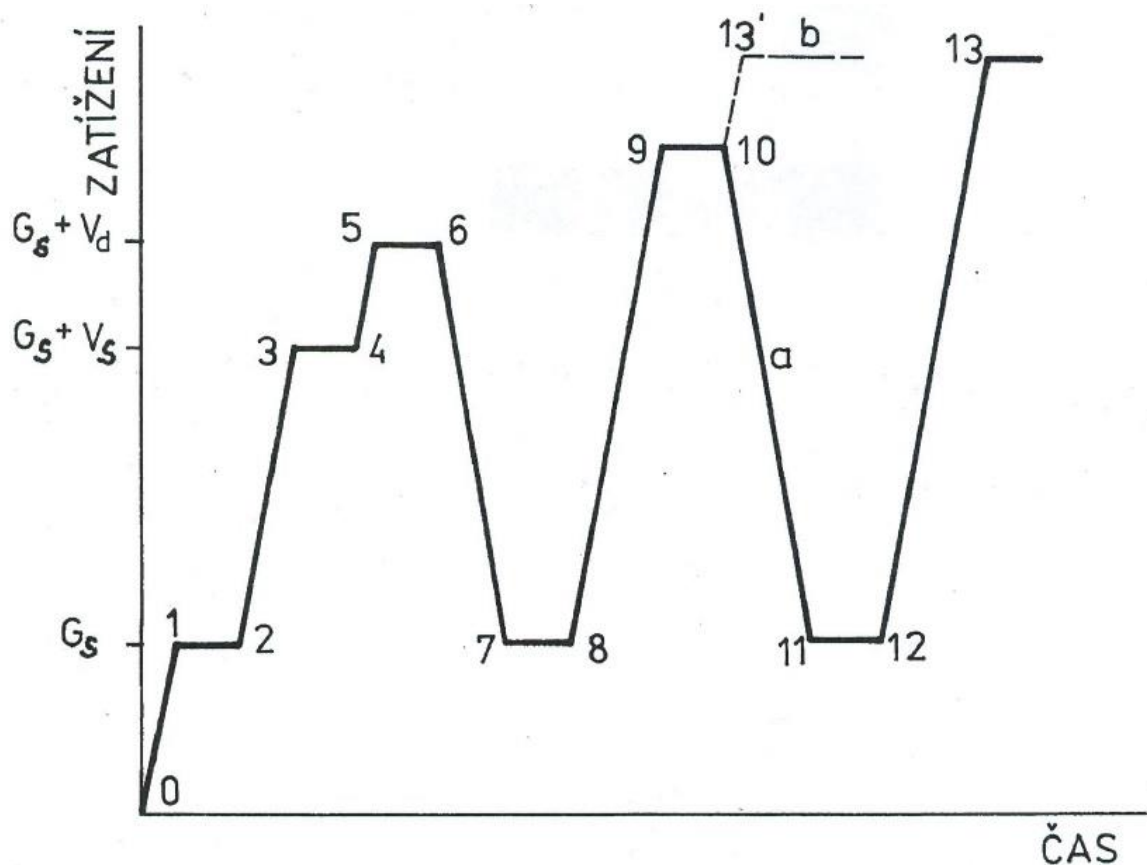
Obecně se zatěžování zkoušené konstrukce provádí postupným přidáváním jednotlivých zatěžovacích stupňů. Stupně zatížení se určují podle druhu testované konstrukce a sledovaného mezního stavu, přičemž jsou tvořeny jednotlivými typy zatížení (stálé, nahodilé atd.) a jejich vzájemnými kombinacemi. Jednotlivé stupně se mohou zavádět vždy až po ustálení deformací způsobenou předešlým stupněm zatížení. Deformaci lze považovat za ustálenou, jestliže přírůstek přetvoření v časovém intervalu deseti minut je menší než 20 % přírůstku v předešlém stejně dlouhém časovém intervalu. Dále je-li menší než polovina jednotky měřicího přístroje nebo je menší než 2 % z celkového přírůstku přetvoření způsobeným předešlým zatěžovacím stupněm.

Základní zatěžovací postup uvedený v platné ČSN 73 2030 je popsán v následujícím výčtu hlavních bodů doplněným grafickým zpracováním zatěžování konstrukce v závislosti na čase, viz obr. 1.17.

- „Konstrukce, která je při začátku zkoušky zatížena vlastní tíhou, popř. tíhou zkušebního zařízení, se zatíží na hodnotu G_s , která odpovídá provozní hodnotě stálého zatížení (Bod 1).“
- „Po ustálení přetvoření (bod 2) se zatížení zvýší na hodnotu $G_s + V_s$, která odpovídá součtu provozní hodnoty stálého zatížení a nahodilého zatížení. (bod 3).“

- „Po ustálení přetvoření (bod 4) se zatížení zvýší na hodnotu $G_s + V_d$, která odpovídá součtu provozní hodnoty stálého zatížení a extrémní hodnoty nahodilého zatížení. (bod 5).“
- „Po ustálení přetvoření (bod 6) se konstrukce odlehčí na hodnotu G_s . (bod 7).“
- „Po ustálení přetvoření (bod 8) se zatížení zvýší na hodnotu, která je podle povahy případu o 10 až 20 % vyšší než hodnota $G_s + V_d$ (bod 9).“
- „Po ustálení přetvoření (bod 10) se konstrukce odlehčí na hodnotu G_s (bod 11) a opět se zjistí (po ustálení) velikost přetvoření (bod 12). Větev „a“.“
- „Při dalších zatěžovacích cyklech se opakuje postup mezi body 8 až 12 s tím, že při každém zatěžovacím cyklu se zatížení zvýší o dalších 10 až 20% z hodnoty $G_s + V_d$.“ [7 str. 4]

Variantu zatěžování podle větve „b“, kdy se v bodě 10 již konstrukce neodlehčuje a v každém dalším zatěžovacím stupni vzrůstá zatížení o 10 až 20 % z hodnoty $G_s + V_d$, je možné použít jen v odůvodněných případech.



Obrázek 1.17 – Základní zatěžovací postup dle ČSN 73 2030 [7]

Je-li zatěžovací zkouška realizována do dosažení únosnosti konstrukce, zatěžování se provádí podle výše zmiňovaného postupu až do stavu porušení konstrukce. V případě zkoušky bez dosažení meze únosnosti se postupuje stejným způsobem, ale pouze do bodu 8, kdy se deformace na konstrukci po odejmutí provozní hodnoty stálého zatížení a extrémní hodnoty nahodilého zatížení ustálí. V tomto bodě je zkouška buď ukončena, nebo se provede její opakování se zpřísněnými kritérii.

Zatěžovací postup se může měnit v závislosti na charakteru využití konstrukce a především na materiálech, ze kterých je vyrobena. Jsou uvedeny v příslušných normách.

1.6 Vyhodnocení zatěžovací zkoušky

Základním cílem zatěžovací zkoušky je zhodnotit spolehlivost předmětné konstrukce na účinky zatížení z hlediska mezních stavů únosnosti a mezních stavů použitelnosti. V ideálním případě se jedná o porovnání hodnot získaných z naměřených deformací při zkoušce s hodnotami stanovenými teoretickým výpočtem mezních stavů. U některých konstrukcí ale nelze získat všechny parametry potřebné pro stanovení teoretických hodnot a pro posouzení se pak musí využít postupy uvedené v příslušných normách dle charakteru testované konstrukce. Postup vyhodnocení popsany níže vychází z [7].

Pro vyhodnocení výběrových zatěžovacích zkoušek se využívají metody matematické statistiky. Tím je myšleno, že ze souboru výsledků stanovených na n zkouškách stejných prvcích nebo částech konstrukce je statistickými metody určena průměrná hodnota požadované veličiny (únosnost či přetvárný účinek zatížení). Stanovení je provedeno dle následujícího vzorce:

$$R_{\text{exp}} = \bar{R}_{\text{exp}} \pm k_n \cdot s_r, \quad (1.1)$$

kde \bar{R}_{exp} je výběrový aritmetický průměr stanovený z experimentálních hodnot požadované veličiny (únosnost či přetvárný účinek zatížení),
 s_r výběrová směrodatná odchylka, jejíž hodnotu lze zmenšit o směrodatnou odchylku chyby měření,
 k_n součinitel pro meze konfidenčního intervalu pro odhad průměru základního souboru.

Hodnoty součinitele k_n se stanoví dle příslušné normy.

1.6.1 Posouzení mezního stavu únosnosti

Při zatěžovací zkoušce provedené **do dosažení únosnosti** konstrukce je předmětná konstrukce spolehlivá z hlediska I. mezního stavu, pokud splňuje tyto podmínky.

- Mezní hodnota únosnosti zjištěná experimentálně je větší než hodnota únosnosti stanovená teoretickým výpočtem a vynásobená součinitelem spolehlivosti zkoušení γ_{exp} .
- Ve fázi, kdy je konstrukce zatížena na hodnotu odpovídající $G_s + V_d$ a následně odlehčena na hodnotu odpovídající G_s (body 6 a 8 na *obr. 17*), musí být poměr mezi trvalou a celkovou deformací menší než součinitel λ_1 . Jestliže poměr trvalé a celkové deformace je větší než součinitel λ_1 a zároveň menší než $2\lambda_1$, může se zatěžovací zkouška opakovat. Při opakování zkoušky je postup zatěžování stejný, ale zpřísňují se kritéria pro splnění podmínky spolehlivosti. Pak tedy poměr mezi trvalou a celkovou deformací ve stejné fázi zatěžování musí být menší než součinitel λ_2 , jenž je roven polovině původního součinitele λ_1 . Zkouška může být tímto způsobem opakována maximálně třikrát.

Hodnoty součinitele spolehlivosti γ_{exp} a součinitele λ_1 se určí dle příslušné normy v závislosti na materiálu konstrukce a způsobu porušení při dosažení meze únosnosti.

Pro zatěžovací zkoušku provedenou **bez dosažení únosnosti** konstrukce platí, že konstrukce je spolehlivá z hlediska mezního stavu únosnosti, pokud splňuje druhou z výše uvedených podmínek.

1.6.2 Posouzení mezního stavu použitelnosti

Konstrukce je spolehlivá z hlediska II. mezního stavu pro oba druhy zatěžovacích zkoušek, tj. do dosažení únosnosti a bez dosažení únosnosti, pokud splňuje tato kritéria.

- Experimentální hodnota přetvárného účinku vyvolaného zkušebním zatížením, jež odpovídá provoznímu nahodilému zatížením, se liší od hodnoty přetvárného účinku stejného zatížení stanoveného teoretickým výpočtem maximálně o $\pm\mu$ násobek. Hodnoty součinitele μ se stanoví dle příslušné normy v závislosti na materiálu konstrukce.
- Experimentální hodnota přetvárného účinku vyvolaného zkušebním zatížením, jež odpovídá provoznímu nahodilému zatížením je menší než odpovídající část mezní hodnoty přetvoření stanovené v příslušných normách pro navrhování

konstrukcí, nebo vycházející z podmínek pro použití konstrukce.

Speciálně pro konstrukce z železobetonu a předpjatého betonu platí, že konstrukce je spolehlivá z hlediska mezního stavu použitelnosti, pokud splňuje navíc i tyto další podmínky.

- Na konstrukcích s potřebou prokazování trhlin nevzniknou trhliny dříve, než bude dosažena mez trhlin stanovená dle normy pro navrhování.
- Je-li třeba na zkoušené konstrukci posuzovat šířku trhlin, nesmí být šířka trhliny způsobená provozní hodnotou zatížení větší než mezní hodnota stanovená dle normy pro navrhování.

1.7 Výstup zatěžovací zkoušky

Celkové zhodnocení provedené zatěžovací zkoušky, včetně všech podstatných informací, je obsaženo ve zkušební protokolu zpracovaným zkušebnou. Protokol musí poskytovat alespoň tyto údaje:

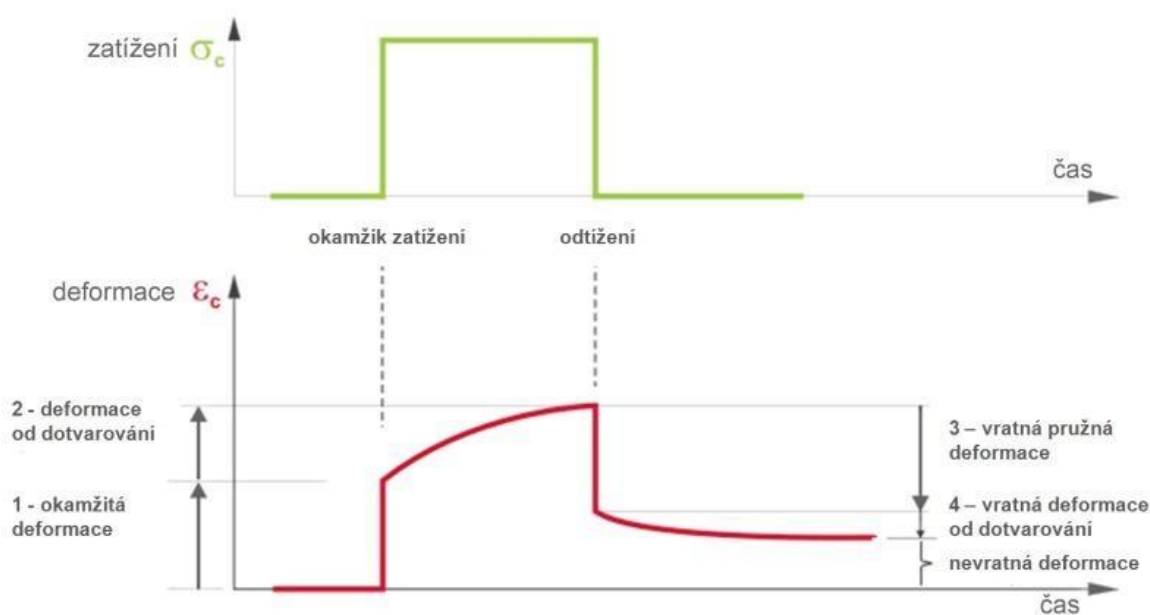
- *„identifikační data laboratoře a jména pracovníků, kteří zkoušku prováděli,*
- *identifikační data objednatele zkoušky,*
- *časové údaje,*
- *účel, pro který se zkouška provádí,*
- *údaje o zatížení, na které je konstrukce navržena a o zatížení, na které má být zkoušena,*
- *údaje o statickém působení konstrukce v provozu a údaje o statickém působení při zatěžovací zkoušce,*
- *technický popis zkoušených konstrukcí, jejich počet, způsob výroby, použité materiály, dimenze rozhodující pro posouzení apod.,*
- *popis zkušebního zařízení,*
- *popis měřicích přístrojů,*
- *údaje o teplotách a dalších vlivech, které mohou ovlivnit výsledek zkoušky,*
- *způsob zatěžování,*
- *způsob zkoušení,*
- *hodnoty měřených veličin a popis sledovaných jevů,*
- *způsob přerušování,*

- *přesnost měření,*
- *fotografickou dokumentaci nebo videozáznam,*
- *vyhodnocení zkoušky,*
- *komentář ke zkoušce". [7 str. 7]*

2 MĚŘENÍ DEFORMACE

Hlavním cílem každé zatěžovací zkoušky je získání výstižných informací o odezvě konstrukce na účinky okolního prostředí, které způsobují v materiálech různé fyzikální a mechanické změny, čímž je ovlivněna i úroveň hladiny napětí v částech konstrukce. Změny různých druhů napětí se na konstrukci projevují vznikem tvarových odchylek neboli deformací (přetvoření). Celkovou deformaci lze rozdělit na **pružnou** a **nepružnou** část. [5]

Pružná část deformace, jinak označována elastická, je charakteristická tím, že po odtížení, čili po odstranění napětí, se namáhané těleso vrátí do původního stavu. Skládá se ze dvou částí. První je okamžité pružné přetvoření, které nastává bezprostředně po vnesení vnějších silových účinků na těleso, čímž se mění i hladiny napětí. Druhou složkou je potom takzvané dopružování neboli zpožděná pružnost a pro širší stavební veřejnost známé jako dotvarování. Jedná se o jev, který se nastává při dlouhodobém intenzivním zatížení objektu a vyznačuje se nárůstem deformace s přibývajícím časem, přičemž hladina napětí zůstává konstantní. Vyskytuje se zejména u kompozitů, tj. materiálů složených ze dvou nebo více složek, které se výrazně liší chemickými a fyzikálními vlastnostmi. Ve stavebnictví je to pak především beton. [5]



Obrázek 2.1 – Deformace betonu v závislost na čase a intenzitě zatížení [38]

Projevem **nepružné** (plastické) části deformace jsou tvarové změny, které po odstranění silových účinků působících na těleso již setrvávají. Vznikají prakticky ihned po zvýšení hladiny napětí a po následném snížení na hladinu původní tak těleso zůstává deformované. Je třeba poznamenat, že velká část výše zmiňovaného dotvarování spadá do kategorie trvalých deformací. [5]

Velikost přetvárných účinků je zjišťována především za účelem stanovení hodnoty a průběhu napětí, k čemuž je třeba znát fyzikálně mechanické parametry použitých materiálů. Jedná se zejména o materiálové charakteristiky, jako jsou modul pružnosti v tahu a Poissonovo číslo. Zjišťují se na zkušebních tělesech pravidelných geometrických tvarů, které jsou zatěžovány známou silou a měří se pak jejich skutečná deformace. Zkušební vzorky lze získat odebráním při výrobě nebo z jádrových vývrtů provedených přímo na konstrukci. Druhým případem využití měření velikosti přetvárných účinků je tedy opačného rázu, kdy je potřeba stanovit skutečné hodnoty fyzikálně mechanických a reologických parametrů materiálů z naměřených deformací. [5]

Při zatěžovací zkoušce musí být hodnoty přetvárných účinků naměřeny s odpovídající požadovanou přesností a bez zkreslení způsobeným okolními vlivy. Od tohoto se odvíjí samotná volba metod monitoringu. Mezi hlavní požadavky při výběru měřicí metody tak patří vysoká přesnost měřících přístrojů, jednoduchost provedení měření a hlavně musí zvolené metody poskytovat takové údaje o přetvárných účincích, aby byl splněn účel zatěžovací zkoušky, pro který byla prováděna.

Podstatnou částí měření deformačních veličin při zatěžovací zkoušce je výběr měřicích bodů na sledované konstrukci. Musí být proveden způsobem, který bude zahrnovat všechny místa, v nichž by podle teoretických poznatků mohlo dojít k poškození nebo nadměrným deformacím omezujícím způsobilost konstrukce pro její další užívání. Nejčastějším předmětem zájmu zatěžovacích zkoušek jsou vodorovné části nosných konstrukcí. Monitorují se svislé či vodorovné posuny dílčích konstrukčních prvků nebo celého objektu a také poměrná přetvoření v rozhodujících průřezech. Je-li nosný systém složen z více hlavních nosíků, je potřeba měřit průhyb na více místech v příčném směru konstrukce kvůli zachycení příčného roznosu zatížení. Pokud se jedná o deskovou konstrukci, musí se měřit svislé deformace minimálně krajních a osových bodů konstrukce. Co se týče umístění měřicích bodů v podélném směru konstrukce, odvíjí se jejich výběr z hlediska výskytu maximálních ohybových momentů, tedy uprostřed rozpětí a nad podporou. Je vhodné měřit svislou deformaci i v místě podpor z důvodu zaznamenání jejich možného

poklesu, což ovlivňuje výsledný průhyb nosné vodorovné konstrukce. [10]

Při výběru umístění měřících přístrojů se také musí brát v potaz možné spolupůsobení ostatních nosných částí konstrukce. Nelze-li se vyvarovat situaci, kdy jsou snímače umístěny v deformační zóně a výsledné hodnoty měření tak mohou být zkresleny pohybem samotných přístrojů, je potřeba doplnit měření ještě další metodou prováděnou z nedeformované oblasti, která bude monitorovat posuny přístrojů či konstrukce jako celku. Tato situace může nastat například při zatěžovací zkoušce stropu vícepodlažní budovy, kdy se deformace promítají i do podlaží s umístěnými přístroji, nebo mostu, u něhož dochází k poklesu v založení a konstrukce tak částečně klesá jako celek. U vysokých mostů je vhodné měřit i náklon podpěr.

Deformace se může projevovat globálním nebo lokálním způsobem. Globálními jsou myšleny deformace tělesa jako celku. V případě zatěžovacích zkoušek je předmětem zájmu především **měření průhybů a posunutí**, tedy posuny v různých směrech a pootočení. Z hlediska lokálního se pak jedná o **měření poměrných přetvoření**, což jsou deformace v konkrétním místě konstrukce. Metody měření poměrných přetvoření jsou také označovány jako tenzometrické.

2.1 Měření průhybů a posunutí

Pojem posun lze charakterizovat jako prostorovou změnu v poloze stavební konstrukce nebo její části ve srovnání s polohou základní. Pro měření vertikálních či horizontálních posunů, naklonění a pootočení se používají metody, jež lze rozdělit podle principu na:

- mechanické,
- geodetické,
- elektrické.

Měření průhybu a posunutí na předmětném stavebním objektu je nejčastěji realizováno z relativně pevného stanoviště. Deformace konstrukce mohou být na měřící zařízení přenášeny přímým způsobem, což nastává, když se snímač nachází v přímém styku s povrchem sledované konstrukce. V takovém případě musí být měřící přístroj osazen na nezávislé tuhé konstrukci (lešení). Realizace přímého měření tak může být na některých konstrukcích značně komplikovaná a finančně nákladná. Poté tedy přichází v úvahu druhá varianta, kdy je přenos měřené veličiny na přístroj osazený ve stojanu zprostředkován

pomocí drátu či struny. Nelze-li ani tato varianta aplikovat například z důvodu umístění konstrukce nad hlubokým údolím nebo prudkou řekou, je možné provést měření jediným možným způsobem a to některou z geodetických metod. [5]

2.1.1 Mechanické metody

Mechanické metody využívají pro měření posunů přístroje, které pracují pouze na mechanickém principu, včetně částí jako jsou přenosové a zvětšující ústrojí. Mezi podstatné, jež lze použít pro měření při zatěžovací zkoušce patří:

- přístroje na principu posuvného měřidla,
- indikátorové hodinky,
- klasické průhyboměry. [5]

Přístroje na principu posuvného měřidla

Jedná se o mechanicky nejjednodušší z výše uvedených přístrojů, který je odborně nazýván jako vernier nebo nonius. Prakticky se s tímto měřidlem lze setkat pod názvem šuplera, jenž je používán v řemeslnickém slangu. Konstrukce posuvného měřítka se skládá ze dvou částí. Tou první je pevná část se základní stupnicí v milimetrech (palcích) a druhou část potom tvoří posuvný jezdec s indexem vernieru. Rozlišovací schopnost a přesnost běžně používaných posuvných měřitek se pohybuje v řádu setin milimetrů. Obvyklé provedení vernieru umožňuje měřit od 0 do 150 mm (výjimečně 300 mm). Vyrábí se i v digitální formě, kdy je posun jezdece měřen magnetickým, indukčním nebo kapacitním snímačem dráhy (tyto snímače jsou podrobně probrány v kapitole 2.1.3). Uplatnění tento typ přístroje může nalézt například pro měření šířky trhlin. [39]



Obrázek 2.2 – Klasický vernier [40]



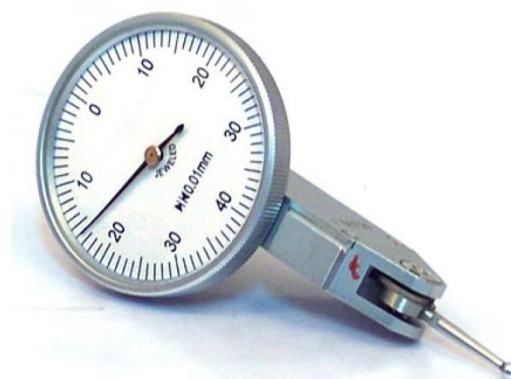
Obrázek 2.3 – Digitální vernier [41]

Indikátorové hodinky

Indikátorové hodinky neboli číselníkové úchylkoměry jsou přístroje založené na principu komparačního měření, jejichž mechanismus je složen z kombinací ozubených kol, pružinek a pák. Obvyklý rozsah měření těchto přístrojů bývá 5, 10, 25, 30 a 50 mm při citlivosti přístroje 100 dílků na 1 mm, nebo pak rozsah 1 až 3 mm (výjimečně 5 mm) s citlivostí 1000 dílků na 1 mm. Přesnost měření je 0,01 nebo 0,001 mm. Úchylkoměr musí být osazený na pevné základně a přenos posunu konstrukce na hodinky je realizován pomocí pohyblivého hrotu snímače. Čtení naměřených posunů z úchylkoměru probíhá způsobem, že velká ručička ukazuje setiny nebo tisíciny milimetru a po jedné její otáčce se malá ručička posune o jeden dílek, tj. 1 mm. Indikátorové hodinky jsou díky své jednoduchosti a přesnosti nejčastěji používaným přístrojem pro přímé měření posunutí. Používají se i pro měření poměrných přetvoření, kdy plní funkci čidla (podrobněji je o tom pojednáno v kapitole věnované čistě měření poměrných přetvoření). Indikátorové hodinky se stejně jako posuvné měřítko vyrábí i v digitální verzi. [14]



Obrázek 2.4 – Číselníkový úchylkoměr – posuvný
[42]



Obrázek 2.5 – Číselníkový úchylkoměr – pákový [42]

Klasické průhyboměry

Průhyboměry fungují na podobném principu jako indikátorové hodinky. Rozdíl je v přenosu měřené veličiny do přístroje. U klasických průhyboměrů je přenos realizován pomocí drátu či struny, který je na horním konci pevně přichycen ke zkoušené konstrukci a na spodním ho napíná závaží nebo nějaký pružný element (péro, guma). Přichycení drátu ke zkoušené konstrukci se obvykle provádí lepením nebo přivázáním na šroubek, jenž je

pevně zakotvený v materiálu konstrukce. Napětí drátu musí být na jednu stranu dostatečné, aby byl rovný, ale na druhou nesmí být překročena jeho pružná oblast deformace z důvodu eliminace protažení drátu, které by mohlo negativně ovlivnit výsledky zkoušky. Napínání drátu musí být provedeno alespoň hodinu před zahájením zkoušení konstrukce. Protažení či smrštění drátu může být způsobeno i vlivem změny teploty v průběhu zkoušky. Proto je nutné během prováděného měření monitorovat i teplotu vzduchu a při vysokých výkyvech počítat s následky při vyhodnocování. Mezi nejběžněji používané měřáky patří mostní průhyboměr Metra-Frič. Jak je patrné z *obr. 2.6*, jeho indikační stupnice je kruhová a rozdělená na 30 dílů, přičemž jeden díl odpovídá jednomu milimetru. Tyto díly jsou ještě dále rozděleny na desetiny. Výsledná přesnost odečítání ze stupnice tak je 0,1mm a odhadem lze přibližně určit i setiny milimetru.



Obrázek 2.6 – Průhyboměr Metra-Frič [27]

2.1.2 Geodetické metody

Geodetické měření nalezne uplatnění u statických zatěžovacích zkoušek převážně za účelem změření vertikálních posunů v průběhu zkoušení konstrukce. Geodetické metody jsou využívány i při dynamických zatěžovacích zkouškách, ale pouze jako doplňující měření pro zaznamenání stavu objektu před a po provedení zátěžového testu. Předností těchto metod ve srovnání s jinými je možnost změření posunů a přetvoření jak relativních, tak i absolutních. V případě že se jedná o posun „relativní“, je posun sledovaného bodu na

konstrukci vztažen k jiné části objektu. Jestliže jde o posun „absolutní“, pak je posun vztažen k referenčnímu geodetickému systému, nezávislému na monitorovaném objektu nebo konstrukci. [17]

Pro určení svislých posunů a deformací se používají následující metody založené na geodetických principech, které jsou podrobněji popsány dále:

- geometrická nivelace,
- trigonometrická metoda,
- hydrostatická nivelace,
- laserová nivelace,
- laserové skenování,
- pozemní fotogrammetrie,
- pozemní radarová interferometrie.

Hlavní výhodou geodetických metod je možnost sledování testovaného objektu, který se nachází ve špatně přístupném terénu. Měřicí aparaturu lze osadit mimo zkoumanou konstrukci, tak i přímo na konstrukci uvnitř zatěžované oblasti, pokud to situace vyžaduje. Z těchto důvodů jsou nejčastěji využívány pro změření posunů a deformací při statických zatěžovacích zkouškách mostních konstrukcí překlenující vodní toky, či hluboká údolí. Každá metoda má své pro a proti a ani geodetické nejsou v tomto případě výjimkou. Mezi nevýhody klasických geodetických metod se řadí přesnost, která se snižuje v závislosti na rostoucí vzdálenosti měřeného bodu od přístroje, a relativně malý počet míst vhodných k usazení měřické aparatury. V neposlední řadě může problém nastat při aplikaci zkušebním zatížení, které v danou chvíli zastíní sledovaný bod na konstrukci a znemožní provést měření. Geodetické metody jsou tak velmi často využívány pouze jako kontrolní měření při zatěžovacích zkouškách.

V předchozím textu je problematika zaměřena pouze na sledování „vertikálních“ posunů. Ale některé geodetické metody umožňují změřit posun ve všech směrech. Této vlastnosti se využívá při zatěžovacích zkouškách mostních konstrukcí. Především se jedná o určení úhlu naklonění mostních pilířů. Naklonění podpěr může být způsobeno nerovnoměrným sedáním vzniklým v důsledku nevhodného založení konstrukce. Úhel náklonu podpěry je možné stanovit například využitím trigonometrie, přesné nivelace či satelitního navigačního systému.

Geometrická nivelace

Nejznámější z geodetických metod pro měření výškových změn je bezpochyby geometrická nivelace. Princip spočívá v odečítání rozdílů převýšení z nivelační latě, jež je opatřena stupnicí o požadované přesnosti, pomocí optického nivelačního přístroje. Jak přístroj, tak lať musí být pečlivě srovnány do roviny. U běžně používaných stavebních nivelačních přístrojů k tomu účelu slouží libela. Optické zvětšení u těchto přístrojů dosahuje hodnot okolo 20x. Při současně zvolené délce záměry do 25 m se kilometrová směrodatná odchylka pohybuje v rozmezí 1,5 až 0,3 mm. Velice důležitá je stabilita vztažných bodů pro kontrolu převýšení. Doporučuje se používat nejméně 3 vztažné body, což umožňuje dvojí kontrolu. Za normálních okolností se však volí větší počet vztažných bodů, které dohromady tvoří uzavřený nivelační pořad, čímž je dosaženo vyšší přesnosti výsledků měření. Avšak **technická nivelace**, jak se jí nazývá, je pro většinu zatěžovacích zkoušek svoji odchylkou nedostačující. [22]



Obrázek 2.7 – Nivelační přístroj [43]



Obrázek 2.8 – Nivelační přístroj s kompenzátořem [44]

Pro účel měření svislých deformací při zatěžovacích zkouškách je vhodnější použít metodu **přesné** či **velmi přesné nivelace**. Zvýšení přesnosti zajišťuje kompenzátorový nivelační přístroj, u něhož odpadá urovnávání přístroje pomocí libely, jelikož funkci urovnávacího mechanismu přebírá samotný kompenzátor. „Kompenzátor je opticko-mechanický prvek, který udržuje optickou osu nivelačního přístroje vždy v horizontální poloze za předpokladu, že nivelační přístroj je nahrubo urovnán kruhovou libelou.“ [3 str. 46] Kilometrová chyba velmi přesné nivelace je do 0,3 mm a používané přístroje mají zvětšení v rozmezí 24x-44x. Pro zvýšení přesnosti nivelační metody je možné také použít předsazenou planparalelní destičku s možností jemného natočení, tzv. optický mikrometr. Citlivost se zvýší na hodnotu 0,1 mm. [5]

Kvalitu měření bezprostředně ovlivňuje nejen samotný nivelační přístroj, ale také použité doplňky potřebné pro nivelaci, jako jsou nivelační lať, nivelační podložka a měřické body osazené na konstrukci. Pro přesnou a velmi přesnou nivelaci jsou používány latě dlouhé 1,8 a 3 m, které jsou vyrobené z jednoho kusu a mají stupnici z invarového pásu s nejmenším dílkem půl centimetru. Pás je na dolním konci pevně připevněn k lati a na horním konci jej napíná pružina silou 200 N. Přestavované body se při nivelaci musí dočasně stabilizovat nivelační podložkou, respektive nivelačními klíny v případě velmi přesné nivelace. [3]

Vhodně zvolené umístění nivelačního přístroje je mimo oblast zasaženou deformačními účinky od zkušebního zatížení. Nelze-li tak uskutečnit z důvodu špatně přístupného okolního terénu či zastínění měřických bodů, instaluje se měřicí přístroj přímo na konstrukci a to nejlépe v místě nad podporou, kde dochází k minimálnímu vertikálnímu pohybu přístroje. Je tedy třeba nezávisle sledovat možný vertikální posun přístroje. V místě nad podporou může docházet i k pootočení, což má za následek naklonění nivelační aparatury. Nivelační přístroj se tak musí neustále kontrolovat a urovnávat. Z tohoto důvodu je vhodnější pro měření na konstrukci použít přístroj s kompenzátorovým mechanismem, který sám průběžně udržuje vodorovnou přímku přístroje. Příklad použití v praxi jsou uvedeny na *obr. 2.9* a *2.10*.



Obrázek 2.9 – Zatěžovací zkouška lávky – nivelace z místa mimo deformovanou oblast [45]



Obrázek 2.10 – Zatěžovací zkouška mostu – nivelace z místa na konstrukci [46]

Při metodě nivelace vznikají chyby měření, které lze obecně rozdělit na **hrubé** a **nevyhnutelné**. Hrubé chyby jsou způsobeny pouze lidským faktorem. Je nutné se jich vyvarovat především zvýšenou důsledností a soustředěností skupiny měřičů při rutinních činnostech. Zejména se jedná o chyby čtení na lati nebo opomenutí urovnání přístroje či

latě.

Nevyhnutelným chybám, jak již z názvu vyplývá, se nedá vyvarovat i při maximální pečlivosti. Lze je pouze potlačit vhodným postupem měření a kvalitní rektifikací. Nevynutelné chyby lze dále rozdělit na **nahodilé** a **systematické**. Nahodilé chyby jsou dle [20] způsobeny:

- nepřesností urovnání nivelační libely – lze ji urovnat s maximální přesností jedné desetiny její citlivosti, použitím kompenzátorového přístroje můžeme tuto chybu zmenšit,
- změnami výšky přístroje a latě – vzniká zapadáním a vytlačováním noh stativu přístroje, lze ji eliminovat důkladným zašlapováním,
- čtením laťové stupnice – závisí na délce záměry, zvětšení dalekohledu, velikosti a tvaru laťového dílku apod.,
- přeastřením (paralaxa).

Systematické chyby vznikají stálým opakováním drobných chyb a ovlivňují tak zejména měření na velkých vzdálenostech. Jedná se o následující chyby:

- chyba ze zakřivení horizontu – závislá na délce záměry, částečně se odstraní rektifikací libelového nivelačního přístroje;
- chyba ze sklonu záměrné přímky – eliminace rektifikací,
- vliv svislé složky refrakce,
- chyba z nesprávné hodnoty délky laťového metru – způsobuje ji např. nerovnoměrné dělení stupnice či ohyb latě,
- vliv nesvislé polohy latě – eliminuje se rektifikací latě,
- vliv teplotních změn na přístroj a lať.

Obecně lze říci, že přesnost nivelační metody nejvíce závisí na zkušenostech a praxi pracovníků zajišťujících měření. Dále pak na dodržování předepsaných postupů a zásad, s čímž souvisí i pravidelná údržba a kalibrace měřících přístrojů. V neposlední řadě závisí přesnost měření na kvalitě nivelační aparatury a povětrnostních podmínkách.

Geometrická nivelace je při dodržení stanovených zásad z geodetických metod považována za nejvhodnější metodu pro měření svislých posunů pozorovaných bodů stavebního objektu. Dodržením všech podmínek je pak možné dosáhnout určení převýšení stabilizovaných nivelačních bodů s reálnou přesností pohybující se v řádu setin milimetru.

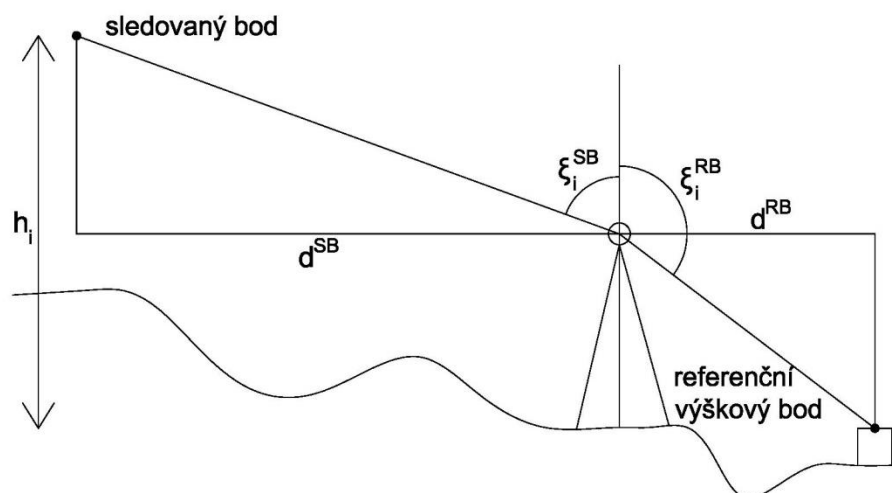
Trigonometrická metoda

Trigonometrická metoda je společně s geometrickou nivelací nejpoužívanější geodetická metoda pro měření svislých posunů a deformací stavebních objektů. Předností trigonometrie jsou dostatečná přesnost a praktičnost. Vhodnost využití této metody nastává především tehdy, jsou-li pozorované body sledovaného objektu složitě dostupné pro geometrickou nivelaci. Zvláště výhodná se trigonometrie jeví v případě, jestliže je třeba současně sledovat i vodorovné posuny sledovaných bodů, jelikož do výpočtu se musí zavádět i změny vodorovných délek záměr. Princip metody je založen na matematickém řešení trojúhelníku s uvažováním fyzikálních vlastností Země a zemské atmosféry. K měření jsou využívány přístroje zvané teodolity nebo totální stanice. [17]



Obrázek 2.11 – Totální stanice [47]

V zásadě jsou dvě varianty měření pomocí trigonometrie, jež se používají při zatěžovacích zkouškách. První je postavena na využití jednoho přístroje, jinak též nazývána trigonometrická nivelace, viz *obr. 2.12*. Předpokladem použití je známá vzdálenost sledovaného bodu. Výška přístroje se určí pomocí zvoleného referenčního výškového bodu, čímž se vyhne problémům při změně polohy přístroje mezi jednotlivými etapami měření. Pak je možné určovat výšku mezi sledovanými body na konstrukci a referenčním výškovým bodem.

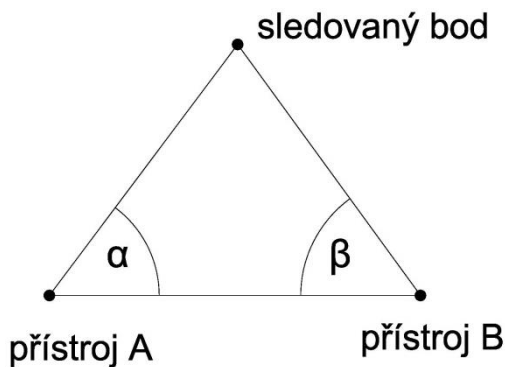


Obrázek 2.12 – Princip určení relativní výšky sledovaných bodů trigonometrickou nivelací [16]

Relativní výška sledovaných bodů v jednotlivých etapách se pak určí dle následujícího vztahu:

$$h_i = d^{SB} \cdot \cot g \xi_i^{SB} + d^{RB} \cdot \cot g(200 - \xi_i^{RB}) + o, \quad (2.1)$$

kde $d^{SB/RB}$ je vodorovná vzdálenost přístroje od bodu sledovaného/referenčního,
 $\xi_i^{SB/RB}$ zenitový úhly v i-té etapě na bod sledovaný/referenční,
 o oprava z vlivu vertikální refrakce a zakřivení Země.



Obrázek 2.13 – Princip trigonometrické metody s využitím 2 měřících přístrojů

Druhá varianta, u níž nelze určit vzdálenost sledovaného bodu, vyžaduje dva přístroje měřící současně, které se sledovaným bodem tvoří dohromady trojúhelník o známých úhlech α , β a délky měřící základny d , viz obr. 2.13. Vzdálenost sledovaného bodu pak lze jednoduše dopočítat. Výhodou použití této varianty je duplicitní měření, čímž lze potlačit vliv refrakce a výsledné hodnoty jsou tak oproti variantě měření s jedním přístrojem přesnější. [16]

Za předpokladu použití dostatečně přesných teodolitů či totálních stanic lze dosáhnou při délkách záměr přibližně 100 m směrodatné odchylky v určení vertikálního posunu kolem 1 mm. Chyba se zmenšuje či zvětšuje v závislosti na délce zvolených záměr.

Hydrostatická nivelace

Hydrostatická nivelace se využívá pro změření relativních hodnot svislých posunů konstrukce. Je schopna poskytovat velmi přesné výsledky, ale kvůli obtížnému použití se její aplikace v praxi vyskytuje jen zřídka. Princip stanovení vertikálního rozdílu hydrostatickou nivelací využívá fyzikálních vlastností kapaliny. Jedná se o dvě nádoby spojené hadicí a celá soustava je naplněná kapalinou o známých fyzikálních vlastnostech. To vše dohromady tvoří hydrostatickou soupravu. Nádoby spojené hadicí se osazují pomocí držáků v místě měřících bodů, jejichž výškový rozdíl potřebujeme změřit. Metoda vychází z Bernoulliho rovnice rovnováhy (2.2), která platí pro kapalinu v klidném stavu v hydrostatické soupravě.

$$p_1 + \rho_1 \cdot g \cdot h_1 = p_2 + \rho_2 \cdot g \cdot h_2, \quad (2.2)$$

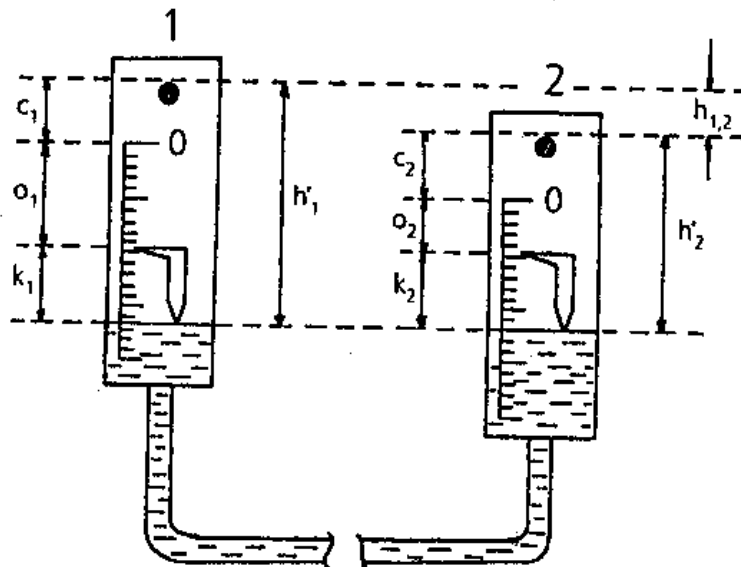
kde p_1, p_2 je tlak vzduchu na hladiny v nádobách,

ρ_1, ρ_2 hustota kapalin,

h_1, h_2 relativní výšky hladin kapaliny v jednotlivých nádobách,

g tíhové zrychlení.

V případě, že vlastnosti kapalin splňují předpoklady $p_1 = p_2$ a zároveň $\rho_1 = \rho_2$, je výška hladin kapaliny v obou nádobách ve stejné úrovni a tvoří tak společnou hladinovou plochu. Přesné určení převýšení se stanoví změřením hloubky hladin kapaliny h_1' a h_2' v jednotlivých nádobách. Odečtením naměřených hodnot hloubek hladin je získán hledaný svislý posun, viz obr. 2.14.



Obrázek 2.14 – Princip hydrostatické nivelace [3]

Pro změření hodnot h_1' , h_2' se používá mikrometr mechanický, optický nebo elektronický. Způsob doteku hrotu mikrometru závisí na použitém druhu. U klasického mechanického je určení vizuálně, optický využívá světelné signalizace a u elektrického se jedná o elektrickou registraci. Za příznivých okolností a eliminaci vnějších vlivů působících na měřickou aparaturu, přičemž hlavní požadavek je na stejnou teplotu kapaliny ve všech místech aparatury, lze dosáhnout reálné přesnosti stanovení změny převýšení mezi sledovanými body 0,05 až 0,1 mm.



Obrázek 2.15 – Digitální hadicová vodováha [49]

Hydrostatická nivelace se dříve používala za účelem změření převýšení na přemostění velkých vzdáleností přes široké vodní toky či mořské úžiny. Dnes se zastává názor, že použití přesné hydrostatické nivelace má smysl při určení svislých posunů pozorovaných bodů vzdálených do 30 m. Rozsah měření je značně omezen rozměry koncových skleněných válců, což má vliv na nižší výskyt této metody v praxi. S běžnými soustavami pro přesnou hydrostatickou nivelaci je možné měřit převýšení pozorovaných bodů do 10 až 15 cm.

V současné době jsou již vyvinuty automatické hydrostatické aparatury, u kterých se hrot posouvá k hladině krokovým motorem napájeným impulsy stejnosměrného proudu. Po styku s hladinou se hrot automaticky zastaví a zabudovaný mikroprocesor následně pomocí počtu impulsů vypočte hodnotu převýšení s přesností 0,003 až 0,01 mm

Výhodné je tuto metodu použít v místech, která jsou těžko přístupná pro geometrickou nivelaci. Taková místa, kde není možné postavit nivelační přístroj a nivelační lať nebo nelze zaostřit dalekohled z důvodu příliš krátké záměry. Velkou výhodou je také možnost kontinuálního a dlouhodobého měření s automatickým zaznamenáváním hodnot i na více místech najednou. Z tohoto důvodu jsou využívány jako stacionární, což znamená trvale zabudované ve stavebních objektech za účelem měření výškové změny, naklonění apod. Takovéto soupravy bývají instalovány na bloku reaktoru či turbogenerátoru jaderných a tepelných elektráren nebo základech strojových zařízení.

[3]

Laserová nivelace

Laserová nivelace funguje principiálně stejně jako nivelace optická a tudíž je i používána za stejnými účely. Rozdíl spočívá v realizaci záměrné přímky, kdy u optických přístrojů je přímka realizována světelným paprskem, u laserových pak přímku zajišťuje viditelný laserový paprsek. Tato metoda umožňuje použít delší záměry. Rovněž jakou u

optických přístrojů i s laserovými lze měření provádět jak mimo konstrukci, tak v případě potřeby přímo na konstrukci (v deformační zóně). Při požadavku na urychlení měření (částečnou automatizaci) a vyšší přesnost lze použít přístroj vybavený kompenzátorovým mechanismem. Laserová nivelace vyžaduje použití speciální latě s čidlem, které umožňuje určit střed záměry. Přesnost metody se pohybuje v rozmezí 0,8 až 3 mm při délce záměry do 100 m a dosah laserového paprsku je obvykle 200 až 300 m. [19]

Modifikací této metody pak může být využití laserového teodolitu, kdy záměrná přímka nemusí být výhradně vodorovná, což se ale negativně projevuje na složitosti stanovení přesnosti.

Laserové skenování

Další z geodetických metod, kterou lze využít pro sledování svislých posunů je laserové skenování. Jedná se o neselektivní metodu využívající k měření souřadnic bodů impulsový či fázový dálkoměr, který podrobně zaměřuje body na objektu v předem nastaveném rastru řádků a sloupců. Měřeny jsou horizontální úhly, vertikální úhly a šikmá vzdálenost. Výsledkem laserového skenování jsou tzv. mračna bodů, jež se dále zpracovávají pomocí specializovaných výpočetních programů. Laserové skenovací systémy tak umožňují sestavit na základě získání prostorových souřadnic podrobných bodů kompaktní 3D virtuální podobu sledovaného objektu. Mezi výhody této bezkontaktní metody se řadí velmi rychle a jednoduché provedení měření, získání dat z těžko dostupných míst a také možnost provádět měření bez omezení provozu na konstrukci. V neprospěch metody pak hraje roli vysoká pořizovací cena, poměrně velký vliv vertikální refrakce, s čímž souvisí i nižší přesnost měření v řádech milimetrů. [48]

Pozemní fotogrammetrie

Fotogrammetrie je metoda bezkontaktního měření s použitím fotografických záznamů ve známém měřítku. Využívá principu optické triangulace, kdy se pomocí fotoaparátu měří povrch a okolí měřeného objektu. Vyhodnocení, nebo lépe řečeno vlastní měření, je pak prováděno na měřických snímcích v laboratoři pomocí vyhodnocovacích přístrojů. Zásadní nevýhodou tedy je, že výsledky nelze získat na místě v průběhu, nebo těsně po skončení měření. Fotogrammetrické metody, jež jsou používány pro měření vertikálních posunů konstrukce, lze rozdělit na následující:

- metoda časové základny,

- metoda reálné základny.

Metoda reálné základny je prováděna pořizováním snímků ze dvou nebo více stanovišť, což umožňuje průsekové nebo stereoskopické vyhodnocení všech tří souřadnic sledovaných bodů z pořizovaných snímků. S rostoucím počtem stanovišť se zvyšuje přesnost metody.

Metoda časové základny se při měření svislých deformací vyskytuje častěji. Princip spočívá v pořizování snímku z jednoho místa v různém čase. Během provádění jednotlivých etap měření musí být stejné podmínky vnitřní a vnější orientace měřické kamery. Orientace kamery musí být nastavena tak, aby osa záběru byla kolmá na rovinu posunu. Vyhodnocují se pak pouze body, které jsou v rovině snímku, tedy dvě souřadnice. [22]

Přesnost metody zaleží v první řadě na kvalitě použité kamery a řádném nasvícení objektu. Za předpokladu splnění těchto podmínek se přesnost metody pohybuje v řádu milimetrů při vzdálenosti měřických bodů od kamery přibližně 100 m. V případě tzv. blízké fotogrammetrie, jež lze použít pro měření poměrných deformací, je přesnost 25 μm při standardní vzdálenosti měření 4 m. Z těchto informací vyplývá, že přesnost pozemní fotogrammetrie se s rostoucí vzdáleností sledovaného objektu od měřícího aparátu markantně zhoršuje.

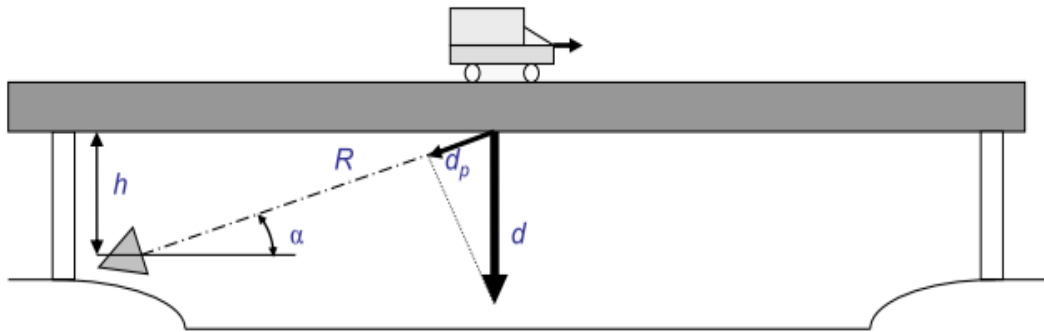
Pozemní radarová interferometrie

Jako poslední z uvedených geodetických metod je radarová interferometrie. Jedná se o bezkontaktní metodu vhodnou pro sledování posunů, jejíž princip je založený na technologii souvislých frekvenčních stupňovitých vln, které radar (*obr. 2.17*) vysílá a po zpětném odrazu přijímá odezvu. Odraz je zprostředkován koutovým odražečem (*obr. 2.18*).

V případě že záměra není orientována přesně ve směru předpokládaného posunu (*obr. 2.16*), musí se skutečný posun dopočítat z následujícího vzorce:

$$d = d_p \cdot \frac{R}{h}, \quad (2.3)$$

kde d_p je pohyb naměřený radarem,
 R délka měřená radarem,
 h převýšení radaru a odražeče, jež je třeba změřit jiným způsobem.



Obrázek 2.16 – Schéma měření průhybu mostní konstrukce pozemní radarovou interferometrií [26]



Obrázek 2.17 – Radar [26]



Obrázek 2.18 – Koutový odražeč osazený na zábradlí mostu [26]

Maximální dosah radarů bývá až 1 km. Přesnost naměřených posunů se pak pohybuje v řádech setin milimetru a závisí zejména na velikosti koutových odražečů, úhlu směru záměry se směrem promítání pohybů a samozřejmě také na vzdálenosti koutových odražečů od radaru. Mezi hlavní přednosti metody patří:

- sledování posunů v reálném čase při krátkodobém i dlouhodobém zatížení,
- určit jak statickou, tak dynamickou odezvu sledované konstrukce,
- dynamicky zachytit a odhalit frekvence a amplitudy kmitání sledovaného objektu ve frekvenčním rozsahu 0,05 až 50 Hz,
- určit posuny na více místech konstrukce současně (paralelně), avšak vzdálenost zájmových bodů na konstrukci je omezena v radiálním směru (směru záměry) na minimální hodnotu 0,75 m,

- rychlost provedení metody,
- možnost využití bez vyloučení provozu na konstrukci.

Tato nová bezkontaktní geodetická metoda tak splňuje všechny předpoklady pro její dynamický rozvoj a budoucímu využití při sledování posunů rizikových objektů.

[23]

2.1.3 Elektrické metody

Tyto metody využívají pro změření posunutí snímače, jež pracují na principu převedení délkové či úhlové změny na změny elektrických veličin (odpor, indukčnost, kapacita apod.) V zásadě se v praxi lze setkat s využitím následujících snímačů polohy založených na elektrickém principu:

- odporové,
- indukčnostní,
- kapacitní.

Měření pomocí elektrických snímačů probíhá tak, že hodnoty sledovaných veličin jsou zaznamenávány do paměti počítače, který je propojený se snímači přes měřicí ústřednu (*obr. 2.19*). V závislosti na zvolené frekvenci snímání tak mohou být hodnoty posunutí a přetvoření zaznamenávány i několikrát za sekundu. Současně s měřením probíhá na počítači grafické vyhodnocení sledovaných účinků, což umožňuje kontinuálně sledovat průběh zkoušky a bezpečně určit, zda jsou deformace dostatečně ustáleny a zatěžovací stupeň může být ukončen.



Obrázek 2.19 – Měřicí ústředna Spider 8 od firmy HBM [50]

Odporové snímače

Odporové neboli potenciometrické snímače převádí změnu polohy měřené části na změnu elektrického odporu pomocí kontaktu (jezdce), který se posouvá po proměnné odporové dráze. Velikost posunutí pak vyplývá z měření změn proudu nebo napětí. Měrným prvkem je odporová vrstva, která může být tvořena vrstvou uhlíku vinutým drátovým elementem nebo elementem vyrobeným z vodivého plastu (CP). Potenciometry pro měření posunu se vyrábějí ve dvou variantách. První je přímé provedení, kdy se jezdec pohybuje po rovné odporové dráze. Tou druhou je provedení kruhové, jež měří otáčivý pohyb jezdce po kruhové dráze. V tomto případě se pohyb konstrukce na měřicí přístroj přenáší pomocí struny zavěšené ke konstrukci a ovinutou kolem kladky (otáčivá osa jezdce) potenciometru, čímž je převeden translační pohyb na rotační. [52] [53]

Potenciometr se zapojuje do měřícího obvodu přes jeden konec a běžce, který plní funkci proměnného odporu, nebo může být zapojen všemi vývody a pak je měřeno napětí úměrné poloze běžce. Na měření může mít negativní vliv odpor přívodních kabelů. Eliminace je možná dvěma způsoby a to použitím potenciometrů s velkým vnitřním odporem nebo zajistit napájení konstantním proudem v kombinaci s více drátovým připojením. Přesnost potenciometrických snímačů se odvíjí od jejich rozsahu měření. Obvykle se pohybuje v rozmezí 0,1 až 1% z rozsahu, ale na trhu se vyskytují i typy, které jsou schopny dosahovat přesnosti až 0,02%. [14]



Obrázek 2.20 – Potenciometrický snímač dráhy [51]



Obrázek 2.21 – Potenciometr otočný [15]

Indukčnostní snímače

Jedná se o snímače, které měřenou mechanickou veličinu převádí na změnu vlastní nebo vzájemné indukčnosti způsobenou změnou jejich magnetického odporu. Indukčnostní

snímač je složen z feromagnetického jádra a cívky, nebo soustavou cívek bez jádra zapojených do obvodu se zdrojem pomocného střídavého napětí. Dělení snímačů dle uspořádání cívky případně magnetického obvodu je následovné:

- snímače s malou vzduchovou mezerou – změna vzduchové mezery magnetického obvodu nebo změna její plochy způsobuje změnu indukčnosti,
- snímače s otevřeným magnetickým obvodem – hodnoty posunu jsou stanoveny na základě pohyblivého feromagnetického jádra, jenž se zasouvá do cívky,
- snímače s potlačeným polem – využívá změny vzdálenosti cívky od elektricky vodivého tělesa,
- transformátorové snímače – měřená veličina se vyhodnocuje prostřednictvím vzájemné indukčnosti alespoň dvou cívek.

Zapojení indukčnostního snímače může být provedeno jako jednoduché, diferenční nebo transformátorové. Nejběžněji používaným typem pro měření posunutí je snímač v provedení otevřeného magnetického obvodu s diferenčním zapojením (*obr. 2.22*). Pracuje na základě změny polohy feromagnetického jádra v dutinách cívek, což způsobuje změnu jejich indukčnosti. Obvykle se indukčnostní snímače vyrábí s rozsahem měření 1 až 500 mm a disponují citlivostí v řádu mikrometrů, přičemž citlivost je lineárně závislá na velikosti průměru cívky. Díky konstrukčnímu řešení jsou měřicí přístroje, využívající elektrické vlastnosti cívek, velmi odolné vůči mechanickému poškození a lze je použít i v extrémních podmínkách. Všechny tyto vynikající vlastnosti dělají z indukčnostních snímačů jedny z nejpoužívanějších přístrojů pro měření deformací a sledování šířky trhlin.

[14] [21]



Obrázek 2.22 – Indukčnostní snímač posunutí [54]

Kapacitní snímače

Kapacitní snímače pracují na podobném principu jako snímače indukčnosti s tím rozdílem, že funkci snímacích cívek v tělese převodníku zastávají kondenzátory, které jsou tvořeny elektrodami. Princip kapacitního snímače je tedy založen na převodu změny délky snímače na změně kapacity kondenzátoru. Tento typ snímače umožňuje velmi lineární, dlouhodobě výborně teplotně stabilní měření. Negativní vliv na přesnost může mít stejně jako u potenciometrů kvalita a délka spojovacích kabelů. Dále se kapacitní snímače vyznačují vysokou přesností měření (až 1 μm) a také odolností v silných magnetických polích a radioaktivním prostředí. Nevýhodou potom může být menší rozsah měření, jenž se pohybuje v řádu desítek milimetrů. [14]



Obrázek 2.23 – Kapacitní snímač posunutí [54]

Obecně platí, že přesnost měření elektrickými snímači se odvíjí od měřicího rozsahu snímačů. Čím větším rozsahem snímač disponuje, tím menší přesnost získaných hodnot poskytuje.

V dnešní době se elektrické snímače používají s velkou oblibou a postupně tak nahrazují mechanické způsoby měření deformací. Jejich hlavní výhodou je možnost kontinuálního měření přetvárných veličin v průběhu zatěžovací zkoušky, přičemž frekvence snímání může být zvolena dle potřeby. Snímače na elektrickém principu jsou tak vhodné i pro měření rychlých pohybů čili kmitání, které vzniká při dynamickém zatěžování konstrukce. Dále se mezi výhody řadí poměrně vysoká přesnost a nízký počet pracovníků potřebných pro obsluhu.

2.2 Měření poměrných přetvoření

Následující část, jež se věnuje popisu měření poměrných přetvoření na konstrukci, byla čerpána převážně z [14].

Při měření poměrného přetvoření, jinak též relativní deformace, jsou sledovány délkové změny měřicí základny ve zvoleném místě tělesa. Tento druh měření deformací se odborně nazývá **tenzometrie**, která je používána za účelem stanovení napětí v určitém místě konstrukce. Ze známých pružnostních charakteristik materiálu (modul pružnosti E , Poissonovo číslo μ) a tenzometrií získaného poměrného přetvoření ε lze stanovit napětí s využitím Hookova zákona:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon, \quad (2.4)$$

Přístroje, které slouží pro měření změny vzdálenosti dvou bodů tělesa, jsou v praxi známé jako **tenzometry** či **deformetry**. Lze je rozdělit podle jejich principu měření a při zatěžovacích zkouškách se nejčastěji používají následující:

- mechanické tenzometry,
- strunové tenzometry,
- extenzometry,
- optické tenzometry,
- odporové tenzometry.

Délka tenzometru je volena v závislosti na druhu materiálu, ze kterého je zkoušená konstrukce vyrobena. Pro homogenní materiály (např. ocel) se používá měřicí základna délky 3-10 mm, u nehomogenních materiálů (např. beton) je to 50-200 mm. [5]

Všechny druhy tenzometrických měření poměrného přetvoření jsou negativně ovlivňovány změnami teploty během měření. Jestliže je známá teplota konstrukce a teplota tenzometru je shodná, lze tento vliv obecně kompenzovat výpočtem změny poměrného přetvoření $\Delta\varepsilon_t$, způsobenou změnou teploty ΔT , dle vzorce:

$$\Delta\varepsilon_t = (\alpha_m - \alpha_t) \cdot \Delta T, \quad (2.5)$$

kde $\alpha_{m/t}$ je součinitel tepelné roztažnosti materiálu objektu/tenzometru

Výsledné poměrné přetvoření se pak získá odečtem deformací způsobené rozdílem teploty od deformace naměřené. Pokud ale není teplota snímače shodná s teplotou konstrukce, je velmi obtížné stanovit korekci. I malé rozdíly teplot mohou způsobovat zdánlivě velké rozdíly naměřených hodnot a proto je důležité snímač chránit před přímým ozářením a velkým prouděním vzduchu. [2]

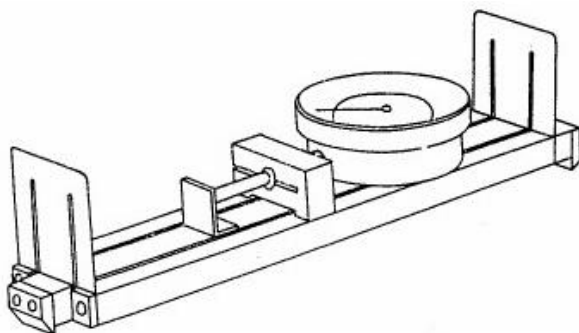
2.2.1 Mechanické tenzometry

Kontakt mechanických tenzometrů s objektem je obvykle zajištěn pomocí břitů, hrotů nebo trnů. Používají se k aplikaci na volném povrchu a jejich výhodou je lineární zvětšení deformace v rozsahu celé stupnice. Měření deformace je zajištěno buď přímo indikátorovými hodinkami, nebo z důvodu zvýšení citlivosti mohou mít pákové zvětšení pohybu. Poměrné přetvoření je u mechanických tenzometrů většinou měřeno přímým způsobem, tj. že při určité délce základny l je měřeno její prodloužení nebo zkrácení Δl a pak tedy platí vzorec:

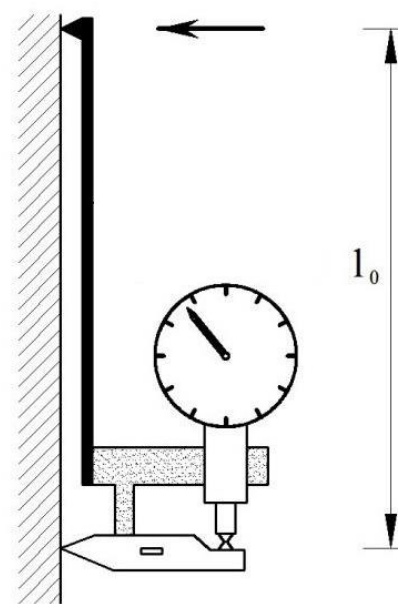
$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}, \quad (2.6)$$

Nejběžněji používané druhy mechanických tenzometrů jsou:

- tenzometry s přímým měřením indikátorovými hodinkami (tyčkový, příložný a můstkový),
- Huggenbergerův – pracuje s pákovým převodem,
- Johansonův – využívá změny tahové síly na zkrucování kovového pásku.



Obrázek 2.25 – Schéma můstkového tenzometru – Hollanův můstek [5]



Obrázek 2.24 – Schéma příložného tenzometru [5]

2.2.2 Strunové tenzometry

Strunový tenzometr je tvořen pevným rámem, jenž zároveň splňuje funkci mechanické ochrany, uvnitř které se nachází napjatá ocelová struna, ukotvená na koncích měřicí základny snímače. Princip snímače je založený na sledování frekvence vlastních kmitů struny, měnící se v závislosti na napjatosti struny. Změny napjatosti struny způsobují délkové změny měřicí základny. Buzení, resp. snímání příčných kmitů struny zajišťuje elektromagnetický jednocívkový nebo dvoucívkový systém. Kmitání struny musí být harmonické a za tímto účel je součástí tenzometru permanentním magnet umístěný v blízkosti struny, nebo může být harmonické kmitání korigováno také stejnosměrným posuvem budícího proudu cívky. Frekvenci příčného kmitání struny popisuje vztah dle [5]:

$$f = \frac{1}{2l} \cdot \sqrt{\frac{\sigma}{\rho}} = \frac{1}{2l} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot \varepsilon}{\rho}}, \quad (2.7)$$

kde l je délka struny,
 E modul pružnosti materiálu struny,
 ρ měrná hmotnost materiálu struny,
 σ napětí struny,
 ε deformace struny.

Ze vzorce (2.7) pak lze jednoduše odvodit vztah pro výpočet hledané veličiny, tedy změny poměrného přetvoření, z naměřených hodnot frekvence:

$$\Delta\varepsilon = (f^2 - f_0^2) \cdot K_s, \quad (2.8)$$

kde K_s je koeficient strunového tenzometru udávaný výrobcem,
 f_0 výchozí frekvence,
 f frekvence v průběhu zatěžování.

V praxi se vzorec (2.8) transformuje na vztah:

$$\Delta\varepsilon = \left(\frac{1}{\Delta T_1} - \frac{1}{\Delta T_2} \right) \cdot K_s, \quad (2.9)$$

kde ΔT je čtení na přístroji – změna periody.

Mezi výhody strunových tenzometrů patří jejich konstrukční řešení, které je provedeno jako masivní vodotěsný systém, velmi odolný proti mechanickému poškození a přitom dostatečně citlivý pro měření poměrného přetvoření. Největší předností je pak časová stálost a velmi vysoká přesnost, čímž jsou předurčeny pro měření na takových místech, kde není možná výměna snímačů v případě poruchy. Nevýhodou je omezená možnost použití v částech konstrukcí namáhaných na ohyb. V důsledku ohýbání konstrukce může docházet i k nadměrnému ohýbání instalovaného snímače, čímž se struna dotýká pouzdra, není dokonale napnutá a přístroj tak vykazuje zkreslené hodnoty. Velmi negativní vliv mají na tento typ snímačů i teplotní změny, na které je nutné brát zřetel při stanovení výsledné deformace, viz vzorec (6).

Strunové tenzometry se vyrábí v provedení jako příložné, kdy jsou přidělány k povrchu sledovaného objektu či přivařené k výztuži, nebo kotevní, které se zabudovávají uvnitř betonových konstrukcí. Kotevní jsou využívány hlavně při zatěžovacích zkouškách in situ a pro další možnost sledování stavu objektu během provozu. Většinou jde o betonové mostní konstrukce, přehradní hráze nebo tunelové ostění. Příložné naleznou uplatnění zejména při laboratorních zkouškách, ale lze se s nimi setkat i při zkouškách in situ.



Obrázek 2.26 – Kotevní strunový tenzometr [56]



Obrázek 2.27 – Příložný strunový tenzometr [57]

2.2.3 Extenzometry

Extenzometry jsou příložné tenzometry, u nichž je poměrné přetvoření měřeno elektrickými snímači posunutí (odporové, indukčnostní, kapacitní). V podstatě se jedná o snímače, které byly podrobně probrány v kapitole 2.1.3. Přenos deformace sledovaného objektu je zajištěn buď přímo, kdy je snímač přilepený či zakotvený k povrchu konstrukce a jezdec má kotvení samostatné nebo se opírá o zarážku připevněnou ke konstrukci. Přenos

deformace může být zprostředkován také pomocnou konstrukcí s pohyblivými břity, do které je snímač osazený. Funkci pomocné konstrukce a zároveň měřicí základny plní například Hollanův můstek uvedený na *obr. 2.29*. Snímače na tomto principu tak mohou průběžně poskytovat velmi přesné hodnoty poměrného přetvoření nebo posunů v trhlinách a lze je použít pro sledování jak statických, tak dynamických účinků od zatížení.



Obrázek 2.28 – Indukční extenzometry osazené na zkušebních betonových kvádrech [58]



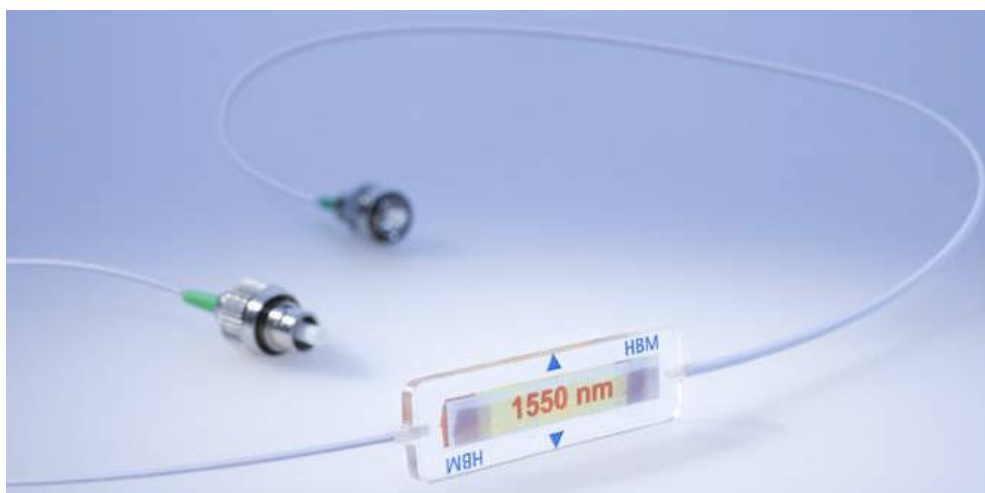
Obrázek 2.29 – Indukční snímač osazený v Hollanově můstku

2.2.4 Optické tenzometry

Princip optických snímačů je založen na odrazu centrální vlnové délky světla Braggovou mřížkou. Tou prochází přivedený signál, přičemž část světelného spektra se odrazí zpět. Odraženou část potom zaznamenává měřicí přístroj a porovnává s referenční (nezatíženou) mřížkou, která je naladěná na stejnou vlnovou délku. Z jejich rozdílu se následně stanoví výsledná deformace.

Provedení samotného tenzometru je v podstatě optické vlákno opatřené Braggovou (odrazivou) mřížkou, která může být do vlákna vytvořena tavením nebo rytím. Celý tento systém zaobaluje polymerová ochrana, jež zabraňuje mechanickým poškozením a proniknutí vlhkosti k měrnému elementu. Optický tenzometr tak lze aplikovat jak přilepením na povrch objektu, tak zabudovat nastálo uvnitř. Běžné tento druh snímačů poskytuje naměřené hodnoty deformací s přesností až $1 \mu\text{m}/\text{m}$. Mezi přednosti optického tenzometru se řadí možnost použití v oblastech velkých deformací, necitlivost na elektromagnetická pole, vysoká přesnost a dlouhá životnost. Naopak nevýhodou je poměrně velká závislost na teplotních změnách a také vysoká pořizovací cena měřicí aparatury. Příklad optického

tenzometru je uveden na *obr. 2.30*. [28]



Obrázek 2.30 – Optický tenzometr [59]

2.2.5 Odporové tenzometry

Odporová tenzometrie je založena na vlastnosti vodiče, kdy jeho deformací, respektive změnou délky a průřezu, dochází ke změně odporu vodiče. Odporové tenzometry jsou tedy tvořeny měřicí mřížkou o známém elektrickém odporu. Pro sledování deformace se tenzometr mechanicky spojí s povrchem měřeného objektu, což je prováděno přilepením nebo přivařením. Přetvoření materiálu, projevující se na povrchu objektu, tak způsobuje deformaci mřížky odporového tenzometru, která je přímo úměrná změně elektrického odporu. Povrch objektu v místě tenzometru musí být před aplikací snímače pečlivě očištěný, tj. obroušený, zbavený nátěru apod.

Snímače mohou být zhotoveny z různých materiálů (kovový drátek, polovodičové vlákno či napařena vrstva). Podle toho jsou dále děleny do dvou hlavních skupin na **kovové** a **polovodičové** tenzometry. Vzhledem k využití v praxi při zatěžovacích zkouškách budou dále popsány pouze kovové odporové tenzometry.

Z fyzikálního hlediska platí pro elektrický odpor vodiče R vztah:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{s}, \quad (2.10)$$

kde ρ je specifický odpor,
 l délka,

s příčný průřez drátku.

Ze vzorce (2.10) lze odvodit vztah popisující závislost změny odporu vodiče na délkové změně:

$$\frac{\Delta R}{R} = K \cdot \frac{\Delta l}{l} = K \cdot \varepsilon, \quad (2.11)$$

kde ΔR je změna odporu tenzometru způsobena deformací,
 R odpor nedeformovaného tenzometru,
 K deformační součinitel citlivosti tenzometru, tzv. K-faktor,
 Δl změna délky tenzometru v důsledku deformace objektu,
 l délka tenzometru před deformací,
 ε poměrné přetvoření.

K-faktor je bezrozměrný součinitel, jenž vyjadřuje vliv celé konfigurace odporového tenzometru a uvádí ho výrobce. Jeho hodnota se odvíjí zejména od typu snímače, materiálu vodiče a geometrie vinutí vodiče. U vodičových snímačů se běžně hodnota K-faktoru pohybuje kolem dvou. Podle provedení měřicí mřížky se kovové odporové tenzometry dělí na **drátkové** a **foliové**. [1]

Drátkové tenzometry

Měřicí element u drátkových tenzometrů tvoří tenký drátek o průměru 0,01 až 0,03 mm, obvykle s konstantanu (60% Cu, 40% Ni). Vyznačují se dobrou linearitou měření, přibližně do 6,5% přetvoření, dále malým rozptylem odporu, K-faktoru i teplotních součinitelů, což zaručuje vyloučení rušivých vlivů při měření více tenzometry současně. Nevýhodou pak je omezení dosažitelné hodnoty odporu z důvodů rozměrů mřížky a průměru drátku. Drátkové tenzometry lze dále rozdělit na:

- lepené s podložkou,
- lepené bez podložky,
- nelepené s volnou mřížkou.

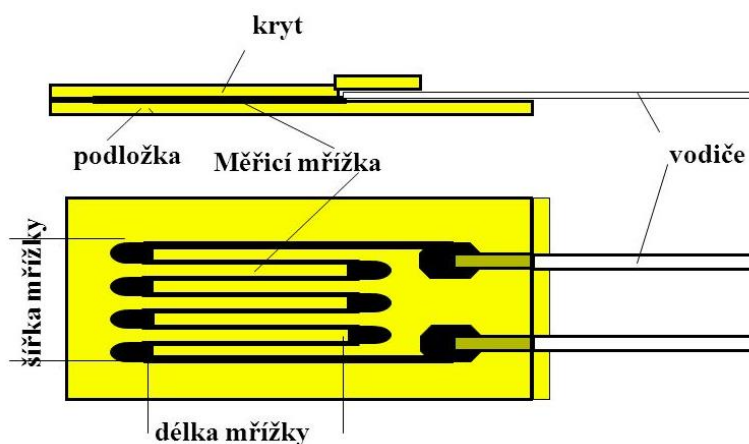
Konstrukce odporového tenzometru **lepeného s podložkou** je řešena tak, že na tenkou podložku je nalepena měřicí mřížka vytvořená z drátku. Speciálními typy lze zjišťovat napjatost i při opakovaném intenzivním dynamickém namáhání (1000 cyklů při ± 4 mm/m) nebo je možné měřit při extrémních teplotách (-270 až +950 °C).

Tenzometry **lepené bez podložky** se připevňují keramickým tmelem a jsou vhodné pro měření při velmi vysokých teplotách.

Odporové snímače **nelepené s volnou mřížkou** jsou konstrukčně řešeny tak, že mřížka je upevněná na soustavě držáků, čímž je zaručen přenos deformace na celý povrch odporového článku. Projevují se malou hystezí a posunem nulového bodu. Jejich nedostatkem je poměrně nízká rezonanční frekvence, dlouhá doba potřebná k dosažení tepelné rovnováhy a náročnost výroby a instalace.

Foliové tenzometry

V současné době se jedná o nejpoužívanější typ kovových tenzometrů. Měřicí mřížka vytvořená z folie o min. tloušťce 5 μm se většinou dělá leptáním na podložku, která bývá z polyamidu nebo skelných vláken, vyztužených fenolovými filmy tloušťky cca 20 μm . Výhodou tohoto způsobu provedení je možnost snadného vytvoření libovolné konfigurace mřížky. Oproti klasickým drátkovým tenzometrům může být použité vyšší napájecí napětí, což je důležité u tenzometrů miniaturních rozměrů, a také tento způsob výroby umožňuje zhotovení integrované soustavy tenzometrů. Díky menší tloušťce aktivní části došlo k výraznému zlepšení odvodu ztrátového tepla a foliový tenzometr tak snese větší proudové zatížení, čímž se úměrně zvětší i výstupní signál. Také se vyznačují vysokou životností, jelikož jsou schopny vydržet až 10 mil. zatěžovacích cyklů. Nevýhoda konstrukčního řešení foliových tenzometrů se projevuje u velmi malých snímačů, kdy dochází ke zvýšení hodnot některých nepříznivých charakteristik, jako jsou hystereze a creep (tečení). [6]



Obrázek 2.31 – Schéma foliového odporového tenzometru [60]

Odporové tenzometry jsou velmi citlivé na teplotní změny a je tedy nutné to během měření kompenzovat, což lze provést třemi způsoby. První je použití kompenzačního tenzometru, který musí být totožný s tenzometrem aktivním a nalepuje se na nezatěžovaném prvku ze stejného materiálu. Aktivní pak měří celkovou deformaci na konstrukci, zatímco kompenzační měří pouze deformace vzniklé teplotní roztažností. Druhá možnost je použití samokompenzovaného tenzometru a třetí je použití metody početní korekce naměřených údajů, k čemuž je potřeba znát patřičné technické údaje o charakteristikách tenzometru a teplotu v měřeném místě. [1]

Odporové tenzometry se při zatěžovacích zkouškách používají pro určování deformací a napětí ve vybraných (kritických, rozhodujících) místech konstrukce. Dominantní oblastí využití tohoto typu snímačů je měření na konstrukcích, či konstrukčních částech zhotovených z homogenního materiálu, ve stavebnictví většinou ocelové části konstrukcí (tj. ocelové nosníky, sloupy, táhla apod.). Lze je samozřejmě využít i pro měření na konstrukcích z nehomogenního materiálu, ale vzhledem k malé měřicí základně, která se pohybuje od 0,6 do 150 mm, a rozdílných vlastností v jednotlivých místech materiálu mohou tyto snímače vykazovat nereálné hodnoty. Výběr délky tenzometru se tak odvíjí podle druhu materiálu (míře nehomogenity) a požadavků měření, zda je potřeba změřit střední hodnotu napětí nebo lokální špičky napětí. Např. pro beton, kdy je většinou potřeba měřit střední hodnotu napětí, se doporučuje délka měřicí základny nejméně pětinasobná k největšímu zrně materiálu. Zatímco pro měření špiček napětí je nutné použít tenzometr s velmi malou měřicí základnou, protože dlouhá by mohla způsobovat měření střední hodnoty napětí. Je nutné poznamenat, že oproti ostatním elektrickým snímačům nemá délka odporového tenzometru vliv na jeho citlivost.



Obrázek 2.32 – Odporový tenzometr použitý při laboratorní zatěžovací zkoušce betonových panelů

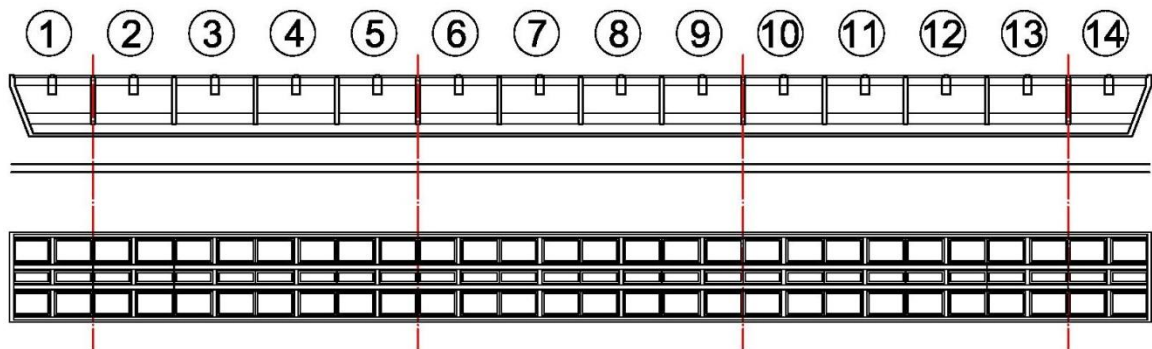
Obecně lze říci, že odporová tenzometrie je metoda, která dává při relativně malých nákladech velmi dobré výsledky a při dostatečné míře zkušeností ji lze použít pro měření nejrozmanitějších situací, vyskytujících se ve stavebním oboru. [5]

3 ZATĚŽOVACÍ ZKOUŠKA ZÁSOBNÍKU UHLÍ

Předmětem experimentu diplomové práce je provedení a vyhodnocení statické zatěžovací zkoušky sanovaného hlubinného zásobníku na uhlí v teplárně Vítkovice. Zkouška, kterou zajistil Ústav stavebního zkušebnictví, Fakulty stavební VUT v Brně, byla provedena na základě objednávky firmy STAVEXIS s.r.o. Cílem zkoušky je prokázat, zda konstrukce po provedených statických a sanačních opatřeních vyhoví z hlediska únosnosti a použitelnosti při působení maximálního zatížení, jenž se v budoucnu bude na konstrukci vyskytovat při běžném provozu.

3.1 Popis testované konstrukce

Jedná se o poměrně složitou železobetonovou, monolitickou konstrukci, která je rozdělena na 5 dilatačních částí s celkovým počtem 14 kójí. Vnitřní dilatační celky tvoří 4 spojené kóje a krajní jsou jako samostatné kóje, viz schématické zobrazení na *obr. 3.1*. Celá konstrukce je situována pod úrovní terénu, respektive nejvyšší bod konstrukce se nachází v úrovni terénu.

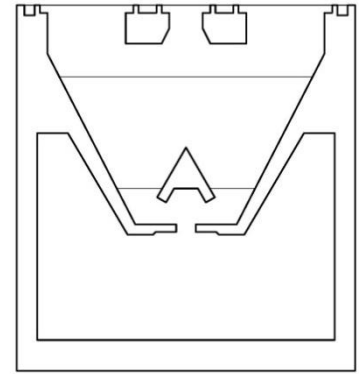


Obrázek 3.1 – Schématický podélný řez a půdorys hlubinného zásobníku s očíslováním kójí, červenou čarou jsou vymezeny dilatační celky

Hlubinný zásobník zajišťuje logistiku a uskladnění uhlí v teplárně. Horní část konstrukce je tvořena železobetonovým roštem složeným z dělicích stěn v příčném směru, příčníků a podélných spojitých nosníků, které nesou kolejnice, přičemž osová vzdálenost dělicích stěn a příčníků je 3 m. Tímto roštem propadá dopravené uhlí z nákladních vagónů do vnitřní části zásobníku, která má v příčném řezu (*obr. 3.2*) tvar trychtýře, a snadno se

tak následně uhlí dávkuje na dopravníkový pás umístěný ve spodní části objektu.

Jak již bylo zmíněno, na konstrukci byly provedeny sanační práce, za účelem statického zajištění nosné konstrukce pro její budoucí provozuschopnost. Tyto opatření spočívají v přidání podpůrných „prostě uložených“ ocelových nosníků, které podpírají stávající zkorodované podélné nosníky z železobetonu a také příčníky uprostřed jednotlivých kójí. Uložení bylo provedeno vysekáním otvorů do železobetonových zdí původní konstrukce, do kterých se následně zakotvily nové ocelové nosníky. Podpěření podélných žebber zajišťují 2 válcované profily HEB 240 z oceli S 235, jeden profil na jedno žebro. Dále každý příčný průvlak zajišťují 4 svařené (metodou stehování) profily IPE 300 pevnostní třídy S 355. Nově přidané ocelové prvky jsou chráněny obetonováním. [12]



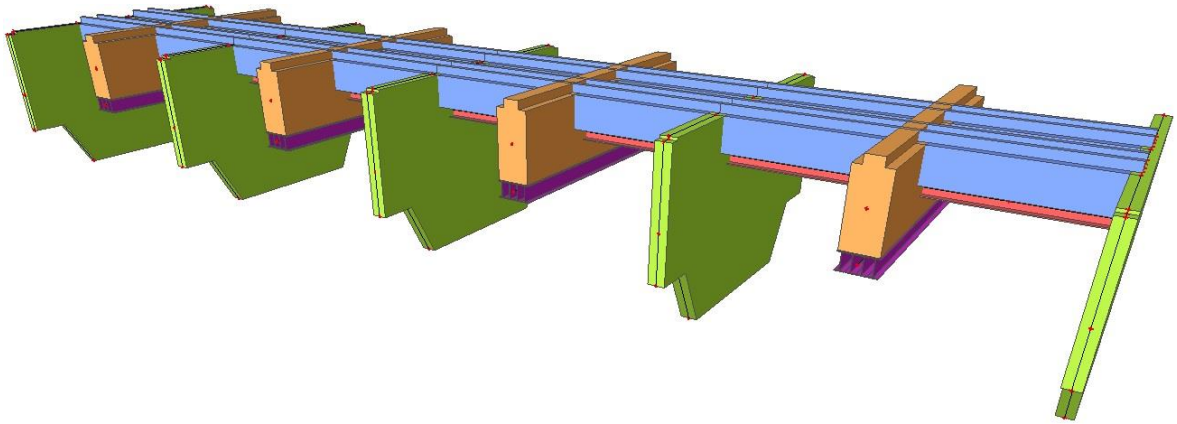
Obrázek 3.2 – Schématický příčný řez zásobníkem



Obrázek 3.3 – Hlubinný zásobník uhlí – horní pohled na nosný železobetonový rošt



Obrázek 3.4 – Pohled ze spodní strany na nosný rošt po sanaci – podélná žebra, příčný průvlak a dělicí stěna



Obrázek 3.5 – Axonometrický pohled na model dilatačního celku vytvořeného v programu SCIA – nosný železobetonový rošt tvořený z podélných nosníků (podepřených profily IPE 300), příčných průvlaků (podepřených profilem HEB 240) a dělicích stěn

3.2 Provedení zatěžovací zkoušky

Zatěžovací zkouška byla provedena v souladu s metodickými pokyny platné normy ČSN 73 2030 *Zatěžovací zkoušky stavebních konstrukcí, Společná ustanovení*. Realizace probíhala takovým zvoleným způsobem, aby byly v co největší možné míře eliminovány vlivy, které by mohly nepříznivě ovlivnit výsledek zkoušky. Přístroje, metody a postupy použité pro zaznamenání chování konstrukce při zatěžovací zkoušce byly zvoleny s ohledem na požadovanou přesnost a nezkreslené zobrazení měření.

3.2.1 Zkušební zatížení

Pro ověření spolehlivosti konstrukce bylo použito zatížení ve formě speciální tažné elektrolokomotivy, jenž v provozu zajišťuje posouvání nákladního vlaku nad zásobníkem. Lokomotiva se skládá ze dvou částí. První část tvoří samotný stroj posazený na dvou nápravách. Druhá část je vozík s bubnem, na kterém je navinutý kabel, jenž napájí mohutné elektromotory uvnitř lokomotivy. Jelikož napájecí kabel dosahuje určité délky, je používání elektrovozu omezeno jen na posouvání nákladních vozů nad zásobníkem. Parametry lokomotivy jsou uvedeny v *tabulce 3.1* s hodnotami převzatými z dochované výkresové dokumentace.

Tabulka 3.1 – Parametry elektrovozu

Celková hmotnost vozu	83 tun
Nápravový tlak	406,9 kN
Rozvor hlavních náprav	4600 mm
Celková hmotnost vozíku s kabelem	5,5 tun
Rozvor zadní nápravy a nápravy kabelového vozíku	2400 mm



Obrázek 3.6 – Elektrovůz použitý jako zkušební zatížení

V České republice běžně používaný nejtěžší nákladní vůz Falls 54 (obr. 3.7) pro dopravu uhlí má hmotnost cca 80 tun při plném naložení, přičemž tato hmotnost se rozkládá na téměř dvojnásobné osové vzdálenosti dvojnáprav než u elektrovozu, který má



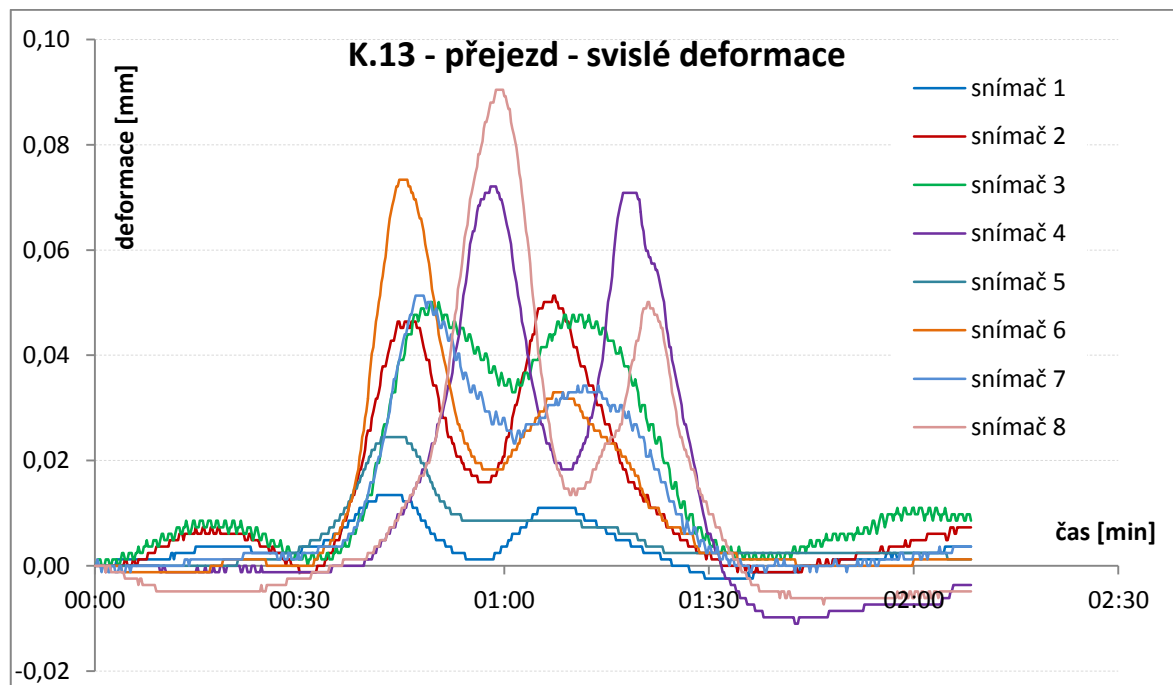
Obrázek 3.7 – Nákladní vůz Falls 54 [61]

jen jednoduché nápravy. Samotný nákladní vůz by teoreticky měl vyvozovat nižší účinky zatížení na konstrukci než tažná elektrolokomotiva. Další možností zatížení je situace, kdy konstrukci zásobníku zatěžuje celý vlak. Toto zatížení lze zjednodušeně uvažovat jako spojitě. Vezme-li se v potaz chování spojitěho nosníku o více polích ze

statického hlediska, je patrné, že v takovém případě působící zatížení v sousedních polích bude kladným způsobem ovlivňovat účinky zatížení v poli sledovaném. Dle této jednoduché úvahy je možné konstatovat, že zatížení samostatným elektrovozem, které bylo použité při zatěžovací zkoušce, bude při běžném provozu vyvolávat nejnepříznivější možné účinky na podélné spojité nosníky, jenž byly hlavním předmětem zájmu při prováděné zatěžovací zkoušce a lze ho tedy nazvat zatížením mezním.

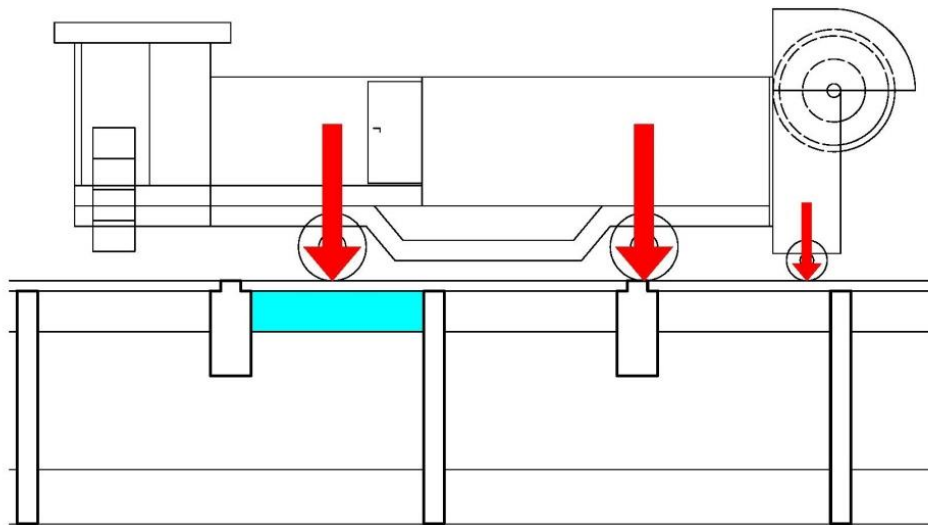
3.2.2 Zatěžovací stavy

Měření průhybů bylo popořadě provedeno ve vybraných kójích 13, 11, 5 a 1, přičemž v kójích 11 a 5 byl měřen i vodorovný posun ve svislých trhlinách na vnějším povrchu vnitřních šikmých stěn zásobníku. Před každým měřením v průběhu zatěžovací zkoušky ve vybraných kójích byl po osazení snímačů proveden zkušební přejezd elektrovozu. Při tomto přejezdu probíhalo měření, jehož účelem bylo zkontrolovat a případně upřesnit zvolené teoretické polohy zatížení od náprav v jednotlivých zatěžovacích stavech. Z provedených záznamů přejezdu bylo patrné, že největší deformace nastaly pod přední nápravou. Proto byla právě tato náprava určena jako maximální zatížení ve zvolených místech s teoreticky největšími průhyby na konstrukci. [12]

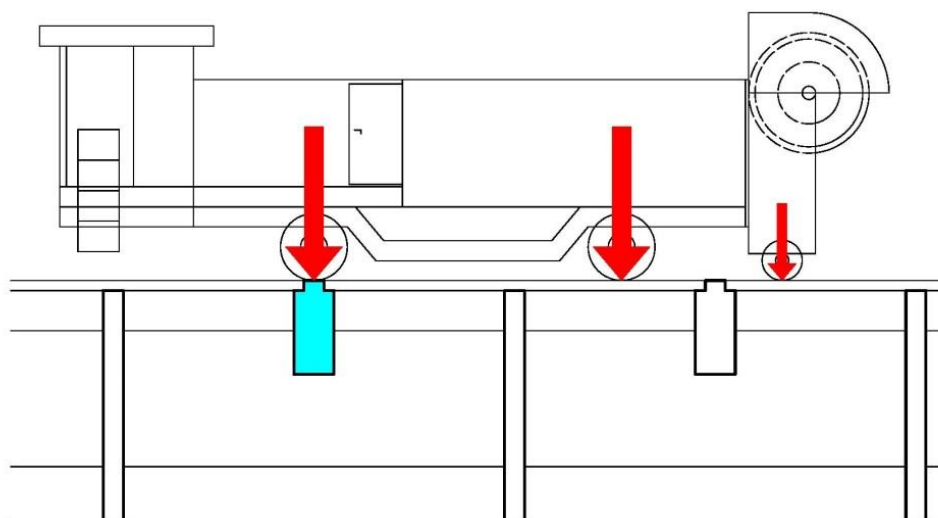


Obrázek 3.8 – Graf K.13 – přejezd elektrovozu zprava doleva – rozmístění snímačů ve variantě č. 1 – naměřené hodnoty z potenciometrických snímačů průhybů v závislosti na čase

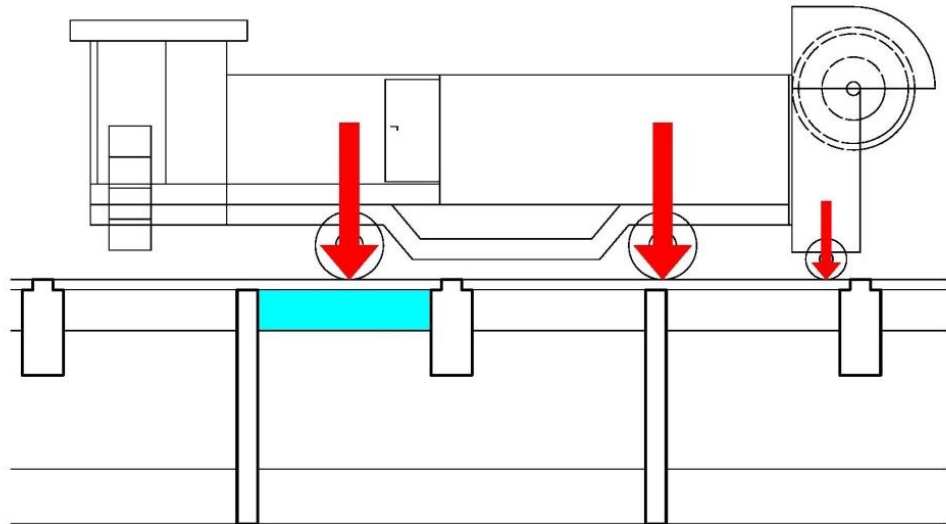
Pro zkoušku v jednotlivých kójkách byly stanoveny 3 základní polohy zkušebního zatížení na konstrukci. Zatěžovací stavy jsou značeny dle kóje, ve které probíhalo měření čili $K.X_ZS.Y$, kde X znamená číslo kóje a Y vyjadřuje polohu přední nápravy. Zatížení v poloze 1 vyvoluje extrémní deformaci v pravé části podélných spojitých nosníků, viz *obr. 3.9*. V případě, kdy se nachází zatížení v poloze 2, způsobuje extrémní deformaci středního příčného průvlastku, viz *obr. 3.10*. Poslední základní poloha č. 3 je zvolena tak, aby zatížení vyvolovalo extrémní deformaci v levé části podélných spojitých nosníků, viz *obr. 3.11*.



Obrázek 3.9 – Zatěžovací stav $K.X_ZS.01$ (extrémní deformace v pravé - vyšrafované části podélného spojitého nosníku)



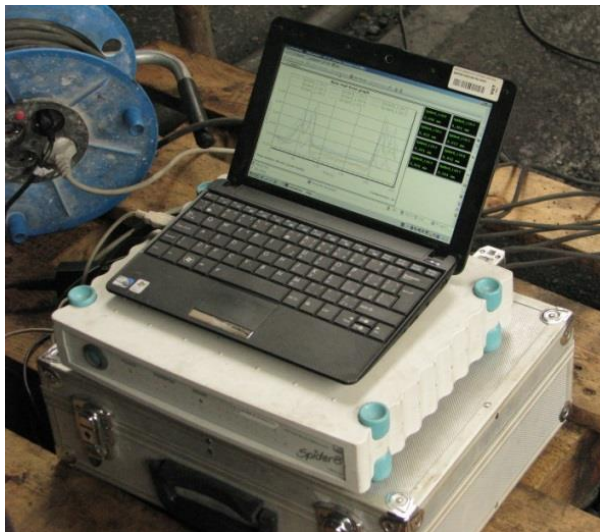
Obrázek 3.10 – Zatěžovací stav $K.X_ZS.02$ (extrémní deformace ve vyšrafované části - příčném průvlastku)



Obrázek 3.11 – Zatěžovací stav K.X_ZS.03 (extrémní deformace v levé - vyšrafované části podélného spojitého nosníku)

3.2.3 Měření deformací a posunů

Na konstrukci byly při zatěžovací zkoušce měřeny svislé deformace (průhyby) a také rozevírání trhlin na vnějším povrchu šikmých stěn zásobníku. Pro změření sledovaných veličin byla využita měřicí ústředna Spider 8 od firmy Hottinger Baldwin Messtechnik (HBM). Ústředna má celkem 8 měřících kanálů a proto je schopna zaznamenávat hodnoty



Obrázek 3.12 – Měřicí ústředna Spider 8 připojená k PC

až z osmi snímačů najednou. Vzorkovací frekvence byla při měření nastavena na 5 Hz, což znamená, že hodnoty sledovaných deformací byly zaznamenávány 5x za sekundu. Jednotlivé snímače deformací byly kabeláží svedeny do měřicí ústředny. Ta byla přes paralelní rozhraní zapojena k PC, do kterého se exportovaly naměřená data ve formátu určeném pro MS Excel. Před každým měřením se provedla kalibrace měřicí aparatury kvůli omezení vzniku možných chyb.

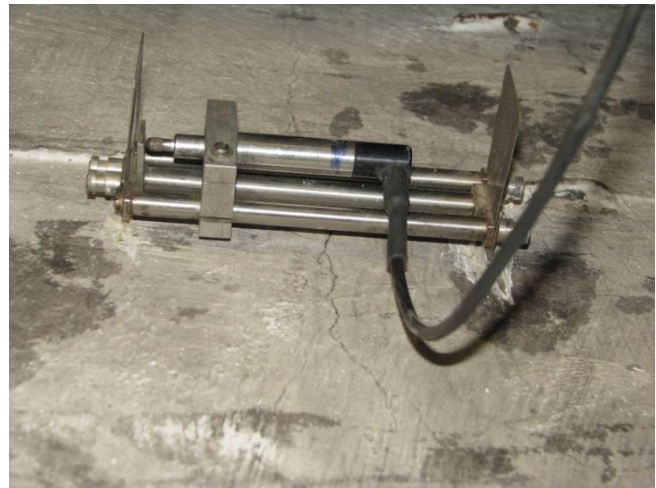
Pro měření průhybů byly použity potenciometrické snímače dráhy MS.04. Instalace přístrojů na měření průhybu probíhala následovně. Na zatěžovaných částech podélných spojitých nosníku byly ze spodní strany osazeny terčíky, které se přilepily pomocí

dvousložkového lepidla HBM X60. Pro lepší přilnavost musí být lepidlo nanášeno na vysušený povrch tělesa, a proto se před samotným lepením inkriminované místo nejprve vysušilo horkovzdušnou pistolí. Z přilepených terčů, které měly formu kovového úhelníku, byl sveden invarový drát napínaný přidělaným závažím na jeho konci. Tyto dráty byly poté uchyceny k potenciometrickým snímačům a zajišťovaly tak přenos svislé deformace. Potenciometry byly postaveny pomocí malých nerezových trojnožek na dně sledované konstrukce, viz *obr. 3.13*.

Pro sledování vodorovných posunů ve svislých trhlinách na vnějším povrchu šikmých stěn zásobníku byl použit indukčnostní snímač posunutí, osazený do Hollanova můstku s délkou měřicí základny přibližně 120 mm, který se taktéž lepil dvousložkovým lepidlem na konstrukci ve spodní, nesanované části zásobníku, viz *obr. 3.14*.



Obrázek 3.13 – Potenciometrické snímače měřící svislé posuny



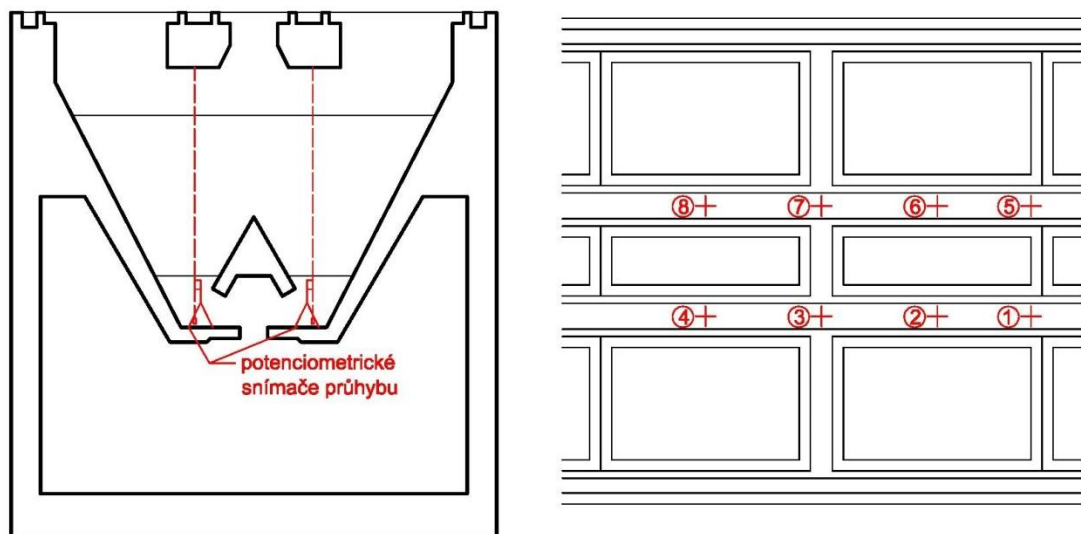
Obrázek 3.14 – Hollanův můstek s indukčnostním snímačem měřící posun ve svislé trhlině

Měření při zatěžovací zkoušce bylo provedeno ve dvou variantách, které zohledňují vzniklé trhliny na povrchu šikmých stěn zásobníku uhlí. Trhliny byly viditelné jen ze spodní, nesanované strany šikmých stěn zásobníku a vyskytovaly se pouze v některých částech konstrukce.

Varianta č. 1 byla použita pro měření deformací při zatěžovací zkoušce v kójiích 1 a 13. V této variantě se sledovaly pouze svislé deformace (průhyby), jelikož se v místech

daných kójí vyskytovaly ze spodní strany šikmých stěn zásobníku jen nepatrné povrchové trhlinky. Celkem bylo v této variantě použito pro měření průhybů 8 potenciometrických snímačů a jejich umístění bylo zvoleno dle předpokládané odezvy konstrukce na působení zkušebního zatížení ze statického hlediska tak, aby byl změřen největší průhyb konstrukce při působení zkušebního zatížení. Nosná podélná žebra lze uvažovat jako spojitý nosník, u kterých dělicí stěny a příčné průvlaky plní funkci pružných podpor s různou tuhostí uložení. V závislosti na této úvaze byly jednotlivé snímače průhybu rozmístěny na obou podélných žebrech následovně, viz *obr. 3.15*:

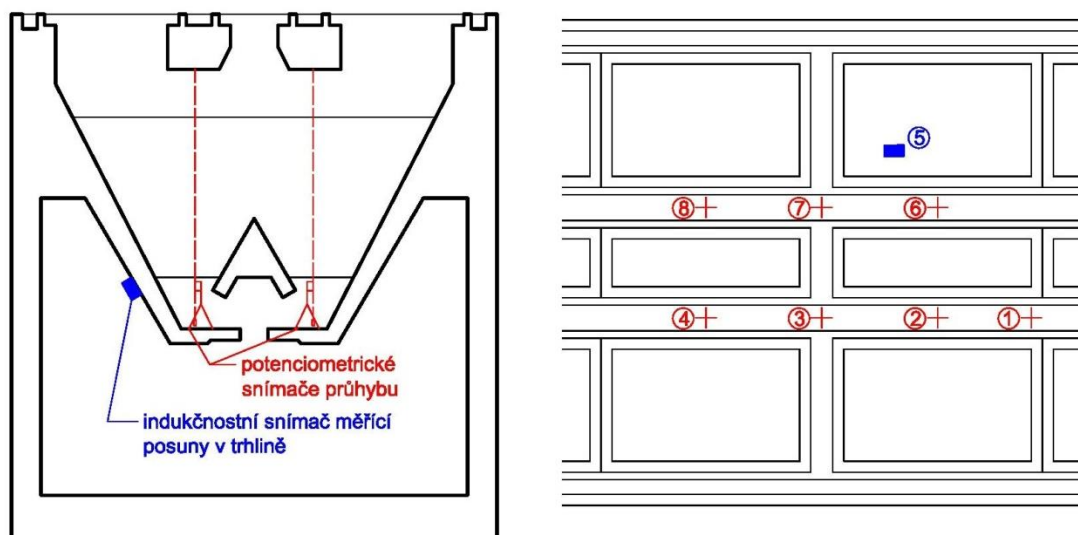
- 2 snímače v polovině rozpětí levé části podélného spojitého nosníku mezi dělicími stěnami,
- 2 snímače v místě příčného průvlaku,
- 2 snímače v polovině rozpětí pravé části podélného spojitého nosníku mezi dělicími stěnami,
- 2 snímače v místě podepření dělicí stěnou.



Obrázek 3.15 – Schématické zobrazení příčného řezu a půdorysu s rozmístěním snímačů svislých posunů (potenciometry) na předmětné konstrukci – varianta č. 1

Varianta č. 2 zahrnuje kromě měření svislých deformací také měření posunů ve svislých trhlinách na vnějším povrchu šikmých stěn zásobníku. Tato varianta měření byla aplikována v kójích 11 a 5. K měření průhybů se použilo 7 potenciometrů, jejichž rozmístění odpovídalo rozmístění ve variantě č. 1 až na výjimku v místě podepření dělicí stěnou, kde byl aplikován pouze jeden snímač na pravé podélné žebro. Místo jednoho

potenciometru byl volný slot na měřící ústředně Spider 8 využitý pro zapojení indukčnostního snímače dráhy TT1, osazeného do Hollanova můstku za účelem monitoringu rozevírání (zavírání) největší trhliny, vyskytující se na povrchu konstrukce v zatěžované oblasti. Umístění snímačů v druhé variantě je znázorněno na *obr. 3.16*.



Obrázek 3.16 – Schématické zobrazení příčného řezu a půdorysu s rozmístěním snímačů pro měření svislých posunů (potenciometry) a monitoring pohybů v trhlíně (indukčnostní snímač) na předmětné konstrukci – varianta č. 2

3.3 Vyhodnocení zatěžovací zkoušky

Z hlediska vyhodnocení zatěžovacích zkoušek dle platného normativního předpisu ČSN 73 2030 čl. 3.2.1 se jedná o zatěžovací zkoušku prováděnou bez dosažení meze únosnosti [7].

V rámci provedené zatěžovací zkoušky dochází k modifikaci zatěžovacího postupu, jenž je uveden ve výše zmíněné normě. Úprava zatěžovacího postupu spočívá v následujícím výčtu provedených změn oproti postupu doporučenému:

- zkoušená konstrukce nebyla zatěžována hodnotou stálého zatížení G_s ,
- konstrukce nebyla zatěžována provozním nahodilým zatížením V_s ,
- konstrukce byla zatěžována pouze tažným elektrovozem, což lze považovat za zatížení extrémní nahodilé - V_d . [12]

Testovaná konstrukce zatěžovací zkouškou bez dosažení meze únosnosti je spolehlivá

z hlediska mezního stavu únosnosti, jestliže splňuje toto kritérium:

- při zatížení hodnotou odpovídající $G_s + V_d$ a následném odtížení na hodnotu odpovídající G_s musí být poměr mezi trvalou a celkovou deformací menší než součinitel λ_I .

Součinitel λ_I se stanoví podle vzorce (3.1) pro konstrukce ze železového betonu.

$$\lambda_I = 0,3 - 0,1 \cdot [V_d \div (V_d + G_s)] \quad (3.1)$$

V tomto případě, kdy zkoušená konstrukce nebyla zatěžována stálým zatížením G_s , je v souladu s platnou normou součinitel λ_I roven nejnižší možné hodnotě 0,2.

Z hlediska mezního stavu použitelnosti je konstrukce spolehlivá, pokud splňuje následující požadavky:

- experimentální hodnoty deformací od zkušebního zatížení, které odpovídá provoznímu nahodilému zatížení, se liší od hodnot stanovených teoretickým výpočtem pro stejné zatížení maximálně o $\pm\mu$ násobek,
- celková maximální deformace sledované části konstrukce zjištěna experimentálně je menší než mezní hodnota deformace stanovená dle norem pro navrhování konstrukcí nebo vycházející z podmínek užívání konstrukce.

Součinitel μ je dle platné ČSN 73 2030 (*příloha A pro betonové konstrukce*) roven hodnotě 0,4 pro konstrukce ze železového betonu.

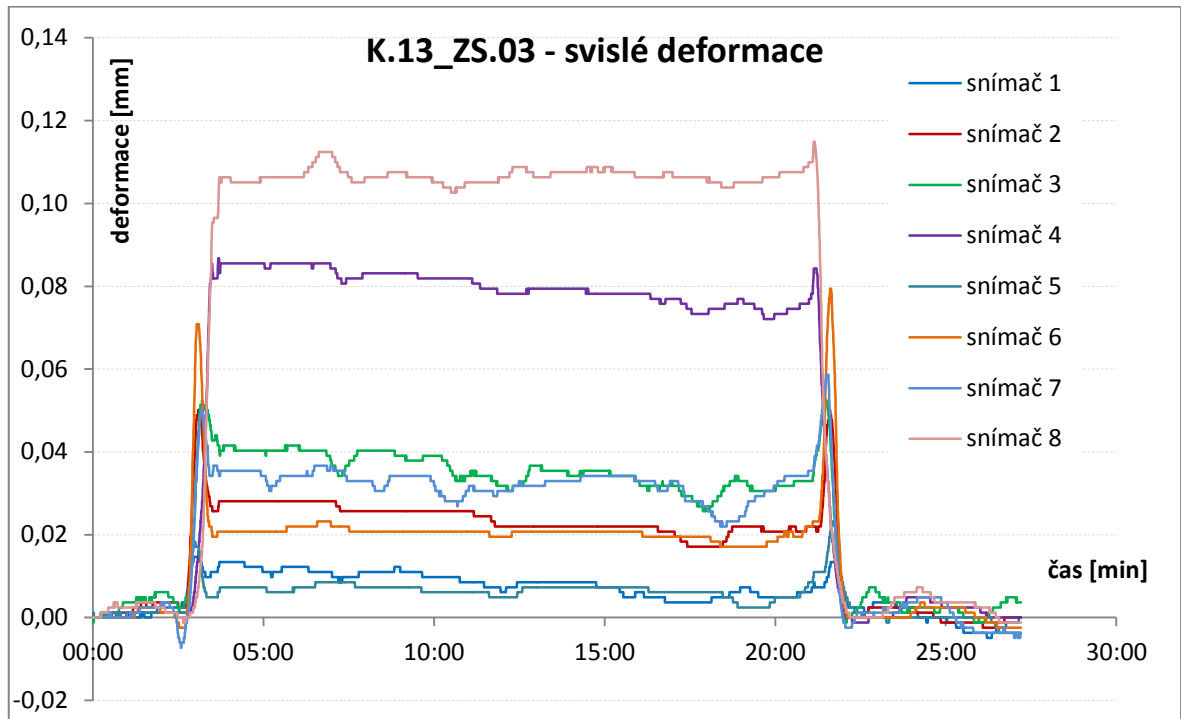
3.3.1 Svislé deformace

Posouzení z hlediska mezního stavu únosnosti

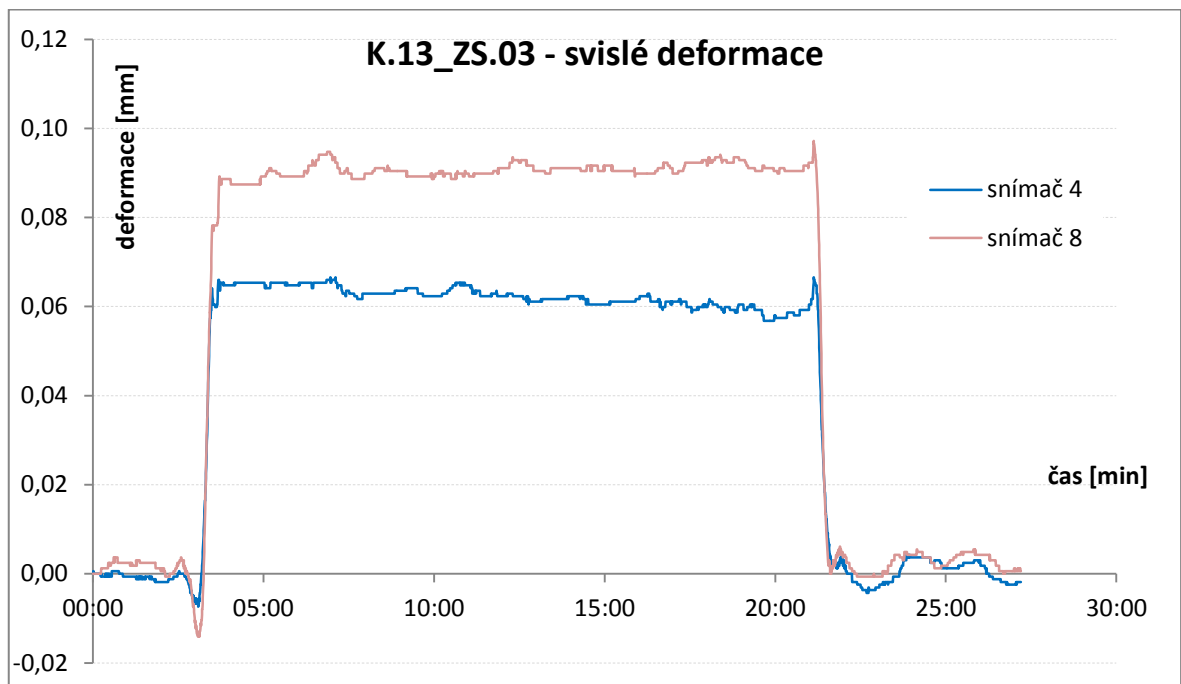
Vyhodnocení svislých deformací v místech poloviny rozpětí podélných nosníků bylo provedeno s vyloučením vlivu poklesu v teoretických podporách. Do výpočtu se to promítlo tak, že od hodnoty průhybu naměřeného potenciometrickým snímačem byl odečten aritmetický průměr naměřených hodnot vertikálních posunů sousedních podpor. Nebyla-li sousední teoretická podpora osazena snímačem, byl její posun uvažován jako nulový čili na stranu bezpečnou.

Zpracování a vyhodnocení naměřených hodnot bylo provedeno tabelárně a graficky pomocí výpočetního programu MS Excel. Jako reprezentativní vzorek pro ukázkou je

vybrán zatěžovací stav ZS.03 v kóji č. 13, kde byl naměřený největší průhyb při zatížení přední nápravou elektrovozu v místě poloviny rozpětí podélných nosníků v levé části kóje.



Obrázek 3.17 – Graf K.13_ZS.03 – rozmístění snímačů ve variantě č. 1 – naměřené hodnoty z potenciometrických snímačů průhybů v závislosti na čase



Obrázek 3.18 – Graf K.13_ZS.03 – rozmístění snímačů ve variantě č. 1 – vyhodnocení extrémní svislé deformace v levé části podélných spojitých nosníků (snímače 4 a 8) bez vlivu poklesu podpor

Tabulka 3.2 – Vyhodnocení zatěžovacího stavu K.13_ZS.03

snímač	svislá deformace					vyhodnocení		
	před zatížením	při zatížení V_d	po odtížení	trvalá deformace	celková deformace	poměr trvalé a celkové deformace	souč. λ_1	kritérium spolehlivosti
	$S_{0,1}$ [mm]	S_{max} [mm]	$S_{0,2}$ [mm]	$S_r=S_{0,2}-S_{0,1}$ [mm]	$S_{tot}=S_{max}$ [mm]	S_r/S_{tot} [-]	λ_1 [-]	$S_r/S_{tot}<\lambda_1$ [-]
4	0,000	0,060	0,004	0,004	0,060	0,067	0,200	VYHOVUJE
8	0,000	0,093	0,005	0,005	0,093	0,054	0,200	VYHOVUJE

Grafické zpracování všech provedených zatěžovacích stavů je uvedeno v příloze P1, která je nedílnou součástí této diplomové práce. Výsledky tabelárního zpracování jsou uvedeny v *tabulce 3.3*.

Tabulka 3.3 – Souhrn vyhodnocení z hlediska mezního stavu únosnosti všech provedených zatěžovacích stavů

popis měřeného místa			svislá deformace					vyhodnocení		
			před zatížením	při zatížení V_d	po odtížení	trvalá deformace	celková deformace	poměr trvalé a celkové deformace	souč. λ_1	kritérium spolehlivosti
kóje	zatěž. stav	snímač	$S_{0,1}$ [mm]	S_{max} [mm]	$S_{0,2}$ [mm]	$S_r=S_{0,2}-S_{0,1}$ [mm]	$S_{tot}=S_{max}$ [mm]	S_r/S_{tot} [-]	λ_1 [-]	$S_r/S_{tot}<\lambda_1$ [-]
K.01	ZS.01	2	0,000	0,041	0,007	0,007	0,041	0,171	0,200	VYHOVUJE
		6	0,000	0,050	0,004	0,004	0,050	0,080	0,200	VYHOVUJE
	ZS.02	3	0,000	0,038	0,000	0,000	0,038	0,000	0,200	VYHOVUJE
		7	0,000	0,066	0,000	0,000	0,066	0,000	0,200	VYHOVUJE
	ZS.03	4	0,000	0,027	0,000	0,000	0,027	0,000	0,200	VYHOVUJE
		8	0,000	0,047	0,000	0,000	0,047	0,000	0,200	VYHOVUJE
K.05	ZS.01	2	0,000	0,032	0,004	0,004	0,032	0,125	0,200	VYHOVUJE
		6	0,000	0,076	0,003	0,003	0,076	0,039	0,200	VYHOVUJE
	ZS.03	4	0,000	0,057	0,003	0,003	0,057	0,053	0,200	VYHOVUJE
		8	0,000	0,070	0,004	0,004	0,070	0,057	0,200	VYHOVUJE
K.11	ZS.01	2	0,000	0,029	0,005	0,005	0,029	0,172	0,200	VYHOVUJE
		6	0,000	0,038	0,004	0,004	0,038	0,105	0,200	VYHOVUJE
	ZS.02	3	0,000	0,053	0,000	0,000	0,053	0,000	0,200	VYHOVUJE
		7	0,000	0,056	0,000	0,000	0,056	0,000	0,200	VYHOVUJE
	ZS.03	4	0,000	0,035	0,005	0,005	0,035	0,143	0,200	VYHOVUJE
		8	0,000	0,064	0,010	0,010	0,064	0,156	0,200	VYHOVUJE
K.13	ZS.01	2	0,000	0,024	0,003	0,003	0,024	0,125	0,200	VYHOVUJE
		6	0,000	0,047	0,005	0,005	0,047	0,106	0,200	VYHOVUJE
	ZS.03	4	0,000	0,060	0,004	0,004	0,060	0,067	0,200	VYHOVUJE
		8	0,000	0,093	0,005	0,005	0,093	0,054	0,200	VYHOVUJE

Posouzení z hlediska mezního stavu použitelnosti

První kritérium pro posouzení spolehlivosti konstrukce z hlediska mezního stavu použitelnosti bylo provedeno porovnáním hodnot maximálních deformací naměřených v jednotlivých zatěžovacích stavech s hodnotami stanovenými teoretickým výpočtem pro tytéž zatěžovací stavy, viz kapitola 4. Vyhodnocení je uvedeno v následující tabulce.

Tabulka 3.4 – Souhrn vyhodnocení zatěžovacích stavů, jež byly simulovány na teoretickém modelu konstrukce, z hlediska mezního stavu použitelnosti

popis měřeného místa		průhyb		vyhodnocení			
		teoretický	experimentální	souč.	rozdíl teor. a exp. hodnot	μ -násobek exp. hodnoty	kritérium spolehlivosti
č. kóje	zatěž. stav	S_{teor}	S_{exp}	μ	$S_{teor}-S_{exp}$	μS_{exp}	$S_{teor} - S_{exp} < \pm \mu S_{exp}$
		[mm]	[mm]	[-]	[mm]	[mm]	[-]
K.05	ZS.01	0,151	0,102	0,4	0,049	0,041	NEVYHOVUJE
	ZS.03	0,111	0,083	0,4	0,028	0,033	VYHOVUJE
K.11	ZS.01	0,110	0,088	0,4	0,022	0,035	VYHOVUJE
	ZS.02	0,076	0,057	0,4	0,019	0,023	VYHOVUJE
	ZS.03	0,114	0,084	0,4	0,030	0,034	VYHOVUJE
K.13	ZS.01	0,151	0,074	0,4	0,077	0,030	NEVYHOVUJE
	ZS.03	0,111	0,110	0,4	0,001	0,044	VYHOVUJE

Pro prokázání spolehlivosti konstrukce z hlediska mezního stavu použitelnost musí být splněno i druhé kritérium, jež porovnává maximální naměřený průhyb s mezním průhybem dle příslušné normy pro navrhování. Celkový limitní průhyb se dle EC 2 [11] uvažuje podle vzorce (3.2) a průhyb od ostatních zatížení na zabudovaném prvku se uvažuje podle (3.3)

$$S_{lim,1} = \frac{L}{250} = \frac{3000}{250} = 12mm, \quad (3.2)$$

$$S_{lim,2} = \frac{L}{500} = \frac{3000}{500} = 6mm, \quad (3.3)$$

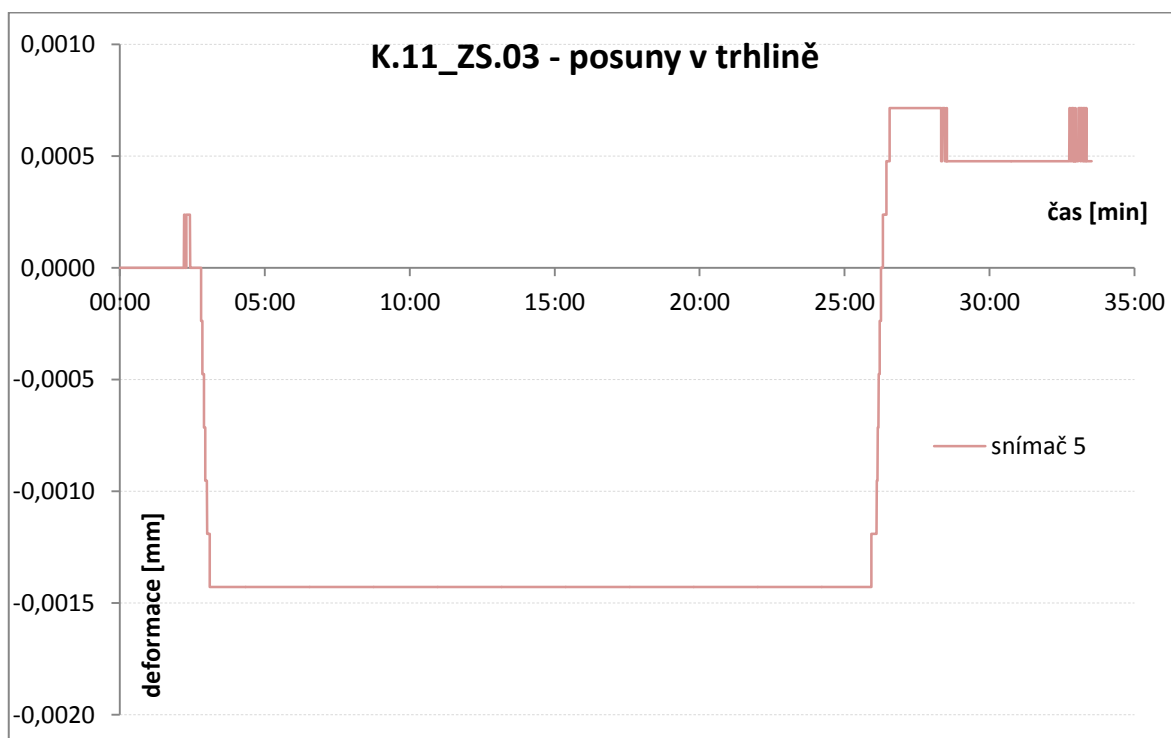
kde L je délka nosníku.

3.3.2 Posuny v trhlinách

Rozevírání (zavírání) svislých trhlin na vnějším povrchu šikmých stěn zásobníku se provádělo při měření v kójiích 5 a 11. Jedná se tedy o následující zatěžovací stavy:

- K.05_ZS.01 – extrémní namáhání pravé části podélných nosníků
- K.05_ZS.03 – extrémní namáhání levé části podélných nosníků
- K.11_ZS.01 – extrémní namáhání pravé části podélných nosníků
- K.11_ZS.02 – extrémní namáhání příčných průvlaků
- K.11_ZS.03 – extrémní namáhání levé části podélných nosníků

Naměřené hodnoty posunu byly stejně jako u svislých deformací zpracovány tabelárně a graficky pomocí výpočetního programu MS Excel. Ukázkově byl vybrán grafický výstup z měření zatěžovacího stavu ZS.03 v kóji č. 11, kdy indukčnostní snímač osazený v Hollanově můstku zaznamenal největší rozevření sledované trhliny.



Obrázek 3.19 – Graf K.11_ZS.03 – rozmístění snímačů ve variantě č. 2 – naměřené hodnoty posunu v závislosti na čase ve svislé trhlině

Grafické zpracování posunů v trhlinách ostatních výše zmíněných zatěžovacích stavů je uvedeno v příloze P2, která je nedílnou součástí této diplomové práce. Naměřené hodnoty posunů v trhlinách všech zatěžovacích stavů jsou uvedeny v souhrnné tabulce 3.5.

Tabulka 3.5 – Maximální hodnoty posunů ve svislých trhlinách na vnějším povrchu šikmých stěn zásobníku naměřených v jednotlivých zatěžovacích stavech

č. kóje	zatěžovací stav	max. hodnota rozevírání v trhlíně	max. hodnota zavírání v trhlíně
		[mm]	[mm]
K.05	ZS.01	0,0014	0,0002
	ZS.03	0,0007	0,0007
K.11	ZS.01	0,0009	0,0012
	ZS.02	0,0012	0,0009
	ZS.03	0,0015	0,0007

Je nutné poznamenat, že naměřené hodnoty posunů v trhlinách se pohybují na mezi citlivosti snímání použitého měřicího přístroje.

4 STATICKÝ VÝPOČET

Za účelem porovnání experimentálně zjištěných hodnot s hodnotami teoretickými byly v programu Scia Engineer provedeny statické výpočty na idealizovaném modelu dilatačního celku konstrukce zásobníku uhlí. Model použitý pro porovnání vychází z materiálů sloužících pro statický návrh provedených sanačních opatření na předmětné konstrukci. Materiály byly poskytnuty ing. Davidem Mikoláškem, jenž je autorem statické analýzy pojezdu vlaku po konstrukci železobetonového zásobníku, viz [13].

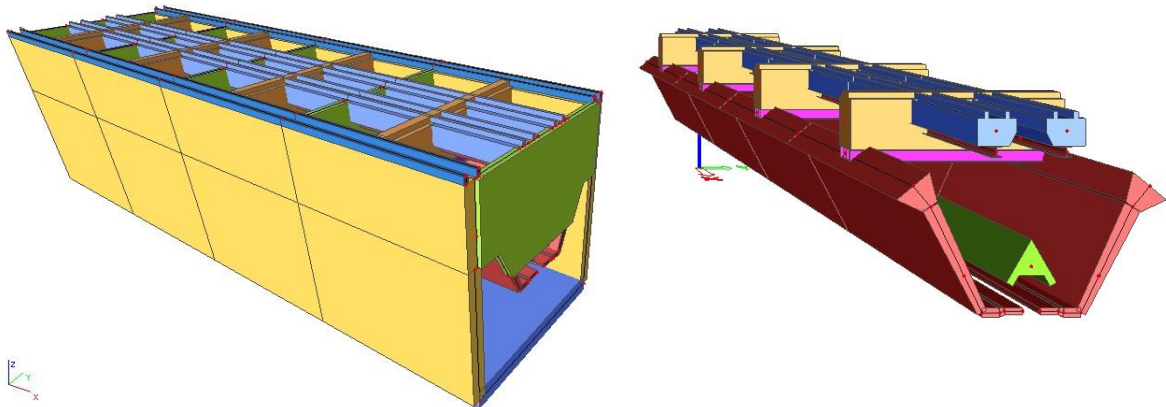
4.1 Vlastnosti modelu

Před opravou stávajícího železobetonového roštu se konstrukce nacházela ve velmi špatném stavu. Vlivem degradace betonu a rozvojem trhlin od opakovaného namáhání konstrukce došlo k obnažení a porušení části smykové výztuže v nosnících kolejového roštu a drobnou korozi vykazovala i podélná výztuž. Na konstrukci nebyl proveden podrobný diagnostický průzkum, který by určil způsob a množství vyztužení a také dle poskytnutých informací není dochována výkresová dokumentace skutečného provedení výztuže. Z těchto důvodů byl v modelu pro železobetonovou část konstrukce uvažován lineárně pružný materiál. Tento předpoklad je podložen i reálným chováním konstrukce při zatěžovací zkoušce, jelikož se po celou dobu zkoušení odezva pohybovala v mezích pružné oblasti, což dokazují naměřené hodnoty průhybů a skutečnost, že nebyl zaznamenán téměř žádný pohyb v trhlinách ani vznik trhlin nových.

Předpoklady modelu jsou následující:

- model je ze skořepinových a prutových konečných prvků,
- výpočty byly provedeny s uvážením geometrické a konstrukční nelinearity
- fyzikální nelinearita není uvažována,
- model je počítán na tuhém podloží,
- vzájemný kontakt stávajícího železobetonového roštu a nového ocelového roštu zajišťují tuhé tlačené prvky po cca 200 až 400 mm, na jejichž koncích je prostorový kloub s rotační tuhostí a uvážením tření ve dvou na sebe kolmých směrech (prokluz ve směru y a z),

- v modelu není počítáno s obetonováním ocelovým nosníků.
- styčníky železobetonového roštu a styčníky podpůrné ocelové konstrukce jsou uvažovány jako polotuhé,
- výpočet byl proveden metodou Newton – Raphson.



Obrázek 4.1 – Axonometrický pohled na model dilatační části zásobníku uhlí

4.2 Materiálové a průřezové charakteristiky

Materiálové charakteristiky byly zjištěny měřením na konstrukci před navržením sanačních opatření. V konstrukci se vyskytuje beton C 10/13,5 s modulem pružnosti o hodnotě $E=25$ GPa a Poissonovým součinitelem příčné roztažnosti $\mu=0,2$. Podpůrné nosníky HEB 240 pod podélnými žebry jsou z oceli třídy S 235 ($E=210$ GPa, $\mu=0,3$) a svařené nosníky pod příčnými průvlaky jsou z materiálu S 355 o stejných pružnostních charakteristikách.

Průřezové charakteristiky jednotlivých prutových prvků použitých v modelu zásobníku uhlí jsou uvedeny v příloze P3.

4.3 Zatížení

Modelové zatížení bylo zvolené o stejné intenzitě s totožným umístěním, jako typ zatížení použitý při realizaci zatěžovací zkoušky, viz kapitola 3.2.2. Dále je do výpočtu také zahrnuta i vlastní tíha konstrukce. Všechny zatížení jsou v kombinacích uvažovány v

charakteristických hodnotách pro větší přiblížení reálnému stavu. Pro porovnání teoretických hodnot s experimentálními byly na modelu spočítány deformační účinky od zatěžovacích stavů v kójiích 5, 11 a 13.

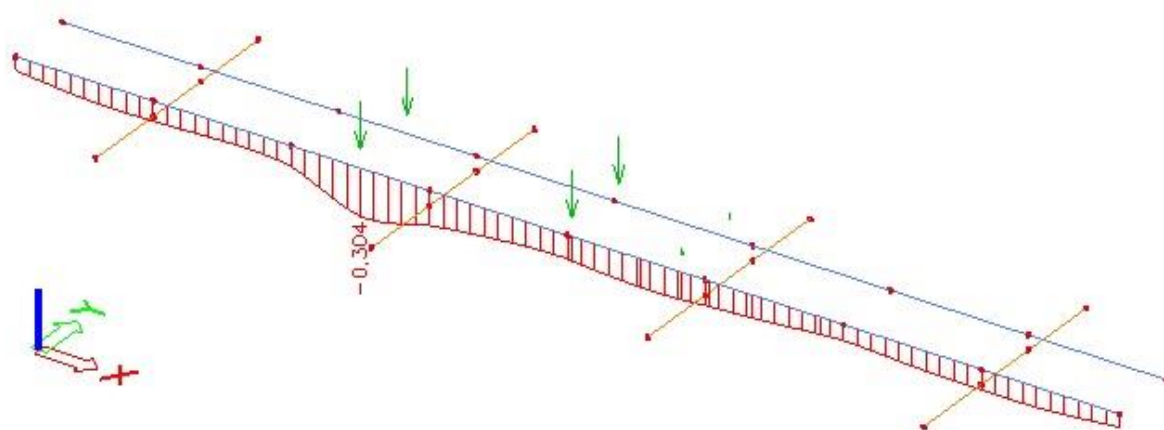
4.4 Výsledky

Svislé deformace stanovené teoretickým způsobem jsou uvedeny v *tab. 4.1*. Výsledné hodnoty teoretických průhybů byly spočítány odečtením svislého posunu misky, na jejímž dně byly umístěny stojany s osazenými snímači, od posunu podélného nosníku ve sledovaném místě. Takto stanovené hodnoty svislých deformací by měly odpovídat hodnotám získaným měřením při zatěžovací zkoušce.

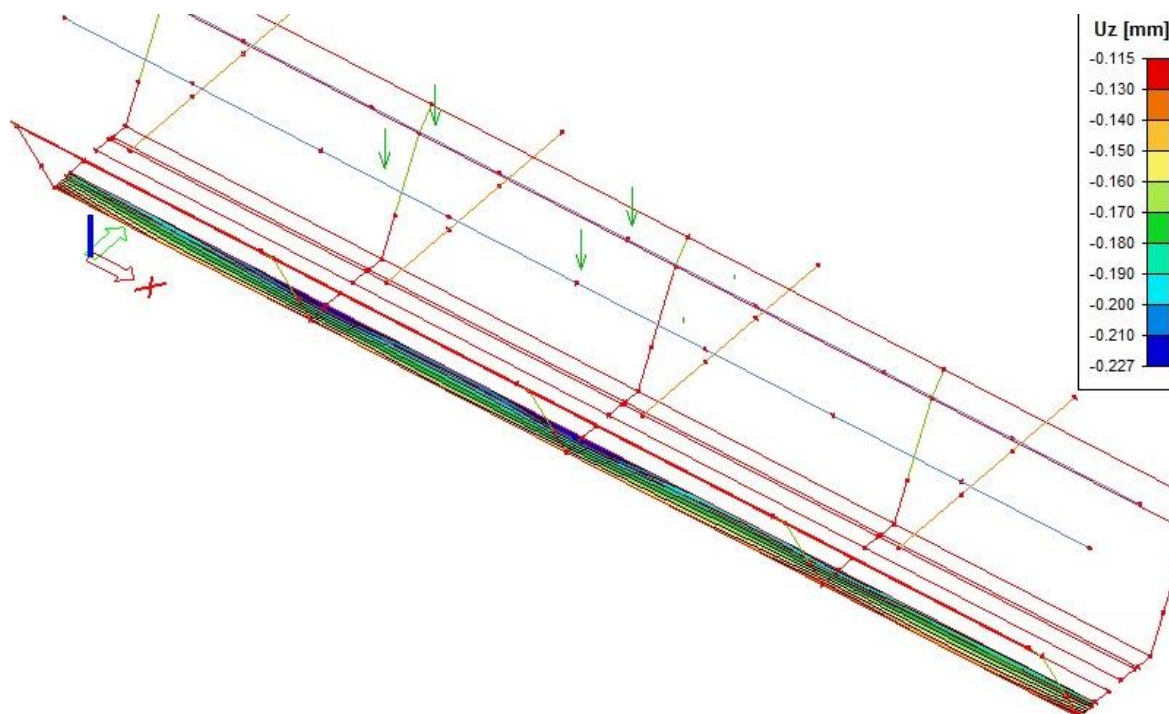
Tabulka 4.1 – Stanovení teoretických průhybů v jednotlivých zatěžovacích stavech

Popis měřeného místa		teoretický průhyb		
č. kóje	zatěžovací stav	podélné žebro	miska	výsledný
		S_z	S_m	$S_{teor}=S_z-S_m$
		[mm]	[mm]	[mm]
K.05	ZS.01	0,341	0,190	0,151
	ZS.03	0,301	0,190	0,111
K.11	ZS.01	0,295	0,185	0,110
	ZS.02	0,261	0,185	0,076
	ZS.03	0,304	0,190	0,114
K.13	ZS.01	0,341	0,190	0,151
	ZS.03	0,301	0,190	0,111

Jako příklad jsou zobrazeny svislé deformace u_z jak podélného žebra (*obr. 4.2*), tak misky (*obr. 4.3*) pro zatěžovací stav K11_ZS.03. Výstupy deformací z ostatních zatěžovacích stavů jsou uvedeny v příloze P3. Pro úplnost jsou v příloze P3 uvedeny také průběhy ohybových momentů od všech zatěžovacích stavů na podélném žebře i příčných průvlacích.



Obrázek 4.2 – Průběh svislých deformací na podélném nosníku – K.11_ZS.03



Obrázek 4.3 – Průběh svislých deformací na dně misky – K.11_ZS.03

ZÁVĚR

Srovnáním experimentálních hodnot získaných při zatěžovací zkoušce s hodnotami stanovenými teoretickým výpočtem se přímo naráží na problematiku modelování složitých konstrukčních systémů. Navrhnout model konstrukce tak, aby přesně vystihoval chování reálné konstrukce, je velmi obtížné a zejména pak v případech, kdy se jedná o letitý objekt, na jehož stavu se již podepsala historie užívání a klimatické podmínky. Není-li možné spolehlivě určit teoretické předpoklady statického působení konstrukce, využije se pro ověření reálného chování objektu zatěžovací zkouška, což bylo provedeno i v případě předmětné konstrukce této práce.

Zatěžovací zkouška byla zaměřena na ověření chování podélných spojitých nosníků, jež jsou „nejsubtilnější“ z dílčích konstrukčních prvků objektu, vystavených přímému extrémnímu zatížení. Na základě naměřených hodnot deformací způsobených mezním nahodilým zatížením na vybraných částech nosné konstrukce lze konstatovat, že se jedná o tuhou železobetonovou konstrukci, která je schopna velmi dobře odolávat deformačním účinkům od zatížení. Hodnoty průhybů podélných spojitých nosníků se pohybují v řádu setin milimetru, přičemž maximální naměřená hodnota nepřesahuje 0,12 mm. Z hlediska vzniku trvalých deformací je konstrukce ve výborném stavu, jelikož naměřené hodnoty plastické části deformace při dané intenzitě zatížení dosahovaly minimálních, až zanedbatelných hodnot v řádu tisícín milimetru.

Posouzením naměřených hodnot průhybů dle kritérií uvedených v platné ČSN 73 2030 z hlediska mezního stavu únosnosti konstrukce vyhovuje ve všech provedených zatěžovacích stavech, viz *tabulka 3.3*.

Posouzení spolehlivosti konstrukce z hlediska mezního stavu použitelnosti bylo provedeno pro dvě kritéria. První se zabývá porovnáním hodnot maximálních průhybů stanovených experimentálně s hodnotami, jež vykazoval model použitý pro simulaci chování konstrukce, viz *tabulka 3.4*. Z tabulky je patrné, že experimentální hodnoty deformací jsou v porovnání s deformacemi teoretickými vyhovující až na dva případy, kde jsou hodnoty stanovené výpočtem vyšší, než povoluje norma oproti hodnotám naměřeným.

Vcelku rozdílné hodnoty průhybů získané při zatěžovací zkoušce jsou pravděpodobně způsobeny skutečností, že v některých místech původní konstrukce došlo vlivem degradace betonu a rozvoje trhlin ke korozi a poškození výztuže, zatímco v jiných místech

konstrukce působí jako nepoškozený průřez s plnou plochou původní výztuže. Pro přesné zpracování statického modelu vystihující reálné chování konstrukčního systému, by musel být proveden podrobný průzkum objektu, který by poskytoval dostatečné informace o aktuálním rozmístění a stavu původního vyztužení.

Z pohledu druhého kritéria pro posouzení spolehlivosti z hlediska II. mezního stavu konstrukce musí splňovat požadavek, kdy extrémní naměřená hodnota průhybu musí být menší než mezní průhyb stanovený dle příslušné normy pro navrhování. Mezní průhyb je při vzdálenosti podpěr podélného nosníku 3m a přihlédnutí k přísnějšímu kritériu roven 6,0 mm. Tato hodnota několikanásobně převyšuje průhyby naměřené, jež se pohybují přibližně v rozmezí 0,1 až 0,2 mm i s uvažováním složky průhybu od vlastní tíhy konstrukce, která je dle teoretického modelu rovna maximálně 0,042 mm.

Měřením vodorovných posunů ve svislých trhlinách na vnějším povrchu šikmých stěn zásobníku byla zjištěna v průběhu zkoušky největší hodnota rozevření 0,0015 mm a uzavření 0,0012 mm, což jsou hodnoty, pohybující se na mezi citlivosti použitého snímače. Z hlediska ovlivnění bezpečnosti nebo statické funkce objektu je možné tyto hodnoty považovat za bezvýznamné. Plastická deformace ve formě trvalého posunu v trhlinách nebyla zaznamenána a rovněž nebyl v průběhu zkoušky zaznamenán vznik nových trhlin.

Na základě výše popsaných skutečností lze tedy prohlásit, že revitalizovaná konstrukce hlubinného zásobníku uhlí v teplárně Vítkovice je spolehlivá a může být nadále bezpečně využívána za účelem přepravování a skladování uhlí.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] JANÍČEK, Přemysl. *Technický experiment*. Brno: VUT v Brně, 1989. 80-244-0848-1.
- [2] SCHMID, Pavel. *Základy zkušebnictví*. Brno: VUT v Brně, fakulta stavební, 2004. 80-214-2584-9.
- [3] STANĚK, Vlastimil, HOSTINOVÁ, Gabriela a KOPÁČIK, Alojz. *Geodézia v stavební-ctve*. Bratislava: Jaga group, 2007. ISBN 978-80-8076-048-9.
- [4] HOBST, Leonard, a další, a další. *Diagnostika stavebních konstrukcí*. Brno: FAST VUT v Brně, 2005. str. 125.
- [5] SCHMID, Pavel. *Zkušebnictví a technologie - Modul BI02-M02 - Stavební zkušebnictví*. [1. vydání elektronických opor] Brno: FAST VUT v Brně, Rok vydání neuveden.
- [6] VLK, Miloš, a další, a další. *Experimentální mechanika*. Brno: FSI VUT v Brně, 2003.
- [7] ČSN 73 2030 *Zatěžovací zkoušky stavebních konstrukcí, Společná ustanovení*. Praha : Český normalizační institut, 1993.
- [8] ČSN 73 2030 *Zatěžovací zkoušky stavebních konstrukcí, Společná ustanovení*. Praha: Vydavatelství Úřadu pro normalizaci a měření, 1977.
- [9] ČSN 73 2044 *Dynamické zkoušky stavebních konstrukcí*. Praha: Český normalizační institut, 1983.
- [10] ČSN 73 6209 *Zatěžovací zkoušky mostů*. Praha: Český normalizační institut, 1996.
- [11] ČSN EN 1992-1-1 *Navrhování betonových konstrukcí - část 1-1 Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [12] ŽÍTT, Petr. *Závěrečná zpráva: Zatěžovací zkouška sanovaného hlubinného zásobníku v teplárně Vítkovice*. Brno: 2013. Ústav stavebního zkušebnictví FAST VUT v Brně.
- [13] MIKOLÁŠEK, David. *STATICKÝ VÝPOČET - Analýza pojezdu vlaku po konstrukci železobetonových zásobníků*. Ostrava 2013. Katedra stavební mechaniky, FAST VŠB - TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA.
- [14] CHYTIL, Jan. *Měření poměrného přetvoření na konstrukci*. Brno: 2012. 51 s., 24 s. příloh. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví, Vedoucí práce: Ing. Petr Daněk, Ph.D.

- [15] HVOZDENSKÝ, Petr. *Kvantifikace a zvyšování přesnosti měření průhybu mostů*. Brno: 2008. 72s. z toho přílohy 5s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Perníkář, CSc.
- [16] JURGA, Václav. *Analýza průhybu mostní konstrukce*. Praha: 2014. Diplomová práce. ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Katedra speciální geodézie. Vedoucí práce Ing. Rudolf Urban, Ph.D.
- [17] ŠVEC, Mojmír a VOREL, Vladimír. *Geodetické monitorování staveb a metody*. Praha: 2007, Stavební obzor, stránky 25-28. ISSN 1210-4027.
- [18] SCHMID, Pavel. Přednášky z předmětu BI52 Diagnostika stavebních konstrukcí - přednáška č. 10: Diagnostika vodorovných nosných konstrukcí - I. www.sz.k.fce.vutbr.cz. [Online] [Citace: 24. 12. 2014.]
<http://www.sz.k.fce.vutbr.cz/vyuka/BI52/>.
- [19] ČADA, Václav. Přednáškové texty z Geodézie. gis.zcu.cz. [Online] [Citace: 12. 12. 2014.] <http://gis.zcu.cz/studium/gen1/html/ch11.html>.
- [20] ŠTRONER, Martin. Přednášky z Geodézie 3 - přednáška č. 2: Nivelace, chyby a přesnost nivelačních prací, mezní odchylky. k154.fsv.cvut.cz. [Online] [Citace: 27. 11. 2014.]
http://k154.fsv.cvut.cz/~stroner/GD3/gd3_pred_2.pdf.
- [21] ŠTĚTINA, Josef, JAROŠ, Michal a RAMÍK, Pavel. Virtuální laboratoř - Měření. [Online] 2003. [Citace: 6. 1. 2015.]
<http://ottp.fme.vutbr.cz/skripta/vlab/mereni/Ka03-02.htm>.
- [22] PROCHÁZKA, Jaromír. Sylabus 11. - Přednášky z inženýrské geodézie (Měření posunů a přetvoření). k154.fsv.cvut.cz. [Online] prosinec 2014. [Citace: 8. 12. 2014.]
http://k154.fsv.cvut.cz/vyuka/geodezie_geoinformatika/inge/Sylabus_IG_11.pdf.
- [23] TALICH, Milan. Velmi přesné určování svislých průhybů mostních konstrukcí metodou radarové interferometrie. www.utia.cas.cz. [Online] září 2013. [Citace: 26. 12. 2012.] <http://library.utia.cas.cz/separaty/2014/ZOI/talich-0427817.pdf>.
- [24] PROKOPIČOVÁ, Jitka. Revoluční betonové stavby, které sbírají ceny. www.earch.cz. [Online] [Citace: 25. 12. 2014.]
<http://www.earch.cz/cs/stavitelstvi/revolucni-betonove-stavby-ktere-sbiraji-ceny>.

- [25] KOUTNÝ, Robert. Nový most v Karlových Varech zkoušely parní stroje. *www.cd.cz*. [Online] [Citace: 24. 12. 2014.]
http://www.cd.cz/old/TCD2005/5_42most.htm.
- [26] TALICH, Milan. Určování svislých průhybů mostních konstrukcí metodou pozemní radarové interferometrie. *www.kgk.cz*. [Online] [Citace: 5. 1. 2015.]
https://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=4&ved=0CC4QFjAD&url=http%3A%2F%2Fwww.kgk.cz%2FSouboryClanku%2F2013-06-09-setk2013-Urcovani_svislych_pruhybu_interferometrii.pptx&ei=-BysVOPyJszyUKzxg6AL&usg=AFQjCNE3BxARLclu0_juZiriHZYH54GdVQ&bv.
- [27] Přednášky z předmětu CI 57 Moderní stavební materiály - Přednáška: Stavebně technické průzkumy a diagnostika staveb. *www.sz.k.fce.vutbr.cz*. [Online] [Citace: 24. 12. 2014.]
<http://www.sz.k.fce.vutbr.cz/vyuka/CI57/STP,%20diagnostika%20staveb,%20zat%C4%9B%C5%BEovac%C3%AD%20zkou%C5%A1ky.pdf>.
- [28] Experimentální metody - přednáška 8: Snímače pro měření deformace. *www.kst.tul.cz*. [Online] [Citace: 7. 1. 2015.]
http://www.kst.tul.cz/podklady/experimentalmetody/prednasky/p8_snimace_deformace.pdf.
- [29] Sfalassa bridge. *www.highestbridges.com*. [Online] 28. 3. 2010. [Citace: 21. 12. 2014.] http://www.highestbridges.com/wiki/index.php?title=Sfalassa_Bridge.
- [30] Zatěžovací zkouška žebrové desky s rozptýlenou výztuží. *www.ecentrum.fsv.cvut.cz*. [Online] [Citace: 21. 12. 2014.]
<http://ecentrum.fsv.cvut.cz/cz/archiv/materialy/2009/05deska.html>.
- [31] Gangway Test Bags. *www.proofload.com*. [Online] [Citace: 24. 12. 2014.]
<http://www.proofload.com/English/products/gangway+testbags/>.
- [32] Ivančice - Letkovice zatěžovací zkouška ocelového mostu. *www.mostni-silnicni.cz*. [Online] [Citace: 24. 12. 2014.]
<http://www.mostni-silnicni.cz/cs/detail-reference/2007-ivancice-letkovice>.
- [33] Statická zatěžovací zkouška Nuselského mostu 66 tanky v roce 1970. *www.radio.cz*. [Online] [Citace: 24. 12. 2014.]
<http://www.radio.cz/cz/static/metro/historie>.
- [34] Nadměrné břemeno. *www.mostni-silnicni.cz*. [Online] [Citace: 24. 12. 2014.]
<http://www.mostni-silnicni.cz/cs/mereni-deformaci>.

- [35] Metrostav. Zátěžové zkoušky Trojského mostu. *www.milujuprahu.cz*. [Online] [Citace: 24. 12. 2014.]
<http://www.milujuprahu.cz/2014/08/zatezove-zkousky-trojskeho-mostu-co-se-vsechno-zkouselo/>.
- [36] Obrazem: Unikátní fotografie z historie stavby Nuselského mostu. *www.aktuálně.cz*. [Online] [Citace: 22. 12. 2014.]
<http://zpravy.aktualne.cz/domaci/obrazem-unikatni-fotografie-z-historie-stavby-nuse/r~i:gallery:29825/r~i:photo:532465/>.
- [37] Pile Load Test. *www.slp-pile.com*. [Online] [Citace: 22. 12. 2014.]
<http://slp-pile.com/wp-content/uploads/2012/01/pp11ton7.png>.
- [38] Dotvarování betonu. *www.ebeton.cz*. [Online] [Citace: 1. 1. 2015.]
<http://www.ebeton.cz/pojmy/dotvarovani-betonu>.
- [39] Posuvné měřítko. *cs.wikipedia.org*. [Online] [Citace: 5. 1. 2015.]
http://cs.wikipedia.org/wiki/Posuvn%C3%A9_m%C4%9B%C5%99%C3%ADtko.
- [40] Měřítka posuvná Extol Premium 0-200mm. *www.eva.cz*. [Online] [Citace: 5. 1. 2015.]
<https://www.eva.cz/zbozi/54118/meritko-posuvne-extol-premium-0-200mm/>.
- [41] Micrómetro Vernier Caliper Digital 150 Mm. *www.articulo.mercadolibre.com.mx*. [Online] [Citace: 5. 1. 2015.]
<http://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-470118252-micrometro-vernier-caliper-digital-150-mm-6-pulgadas-pie-rey- JM>.
- [42] Číselníkové úchylkoměry. *www.markagro.cz*. [Online] [Citace: 5. 1. 2015.]
<http://www.markagro.cz/ciselnikove-uchylkomery-512-540-560/>.
- [43] Nivelační přístroje a sady. *www.geoserver.cz*. [Online] [Citace: 9. 12. 2014.]
http://www.geoserver.cz/nivelacni-pristroje-akcni-sety-prislusenstvi-stativy-late/opticke-nivelacni-pristroje/nivelacni-pristroj_geofennel_fal20x_zaruka_3_roky-148.
- [44] Nivelační přístroj Zeiss NI 007. *www.geoteam.cz*. [Online] [Citace: 9. 12. 2014.]
<http://www.geoteam.cz/eshop/nivelacni-pristroj-zeiss-ni-007>.
- [45] Novou lávku pro cyklisty přes řeku Jihlavu zatížilo 21 tun. *www.idnes.cz*. [Online] [Citace: 9. 12. 2014.]
http://jihlava.idnes.cz/foto.aspx?r=jihlava-zpravy&c=A141030_153350_jihlava-zpravy_mkk&foto=MKK56eaa6_DSC0890.JPG.

- [46] Zatěžkávací zkoušky mostních objektů. *www.profigeo.info*. [Online] [Citace: 9. 12. 2014.] <http://www.profigeo.info/reference-ostatni>.
- [47] 1. mezinárodní veletrh geodzie, kartografie, navigace a geoinformatiky GEOS 2006. *www.stavebnictvi3000.cz*. [Online] [Citace: 10. 12. 2014.] <http://www.stavebnictvi3000.cz/clanky/veletrh-geos-2006/>.
- [48] Laserové skenování. *www.cept.cz*. [Online] [Citace: 3. 1. 2015.] <http://www.cept.cz/cinnosti/laserove-skenovani/>.
- [49] NIVCOMP - elektronická hadicová vodováha. *meridla.naturahradec.cz*. [Online] [Citace: 4. 1. 2015.] <http://meridla.naturahradec.cz/elektronicka-hadicova-vodovaha-nivcomp-379/>.
- [50] spider 8. *www.sensor-hbm.com*. [Online] 2009. [Citace: 7. 1. 2015.] <http://www.sensor-hbm.com/html/spider8.html>.
- [51] Potenciometrický snímač dráhy. *www.meatest.cz*. [Online] 2015. [Citace: 6. 1. 2015.] <http://www.meatest.cz/produkty-levny-snimac-drahy-potenciometricky-8712-8713-detail-52>.
- [52] rezistory. *sout.mev.sweb.cz*. [Online] 1. 9 2001. [Citace: 6. 1. 2015.] <http://sout.mev.sweb.cz/bzr.htm>.
- [53] potenciometr. *cs.wikipedia.org*. [Online] [Citace: 6. 1. 2015.] <http://cs.wikipedia.org/wiki/Potenciometr>.
- [54] Indukčnostní snímač dráhy. *www.esa-messtechnik.de*. [Online] [Citace: 23. 4. 2012.] <http://www.esa-messtechnik.de/displacement-transducers.html>.
- [55] kapacitní snímač dráhy. *www.uvbtechnik.cz*. [Online] [Citace: 6. 1. 2015.] <http://www.uvbtechnik.cz/snimac-posunuti>.
- [56] Experimentální ověření působení tunelových ostění. *www.santra.cz*. [Online] [Citace: 6. 1. 2015.] <http://www.santra.cz/sledovani-tunelovych-osteni/>.
- [57] tenzometry. *www.huddy.cz*. [Online] [Citace: 7. 1. 2015.] <http://www.huddy.cz/produkty/tenzometry-59>.
- [58] Měření smrštění geopolymerního betonu. *ecentrum.fsv.cvut.cz*. [Online] [Citace: 7. 1. 2015.] <http://ecentrum.fsv.cvut.cz/cz/archiv/materialy/2010/01SmrsteniGeopolymeru.html>
- [59] Optical strain gages. *www.hbm.com*. [Online] [Citace: 7. 1. 2015.] <http://www.hbm.com/en/menu/products/strain-gages-accessories/optical-strain-gages/k-ol/>.

- [60] Prezentace - Experimentální metody mechaniky těles. *slideplayer.cz*. [Online] [Citace: 7. 1. 2015.] <http://slideplayer.cz/slide/1891428/>.
- [61] Modernizace vozů Falls pro ČD. *www.parostron.net*. [Online] [Citace: 9. 12. 2014.] http://www.parostron.net/katalog/nv/clanky/Falls54/Falls54_2.jpg.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Velká písmena latinské abecedy

<i>BOZP</i>	Bezpečnost a ochrana zdraví při práci
<i>ČSN</i>	Česká technická norma
G_s	Provozní hodnota stálého zatížení
K	Deformační součinitel citlivosti odporového tenzometru, tzv. K-faktor
K_s	Koeficient strunového tenzometru
L	délka nosníku mezi podporami
R	Délka měřená radarem
R	Elektrický odpor
\bar{R}_{exp}	Výběrový aritmetický průměr stanovený z experimentálních hodnot
<i>Sb.</i>	Sbírka zákonů
T	Teplota
$T_{1,2}$	Perioda
V_d	Extrémní hodnoty nahodilého zatížení
V_s	Provozní hodnota nahodilého zatížení

Malá písmena latinské abecedy

d	Délky měřicí základny
d_p	Pohyb naměřený radarem
d^{RB}	Vodorovná vzdálenost přístroje od referenčního bodu,
d^{SB}	Vodorovná vzdálenost přístroje od sledovaného bodu,
E	Modul pružnosti
f	Frekvence
f_0	Výchozí frekvence
g	Tíhové zrychlení
h	Převýšení radaru a odražeče
h_1, h_2	Relativní výšky hladin kapaliny v jednotlivých nádobách
h_1', h_2'	Hloubky hladin kapaliny v nádobách

k_n	Součinitel pro meze konfidenčního intervalu pro odhad průměru základního souboru
l	Délka
o	Oprava z vlivu vertikální refrakce a zakřivení Země
p_1, p_2	Tlak vzduchu na hladiny v nádobách
s_r	Výběrová směrodatná odchylka

Velká písmena řecké abecedy

Δ	Změna
----------	-------

Malá písmena řecké abecedy

α_m	Součinitel tepelné roztažnosti materiálu objektu
α_t	Součinitel tepelné roztažnosti měrného elementu tenzometru
α, β	Úhly mezi přístroji a měřeným bodem
γ_{exp}	Součinitelem spolehlivosti zkoušení
ε	Deformace (přetvoření)
ε_t	Poměrného přetvoření vlivem teploty
λ_1, λ_2	Součinitel pro porovnání trvalé a celkové deformace
μ	Součinitel pro posouzení mezního stavu použitelnosti
ζ_i^{RB}	Zenitový úhle v i-té etapě na bod referenční
ζ_i^{SB}	Zenitový úhle v i-té etapě na bod sledovaný
ρ	Specifický odpor
ρ_1, ρ_2	Hustota kapalin
σ	Napětí

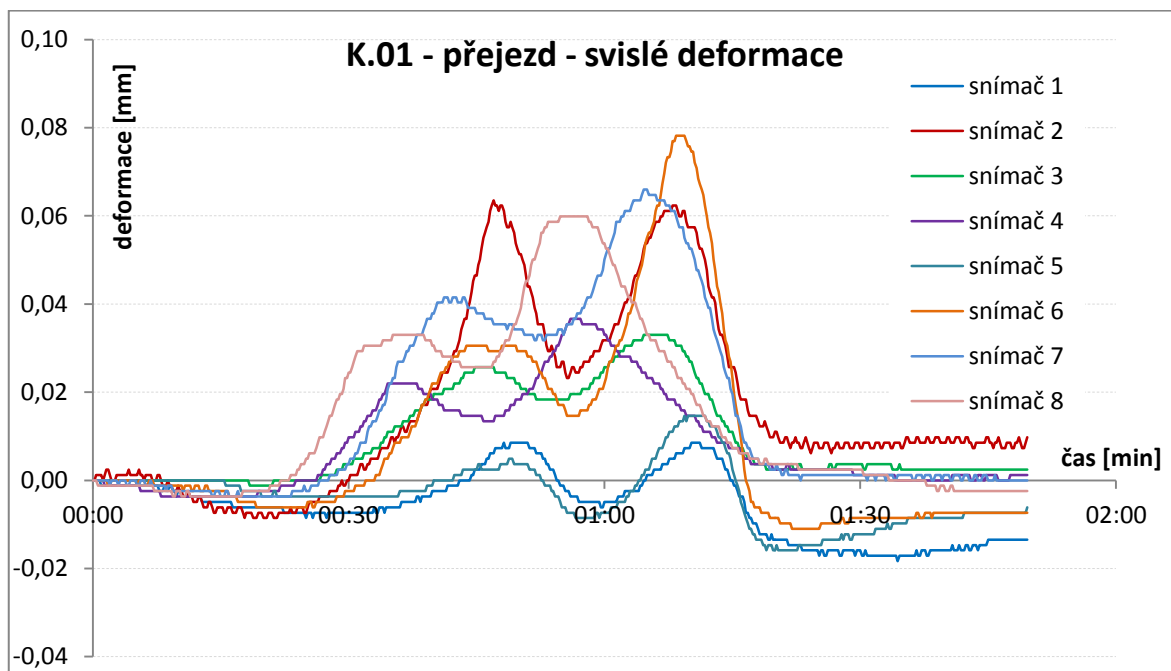
SEZNAM PŘÍLOH

- **Příloha P1:** Grafické výstupy – měření svislých deformací
- **Příloha P2:** Grafické výstupy – měření posunů v trhlinách
- **Příloha P3:** Statický výpočet – modelové údaje

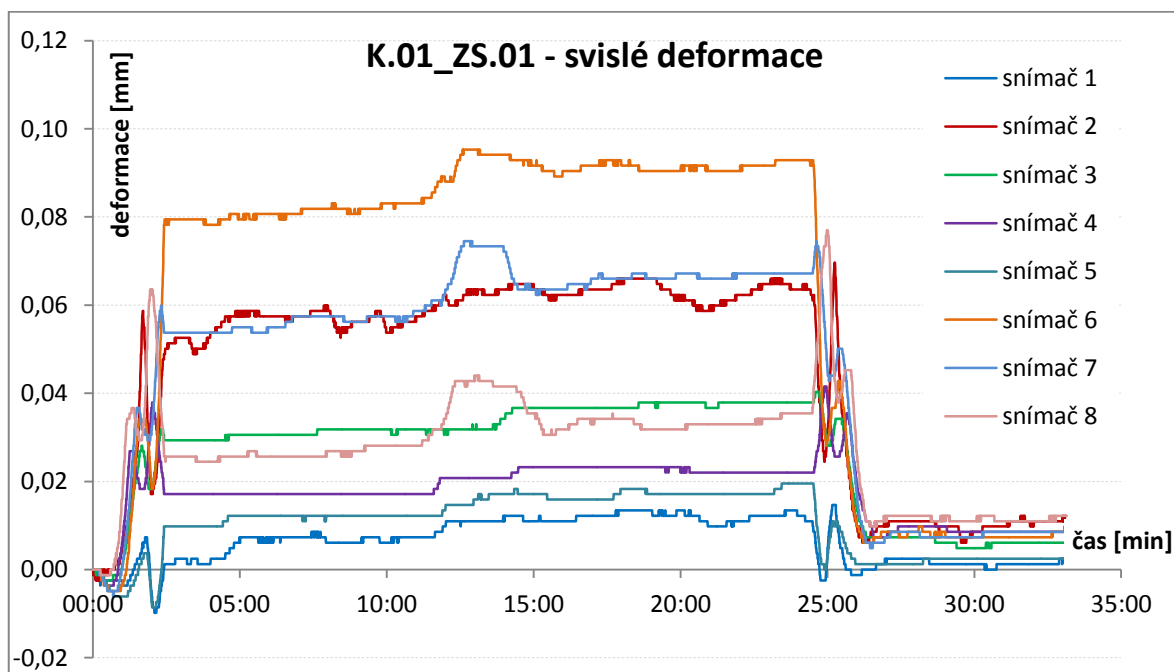
PŘÍLOHA P1

GRAFICKÉ VÝSTUPY – MĚŘENÍ SVISLÝCH DEFORMACÍ

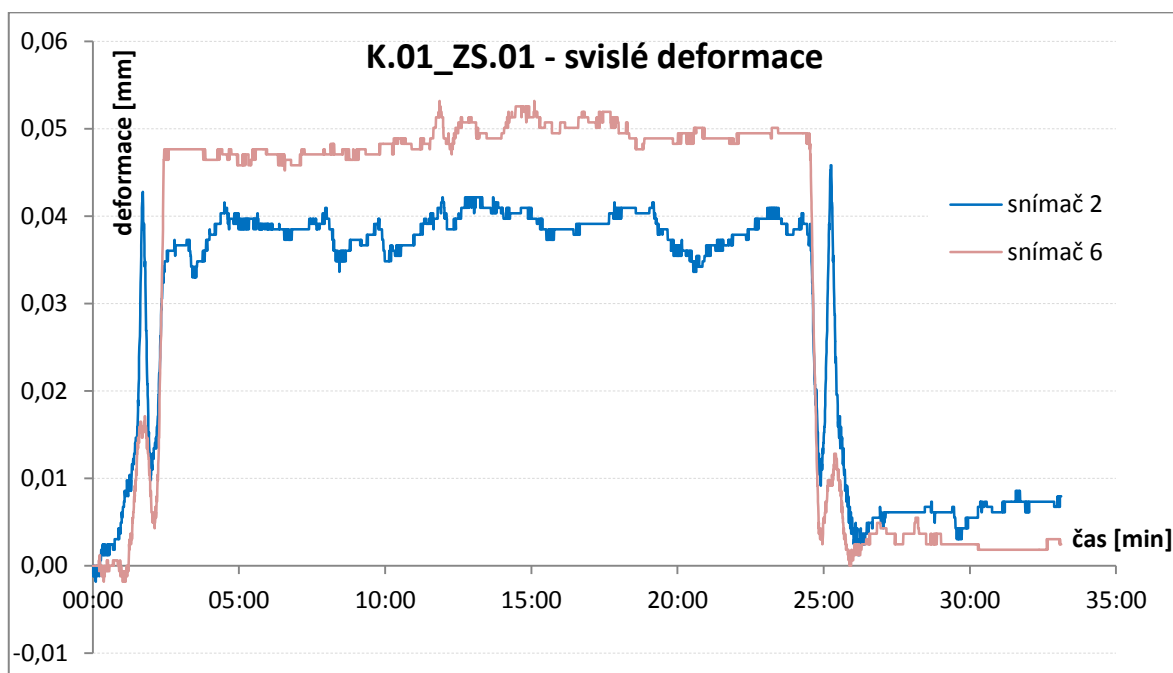
KÓJE Č. 1



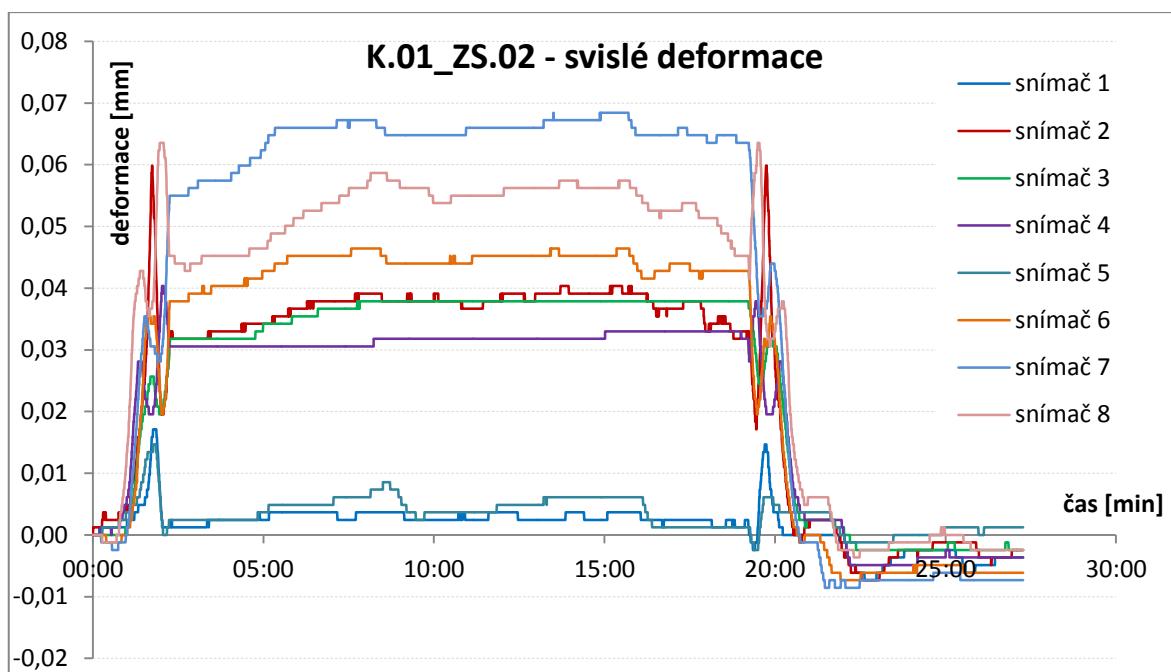
Obrázek P1.1 – Graf K.01 – přejezd elektrovozu zprava doleva – rozmístění snímačů ve variantě č. 1 – naměřené hodnoty z potenciometrických snímačů průhybů



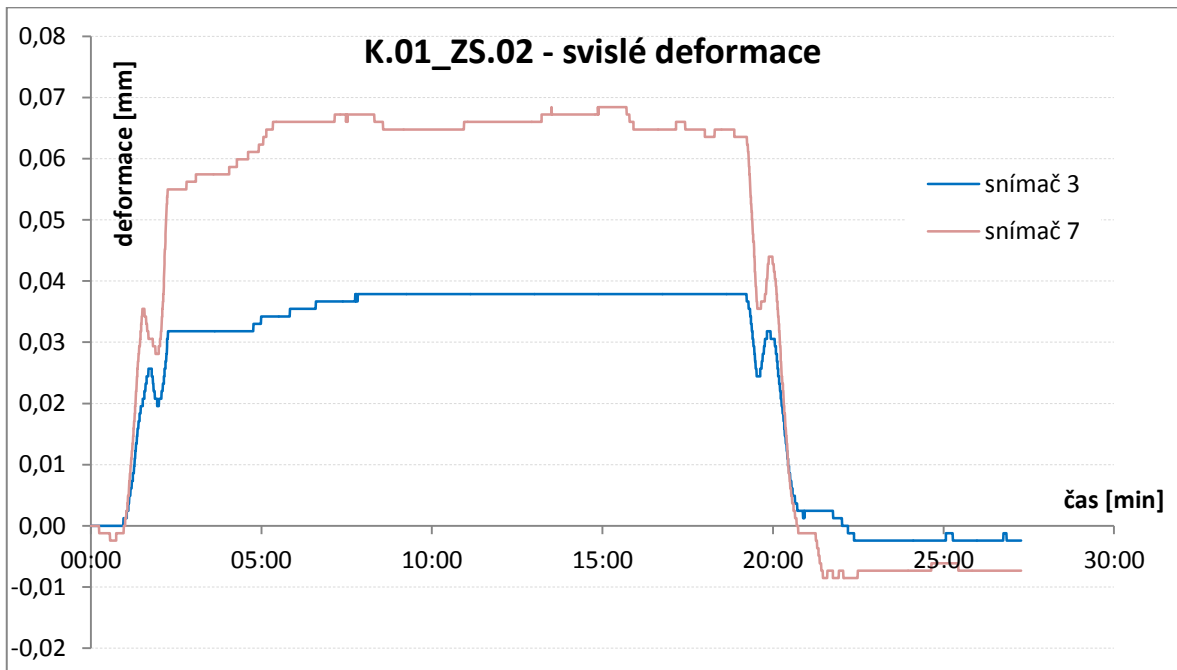
Obrázek P1.2 – Graf K.01_ZS.01 – rozmístění snímačů ve variantě č. 1 – naměřené hodnoty z potenciometrických snímačů průhybů



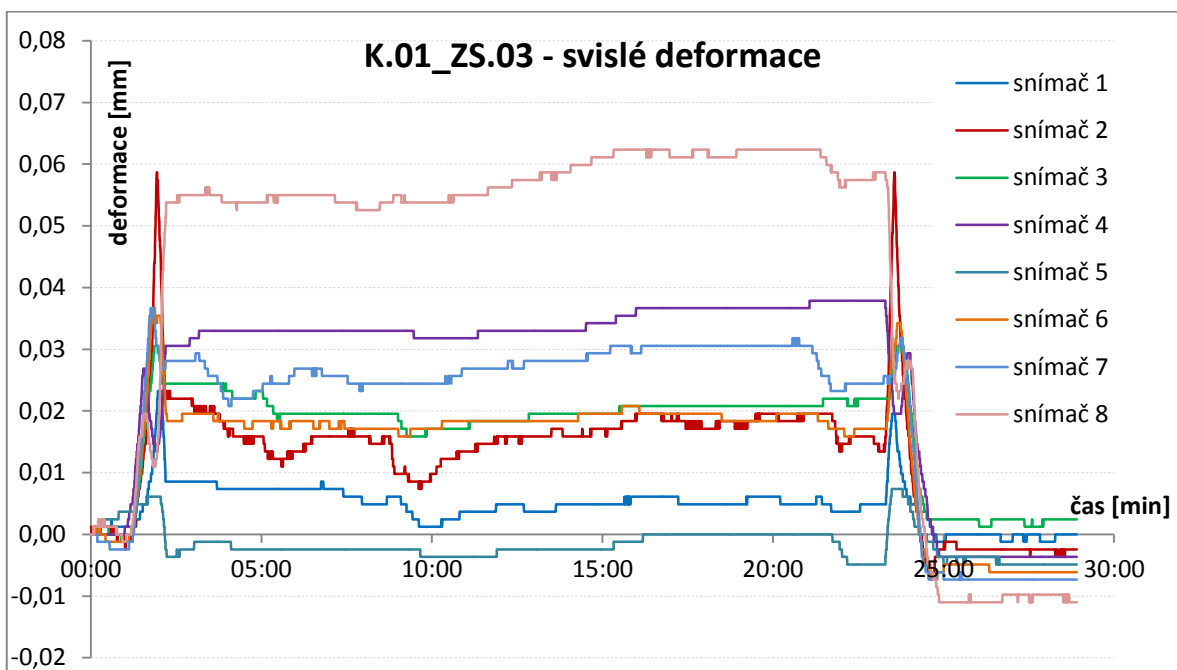
Obrázek P1.3 – Graf K.01_ZS.01 – rozmístění snímačů ve variantě č. 1 – vyhodnocení extrémní svislé deformace v pravé části podélných spojitých nosníků (snímače 2 a 6) bez vlivu poklesu podpor



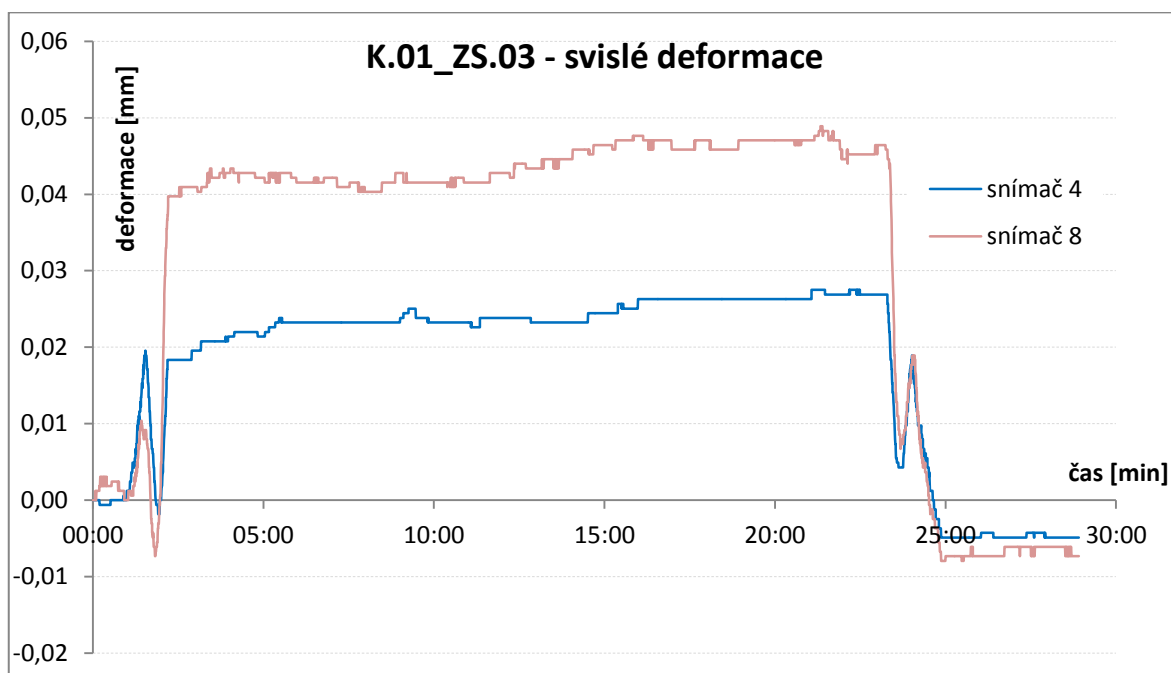
Obrázek P1.4 – Graf K.01_ZS.02 – rozmístění snímačů ve variantě č. 1 – naměřené hodnoty z potenciometrických snímačů průhybů



Obrázek P1.5 – Graf K.01_ZS.02 – rozmístění snímačů ve variantě č. 1 – vyhodnocení extrémní svislé deformace v místě příčného průvlaku (snímače 3 a 7)

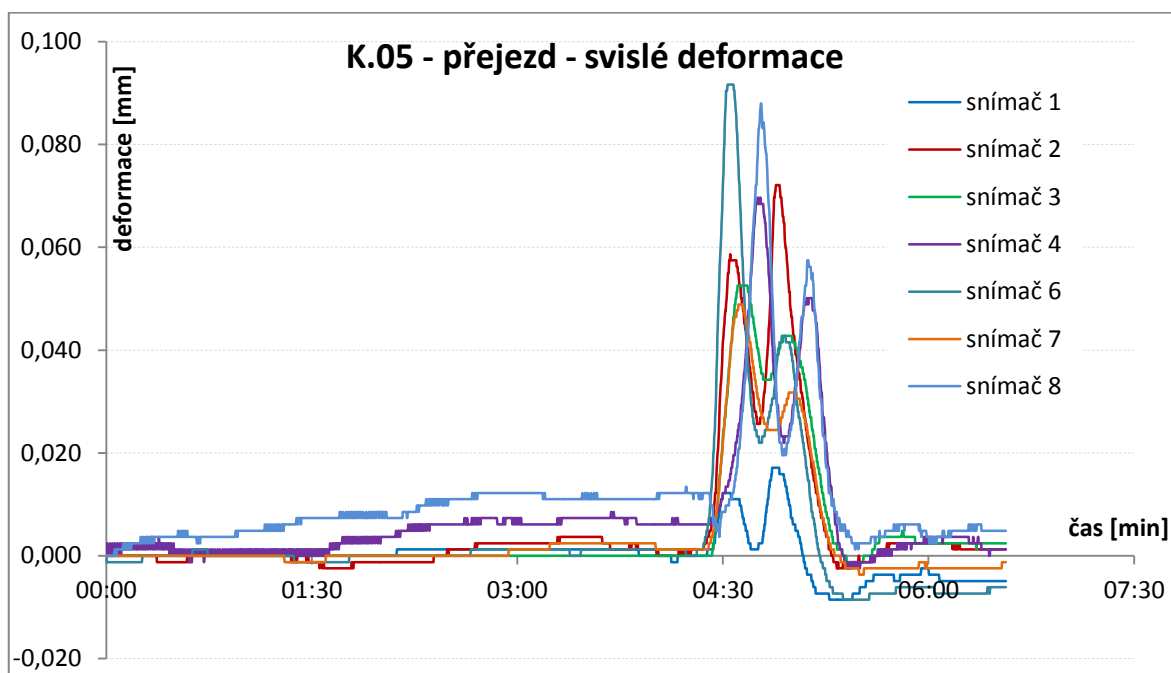


Obrázek P1.6 – Graf K.01_ZS.03 – rozmístění snímačů ve variantě č. 1 – naměřené hodnoty z potenciometrických snímačů průhybů

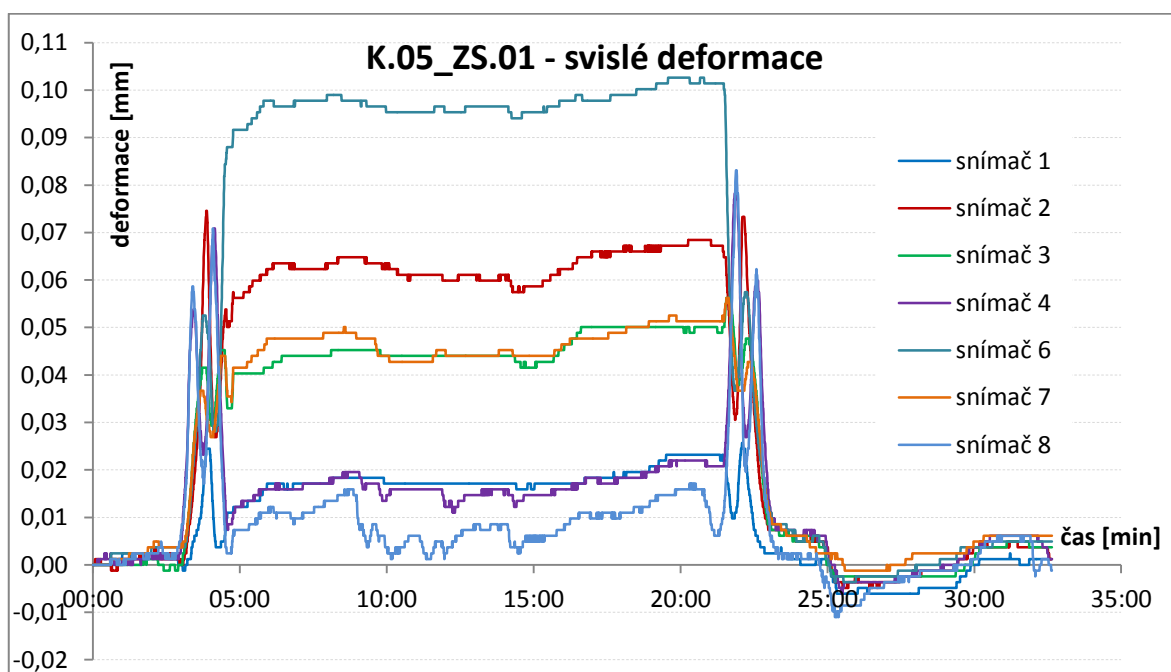


Obrázek P1.7 – Graf K.01_ZS.03 – rozmístění snímačů ve variantě č. 1 – vyhodnocení extrémní svislé deformace v levé části podélných spojitéch nosníků (snímače 4 a 8) bez vlivu poklesu podpor

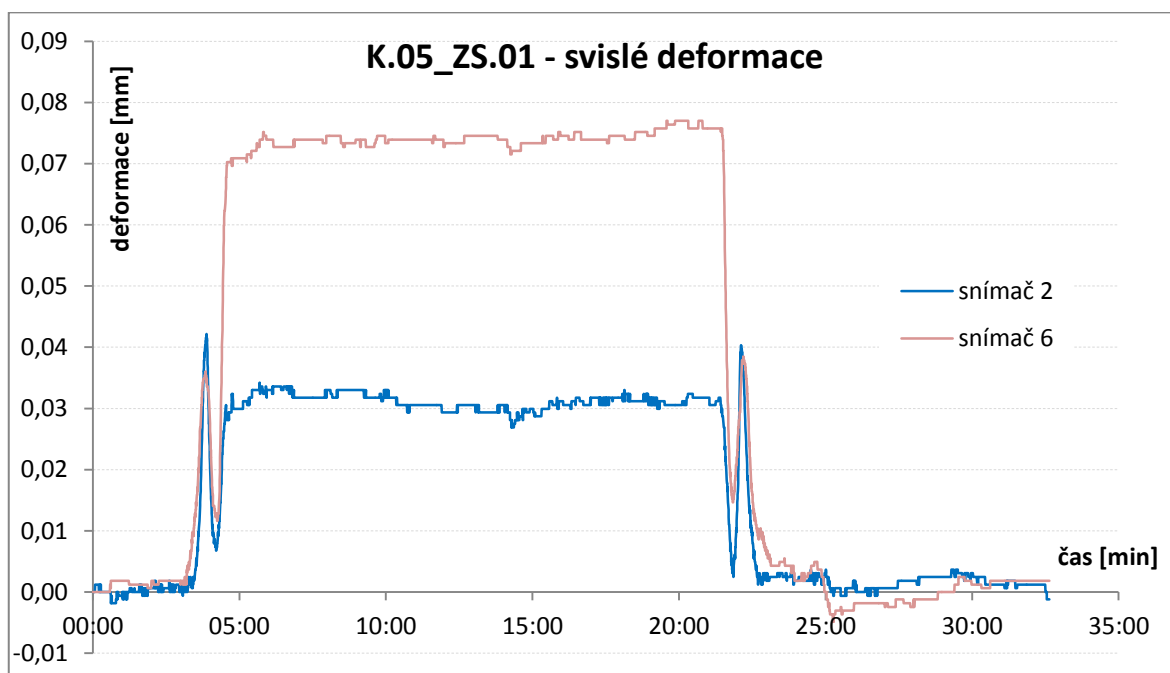
KÓJE Č. 5



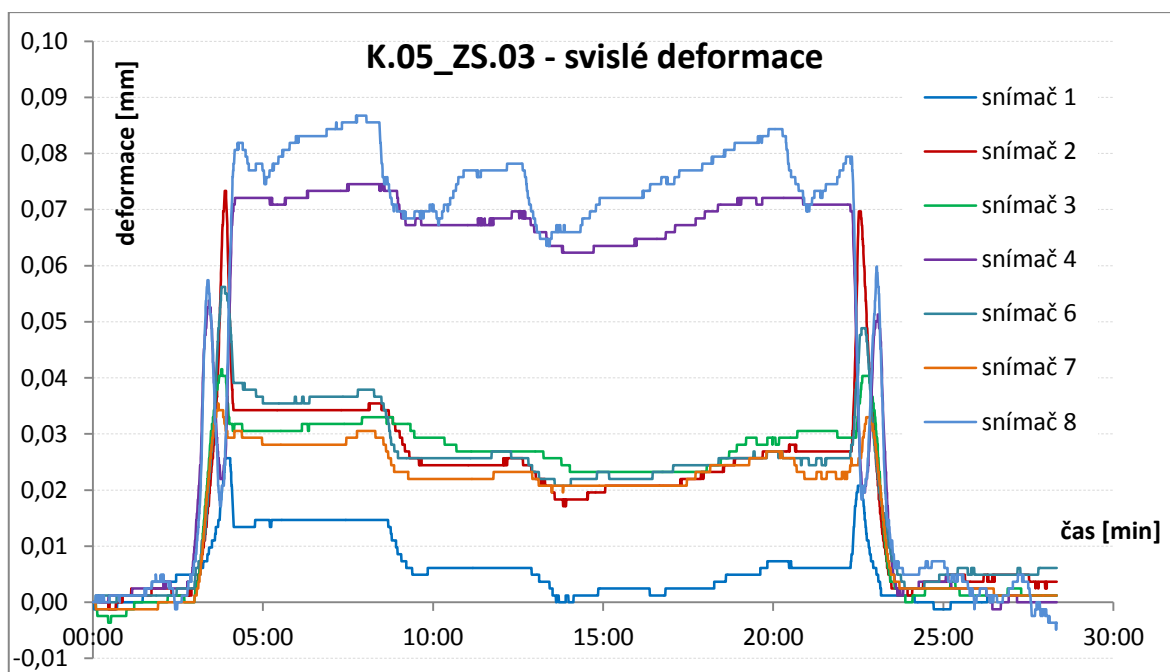
Obrázek P1.8 – Graf K.05 – přejezd elektrovozu zprava doleva – rozmístění snímačů ve variantě č. 2 – naměřené hodnoty z potenciometrických snímačů průhybů



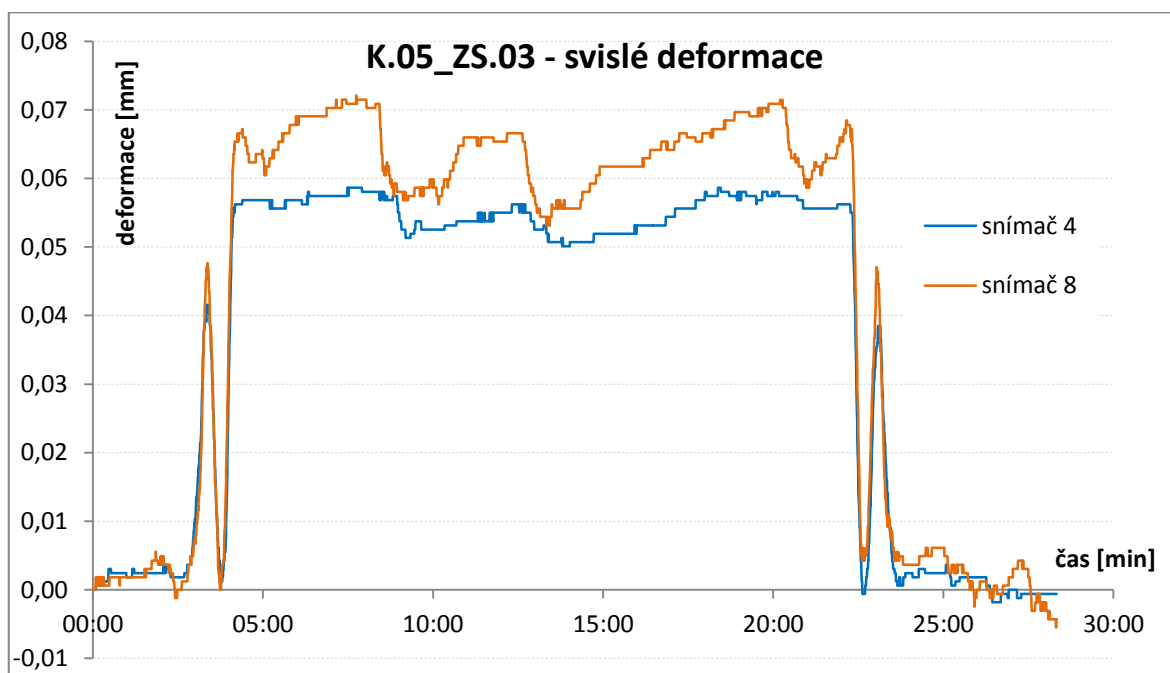
Obrázek P1.9 – Graf K.05_ZS.01 – rozmístění snímačů ve variantě č. 2 – naměřené hodnoty z potenciometrických snímačů průhybů



Obrázek P1.10 – Graf K.05_ZS.01 – rozmístění snímačů ve variantě č. 2 – vyhodnocení extrémní svislé deformace v pravé části podélných spojitých nosníků (snímače 2 a 6) bez vlivu poklesu podpor

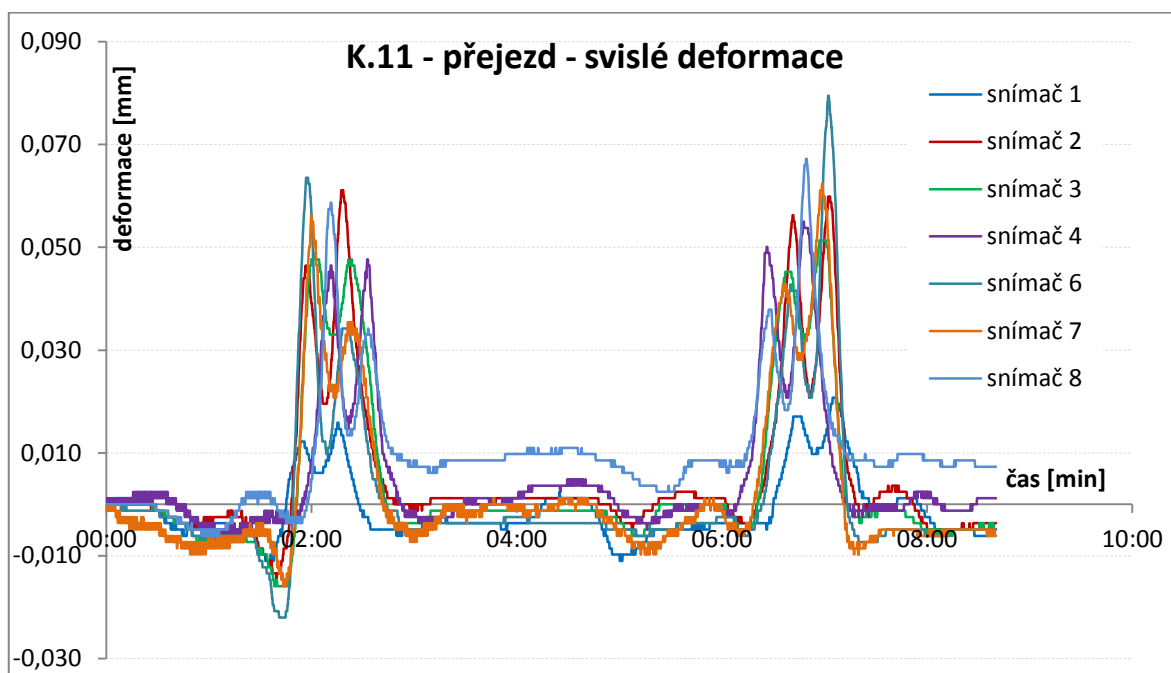


Obrázek P1.11 – Graf K.05_ZS.03 – rozmístění snímačů ve variantě č. 2 – naměřené hodnoty z potenciometrických snímačů průhybů

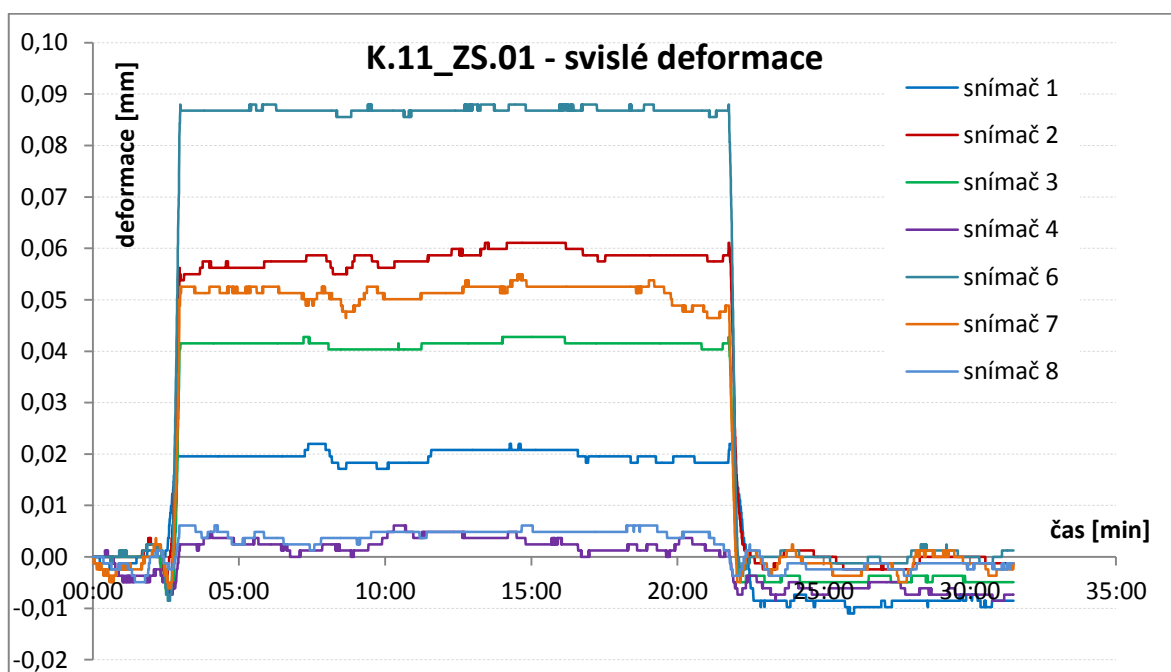


Obrázek P1.12 – Graf K.05_ZS.03 – rozmístění snímačů ve variantě č. 2 – vyhodnocení extrémní svislé deformace v levé části podélných spojitéch nosníků (snímače 4 a 8) bez vlivu poklesu podpor

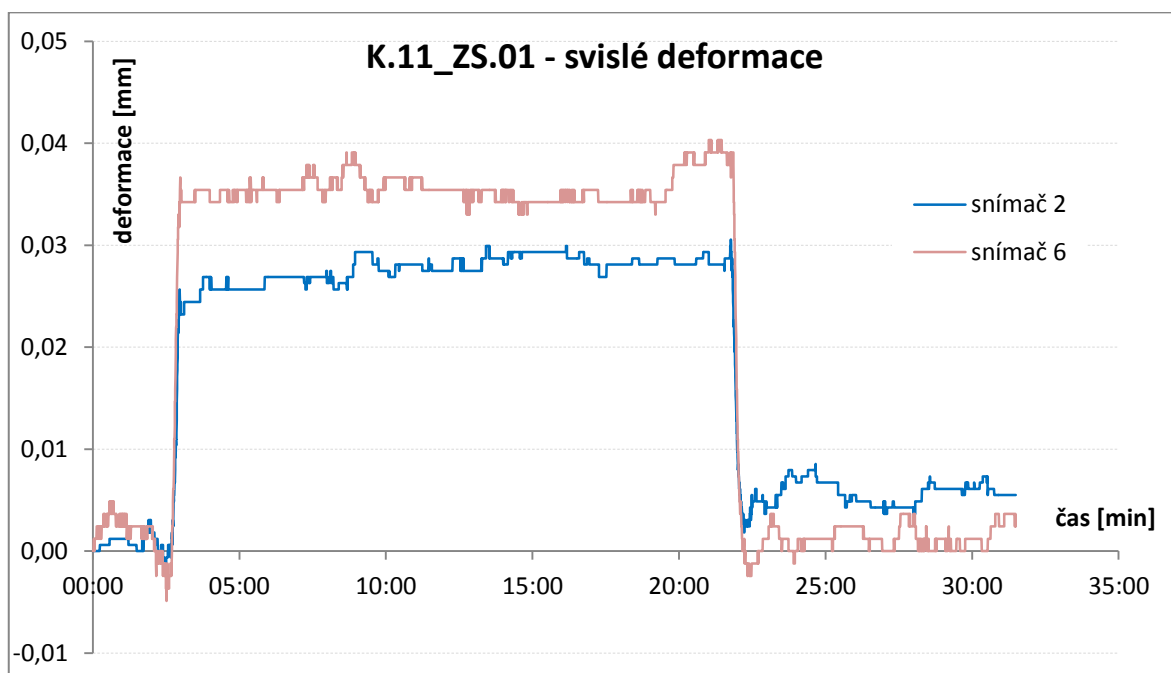
KÓJE Č. 11



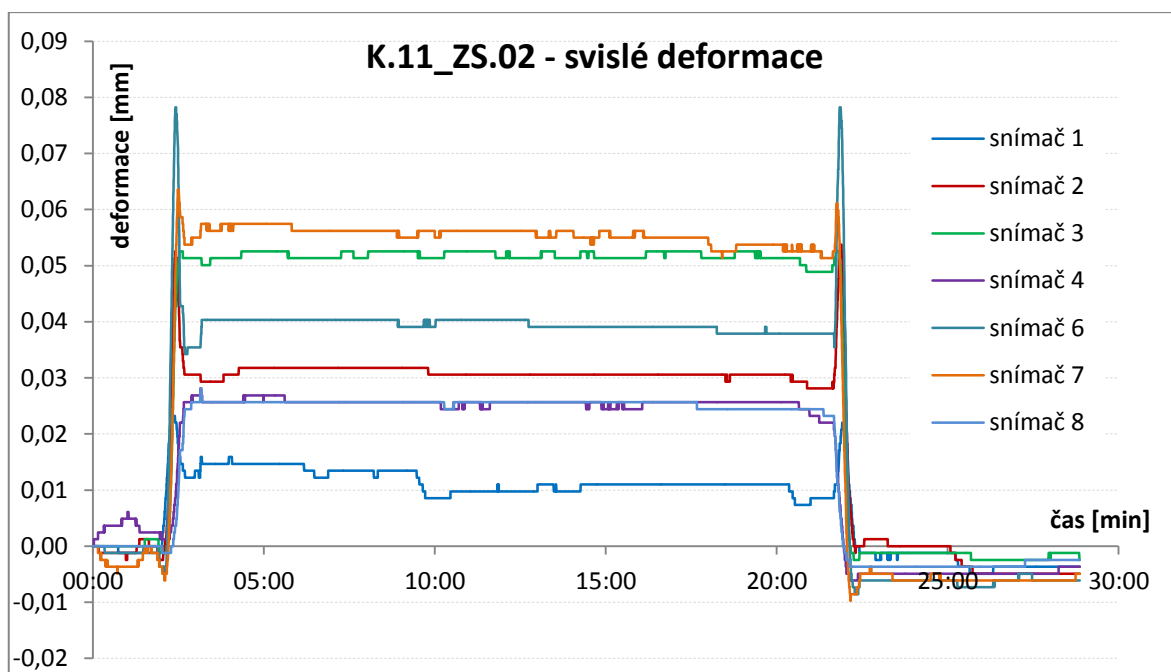
Obrázek P1.13 – Graf K.11 – obousměrný přejezd elektrovozu – rozmístění snímačů ve variantě č. 2 – naměřené hodnoty z potenciometrických snímačů průhybů



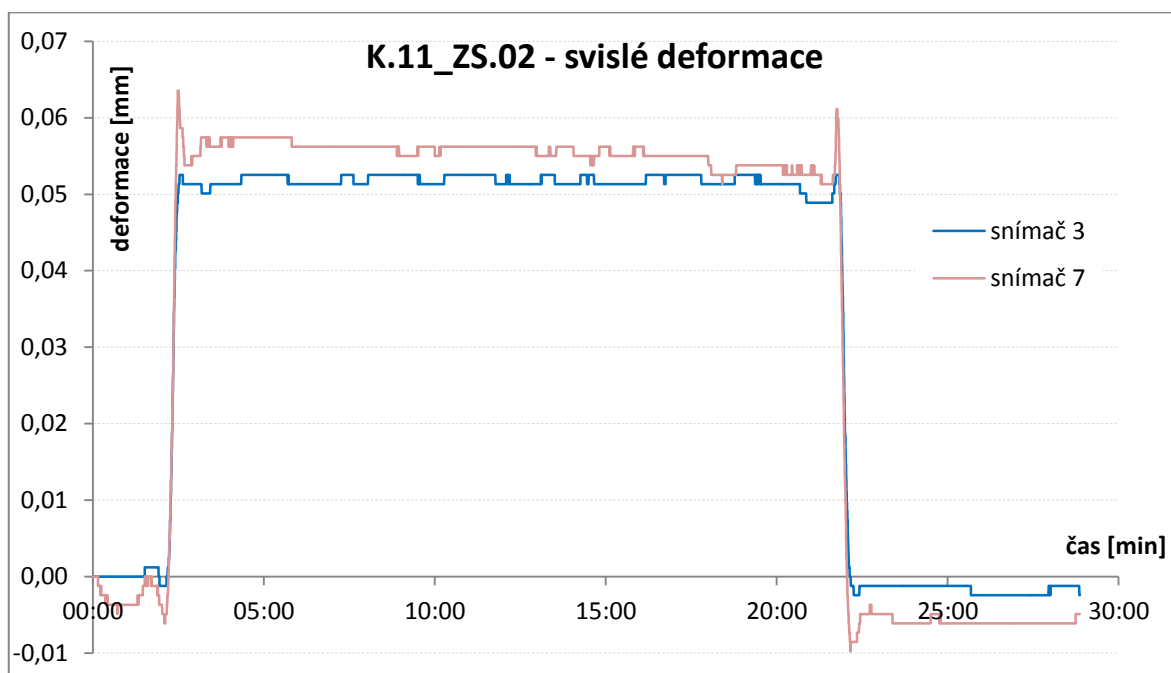
Obrázek P1.14 – Graf K.11_ZS.01 – rozmístění snímačů ve variantě č. 2 – naměřené hodnoty z potenciometrických snímačů průhybů



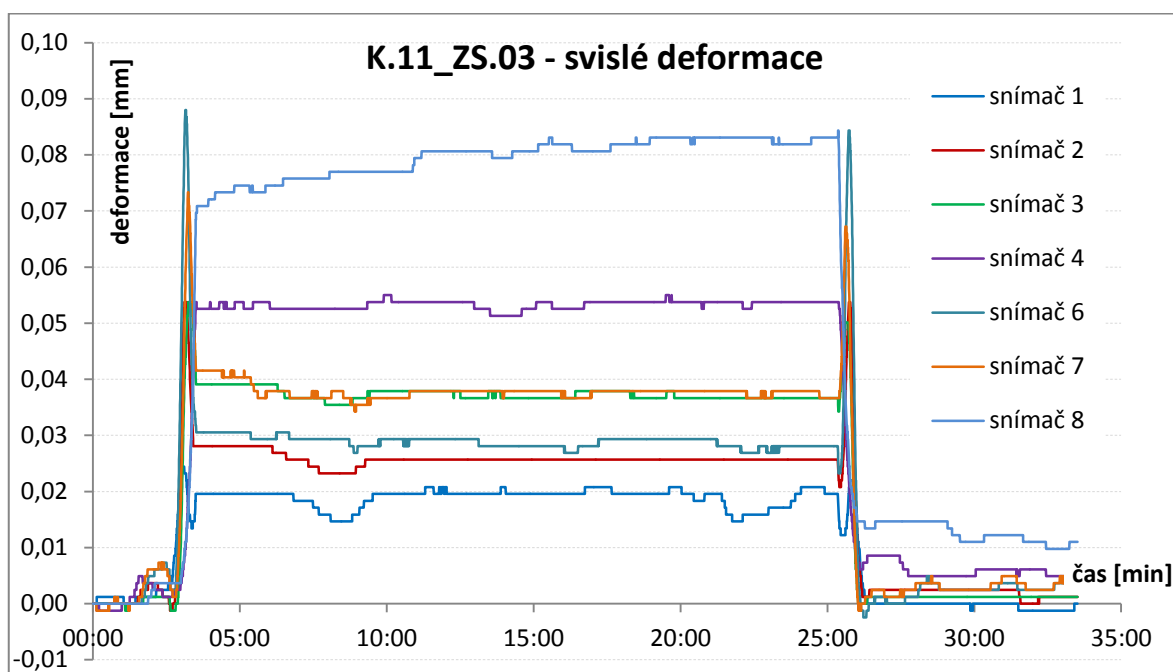
Obrázek P1.15 – Graf K.11_ZS.01 – rozmístění snímačů ve variantě č. 2 – vyhodnocení extrémní svislé deformace v pravé části podélných spojitých nosníků (snímače 2 a 6) bez vlivu poklesu podpor



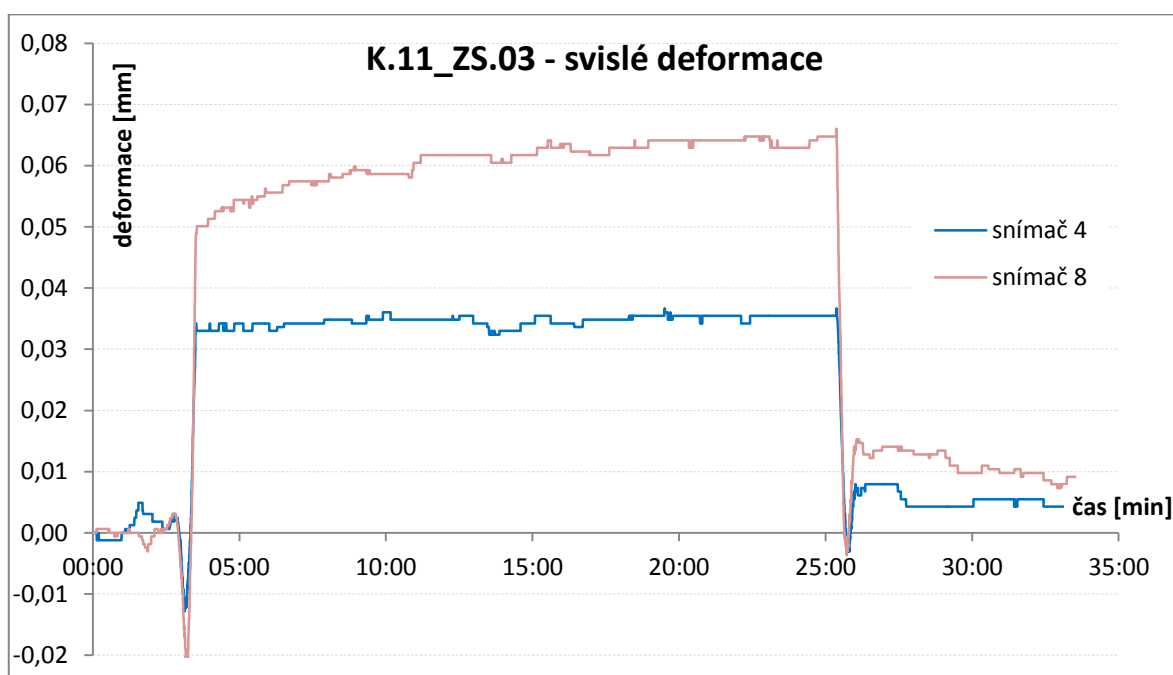
Obrázek P1.16 – Graf K.11_ZS.02 – rozmístění snímačů ve variantě č. 2 – naměřené hodnoty z potenciometrických snímačů průhybů



Obrázek P1.17 – Graf K.11_ZS.02 – rozmístění snímačů ve variantě č. 2 – vyhodnocení extrémní svislé deformace v místě příčného průvlaku (snímače 3 a 7)

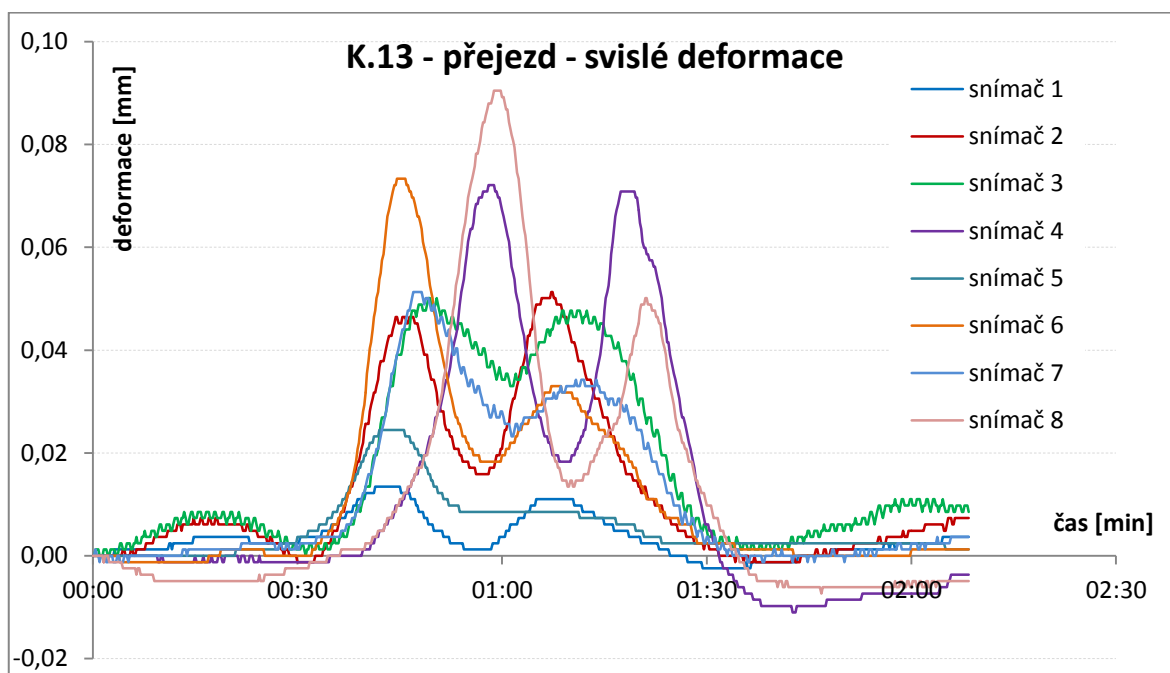


Obrázek P1.18 – Graf K.11_ZS.03 – rozmístění snímačů ve variantě č. 2 – naměřené hodnoty z potenciometrických snímačů průhybů

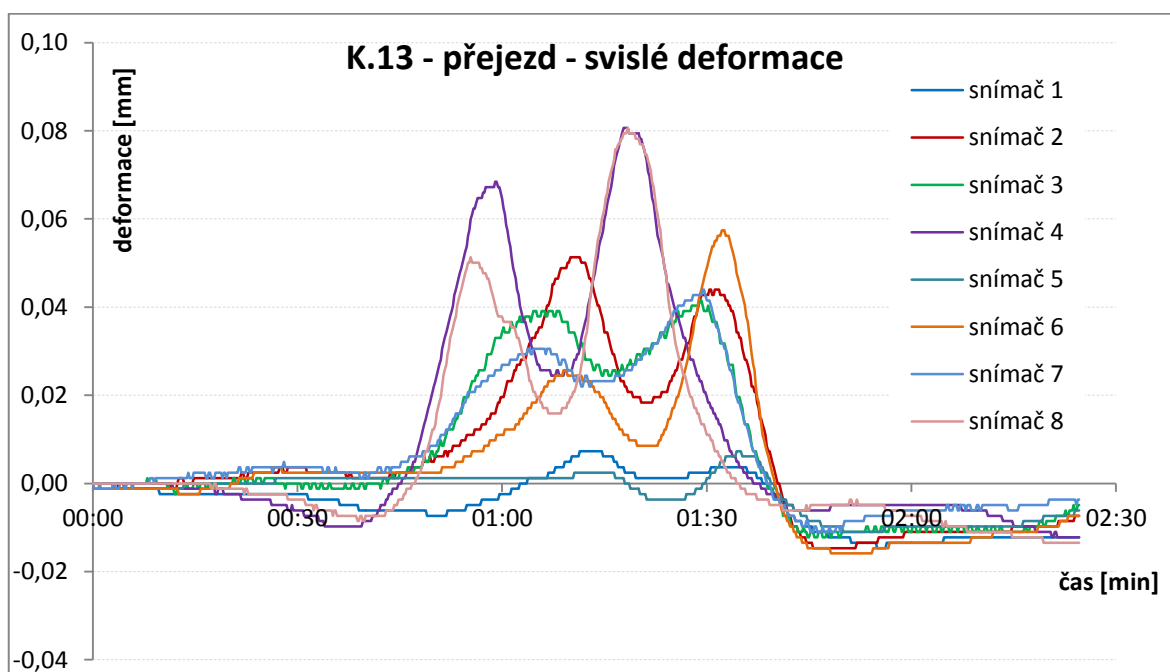


Obrázek P1.19 – Graf K.11_ZS.03 – rozmístění snímačů ve variantě č. 2 – vyhodnocení extrémní svislé deformace v levé části podélných spojitých nosníků (snímače 4 a 8) bez vlivu poklesu podpor

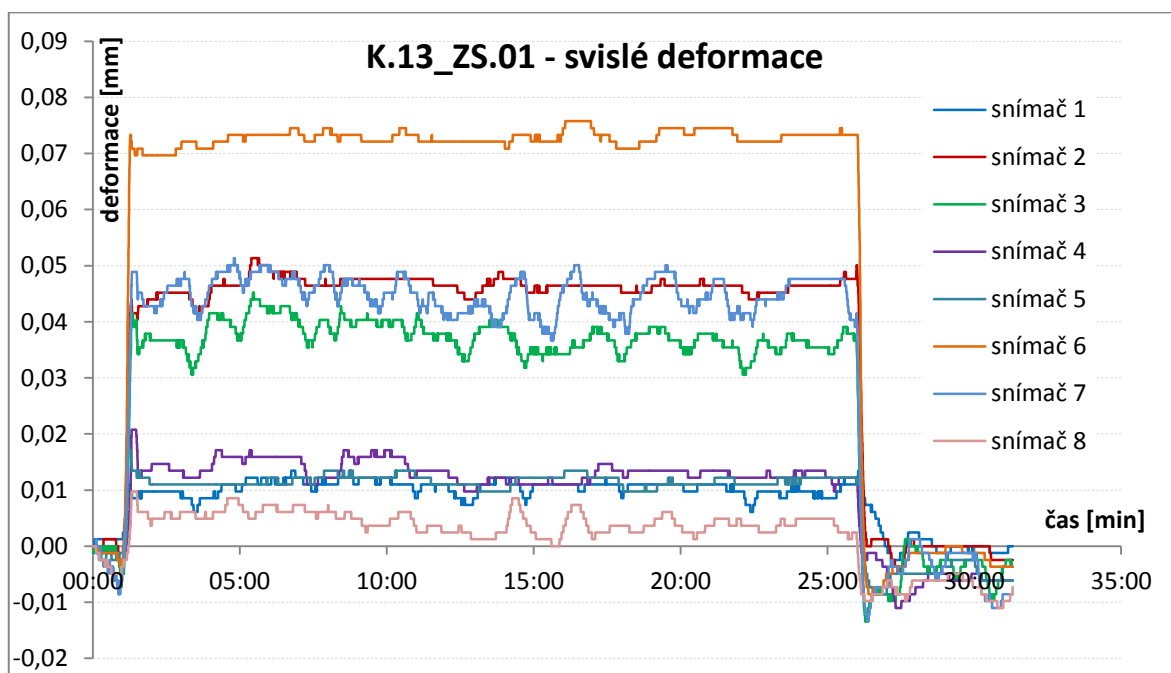
KÓJE Č. 13



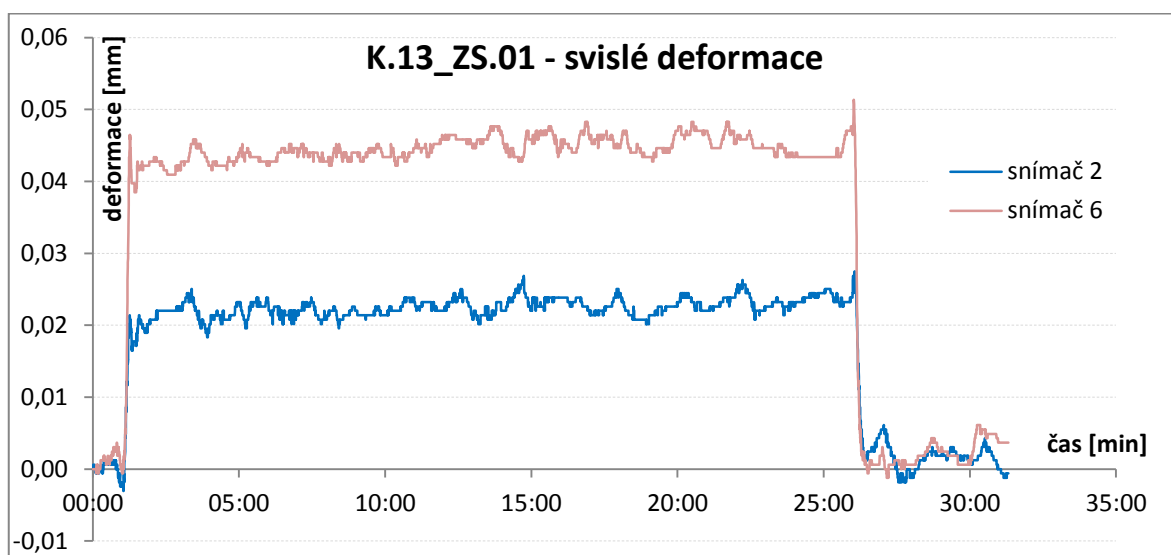
Obrázek P1.20 – Graf K.13 – přejezd elektrovozu zprava doleva – rozmístění snímačů ve variantě č. 1 – naměřené hodnoty z potenciometrických snímačů průhybů



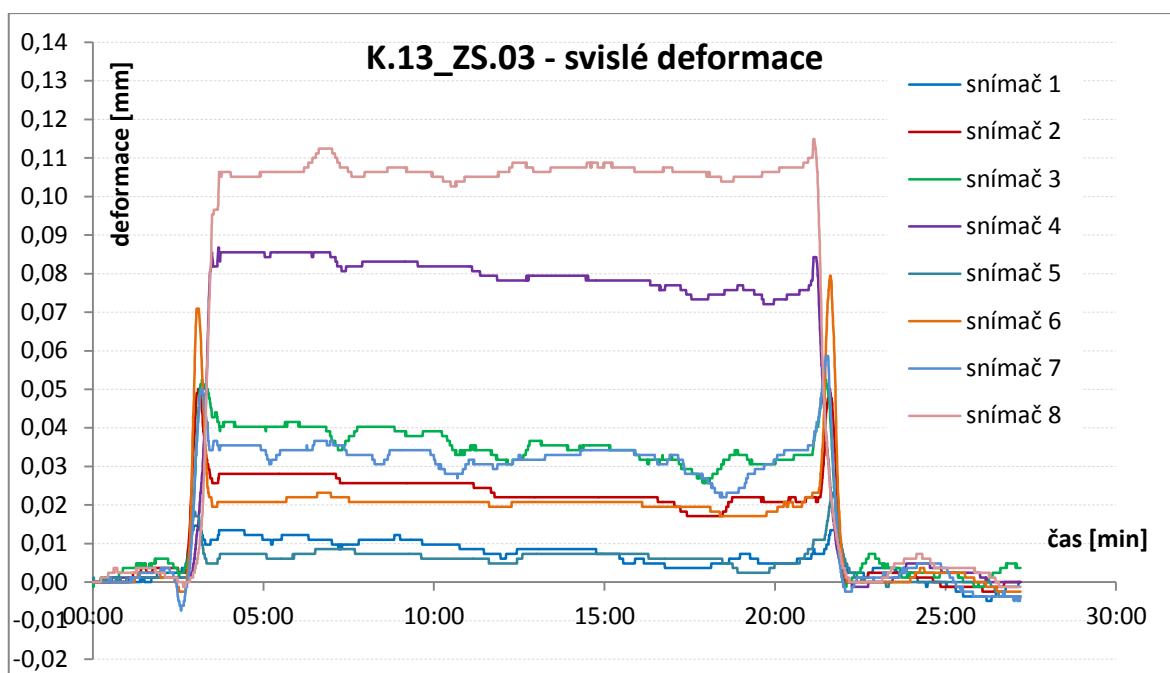
Obrázek P1.21 – Graf K.13 – přejezd elektrovozu zleva doprava – rozmístění snímačů ve variantě č. 1 – naměřené hodnoty z potenciometrických snímačů průhybů



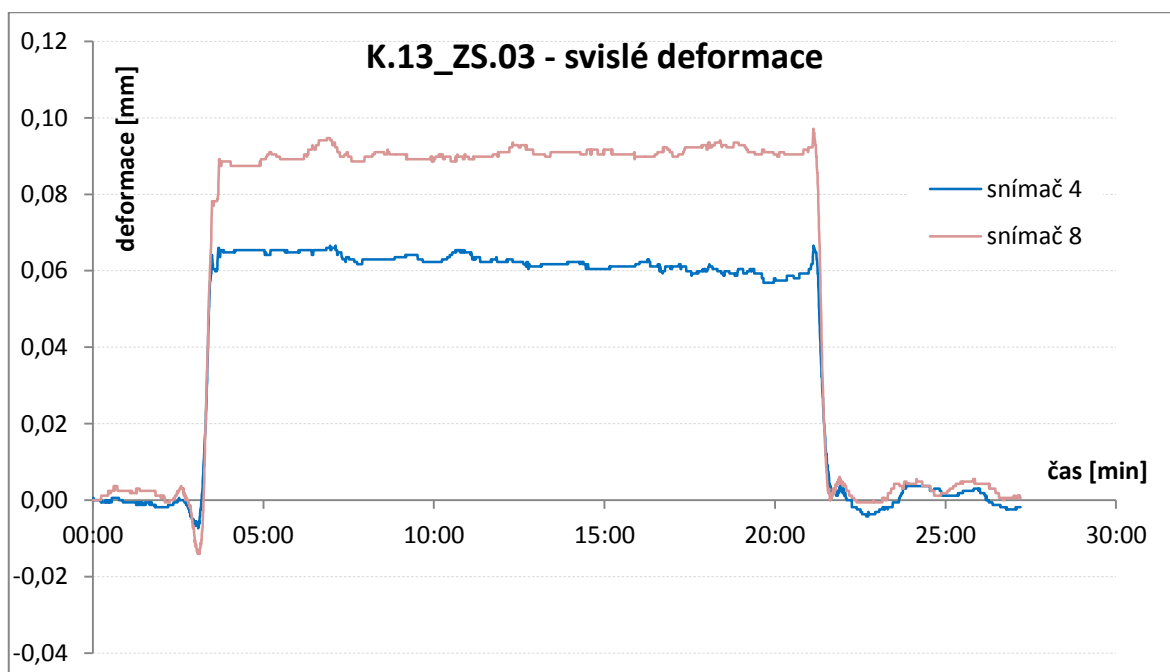
Obrázek P1.22 – Graf K.13_ZS.01 – rozmístění snímačů ve variantě č. 1 – naměřené hodnoty z potenciometrických snímačů průhybů



Obrázek P1.23 – Graf K.13_ZS.01 – rozmístění snímačů ve variantě č. 1 – vyhodnocení extrémní svislé deformace v pravé části podélných spojitých nosníků (snímače 2 a 6) bez vlivu poklesu podpor



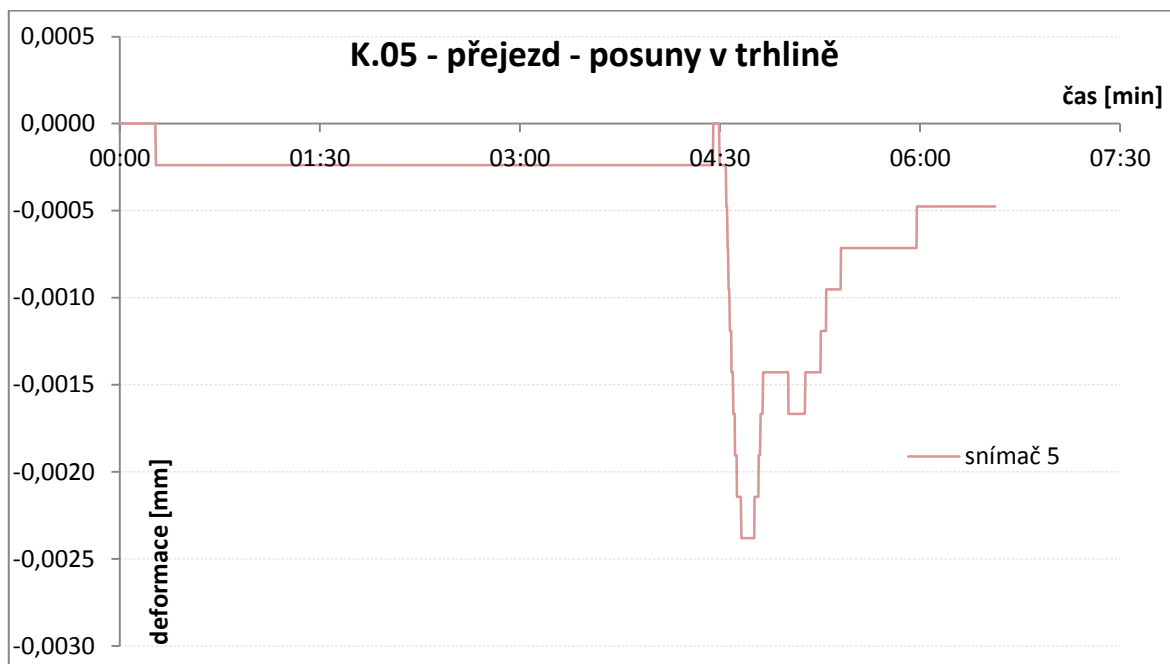
Obrázek P1.24 – Graf K.13_ZS.03 – rozmístění snímačů ve variantě č. 1 – naměřené hodnoty z potenciometrických snímačů průhybů



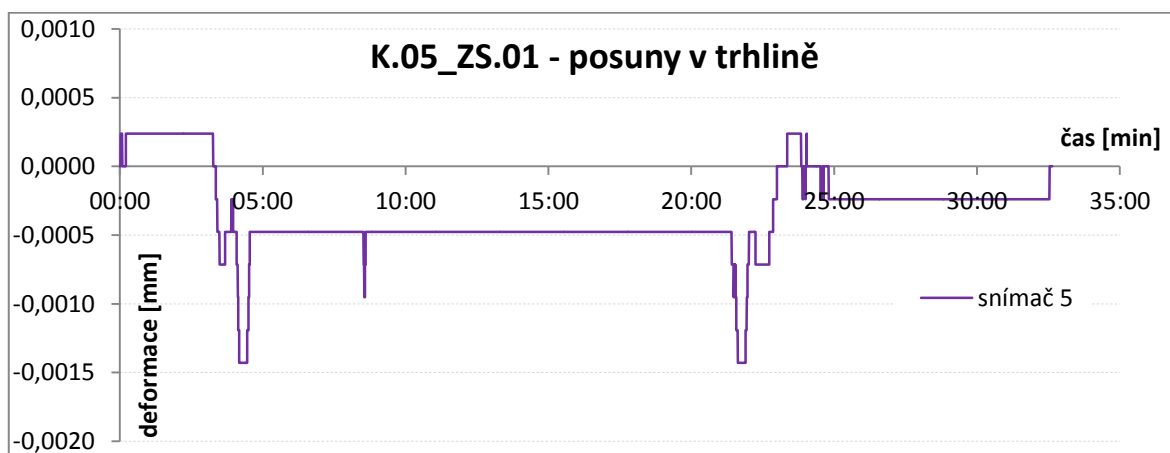
Obrázek P1.25 – Graf K.13_ZS.03 – rozmístění snímačů ve variantě č. 1 – vyhodnocení extrémní svislé deformace v levé části podélných spojitých nosníků (snímače 4 a 8) bez vlivu poklesu podpor

PŘÍLOHA P2

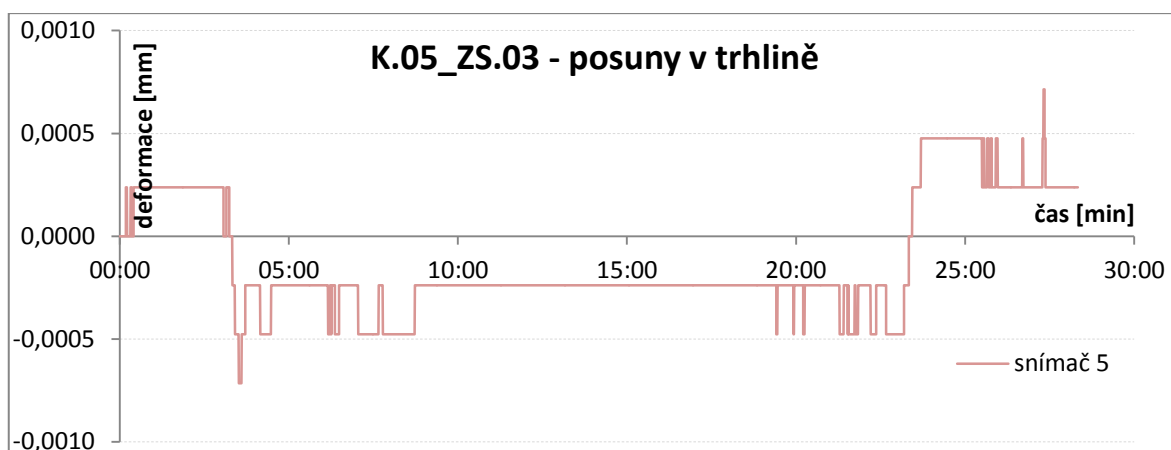
GRAFICKÉ VÝSTUPY – MĚŘENÍ POSUNŮ V TRHLINÁCH

KÓJE Č. 5

Obrázek P2.1 – Graf K.05 – přejezd elektrovozu zprava doleva – rozmístění snímačů ve variantě č. 2 – naměřené hodnoty posunu v závislosti na čase ve svislé trhlině

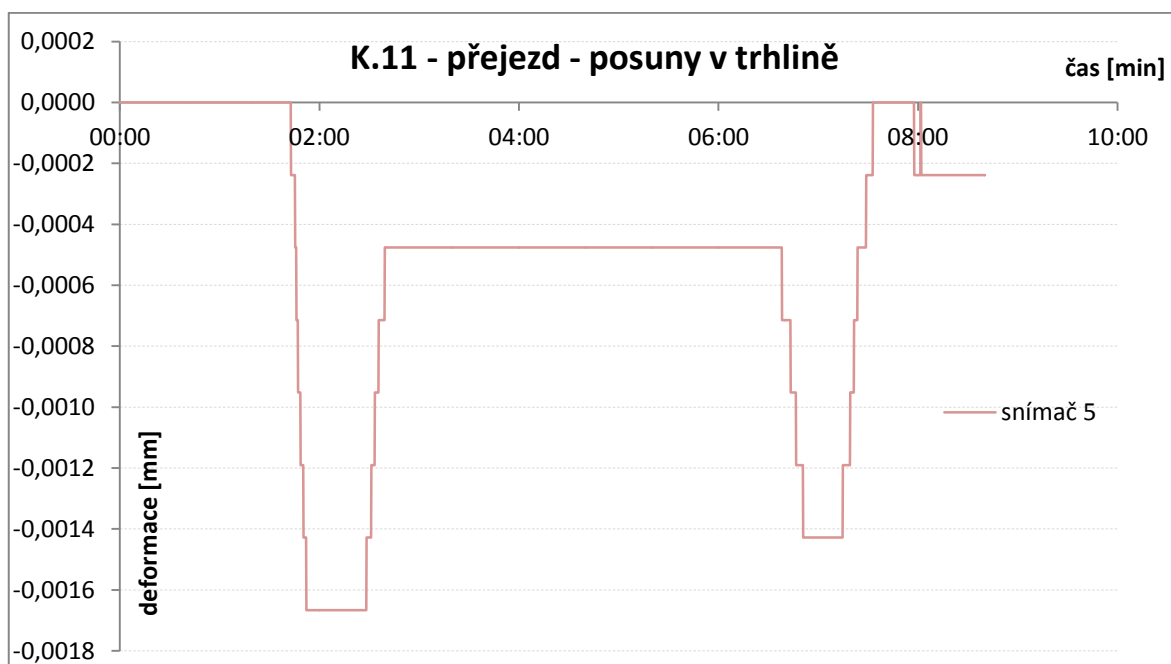


Obrázek P2.2 – Graf K.05_ZS.01 – rozmístění snímačů ve variantě č. 2 – naměřené hodnoty posunu v závislosti na čase ve svislé trhlině

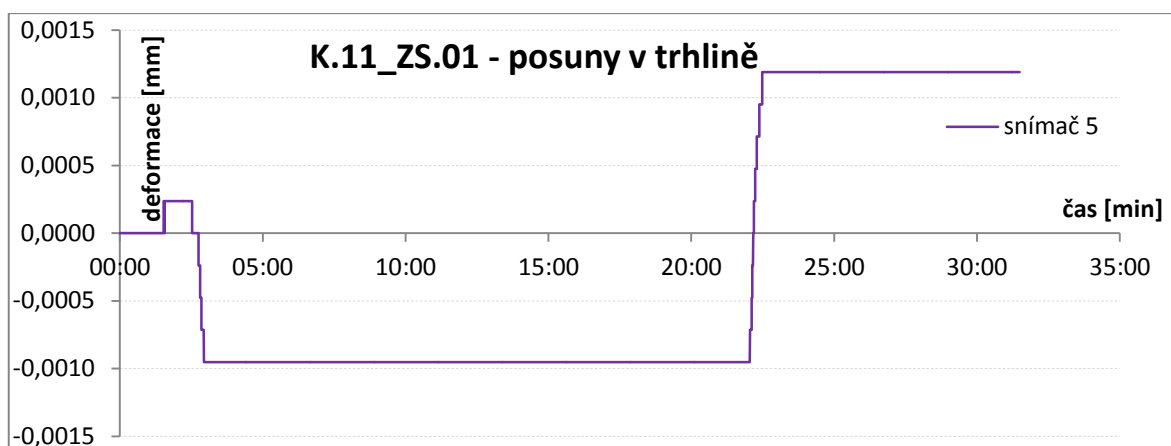


Obrázek P2.3 – Graf K.05_ZS.03 – rozmístění snímačů ve variantě č. 2 – naměřené hodnoty posunu v závislosti na čase ve svislé trhlině

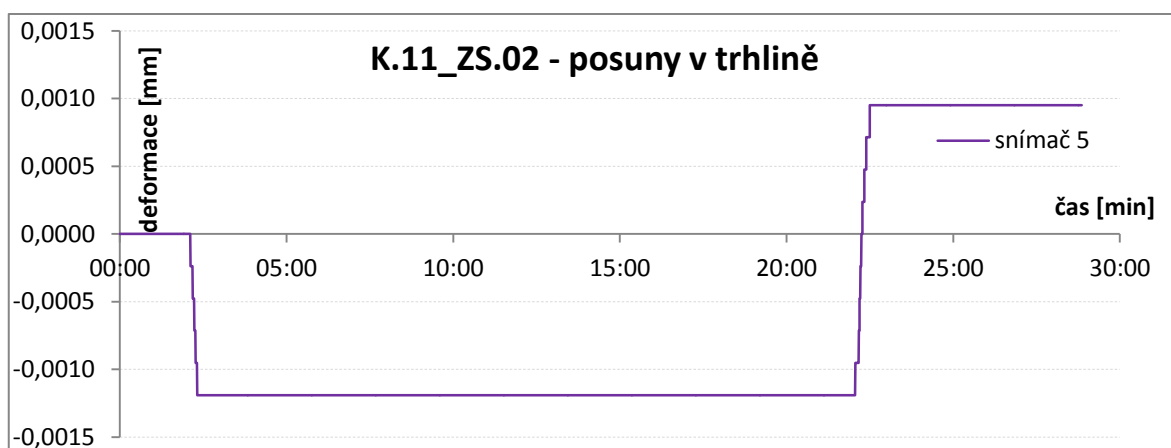
KÓJE Č. 11



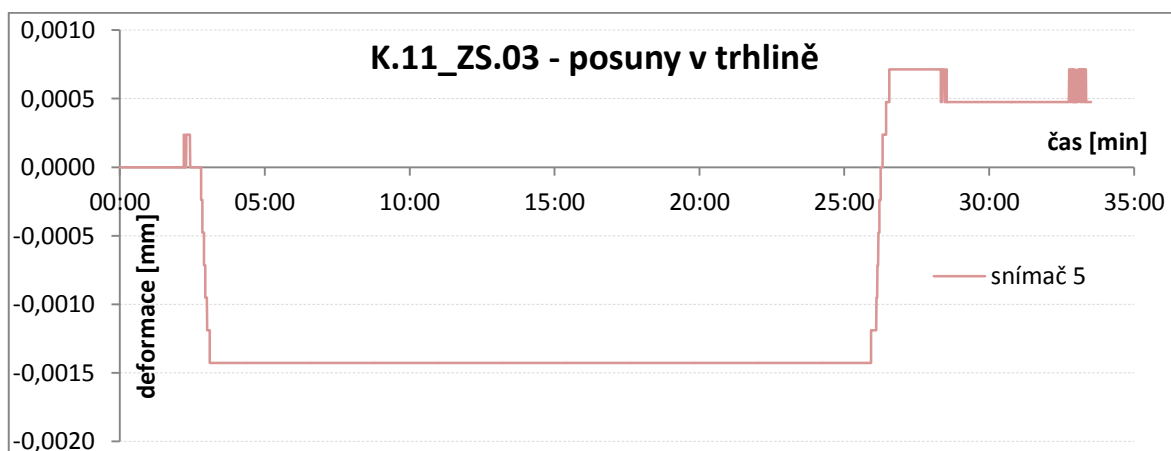
Obrázek P2.4 – Graf K.11 – obousměrný přejezd elektrovozu – rozmístění snímačů ve variantě č. 2 – naměřené hodnoty posunu v závislosti na čase ve svislé trhlině



Obrázek P2.5 – Graf K.11_ZS.01 – rozmístění snímačů ve variantě č. 2 – naměřené hodnoty posunu v závislosti na čase ve svislé trhlině



Obrázek P2.6 – Graf K.11_ZS.02 – rozmístění snímačů ve variantě č. 2 – naměřené hodnoty posunu v závislosti na čase ve svislé trhlině



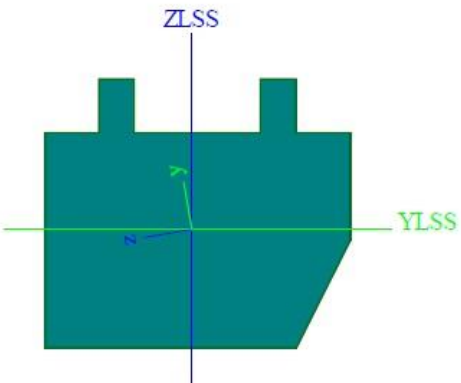
Obrázek P2.7 – Graf K.11_ZS.03 – rozmístění snímačů ve variantě č. 2 – naměřené hodnoty posunu v závislosti na čase ve svislé trhlině

PŘÍLOHA P3

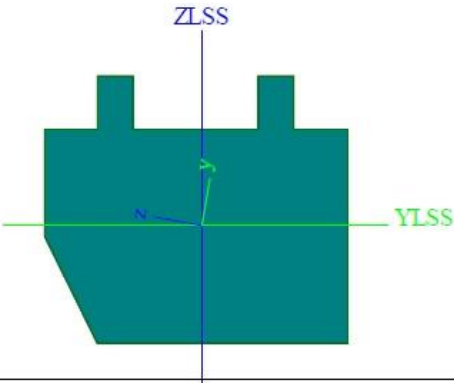
STATICKÝ VÝPOČET – MODELOVÉ ÚDAJE

- PRŮŘEZOVÉ CHARAKTERISTIKY
- VÝSLEDKY DEFORMACÍ A OHYBOVÝCH MOMENTŮ

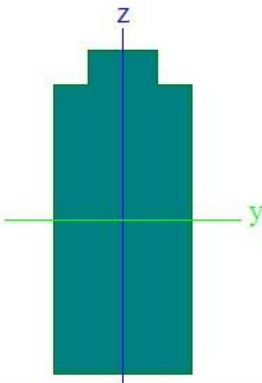
PRŮŘEZOVÉ CHARAKTERISTIKY

Jméno	LEVÝ PODÉLNÝ NOSNÍK	
Typ	Obecný průřez	
Materiál	C10/13.5	
Výroba	obecný	
Vzpěr y-y, z-z	c	c
Výpočet FEM	✓	
		
A [m ²]	5,1750e-01	
A y, z [m ²]	3,6723e-01	3,4884e-01
I y, z [m ⁴]	2,9249e-02	1,7754e-02
I YLSS, ZLSS [m ⁴]	1,8083e-02	2,8920e-02
I w [m ⁶], t [m ⁴]	1,6818e-04	3,2996e-02
Wel y, z [m ³]	6,0867e-02	3,8826e-02
Wpl y, z [m ³]	0,0000e+00	0,0000e+00
d y, z [mm]	-40	8
c YLSS, ZLSS [mm]	-16	-45
alfa [deg]	99,74	
IYZLSS [m ⁴]	1,9162e-03	
AL [m ² /m]	3,3854e+00	

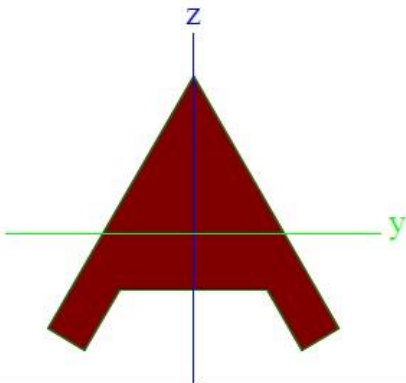
Obrázek P3.1 – Průřezové charakteristiky – levý podélný nosník

Jméno	PRAVÝ PODÉLNÝ NOSNÍK	
Typ	Obecný průřez	
Materiál	C10/13.5	
Výroba	obecný	
Vzpěr y-y, z-z	c	c
Výpočet FEM	✓	
		
A [m ²]	5,1750e-01	
A y, z [m ²]	3,6723e-01	3,4912e-01
I y, z [m ⁴]	2,9249e-02	1,7754e-02
I YLSS, ZLSS [m ⁴]	1,8083e-02	2,8920e-02
I w [m ⁶], t [m ⁴]	1,6818e-04	3,2996e-02
W _{el} y, z [m ³]	6,0867e-02	3,8826e-02
W _{pl} y, z [m ³]	0,0000e+00	0,0000e+00
d y, z [mm]	-40	-8
c YLSS, ZLSS [mm]	866	-45
alfa [deg]	80,26	
IYZLSS [m ⁴]	-1,9162e-03	
AL [m ² /m]	3,3854e+00	

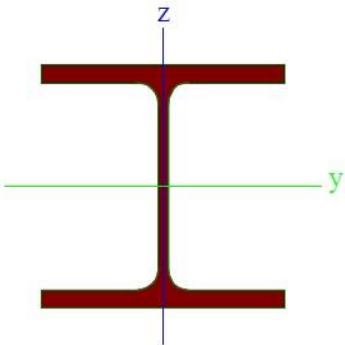
Obrázek P3.2 – Průřezové charakteristiky – levý podélný nosník

Jméno	PŘÍČNÝ PRŮVLAK	
Typ	Obecný průřez	
Materiál	C10/13.5	
Výroba	obecný	
Vzpěr y-y, z-z	c	c
Výpočet FEM	✓	
		
A [m ²]	7,9500e-01	
A y, z [m ²]	6,7975e-01	6,7374e-01
I y, z [m ⁴]	1,1854e-01	2,2837e-02
I w [m ⁶], t [m ⁴]	1,4018e-03	6,6722e-02
Wel y, z [m ³]	1,6120e-01	7,6125e-02
Wpl y, z [m ³]	0,0000e+00	0,0000e+00
d y, z [mm]	0	-18
c YLSS, ZLSS [mm]	0	-35
alfa [deg]	0,00	
AL [m ² /m]	4,0000e+00	

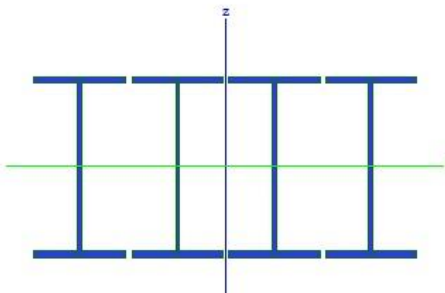
Obrázek P3.3 – Průřezové charakteristiky – levý podélný nosník

Jméno	NÁBĚH V MISCE	
Typ	Obecný průřez	
Materiál	C10/13.5	
Výroba	obecný	
Vzpěr y-y, z-z	c	c
Výpočet FEM	✓	
		
A [m ²]	4,3792e-01	
A y, z [m ²]	2,0418e-01	3,0857e-01
I y, z [m ⁴]	2,0862e-02	2,5258e-02
I w [m ⁶], t [m ⁴]	1,1868e-04	1,6527e-02
Wel y, z [m ³]	3,5378e-02	4,6286e-02
Wpl y, z [m ³]	0,0000e+00	0,0000e+00
d y, z [mm]	0	93
c YLSS, ZLSS [mm]	0	-77
alfa [deg]	0,00	
AL [m ² /m]	3,5770e+00	

Obrázek P3.4 – Průřezové charakteristiky – levý podélný nosník

Jméno	PODÉLNÉ VYZTUŽENÍ	
Typ	HEB240	
Zdroj hodnot	Profil Arbed / Structural shapes / Edition Octobre 1995	
Materiál	S 235	
Výroba	válcovaný	
Vzpěr y-y, z-z	b	c
		
A [m ²]	1,0600e-02	
A y, z [m ²]	6,9786e-03	2,0884e-03
I y, z [m ⁴]	1,1260e-04	3,9230e-05
I w [m ⁶], t [m ⁴]	4,8839e-07	1,0270e-06
W _{el} y, z [m ³]	9,3830e-04	3,2690e-04
W _{pl} y, z [m ³]	1,0540e-03	5,0000e-04
d y, z [mm]	0	0
c YLSS, ZLSS [mm]	120	120
alfa [deg]	0,00	
AL [m ² /m]	1,3838e+00	

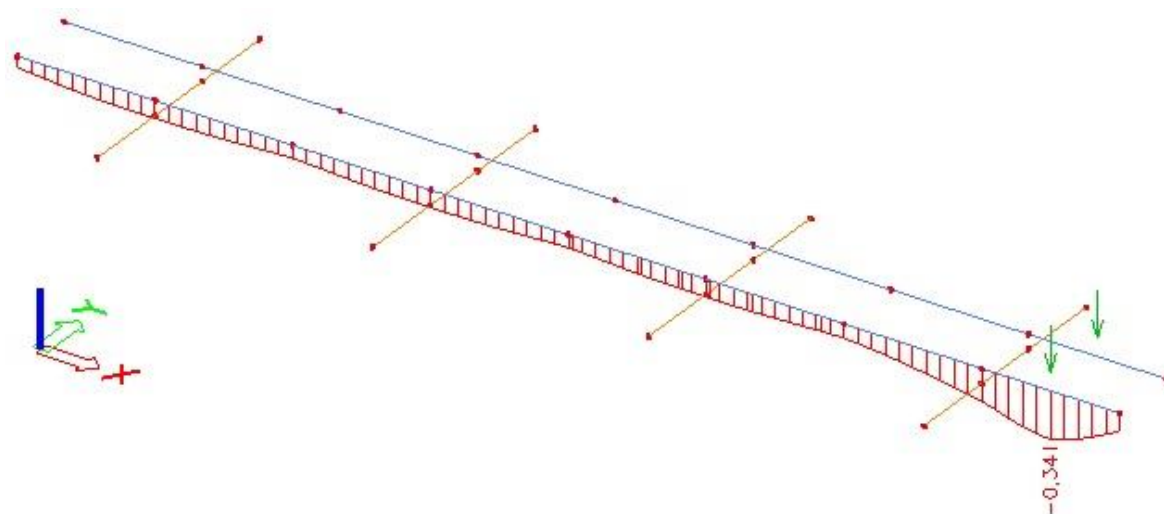
Obrázek P3.5 – Průřezové charakteristiky – podélný ocelový nosník

Jméno	PŘÍČNÉ VYZTUŽENÍ	
Typ	Obecný průřez	
Materiál	S 355	
Výroba	obecný	
Vzpěr y-y, z-z	c	c
		
A [m ²]	2,1292e-02	
A y, z [m ²]	1,2266e-02	7,7886e-03
I y, z [m ⁴]	3,3207e-04	7,0613e-04
I w [m ⁶], t [m ⁴]	5,4550e-07	6,6457e-07
Wel y, z [m ³]	2,2138e-03	2,2417e-03
Wpl y, z [m ³]	2,4920e-03	3,4067e-03
d y, z [mm]	0	0
c YLSS, ZLSS [mm]	0	-5
alfa [deg]	0,00	
AL [m ² /m]	4,9440e+00	

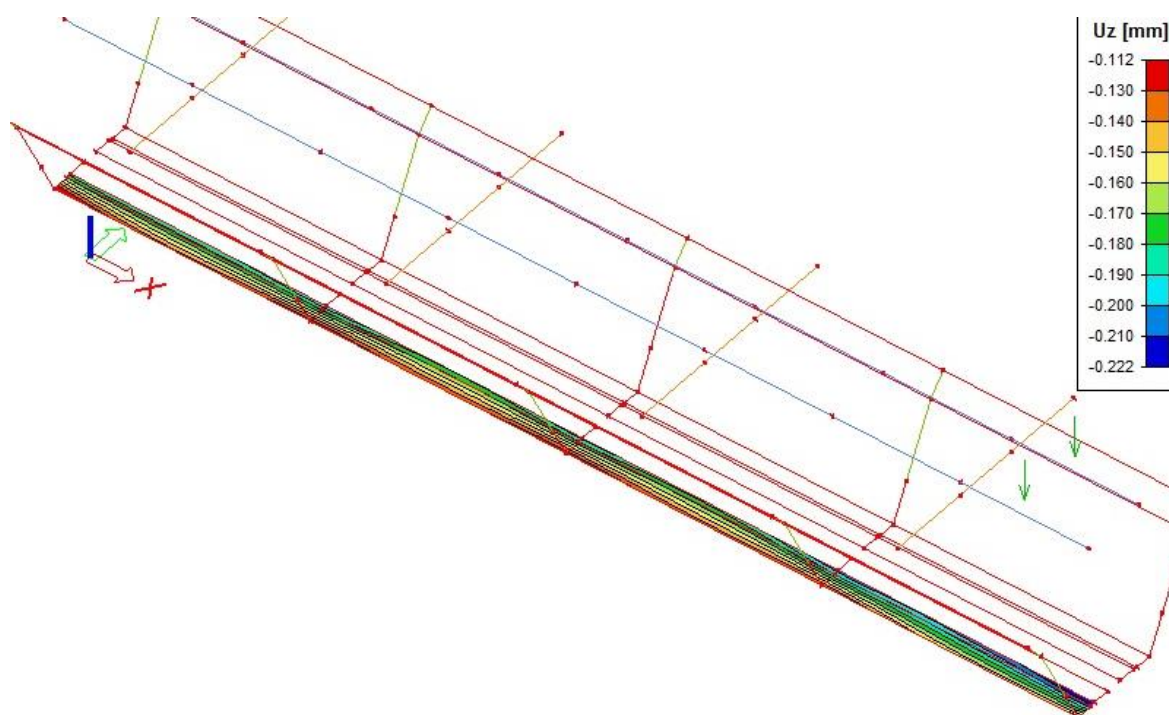
Obrázek P3.6 – Průřezové charakteristiky – příčný ocelový nosník

VÝSLEDKY DEFORMACÍ A OHYBOVÝCH MOMENTŮ

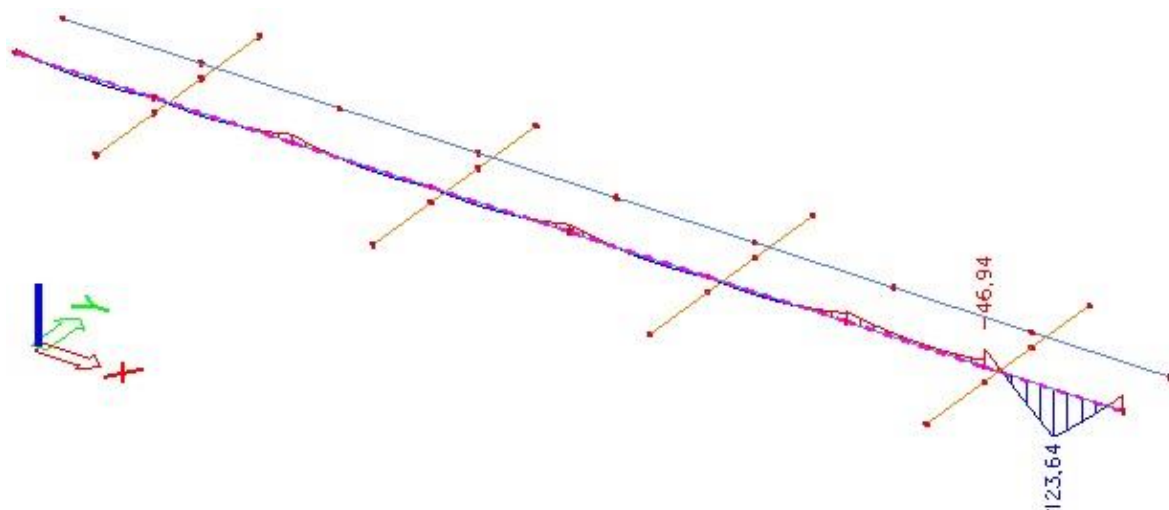
KÓJE Č. 5, 13 – ZS.01



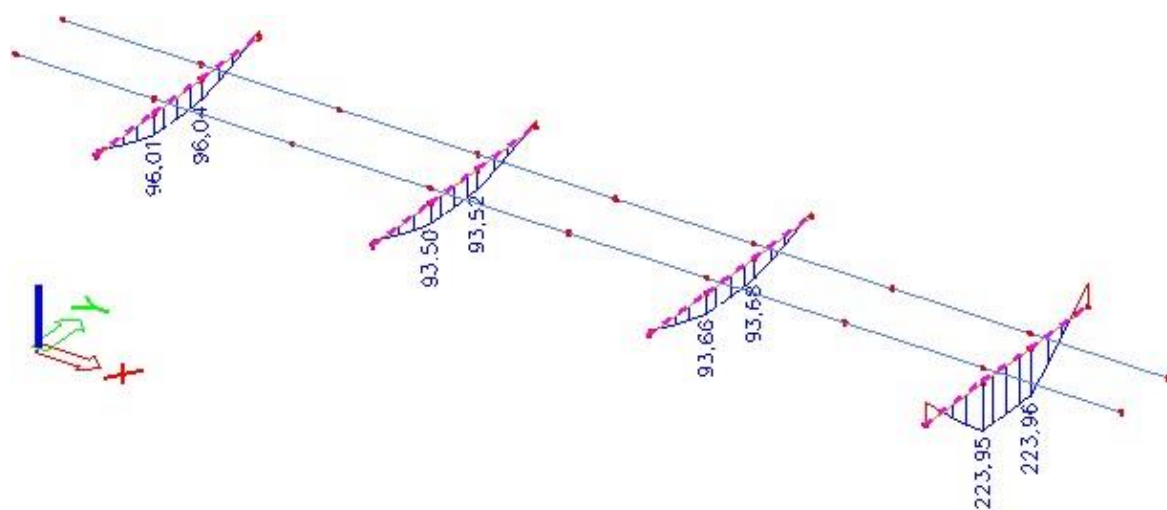
Obrázek P3.7 – Průběh svislých deformací na podélném nosníku – K.5a13_ZS.01



Obrázek P3.8 – Průběh svislých deformací na dně misky – K.5a13_ZS.01

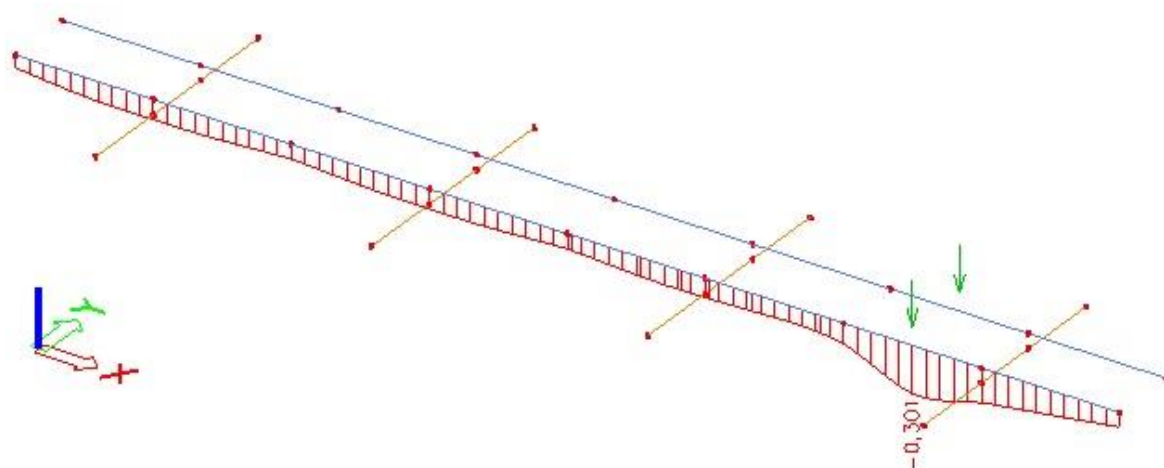


Obrázek P3.9 – Průběh ohybových momentů na podélném nosníku – K.5a13_ZS.01

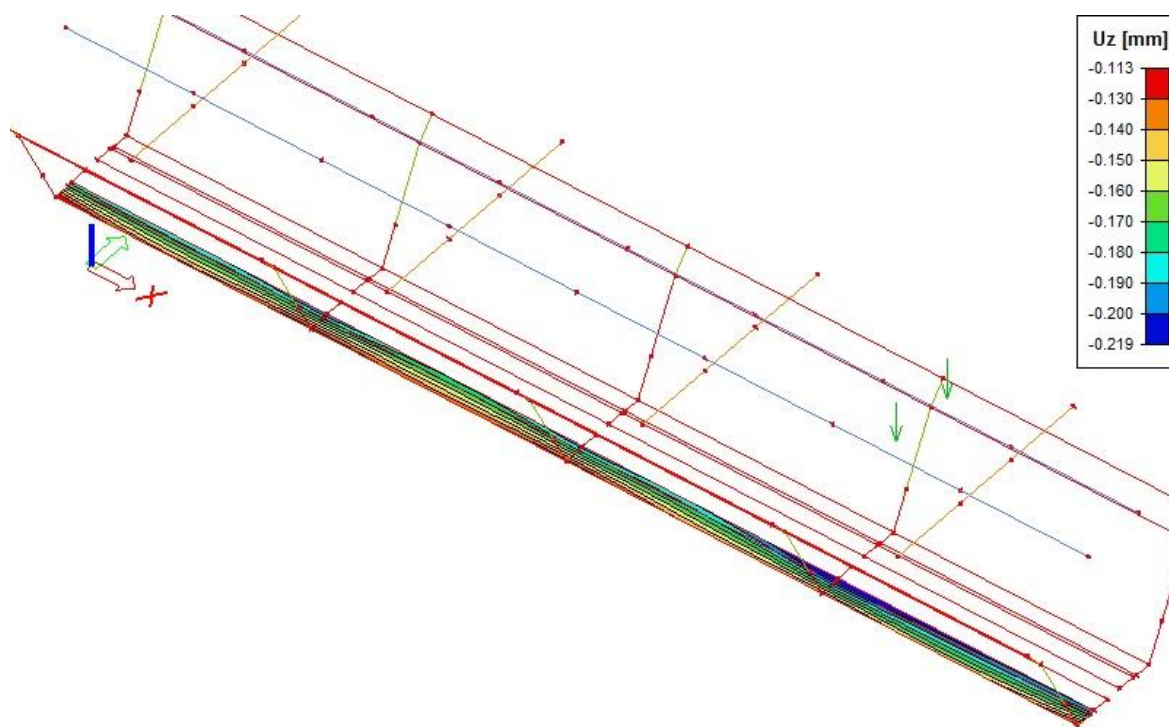


Obrázek P3.10 – Průběh ohybových momentů na příčném průvlaku – K.5a13_ZS.01

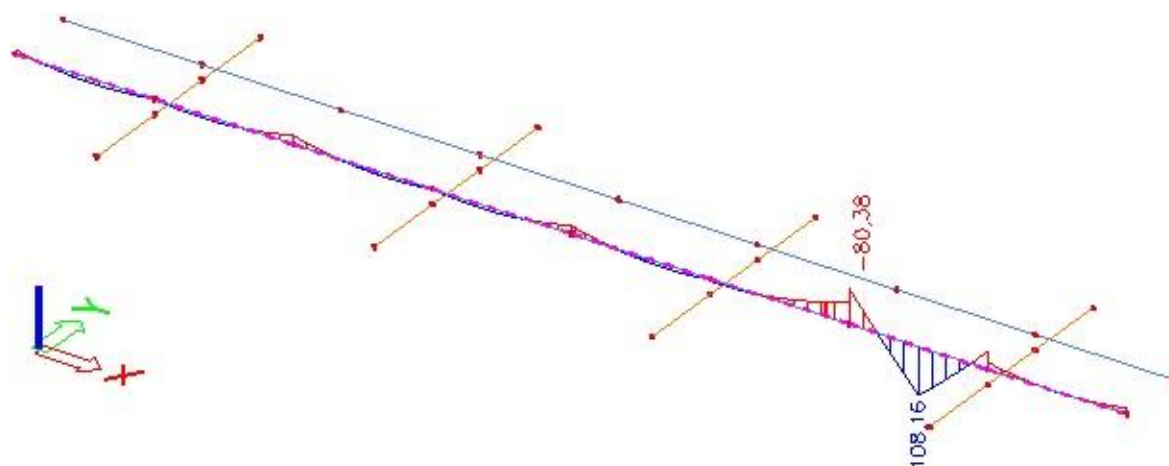
KÓJE Č. 5, 13 – ZS.03



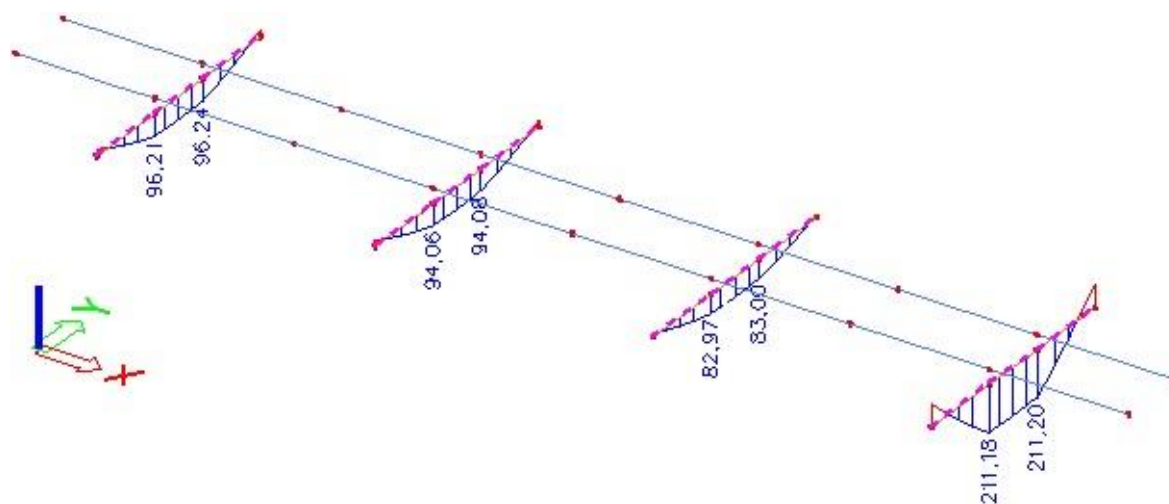
Obrázek P3.11 – Průběh svislých deformací na podélném nosníku – K.5a13_ZS.03



Obrázek P3.12 – Průběh svislých deformací na dně misky – K.5a13_ZS.03

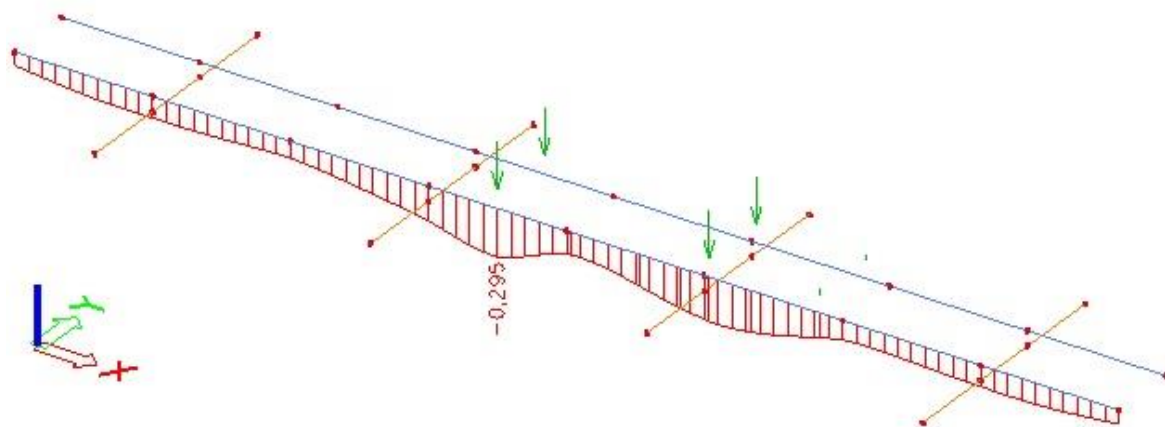


Obrázek P3.13 – Průběh ohybových momentů na podélném nosníku – K.5a13_ZS.03

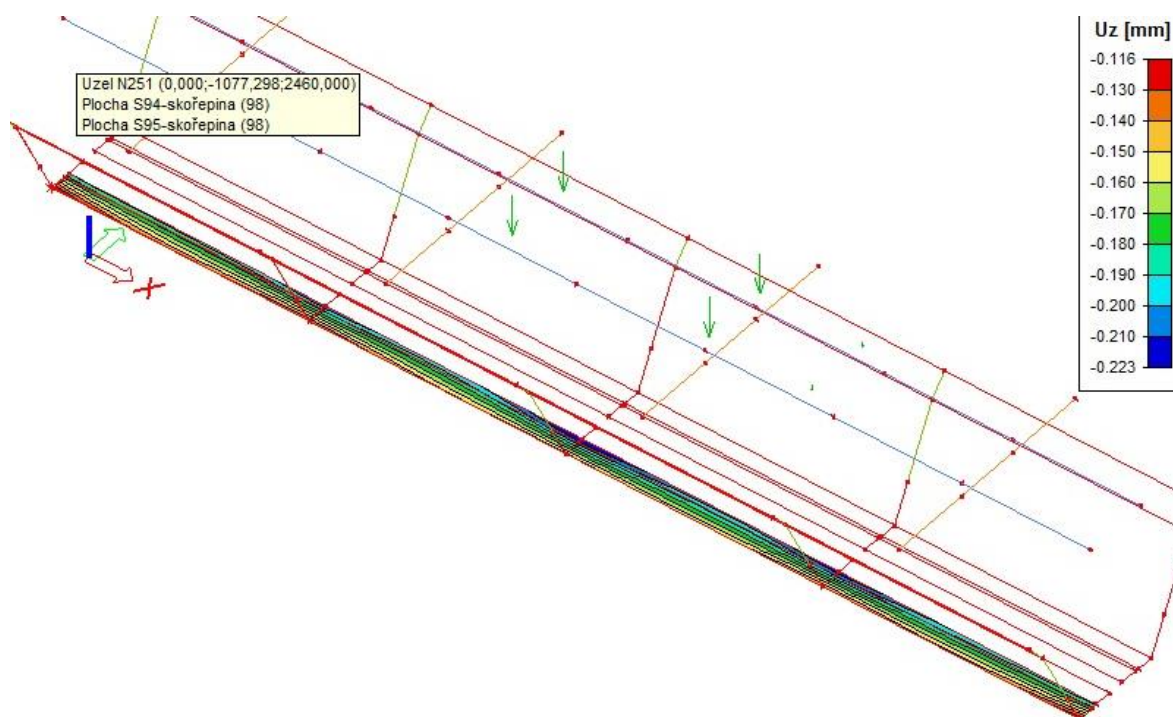


Obrázek P3.14 – Průběh ohybových momentů na příčném průvlaku – K.5a13_ZS.03

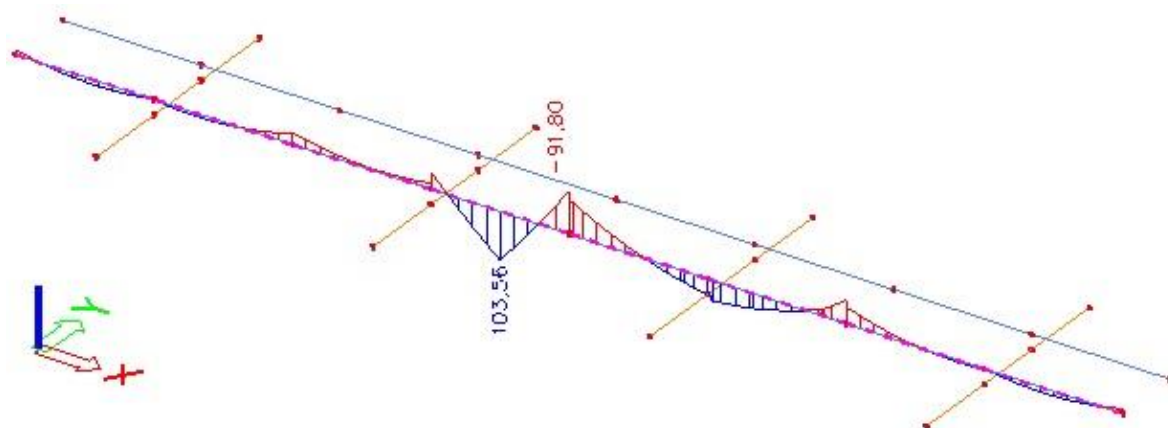
KÓJE Č. 11 – ZS.01



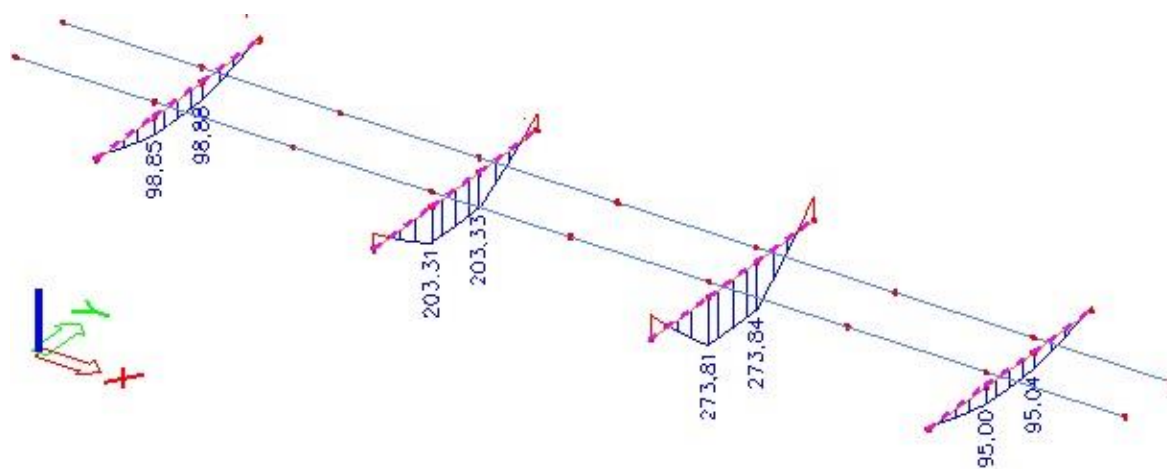
Obrázek P3.15 – Průběh svislých deformací na podélném nosníku – K.11_ZS.01



Obrázek P3.16 – Průběh svislých deformací na dně misky – K.11_ZS.01

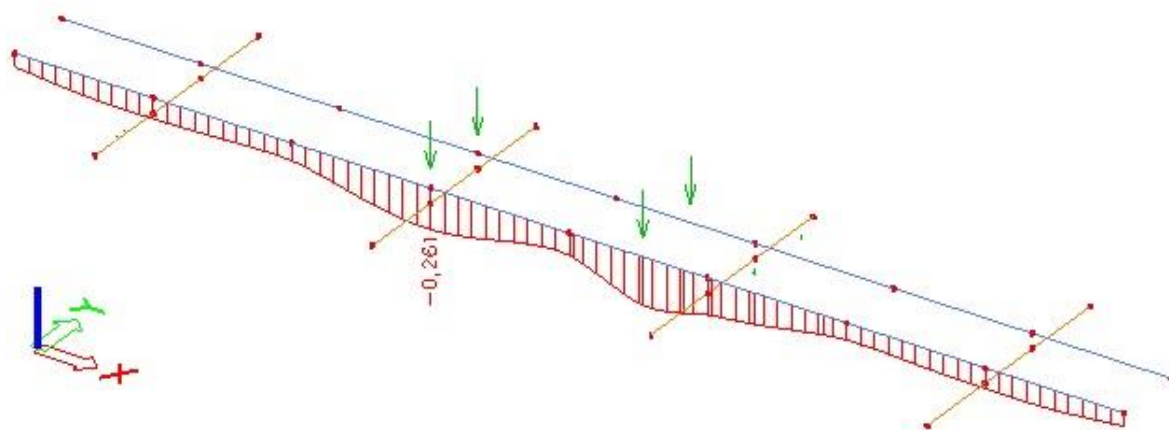


Obrázek P3.17 – Průběh ohybových momentů na podélném nosníku – K.11_ZS.01

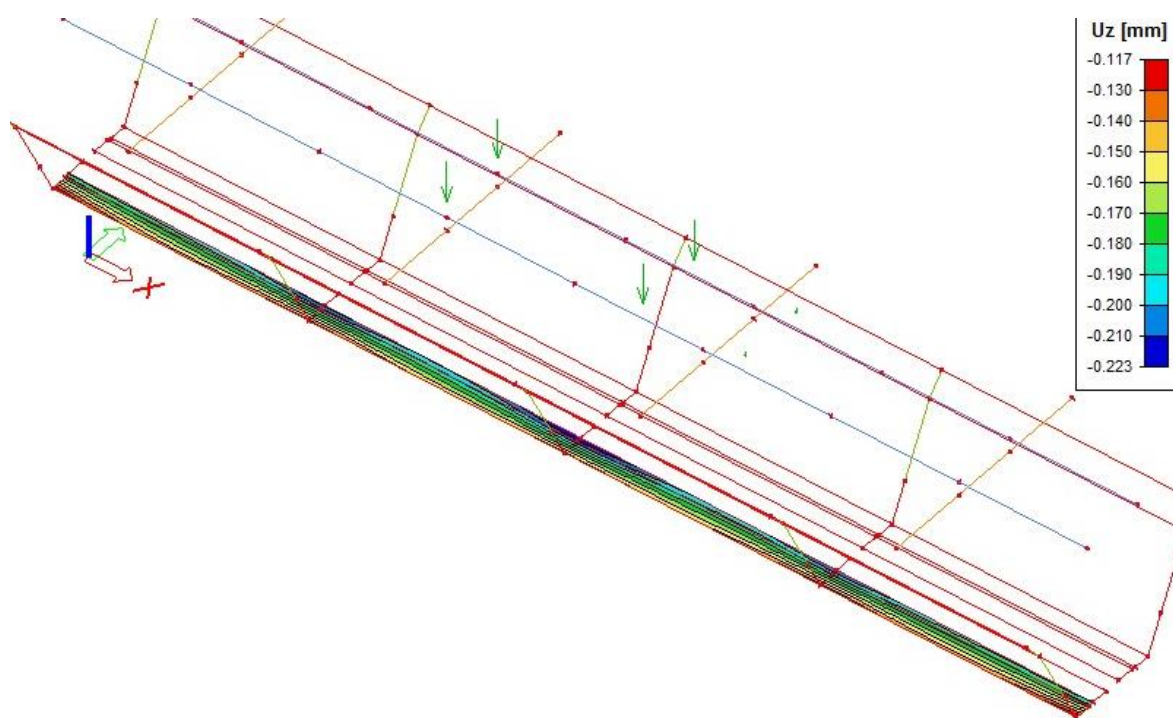


Obrázek P3.18 – Průběh ohybových momentů na příčném průvlaku – K.11_ZS.01

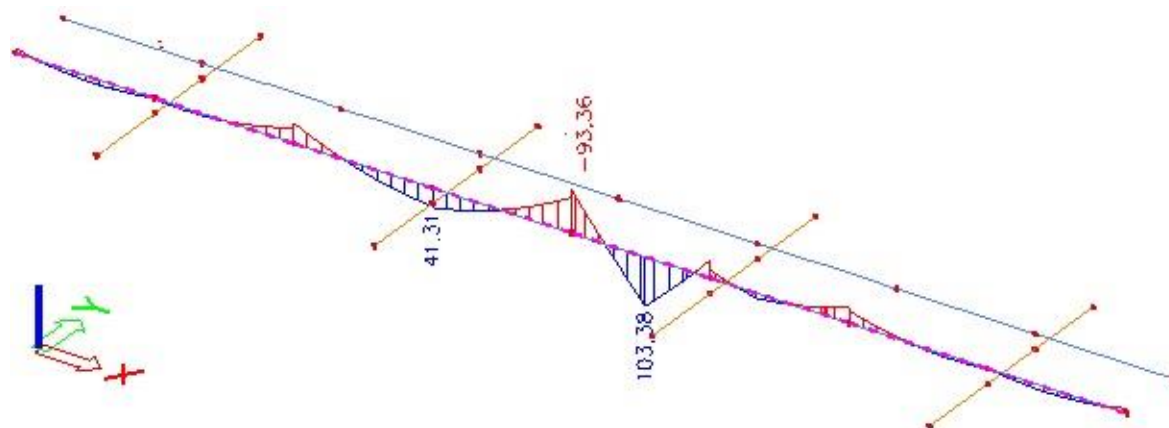
KÓJE Č. 11 – ZS.02



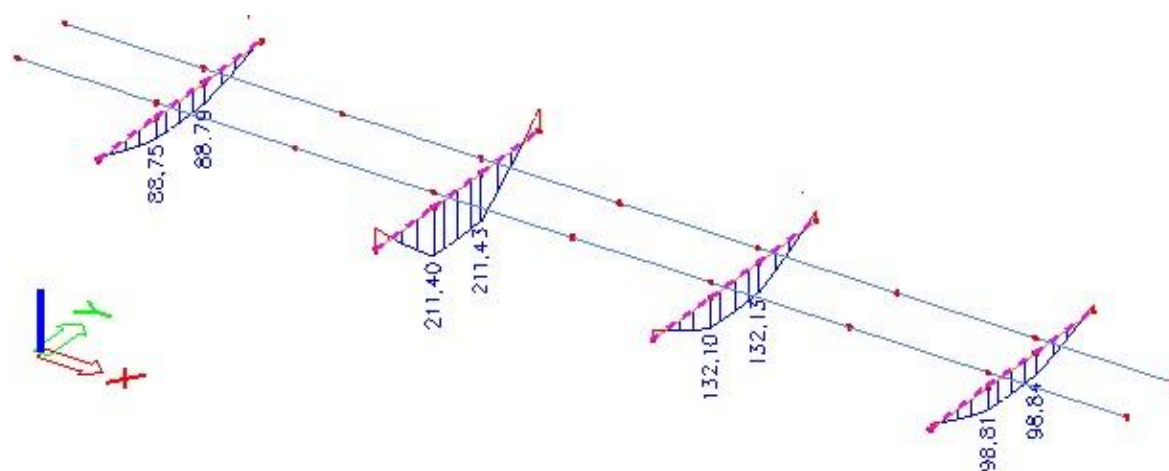
Obrázek P3.19 – Průběh svislých deformací na podélném nosníku – K.11_ZS.02



Obrázek P3.20 – Průběh svislých deformací na dně misky – K.11_ZS.02

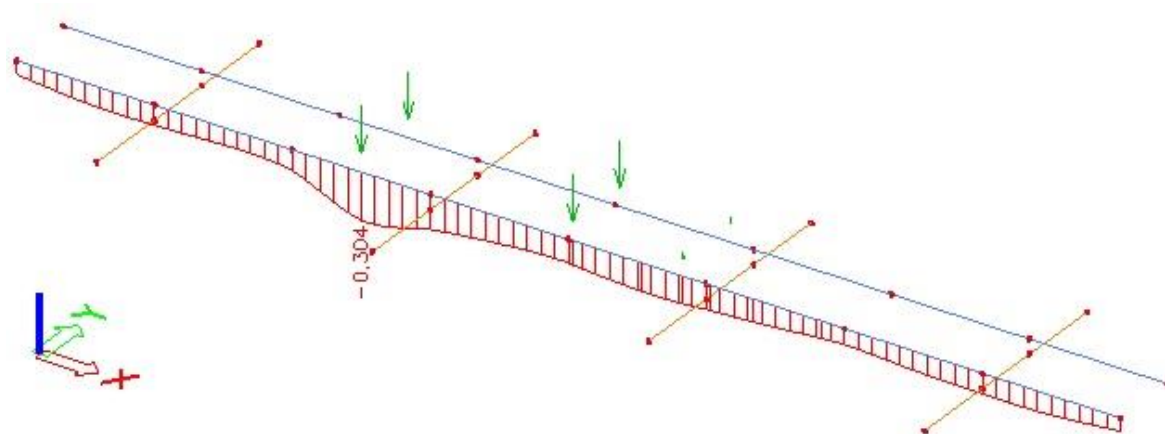


Obrázek P3.21 – Průběh ohybových momentů na podélném nosníku – K.11_ZS.02

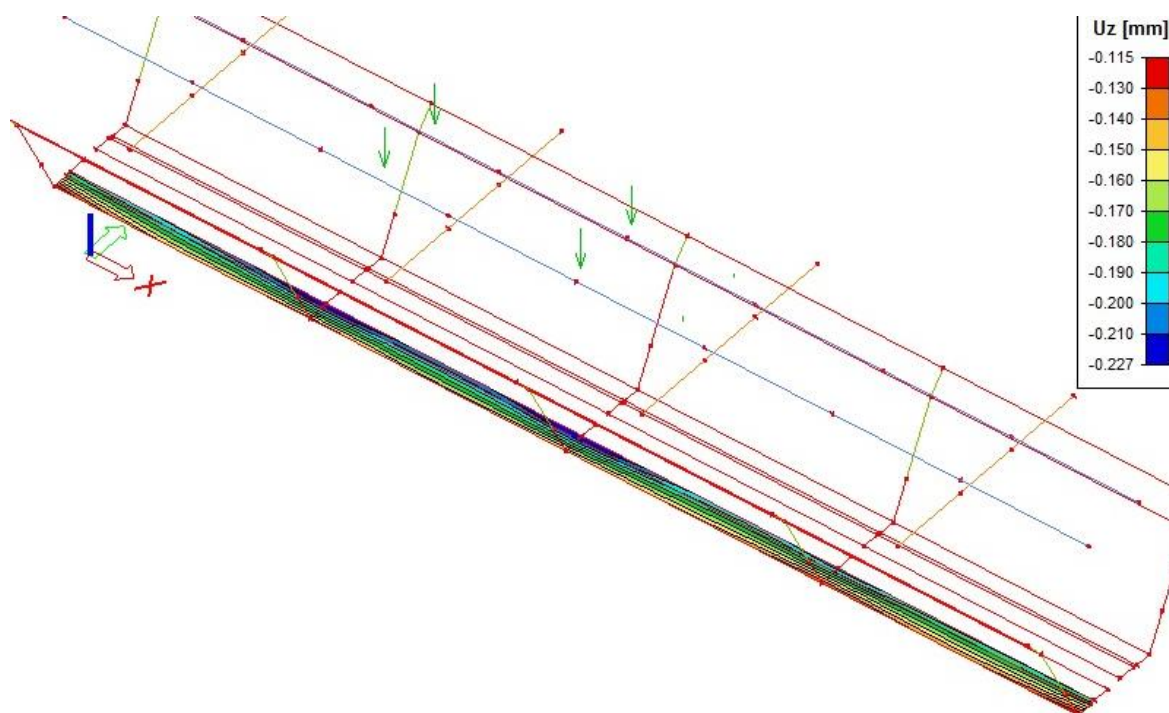


Obrázek P3.22 – Průběh ohybových momentů na příčném prűvlaku – K.11_ZS.02

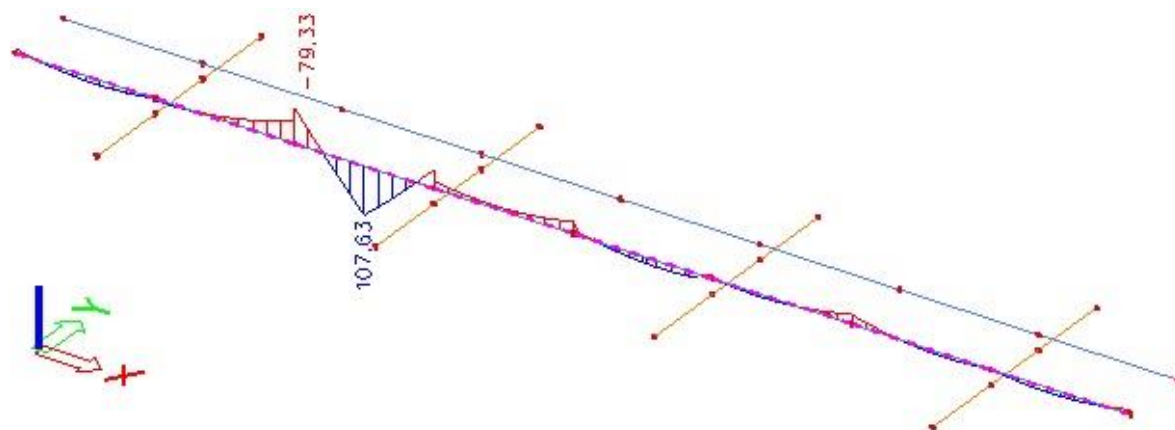
KÓJE Č. 11 – ZS.03



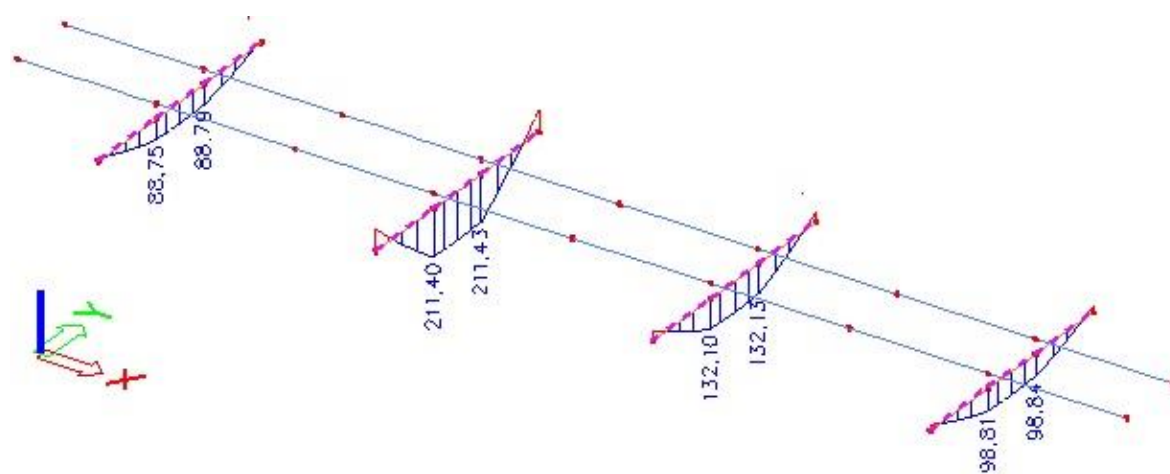
Obrázek P3.23 – Průběh svislých deformací na podélném nosníku – K.11_ZS.03



Obrázek P3.24 – Průběh svislých deformací na dně misky – K.11_ZS.03



Obrázek P3.25 – Průběh ohybových momentů na podélném nosníku – K.11_ZS.03



Obrázek P3.26 – Průběh ohybových momentů na příčném průvlaku – K.11_ZS.03