

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí



## DIPLOMOVÁ PRÁCE

Návrh a numerická analýza nového typu mostního  
závěru

Design and analysis of the new type of the expansion  
joint

**Autor:** Bc. Jiří Kašpárek

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Pavel Ryjáček, Ph.D.

Praha, 2017



## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Kašpárek Jméno: Jiří Osobní číslo: \_\_\_\_\_  
Zadávací katedra: Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí  
Studijní program: Stavební inženýrství  
Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby

### II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Návrh a numerická analýza nového typu mostního závěru

Název diplomové práce anglicky: Design and analysis of the new type of the expansion joint

Pokyny pro vypracování:

Návrh řešení nového typu mostního závěru, provedení experimentálních měření, validace numerického modelu, analýza vlivu poškození na dynamické chování mostního závěru.

Seznam doporučené literatury:

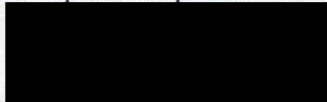
Fryba, L. Dynamika železničních mostů. 1. vyd. Praha: Academia, 1992. 328 s. ISBN 80-200-0262-6

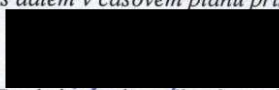
Jméno vedoucího diplomové práce: doc. Ing. Pavel Ryjáček, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 3.10.2016

Termín odevzdání diplomové práce: 8.1.2017

Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

  
Podpis vedoucího práce


  
Podpis vedoucího katedry

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

*Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.*

11.10.2016

Datum převzetí zadání

  
Podpis studenta(ky)

## **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci napsal samostatně a výhradně s použitím uvedených zdrojů.

V Praze dne 8. ledna 2017

Bc. Jiří Kašpárek

.....

## **Poděkování**

Tímto bych chtěl poděkovat doc. Ing. Pavlu Ryjáčkovi za odborné vedení této práce, rady a věcné připomínky a svým rodičům za podporu během studia. Zároveň bych chtěl poděkovat Technologické agentuře ČR, která celý projekt TA04030714 – Progresivní mostní závěr s nízkou hlučností a inteligentními prvky financuje.

## **Abstrakt česky**

Na základě dosavadních zkušeností se ukazuje, že mostní závěry (MZ) jsou v současné době místem častých poruch mostů a vyžadují pravidelnou, náročnou údržbu, která může vyžadovat i uzavření mostu a následně způsobuje komplikace v dopravě. MZ také často bývají nejhlučnějšími prvky mostní konstrukce, což je problém zejména v intravilánu.

Obsahem této práce je vývoj nového, progresivního typu MZ se sníženou hlučností a inteligentními prvky, které budou umožňovat on-line detekci jeho poškození. Vývoj spočívá v návrhu celkové konstrukce MZ a následném návrhu konstrukčních detailů.

Segment nově vyvinuté konstrukce byl vyroben a následně experimentálně vyzkoušen v laboratoři. Na základě laboratorních zkoušek byla ověřena únosnost vzorku a byl validován a optimalizován předběžný výpočetní model. Na upraveném, přílehavém modelu bylo provedeno ověření částí MZ na únavu.

V neposlední řadě se práce věnuje analýze poškození MZ, jejímž cílem je určit indikátory poškození, tedy v reálném čase měřené hodnoty, jejichž změna (navýšení) bude znamenat poškození MZ.

## **Klíčová slova**

Mostní závěr, numerická analýza, experimentální ověření, analýza poškození

## **Abstrakt anglicky**

Based on existing experience, expansion joints (EJ) are currently one of the most defective component of bridges. EJ also demand frequent, severe maintenance, which may demand closure of a bridge. The closure consequently causes traffic complications. EJ are also often the noisiest component of a bridge structure, this causes problems especially in urban areas.

The issue of this thesis is to develop a new, progressive type of EJ with silent behaviour and intelligent components. These components will enable on-line detection of EJ's defection. The development consists of designing EJ's overall structure and consequently designing structural details.

A segment of this newly developed structure was manufactured and experimentally validated in laboratory. Based on laboratory experiment, bearing capacity of the sample was validated, also the preliminary computational model was validated and optimized, which allowed fatigue verification of particular components of the EJ.

Another part of this thesis is damage analysis. Its purpose is to choose performance indicators, which will show expansion joint's condition according to real-time monitoring.

## **Key words**

Expansion joint, numerical analysis, experimental validation, damage analysis

# Obsah

1	Úvod .....	1
2	Teoretický popis zkoumané problematiky.....	2
2.1	Typy mostních závěrů .....	2
2.2	Návrhové parametry a konstrukční provedení mostních závěrů .....	10
2.3	Průkazní zkoušky mostních závěrů.....	12
2.4	Kontrolní zkoušky mostních závěrů .....	15
2.5	Dynamika stavebních konstrukcí .....	16
3	Návrh MZ.....	20
3.1	Lamela .....	22
3.2	Roznášecí mechanismus.....	24
3.3	Pevná krabice roznášecího mechanismu .....	25
3.4	Posuvná krabice .....	27
3.5	Těsnící a tlumící profily .....	29
3.6	Řídící systém .....	30
4	Posouzení .....	31
4.1	Výpočetní model .....	31
4.2	Statické zatížení.....	33
4.3	Kombinace zatížení na MSÚ.....	36
4.4	Statické zatížení na únavu .....	36
4.5	Kombinace zatížení na únavu FAT .....	37
4.6	Dynamické zatížení na únavu FAT-DYN .....	37
4.7	Výsledky .....	37
4.8	Posouzení na MSÚ .....	38
4.9	Posouzení na únavu .....	39
5	Experimentální ověření - modální analýza .....	42
5.1	Rozmístění snímačů .....	42
5.2	Nastavení rozevření dilatační spáry.....	43
5.3	Podpření konstrukce .....	44
5.4	Zkouška bez tlumících profilů.....	44
5.5	Zkouška s tlumícími profily.....	44
5.6	Výsledky .....	45
6	Experimentální ověření - Statická zatěžovací zkouška.....	51
6.1	Pozice a způsob zatížení .....	51
6.2	Zatěžovací stavy .....	51
6.3	Rozmístění snímačů .....	52
6.4	Průběh SZS 1 .....	54

6.5	Průběh SZS 2 .....	56
6.6	SZS 4 .....	58
6.7	SZS 6 .....	61
6.8	SZS 7 .....	64
6.9	Výpočetní model .....	67
7	Numerická analýza poškození .....	69
7.1	Výpočetní modely .....	69
7.2	Poruchy .....	71
7.3	Zatížení .....	72
7.4	Porovnání zrychlení deformací lamely .....	73
7.5	Porovnání deformací lamely .....	80
7.6	Porovnání zrychlení a průhybů traverzy .....	87
7.7	Porovnání vlastních frekvencí a tvarů .....	92
7.8	Závěry z analýzy poškození .....	107
8	Závěr .....	108
	Zdroje .....	109
	Použité programy .....	109
	Seznam příloh .....	110
	Segment MZ pro experiment .....	110
	Segment MZ pro zkušební stand .....	110
	Zkušební stand .....	110

## Seznam použitých zkratek

ČR	Česká republika
DP	Dolní pásnice
EC	Experimentální centrum Fakulty stavení ČVUT v Praze
FSv	Fakulta stavební
HP	Horní pásnice
K132	Katedra mechaniky Fakulty stavení ČVUT v Praze
KD	Kategorie detailu
MZ	Mostní závěr
NK	Nosná konstrukce
PK	Pozemní komunikace
SZZ	Statická zatěžovací zkouška
TAČR	Technologická agentura České republiky
TePř	Technologický předpis
TKP	Technické kvalitativní podmínky
TNV	Těžká nákladní vozidla
TP	Technické podmínky
TPP	Technický a prováděcí předpis



## 1 Úvod

MZ v současné době vykazují časté poruchy a vyžadují obtížnou údržbu. Tato skutečnost nejen způsobuje komplikace v dopravě a objížďky na pozemních komunikacích, ale také vyžaduje nemalé finanční náklady Ředitelství silnic a dálnic na opravu poruch. Poruchy těsnění dilatační spáry MZ mohou navíc způsobit poškození celého mostu a vyžádat si tak ještě více komplikací a finančních prostředků.

Cílem této práce je návrh nového typu mostního závěru, který bude odolný, tichého provedení a bude umožňovat indikaci poškození.

Pro návrh samotné konstrukce MZ byly použity progresivní prvky, které zjednoduší jeho konstrukci a obecně zlepší jeho funkčnost a chování. Pro návrh a posouzení závěru byl vytvořen komplexní výpočetní model z prostorových prvků.

Segment navrženého MZ byl vyroben a následně experimentálně ověřen. Na základě experimentálních měření byl komplexní výpočetní model pro větší přiléhavost optimalizován a validován.

V rámci projektu „Progresivní mostní závěr s nízkou hlučností a inteligentními prvky“ programu ALFA TAČR bylo v roce 2015 na mostě v km 67,15075 dálnice D5 u Ejpovic provedeno experimentální měření mostního závěru. Tento MZ byl vybrán, protože obsahoval zároveň poškozené a nepoškozené roznášecí mechanismy a umožnil tak experimentální porovnání dynamického chování MZ bez poškození a s poškozením. Výsledky experimentu ukázaly, že hodnoty deformací, zrychlení deformací i normálového napětí se při poškození významně zvyšují a je tedy možné pomocí nich indikovat poškození konstrukce MZ. Této skutečnosti bylo využito jako podkladu pro analýzu vlivu poškození na dynamické chování nového typu MZ a následný návrh indikátorů poškození a monitorovacího systému.

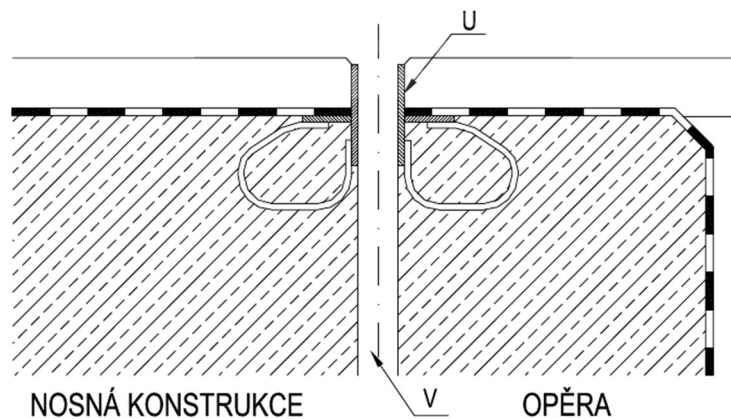
## 2 Teoretický popis zkoumané problematiky

Mostní závěry pozemních komunikací slouží jako dilatační zařízení na mostech, jejich funkcí je bezpečné převedení vozidel přes dilatační spáru.

### 2.1 Typy mostních závěrů

#### 2.1.1 Volná dilatační spára

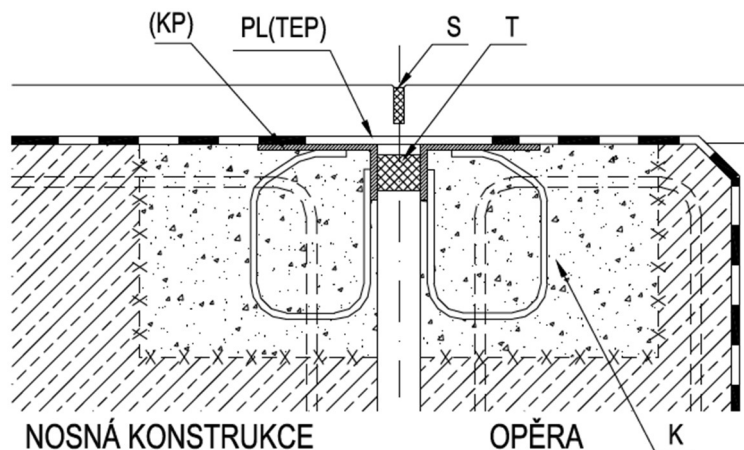
Nejjednodušším řešením kompenzace dilatačních posunů je ponechání volné dilatační spáry, netěsněného povrchového MZ. Ta se smí použít při celkovém posunu do 20 mm na mostech silnic III. třídy s nízkou intenzitou dopravy a na obslužných místních komunikacích, případně komunikacích se smíšeným provozem a účelových komunikacích. Na mostech dálnic, rychlostních silnic, silnic I. a II. třídy a místních komunikacích rychlostních a sběrných je doporučeno používat těsněné mostní závěry. Ve schématu na Obr. 1 je volná dilatační spára (V) a ukončení vozovky pomocí ocelového profilu (U).



Obr. 1: Schéma volné dilatační spáry [12]

#### 2.1.2 Podpovrchový mostní závěr

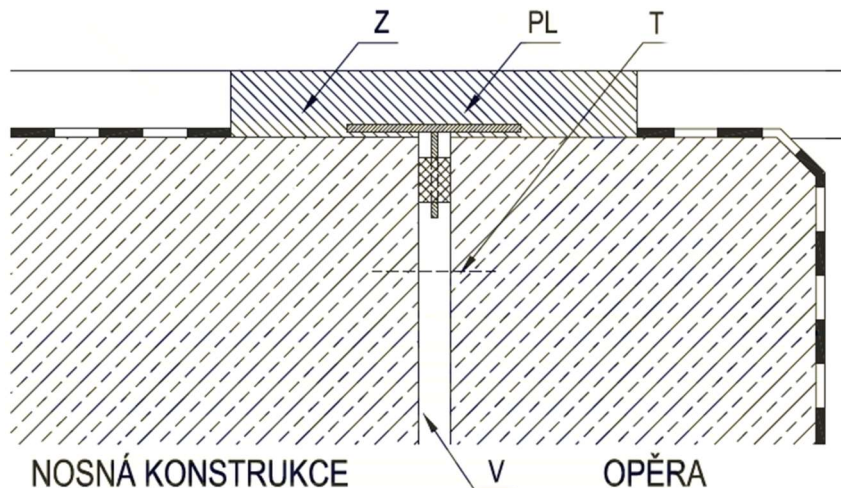
Tento typ závěrů se uplatní pro dilatační pohyby do cca 20 mm, běžně se používá u mostů s malým rozpětím, případně nad pevnými ložisky mostů s rozpětím do 30 m. Vozovka nad závěrem musí umožnit 1,2 násobek dilatačního posunu mostu po celou dobu životnosti. Na Obr. 2 jsou vidět komponenty podpovrchového MZ – krycí plech (PL) / těsnicí prvek (TEP), kotvení (K), krajové profily (KP), úzkou spáru (S) v obrusné vrstvě vozovky. Těsnění se může umístit i pod úroveň závěru (T).



Obr. 2: Schéma podpovrchového MZ [12]

### 2.1.3 Elastický mostní závěr

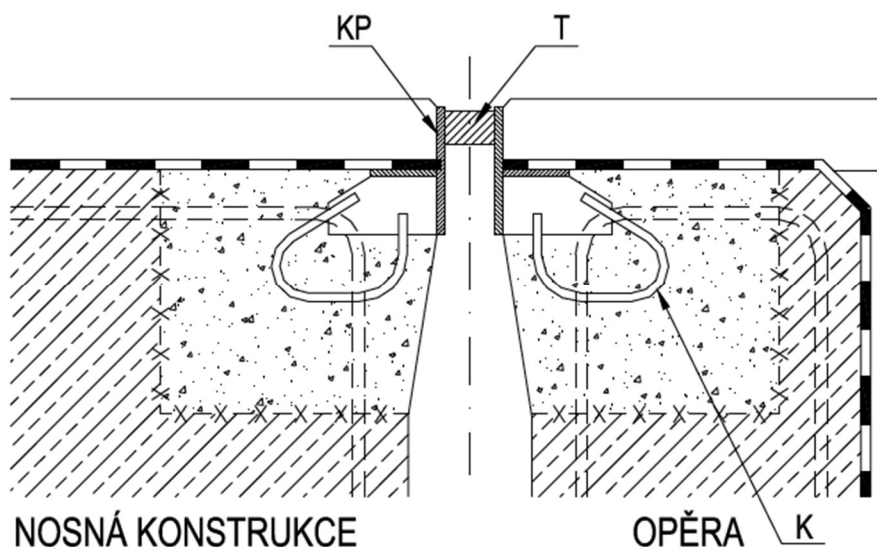
Řešením pro mosty menších rozpětí s malými intenzitami dopravy jsou elastické mostní závěry. I tyto závěry je možné umístit nad pevná ložiska mostů s rozpětím do 30 m. Konstrukce elastického MZ je na Obr. 3. Zálivka (Z) je tvořena asfaltem vyztuženým síťovinou, jako podpora zde slouží ocelový krycí plech (PL), pod kterým je umístěn těsnící profil (T). U těsnícího profilu je ponechán záhyb, díky kterému je profil schopen odolávat dilatačním pohybům mostu.



Obr. 3: Schéma elastického MZ [12]

### 2.1.4 Mostní závěr s jednoduchým těsněním spáry

Pro mosty s dilatačními pohyby do 80 – 100 mm se používají závěry s jednoduchým těsněním spáry. Těsnící profily (T) jsou umístěny mezi krajními „F“ profily (KP), v těsnění je opět ponechán záhyb pro kompenzaci teplotních změn, schéma viz Obr. 4. Krajobé profily jsou kotveny (K) do mostu nebo závěrné zídky. Pohled shora na MZ na mostě u Ejovic je na Obr. 5 vlevo, vpravo pak pohled z úložného prahu opěry na konstrukci závěru v Klatovech.



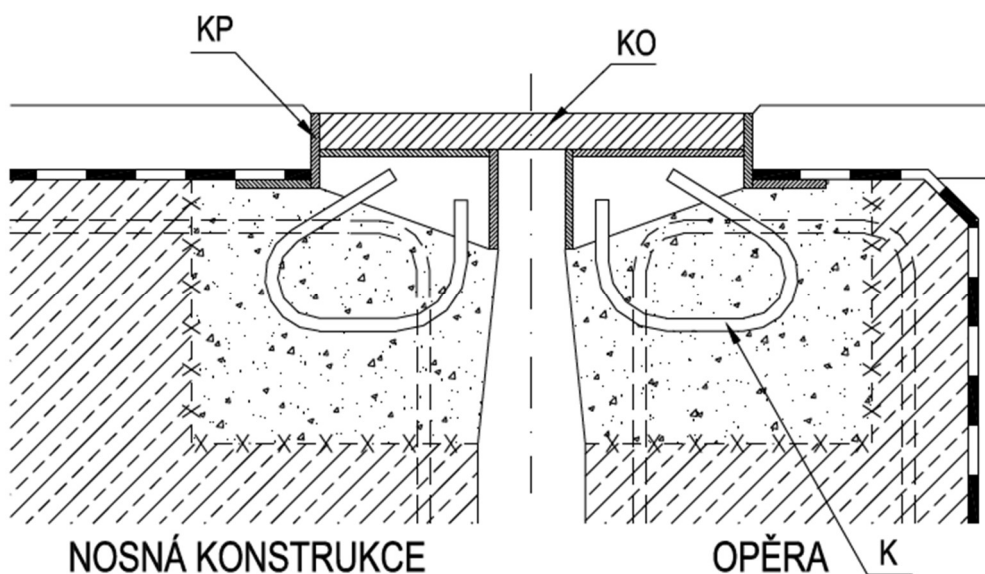
Obr. 4: Schéma konstrukce MZ s jednoduchým těsněním spáry [12]



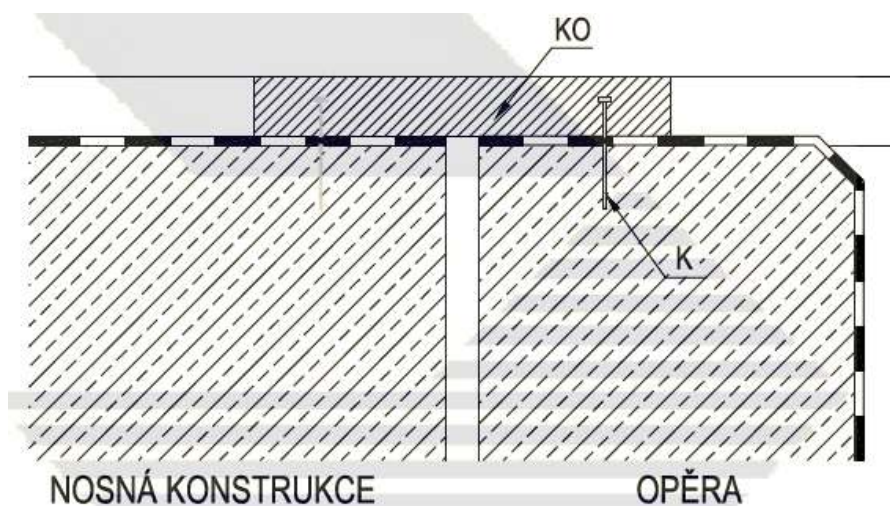
Obr. 5: Vlevo pohled shora (Ejovice), vpravo pohled z úložného prahu (Klatovy)

### 2.1.5 Kobercový mostní závěr

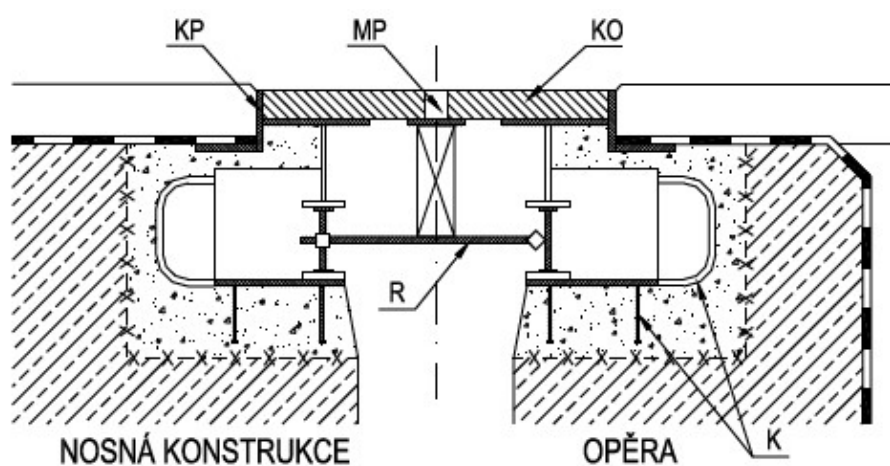
Kobercové závěry se již na mostech PK v ČR u novostaveb nenavrhují. Závěr sestává z koberce (KO), krajových profilů (KP) a kotvení (K), viz Obr. 6. Existuje i varianta bez krajových profilů, kdy je koberec kotven přímo do NK mostu nebo závěrné zídky, viz Obr. 7. Pro větší dilatační pohyby se uplatní kobercový MZ s mezilehlým profilem (MP), který podpírá koberec, mezilehlý profil je podporován roznášecím mechanismem (R), schéma na Obr. 8.



Obr. 6: Schéma kobercového MZ s krajovými profily [12]



Obr. 7: Schéma koberecového MZ bez krajových profilů [12]



Obr. 8: Schéma koberecového MZ s mezilehlým profilem [12]

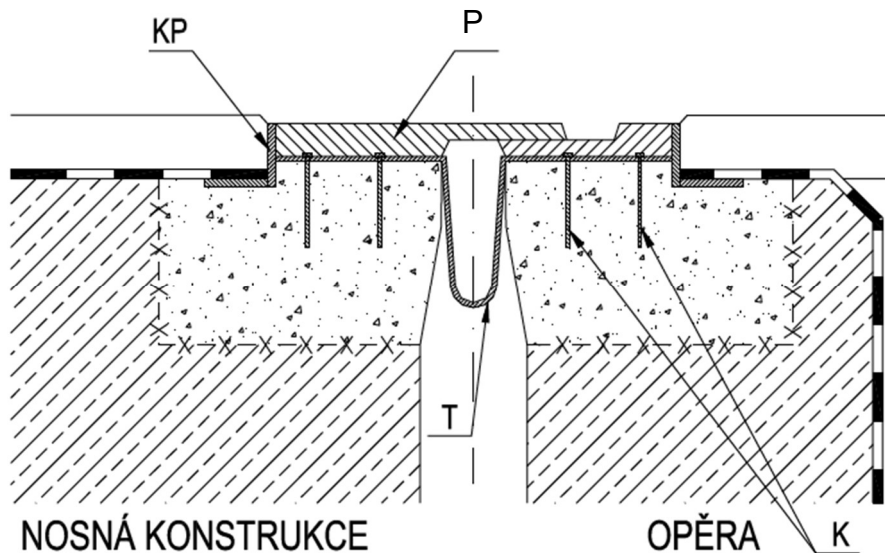
#### 2.1.6 Hřebenový mostní závěr

Hřebenový (prstový) MZ je použit například na Trojském mostě v pražských Holešovicích.

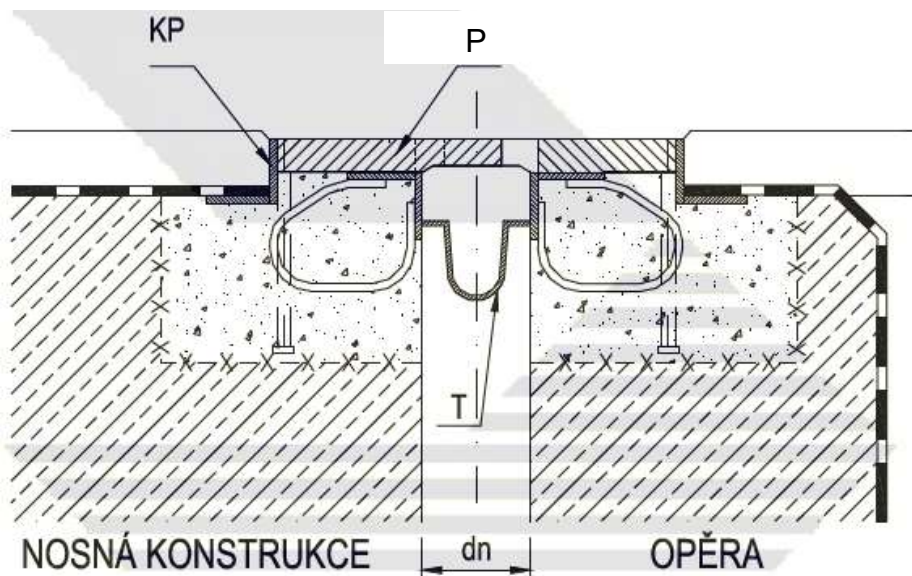


Obr. 9: Vlevo konstrukce hřebenového MZ [5], vpravo pohled shora (Trojský most) [5]

Konstrukce je tvořena prsty (P), ty jsou spojeny s krajovým profilem (KP), který je kotven do NK mostu/opěře. Pro statické schéma prstů existují 2 alternativy. První z nich znázorňuje Obr. 10, prsty jsou zde na jednom konci vetknuté a na druhém posuvně uložené, působí tedy jako nosníky. Ve druhé alternativě (Obr. 11) není volný konec vůbec podepřený a prsty staticky působí jako konzoly. Tato varianta je určena pro širší dilatační spáry, prsty musí být nadimenzované na větší namáhání.



Obr. 10: Schéma konstrukce hřebenového MZ s podepřenými prsty [12]



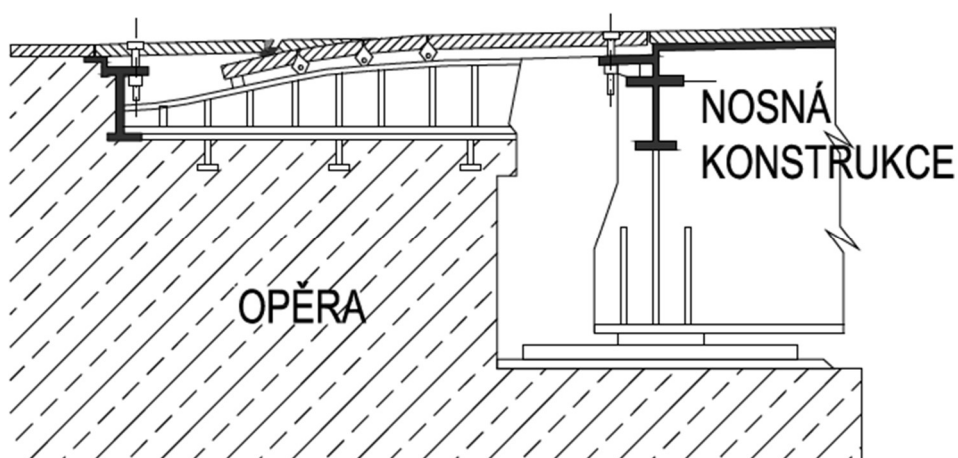
Obr. 11: Schéma konstrukce hřebenového MZ s konzolovými prsty [12]

### 2.1.7 Podporovaný mostní závěr

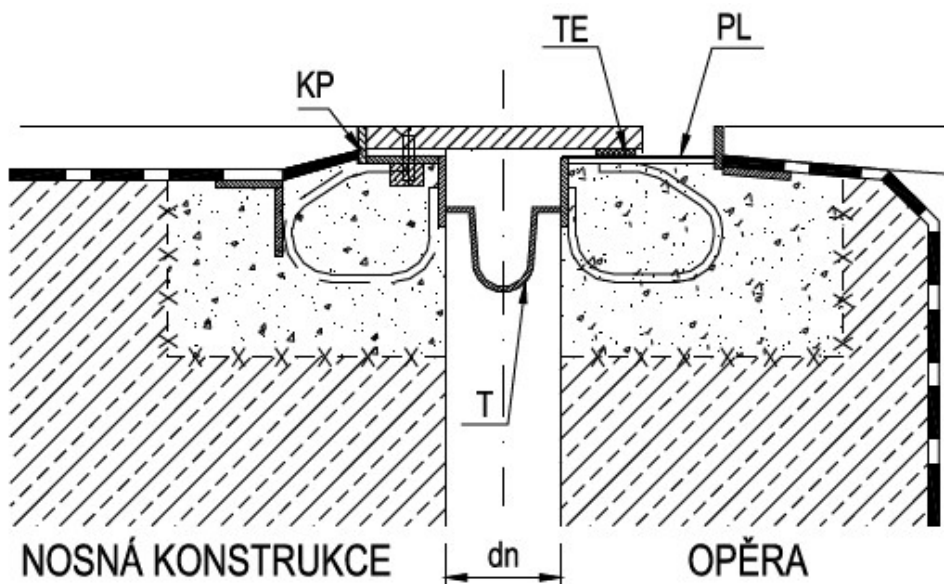
Nejnámějším použitím podporovaného MZ v ČR je bezesporu Žďákovský most, fotky k dispozici na Obr. 12, po rekonstrukci mostu byl podporovaný MZ nahrazen novým MZ. Plech nebo více samostatných plechů se pohybuje po rovinné nebo zakřivené ploše, na jedné straně je plech vetknutý do mostu, na druhé kluzně uložen na opěře, schéma viz Obr. 13. Konstrukce podporovaného MZ může být také tvořena krycím plechem, který je na jedné straně zakotven do krajových profilů (KP) a na druhé kluzně uložen na vrstvě teflonu (TE) - Obr. 14.



Obr. 12: Vlevo pohled shora [8], vpravo vystavený segment podporovaného MZ (oboje Žďákovský most)



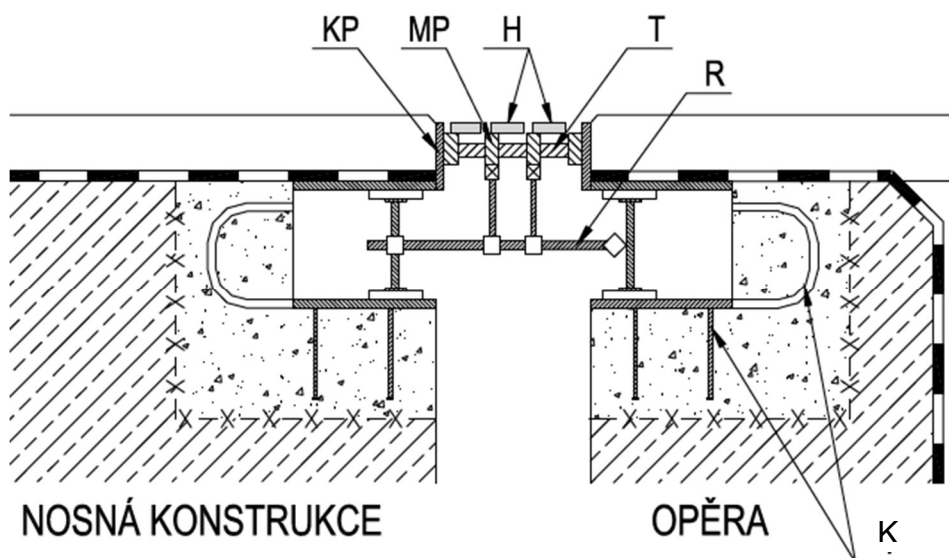
Obr. 13: Schéma podporovaného MZ [12]



Obr. 14: Schéma podporovaného MZ s krycím plechem [12]

### 2.1.8 Lamelový mostní závěr

Skladba lamelového mostního závěru je patrná z Obr. 15. Krajní profily (KP) jsou pomocí kotvení (K) upevněny do mostu nebo opěry. Mezilehlé profily (MP) jsou podporovány roštovým mechanismem (R), ten se skládá z traverz, které nesou mezilehlé profily, a z řídicího systému, který zabezpečuje rovnoměrné rozevření spár MZ. Mezi jednotlivé ocelové profily jsou vsazeny těsnící profily (T). Z důvodu snížení hluku při přejezdu může být upraven povrch horních pásnic lamel a krajových profilů (H). Obr. 16 ukazuje použití lamelového MZ v praxi, Obr. 17 celkový pohled na konstrukci lamelového MZ s roštovým roznášecím mechanismem.



Obr. 15: Schéma lamelového MZ s roštovým roznášecím mechanismem [12]



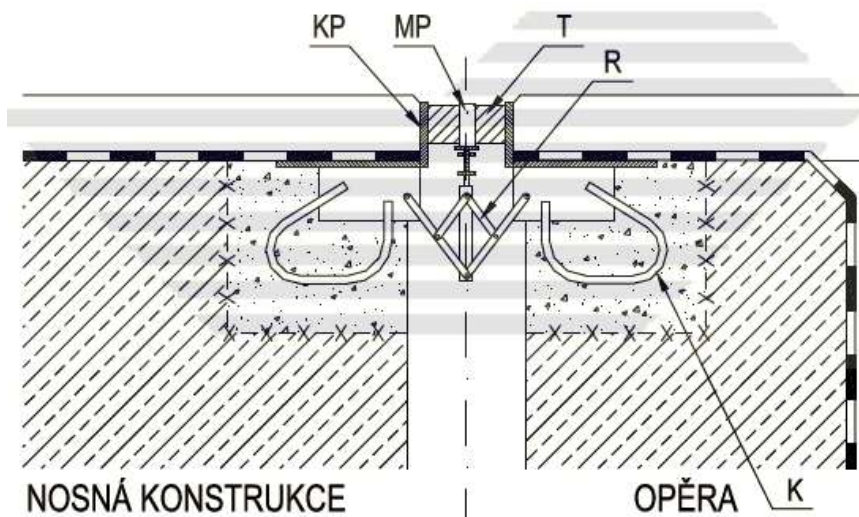
Obr. 16: Vlevo pohled shora na MZ na mostě přes Černovický potok, vpravo roznášecí mechanismus na dálničním mostě přes Ohři





Obr. 17: Konstrukce lamelového MZ [5]

Dříve se používala varianta lamelového MZ s nůžkovým roznášecím mechanismem, schéma konstrukce na Obr. 18. Z důvodu častých trhlin ve svarech a dalších systémových poruch tohoto typu MZ byl nůžkový mechanismus v ČR zakázán pro mosty na dálnicích, rychlostních komunikacích a silnicích I. třídy. Na Obr. 19 je zobrazen MZ na dálničním mostě v Ejpovicích, závěr byl již vyměněn za typ s roštovým mechanismem.



Obr. 18: Schéma lamelového MZ s nůžkovým roznášecím mechanismem [12]



Obr. 19: Nůžkový mechanismus na mostě v Ejpovicích

## 2.2 Návrhové parametry a konstrukční provedení mostních závěrů

### Jmenovitý dilatační posun MZ

Celkový rozsah dilatačního posunu od obou krajních poloh závěru (obecně ve třech směrech), na který je konstrukce mostního závěru dimenzována. Rozsah je zpravidla dán jedním údajem v mm, případně součtem posunu kladného a záporného od základní polohy.

### Návrhový dilatační posun MZ

Největší celkový rozsah dilatačního posunu (obecně ve třech směrech) v provozním stavu po celou dobu životnosti mostu.

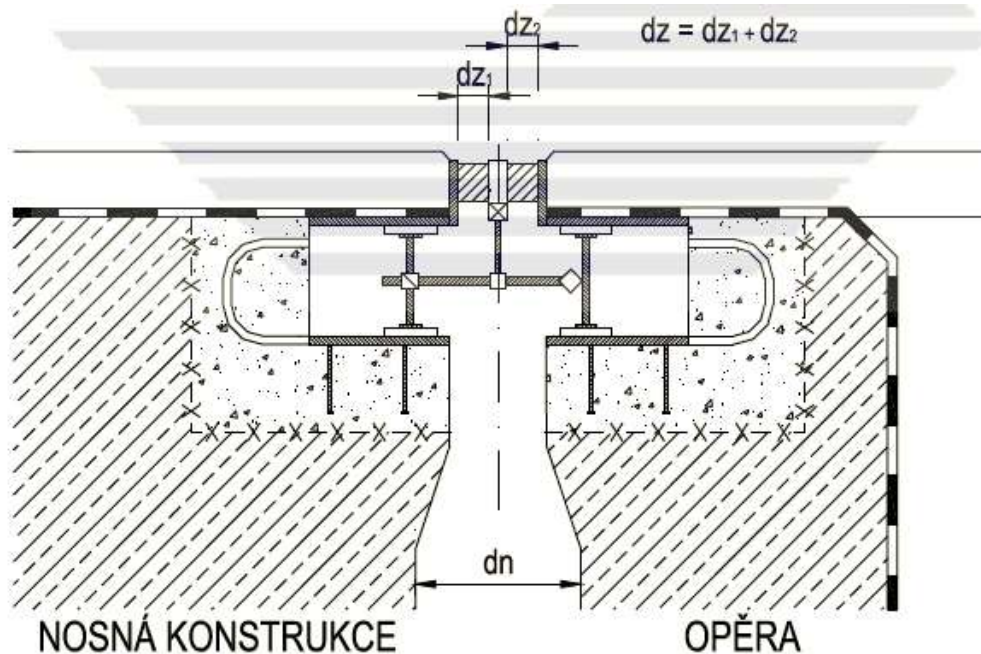
### Dilatační spára NK ( $d_n$ )

Mezera mezi nosnou konstrukcí a opěrou, případně mezi nosnými konstrukcemi, jejíž šířka a tvar se mění v závislosti na pohybech nosné konstrukce. Šířka dilatační spáry NK se měří v úrovni těsně pod kotevními bloky.

### Dilatační spára MZ ( $d_z$ )

Pohyblivá mezera (mezery) mezi krajovými (mezilehlými) profily povrchového mostního závěru v úrovni povrchu vozovky. Šířka dilatační spáry (dílčích dilatačních spár) se měří zpravidla jako vzdálenost svislých ploch profilů. Způsob měření musí být určen v TPP, případně v TePř. Pokud je součástí závěru více pohyblivých mezer, je šířka dilatační spáry součtem šířky dílčích dilatačních spár  $d_{z1}$  až  $d_{zn}$ , viz Obr. 20.

Minimální šířka je pro MZ s jednoduchým těsněním spáry a lamelové MZ 5 mm, maximální šířka běžně 70 mm, 100 mm pro závěry se sníženou hlučností s tělesy se zvláštní tvarovou úpravou povrchu. Volná dilatační spára může mít maximální šířku ve vozovce 60 mm při vyloučeném provozu chodců a cyklistů, bez omezení jejich přístupu maximálně 32 mm ve vozovce. V chodníkové části je maximum 16 mm.



Obr. 20: Dilatační spáry NK a MZ [12]

### **Odvádění povrchové vody z prostoru MZ**

Těsněný MZ musí být naprojektován a vyroben takovým způsobem, aby umožnil odvod povrchové vody v podélném směru vozovky v odvodňovacím proužku nebo svod z okraje MZ do odvodňovače. K tomu je potřeba provést v konstrukci závěru 1 nebo 2 zlomy v oblasti odvodňovacího proužku.

U netěsněných MZ musí být voda protékající dilatační spárou odvedena mimo NK, aby nemohla vnikat do žádné části mostu.

Odvodnění musí být navrženo s ohledem na jednoduchou údržbu, čistitelnost a případnou výměnu.

### **Vodotěsnost MZ**

Dělí se na vodotěsnost výrobku v místě těsnícího profilu a na vodotěsnost celého MZ zabudovaného na mostě, což je ovlivněno stavební činností. Jako kontrola splnění požadavku vodotěsnosti se provádí počáteční zkouška typu na vodotěsnost.

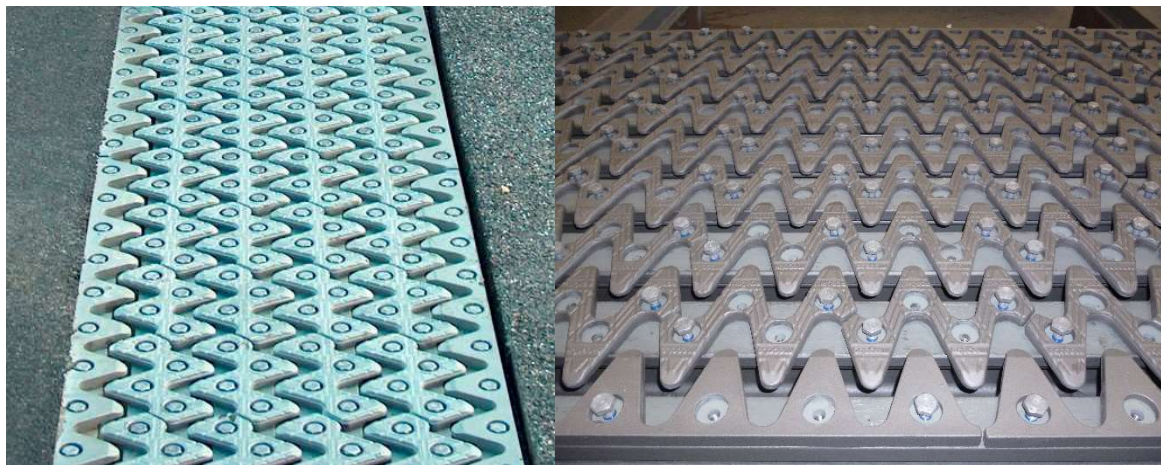
### **Vyměnitelnost opotřebovaných dílů**

Všechny opotřebované a elastomerové prvky musí být schopné výměny, v ideálním případě bez poškození NK závěru, vozovky a betonových konstrukcí. Vyměnitelnost se týká prvků, které spadají do kategorie minimální životnosti 10 let.

### **Snížení hlučnosti**

Pro snížení hlučnosti MZ při přejezdu vozidel je možné provést následující úpravy:

- snížení šířky dilatační spáry na 60 mm
- přišroubování nebo přivaření těles speciálního tvaru (Obr. 21) na horní pásnice lamel nebo krajových profilů, případně speciální tvar samotné horní pásnice u lamelových MZ a závěrů s jednoduchým těsněním spáry



*Obr. 21: Rombické destičky pro snížení hlučnosti [9]*

- úprava tvaru a povrchová úprava prstů hřebenového závěru
- vložení rohoží bránících šíření hluku z prostoru MZ mezi čelo NK a závěrnou zídku

## 2.3 Průkazní zkoušky mostních závěrů

Pro celek mostního závěru (výrobek) se provádějí počáteční zkoušky typu, mezi ně patří zkouška trvanlivosti, zkouška kapacity dilatační spáry, zkouška vodotěsnosti a provozní zkouška typu mostního závěru.

### 2.3.1 Průkazní zkoušky trvanlivosti (na únavu)

Pro ověření trvanlivosti MZ se na konstrukci umístí zatížení na únavu podle TP 86 přílohy G, tedy dvojnáprava TS1 s nápravovým zatížením 300 kN, kolovým zatížením 150 kN a dotykovou plochou kola 0,4 x 0,4 m (LM 1). Dvojnáprava se umístí do kritického místa konstrukce, kde vyvolává mezní napětí na jednotlivých prvcích konstrukce. Mezní napětí se stanovují 3 zkouškami, při nichž je nutné měřit napětí na celém MZ, například pomocí odporových tenzometrů.

Zároveň je při průkazních zkouškách nutné stanovit dynamické vlastnosti systému MZ, především útlum při pojezdové zkoušce. Pojezdové zkoušky se provádí za reálných podmínek na prototypu MZ osazeném na mostě. Pojezdy jsou realizovány těžkým vozidlem s kolovým zatížením 60 kN (FLM 3) rychlostí 45 km/hod. Povrch vozovky na mostě musí být rovný a suchý, podélný sklon vozovky je maximálně 1%, příčný sklon maximálně 2,5 %. Šířka dilatační spáry MZ  $d_z$  se musí pohybovat mezi 35 – 40 mm. Zkouška se nesmí provádět při teplotě konstrukce MZ nižší než 0°C. Zatížení se nesmí na závěr aplikovat přes těsnící prvky.

U lamelových závěrů s vícenásobným těsněním spáry je při přejezdech vozidla zapotřebí měřit všechny vodorovné posuny mezilehlých profilů v pojížděné části MZ. Posuny se měří v úrovni těžiště lamely mezi lamelou a krajovým profilem.

V případě nevýhodných vlivů změn teploty, rychlosti vnášení zatížení při přejezdech nebo jiných nepříznivých vlivů je možné určit stanovit dynamické charakteristiky pro jednotlivé prvky MZ v laboratorním prostředí. Jejich účinek na celou konstrukci je dále stanoven matematicky. Vypočtené hodnoty je nezbytné verifikovat namátkovými zkušebními měřeními na celé konstrukci MZ in-situ na prototypu MZ za běžného provozu.

Kotvení MZ vyhoví při průkazní zkoušce na únavu, pokud při zkušebním zatížení odpovídajícímu 1,25 násobku působení dvojnápravy TS 1 není zaznamenána porucha kotvení ani po 4 milionech cyklů.

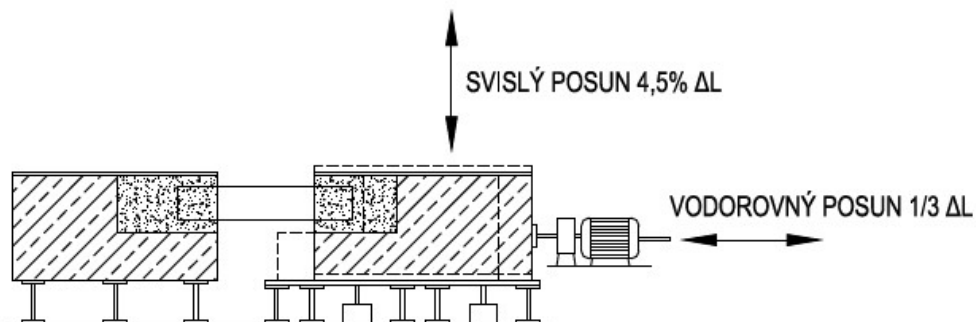
### 2.3.2 Zkouška kapacity dilatační spáry

Kinematická průkazní zkouška se provádí na zkušebních vzorcích, jejichž kinematický systém co nejpřiléhavěji vystihuje skutečné chování MZ.

Zkouška posuvů v rovině vozovky se dělí na 2 části, v 1. části je výchozí polohou minimální dilatační spára MZ  $d_z$ , od této polohy se závěr 2500 krát cyklicky rozevírá o 1/3 jmenovitého dilatačního posunu, kdy každý cyklus musí trvat alespoň 30 s. Druhá část zkoušky se provádí analogicky k té první, změna spočívá ve změně výchozí polohy na maximální dilatační spáru, ta se cyklicky zavírá o 1/3 jmenovitého dilatačního posunu. Zkouška se provádí zvláště pro podélný a příčný posun.

Výchozí polohou pro zkoušku posuvů ve směru kolmo k rovině vozovky je rozevření MZ na 1/4 jmenovitého dilatačního posunu, přičemž oba krajní profily jsou ve stejné výškové úrovni. Zkouška spočívá v cyklickém zvedání jednoho z krajních profilů o 4,5% jmenovitého dilatačního posunu, stejně jako u předchozí zkoušky se provádí 2500 cyklů.

MZ vyhoví při zkouškách kapacity dilatační spáry, pokud na něm nejsou po provedení zmíněných zkoušek patrna žádná poškození.



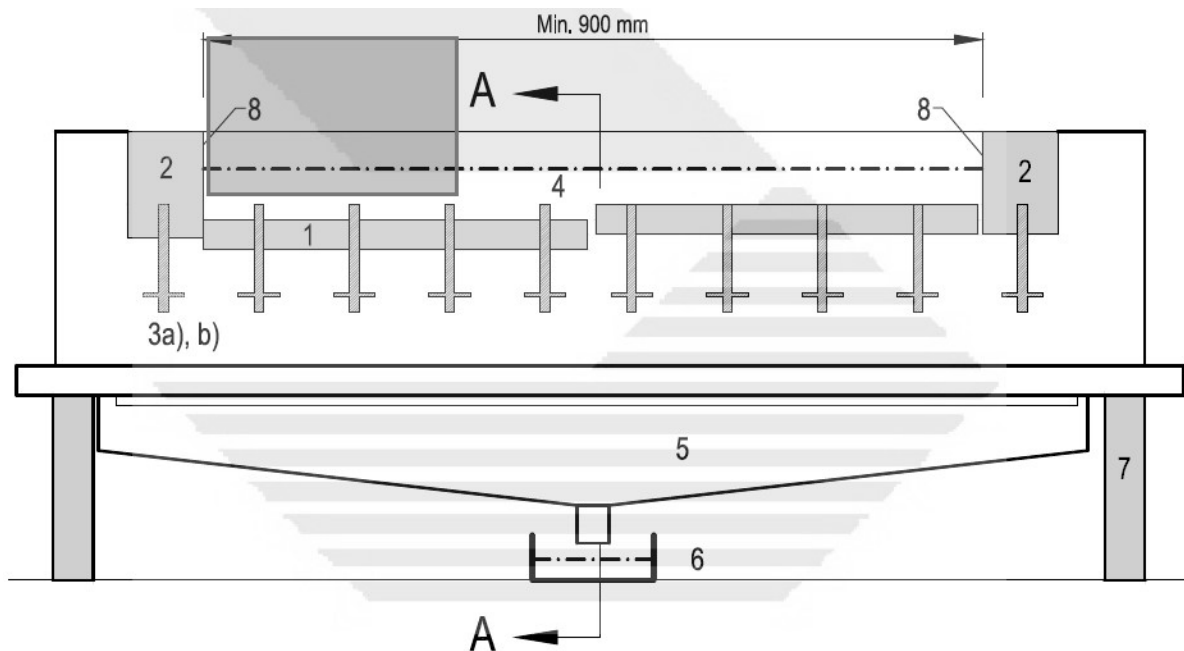
Obr. 22: Schéma zkoušek kapacity dilatační spáry [12]

### 2.3.3 Zkouška vodotěsnosti

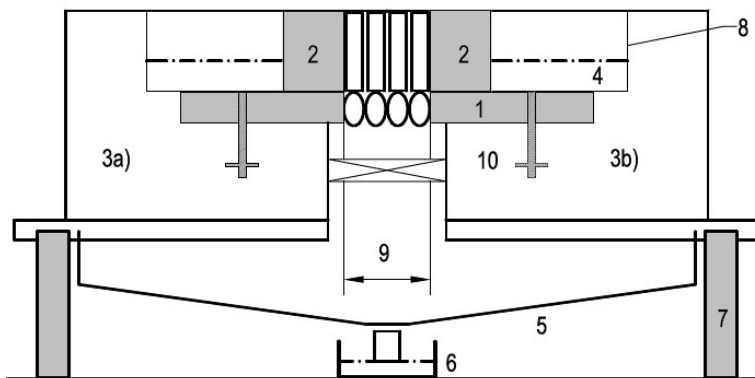
Jedná se o laboratorní počáteční zkoušku typu MZ, která má prokázat, že se voda nedostane na spodní povrch MZ. Jeden vzorek skutečných rozměrů včetně reálného připojení ke konstrukci mostu je vystaven působení definované vodní hladiny, pod vzorkem se nesmí objevit vlhkost. Vyrobený vzorek musí přesně odpovídat výkresové dokumentaci, minimální délka je 1 m, vzorek musí být vybaven skutečným uspořádáním těsnících profilů a kotvení.

Zkouška se provádí při maximální jmenovité šířce dilatační spáry, výjimečně se může zkoušet i při jiném rozevření, pokud jsou při něm méně příznivé podmínky vodotěsnosti. Pro zkoušku se používá pitná voda, minimální výška hladiny nad nejvyšším místem vzorku je 30 mm, maximální hladina se běžně volí 50 mm, zkouška trvá 6 hodin. V průběhu zkoušky se neustále sleduje, zda závěr těsní a nedochází k průniku vody. V případě zjištění významné netěsnosti se zkouška přeruší.

Závěr vyhoví, pokud se nezjistí žádné protékání vody pod MZ.



Obr. 23: Podélný pohled na zařízení při zkoušce vodotěsnosti MZ [12]



Obr. 24: Princip zkoušky vodotěsnosti MZ - řez A-A[12]

Popis zařízení:

- 1 Část mostního závěru včetně všech součástí a připojení ke konstrukci mostu
- 2 Vytýšená část
- 3 Betonové bloky vytvářející zkušební skříň a), b).
- 4 Výška vody
- 5 Svod vody
- 6 Sběrný hrnec
- 7 Podpěrná konstrukce zkušebního zařízení
- 8 Jímka nebo zvýšený okraj
- 9 Dilatační spára
- 10 Část zajišťující rozevření dilatační spáry

#### 2.3.4 Provozní zkouška typu mostního závěru

Pro tento typ zkoušek existují 2 metodiky. První metodika se uplatňuje pro posouzení nově vytvořených typů MZ, které dosud nebyly provozovány v ČR ani v zahraničí po dobu 5 let. Mostní závěr je zabudován do mostu PK, automatickým zařízením se zaznamenává počet přejezdů vozidel a nápravový tlak. Po roce se závěr vyhodnocuje podle kontrolního procesu III dle kapitoly 8.4 TP 86. Pokud je výsledek vyhodnocení příznivý, bude tento typ MZ povolen pro používání v ČR.

Druhá metodika slouží pro posouzení typu MZ, který nikdy nebyl zabudován v ČR, ale je minimálně po dobu 5 let provozován v zahraničí, případně pokud se jedná o typ MZ, který je znovu zařazen do výroby, od které se dříve ustoupilo. V tomto případě stačí dodat písemný seznam referencí s uvedením délky zabudování a počtu přejezdů TNV. Po 1. roce provozu v ČR se MZ vyhodnotí podle kontrolního procesu IV kapitoly 8.4 TP 86. Pokud je výsledek vyhodnocení příznivý, bude tento typ MZ povolen pro používání v ČR.

## 2.4 Kontrolní zkoušky mostních závěrů

Mezi kontrolní zkoušky patří zkouška vodotěsnosti zabudovaného MZ, zkoušky materiálů a hmot - ocel, svary, plasty, beton, atd.

### 2.4.1 Zkouška vodotěsnosti zabudovaného MZ

Provádí se pro každý mostní závěr po uložení všech vrstev vozovky a po zatěsnění všech spár zálivkami. Většinou se provádí v době okolo první hlavní prohlídky mostu nebo při přejímce mostu.

Zkouška spočívá ve vizuální prohlídce těsnících profilů MZ, vodotěsnosti přípoje MZ na vozovku, oblasti čel NK a závěrných zídek. Zkoušku je ideální provést krátce po dešti, pokud to není možné nebo jsou pochybnosti o vodotěsnosti, provede se umělé zavodnění MZ.

### 2.4.2 Kontrolní zkoušky betonu

Podle TKP, kapitola 18.

### 2.4.3 Kontrolní zkoušky betonářské oceli

Podle TKP, kapitola 18, příloha P10.

### 2.4.4 Kontrolní zkoušky oceli

Podle TKP, kapitola 19A.

### 2.4.5 Kontrolní zkoušky PKO

Podle TKP, kapitola 19B.

### 2.4.6 Kontrolní zkoušky vozovky

Musí se provádět pro kritické oblasti, tedy pokud jsou podél MZ použity hutněné asfaltové vrstvy vozovky. Kontrolují se tolerance tlouštěk vozovky, měření se provádí ve vzdálenostech 0, 0,3 a 1 m od krajového profilu MZ na obou stranách. V příčném směru vozovky se měření provádějí po 1-3 m po délce MZ. Měření se provádí po pokládce a zhutnění asfaltu zhotovitelem při současném určení míry zhutnění a mezerovitosti vrstvy nedestruktivním způsobem.

## 2.5 Dynamika stavebních konstrukcí

Ve výpočetních modelech jsou použity zatěžovací stavy typu „modal“, které slouží pro nalezení vlastních tvarů konstrukce. Také jsou použity přejezdy vozidel, které zatěžují konstrukci dynamicky. K porozumění způsobu výpočtu je vhodné shrnout poznatky o dynamice stavebních konstrukcí, zejména o tlumeném kmitání soustav s více stupni volnosti a určování vlastních tvarů. V následujících kapitolách je uveden stručný přehled této problematiky.

### 2.5.1 Úlohy dynamiky

Dynamika je stejně jako statika úloha o rovnováze vnitřních a vnějších sil, ale na rozdíl od statiky uvažuje působení setrvačných a tlumících sil. Odezva konstrukce pak závisí na tuhosti konstrukce, hmotnosti konstrukce, útlumu, velikosti a časovému průběhu zatížení.

Základní pohybová rovnice:

$$\mathbf{K} \mathbf{r}(t) = \mathbf{f}(t) - \mathbf{M} \ddot{\mathbf{r}}(t) - \mathbf{C} \dot{\mathbf{r}}(t), \text{ kde:}$$

$\mathbf{K}$  – matice tuhosti konstrukce,

$\mathbf{M}$  – matice hmotnosti konstrukce,

$\mathbf{C}$  – matice útlumu konstrukce,

$\mathbf{r}$  – vektor posunutí,

$\dot{\mathbf{r}}$  – vektor rychlosti,

$\ddot{\mathbf{r}}$  – vektor zrychlení,

$\mathbf{f}$  – vektor zatížení,

$t$  – čas.

### 2.5.2 Vlastní netlumené kmitání

Účelem výpočtu vlastního kmitání je stanovit dynamické charakteristiky konstrukce, tedy vlastní kruhové frekvence a odpovídající vlastní tvary. Při vlastním kmitání nepůsobí žádné budící síly a zanedbáváme tlumení konstrukce, pohybová rovnice se tedy zjednoduší na tvar:

$$\mathbf{K} \mathbf{r}(t) + \mathbf{M} \ddot{\mathbf{r}}(t) = 0.$$

Odvození rovnice vlastního kmitání

$$\mathbf{r}(t) = \boldsymbol{\phi}(A \cos(\omega t) + B \sin(\omega t))$$

$$\ddot{\mathbf{r}}(t) = -\omega^2 \mathbf{r}(t)$$

$$(\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M}) \boldsymbol{\phi}(A \cos(\omega t) + B \sin(\omega t)) = 0$$

Rovnice vlastního kmitání:

$$(\mathbf{K} - \omega_n^2 \mathbf{M}) \boldsymbol{\phi}_n = 0, \text{ kde}$$

$\omega_n^2$  – vlastní kruhová frekvence,

$\boldsymbol{\phi}_n$  – vektor vlastního tvaru kmitání,

$n$  – počet stupňů volnosti.



Rovnice vlastního kmitání představuje z matematického hlediska problém vlastních čísel a má netriviální řešení, pokud

$$\det((\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M})) = 0.$$

Řešením této rovnice je polynom stupně  $n$ , jehož  $n$  kořenů představuje druhé mocniny vlastních kruhových frekvencí, ze kterých můžeme sestavit diagonální spektrální matici  $\mathbf{\Omega}^2$ .

$$\mathbf{\Omega}^2 = \begin{bmatrix} \omega_1^2 & & & \\ & \omega_2^2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \omega_n^2 \end{bmatrix}$$

Pro každou z  $n$  vlastních frekvencí lze určit odpovídající vektor vlastního tvaru. Z těchto vektorů můžeme sestavit modální matici  $\mathbf{\Phi}$  tak, že v každém sloupci je obsažen jeden vlastní tvar ( $n$ ).

$$\mathbf{\Phi} = \begin{bmatrix} \phi_{1(1)} & \phi_{1(2)} & \cdots & \phi_{1(n)} \\ \phi_{2(1)} & \phi_{2(2)} & \cdots & \phi_{2(n)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi_{n(1)} & \phi_{n(2)} & \cdots & \phi_{n(n)} \end{bmatrix}$$

Rovnice vlastního kmitání se pak dá zapsat kompaktním zápisem pro všechny vlastní tvary:

$$\mathbf{K}\mathbf{\Phi} = \mathbf{M}\mathbf{\Phi}\mathbf{\Omega}^2.$$

1. vlastní tvar je také možné přibližně určit energetickou (inženýrskou) metodou nebo metodou inverzních iterací (postupných aproximací), které konvergují k 1. vlastnímu tvaru. K získání dalších vlastních frekvencí a tvarů slouží Gramm-Schmidtova ortogonalizace.

#### Ortogonalita a normalizace vlastních tvarů:

Dva různé vlastní tvary, které odpovídají dvěma různým vlastním frekvencím, splňují podmínky ortogonality:

$$\mathbf{\Phi}_n^T \mathbf{K} \mathbf{\Phi}_m = 0$$

$$\mathbf{\Phi}_n^T \mathbf{M} \mathbf{\Phi}_m = 0.$$

Vlastní tvary, které byly získány při výpočtu vlastního kmitání, odpovídají vzájemným poměrům výchylek v jednotlivých bodech, ale neodpovídají jejich skutečné velikosti. Pro získání skutečných velikostí výchylek je možné vlastní tvary normalizovat. Nejčastější jsou vlastní tvary normované vzhledem k matici hmotnosti:

$$\tilde{\mathbf{\Phi}}_n = \frac{\mathbf{\Phi}_n}{\sqrt{\mathbf{\Phi}_n^T \mathbf{M} \mathbf{\Phi}_n}}$$

Pro normované tvary pak platí:

$$\mathbf{\Phi}_n^T \mathbf{K} \mathbf{\Phi}_n = \omega_n^2, \text{ respektive } \mathbf{\Phi}^T \mathbf{K} \mathbf{\Phi} = \mathbf{\Omega}^2,$$

$$\mathbf{\Phi}_n^T \mathbf{M} \mathbf{\Phi}_n = 1, \text{ respektive } \mathbf{\Phi}^T \mathbf{M} \mathbf{\Phi} = \mathbf{I}, \text{ kde}$$

$\mathbf{I}$  – jednotková matice.

### 2.5.3 Volné tlumené kmitání

Stejně jako u vlastního kmitání ani u volného kmitání nepůsobí žádná budící síla. Kmitání je vyvoláno nenulovými počátečními podmínkami. Pohybová rovnice má tvar:

$$\mathbf{K} \mathbf{r}(t) + \mathbf{M} \ddot{\mathbf{r}}(t) + \mathbf{C} \dot{\mathbf{r}}(t) = 0.$$

Tento typ není ve výpočtu odezvy konstrukce použit, nemá tedy cenu ho více rozvádět.

### 2.5.4 Vynucené tlumené kmitání

U vynuceného kmitání působící budící síla s předepsaným časovým průběhem. Právě časový průběh tvoří markantní rozdíl mezi statickým a dynamickým zatížením. Pro 2 zatížení se stejným směrem, velikostí, ale jiným časovým průběhem můžeme dostat velmi odlišné výchylky konstrukce. Cílem výpočtu je stanovit odezvu konstrukce na dynamické zatížení. Pohybová rovnice je ve tvaru:

$$\mathbf{K} \mathbf{r}(t) + \mathbf{M} \ddot{\mathbf{r}}(t) + \mathbf{C} \dot{\mathbf{r}}(t) = \mathbf{f}(t).$$

Počáteční podmínky:

$$\mathbf{r}(0) = \mathbf{r}_0; \dot{\mathbf{r}}(0) = \dot{\mathbf{r}}_0.$$

Tato rovnice představuje soustavu n diferenciálních rovnic druhého řádu a má 2 možné způsoby řešení – rozklad do vlastních tvarů (modální analýzu) nebo přímou integraci pohybových rovnic.

#### Rozklad do tvarů vlastního kmitání:

Odezva konstrukce se při této metodě výpočtu stanoví jako lineární kombinace vlastních tvarů kmitání s využitím modálních souřadnic. Potom:

$$\mathbf{r}(t) = \mathbf{\Phi} \mathbf{q}(t), \text{ kde}$$

$\mathbf{q}(t)$  – vektor modálních souřadnic.

Tento vztah dosadíme do pohybové rovnice:

$$\mathbf{K} \mathbf{\Phi} \mathbf{q}(t) + \mathbf{M} \mathbf{\Phi} \ddot{\mathbf{q}}(t) + \mathbf{C} \mathbf{\Phi} \dot{\mathbf{q}}(t) = \mathbf{f}(t).$$

Vynásobíme zleva maticí  $\mathbf{\Phi}^T$ :

$$\mathbf{\Phi}^T \mathbf{K} \mathbf{\Phi} \mathbf{q}(t) + \mathbf{\Phi}^T \mathbf{M} \mathbf{\Phi} \ddot{\mathbf{q}}(t) + \mathbf{\Phi}^T \mathbf{C} \mathbf{\Phi} \dot{\mathbf{q}}(t) = \mathbf{\Phi}^T \mathbf{f}(t).$$

Pro normované tvary platí:

$$\mathbf{\Omega}^2 \mathbf{q}(t) + \mathbf{I} \ddot{\mathbf{q}}(t) + \mathbf{\Phi}^T \mathbf{C} \mathbf{\Phi} \dot{\mathbf{q}}(t) = \mathbf{\Phi}^T \mathbf{f}(t).$$

Pro klasický útlum je  $\mathbf{\Phi}^T \mathbf{C} \mathbf{\Phi}$  diagonální matice, jejíž prvky jsou  $2\xi_n \omega_n$ . Vlastní tvary jsou ortogonální nejen k maticím tuhosti a hmotnosti, ale i k matici útlumu.  $\xi_n$  je koeficient poměrného útlumu n. vlastního tvaru. Pak lze psát:

$$\omega_n^2 q_n(t) + \ddot{q}_n(t) + 2\xi_n \omega_n \dot{q}_n(t) = \phi_n^T f(t).$$

Tuto soustavu n nezávislých rovnic lze vyřešit například přes Duhamelův integrál. Zatížení je pak vyjádřeno jako spojitě působení impulzů síly a výsledná odezva konstrukce je součtem odezev na jednotlivé impulzy.

Přímá integrace pohybové rovnice – Newmarkova metoda:

Numerické řešení integrace - derivace se nahradí diferencemi, soustava diferenciálních rovnic je pak převedena na soustavu algebraických rovnic. Časová osa je rozdělena pomocí délky integračního kroku  $h$ . Jedná se o implicitní metodu, která řeší pohybovou rovnici v čase  $t_{i+1}$ , k výpočtu tedy potřebujeme znát hodnoty  $u_0, \dot{u}_0, \ddot{u}_0, u_n, \dot{u}_n, \ddot{u}_n$  a vypočítáme  $u_{n+1}, \dot{u}_{n+1}, \ddot{u}_{n+1}$ . Metoda je stabilní pro vhodnou parametrů  $\alpha$  a  $\delta$ , je možné použít metodu průměrného ( $\alpha = 1/4, \delta = 1/2$ ) nebo lineárního zrychlení ( $\alpha = 1/6, \delta = 1/2$ ).

- $h$  délka integračního kroku
- $u_0$  vektor počátečních posunů, dále posuny v čase  $t$
- $\dot{u}_0$  vektor počátečních rychlostí, dále rychlosti v čase  $t$
- $\ddot{u}_0$  vektor počátečních zrychlení, dále rychlosti v čase  $t$
- $u_n$  vektor posunů v čase  $t+h$
- $\dot{u}_n$  vektor rychlostí v čase  $t+h$
- $\ddot{u}_n$  vektor zrychlení v čase  $t+h$

Metoda průměrného zrychlení:

$$\alpha = 1/4 \text{ a } \delta = 1/2$$

$$\left(k + \frac{m}{h^2 \cdot \alpha} + \frac{c \cdot \delta}{h \cdot \alpha}\right) \cdot u_{n+1} = p_{n+1} + m \cdot \left(\frac{\ddot{u}_n}{h \cdot \alpha} + \frac{u_n}{h^2 \cdot \alpha} + \frac{\ddot{u}_n \cdot (0,5 - \alpha)}{\alpha}\right) +$$

$$+ c \cdot \left(-\dot{u}_n - \ddot{u}_n \cdot h \cdot (1 - \delta) + \frac{\dot{u}_n \cdot \delta}{\alpha} + \frac{u_n \cdot \delta}{h \cdot \alpha} + \frac{\ddot{u}_n \cdot h \cdot (0,5 - \alpha) \cdot \delta}{\alpha}\right)$$

$$\dot{u}_{n+1} = \frac{\dot{u}_n \cdot h \cdot (\alpha - \delta) + \ddot{u}_n \cdot h \cdot (\alpha - 0,5 \cdot \delta) + u_{n+1} \cdot \delta - u_n \cdot \delta}{h \cdot \alpha}$$

$$\ddot{u}_{n+1} = \frac{-\dot{u}_n \cdot h + u_{n+1} - u_n - \ddot{u}_n \cdot h^2 \cdot (0,5 - \alpha)}{h^2 \cdot \alpha}$$

Přímá integrace pohybové rovnice – Metoda centrálních diferencí:

Jiné numerické řešení integrace. Jedná se o explicitní metodu, ta řeší pohybovou rovnici v čase  $t_i$ , k výpočtu potřebujeme znát hodnoty  $u_0, \dot{u}_0, \ddot{u}_0, u_{n+1}$  a vypočítáme  $u_n$ .

- $h$  délka integračního kroku
- $u_0$  vektor počátečních posunů, dále posuny v čase  $t$
- $\dot{u}_0$  vektor počátečních rychlostí, dále rychlosti v čase  $t$
- $\ddot{u}_0$  vektor počátečních zrychlení, dále rychlosti v čase  $t$
- $u_{n+1}$  vektor posunů v čase  $t+h$
- $u_{n-1}$  vektor posunů v čase  $t-h$

$$\left(\frac{m}{h^2} + \frac{c}{2 \cdot h}\right) \cdot u_{n+1} = p_n + \left(\frac{2 \cdot m}{h^2} - k\right) \cdot u_n + \left(\frac{c}{2 \cdot h} - \frac{m}{h^2}\right) \cdot u_{n-1}$$

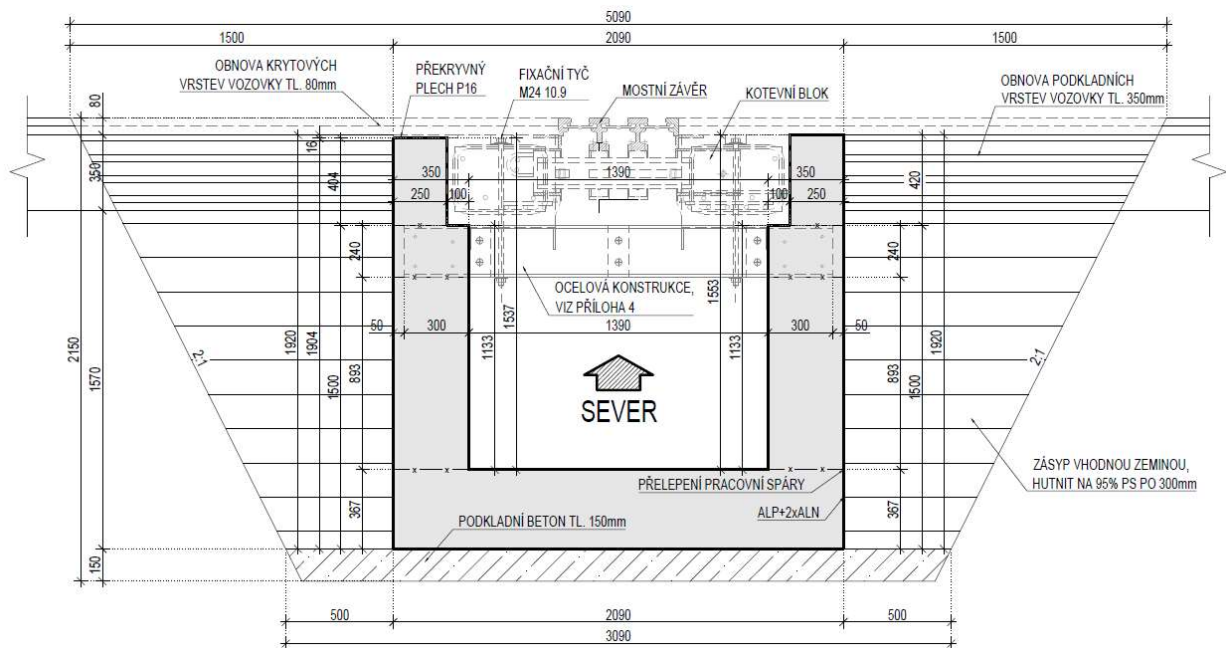
$$u_{n-1} = u_0 - h \cdot \dot{u}_0 + \frac{h^2}{2} \cdot \ddot{u}_0$$

### 3 Návrh MZ

Z typů MZ uvedených v teoretické části této práce byl pro vývoj a následnou výrobu nového typu MZ jako předloha vybrán lamelový MZ s roštovým roznášecím mechanismem. Důvodem jeho výběru bylo poměrně velké množství zkušeností s tímto typem a možnost jeho použití i pro větší dilatační pohyby mostu.

V první fázi vývoje nového typu MZ probíhal návrh Segmentu pro experiment, který byl vyroben a následně použit pro experimentální ověření předpokládaného chování MZ a pro posouzení na MSÚ. Pro potřeby návrhu roznášecího mechanismu a řídicího systému probíhal současně návrhem Segmentu pro experiment i předběžný návrh Segmentu pro zkušební stand, na jednopoložném Segmentu pro experiment by nebylo možné tyto součásti navrhnout. Po laboratorní zkoušce proběhnou na Segmentu pro zkušební stand případná vylepšení a úpravy konstrukčních detailů. V příloze k této práci je k dispozici kompletní výkresová dokumentace obou Segmentů.

Současně s návrhem Segmentů probíhal i návrh zkušebního standu. Jedná se o betonovou rámovou konstrukci zapuštěnou do staré letištní dráhy. Do této konstrukce bude v roce 2017 osazen Segment MZ pro zkušební stand a testován přejezdy TNV. výkresová dokumentace zkušebního standu je také součástí přílohy k této práci.



Obr. 25: Schéma zkušebního standu

Segment pro experiment byl vyroben a odzkoušen v laboratorních podmínkách v prosinci 2016. Jednotlivé prvky byly navrženy na základě požadavků TP 86, průřezu mostních závěrů, požadavků na tiché provedení a s ohledem na únavovou životnost prvků. Uvažované zatížení pro dimenzování prvků je uvedeno v kapitole 4. Segment se skládá ze 2 lamel, roznášecího mechanismu, pevné krabice, posuvné krabice a těsnících a tlumících profilů. Obr. 26 a Obr. 27 zobrazují přehledné pohledy na celou konstrukci, jednotlivé díly jsou popsány v následujících podkapitolách.



*Obr. 26: Celkový pohled na vyrobený Segment MZ pro experiment*

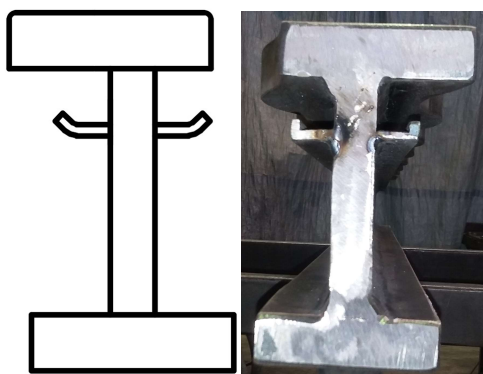


*Obr. 27: Pohled na horní povrch*

### 3.1 Lamela

Lamela byla navržena jako svařovaný ocelový průřez tvaru I s přidavným středním plechem pro uchycení těsnícího profilu z EPDM. Použití svařovaného profilu je progresivní variantou, která snižuje cenu lamely oproti protlačovaným profilům, které se dnes většinou používají. Podrobný výkres lamely je k dispozici ve výkresové příloze Segment MZ pro experiment-03, na Obr. 28 je porovnání schématu tvaru lamely a jejího skutečného provedení.

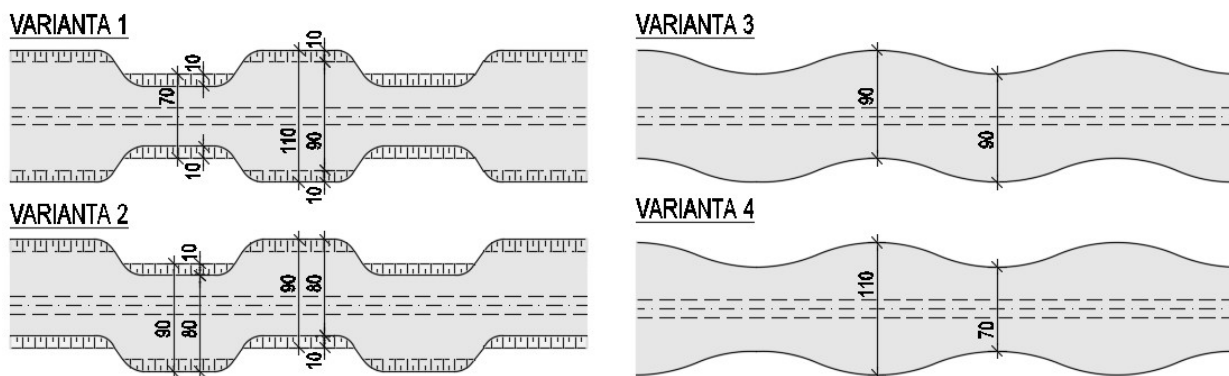
Dimenze plechů byly navrženy na základě předběžného statického výpočtu, průřezu tvarů dosud používaných protlačovaných profilů a s ohledem na proveditelnost navržených svarů. Tloušťka pásnic byla zvolena 25 mm, tloušťka stojiny 20 mm, zvláštní pozornost byla věnována únavové životnosti oceli.



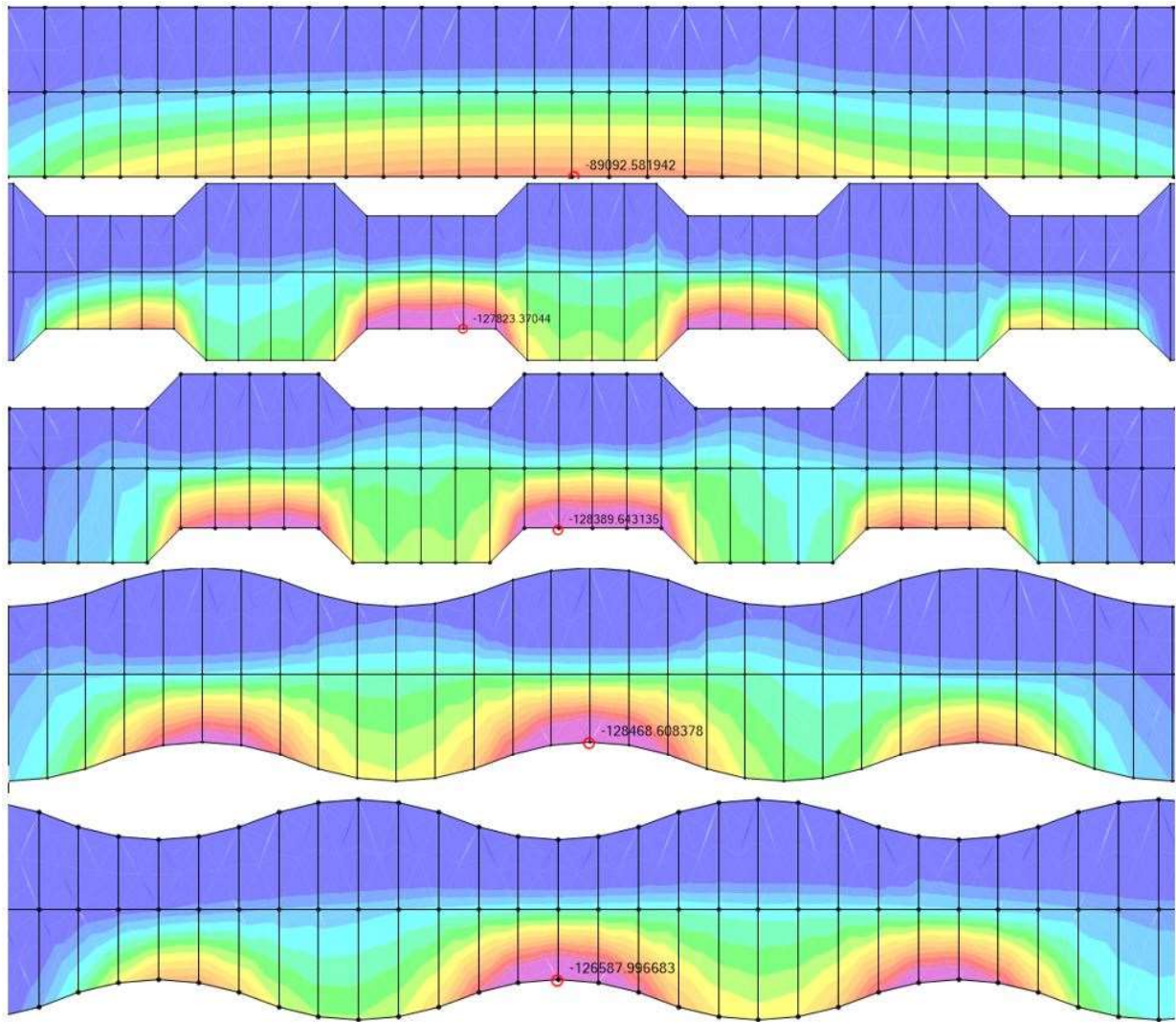
Obr. 28: Schéma tvaru průřezu lamely

Splnění požadavku snížení hlučnosti MZ při přejezdu vozidel vyžadovalo úpravu povrchu horní pásnice lamely. V roce 2015 navrhnul Ing. Martin Macho v rámci řešení projektu TAČR 4 varianty tvaru HP lamely, viz Obr. 29.

Pro každou variantu HP byl vytvořen jednoduchý výpočetní model lamely, který byl ve všech případech zatížen stejným kontaktním napětím na HP, kontaktní napětí odpovídalo statickému zatížení na únavu podle TP 86. Navíc byl vytvořen model pro variantu s obdélníkovým tvarem HP. Na Obr. 30 jsou napětí na všech variantách, z jejich porovnání vyplývá, že maximální napětí jsou u všech variant stejná, ze statického hlediska je tedy jedno, kterou vybereme. Oproti obdélníkové variantě narostlo napětí z 89 MPa na 128 MPa, tedy o 44%. Z hlediska snížení hluku jsou efektivnější varianty 3 a 4, z nichž byla pro segment MZ pro laboratorní zkoušku vybrána varianta 3.



Obr. 29: Možnosti tvarů HP



Obr. 30: Porovnání normálového napětí v podélném směru lamely na variantách HP



Obr. 31: Povrch horní pásnice při experimentu

### 3.2 Roznášecí mechanismus

Návrh roznášecího mechanismu také probíhal na základě průzkumu stávajících MZ a dodržení požadavků TP 86. Progresivním prvkem je zde použití kluzného bloku z materiálu ZX-100 K s velmi nízkým součinitelem tření 0,11 a zároveň vysokou pevností v tlaku při krátkodobém zatížení 75 MPa, což umožňuje kluzné uložení traverzy pouze pomocí tohoto bloku a tenkého nerezového plechu, kterým je obalena traverza. V dosud vyráběných závěrech se pro kluzné uložení používal teflonem potažený elastomerový blok a nerezový plech.

Spojení kluzného bloku s lamelou je provedeno pomocí nerezového čepu, který je zasazen do vybroušeného otvoru v kluzném bloku. Uložení umožňuje natočení lamely kolem svislé osy. V budoucnu se pro uložení lamely na kluzný blok uvažuje o použití polokulového čepu, který bude umožňovat natočení ve všech směrech a sníží tak riziko poškození hrany vybroušeného otvoru v kluzném bloku. Nerezový čep a kluzný blok byly v současném řešení použity i na dolním povrchu traverzy.

Celý roznášecí mechanismus je uzavřen pomocí úchyty, přivařeného na jednom konci k nerezovému čepu a na druhém konci k lamele. Úchyt současně zabezpečuje mechanismus proti nadzvedávání. Pro další konstrukční řešení bude lepší použít variantu šroubovaného přípoje úchyty k lamele. Šroubovaný přípoj umožní jednodušší sestavení konstrukce MZ a jednodušší případnou výměnu poškozené lamely.

Fotodokumentace roznášecího mechanismu vyrobeného Segmentu je k dispozici na Obr. 32 - Obr. 34, schéma je k dispozici na Obr. 35. Uložení konců traverzy je popsáno v následujících kapitolách.



Obr. 32: Ocelová traverza s přivařeným nerezovým plechem

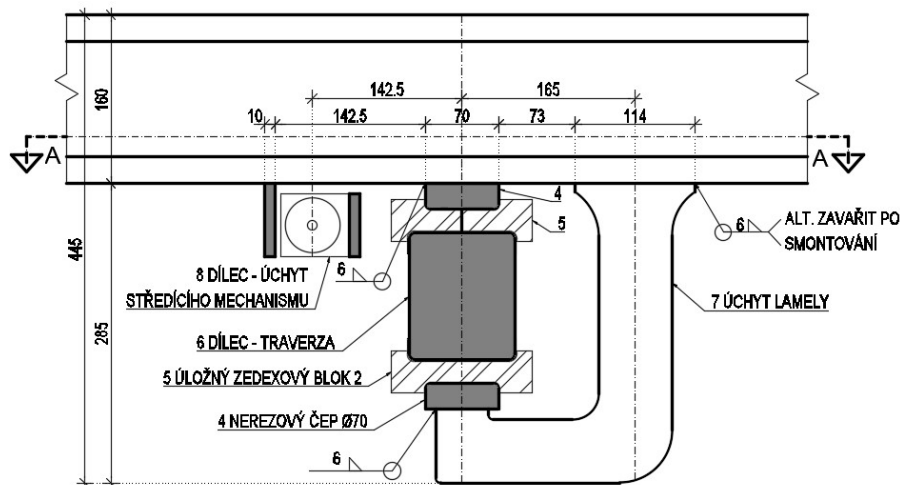


Obr. 33: Vlevo úchyty a nerezové čepy na lamele, vpravo čepy již osazené kluznými bloky a traverzou, horní kluzný blok dotlačen k traverze tíhou lamely





Obr. 34: Vlevo dolní kluzný blok mezi traverzou a úchytem, patrná vůle v uložení, vpravo kluzný blok mezi traverzou a lamelou, po osazení lamely plně dotlačen



Obr. 35: Schéma roznášecího mechanismu

### 3.3 Pevná krabice roznášecího mechanismu

Uložení traverzy v pevné krabici je konstrukčně stejné jako uložení lamely na traverzu. Opět je použit kluzný zedexový blok, na který je přímo uložena traverza. Na horní a dolní povrch traverzy je přivařený nerezový plech, aby nedocházelo k mechanickému poškození protikorozní ochrany. Kluzný blok je pro zvýšení jízdního komfortu podložen elastomerovým blokem, oba bloky jsou pro zajištění polohy nasazeny na nerezový čep (Obr. 36 a Obr. 37).

Do předem vyfrézovaného otvoru v jedné straně traverzy je zasazen zedexový čep. Po finálním osazení traverzy do krabice je do tohoto čepu zasunut zádržný plech, který zabraňuje podélnému posunu traverzy a zároveň umožňuje natočení ve všech směrech (Obr. 39). Na druhém boku je pro zabránění příčného posunu traverzy pomocí speciálního přípravku uchycen elastomerový bloček. Styčnickový plech v krajní horní části slouží pro uchycení řídicího systému.



Obr. 36: Vlevo prázdná krabice, vpravo úložný elastomerový blok nasazený na nerezovém čepu v dolní části krabice



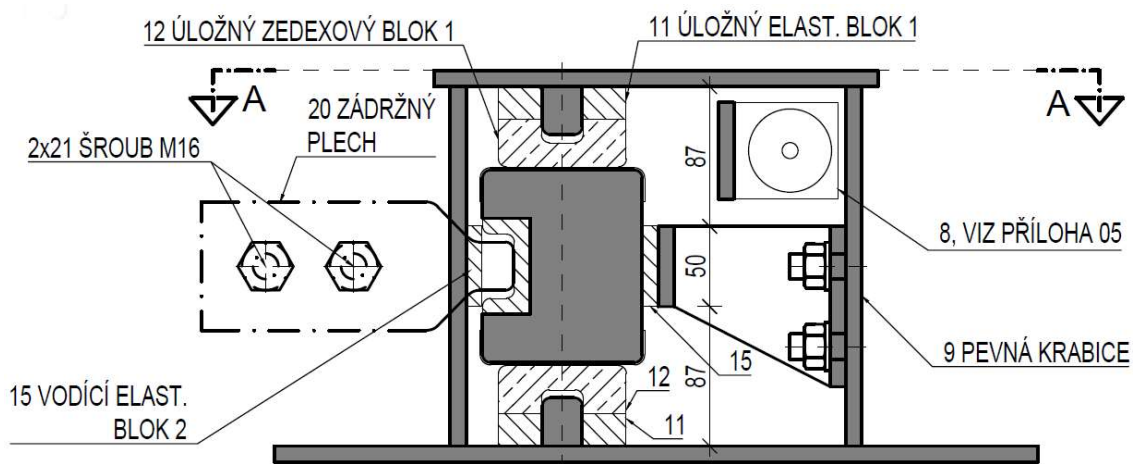
Obr. 37: Vlevo úložný kluzný blok na úložném bloku, vpravo sestavené celé uložení traverzy v pevné krabici, v horní části opět úložný a kluzný blok na nerezovém čepu, na boku elastomerový bloček uchycený speciálním přípravkem



Obr. 38: Detail uložení na horním povrchu traverzy, patrná vůle mezi elastomerovým blokem a krabicí (bloky nejsou přilepeny ke krabici)



Obr. 39: Vlevo traverza ještě nezafixovaná proti posunům, vpravo již zafixovaná pomocí zádržného plechu v zedexovém čepu, čep je osazený do otvoru v traverze



Obr. 40: Schéma pevné krabice

### 3.4 Posuvná krabice

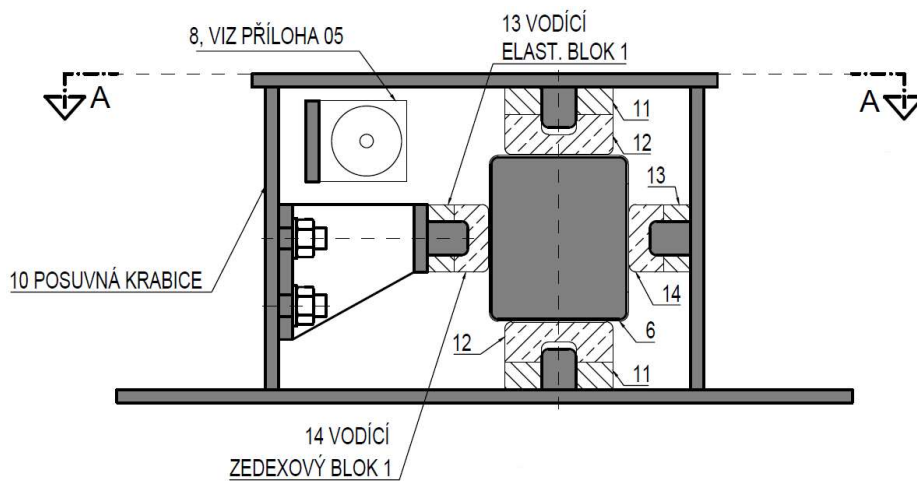
Uložení horního a dolního povrchu traverzy je stejné jako u pevné krabice, změny nastaly v bočním uložení. To je u posuvné krabice shodné s horním a dolním uložení, tedy úložný a kluzný blok nasazený na nerezovém čepu, aby se mohla traverza volně posouvat. V krajní horní části je i u posuvné krabice styčnickový plech, který slouží pro uchycení řídicího systému.



Obr. 41: Prázdná krabice, čepy na všech 4 stranách



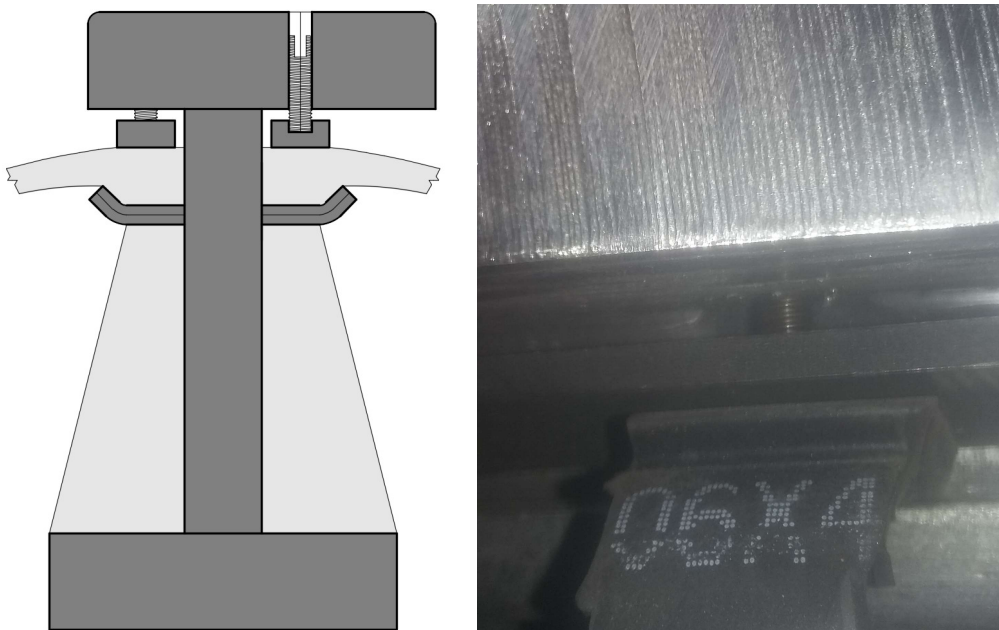
Obr. 42: Kluzné uložení tentokrát i po stranách traverzy, vlevo patrná vůle mezi horním povrchem traverzy a kluzným blokem (kluzný a úložný blok jsou přilepeny ke krabici)



Obr. 43: Schéma posuvné krabice

### 3.5 Těsnící a tlumící profily

Vzhledem k použití lamelového MZ s vícenásobným těsněním dilatační spáry musí být mezi mezilehlými lamelami a krajními profily umístěno těsnění. Těsnící profily jsou uchyceny pomocí středového plechu přivařeného k lamele a přítlačného plechu na horním povrchu těsnícího profilu. Aktivace těsnění je zajištěna stavěcími šrouby, které domáčknou přítlačný plech ke středovému zobáčku. Při laboratorní zkoušce, kdy nebyl použit řídicí systém, fungovalo těsnění zároveň pro zajištění rovnoměrného rozevření dilatační spáry. S lehkou mechanickou pomocí to těsnění dokázalo téměř rovnoměrně. Nevýhodou použití tohoto systému těsnění spočívá v obtížné výměně profilu za provozu, v budoucnu bude muset být aplikováno vhodnější řešení tohoto detailu.



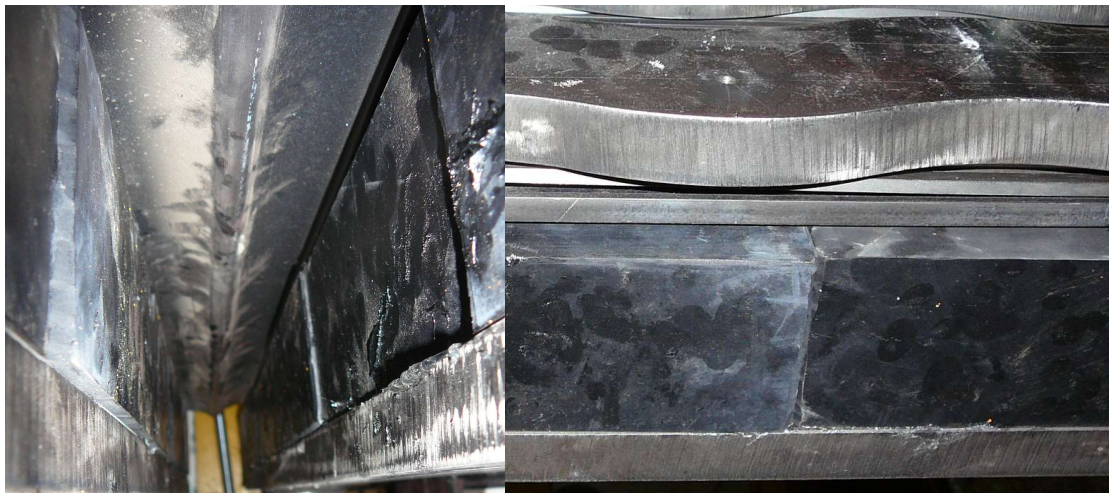
Obr. 44: Vlevo schéma umístění profilů, vpravo ukázka upevnění těsnícího profilu



Obr. 45: Pohled shora na těsnící profil mezi lamelami, v HP viditelné otvory pro stavěcí šrouby

Tlumící profily mají v konstrukci závěru 2 funkce. První funkcí je tlumení vodorovných vibrací stojiny lamely při přejezdu vozidla přes MZ, což zaručí snížení hlučnosti. Další funkcí je zvýšení útlumu konstrukce mostního závěru, v důsledku toho dojde ke zlepšení dynamického chování MZ. Nejpříznivějším výsledkem je snížení deformací a zrychlení lamel při průjezdu TNV.

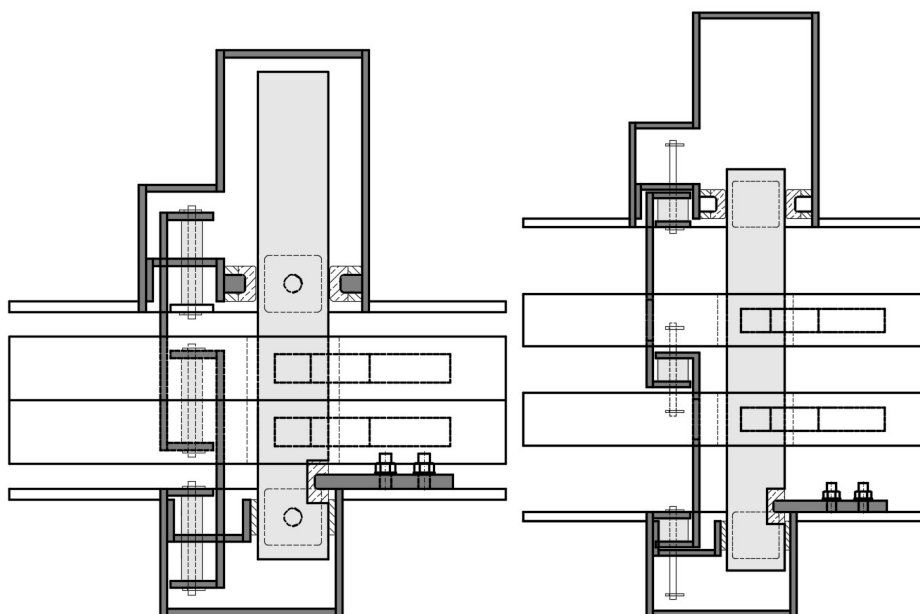
Aby bylo možné určit vliv tlumících profilů na útlum MZ, byly provedeny 2 zkoušky pro stanovení vlastních tvarů, první před nalepením profilů a druhá po něm.



Obr. 46: Nalepené tlumící profily

### 3.6 Řídicí systém

Pro řídicí systém byla zvolena varianta gumových profilů, které jsou díky vhodnému umístění úchytů při každé možnosti rozevření MZ v tlaku. Oproti namáhání gumy stříhem má tato alternativa delší životnost. Schéma při maximálním a minimálním možné rozevření viz Obr. 47, detailní dokumentace je k dispozici ve výkresové příloze Segment pro laboratorní zkoušku-05. Z důvodu lepšího přístupu k roznášecímu mechanismu pro osazení snímačů a možnosti sledování chování segmentu při zatěžování nebyl segment MZ pro laboratoř opatřen středícím mechanismem.

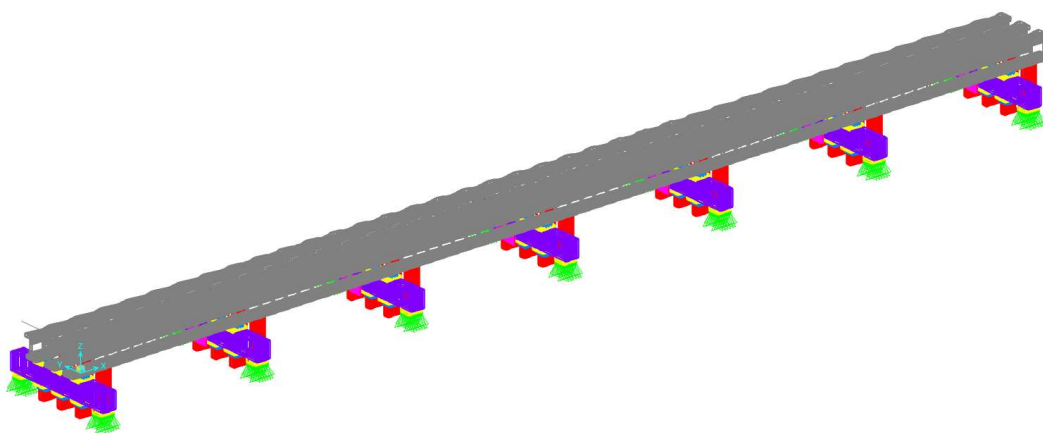


Obr. 47: Schéma řídicího systému, vlevo minimální a vpravo maximální rozevření

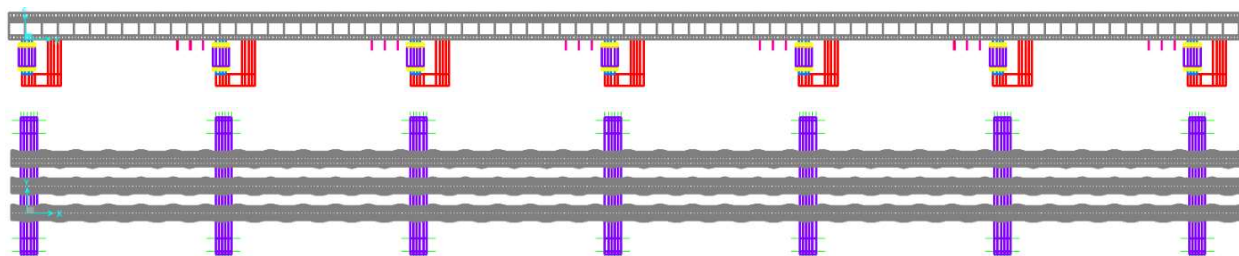
## 4 Posouzení

### 4.1 Výpočetní model

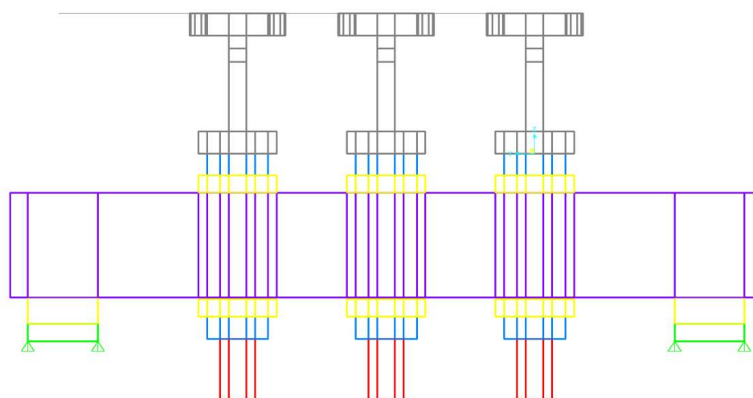
Pro ověření dimenzí prvků MZ byl v programu CSiBridge v15.2.0 vytvořen výpočetní model z prostorových prvků (bricků) segmentu MZ se 7 roznášecími mechanismy, lamely zde tedy působí jako spojitě nosníky o 6 polích, rozpětí pole je 1,2 m. Bricky nejpřiléhavěji vystihují chování prvků v uložení lamely na roznášecí mechanismus. Uložení lamely na traverzu je provedeno pomocí nerezového čepu a zedexového kluzného bloku, proti nadzvedávání lamely je z dolní strany traverzy použita stejná kombinace a celá sestava je uzavřena úchytem. Konce traverz jsou uloženy na zedexových a elastomerových úložných blocích. Model byl vytvořen pro maximální dilatační spáru, kdy jsou lamela i traverza maximálně namáhány. Screenshoty modelu jsou na Obr. 48 - Obr. 52. Charakteristiky použitých materiálů jsou shrnuty v Tab. 1, jejich přiřazení k jednotlivým prvkům je v Tab. 2.



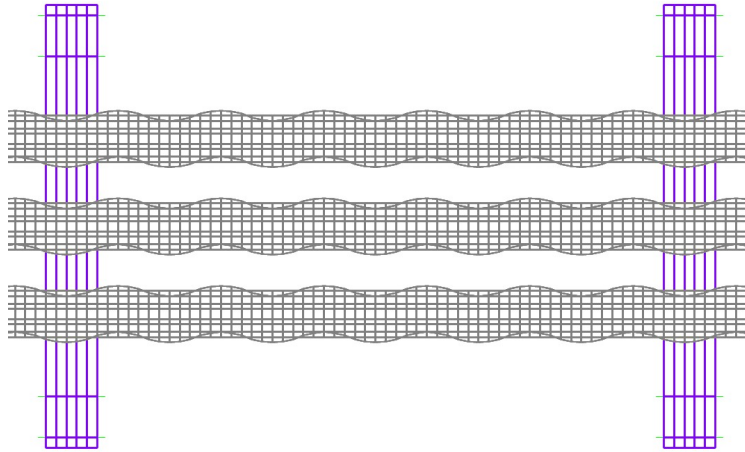
Obr. 48: Celkový pohled na model



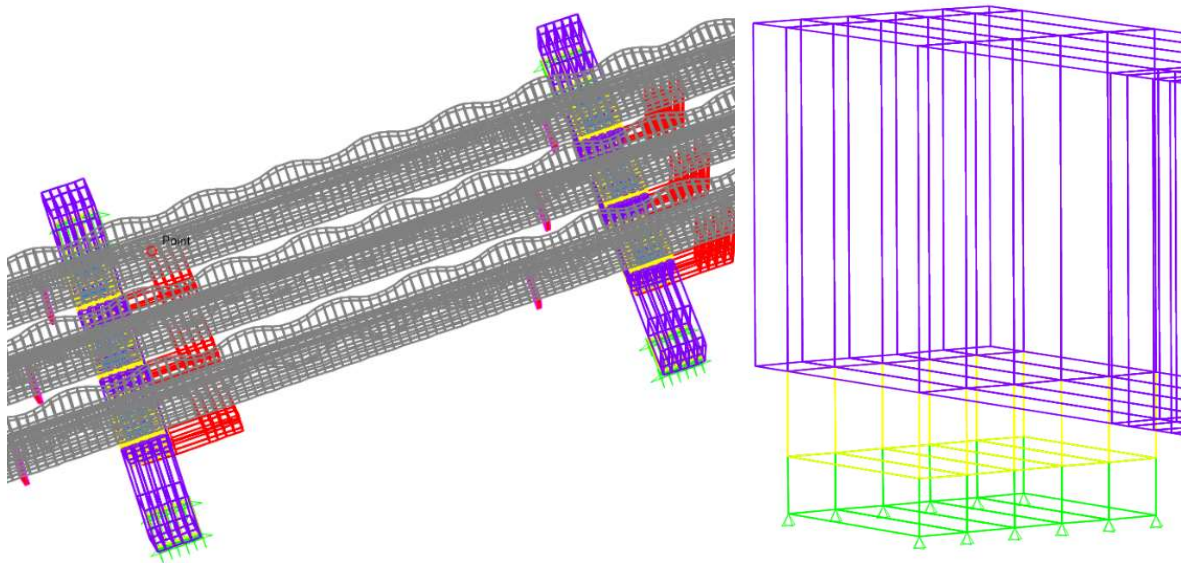
Obr. 49: Nahoře podélný pohled, dole pohled shora na model



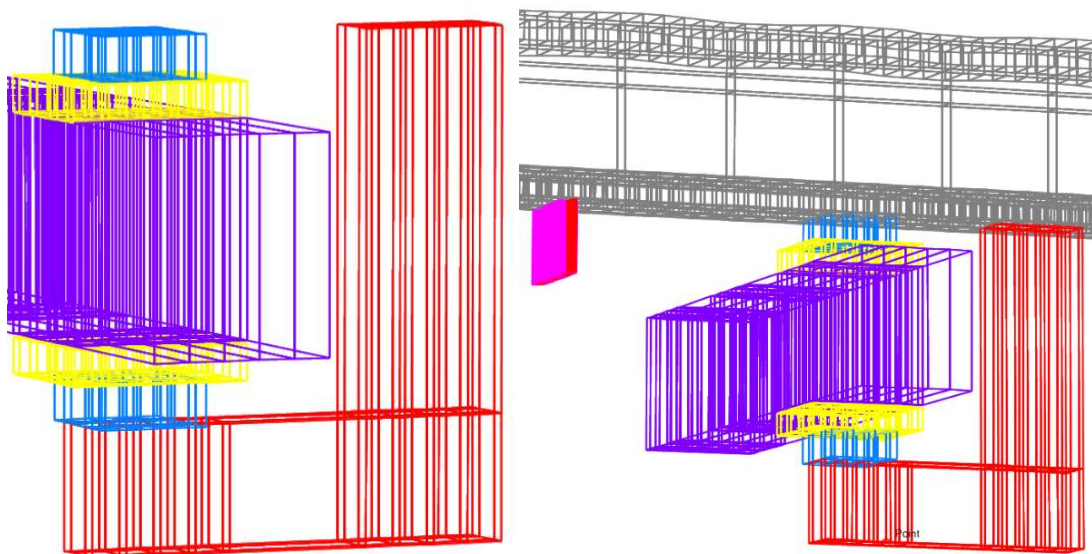
Obr. 50: Vlevo příčný řez v místě traverzy, vpravo detail uložení lamely



Obr. 51: Detail pole závěru



Obr. 52: Axonometrický pohled na pole závěru



Obr. 53: Detail namodelovaného roznášecího mechanismu



Materiál	Objemová tíha	Modul pružnosti	Mez kluzu	Poissonův součinitel
	$\gamma$ [kg/m <sup>3</sup> ]	E [GPa]	$f_y$ [MPa]	$\nu$ [-]
S355	7850	210	355	0,3
Nerezová ocel 1.4404	7850	200	235	0,3
EPDM	1050	1,5	-	0,45
ZX-100K	1350	2,5	-	0,3

Tab. 1: Přehled použitých materiálů

Prvek	Materiál	Barva
Lamela	S355	Šedá
Traverza	S355	Fialová
Kluzný blok	ZX-100K	Žlutá
Úložný blok	EPDM	Zelená
Čep	Nerezová ocel 1.4404	Modrá
Úchyt	S355	Červená
Úchyt řízení	S355	Růžová

Tab. 2: Přiřazení materiálů k jednotlivým prvkům MZ

## 4.2 Statické zatížení

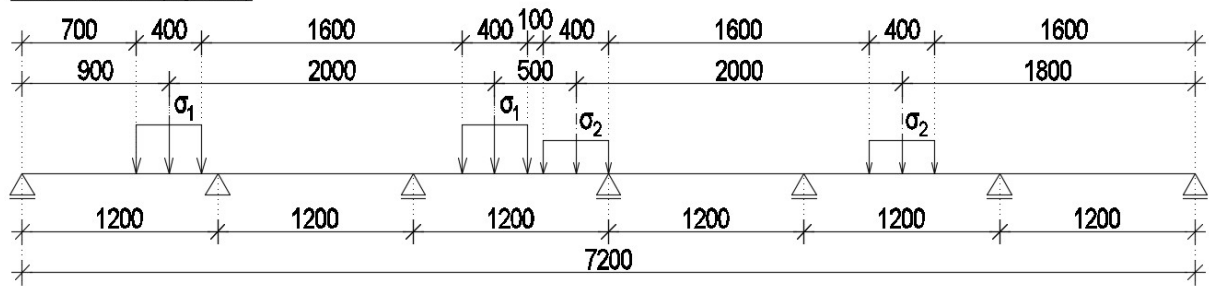
Statické posouzení MZ bylo provedeno podle TP 86 Přílohy G pro maximální rozměr dilatační spáry. Použitý model statického zatížení je odvozený od zatížení podle ČSN EN 1991-2, článek 4.3, model zatížení 1 (LM1) s použitím součinitele  $\alpha_{Qi}$ . Pro zatížení mostního závěru se uvažuje pouze zatížení dvounápravou (TS), rovnoměrné zatížení (UDL) se neuvažuje. Nápravy jsou od sebe v podélném směru vzdáleny 1,2m, na konstrukci lze tedy umístit pouze 1 nápravu. Jako dotyková plocha kola se uvažuje čtverec 0,4 x 0,4 m. Hodnoty nápravového a kolového zatížení jsou uvedeny v Tab. 3, od těchto hodnot je dále odvozeno vodorovné zatížení a zatížení na únavu.

	náprava [kN]	1 kolo [kN]
TS1	300	150
TS2	200	100
TS3	100	50

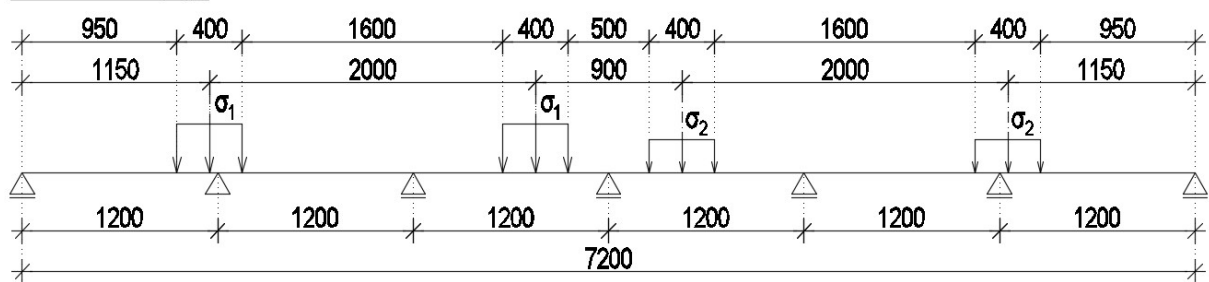
Tab. 3: Přehled náprav modelu LM 1

Nápravy byly na konstrukci umístěny do 2 pozic, v první vyvolávají maximální normálové napětí na lamely v polovině 3. pole a zároveň maximální svislou reakci ve 4. podpoře, ve druhé maximální normálové napětí nad 4. podporou. Pro posouzení konstrukce na únavu při statickém zatížení je nutné získat rozkmit napětí, který se skládá z kladné a záporné části, proto byly přidány ještě pozice 3 a 4. Ty vyvozují maximální namáhání opačného znaménka vzhledem k pozicím 1 a 2, což umožňuje sestavit rozkmit napětí. Schéma uvažovaných pozic je na obr. 11. Vzhledem k tomu, že náprava TS3 neovlivňuje velikost maximálních veličin, byly použity pouze nápravy TS1 a TS2, což umožnilo použít model menšího rozsahu s rychlejším výpočtem.

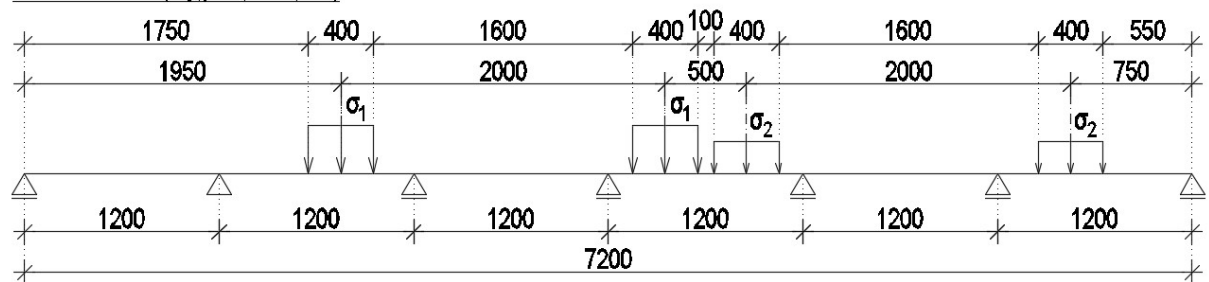
LM1 - Pozice 1 (My+, Rz)



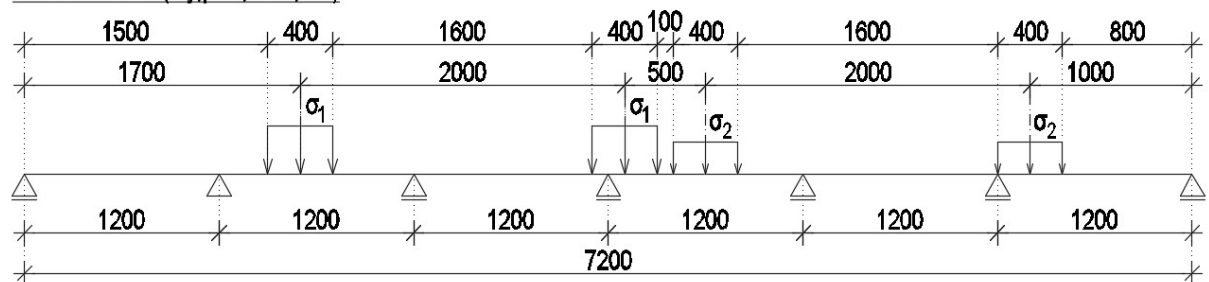
LM1 - Pozice 2 (My-)



LM1 - Pozice 3 (My,pole,max-, Rz)



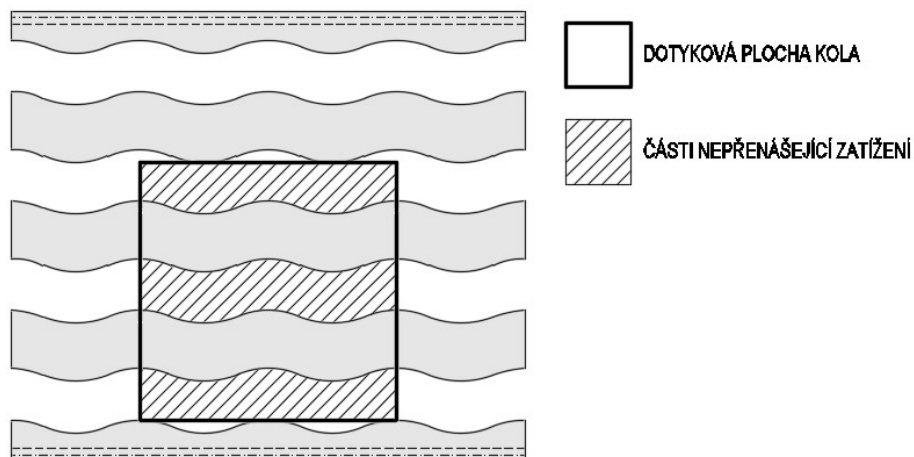
LM1 - Pozice 4 (My,pole,max-, Rz)



Obr. 54: Schéma pozic náprav LM1

#### 4.2.1 Svislé zatížení

Charakteristické hodnoty svislého zatížení  $Q_{1,k}$  a  $Q_{2,k}$  se přímo shodují s hodnotami kolového zatížení TS 1 a TS 2, které již zahrnuje vliv dynamického působení. Pro získání kontaktního napětí, které bylo v modelu aplikováno na plochu horní pásnice lamely, je třeba určit roznoš zatížení kolem na jednotlivé lamely. Při uvažování závěru se 4 dilatačními spárami, tedy s 3 lamelami a 2 krajními profily, je nejhorší pozice kolového zatížení na Obr. 55.



Obr. 55: Nejhorší pozice pro roznos kolového zatížení.

Kontaktní napětí přímo aplikované na lamelu se pak vypočítá ze vzorce:

$$\sigma = \frac{P_{kola}}{S - S_v}$$

kde:  $P_{kola}$  kolové zatížení  
 $S$  dotyková plocha kola  
 $S_v$  plocha části nepřenášející zatížení.

$$\sigma_{1,k} = \frac{Q_{1,k}}{S - S_v} = \frac{150}{0,16 - 0,088} = 2083 \text{ kN}$$

$$\sigma_{2,k} = \frac{Q_{2,k}}{S - S_v} = \frac{100}{0,16 - 0,088} = 1389 \text{ kN}$$

#### 4.2.2 Brzdné a rozjezdové síly

Charakteristické hodnoty byly odvozeny z LM1 a určí se ze vzorce:

$$Q_{1,br,k} = b_k * Q_{1,k} = 0,4 * 150 = 60 \text{ kN}$$

$$Q_{2,br,k} = b_k * Q_{2,k} = 0,4 * 100 = 40 \text{ kN}$$

Kontaktní napětí se vypočte jako u svislého zatížení.

#### 4.2.3 Odstředivé síly

Charakteristické hodnoty byly odvozeny z LM1 a určí se ze vzorce:

$$Q_{1,t,k} = 0,2 * Q_{1,k} = 0,2 * 150 = 30 \text{ kN}$$

$$Q_{2,t,k} = 0,2 * Q_{2,k} = 0,2 * 100 = 20 \text{ kN}$$

Kontaktní napětí se vypočte jako u svislého zatížení.

### 4.3 Kombinace zatížení na MSÚ

#### 4.3.1 MSÚ A - Plynulý přejezd vozidla

Kombinace MSÚ A pro plynulý přejezd vozidla obsahuje maximální zatížení dopravou a odstředivé síly.

Zatěžovací stav	Směr		$Q_{i,k}$ [kN]	$\sigma_{i,k}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\gamma$	$\psi$	$\sigma_{i,d}$ [kN/m <sup>2</sup> ]
Vlastní tíha	Z-		-	-	1,35	1	-
LM 1	Z-	TS1	150	2083	1,35	1	2813
		TS2	100	1389	1,35	1	1875
Odstředivé síly	X+	TS1	30	417	1,35	0,5	281
		TS2	20	278	1,35	0,5	188

Tab. 4: Hodnoty pro kombinaci na MSÚ A

#### 4.3.2 MSÚ B - Brzdění vozidla

Kombinace pro brzdění vozidla obsahuje redukované zatížení dopravou, brzděné a odstředivé síly.

Zatěžovací stav	Směr		$Q_{i,k}$ [kN]	$\sigma_{i,k}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\gamma$	$\psi$	$\sigma_{i,d}$ [kN/m <sup>2</sup> ]
Vlastní tíha	Z-		-	-	1,35	1	-
LM 1	Z-	TS1	150	2083	1,35	0,7	1969
		TS2	100	1389	1,35	0,7	1313
Brzděné síly	Y+	TS1	60	833	1,35	0,5	563
		TS2	40	556	1,35	0,5	375
Odstředivé síly	X+	TS1	30	417	1,35	0,5	281
		TS2	20	278	1,35	0,5	188

Tab. 5: Hodnoty pro kombinaci na MSÚ A

### 4.4 Statické zatížení na únavu

#### 4.4.1 Svislé zatížení na únavu pro MZ 1 (FLM1EJ)

Dynamický součinitel  $\Delta_{q,fat} = 1,3$

Charakteristické hodnoty byly odvozeny z LM1 a určí se ze vztahů:

$$Q_{1,k,fat} = 0,7 * \Delta_{q,fat} * Q_{1,k} = 0,7 * 1,3 * 150 = 136,5 \text{ kN}$$

$$Q_{2,k,fat} = 0,7 * \Delta_{q,fat} * Q_{2,k} = 0,7 * 1,3 * 100 = 91 \text{ kN}$$

Kontaktní napětí se vypočte jako u svislého zatížení.

#### 4.4.2 Vodorovné zatížení na únavu pro MZ 1 (FLM1EJ)

Charakteristické hodnoty byly odvozeny z LM1 a určí se ze vztahů:

$$\Delta_{q,fat,h} = 1,0$$

$$Q_{1,lk,fat} = 0,7 * 0,2 * \Delta_{q,fat} * Q_{1,k} = 0,7 * 0,2 * 1,0 * 150 = 21 \text{ kN}$$

$$Q_{2,lk,fat} = 0,7 * 0,2 * \Delta_{q,fat} * Q_{2,k} = 0,7 * 0,2 * 1,0 * 100 = 14 \text{ kN}$$

Kontaktní napětí se vypočte jako u svislého zatížení.

#### 4.5 Kombinace zatížení na únavu FAT

Zatěžovací stav	Směr		$Q_{i,k}$ [kN]	$\sigma_{i,k}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\gamma$	$\sigma_{i,d}$ [kN/m <sup>2</sup> ]
Vlastní tíha	Z-		-	-	1	-
FLM1EJ svisle	Z-	TS1	136,5	1896	1	1896
		TS2	91,0	1264	1	1264
FLM1EJ vodorovně	Y+	TS1	21	292	1	292
		TS2	14	194	1	194

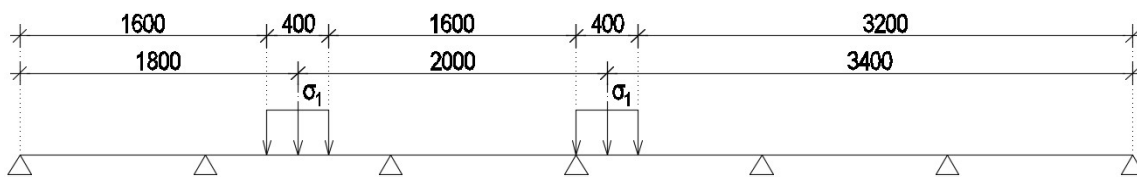
Tab. 6: Hodnoty pro kombinaci na únavu

#### 4.6 Dynamické zatížení na únavu FAT-DYN

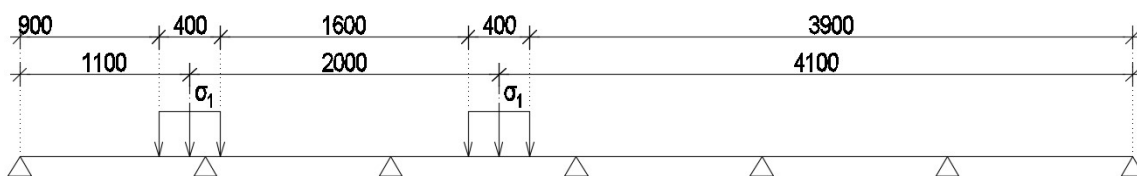
CSiBridge v15.2.0 umožňuje simulaci dynamického zatížení formou přejezdů zatěžovacích vozidel konkrétní rychlostí po konstrukci. Pro dynamickou analýzu byla použita 1 náprava 120 kN modelu na únavu 3 (FLM3). Pro přejezdy byly zvoleny 2 pozice, 1. pozice vyvolává maximální napětí na lamele uprostřed 2. pole, 2. pozice maximální napětí a maximální svislou reakci ve 2. podpoře, schéma viz Obr. 56.

Pro dynamické zatížení nejsou použity žádné kombinace zatížení ani kombinační součinitele, zajímá nás reálné namáhání MZ při přejezdu 12t nápravy, což je největší přípustná hmotnost nápravy podle ŘSD. Výpočet simuluje dynamické účinky, proto není použit ani dynamický součinitel.

FLM3 - Pozice 1 (My+)



FLM3 - Pozice 2 (My-, Rz)



Obr. 56: Schéma pozic 12 t nápravy

#### 4.7 Výsledky

Kombinace zatížení:		MSÚ A		MSÚ B	
Prvek	Druh $\sigma$	Pozice 1	Pozice 2	Pozice 1	Pozice 2
Lamela	S11	-110,5	-67,2	-156	-109,2
		74,4	56,7	95,2	76,5
Úchyt	SVM	-32,9	-15,5	-34,1	-29,3
Čep	SVM	-25,8	-28,1	-22,0	-22,0
Úložný blok	SVM	-9,7	-9,7	-6,5	-8,3
Traverza	S22	-118,5	-119,7	-93,2	-96,1
		117,2	119,2	90,4	91,5

Tab. 7: Výsledky kombinací na MSÚ

	Druh $\sigma$	$\sigma_{-max}$	$\sigma_{+}$	$\sigma_E$	$\sigma_{+max}$	$\sigma_{-}$	$\sigma_E$
		[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
Plech lamely - HP	S11	-108,6	41,8	107,0			
Plech lamely - DP	S11				67,6	-26,4	83,4
Svar pásnice ke stojině	S11	-49,9	17,4	47,3	35,1	-14,4	43,7
Otvor v HP	S11	-54,5	18,7	51,4	23,5	-12,7	31,1
Traverza	S22	-91,3	3,8	58,6	92,8	-3,9	95,1
Svar čepu	S33	-11,8	0,5	7,6			
	SVM	-18,2	0,7	11,6			
Svar úchyty	S33	-2,2	0,1	1,4			
	SVM	-13,1	1,1	9,0			
Svar říd.syst.	SVM	-4,1	0,0	2,5			

Tab. 8: Výsledky kombinací na únavu staticky

	Druh $\sigma$	$\sigma_{-max}$	$\sigma_{+}$	$\sigma_E$	$\sigma_{+max}$	$\sigma_{-}$	$\sigma_E$
Plech lamely - HP	S11	-94,1	43,9	100,4	50,5	-37,3	72,9
Plech lamely - DP	S11	-59,9	23,4	59,3	78,1	-11,8	85,2
Svar pásnice ke stojině	S11	-61,0	26,2	62,8	57,3	-14,4	65,9
Otvor v HP	S11	-50,4	20,1	50,3	27,3	-17,1	37,6
Traverza	S22	-57,4	34,6	69,0	60,5	-38,2	83,4
Svar čepu	S33	-12,4	8,9	16,3	7,7	-10,9	14,2
Svar úchyty	S33	-2,7	1,2	2,8	2,0	-3,0	3,8
Svar říd.syst.	S11	-6,7	2,2	6,2	4,5	-1,9	5,6

Tab. 9: Výsledky kombinací na únavu dynamicky

#### 4.8 Posouzení na MSÚ

Posouzení MZ na MSÚ bylo provedeno pro absolutní maximální napětí na jednotlivých prvcích pro kombinace MSÚ A a B.

Prvek		Lamela	Traverza	Úchyt	Čep	Úložný blok
Materiál		Ocel	Ocel	Ocel	Nerez	ZX
Max. napětí v tahu [MPa]	$\sigma_{t,max}$	-156	-119,7	-	-	-
Max. napětí v tlaku [MPa]	$\sigma_{c,max}$	95,2	119,2	-	-	-
Max. napětí [MPa]	$\sigma_{max}$	156	119,7	34,1	28,1	9,7
Charakteristická odolnost [MPa]	$R_k$	355	355	355	235	75
Součinitel materiálu	$\gamma_f$	1	1	1	1	1
Návrhová odolnost [MPa]	$R_d=R_d/\gamma_f$	355	355	355	235	75
Využití	$\sigma_{max}/R_d$	44%	34%	10%	12%	13%
Posudek		Vyhovuje	Vyhovuje	Vyhovuje	Vyhovuje	Vyhovuje

Tab. 10: Posouzení MZ na MSÚ

### 4.9 Posouzení na únavu

Únavová pevnost je určena souborem S-N křivek, které odpovídají typickým kategoriím detailů (KD). Jednotlivé křivky jsou označeny hodnotou KD  $\Delta\sigma_C$ , která odpovídá rozkmitu napětí [MPa] při  $2 \cdot 10^6$  cyklech. Pomocí KD lze ze sklonu jednotlivých částí grafu stanovit mez únavy při konstantní amplitudě  $\Delta\sigma_D$  a mez únavy  $\Delta\sigma_L$ . Příklad výpočtu pro KD 140, tedy  $\Delta\sigma_C = 140$  MPa:

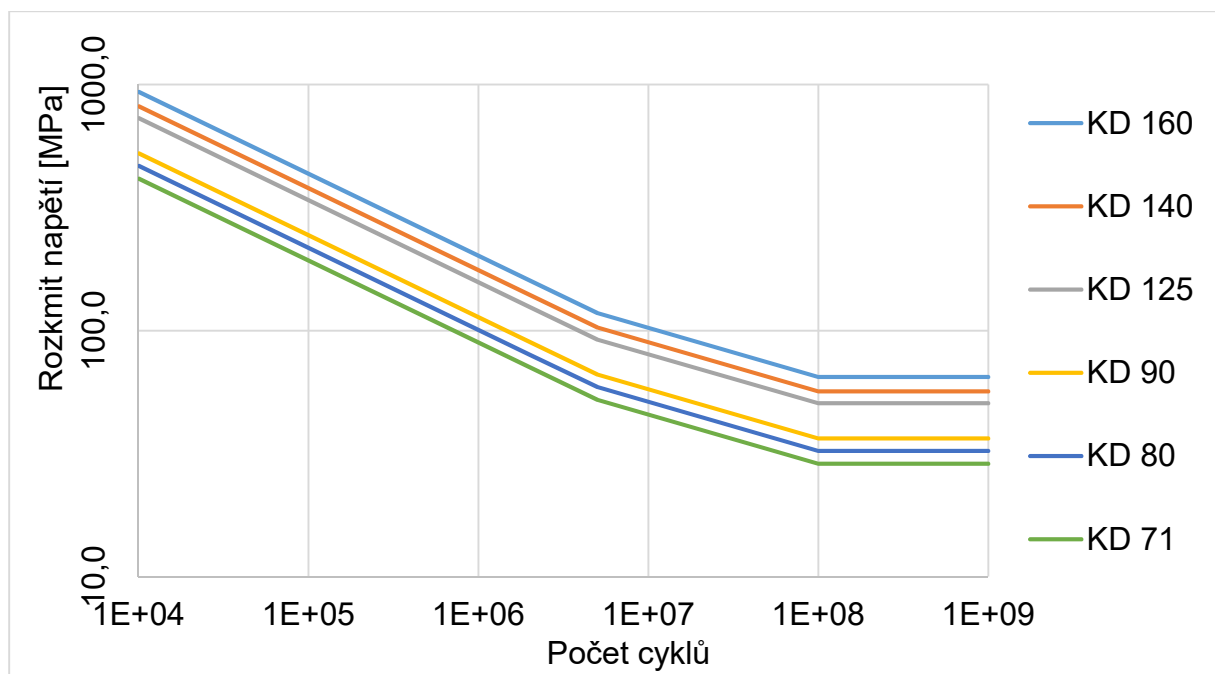
$$\Delta\sigma_{D,KD140} = \left(\frac{2}{5}\right)^{\frac{1}{3}} * \Delta\sigma_C = \left(\frac{2}{5}\right)^{\frac{1}{3}} * 140 = 103,2 \text{ MPa}$$

$$\Delta\sigma_{L,KD140} = \left(\frac{5}{100}\right)^{\frac{1}{5}} * \Delta\sigma_D = \left(\frac{5}{100}\right)^{\frac{1}{5}} * \left(\frac{2}{5}\right)^{\frac{1}{3}} * \Delta\sigma_C = \left(\frac{5}{100}\right)^{\frac{1}{5}} * \left(\frac{2}{5}\right)^{\frac{1}{3}} * 140 = 56,7 \text{ MPa}$$

Přehled únavových pevností je v Tab. 11, v Graf 1 jsou znázorněny S-N (Wöhlerovy) křivky pro použité KD.

Název	Označení	Počet cyklů	Rozkmit [MPa]						
			KD 160	KD 140	KD 125	KD 90	KD 80	KD 71	KD 36
Kategorie detailu	$\Delta\sigma_C$	2E+06	160	140	125	90	80	71	36
Mez únavy při konstantní amplitudě	$\Delta\sigma_D$	5E+06	117,9	103,2	92,1	66,3	58,9	52,3	26,5
Mez únavy	$\Delta\sigma_L$	1E+08	64,8	56,7	50,6	36,4	32,4	28,7	14,6

Tab. 11: Kategorie detailů



Graf 1: Wöhlerovy křivky

Podle ČSN EN 1993-1-9 lze pro nesvařované detaily nebo svařované detaily žíhané na snížení úrovně zbytkových napětí vypočítat účinný rozkmit napětí  $\Delta\sigma_E$  jako součet tahové části rozkmitu napětí a 60% velikosti tlakové části rozkmitu napětí. U dynamického zatížení formou přejezdu je výsledkem výpočtu časový průběh napětí na prvku a není tedy problém z něj stanovit účinný rozkmit. U statického zatížení byly využity výše zmíněné pozice 3 a 4, které způsobují v místech maximální napětí od pozic 1 a 2 maximální napětí s opačným znaménkem. Z těchto napětí obráceného působení byl stanoven účinný rozkmit.

Ekvivalentní rozkmit napětí na jednotlivých prvcích byly zařazeny do 3 intervalů, v rámci kterých byl určen počet cyklů do porušení  $N_E$ .

Pro  $\Delta\sigma_E$  z intervalu  $(0; \Delta\sigma_L)$  není životnost omezena počtem cyklů, tedy:

$$N_E = \infty \text{ cyklů}$$

Pro  $\Delta\sigma_E$  z intervalu  $(\Delta\sigma_L; \Delta\sigma_D)$  platí:

$$N_E = \left(\frac{\Delta\sigma_D}{\Delta\sigma_E}\right)^5 * 5 * 10^6$$

Nebo:

$$N_E = \left(\frac{\Delta\sigma_L}{\Delta\sigma_E}\right)^5 * 10^8$$

Například u traverzy:

$$N_E = \left(\frac{\Delta\sigma_D}{\Delta\sigma_E}\right)^5 * 5 * 10^6 = \left(\frac{117,9}{95,1}\right)^5 * 5 * 10^6 = 1,5 * 10^7 \text{ cyklů}$$

nebo

$$N_E = \left(\frac{\Delta\sigma_L}{\Delta\sigma_E}\right)^5 * 10^8 = \left(\frac{64,8}{95,1}\right)^5 * 10^8 = 1,5 * 10^7 \text{ cyklů}$$

Pro  $\Delta\sigma_E$  z intervalu  $(\Delta\sigma_D; \infty)$  platí:

$$N_E = \left(\frac{\Delta\sigma_D}{\Delta\sigma_E}\right)^3 * 5 * 10^6$$

Například u plechu lamely:

$$N_E = \left(\frac{\Delta\sigma_D}{\Delta\sigma_E}\right)^3 * 5 * 10^6 = \left(\frac{103,2}{107}\right)^3 * 5 * 10^6 = 4,5 * 10^6 \text{ cyklů}$$

Hodnoty  $N_E$  byly porovnány s tabulkou 3, přílohy 6. R, ETAG N° 032, Tab. 12. Ta udává pro model FLM 1 EJ počet cyklů, který když počet cyklů od porušení daného prvku překročí, považuje se za prvek s neomezenou životností.

Kontaktní napětí aplikované na HP lamely je 1,2 MPa od FLM 1 EJ TS 2. Při kontaktním napětí 1 MPa je tento minimální počet cyklů do porušení  $3,6 * 10^6$ , což všechny prvky splňují (Tab. 13 a Tab. 14) a mají tedy neomezenou životnost. V případě, že by některý prvek nevyhověl na FLM 1 EJ, lze uvažovat zatížení modelem FLM 2 EJ a určit jeho životnost.



Test description		FLM 2 EJ				FLM 1 EJ
		10 years	15 years	25 years	50 years	Unlimited
Contact pressure: 0,8 N/mm <sup>2</sup>	1 <sup>st</sup> stage: vertical and horizontal loads simultaneously applied	1,7 x 10 <sup>6</sup>	2,5 x 10 <sup>6</sup>	4,2 x 10 <sup>6</sup>	FLM 1 EJ applies	7,4 x 10 <sup>6</sup>
	2 <sup>nd</sup> stage: vertical loads only applied	1,1 x 10 <sup>6</sup>	1,7 x 10 <sup>6</sup>	2,9 x 10 <sup>6</sup>	--	--
	Envelope approach: vertical and horizontal loads simultaneously applied	2,8 x 10 <sup>6</sup>	4,2 x 10 <sup>6</sup>	7,1 x 10 <sup>6</sup>	FLM 1 EJ applies	7,4 x 10 <sup>6</sup>
Contact pressure: 1,0 N/mm <sup>2</sup> (alternatively to 0,8 N/mm <sup>2</sup> )	1 <sup>st</sup> stage: vertical and horizontal loads simultaneously applied	0,87 x 10 <sup>6</sup>	1,3 x 10 <sup>6</sup>	2,2 x 10 <sup>6</sup>	FLM 1 EJ applies	3,8 x 10 <sup>6</sup>
	2 <sup>nd</sup> stage: vertical loads only applied	0,57 x 10 <sup>6</sup>	0,87 x 10 <sup>6</sup>	1,5 x 10 <sup>6</sup>	--	--
	Envelope approach: vertical and horizontal loads simultaneously applied	1,44 x 10 <sup>6</sup>	2,17 x 10 <sup>6</sup>	3,7 x 10 <sup>6</sup>	(FLM 1 EJ applies)	3,8 x 10 <sup>6</sup>

Tab. 12: Tabulka životností pro modely na únavu [2]

Prvek	$\Delta\sigma_C$	$\Delta\sigma_D$	$\Delta\sigma_L$	$\Delta\sigma_E$	$N_E$	Posudek
	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[cyklů]	
Plechý lamely	140	103,2	56,7	107,0	4,5E+06	OK
Podélný svar pásnice ke stojně	125	92,1	50,6	47,3	$\infty$	OK
Otvor v HP	90	66,3	36,4	51,4	1,8E+07	OK
Traverza	160	117,9	64,8	95,1	1,5E+07	OK
Svar čepu	36	26,5	14,6	7,6	$\infty$	OK
	71	52,3	28,7	11,6	$\infty$	OK
Svar úchyty	36	26,5	14,6	1,4	$\infty$	OK
	71	52,3	28,7	9,0	$\infty$	OK
Svar říd. syst.	36	26,5	14,6	2,5	$\infty$	OK

Tab. 13: Posouzení MZ na únavu staticky

Prvek	$\Delta\sigma_C$	$\Delta\sigma_D$	$\Delta\sigma_L$	$\Delta\sigma_E$	$N_E$	Posudek
	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[cyklů]	
Plechý lamely	140	103,2	56,7	100,4	5,7E+06	OK
Podélný svar pásnice ke stojně	125	92,1	50,6	65,9	2,7E+07	OK
Otvor v HP	90	66,3	36,4	50,3	2,0E+07	OK
Traverza	160	117,9	64,8	83,4	2,8E+07	OK
Svar čepu	36	26,5	14,6	16,3	5,6E+07	OK
Svar úchyty	36	26,5	14,6	3,8	$\infty$	OK
Svar říd. syst.	36	26,5	14,6	6,2	$\infty$	OK

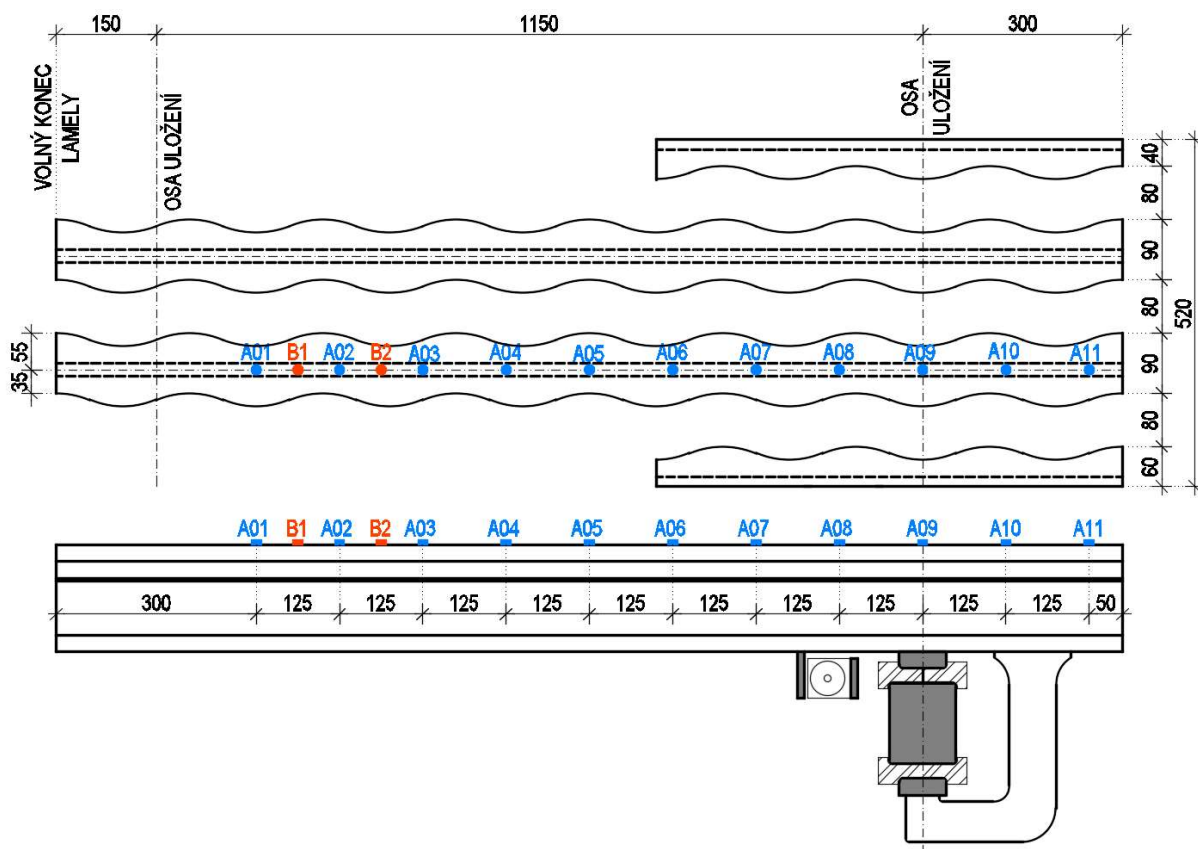
Tab. 14: Posouzení MZ na únavu dynamicky

## 5 Experimentální ověření - modální analýza

První fáze experimentálního měření proběhla ve dnech 20. a 21. prosince 2016 a byla věnována určení vlastních frekvencí, jim odpovídajících vlastních tvarů a součinitele útlumu. Experiment provedli na základě autorem dodaných podkladů prof. Ing. Michal Polák, CSc. a Ing. Tomáš Plachý, Ph.D. z Katedry mechaniky Fakulty stavební ČVUT v Praze společně s týmem Experimentálního centra Fakulty stavební ČVUT v Praze. Pro vynucení kmitání konstrukce byl použit impuls síly pomocí modálního kladívka a gumové palice.

### 5.1 Rozmístění snímačů

Na horní pásnici jedné z mezilehlých lamel bylo vybráno 11 míst pro osazení akcelerometrů. Měření probíhalo zároveň pro 2 sady snímačů. 11 akcelerometrů TLA05 Techlab Experimentálního centra (ústředna Dewetron) bylo osazeno najednou, 4 snímače Brüel & Kjær 4507 B 005 Katedry mechaniky (ústředna Pulse) se osazovaly na určené pozice postupně, nejprve A01 – A04, dále A05 – A08 a nakonec A08 – A11.



Obr. 57: Schéma rozmístění akcelerometrů



Obr. 58: Umístění 11 snímačů Experimentálního centra



Obr. 59: Vlevo současné umístění snímačů EC a K132, vpravo modální kladívko

## 5.2 Nastavení rozevření dilatační spáry

Dilatační spára MZ byla nastavena na maximální rozevření  $3 \cdot 80 \text{ mm} = 240 \text{ mm}$ , při tomto nastavení je vzdálenost vnějších hran krajních profilů  $520 \text{ mm}$ , viz Obr. 57. Maximální rozevření bylo použito pro zkoušku bez tlumících profilů i pro zkoušku s nimi.



Obr. 60: Maximální rozevření dilatační spáry, vlevo pohled shora, vpravo zespoda

### 5.3 Podepření konstrukce

Krabice MZ byly při modální analýze přivařeny k těžkým ocelovým nosníkům pomocí koutových svarů. Volné konce lamel na straně, kde nejsou krabice, byly podloženy ocelovými podložkami a kolejnicí do potřebné výšky. Pro zajištění rozevření dilatační spáry a větší stability podepření byly mezi sebou jednotlivé prvky svařeny. Všechny detaily podepření byly aplikovány do výpočetního modelu.



*Obr. 61: Vlevo podepření volného konce lamely, vpravo upevnění krabice*

### 5.4 Zkouška bez tlumících profilů

Tato zkouška proběhla 20. 12. 2016, konstrukce byla buzena ve 2 různých bodech B1 a B2, viz Obr. 57. Tyto body byly vybrány z důvodu největšího počtu nenulových pořadnic vlastních tvarů, buzením v těchto místech se tedy dá stanovit nejvíce vlastních frekvencí a vlastních tvarů. Měření zrychlení probíhalo pouze ve svislém směru.



*Obr. 62: Vlevo buzení v bodě 1, vpravo v bodě 2*

### 5.5 Zkouška s tlumícími profily

Druhá zkouška pro určení dynamických vlastností MZ proběhla 21. 12. 2016, změnou oproti první zkoušce bylo nalepení tlumících profilů na stojiny lamel a krajních profilů. Cílem zkoušky bylo porovnání vlastních frekvencí, vlastních tvarů a především součinitele útlumu MZ s tlumícími profily a bez nich. Opět bylo provedeno několik

měření s buzením konstrukce v bodech B1 a B2. Měření na ústředně Pulse proběhlo v podélném, příčném i svislém směru.



Obr. 63: Nalepené tlumící profily na stojiny lamel

## 5.6 Výsledky

Z naměřených dat byly Ing. Tomášem Plachým, Ph.D. vyhodnoceny vlastní tvary kmitání a vlastní frekvence. Pro 2 dominantní frekvence byl pomocí metod Loss Factor (na základě šířky rezonančního pásma), „Monte Carlo“(proložení teoretické rezonanční křivky skrz naměřená data) nebo pomocí frekvenčních multispekter vyhodnocen součinitel útlumu, vyhodnocení útlumu provedl prof. Ing. Michal Polák, CSc.

Na Obr. 64 je vlastní tvar s frekvencí 229 Hz MZ bez tlumících profilů, na dalším Obr. 65 je odpovídající vlastní tvar MZ s tlumícími profily. Vzhledem k větší hmotnosti konstrukce klesla vlastní frekvence na 222 Hz.

Obr. 66 - Obr. 68 ukazují vyhodnocení útlumu pro tyto vlastní tvary. U MZ s profily vyšel z metod shodně součinitel útlumu 0,015, u vyhodnocení MZ bez profilů se metody lehce liší.

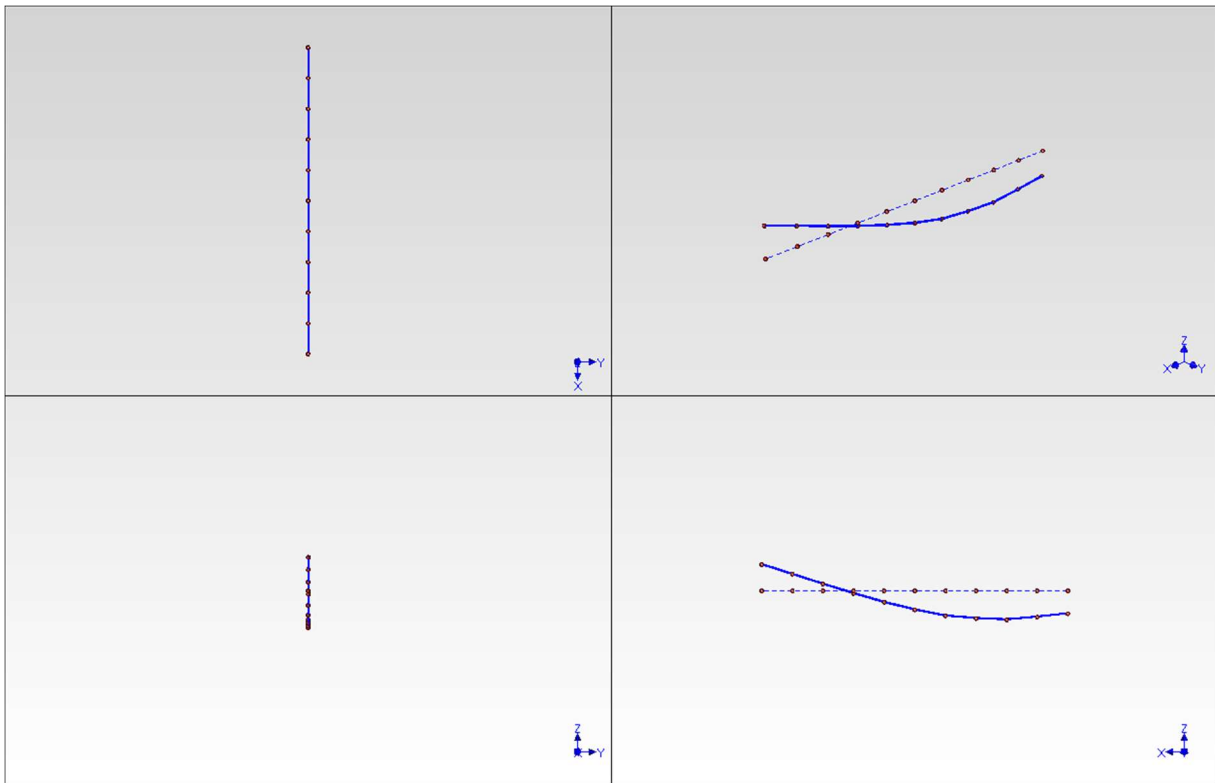
Na Obr. 64 je vlastní tvar s frekvencí 271 Hz MZ bez tlumících profilů, na dalším Obr. 65 je odpovídající vlastní tvar MZ s tlumícími profily. Vzhledem k větší hmotnosti konstrukce klesla vlastní frekvence na 251 Hz.

Obr. 66 - Obr. 68 ukazují vyhodnocení útlumu pro tyto vlastní tvary. U konstrukce bez tlumících profilů byl opět drobný rozdíl v hodnotě útlumu, u konstrukce s tlumícími profily byl stanoven součinitel útlumu 0,024.

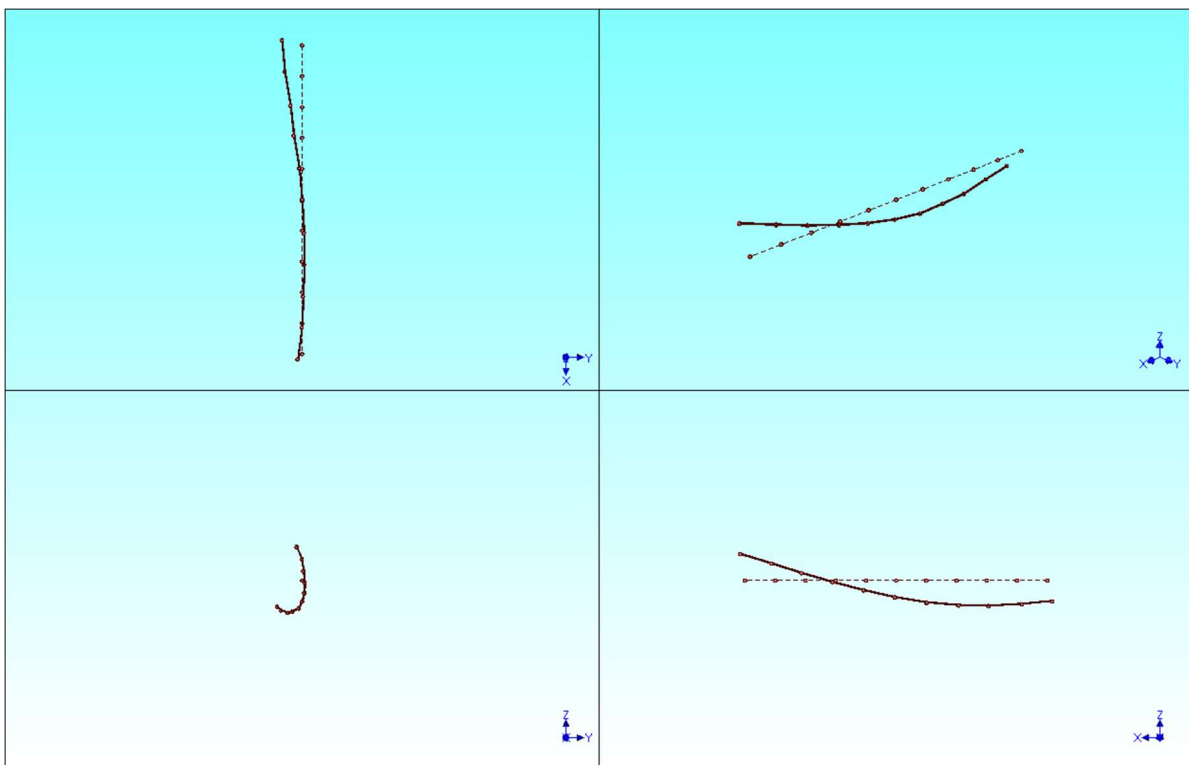
Shrnutí výše popsaných tvarů a útlumu poskytuje Tab. 15. Bezpečně lze říci, že při použití tlumících profilů naroste součinitel útlumu konstrukce MZ dvojnásobně.

	Bez tlumících profilů	S tlumícími profily
f [Hz]	229	222
$\xi$ [-]	0,005-0,007	0,015
f [Hz]	271	251
$\xi$ [-]	0,007-0,012	0,024

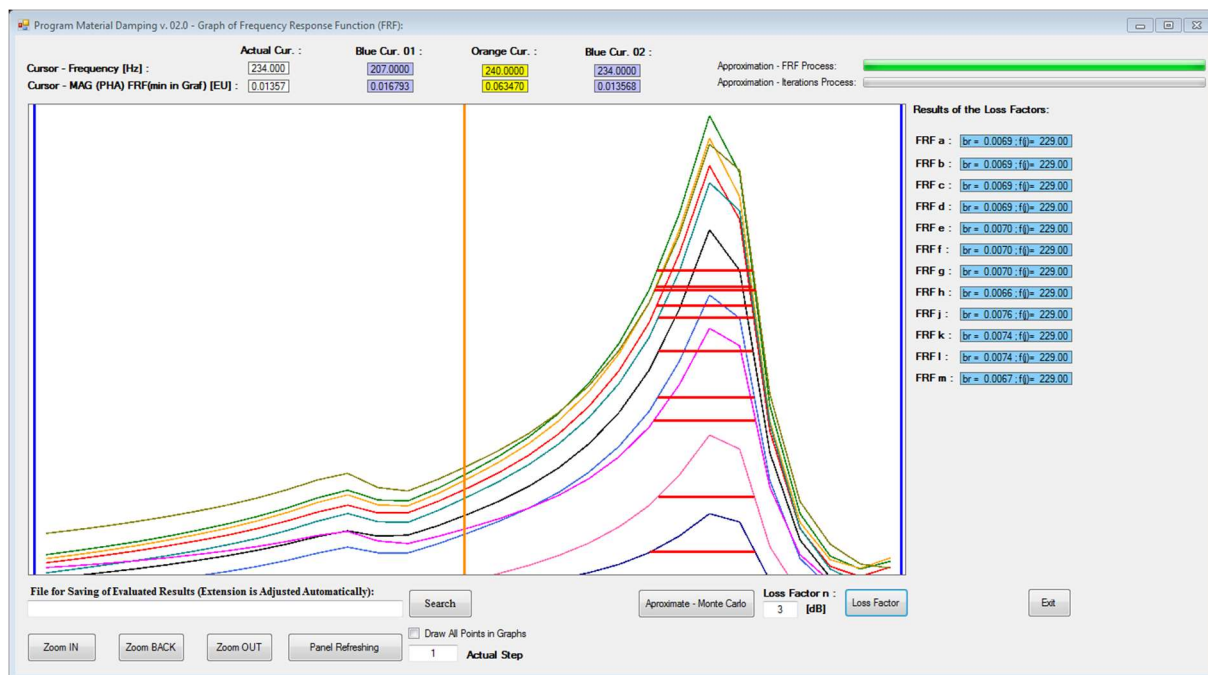
Tab. 15: Porovnání vlastních tvarů a útlumu



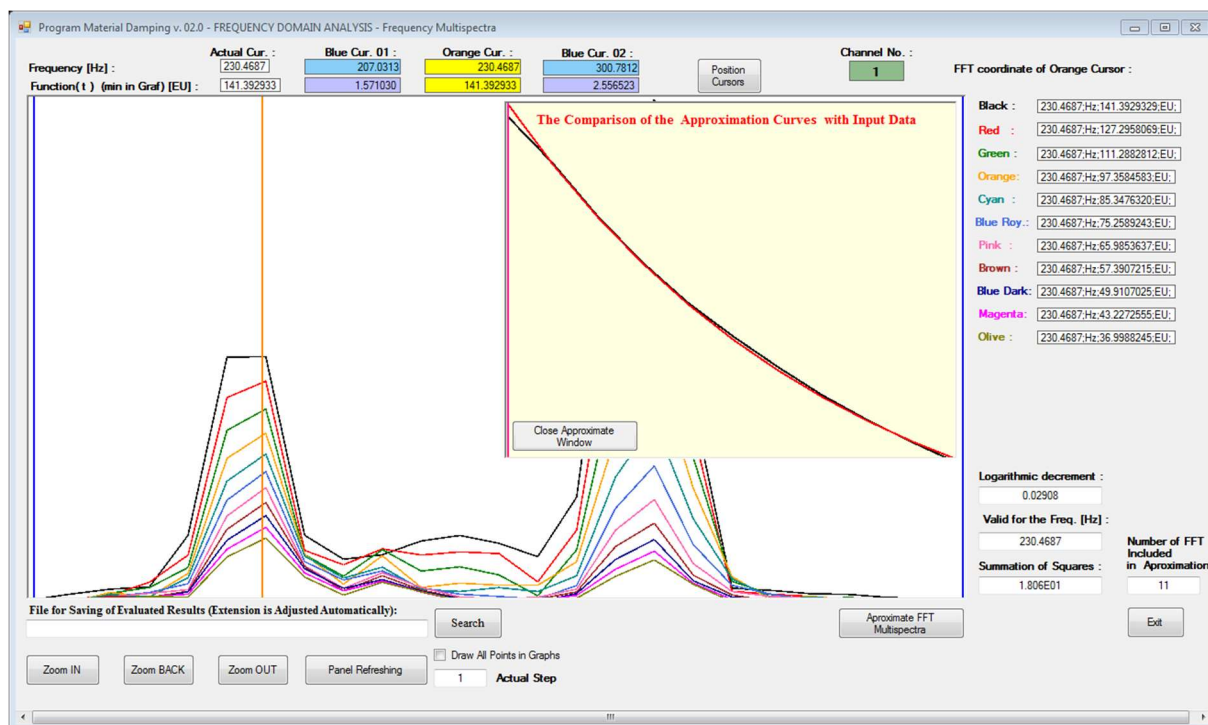
Obr. 64: Vlastní tvar s frekvencí 229 Hz MZ bez tlumících profilů [7]



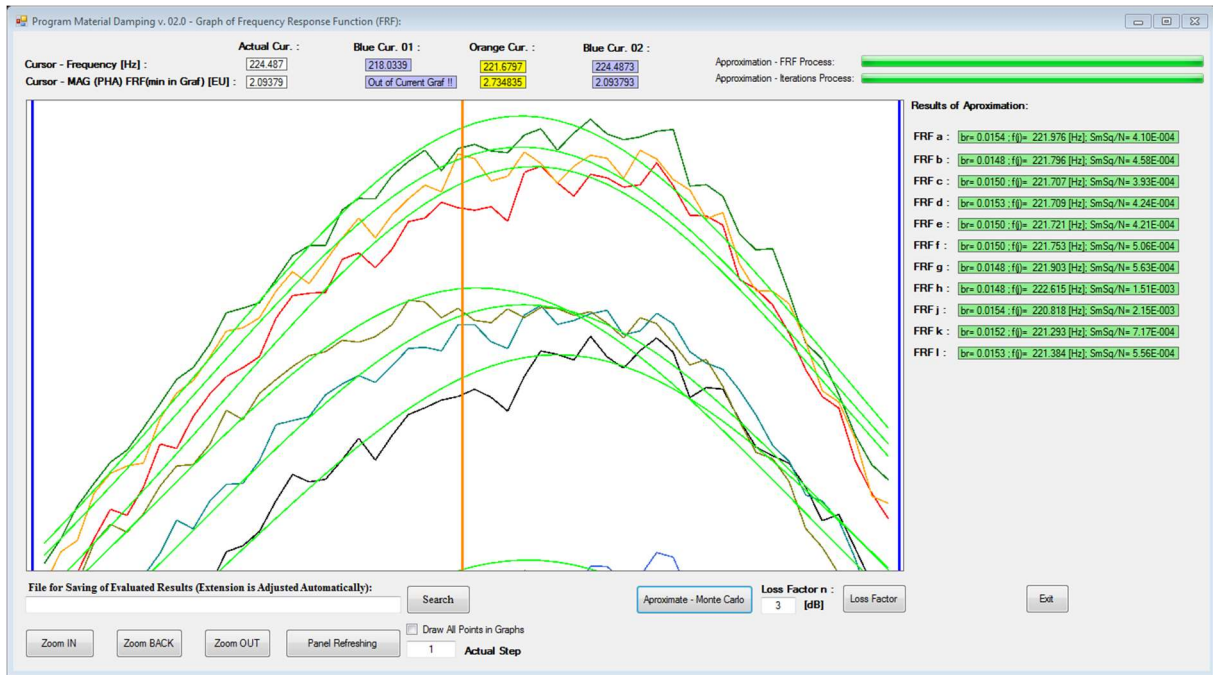
Obr. 65: Vlastní tvar s frekvencí 222 Hz MZ s tlumícími profily [7]



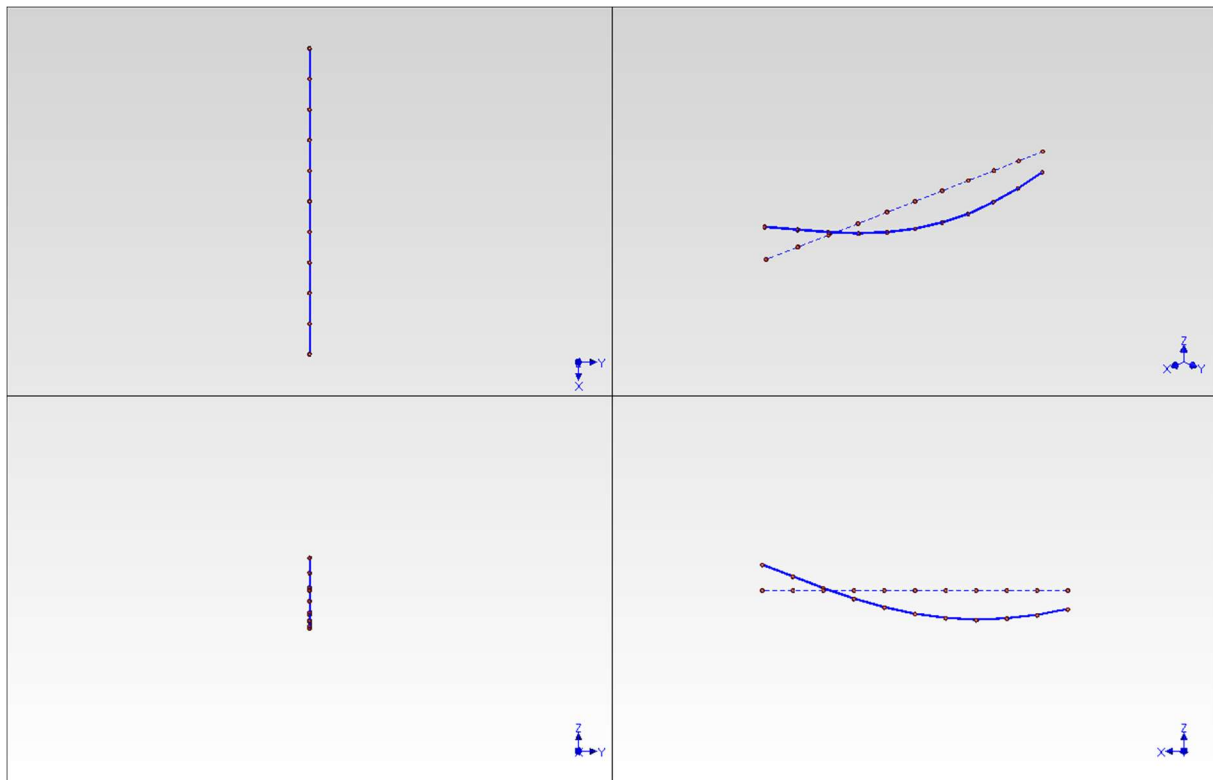
Obr. 66: Vyhodnocení útlumu metodou Loss Factor pro vl.tv. při 229 Hz bez tlumení [7]



Obr. 67: Vyhodnocení útlumu metodou frekvenčních multispekter pro vl.tv. při 229 Hz bez tlumení [7]

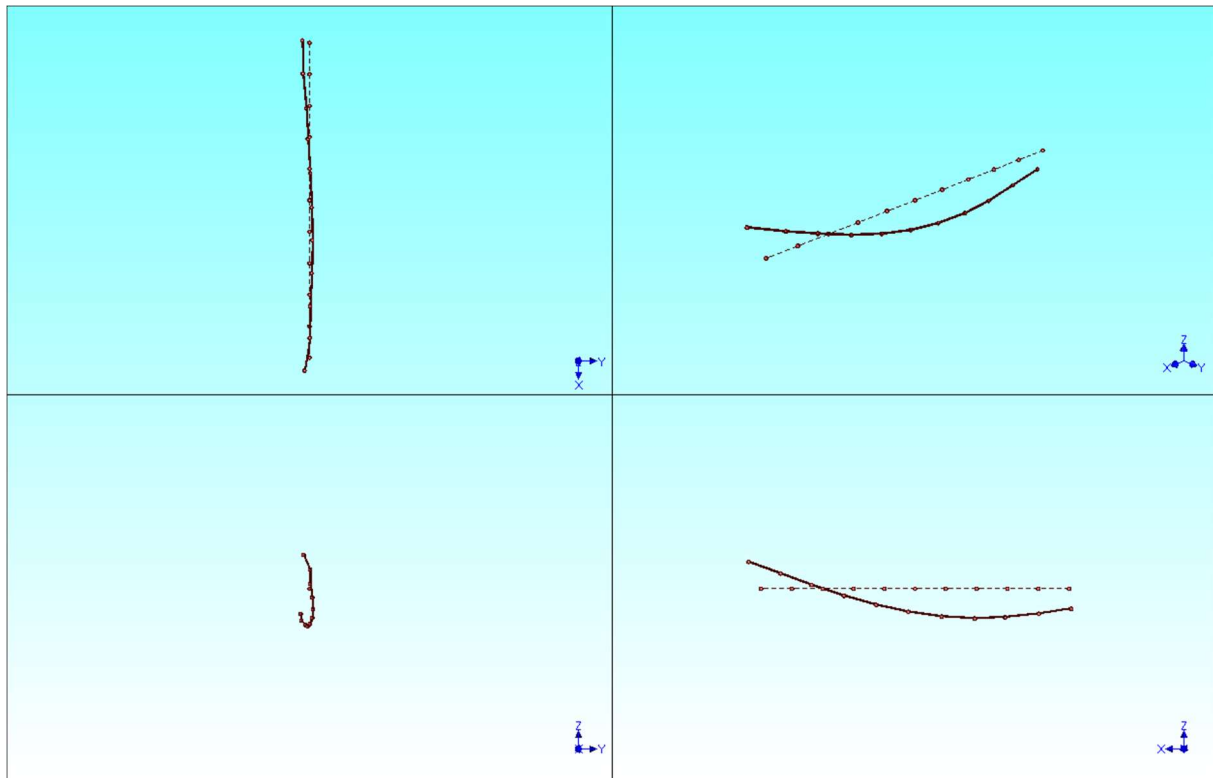


Obr. 68: Vyhodnocení útlumu metodou Monte Carlo pro vl.tv. při 222 Hz s tlumením [7]

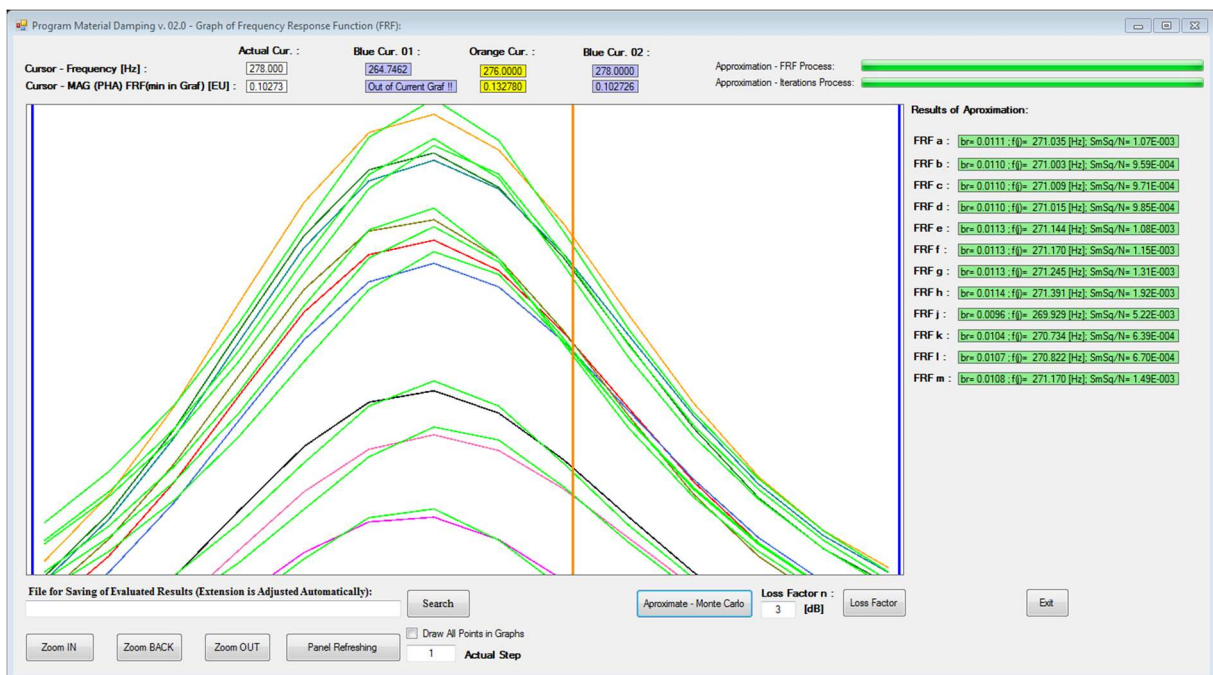


Obr. 69: Vlastní tvar s frekvencí 271 Hz MZ bez tlumících profilů [7]

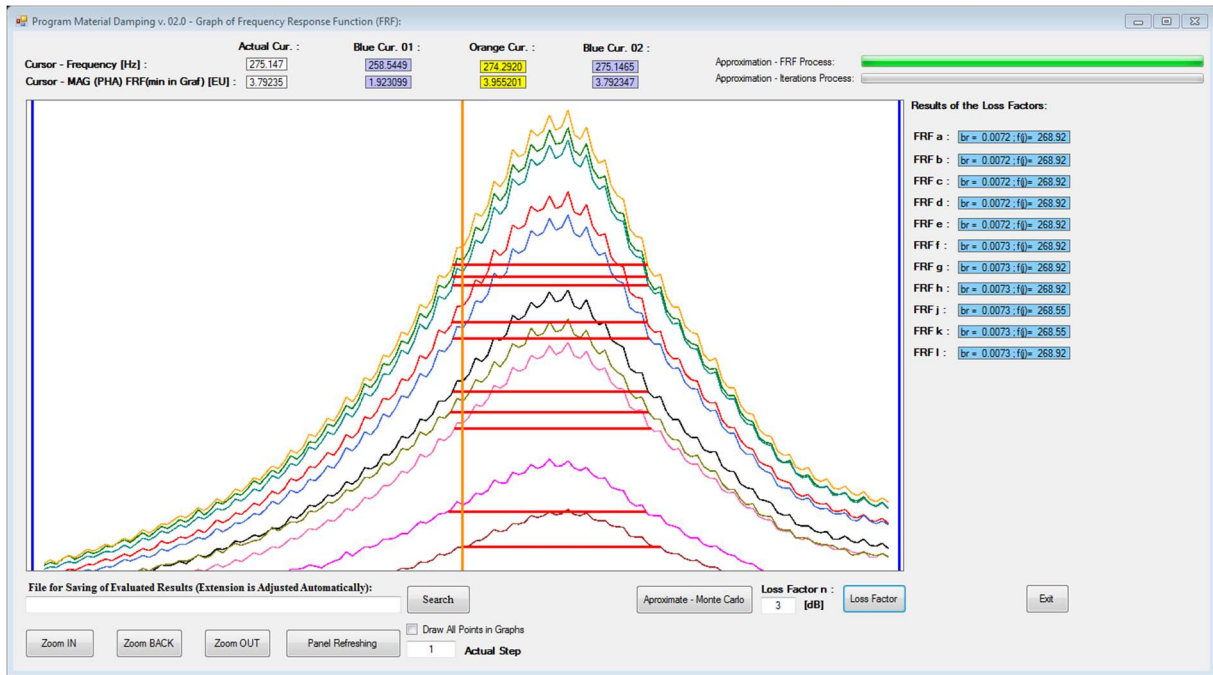




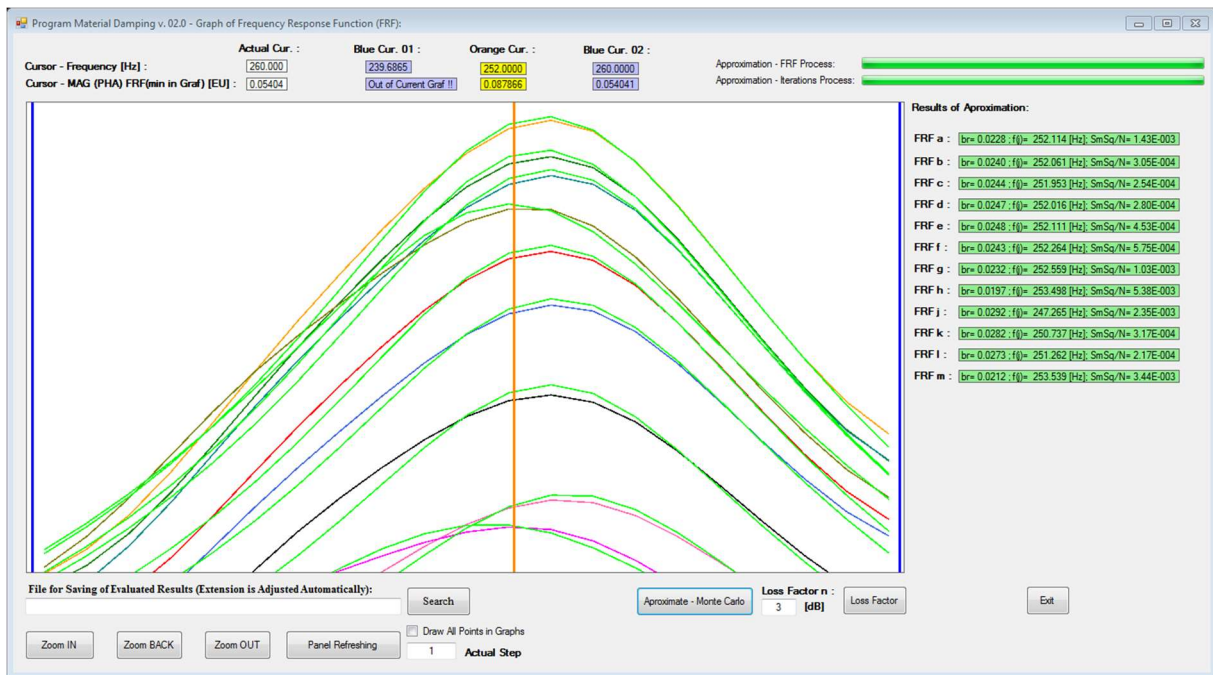
Obr. 70: Vlastní tvar s frekvencí 251 Hz MZ s tlumícími profily [7]



Obr. 71: Vyhodnocení útlumu metodou Monte Carlo pro vl.tv. při 71 Hz bez tlumení [7]



Obr. 72: Vyhodnocení útlumu metodou Loss Factor pro vl.tv. při 269 Hz bez tlumení [7]



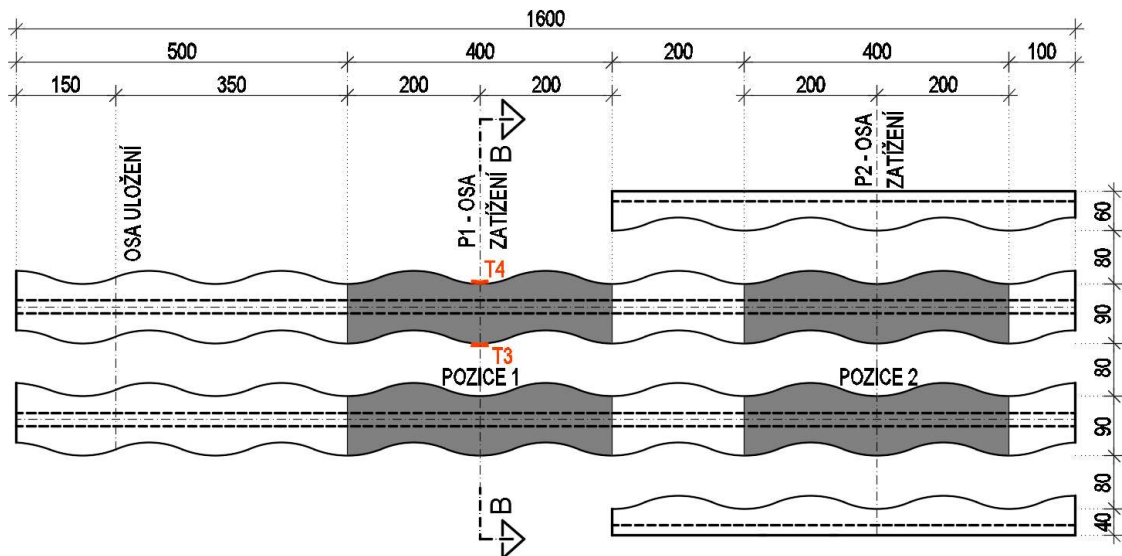
Obr. 73: Vyhodnocení útlumu metodou Monte Carlo pro vl.tv. při 251 Hz s tlumením [7]

## 6 Experimentální ověření - Statická zatěžovací zkouška

Statickou zatěžovací zkoušku provedl ve dnech 21. a 22. prosince 2016 na základě autorem dodaných podkladů tým EC FSv ČVUT v Praze. Účelem celé zkoušky bylo ověření předpokládaného chování a únosnosti segmentu MZ. Vyhodnocení zkoušky provedl autor sám.

### 6.1 Pozice a způsob zatížení

Pro statické zatížení hydraulickým válcem o maximální možné síle 1000 kN byly zvoleny 2 pozice, viz Obr. 74. V pozici 1 vyvolává válec maximální účinky uprostřed rozpětí lamely, v pozici 2 maximální účinky v roznášecím mechanismu.



Obr. 74: Schéma pozic zatížení a tenzometrů na horní pásnici lamely

### 6.2 Zatěžovací stavy

Při experimentu bylo provedeno celkem 5 zatěžovacích stavů. Zatěžovací stavy SZS 1, 2, 4 a 6 sloužily pro experimentální posouzení navrženého MZ na MSÚ. Aplikovaná síla byla určena z charakteristické kolové síly  $F_{1,k} = 150$  kN nápravy TS 1 modelu LM 1 s aplikováním kombinačního součinitele pro zatížení dopravou silničních mostů  $\gamma_Q = 1,35$ . Návrhové zatížení  $F_{1,d} = 1,35 \cdot 150 = 202,5$  kN. MZ byl v každém zatěžovacím stavu 10krát cyklicky zatížen a odtížen.

Rozdíly mezi jednotlivými stavy spočívaly v různých pozicích zatížení, různém rozevření závěru a v použití klínových desek, shrnutí viz Tab. 16.

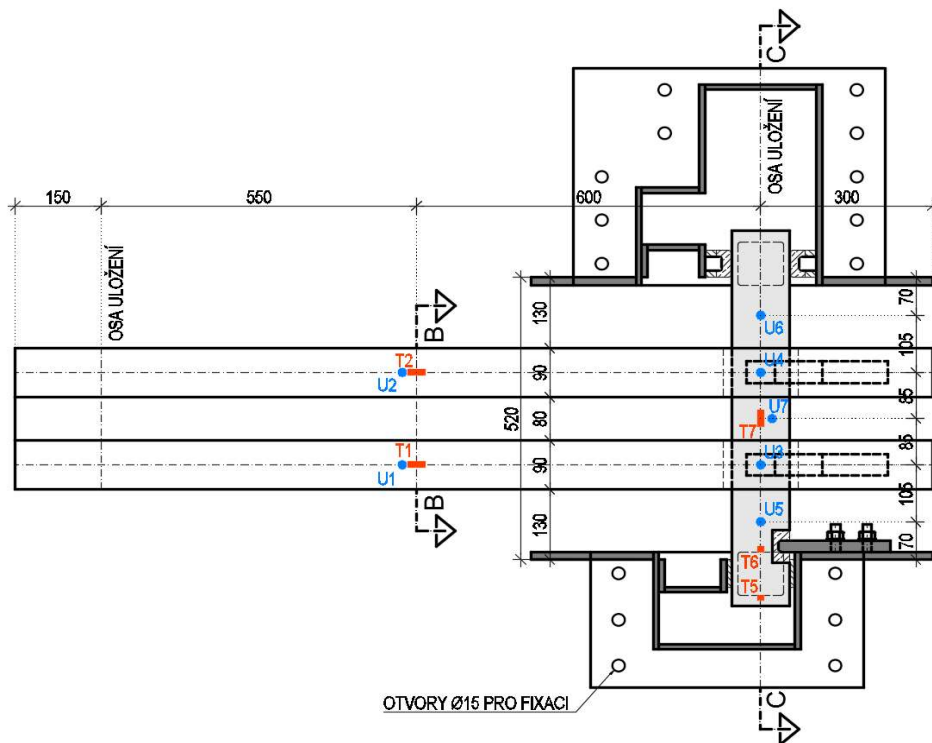
Účelem SZS 7 bylo zjistit, který prvek MZ se při zkoušce do porušení poškodí jako první a jaká síla při tomto poškození působila.

Název ZS	Počet cyklů	Pozice	Rozevření	Klínové desky	Síla [kN]
SZS 1	10	1	maximální	ne	202,5
SZS 2	10	2	maximální	ne	202,5
SZS 4	10	2	minimální	ne	202,5
SZS 6	10	2	minimální	ano	202,5
SZS 7	1	2	minimální	ano	800

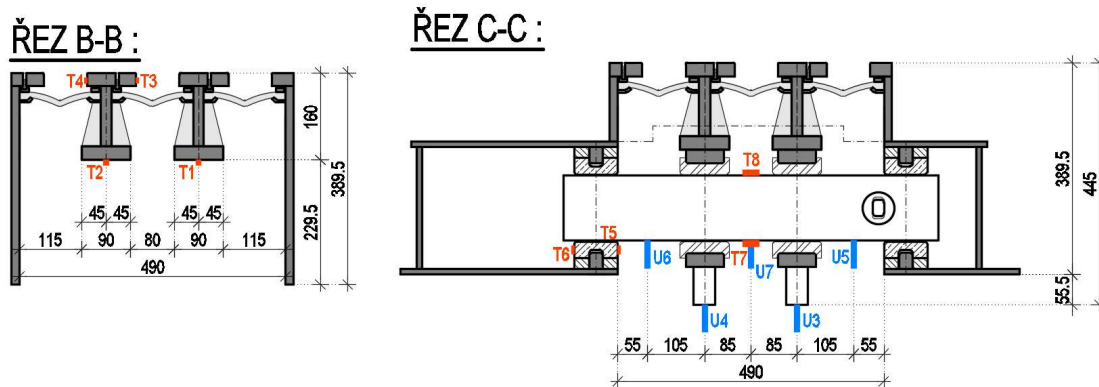
Tab. 16: Shrnutí statických zatěžovacích stavů

### 6.3 Rozmístění snímačů

V průběhu SZZ bylo použito 7 inдуктивních snímačů dráhy U1 – U7 (s různými měřicími rozsahy  $\pm 3$  mm,  $\pm 5$  mm a  $\pm 10$  mm) a 8 tenzometrů T1 – T8 (6x LY11-10/120 pro tenzometry na ocelových částech a 2x LD20-6/120 pro T5 a T6 na zedexovém bloku).



Obr. 75: Schéma tenzometrů a snímačů dráhy na dolním povrchu lamely a traverzy



Obr. 76: Příčné řezy schématy umístění snímačů pro SZZ



Obr. 77: Vlevo umístění T1 a T2, vpravo T3



Obr. 78: Vlevo umístění T4, vpravo T5 (viditelný vpředu) a T6 (skrytý vzadu)



Obr. 79: Vlevo umístění T7, vpravo T8



Obr. 80: Vlevo snímače U1 a U2 v těsné blízkosti tenzometrů T1 a T2, vpravo umístění snímačů dráhy na roznášecím mechanismu - zleva U6, U4, U7, U3 a U5

## 6.4 Průběh SZS 1

V prvním zatěžovacím stavu byl hydraulický válec umístěn do pozice 1, tedy do středu rozpětí lamely. Dilatační spára byla nastavena na maximální hodnotu, volné konce lamel a obě krabice byly přivařené k podkladním nosníkům, tedy stejné uspořádání jako při modální analýze. Smyslem tohoto stavu bylo vyvinout maximální ohybové namáhání lamely uprostřed rozpětí a zjistit rozložení napětí v tomto průřezu.



*Obr. 81: Zatížení při SZS 1*



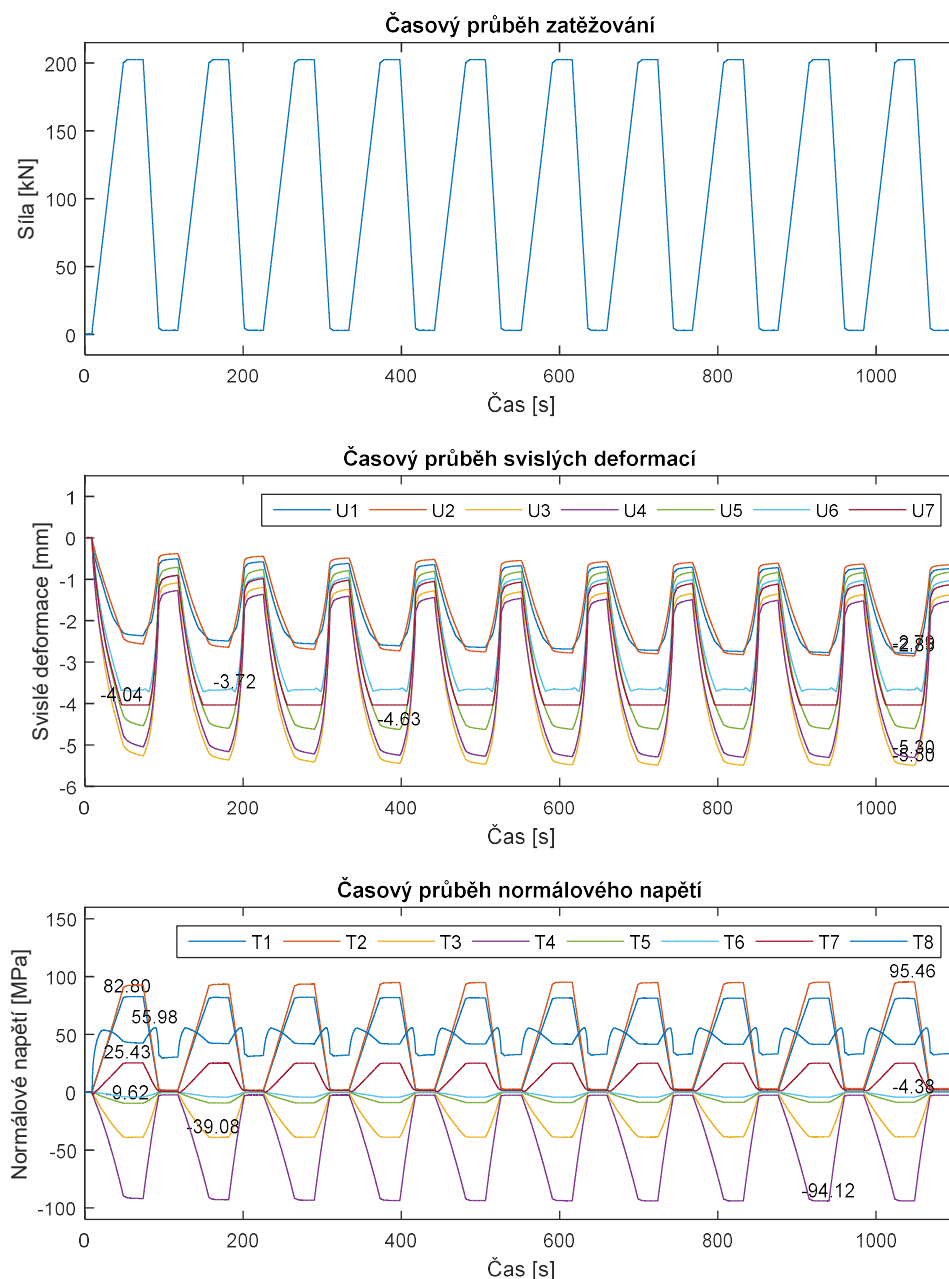
*Obr. 82: Zatlačení zedexového bloku do elastomeru při SZS 1*

V Tab. 17 jsou vypsané maximální a hodnoty sledovaných veličin při SZS 1, zároveň jsou k nim doplněny hodnoty průhybů a napětí v místě snímačů z výpočetního modelu. U snímačů dráhy U6 a U7 došlo k překročení jejich rozsahu, proto jsou hodnoty vypsané červeně.

V Grafu 2 je vykreslen průběh zatěžování a odezvy konstrukce. Průběhy téměř všech veličin odpovídají předpokladu, výjimkou je průběh poměrného přetvoření (přepočítaného na napětí) na tenzometru T8. Tenzometr je umístěn na nerezovém plechu, kterým je obalena traverza. Oproti tenzometru T7, který je umístěn stejným způsobem, je zde ale tenký nerezový plech v tlaku a zřejmě došlo k jeho vyboulení, z toho důvodu je hodnota uvedena červeně.

SZS 1	Experiment		Model		Experiment		Model	
	$\delta_{\max}$ [mm]	$\delta_{\min}$ [mm]	$\delta_{\min}$ [mm]		$\sigma_{\max}$ [MPa]	$\sigma_{\min}$ [MPa]	$\sigma_{\max}$ [MPa]	$\sigma_{\min}$ [MPa]
U1	0,00	-2,79	-2,82	T1	82,8	-0,5	84,2	-
U2	0,00	-2,85	-2,82	T2	95,5	-0,1	84,2	-
U3	0,01	-5,50	-4,45	T3	0,7	-39,1	-	-18,8
U4	0,01	-5,30	-4,45	T4	0,1	-94,1	-	-117
U5	0,00	-4,63	-4,35	T5	0,1	-9,6	-	-5,1
U6	0,01	-3,72	-4,35	T6	0,0	-4,4	-	-4,7
U7	0,01	-4,04	-4,41	T7	25,4	-2,0	39	-
				T8	56,0	-0,5	-	-38,1

Tab. 17: Vlevo maxima a minima průhybů, vpravo tenzometrů při SZS 1



Graf 2: Průběh zatížení a sledovaných veličin při SZS 1

## 6.5 Průběh SZS 2

Při SZS 2 byl lis umístěn do pozice 2, ve které vyvolává největší namáhání v traverze a v uložení v krabicích. Od této chvíle již nebyl lis přesouván, SZS 2-7 byly zatěžovány v pozici 2. Nejsledovanějšími veličinami zde bylo napětí v traverze a zatlačení úložných bloků. Dilatační spára byla stále nastavena na maximální rozevření a konstrukce byla přivařena k podkladním nosníkům.



*Obr. 83: Zatlačení zedexového bloku do elastomeru při SZS 2, patrná větší deformace než při SZS 1*



*Obr. 84: Vlevo poloha zádržného plechu v zedexovém čepu bez zatížení, vpravo se zatížením, viditelný významný rozdíl*

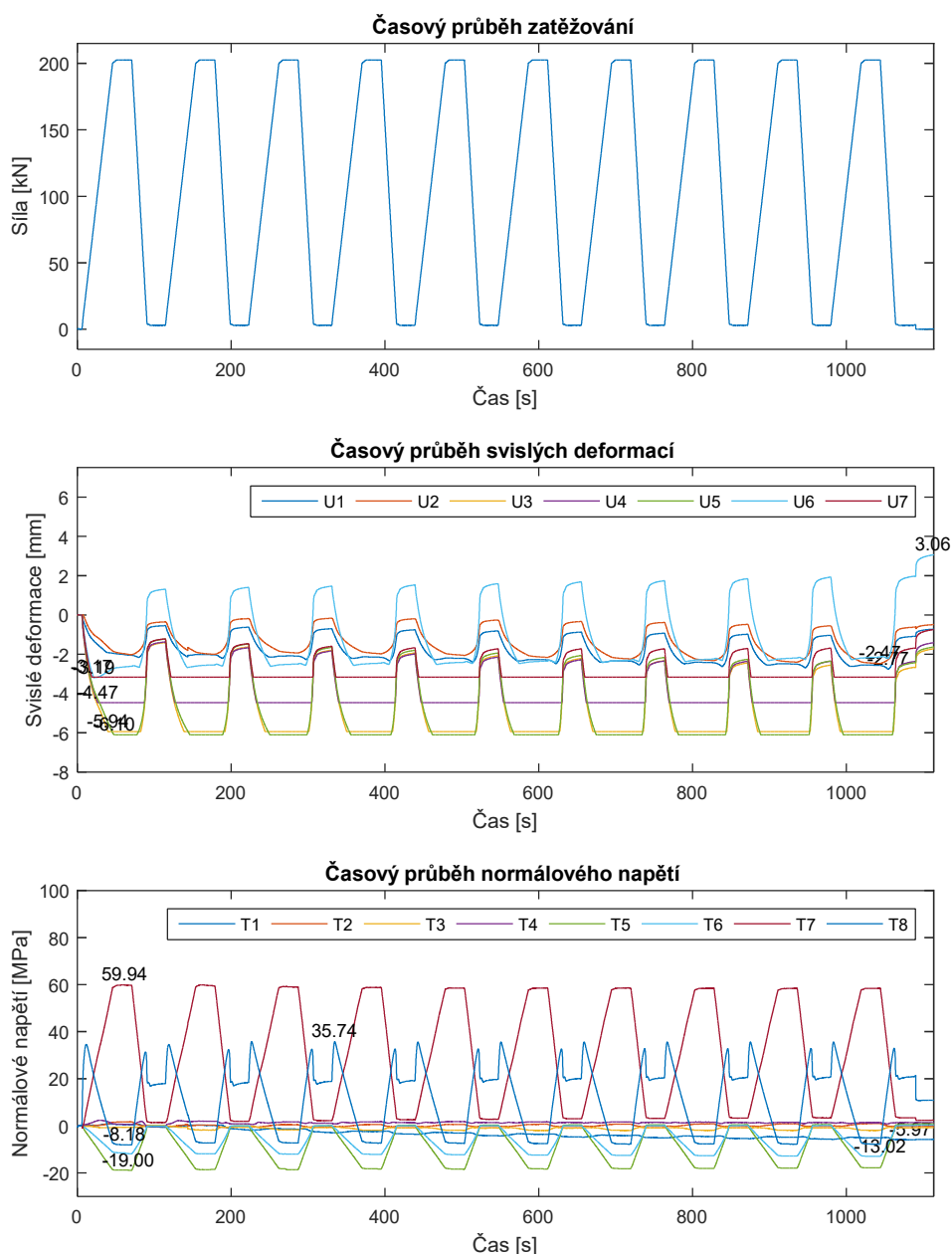
Maximální a minimální hodnoty naměřené v laboratoři a jejich porovnání s hodnotami z výpočetního modelu je v Tab. 18. Tentokrát došlo vzhledem k velmi malé tuhosti elastomerového úložného bloku k velkému zatlačení traverzy, mimo rozsah byly všechny snímače umístěné pod roznášecím mechanismem.

Z průběhu zkoušky na Grafu 3 je opět patrný nestandardní průběh napětí v místě T8, který je zřejmě způsoben boulením nerezového plechu. Ostatní veličiny svým chováním splňují teoretické předpoklady.



SZS 2	Experiment		Model		Experiment		Model	
	$\bar{\delta}_{\max}$ [mm]	$\bar{\delta}_{\min}$ [mm]	$\bar{\delta}_{\min}$ [mm]		$\sigma_{\max}$ [MPa]	$\sigma_{\min}$ [MPa]	$\sigma_{\max}$ [MPa]	$\sigma_{\min}$ [MPa]
U1	0,00	-2,77	-4,37	T1	0,8	-6,0	-	-5,9
U2	0,02	-2,47	-4,37	T2	1,7	-0,7	-	-5,9
U3	0,01	-5,94	-9,25	T3	0,3	-2,0	1,6	-
U4	0,02	-4,47	-9,25	T4	2,4	-0,3	9,2	-
U5	0,01	-6,10	-9,05	T5	0,8	-19,0	-	-10,5
U6	3,06	-3,19	-9,05	T6	0,3	-13,0	-	-9,7
U7	0,01	-3,17	-9,15	T7	59,9	-1,2	81,1	-
				T8	35,7	-8,2	-	-79,2

Tab. 18: Vlevo maxima a minima průhybů, vpravo tenzometrů při SZS 2



Graf 3: Průběh zatížení a sledovaných veličin při SZS 2

## 6.6 SZS 4

SZS 4 je první ze série zatěžovacích stavů s maximálním sevřením dilatační spáry, viz Obr. 85 a Obr. 86. Spára byla nastavena na  $3 \cdot 5 \text{ mm} = 15 \text{ mm}$ , při tomto nastavení je vzdálenost vnějších hran krajních profilů 295 mm. Aby bylo možné toto rozevření nastavit, musely být z traverzy odstraněny tenzometry T7 a T8 a snímač dráhy U7. Zatěžovací lis byl umístěn v pozici 2, pod zatěžovací desku lisu musely být umístěny pryžové podklady, aby byly zatěžovány samostatně pouze vnitřní lamely a ne společně s nimi i krajní profily, viz Obr. 87.

Krabice i volný konec lamely byly před zatěžováním přivařeny k podkladním nosníkům, svary na volném konci lamely ale byly porušeny hned při 1. cyklu zatěžování a volný konec se potom lehce nadzvedával.

Kromě výše uvedených odstraněných snímačů přestal ze začátku zatěžování fungovat tenzometr T5, což je viditelné na Grafu 4.



*Obr. 85: Pohled na horní povrch MZ při minimálním rozevření*



Obr. 86: Vlevo roznášecí mechanismus a vpravo těsnící a tlumící profily při minimální spáře.



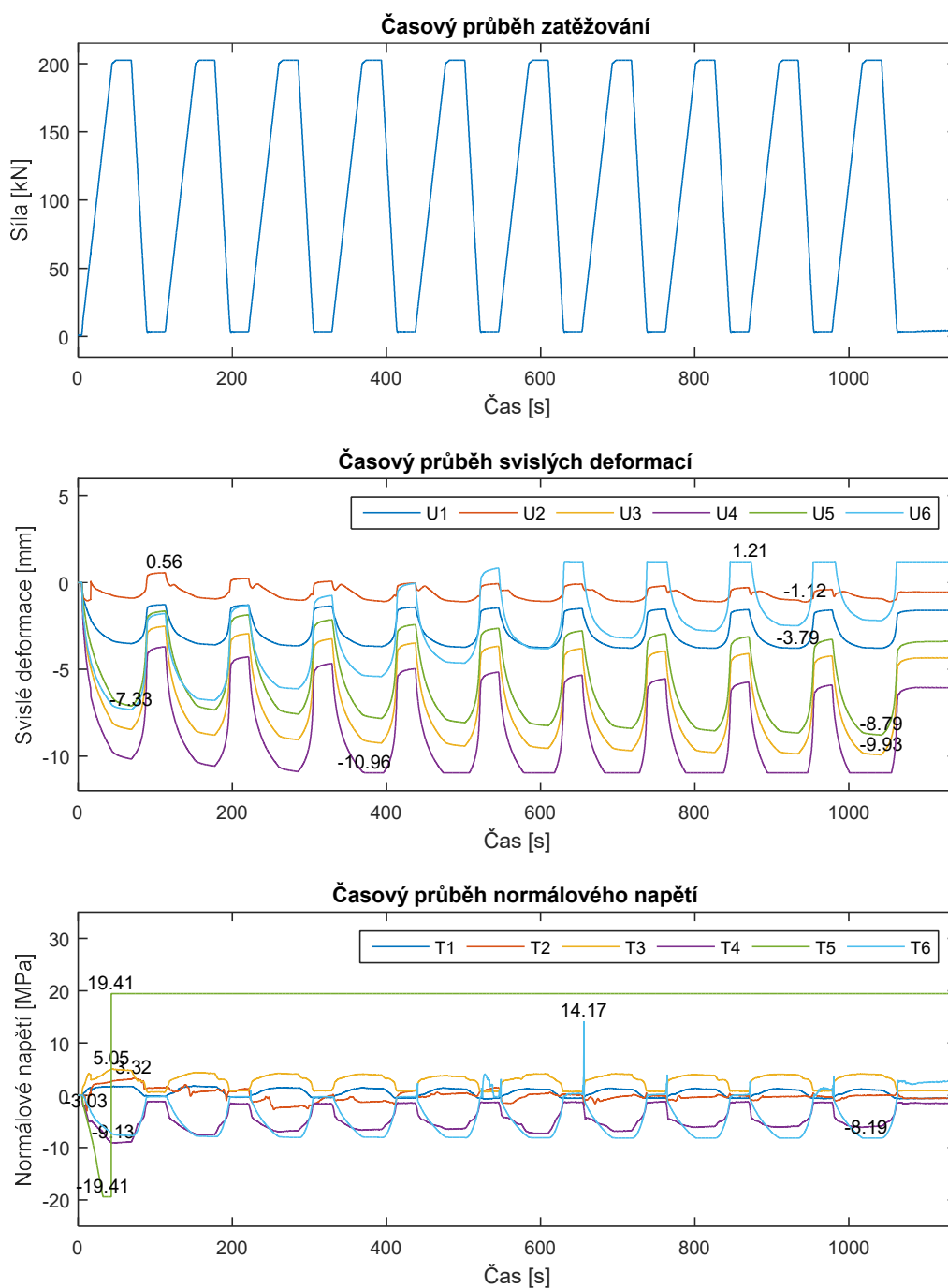
Obr. 87: Vlevo podklady pod zatěžovací deskou, vpravo i s deskou



Obr. 88: Vlevo nárůst vůle mezi traverzou a zedexovým blokem v posuvné krabici při zatížení, vpravo nárůst vůle mezi pevnou krabicí a elastomerovým blokem.

SZS 4	Experiment			Experiment	
	$\delta_{\max}$ [mm]	$\delta_{\min}$ [mm]		$\sigma_{\max}$ [MPa]	$\sigma_{\min}$ [MPa]
U1	0,01	-3,79	T1	1,8	-0,8
U2	0,56	-1,12	T2	3,3	-3,0
U3	0,02	-9,93	T3	5,1	0,0
U4	0,02	-10,96	T4	0,0	-9,1
U5	0,00	-8,79	T5	19,4	-19,4
U6	1,21	-7,33	T6	14,2	-8,2

Tab. 19: Vlevo maxima a minima průhybů, vpravo tenzometrů při SZS 4



Graf 4: Průběh zatížení a sledovaných veličin při SZS 4

## 6.7 SZS 6

Znovu zatěžovací stav s minimální dilatační spárou a lisem v pozici 2, změnou oproti SZS 4 je přidání klínových desek pod krabice. Ty simulují natočení koncového příčnicku mostu. Klínová deska pod pevnou krabicí má sklon  $2,4^\circ$  v podélném směru segmentu, klínová deska pod posuvnou krabicí  $2,4^\circ$  v příčném směru. Volné konce lamely nebyly zavařeny, docházelo k jejich nadzvedávání.

Kvůli natočení závěru je SZS 6 nejkritičtější stavem pro experimentální posouzení roznášecího mechanismu, proto byl segment v první části SZS 6 přírůstkově zatěžován na MSÚ, aby bylo možné sledovat případné poškození. K poškození při zatěžování nedošlo, závěr v pořádku vyhověl na MSÚ. V druhé části zatěžování bylo aplikováno 10 zatěžovacích cyklů na MSÚ jako u předešlých stavů.



Obr. 89: Vlevo klínová deska pod pevnou krabicí, vpravo horní povrch, viditelný výškový rozdíl kvůli klínovým deskám



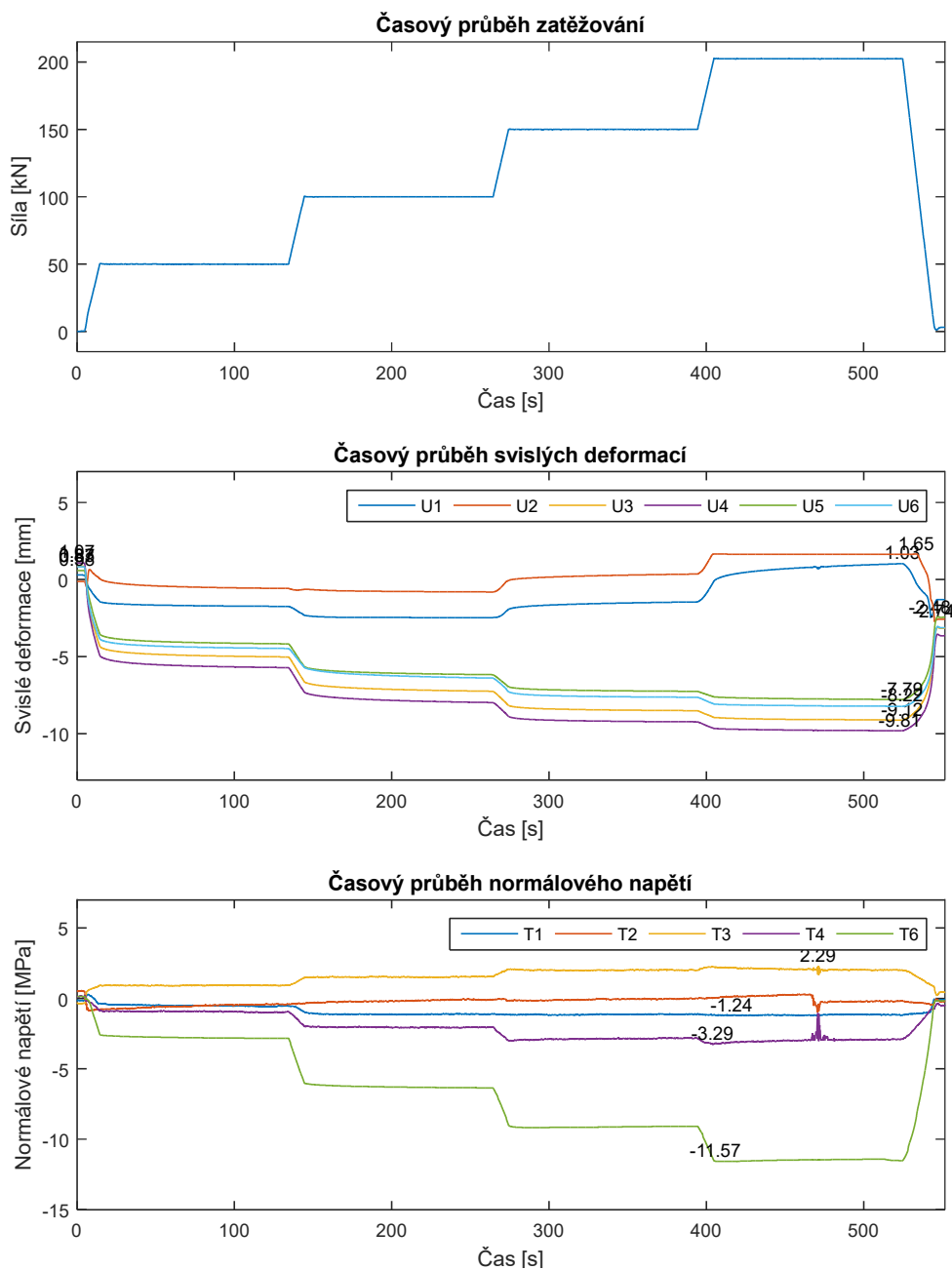
Obr. 90: Vlevo klínová deska pod posuvnou krabicí, vpravo nadzvednutý volný konec



Obr. 91: Vlevo deformovaný úložný elastomer, vpravo vzniklá vůle nad traverzou

SZS 6 přírůstky	Experiment			Experiment	
	$\delta_{\max}$ [mm]	$\delta_{\min}$ [mm]		$\sigma_{\max}$ [MPa]	$\sigma_{\min}$ [MPa]
U1	1,03	-2,48	T1	0,3	-1,2
U2	1,65	-2,74	T2	0,6	-1,0
U3	0,87	-9,12	T3	2,3	-0,4
U4	1,07	-9,81	T4	0,2	-3,3
U5	0,58	-7,79	T6	0,1	-11,6
U6	0,83	-8,22			

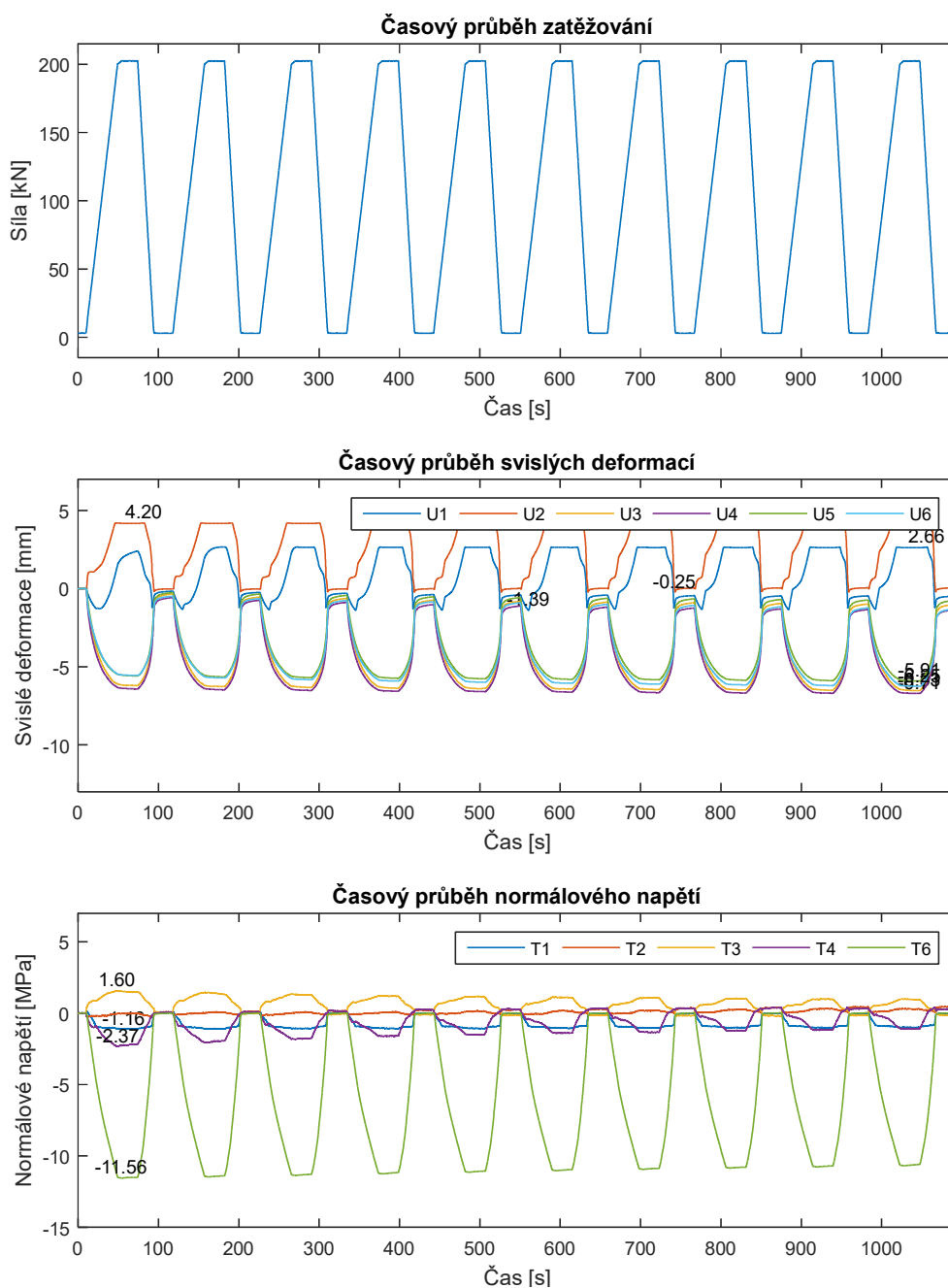
Tab. 20: Vlevo maxima a minima průhybů, vpravo tenzometrů při SZS 6 při postupném zatěžování



Graf 5: Průběh zatížení a sledovaných veličin v první fázi SZS 6

SZS 6	Experiment			Experiment	
	$\delta_{max}$ [mm]	$\delta_{min}$ [mm]		$\sigma_{max}$ [MPa]	$\sigma_{min}$ [MPa]
U1	2,66	-1,39	T1	0,2	-1,2
U2	4,20	-0,25	T2	0,5	-0,3
U3	0,02	-6,53	T3	1,6	-0,3
U4	0,02	-6,71	T4	0,4	-2,4
U5	0,02	-5,91	T6	0,0	-11,6
U6	0,02	-6,25			

Tab. 21: Vlevo maxima a minima průhybů, vpravo tenzometrů při SZS 6



Graf 6: Průběh zatížení a sledovaných veličin v druhé fázi SZS 6

## 6.8 SZS 7

V poslední fázi experimentu měl být vzorek postupně zatěžován až do porušení a měla být určena část, která se poruší první a při jaké síle toto nastane. Porušení žádného prvku nebylo možné dosáhnout, při síle 800 kN došlo k opření zatěžovací desky o krajní profil, pak muselo být zatěžování ukončeno, jelikož by byly zatěžovány krajní profily, které byly pevně podepřeny.

Závěrem se dá konstatovat, že závěr při experimentálním posouzení vyhověl na MSÚ pro 2 extrémní pozice zatížení při maximální spáře, minimální spáře i s klínovými deskami simulujícími natočení koncového příčnicku. Při SZS 7 bylo dokonce zjištěno, že závěr je schopen přenést minimálně 4krát větší svislé zatížení, než je potřeba dle normy.



*Obr. 92: Vlevo podložená zatěžovací deska, vpravo nadzvednutý volný konec lamely při síle 400 kN*



*Obr. 93: Vlevo deformovaný elastomerový blok v pevné krabici při síle 400 kN, vpravo nárůst vůle mezi krabicí a elastomerem při stejné síle*

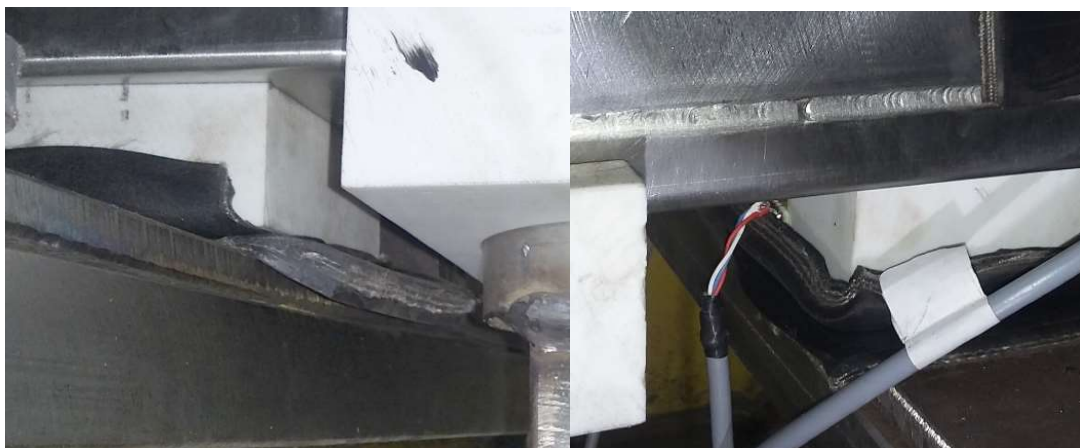




*Obr. 94: Vlevo opření zatěžovací desky o krajní profil při síle, vpravo nadzvednutí volného konce ve stejném okamžiku*



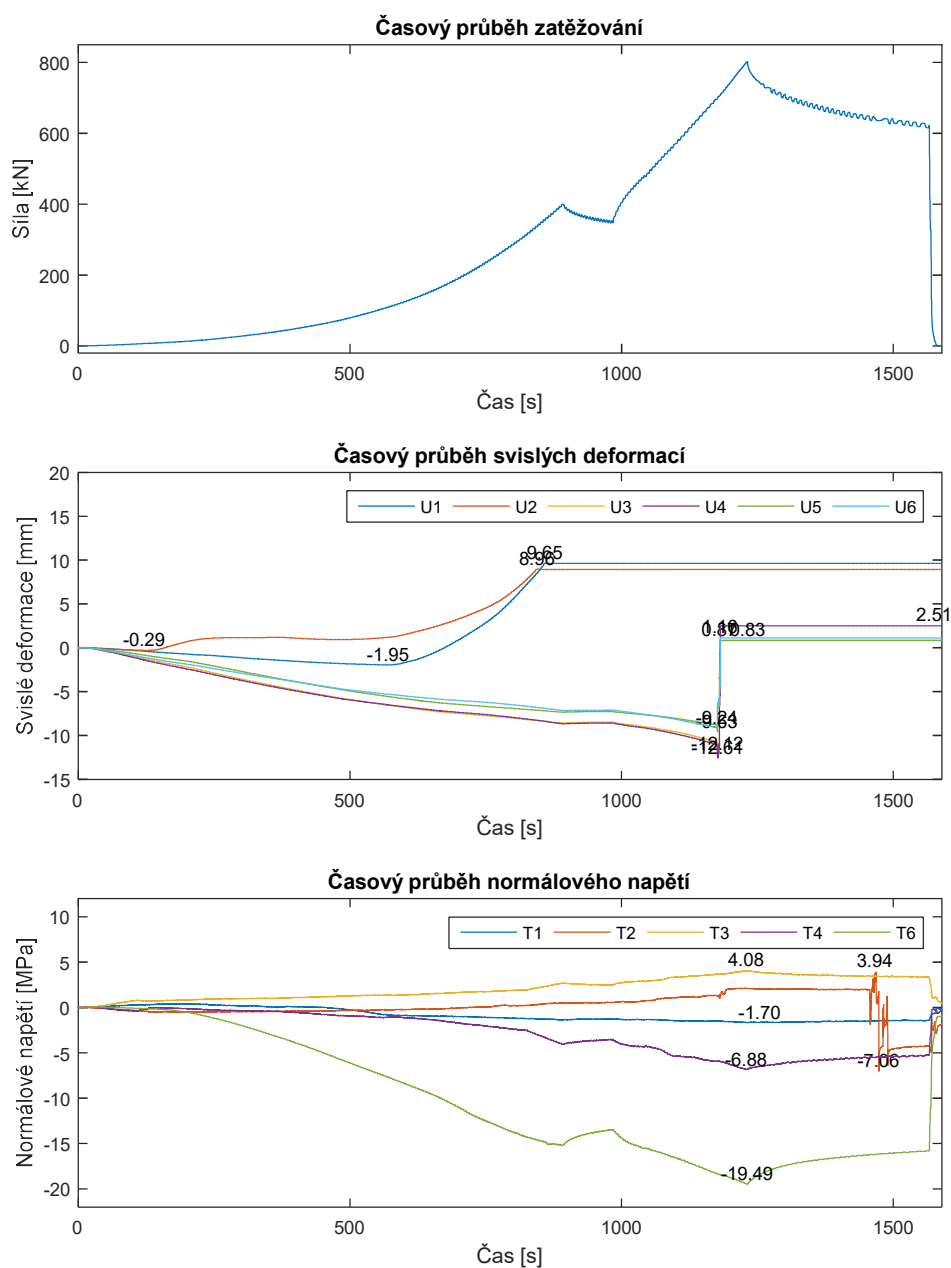
*Obr. 95: Vlevo celkový pohled na roznášecí mechanismus při plném zatížení 800 kN, vpravo posuvná krabice – extrémně deformovaný úložný elastomerový blok a velká vůle mezi traverzou a zedexovým blokem*



*Obr. 96: Extrémně deformované úložné bloky, vlevo posuvná krabice, vpravo pevná*

SZS 7	Experiment			Experiment	
	$\delta_{\max}$ [mm]	$\delta_{\min}$ [mm]		$\sigma_{\max}$ [MPa]	$\sigma_{\min}$ [MPa]
U1	9,65	-1,95	T1	0,5	-1,7
U2	8,96	-0,29	T2	3,9	-7,1
U3	0,87	-12,12	T3	4,1	0,0
U4	2,51	-12,61	T4	0,1	-6,9
U5	0,83	-9,63	T6	0,0	-19,5
U6	1,16	-9,24			

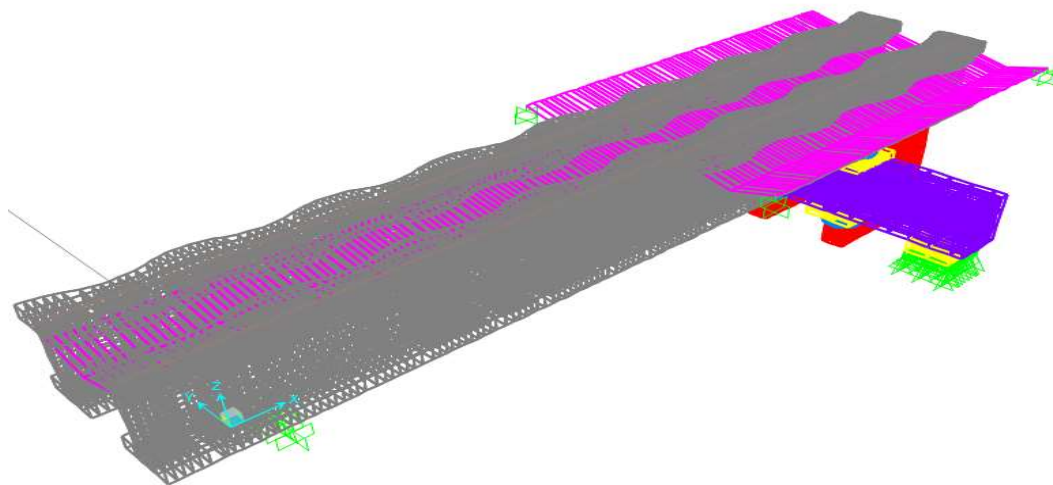
Tab. 22: Vlevo maxima a minima průhybů, vpravo tenzometrů při SZS 7



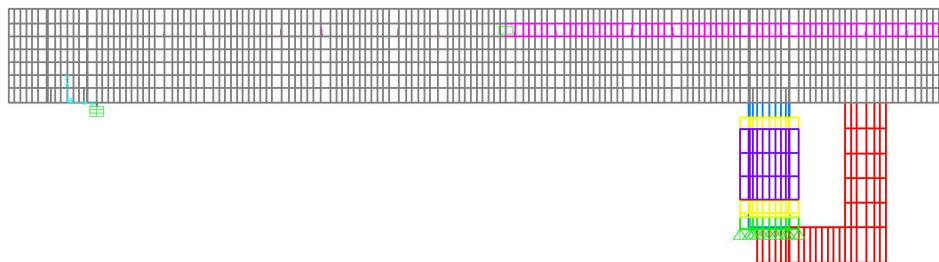
Graf 7: Průběh zatížení a sledovaných veličin při SZS 7

## 6.9 Výpočetní model

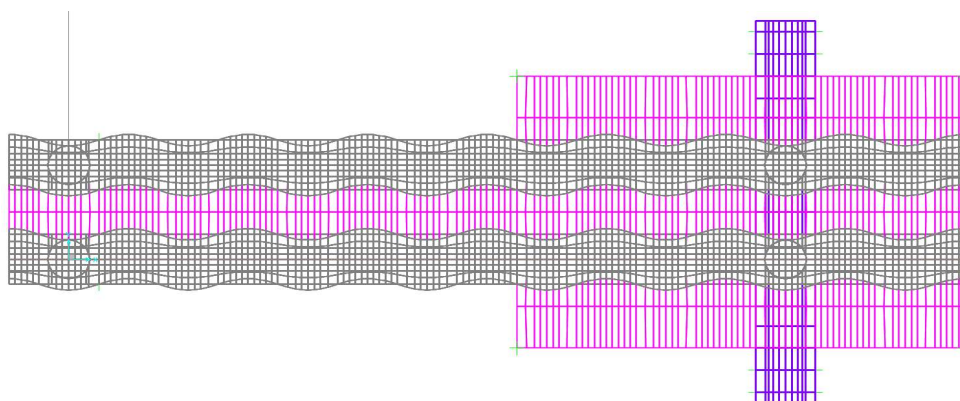
Pro srovnání výsledků experimentu a numerické analýzy byl v programu CSiBridge v15.2.0 vytvořen výpočetní model Segmentu MZ pro experiment. Konceptně je model stejný jako model použitý pro ověření dimenzí prvků MZ v kapitole 4. Model se skládá ze 2 mezilehlých lamel a 1 roznášecího mechanismu. Jako nastavení rozevření MZ byla zvolena maximální dilatační spára, model tedy odpovídá SZS 1 a 2. Zatížení bylo aplikováno jako kontaktní napětí  $2813 \text{ kN/m}^2$ , které odpovídá kolovému tlaku  $150 \text{ kN}$  s kombinačním součinitelem  $1,35$ , tedy  $202,5 \text{ kN}$ . Zatížení bylo aplikováno do stejných pozic jako při experimentu. Screenshots modelu jsou na Obr. 97 - Obr. 101. Po provedení experimentu byl model optimalizován a validován. Charakteristiky použitých materiálů jsou shrnuty v Tab. 23, jejich přiřazení k prvkům MZ v Tab. 24.



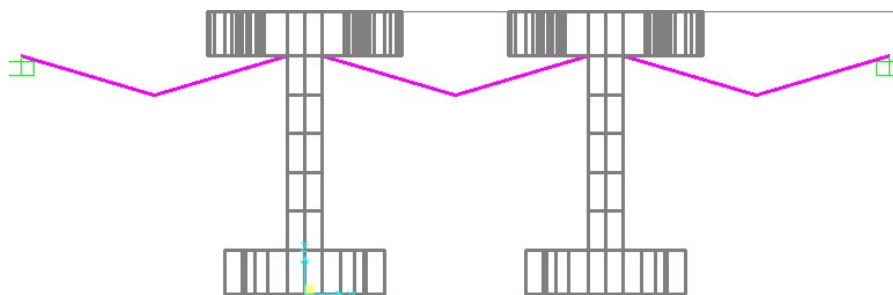
Obr. 97 : Celkový axonometrický pohled na model



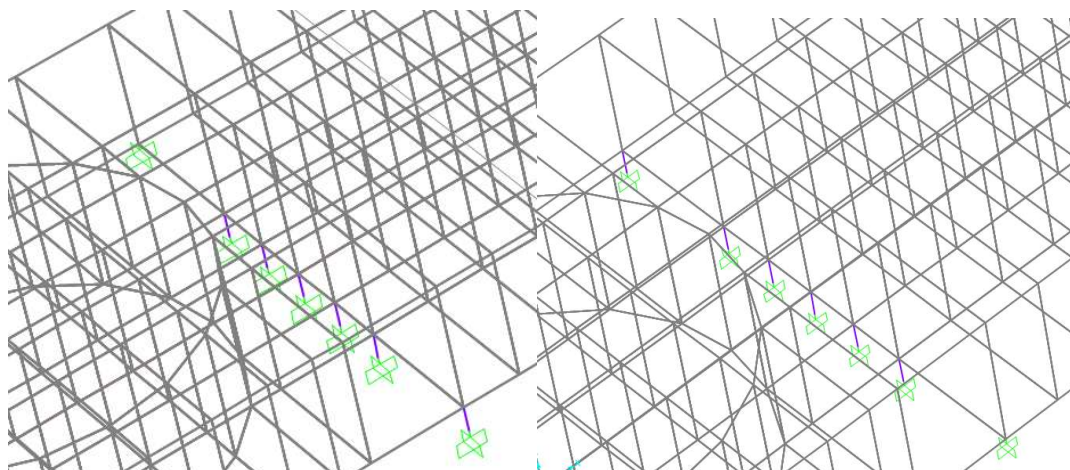
Obr. 98: Podélný pohled na model



Obr. 99: Pohled shora na model



Obr. 100: Příčný řez modelem



Obr. 101: Uložení volného konce lamel – na kraji vetknutí simulující svary, ostatní podpory jsou pruty působící pouze v tlaku, ty simulují podložení kolejnic.

Materiál	Objemová tíha	Modul pružnosti	Mez kluzu	Poissonův součinitel
	$\gamma$ [kg/m <sup>3</sup> ]	E [GPa]	$f_y$ [MPa]	$\nu$ [-]
S355	7850	210	355	0,3
Nerezová ocel 1.4404	7850	200	235	0,3
EPDM	1050	1,5	-	0,45
EPDM 2	0	1,5	-	0,45
ZX-100K	1350	2,5	-	0,3

Tab. 23: Přehled vlastností použitých materiálů

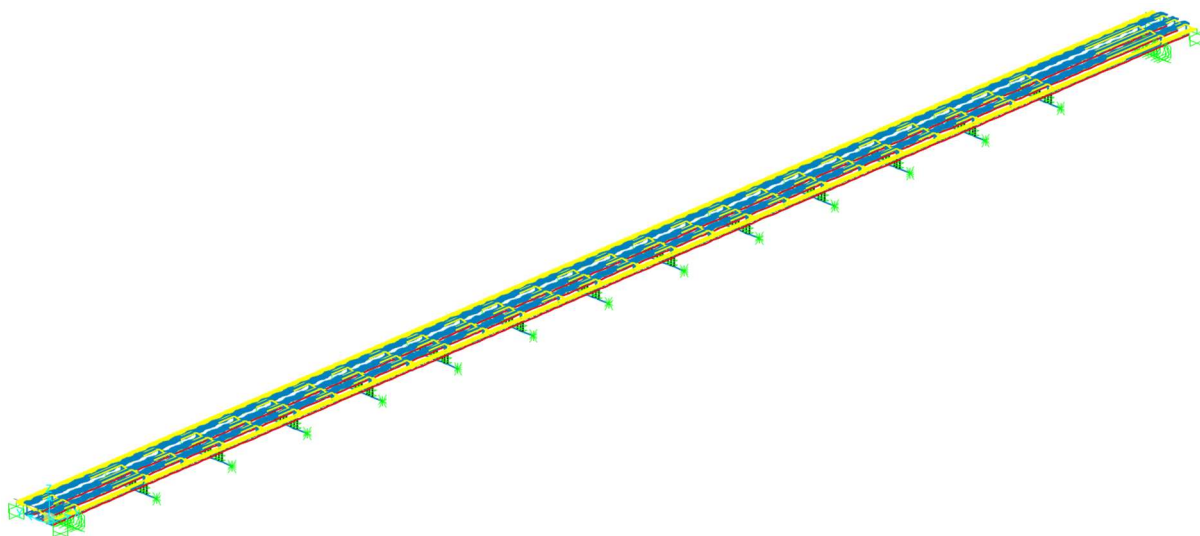
Prvek	Materiál	Barva
Lamela	S355	Šedá
Traverza	S355	Fialová
Kluzný blok	ZX-100K	Žlutá
Úložný blok	EPDM	Zelená
Čep	Nerezová ocel 1.4404	Modrá
Úchyt	S355	Červená
Tlumící profil	EPDM 2	Růžová

Tab. 24: Přiřazení materiálů k prvkům

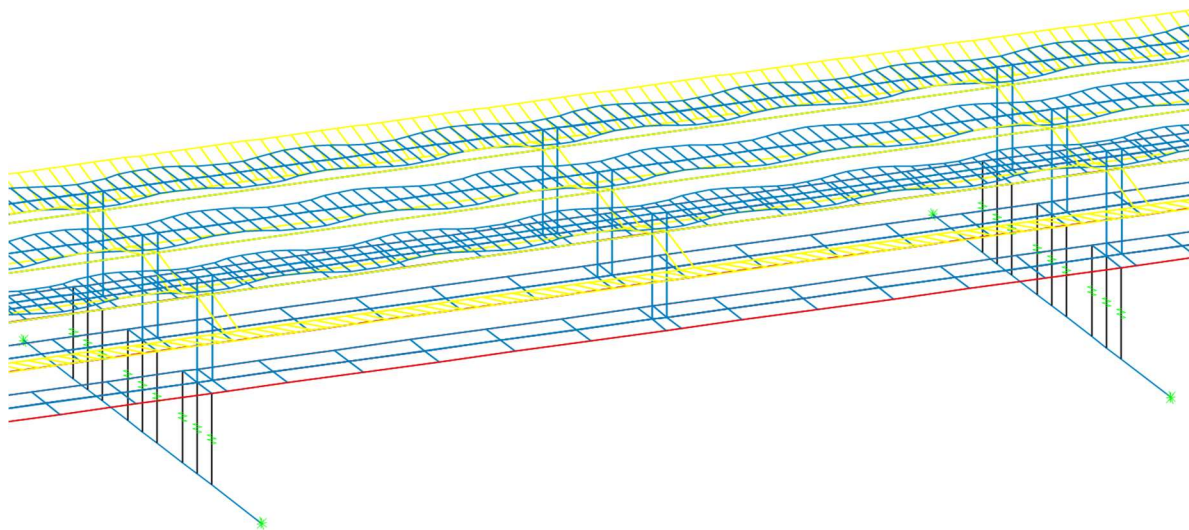
## 7 Numerická analýza poškození

### 7.1 Výpočetní modely

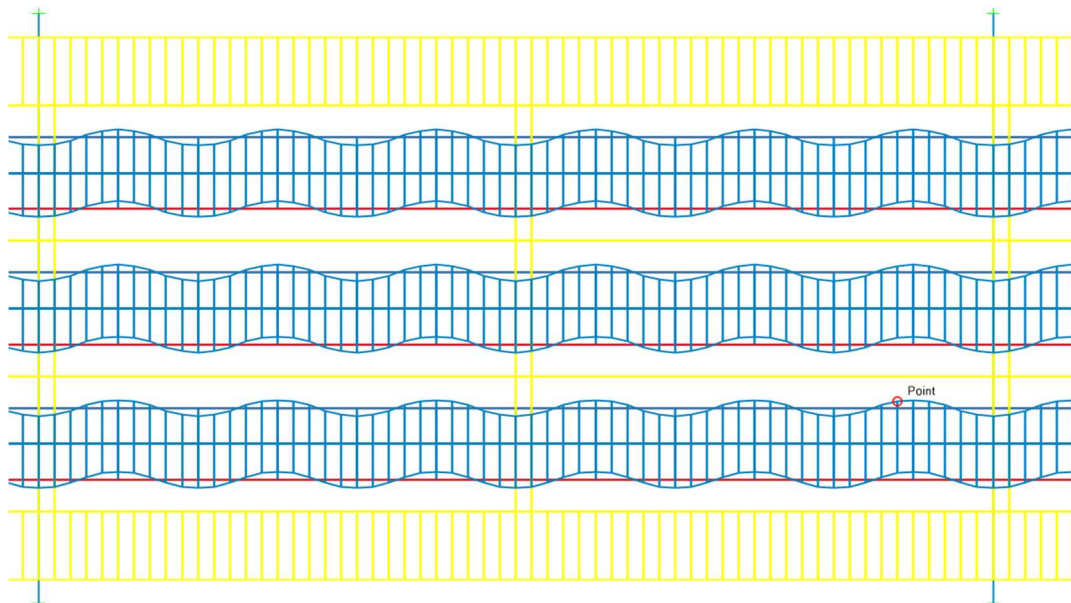
Pro zjištění chování MZ při různých poruchách a pro stanovení indikátorů poškození byla provedena numerická analýza na segmentu MZ se 13 roznášecími mechanismy, lamely zde tedy působí jako spojité nosníky o 12 mezilehlých polích, rozpětí pole je 1,2 m. Převíslé konce v oblasti říms jsou podepřeny vodícím mechanismem, což přidává další 2 krajní pole. Toto uspořádání statickým schématem i šířkovým uspořádáním odpovídá skutečnému mostnímu závěru. Z důvodu nárůstu velikosti konstrukce oproti segmentu pro dimenzování bylo nutné použít modely s kombinací deskostěn a prutů namísto brickového modelu. Screenshoty modelu jsou na Obr. 102 - Obr. 104.



*Obr. 102: Celkový pohled na dispozici modelu*

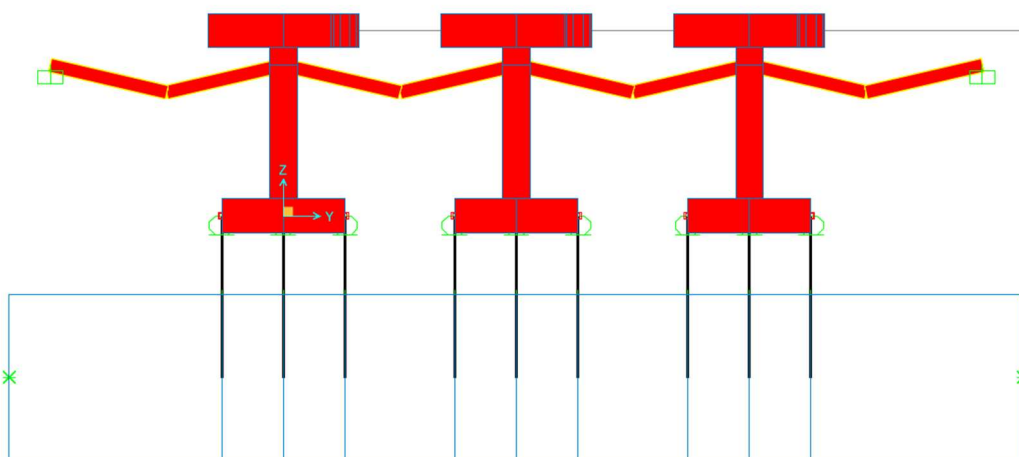


*Obr. 103: Detail pole v axonometrickém pohledu*



Obr. 104: Detail pole shora

Lamely jsou jako jediný průřez vytvořeny z plošných prvků, aby bylo uváženo jejich reálné chování při přejezdu zatěžovacího vozidla, tedy účinky kroucení. Kvůli zachování průřezových charakteristik skutečného průřezu lamely musely být deskostěny modifikovány některé vlastnosti. Pro HP a DP byl nastaven modifikátor plochy ve směru lokální osy 1 (v podélném směru lamely) „ $f_{11}$ “ = 0,91. Díky této změně bylo dosaženo potřebného momentu setrvačnosti  $I_y$  a tedy i průhybu. Mezi lamely byly vloženy deskostěny simulující těsnící profily z EPDM, viz Obr. 105.



Obr. 105: Detail lamel a těsnících profilů

Pro uložení lamely z plošných prvků na prutovou traverzu byly použity lineární vazby (linky). Lamela je ve skutečnosti uložena pomocí nerezového čepu a úložného bloku, pro oba prvky byla určena jejich tuhost  $k$ , výsledná tuhost pro 1 link pak odpovídá třetině tuhosti sériového zapojení obou prvků.

Tuhost nerezového čepu:

Modul pružnosti  $E = 210 \text{ GPa}$ , průměr  $d = 0,07 \text{ m}$ , výška  $L = 0,025 \text{ m}$

$$k_1 = \frac{E * A}{L} = \frac{210 * 10^3 * \pi * \frac{0,07^2}{4}}{0,025} = 32\,327,0 \text{ MN/m}$$

Tuhost úložného bloku:

Modul pružnosti  $E = 2,5 \text{ GPa}$ , šířka  $a = 0,09 \text{ m}$ , délka  $b = 0,1 \text{ m}$ , výška  $L = 0,02 \text{ m}$

$$k_2 = \frac{E * A}{L} = \frac{2,5 * 10^3 * 0,09 * 0,1}{0,02} = 1\,125,0 \text{ MN/m}$$

Výsledná celková tuhost:

$$k_c = \frac{k_1 * k_2}{k_1 + k_2} = \frac{32\,327 * 1125}{32\,327 + 1125} = 1087,2 \text{ MN/m}$$

Tuhost 1 linku:

$$k_{link} = \frac{k_c}{3} = \frac{1087,2}{3} = 362,4 \text{ MN/m}$$

Přehled materiálů použitých ve výpočetních modelech viz

Materiál	Objemová tíha	Modul pružnosti	Mez kluzu	Pevnost	Poissonův součinitel
	$\gamma$ [kg/m <sup>3</sup> ]	E [MPa]	$f_y$ [MPa]	$f_u$ [MPa]	$\nu$ [-]
S355	7850	210 000	355	510	0,3
EPDM	0	15	-	-	-

Tab. 25: Použité materiály

## 7.2 Poruchy

Pro možnosti diagnostikování vlivu poruchy na chování MZ bylo vytvořeno 7 výpočetních modelů s různými poruchami, jejich přehled je v Tab. 26.

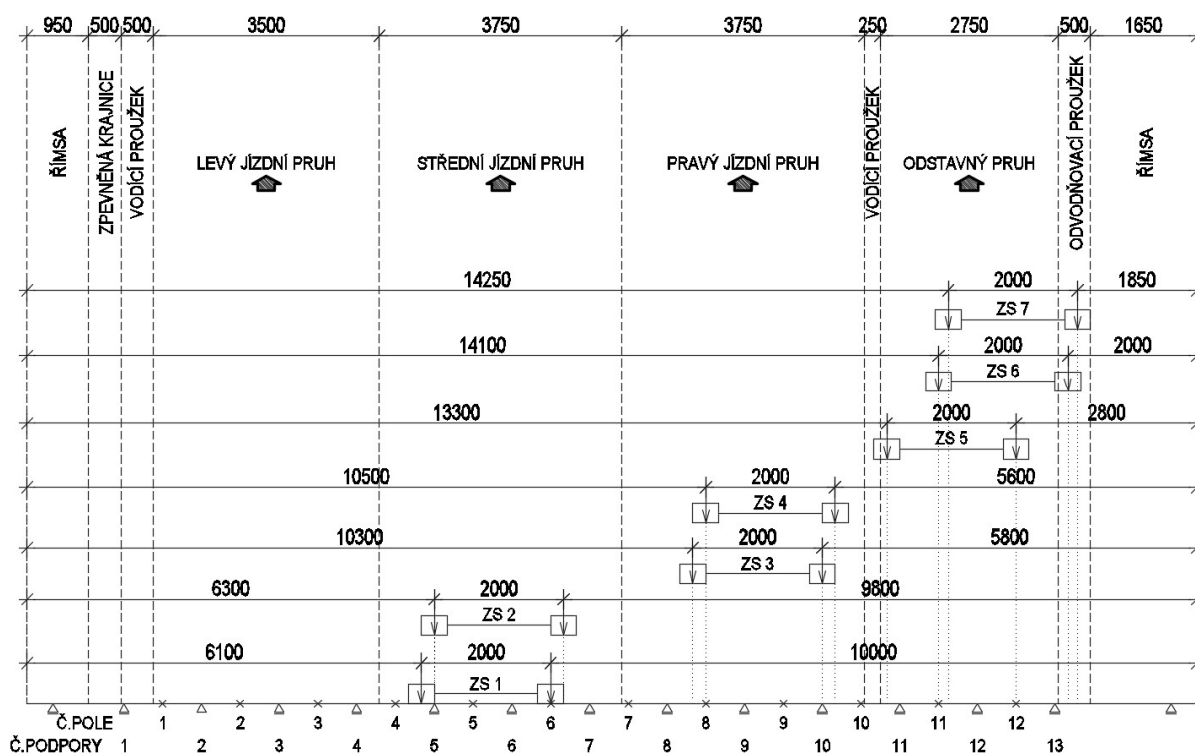
Model	Porucha
M2	-
M3	Trhlina v 1. lamelle v 8. poli
M4	Trhlina v 2. lamelle v 8. poli
M5	Trhlina v 3. lamelle v 8. poli
M6	Trhlina v 1. lamelle nad 10. podporou
M7	Poškození kluzného bloku pod 1. lamelou nad 10. podporou
M8	Poškození posuvného úložného bloku v 10. podpoře
M9	Trhlina v 1. lamelle nad 10. podporou, lamela není v podpoře vůbec držena

Tab. 26: Seznam poruch

### 7.3 Zatížení

Cílem analýzy je zjistit reálné dynamické chování MZ při přejezdu 12t (120 kN) nápravy, což je největší přípustná hmotnost nápravy na pozemních komunikacích povolena ŘSD. Pro přejezdy byla zadána rychlost 25 m/s (90 km/h), tedy nejpravděpodobnější rychlost, kterou budou přes závěr přejíždět TNV. Zatížení formou přejezdů simuluje dynamické účinky, proto není použit dynamický součinitel, zároveň nejsou použity žádné kombinace zatížení ani kombinační součinitele.

Celkem bylo zvoleno 7 pozic zatěžovacích stavů, které vyvozují maximální účinky na lamele v poli/nad podporou nebo maximální svislé reakce. Zároveň byl brán ohled na polohu nápravy vzhledem k šířkovému uspořádání komunikace. Pozice 1 a 2 odpovídají jízdě těžkého nákladního vozidla (TNV) ve středním pruhu, pozice 3 a 4 v pravém pruhu (nejreprezentativnější) a pozice 5, 6 a 7 v odstavném pruhu, schéma je znázorněno na Obr. 106.



Obr. 106: Schéma pozic náprav FLM 3



## 7.4 Porovnání zrychlení deformací lamely

Z výsledků výpočtů byly vytvořeny přehledné grafy, které byly analyzovány. V prvním kroku byly určeny maximální hodnoty zrychlení, které se na nepoškozené konstrukci běžně vyskytují, viz Tab. 27, vodorovně jsou kladné hodnoty ve směru jízdy vozidla, svisle proti směru gravitace.

Vodorovné deformace	$a_{2,max}$ [mm]	$a_{2,min}$ [mm]
Nepoškozený MZ	1380	-1394
Zvýšení o 10%	1518	-1533

Svislé deformace	$a_{3,max}$ [mm]	$a_{3,min}$ [mm]
Nepoškozený MZ	1404	-1454
Zvýšení o 10%	1544	-1599

Tab. 27: Běžné hodnoty zrychlení na nepoškozeném MZ

Dále byly pro jednotlivá pole, podpory a zatěžovací stavy sledovány výchylky a do Tab. 28 vypsány hodnoty, které překračují alespoň o 10% maximální běžné výchylky.

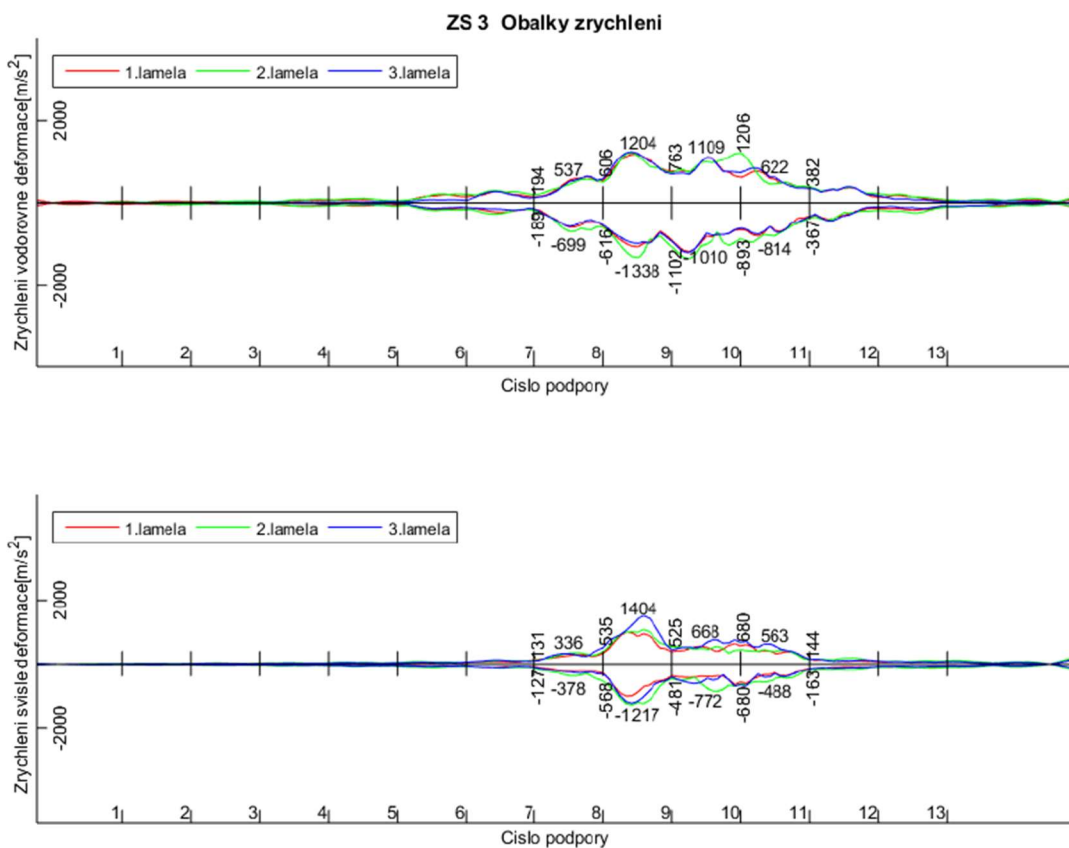
K nárůstu zrychlení deformací došlo pouze v okolí místa poruchy, tedy u modelů M3, M4 a M5 jen v poškozeném 8. poli a to pouze pod poškozenou lamelou. U modelů M6 a M9 se poškození projevuje v podstatě pouze v 10. podpoře. U modelů M7 a M8, kdy bylo poškozené uložení traverzy, nelze poškození ze změny zrychlení deformací téměř vůbec identifikovat.

Obecně se dá z porovnání zrychlení deformací vyvodit závěr, že poruchy MZ lze identifikovat pouze podle zvýšení zrychlení vodorovných a svislých deformací přímo v místě poruchy. Vzhledem k omezené kapacitě připojených snímačů k ústředně není možné monitorovat najednou celý MZ, akcelerometry by proto byly umístěny pouze na část MZ v pravém jízdním pruhu, kde je statisticky nejfrekventovanější doprava těžkých nákladních vozidel a tedy nejpravděpodobnější místo poruchy.

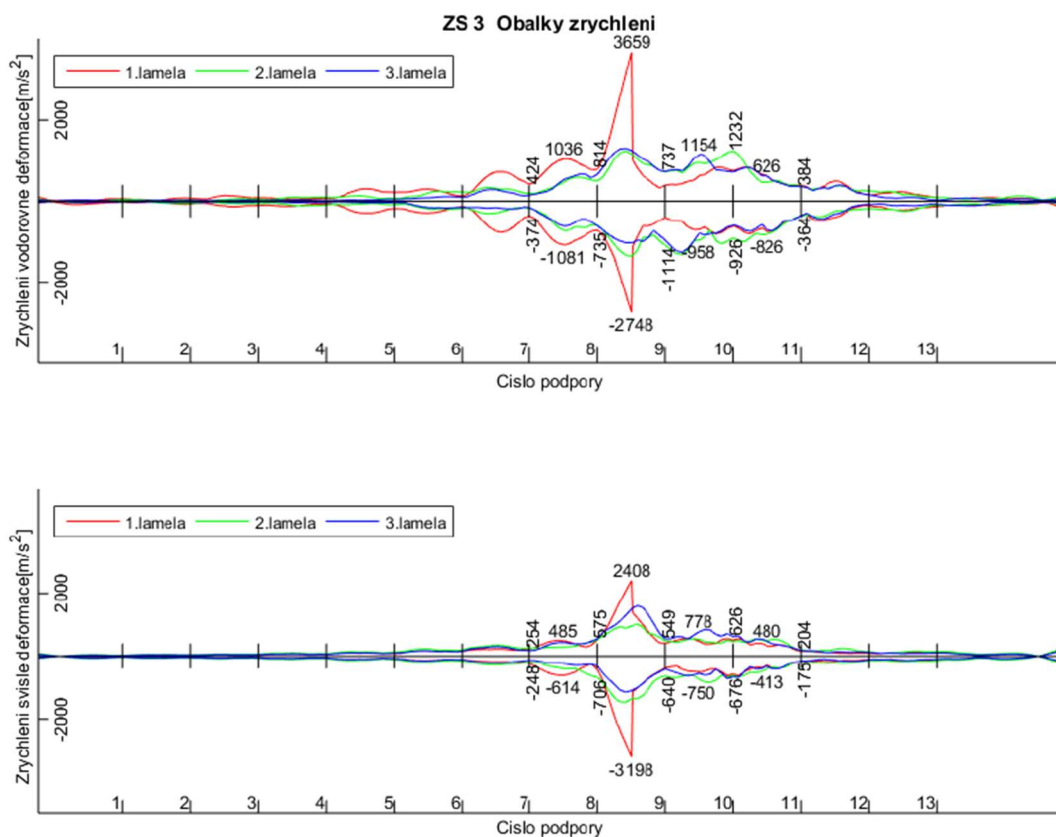
Využití zrychlení jako identifikátoru poškození znamená použití akcelerometrů, jejichž výhodou je snímání zrychlení ve 3 směrech, snadná vyměnitelnost a možnost sledování v reálném čase.

	Model	ZS 3			ZS 4			ZS 5				
		Pole 8	Podpora 10	Pole 10	Pole 8	Podpora 10	Pole 10	Pole 8	Podpora 10	Pole 10		
Vodorovně	Max	M2	1204	1206	622	1380	1064	897	208	419	909	
		M3	3659			2161						
		M4	2848			1860						
		M5	3515			2139						
		M6					2150	1954				
		M7										
		M8										
		M9					2154					
		Min	M2	-1338	-893	-814	-1394	-994	-850	-254	-593	-850
	M3		-2748									
	M4		-3497			-2030						
	M5		-2621									
	M6						-1600			-1655		
	M7											
	M8											
	M9						-1600			-1655		
	Svisle		Max	M2	1404	680	563	1310	512	1075	109	289
		M3		2408			1782					
M4		2662				1762						
M5		3116				1766						
M6				2751			4051			1765		
M7				2165			1846					
M8												
M9				2765			4053	1964		1765		
Min		M2		-1217	-680	-488	-1454	-620	-880	-112	-350	-883
		M3	-3198			-1968						
		M4	-3146			-2292						
		M5	-3536			-2160						
		M6		-1983			-3162					
		M7										
		M8										
		M9		-1983			-3182					

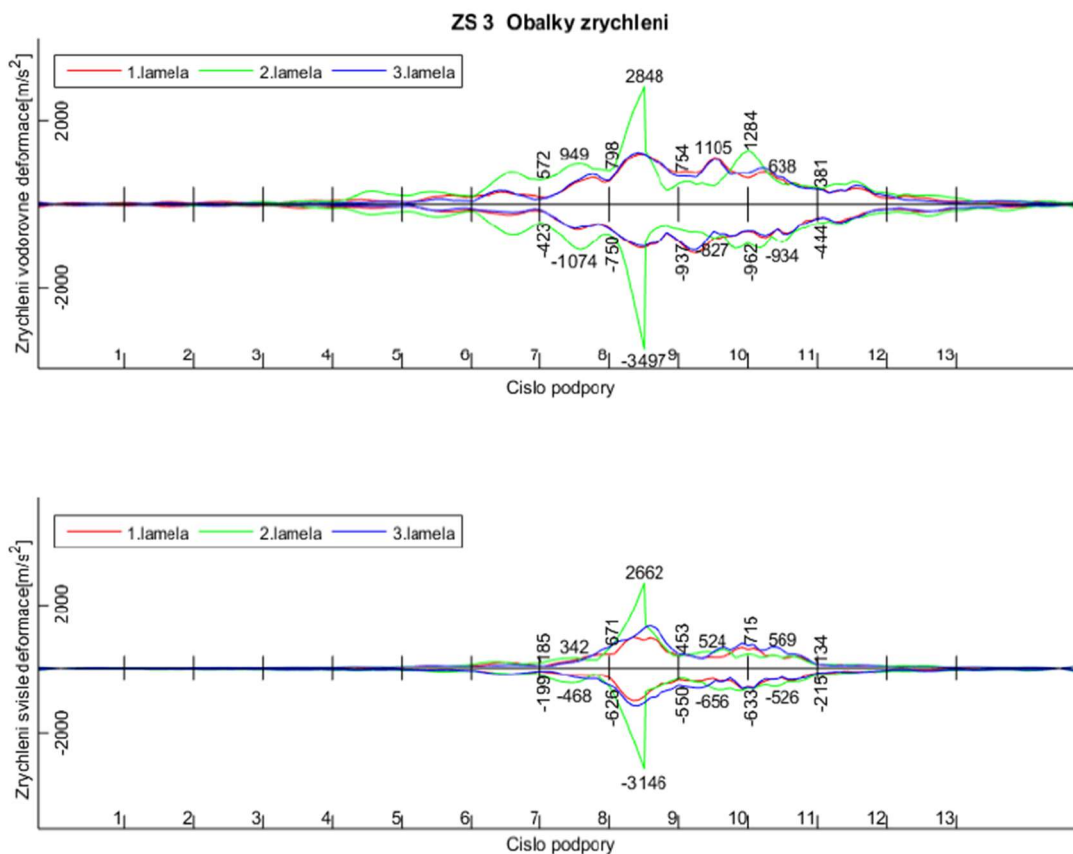
Tab. 28: Přehled identifikovatelných zrychlení pro různá poškození



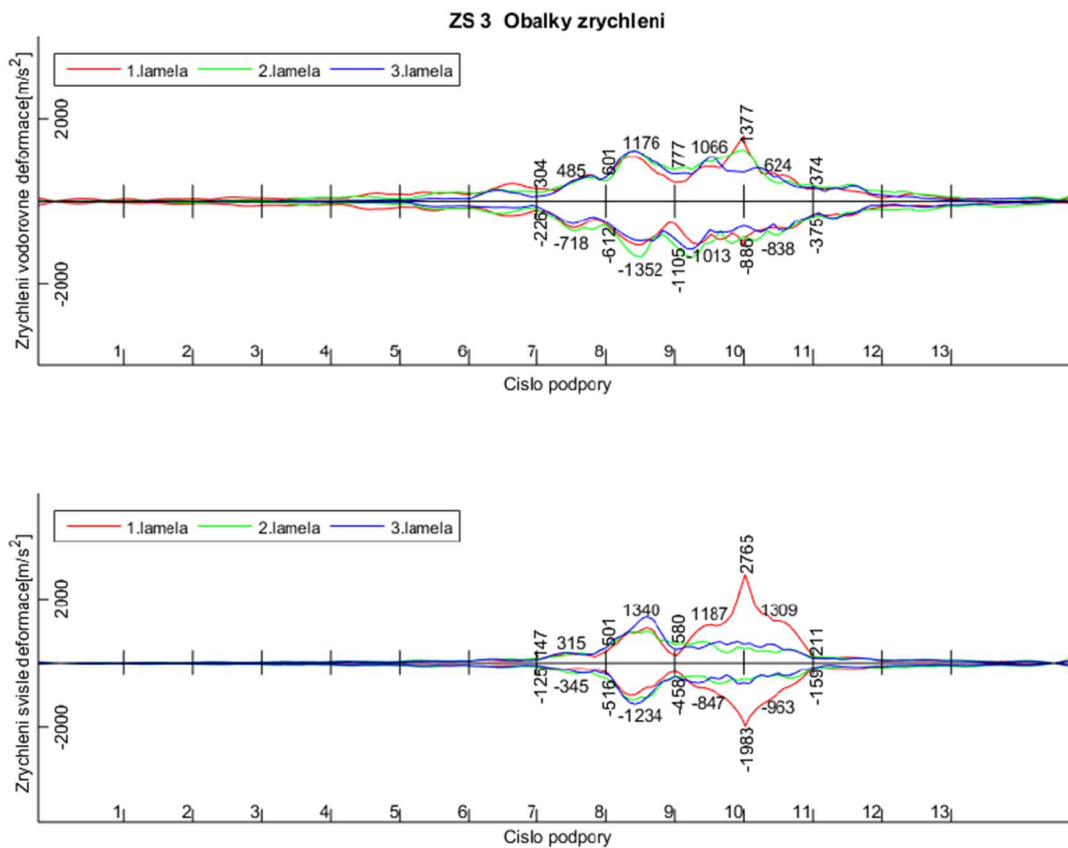
Graf 8: Obálky zrychlení deformací modelu M2, ZS 3



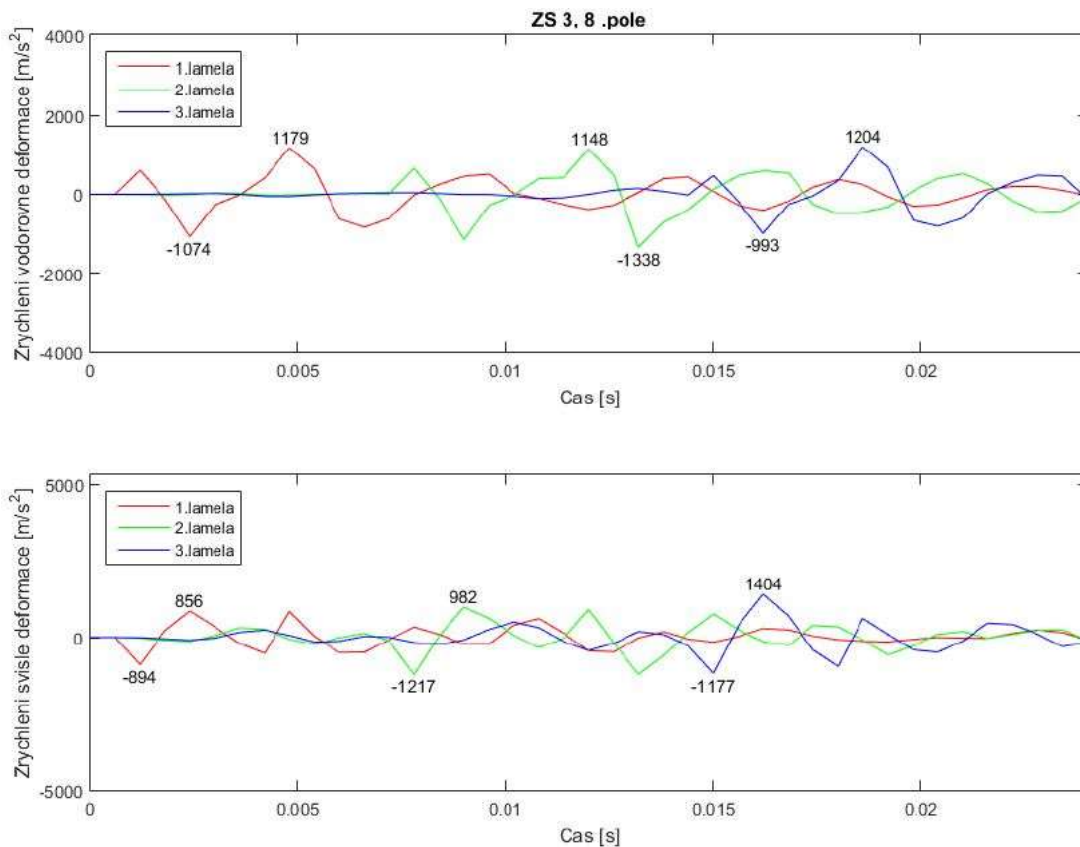
Graf 9: Obálky zrychlení deformací modelu M3, ZS 3



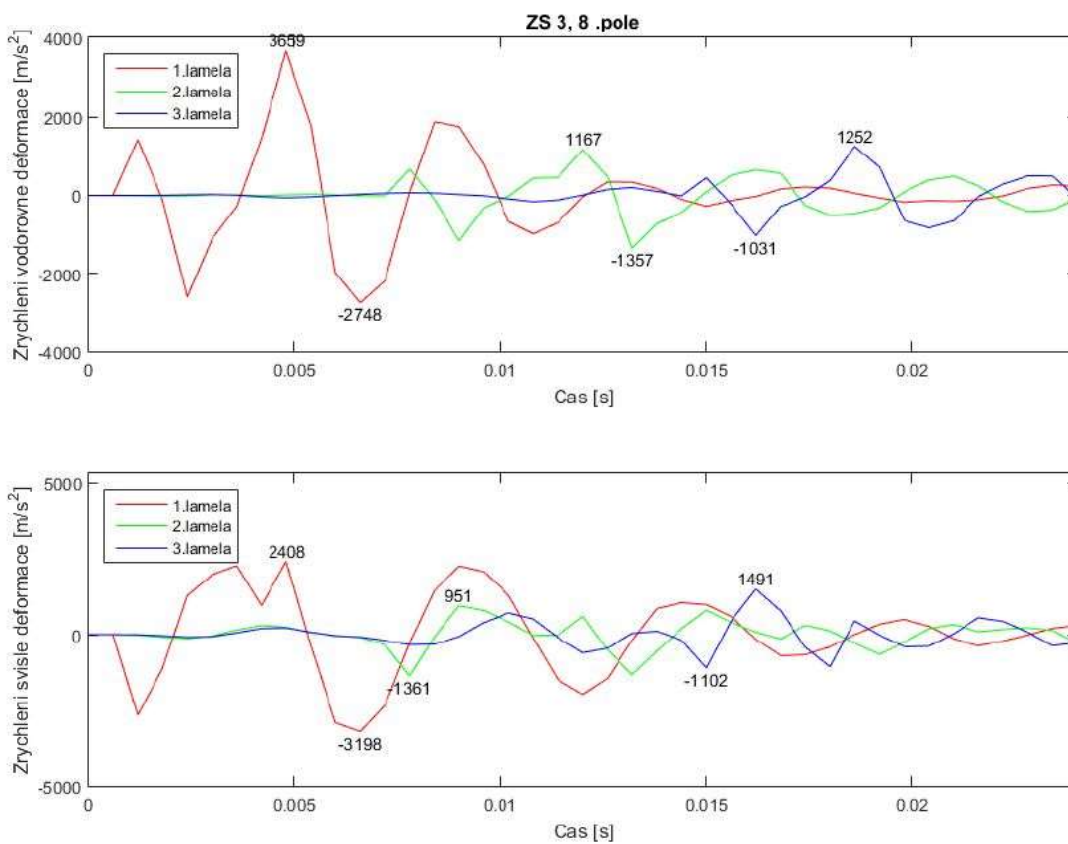
Graf 10: Obálky zrychlení deformací modelu M4, ZS 3



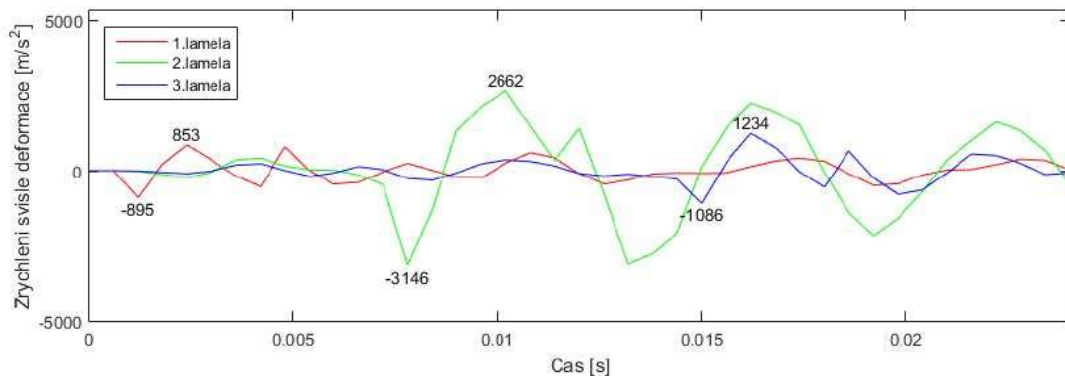
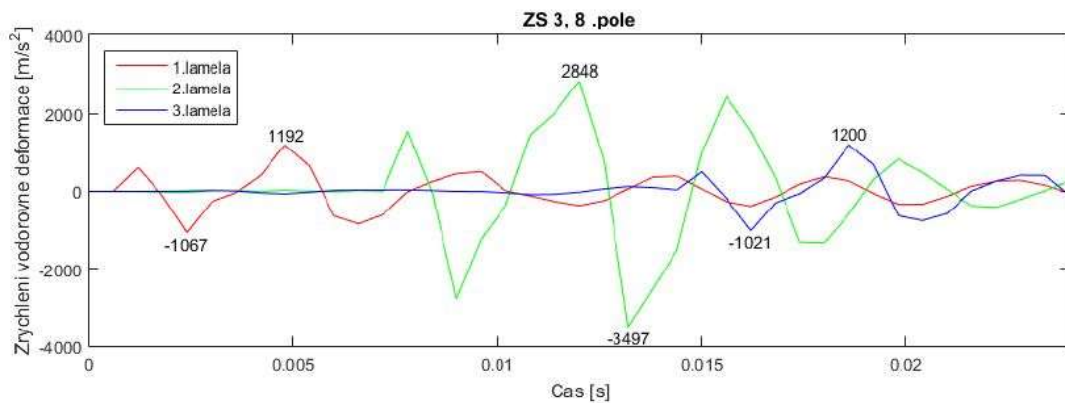
Graf 11: Obálky zrychlení deformací modelu M9, ZS 3



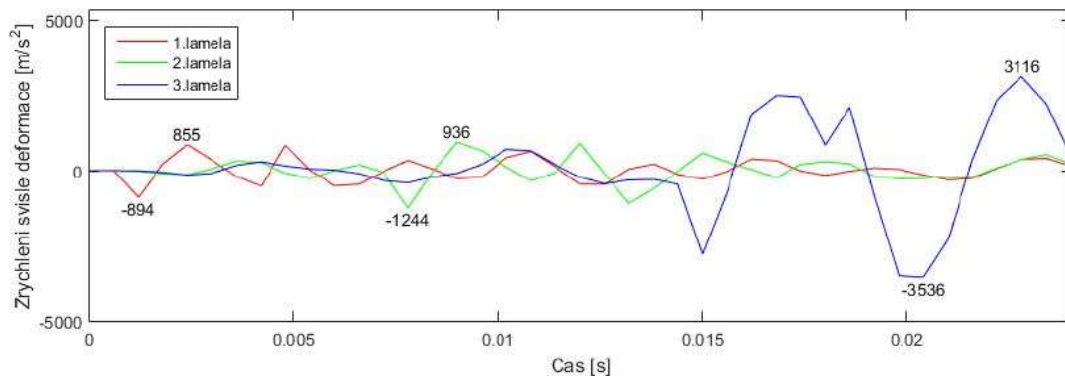
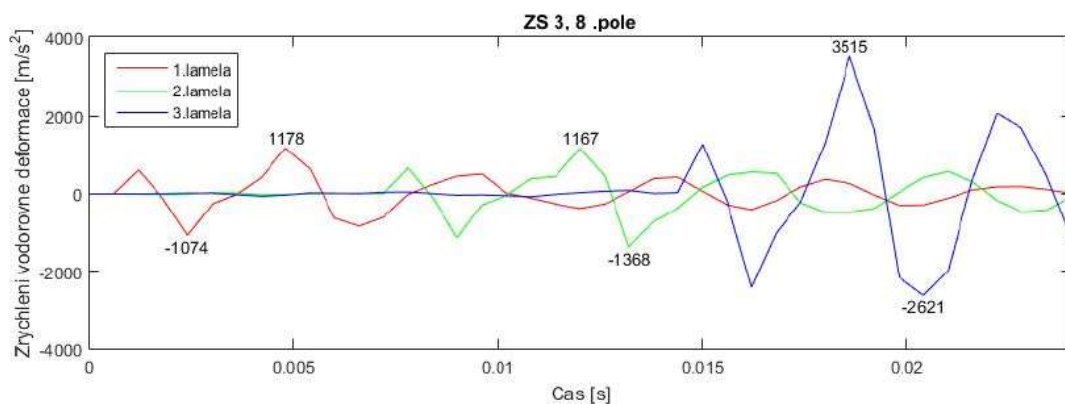
Graf 12: Průběh zrychlení v čase ve středu 8. pole modelu M2, ZS 3



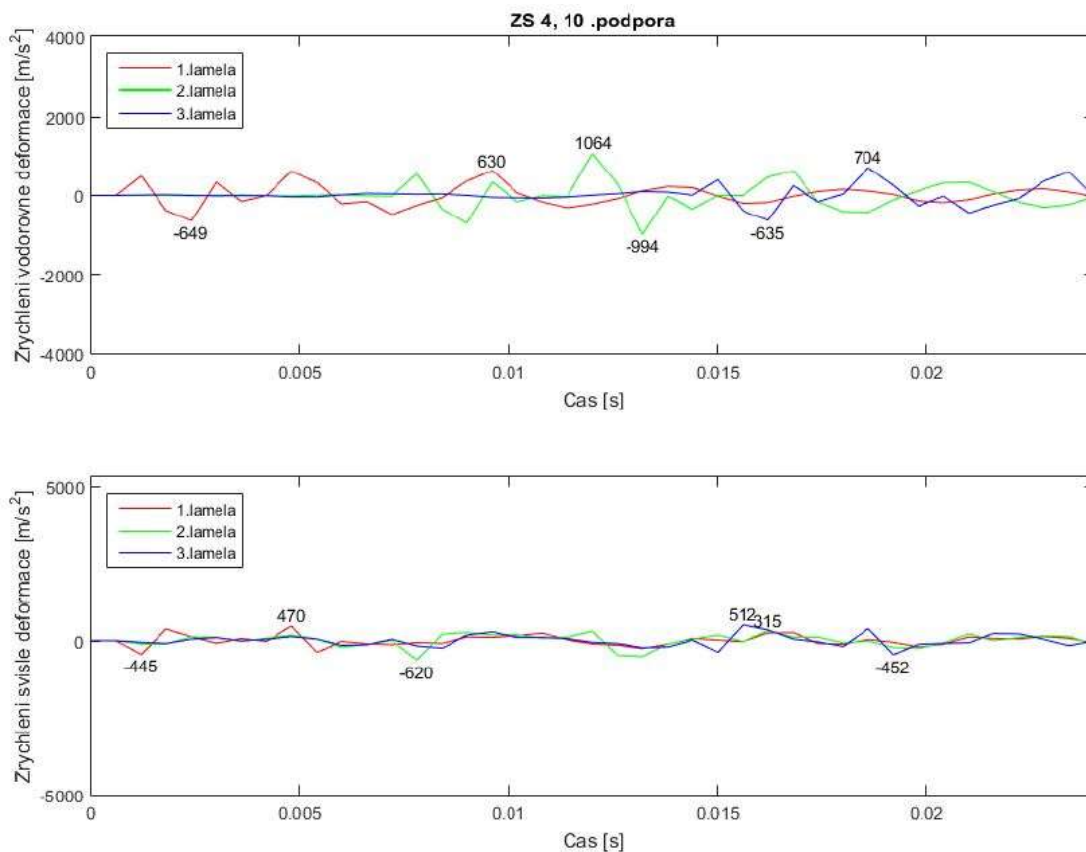
Graf 13: Průběh zrychlení v čase ve středu 8. pole modelu M3, ZS 3



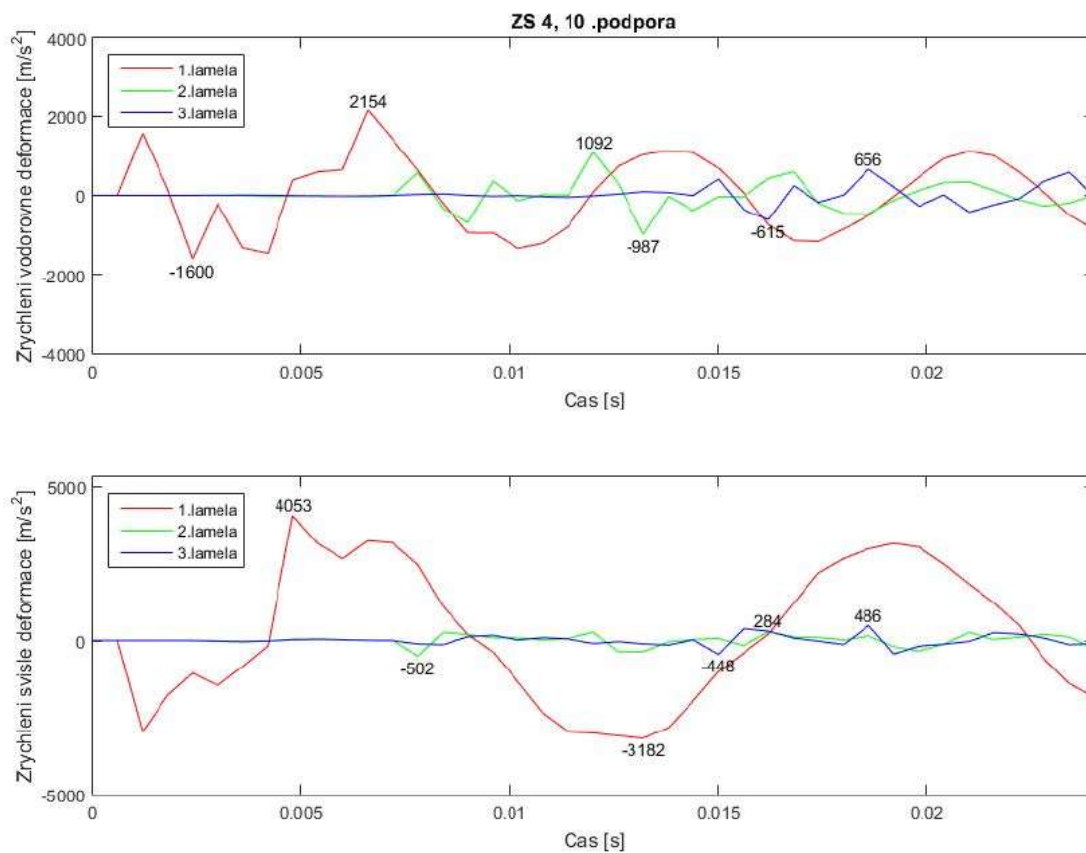
**Graf 14: Průběh zrychlení v čase ve středu 8. pole modelu M4, ZS 3**



**Graf 15: Průběh zrychlení v čase ve středu 8. pole modelu M5, ZS 3**



Graf 16: Průběh zrychlení v čase v 10. podpoře modelu M2, ZS 4



Graf 17: Průběh zrychlení v čase v 10. podpoře modelu M9, ZS 4

## 7.5 Porovnání deformací lamely

Pro vodorovné a svislé deformace jsou maximální běžně se vyskytující hodnoty uvedeny v Tab. 29, vodorovně jsou kladné hodnoty opět ve směru jízdy vozidla, svisle proti směru gravitace.

Vodorovné deformace	$u_{2,max}$ [mm]	$u_{2,min}$ [mm]
Nepoškozený MZ	0,59	-0,55
Zvýšení o 10%	0,65	-0,61

Svislé deformace	$u_{3,max}$ [mm]	$u_{3,min}$ [mm]
Nepoškozený MZ	0,34	-0,78
Zvýšení o 10%	0,38	-0,85

Tab. 29: Běžné hodnoty deformací na nepoškozeném MZ

Hodnoty převyšující alespoň o 10% maximální běžně se vyskytující průhyby jsou uvedeny v Tab. 30.

Charakter vlivu poškození na deformace je v podstatě stejný jako u vlivu na zrychlení, tedy identifikace poškození je u modelů M3, M4 a M5 možná pouze z nárůstu deformací v 8. poli. Změna nastala u modelů M6 a M9, kde se poškození u deformací projevuje nejen v nárůstu průhybů v 10. podpoře, ale i v přilehlých polích 9 a 10. Další změna je patrná u modelu M7, u kterého je z nárůstu deformací v 10. podpoře možné identifikovat poškození, u zrychlení identifikace vůbec nebyla možná.

Stejně jakou u zrychlení se dá i u deformací vyvodit závěr, že poruchy MZ lze identifikovat pouze podle zvýšení sledované veličiny přímo v místě poruchy, snímače dráhy by tedy opět byly umístěny pouze na část MZ v pravém jízdním pruhu.

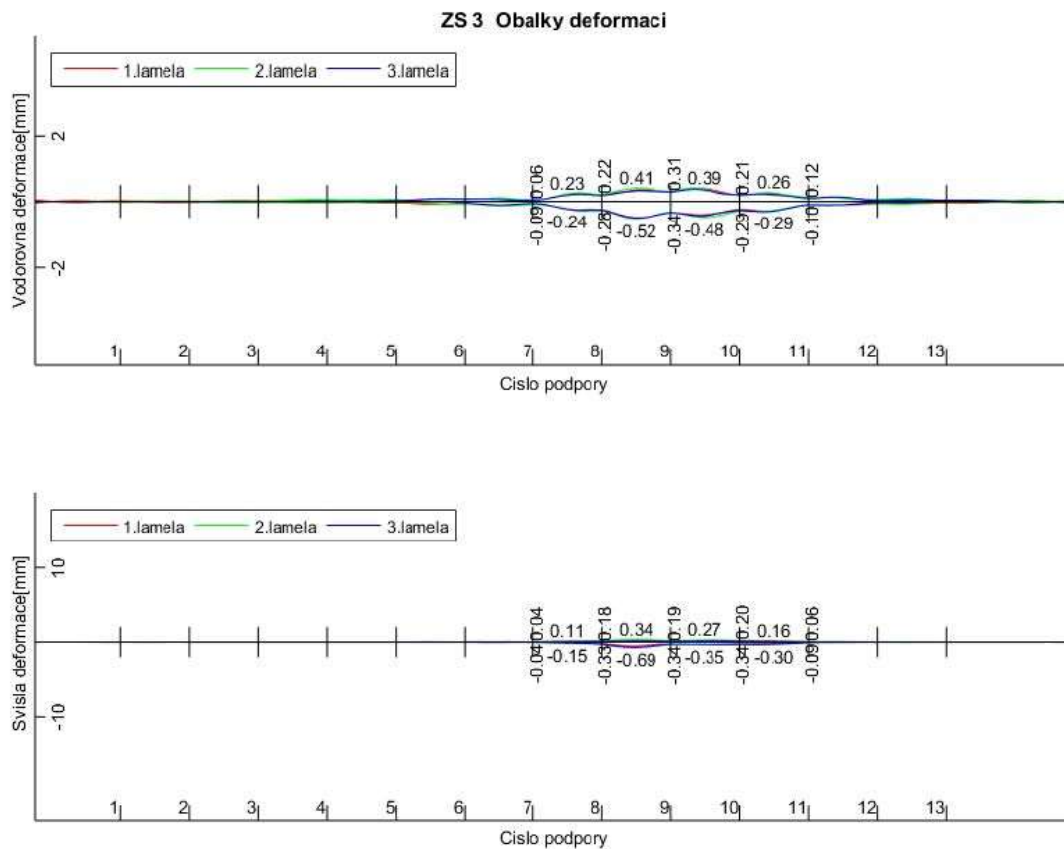
Nevýhodou snímačů dráhy oproti akcelerometrům je téměř nemožná nebo velmi obtížná instalace pro měření vodorovných deformací, pravděpodobně by bylo možné sledovat pouze svislé deformace. Dalšími nevýhodami jsou vyšší cena a obtížná vyměnitelnost, pro nový snímač by se muselo znovu provádět nulové čtení.

Vhodnější aplikací snímačů dráhy by bylo jednorázové zaznamenání kolapsu pomocné konstrukce pod MZ, více viz kapitola 7.8 „Závěry z analýzy poškození“.

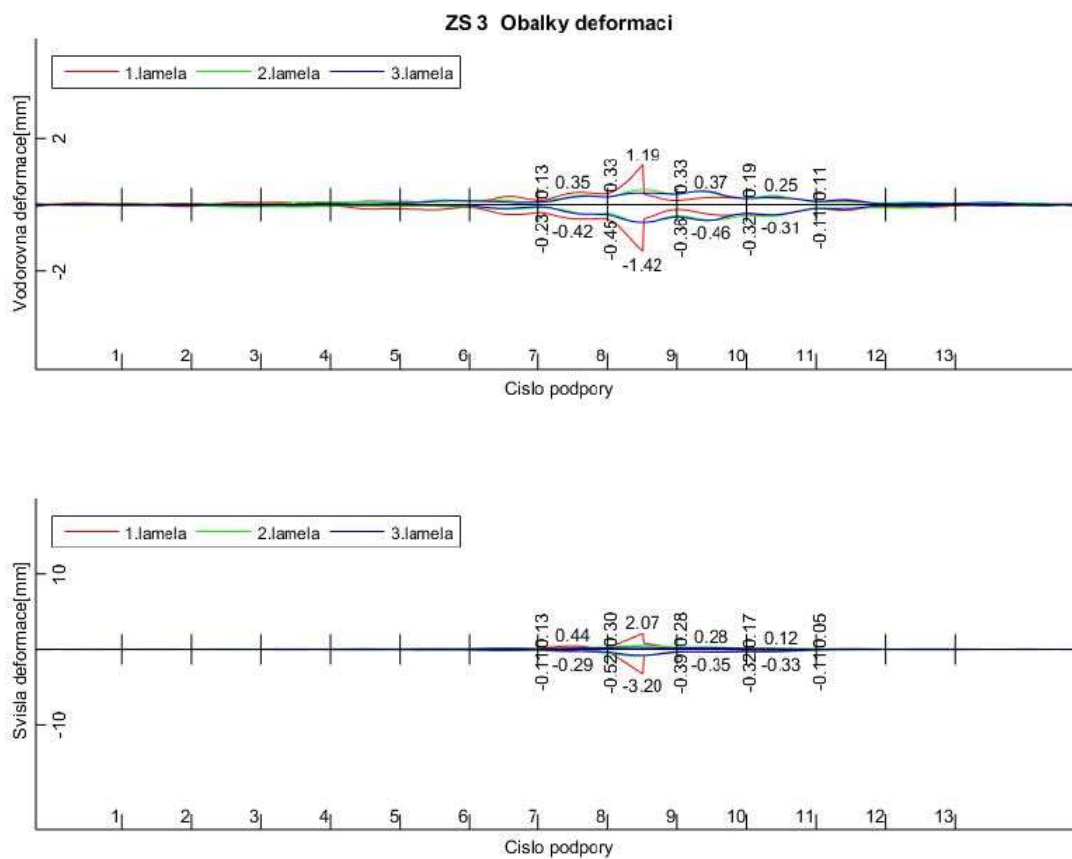


	Model	ZS 3				ZS 4				ZS 5			
		Pole 8	Pole 9	Podpora 10	Pole 10	Pole 8	Pole 9	Podpora 10	Pole 10	Pole 8	Podpora 10	Pole 10	
Vodorovně	Max	M2	0,41	0,39	0,21	0,26	0,43	0,44	0,21	0,33	0,11	0,20	0,33
		M3	1,19				0,67						
		M4	1,35				0,75						
		M5	1,11										
		M6			0,91				1,74	1,08		0,90	
		M7			1,04	0,69			1,03	0,71			
		M8											
		M9			0,90				1,74	1,08		0,90	
	Min	M2	-0,52	-0,48	-0,29	-0,29	-0,55	-0,49	-0,29	-0,37	-0,08	-0,18	-0,37
		M3	-1,42				-0,82						
		M4	-1,54				-0,90						
		M5	-1,32										
		M6			-1,11				-2,12	-1,19		-0,92	
		M7			-1,12			-0,88	-1,10				
		M8											
		M9		-0,82	-1,13	-0,64			-2,12	-1,19		-0,92	
Svisle	Max	M2	0,34	0,27	0,20	0,16	0,34	0,25	0,21	0,23	0,03	0,10	0,24
		M3	2,07				1,26						
		M4	2,09				1,41						
		M5	2,27				1,40						
		M6			7,92	3,63			14,19	6,47		2,21	1,00
		M7		1,68	2,49	1,70		1,59	2,38	1,61			
		M8											
		M9		3,22	7,93	3,64			14,17	6,48		2,21	1,00
	Min	M2	-0,70	-0,35	-0,34	-0,31	-0,78	-0,31	-0,36	-0,49	-0,03	-0,15	-0,50
		M3	-3,20				-2,01						
		M4	-3,77				-2,43						
		M5	-3,43				-2,27						
		M6			-8,42	-3,94			-15,12	-7,02		-2,86	-1,21
		M7		-1,86	-2,81	-1,81		-1,75	-2,66	-1,76			
		M8											
		M9		-3,47	-8,44	-3,95			-15,11	-7,02		-2,86	-1,21

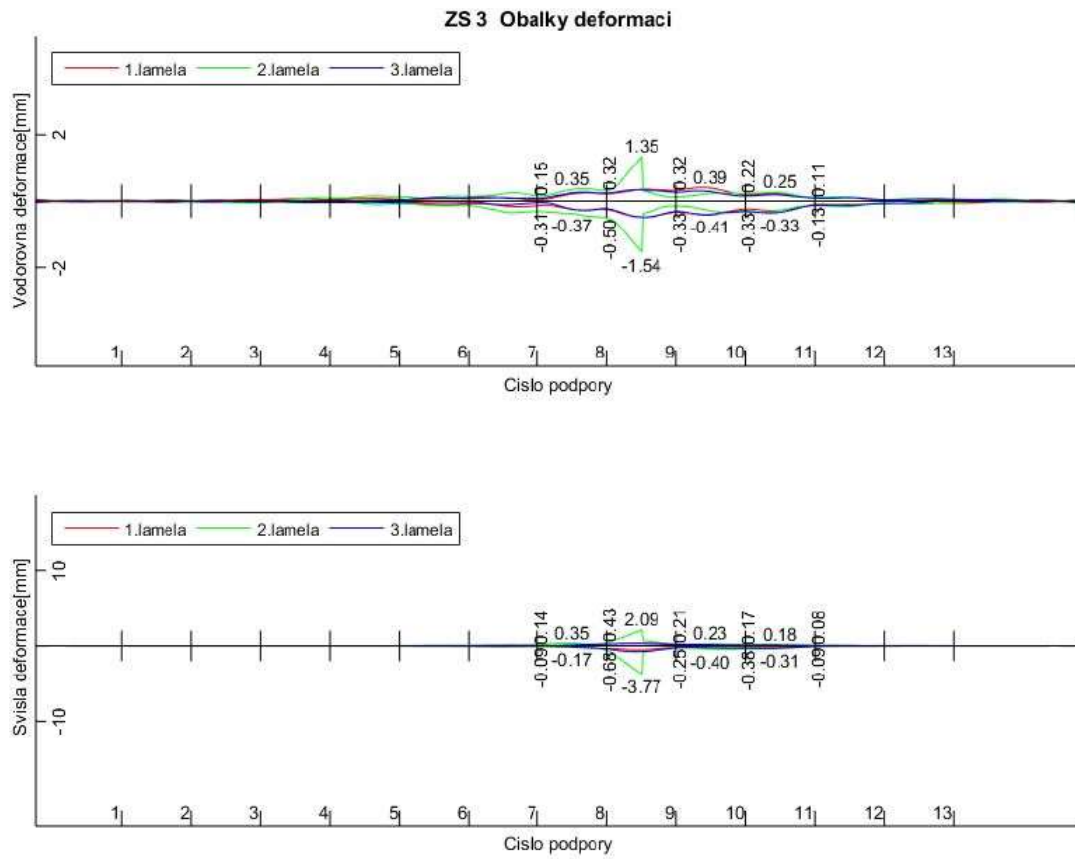
Tab. 30: Přehled identifikovatelných deformací pro různá poškození



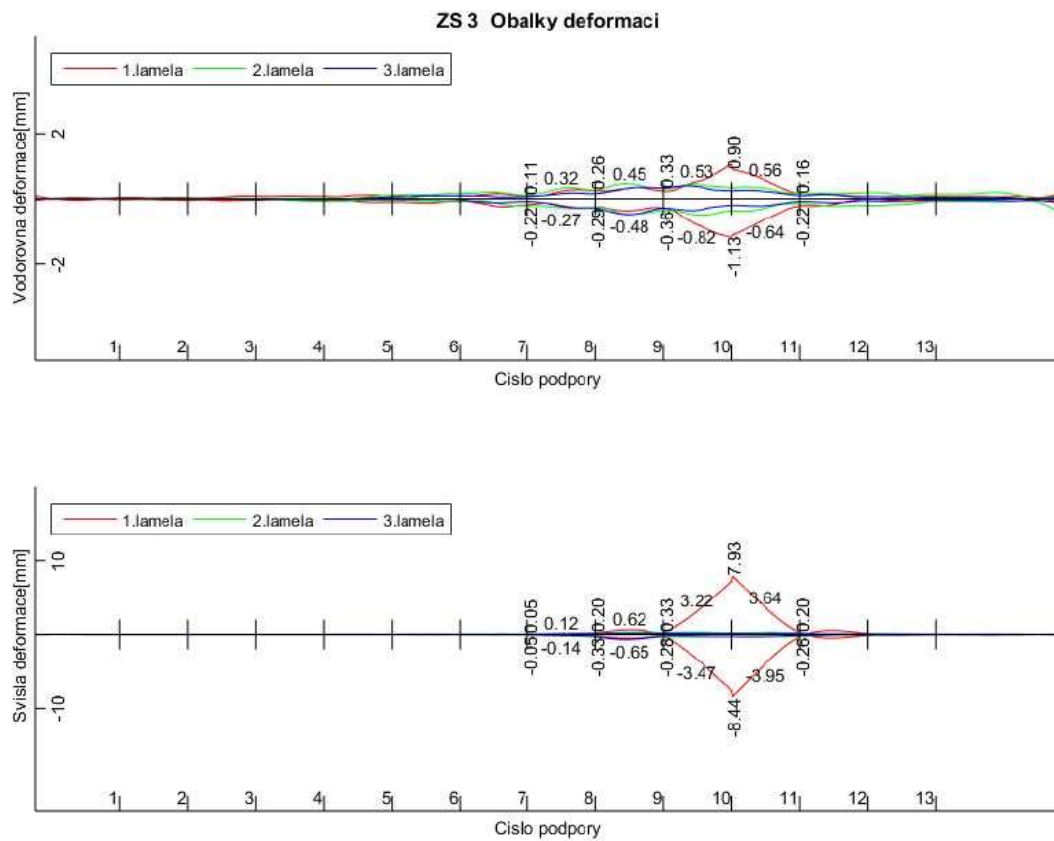
Graf 18: Obálky deformací modelu M2, ZS 3



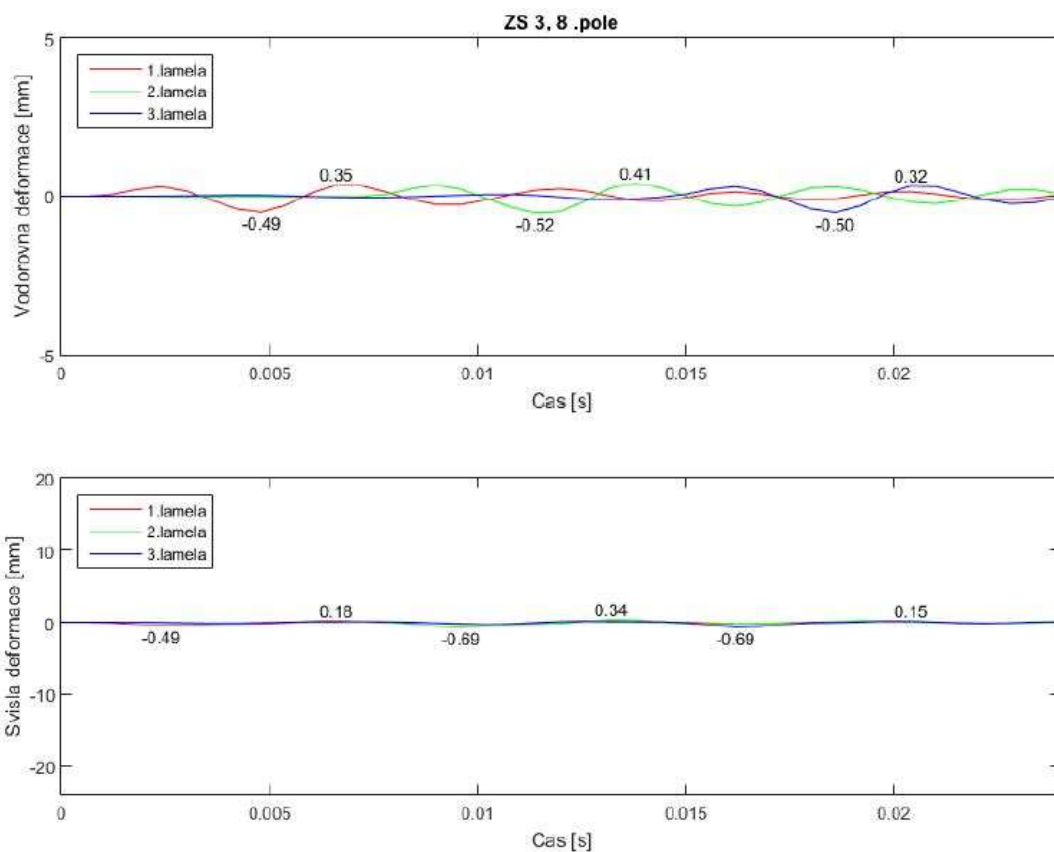
Graf 19: Obálky deformací modelu M3, ZS 3



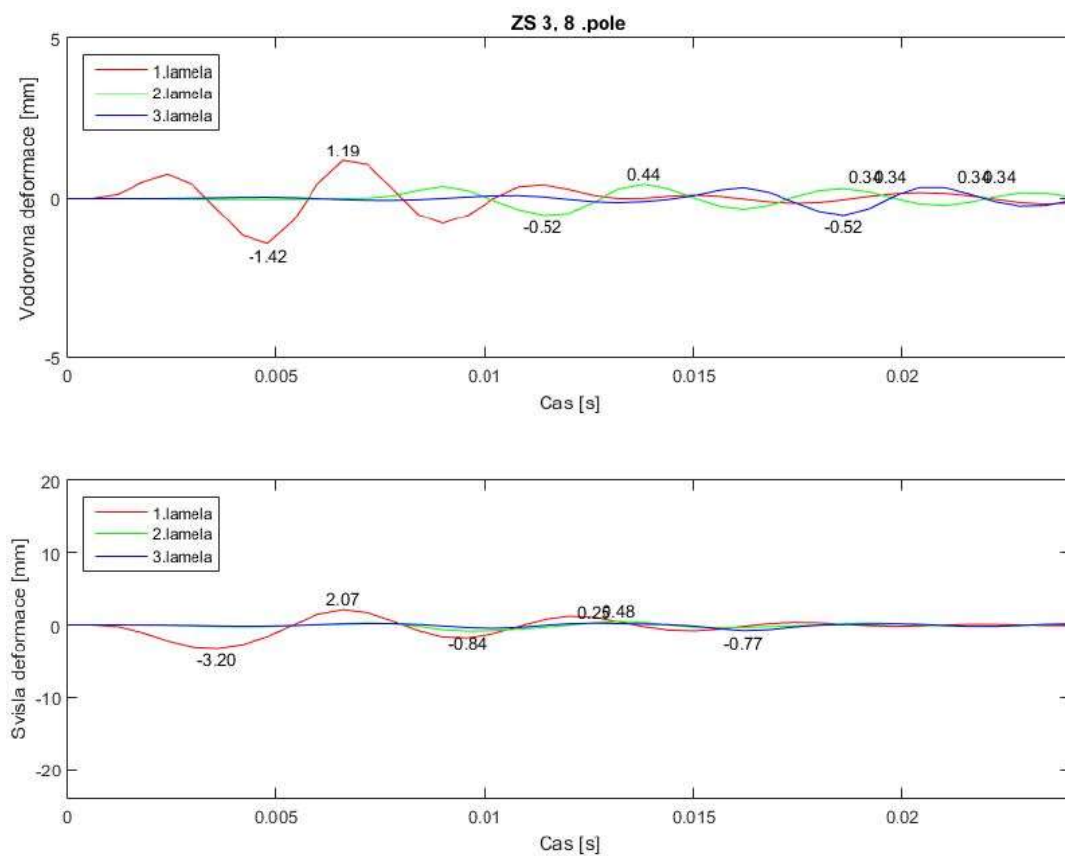
Graf 20: Obálky deformací modelu M4, ZS 3



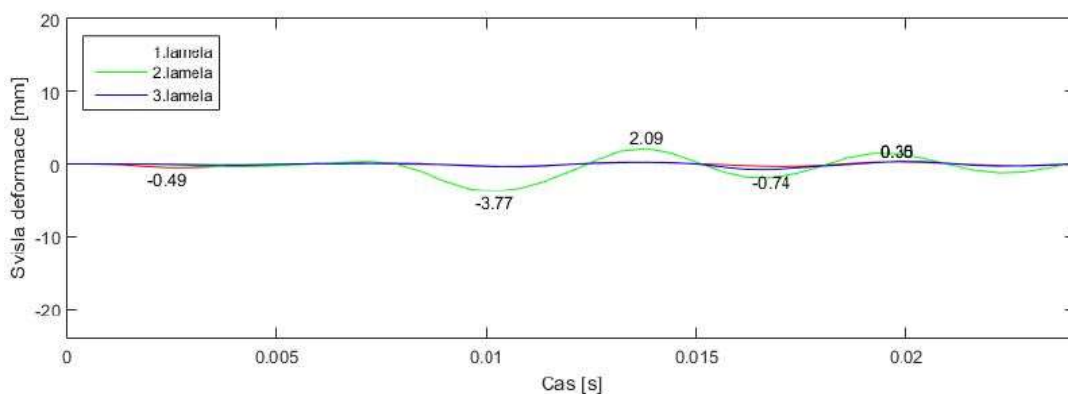
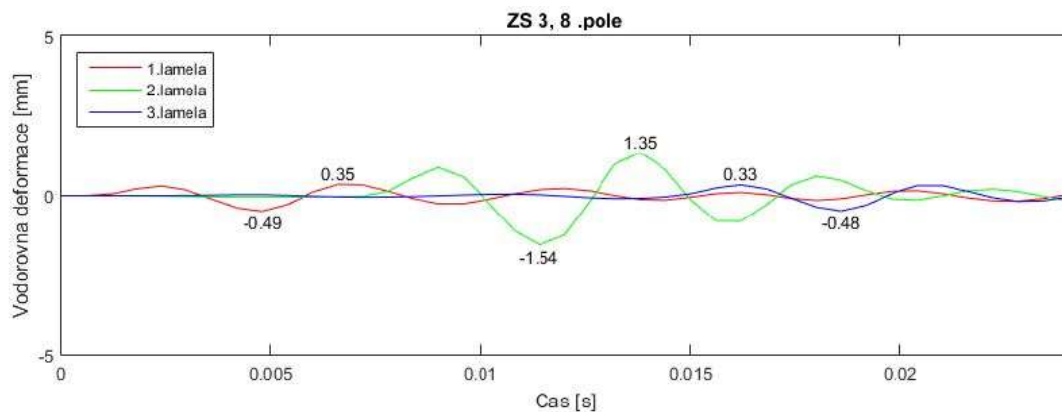
Graf 21: Obálky deformací modelu M9, ZS 3



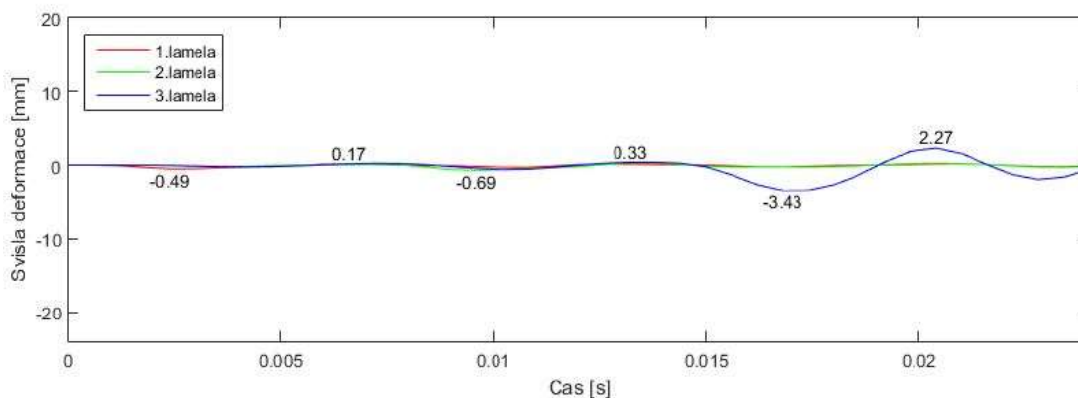
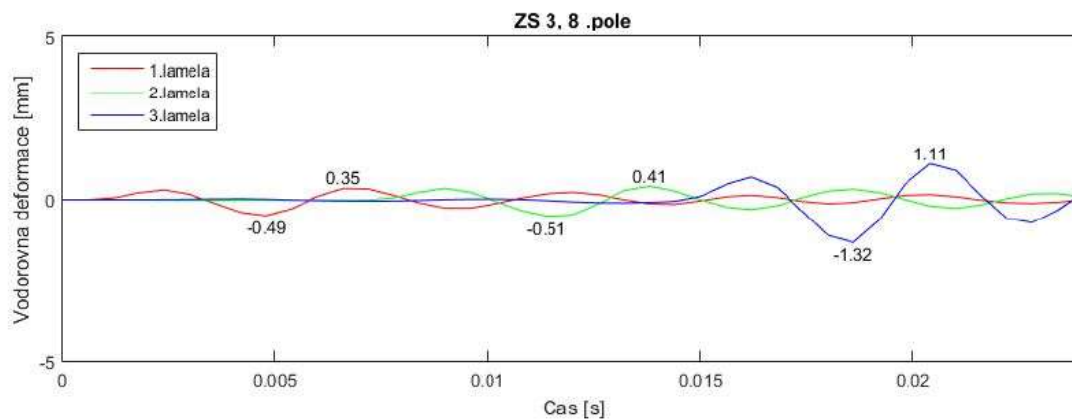
Graf 22: Průběh deformací v čase ve středu 8. pole modelu M2, ZS 3



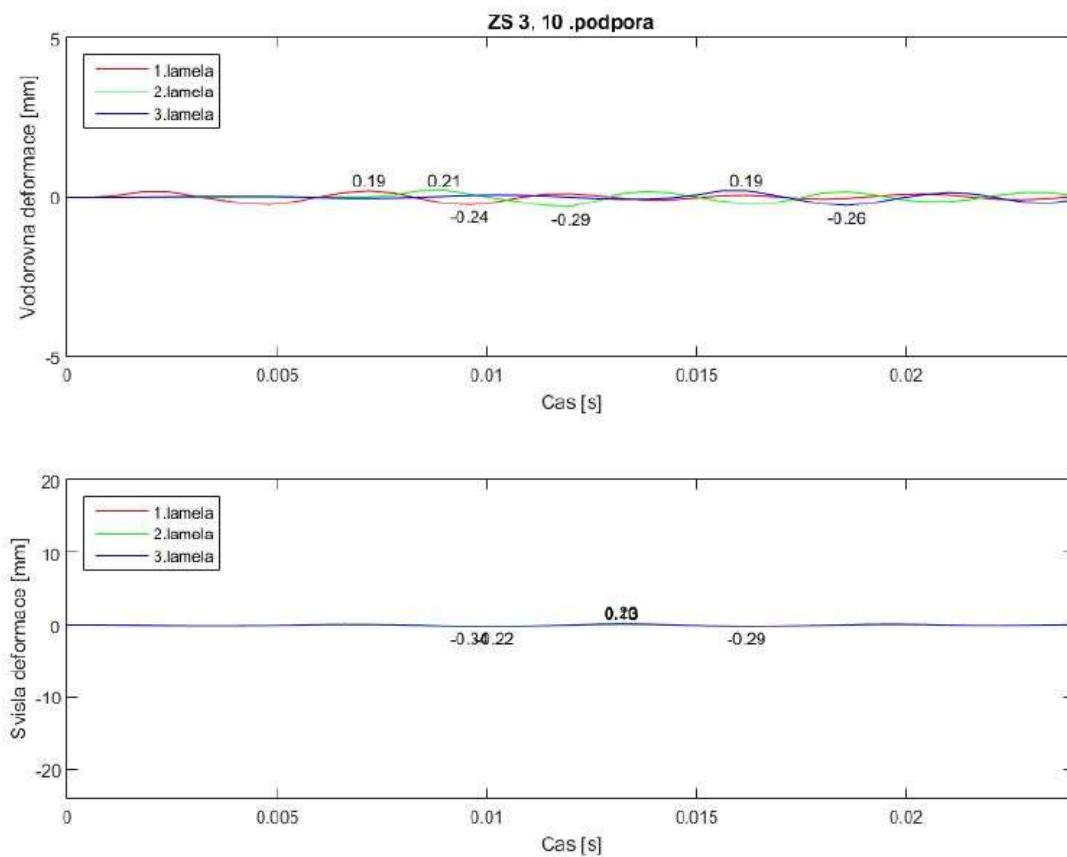
Graf 23: Průběh deformací v čase ve středu 8. pole modelu M3, ZS 3



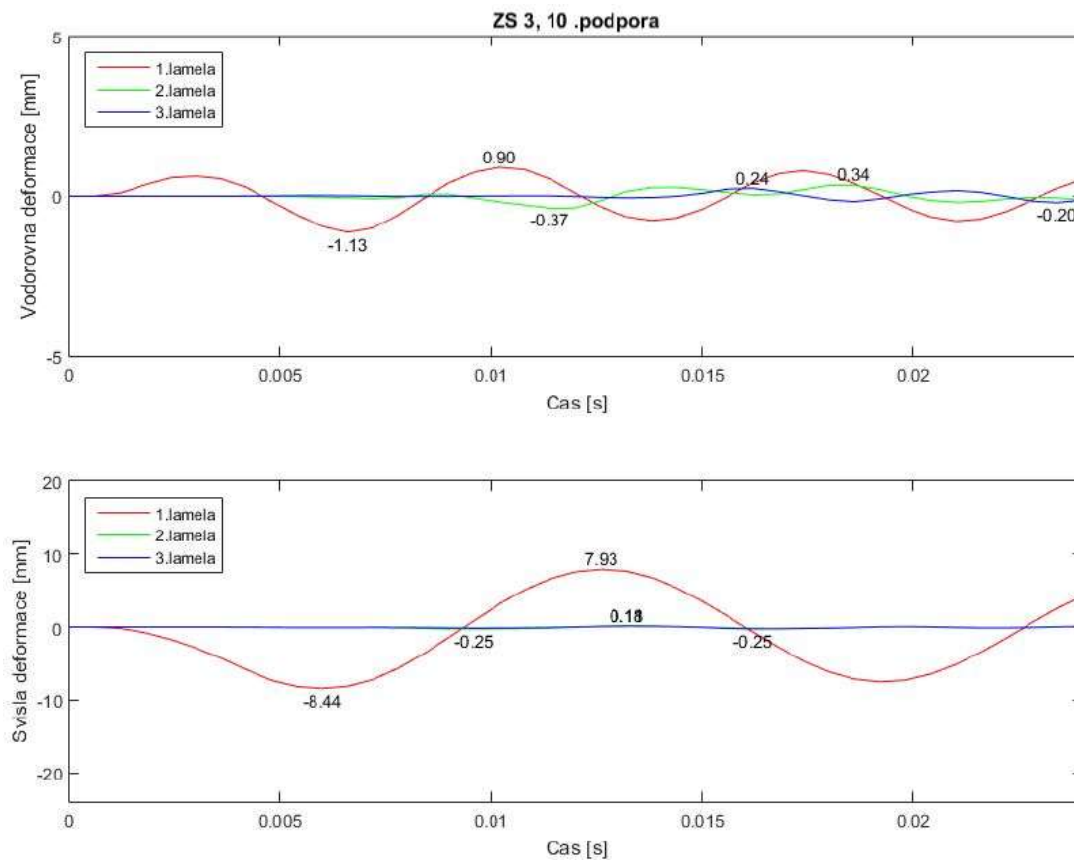
Graf 24: Průběh deformací v čase ve středu 8. pole modelu M4, ZS 3



Graf 25: Průběh deformací v čase ve středu 8. pole modelu M5, ZS 3



Graf 26: Průběh deformací v čase 10. podpoře modelu M2, ZS 3



Graf 27: Průběh deformací v čase 10. podpoře modelu M9, ZS 3

## 7.6 Porovnání zrychlení a průhybů traverzy

Pro identifikaci poruchy z chování traverzy musí zrychlení a svislé deformace překročit hodnoty z Tab. 31. To ale nastává pouze ve výjimečných případech, hodnoty na poškozeném závěru jsou navíc velmi blízké běžně se vyskytujícím hodnotám na závěru nepoškozeném, v praxi by nebylo možné rozeznat poruchu od běžného stavu. Sledování deformací nebo zrychlení deformací traverzy není z tohoto důvodu vhodným indikátorem poškození, dalším negativem je obtížná instalace snímačů na traverzy, kvůli dilatačním pohybům by bylo velmi náročné vybrat místo, kde může být snímač umístěn.

Zrychlení	$a_{\max}$ [m/s <sup>2</sup> ]	$a_{\min}$ [m/s <sup>2</sup> ]
Nepoškozený MZ	386	-488
Zvýšení o 10%	424	-537

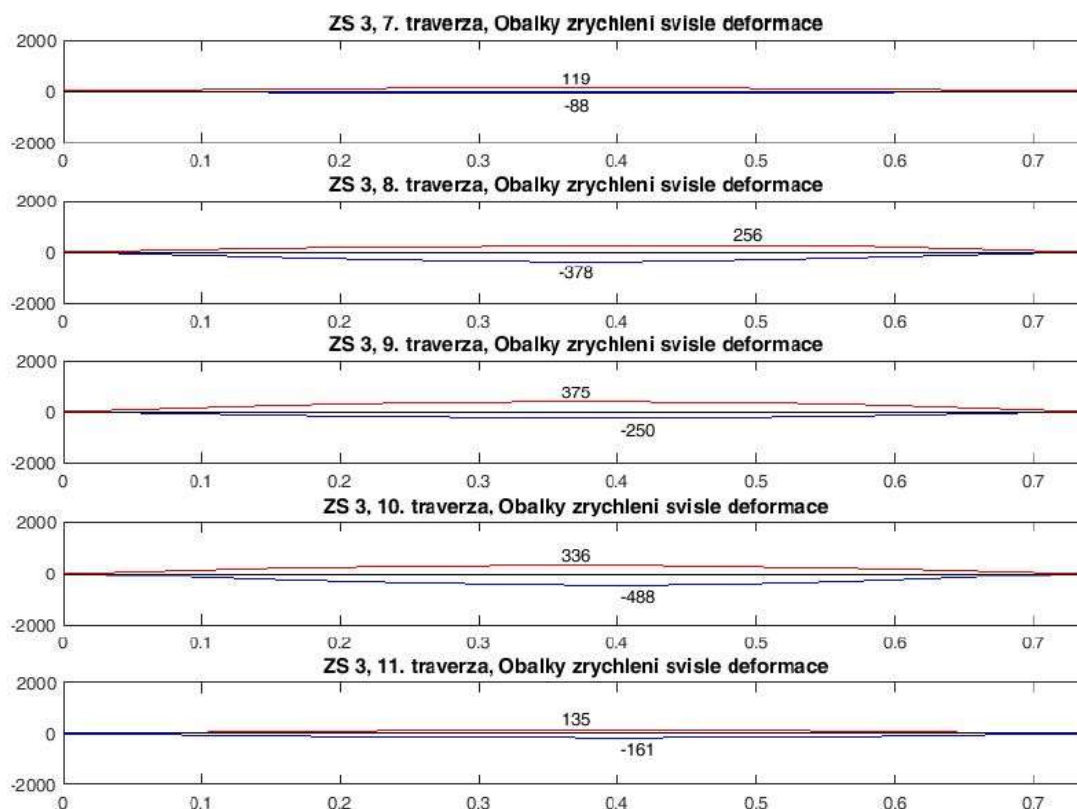
Deformace	$u_{\max}$ [mm]	$u_{\min}$ [mm]
Nepoškozený MZ	0,18	-0,30
Zvýšení o 10%	0,19	-0,33

Tab. 31: Běžné hodnoty zrychlení a deformací na nepoškozeném MZ

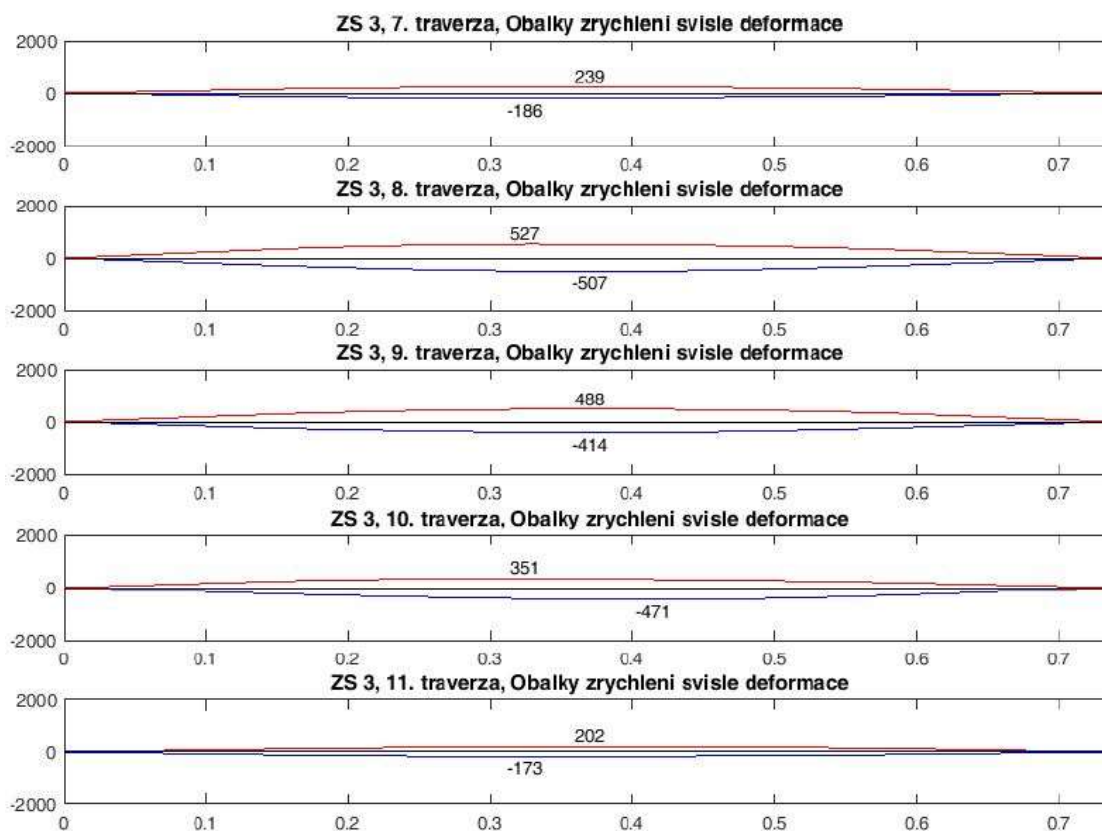
	Model	ZS 3			ZS 4					
		Podpora 8	Podpora 9	Podpora 10	Podpora 8	Podpora 9	Podpora 10	Podpora 11		
Zrychlení	Max	M2	256	375	336	276	302	361	184	
		M3	527	488		501	463			
		M4	510			457				
		M5								
		M6								
		M7								
		M8								
		M9								
		Min	M2	-378	-250	-488	-301	-232	-476	-188
	M3		-507							
	M4									
	M5									
	M6									
	M7									
	M8									
	M9									
	Deformace		Max	M2	0,14	0,15	0,17	0,11	0,16	0,17
		M3		0,25	0,23		0,22	0,24		
M4		0,31				0,24	0,23			
M5		0,24								
M6									0,30	
M7										
M8					0,43			0,41		
M9									0,29	
Min		M2		-0,25	-0,30	-0,28	-0,22	-0,30	-0,29	-0,13
		M3	-0,43	-0,34		-0,4	-0,41			
		M4	-0,48				-0,36			
		M5								
		M6							-0,42	
		M7								
		M8			-0,65			-0,64		
		M9							-0,42	

Tab. 32: Přehled identifikovatelných deformací traverzy pro různá poškození

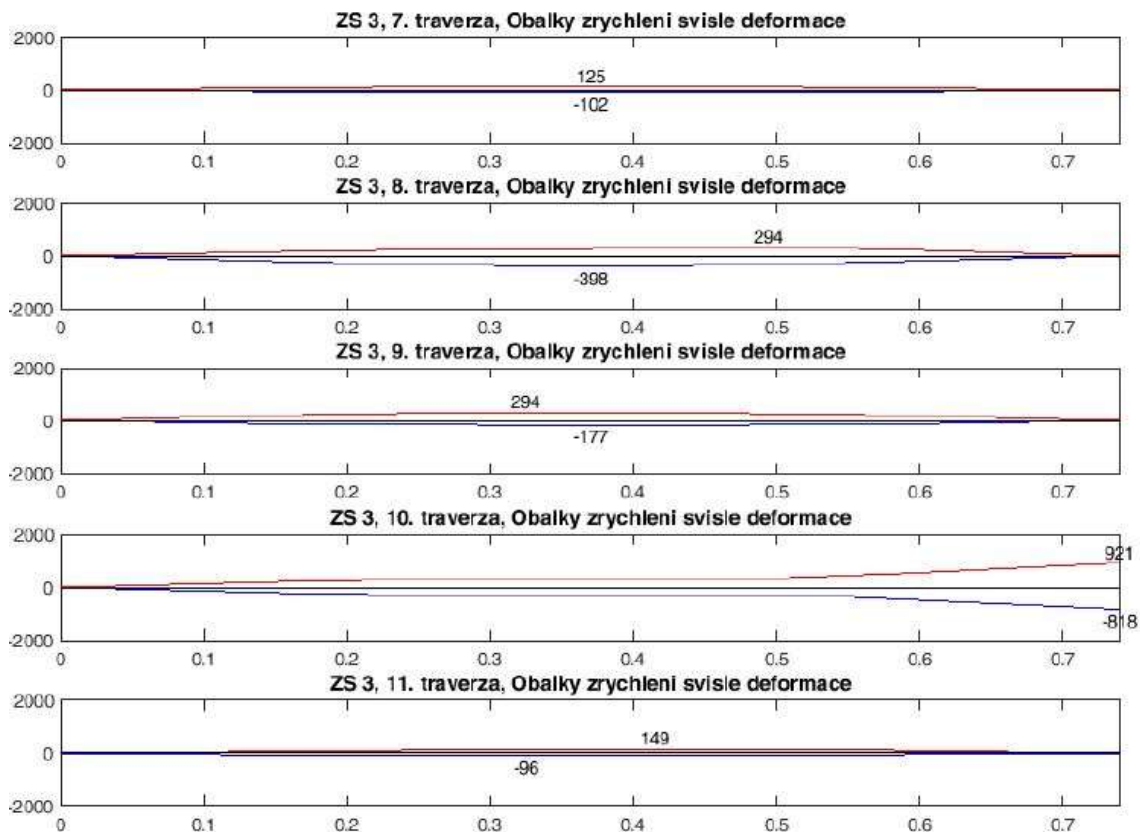




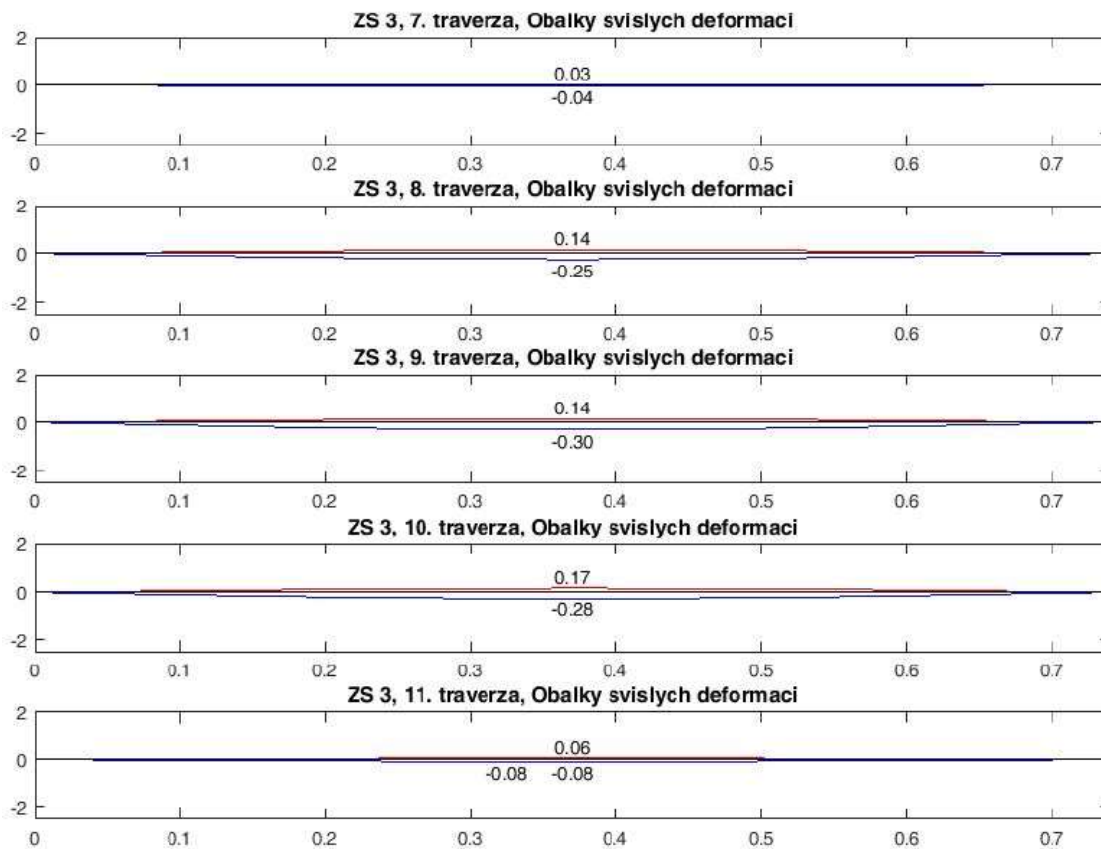
Graf 28: Obálky zrychlení deformací traverzy modelu M2, ZS 3



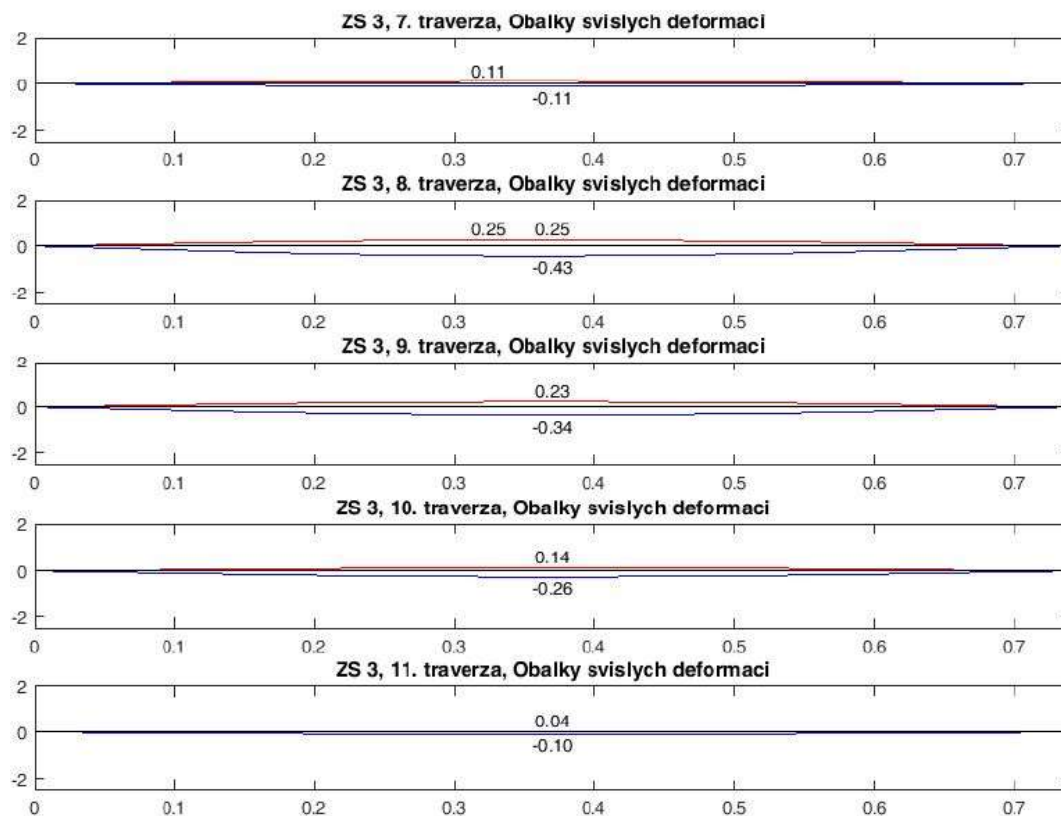
Graf 29: Obálky zrychlení deformací traverzy modelu M3, ZS 3



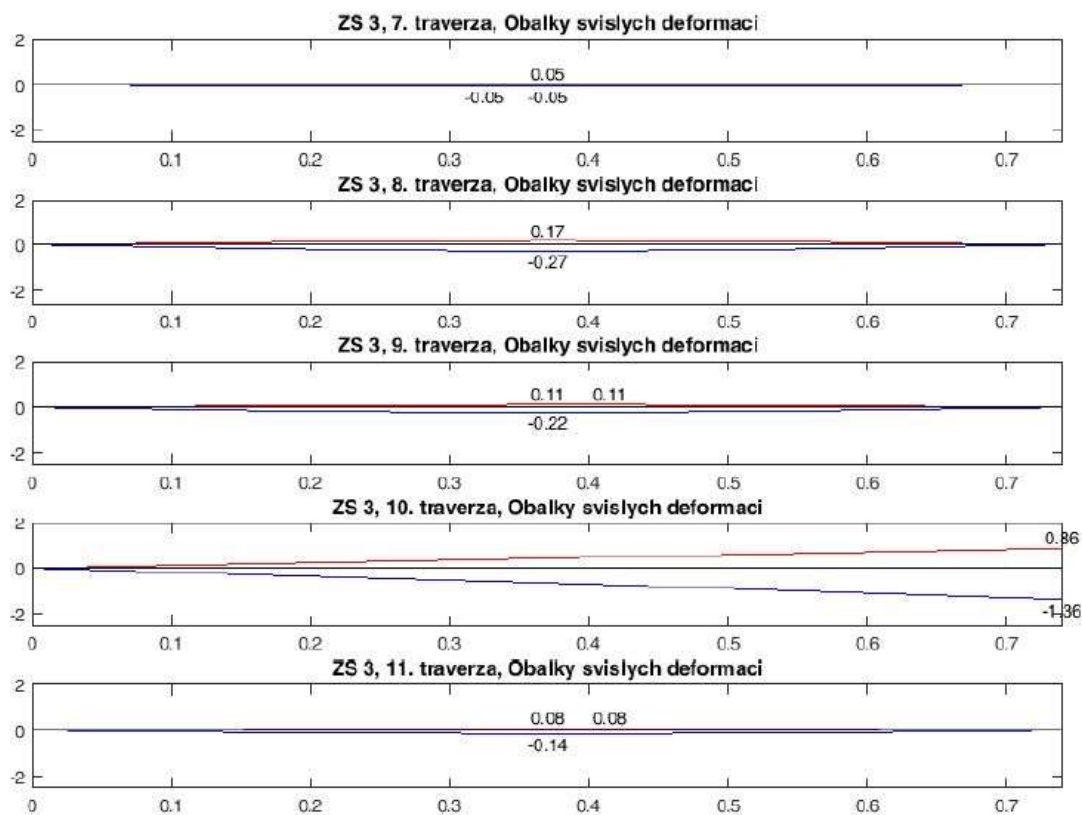
Graf 30: Obálky zrychlení deformací traverzy modelu M8, ZS 3



Graf 31: Obálky deformací traverzy modelu M2, ZS 3



Graf 32: Obálky deformací traverzy modelu M3, ZS 3



Graf 33: Obálky deformací traverzy modelu M8, ZS 3

## 7.7 Porovnání vlastních frekvencí a tvarů

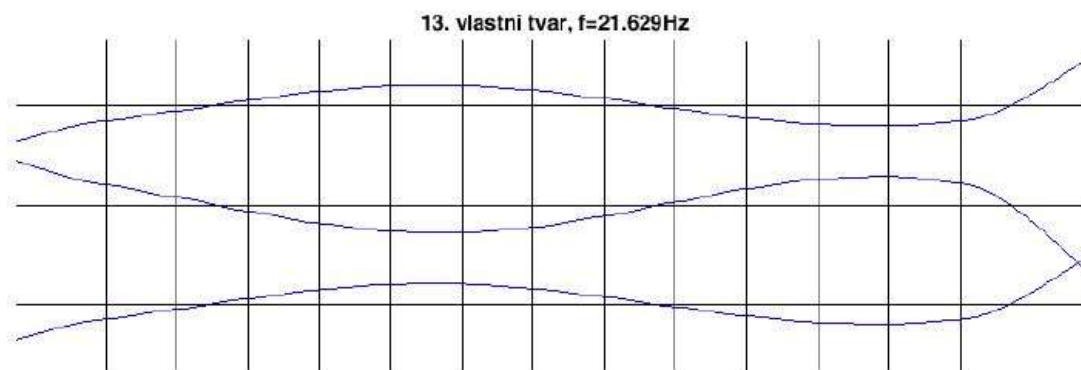
Pro modely M2 – M9 bylo v programu CsiBridge zatěžovacím stavem typu „Modal“ nalezeno prvních 100 vlastních tvarů. Pro zjednodušení porovnání byly vytvořeny grafy znázorňující vodorovné a svislé deformace osy dolní pásnice lamely. Vlastní tvary poškozených modelů M3 – M9 pak byly porovnány se základním, nepoškozeným modelem M2, porovnávány byly vždy k sobě příslušné vlastní tvary (podobné tvarem a frekvencí).

Pro zachycení vlastního tvaru na reálné konstrukci je nutná hustá síť snímačů. Pokud by se porucha prvku MZ projevovala na celé konstrukci, bylo by možné osadit hustě rozmístěnými snímači jen jedno pole lamely mezi traverzami. Z Grafů 34 – 64 je vidět, že tento případ nenastává, snímače by tedy musely být osazené hustě v každém poli na všech lamelách, což několikanásobně převyšuje dostupný počet kanálů v měřící ústředně.

Negativem také je, že sledování změn vlastních tvarů konstrukce by nemohlo probíhat v reálném čase, z dostupných naměřených hodnot by se musely pravidelně vyhodnocovat vlastní tvary a porovnávat pomocí CAMOSUC (porovnávání křivostí) nebo diagonály matice modální poddajnosti. Identifikace poškození pomocí vlastních tvarů není kvůli zmíněným negativům ideální volbou.

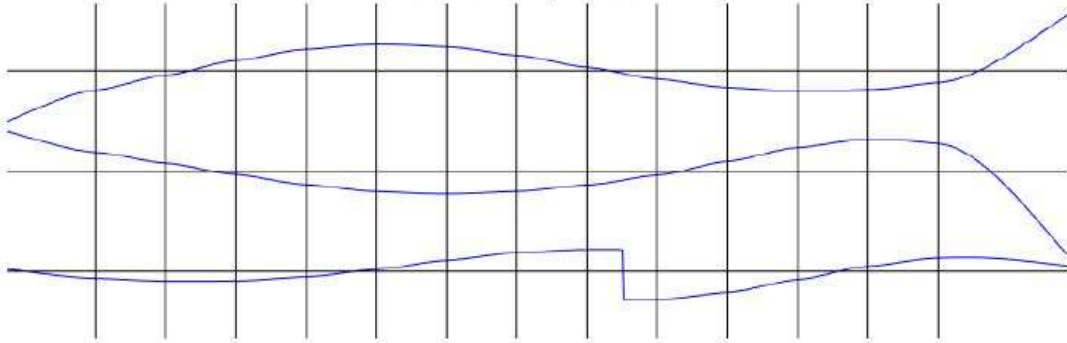
Další možnost identifikace poškození spočívá ve sledování změny vlastních frekvencí MZ. Snímače by se osadily do míst, kde má co nejvíce vlastních tvarů nenulové pořadnice, pak bylo by možné vyhodnocovat vlastní frekvence konstrukce pomocí Rychlé Fourierovy transformace (FFT – Fast Fourier transform). Nicméně vlastní frekvence nepoškozené a poškozené konstrukce mají velmi malé odchylky, v praxi by tedy bylo téměř nemožné identifikovat poruchu od běžného chování konstrukce. Vlastní tvary ani vlastní frekvence nejsou vhodným indikátorem poškození.

Vlastní tvary adekvátní k 13. vlastnímu tvaru modelu M2:



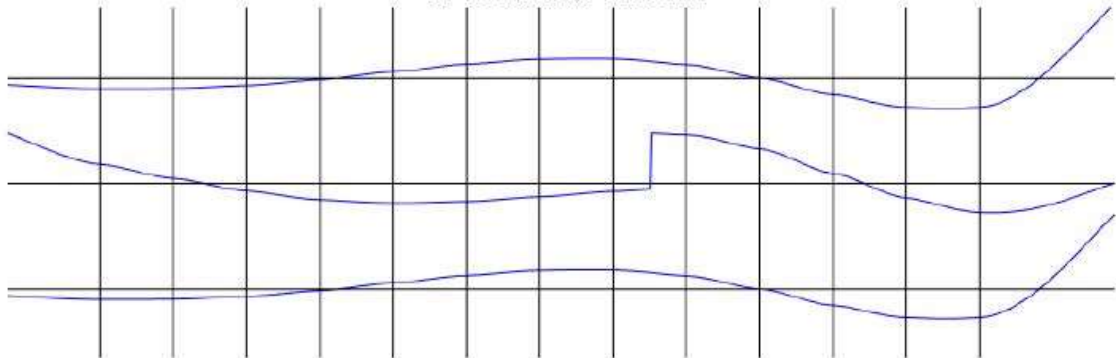
Graf 34: Model M2

13. vlastní tvar,  $f=21.008\text{Hz}$



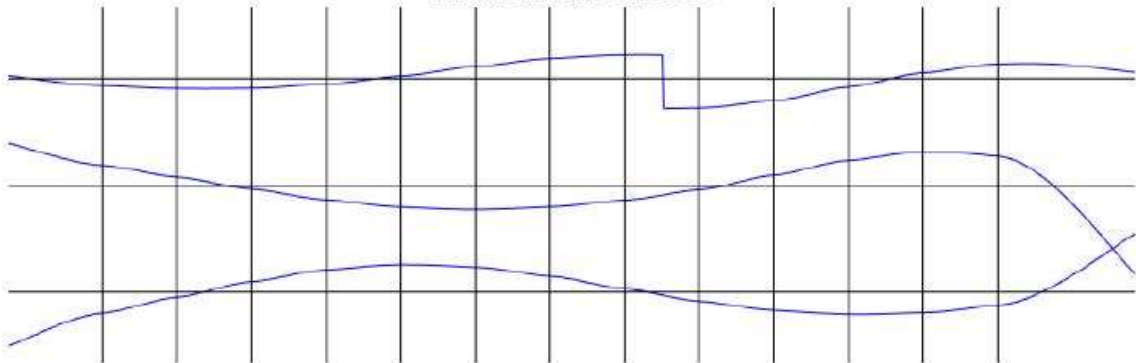
*Graf 35: Model M3*

13. vlastní tvar,  $f=20.423\text{Hz}$



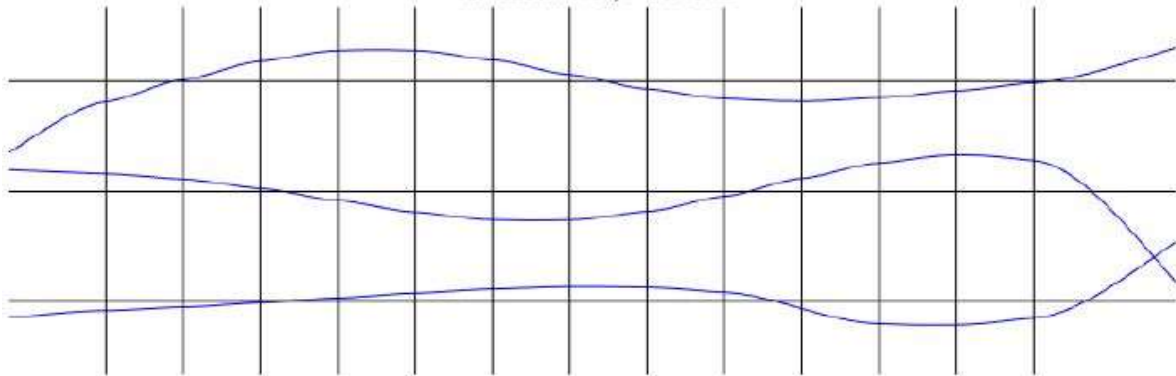
*Graf 36: Model M4*

13. vlastní tvar,  $f=21.008\text{Hz}$



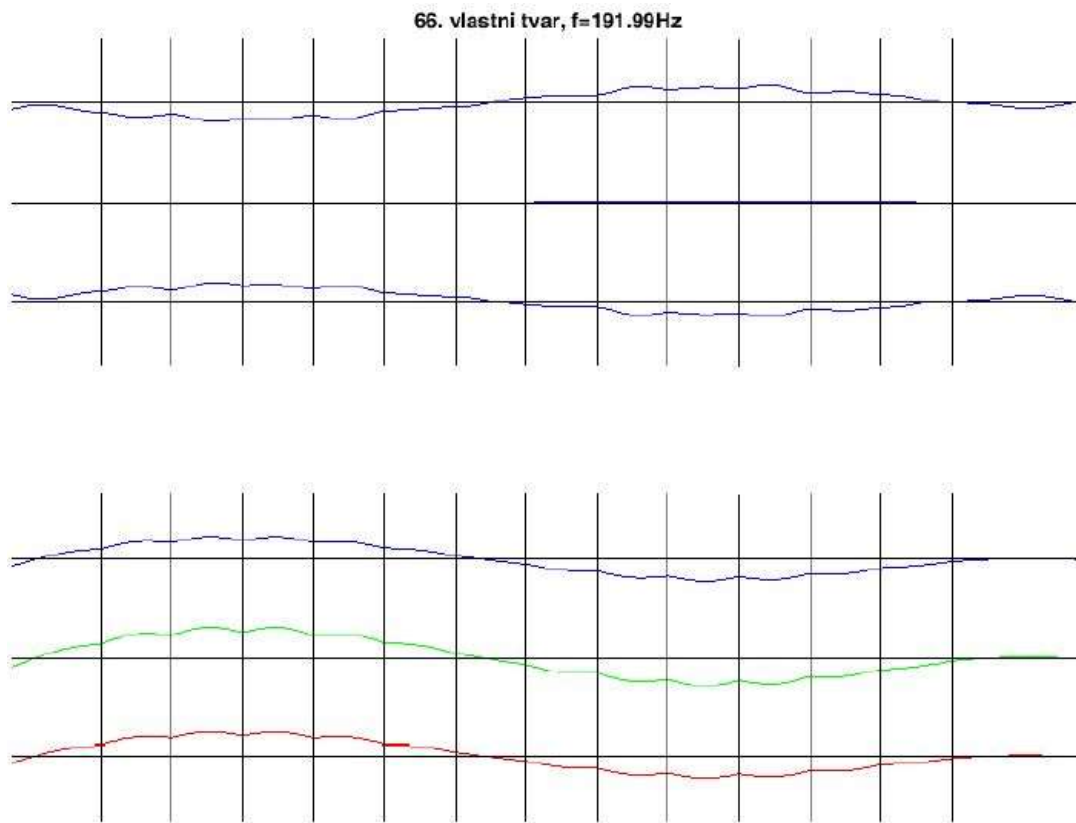
*Graf 37: Model M5*

13. vlastní tvar,  $f=21.46\text{Hz}$

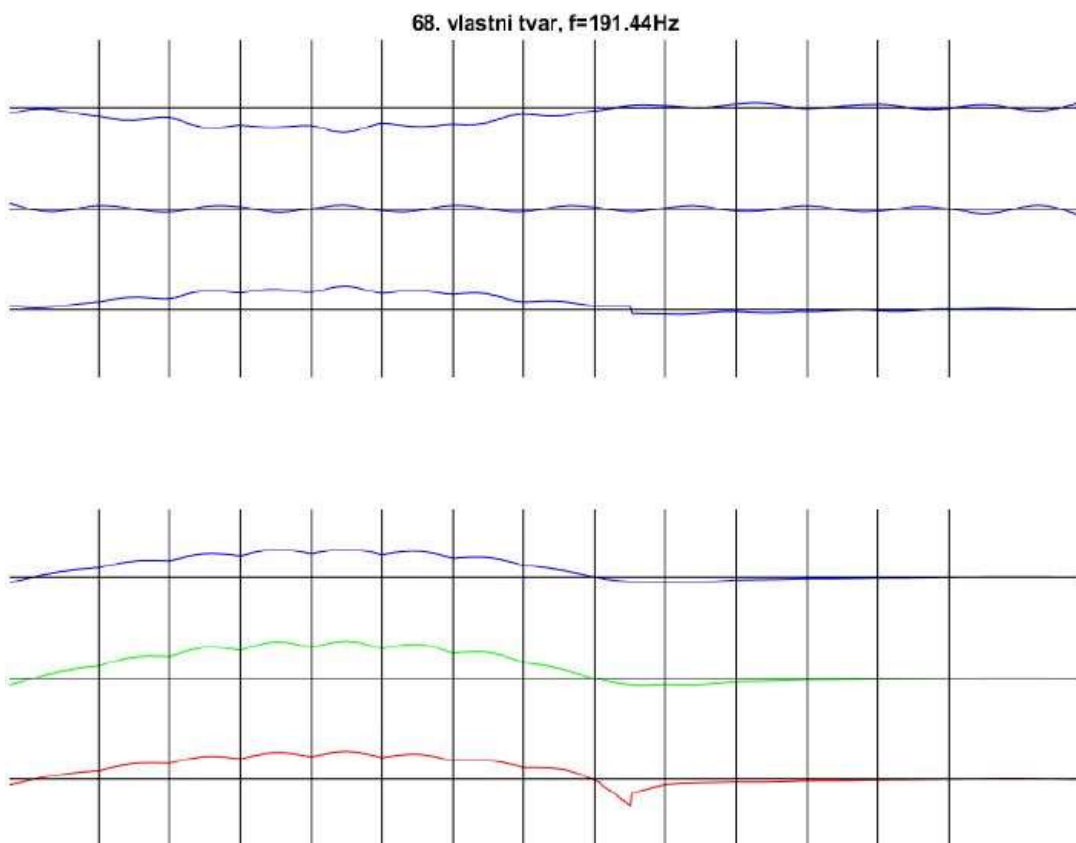


*Graf 38: Model M7*

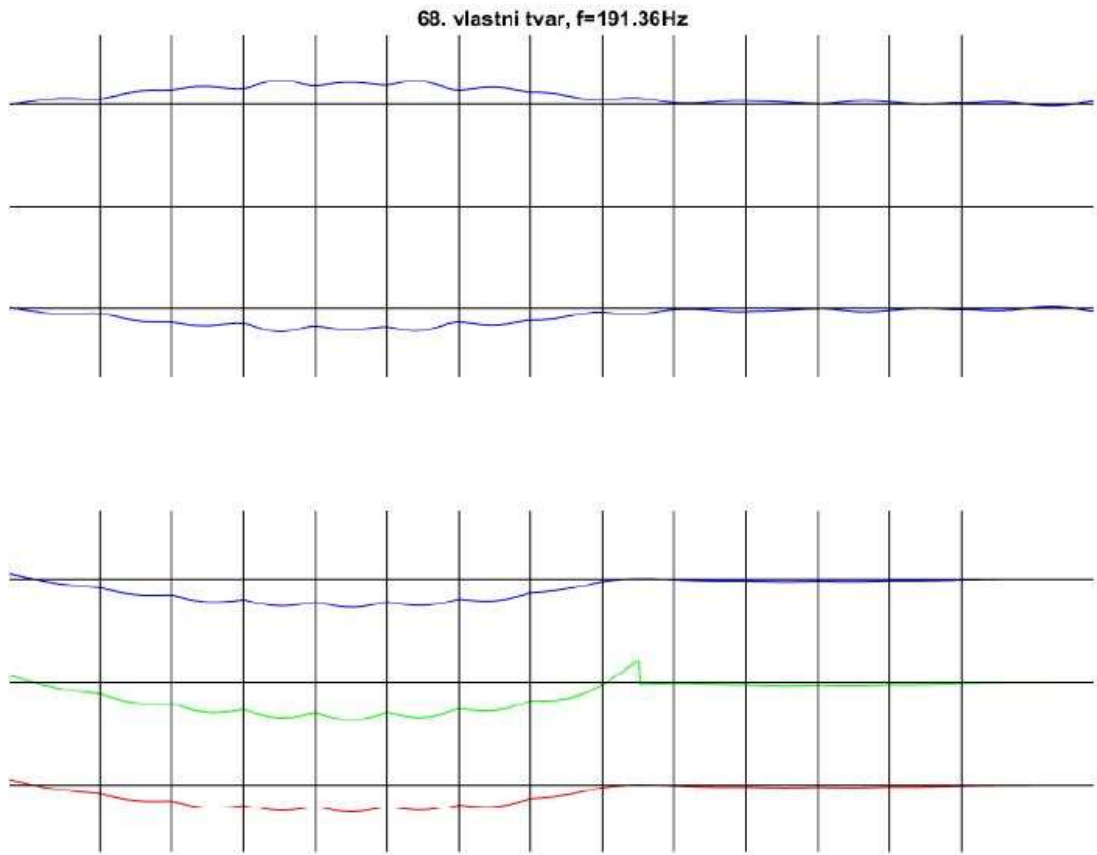
Vlastní tvary adekvátní k 66. vlastnímu tvaru modelu M2:



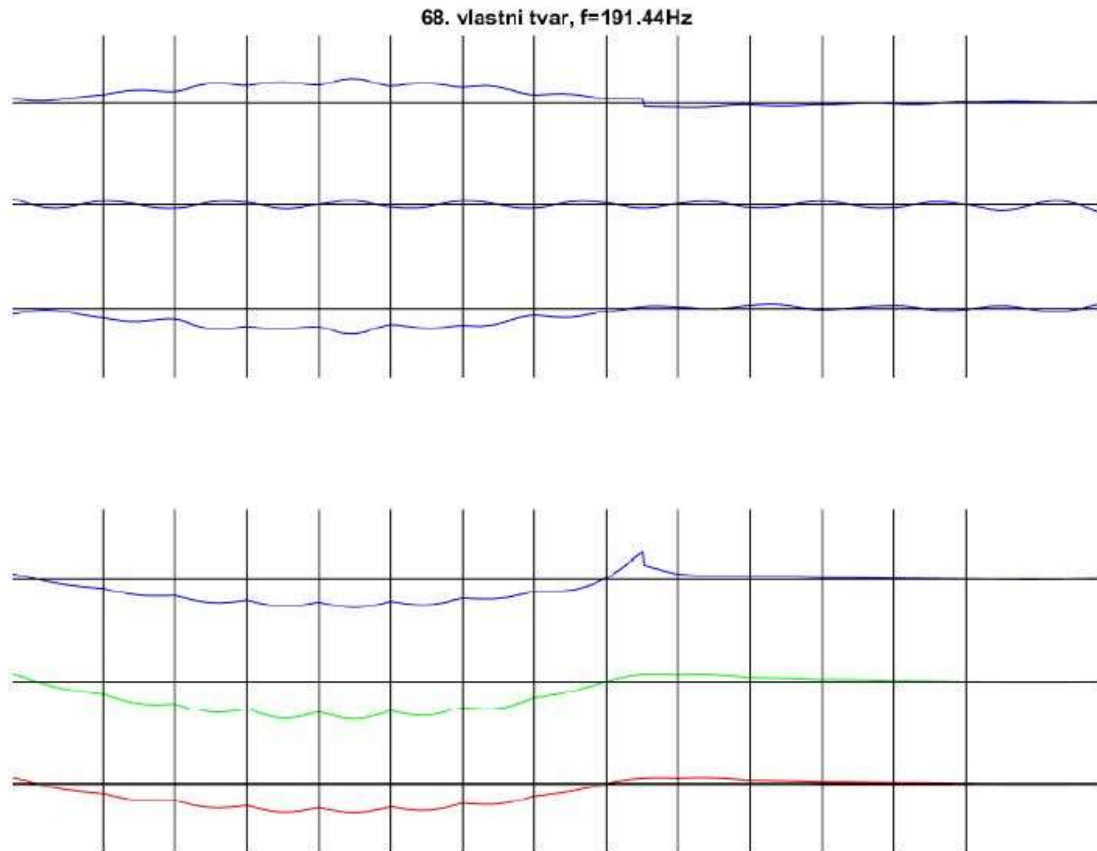
*Graf 39: Model M2*



*Graf 40: Model M3*

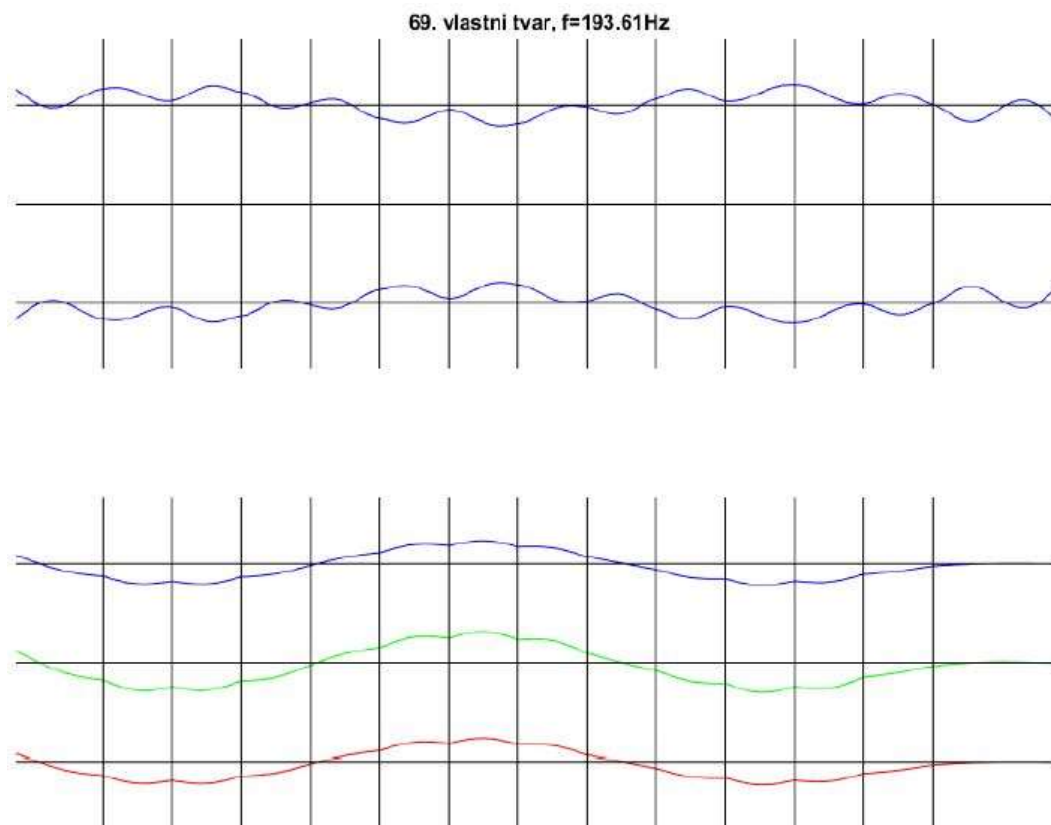


*Graf 41: Model M4*

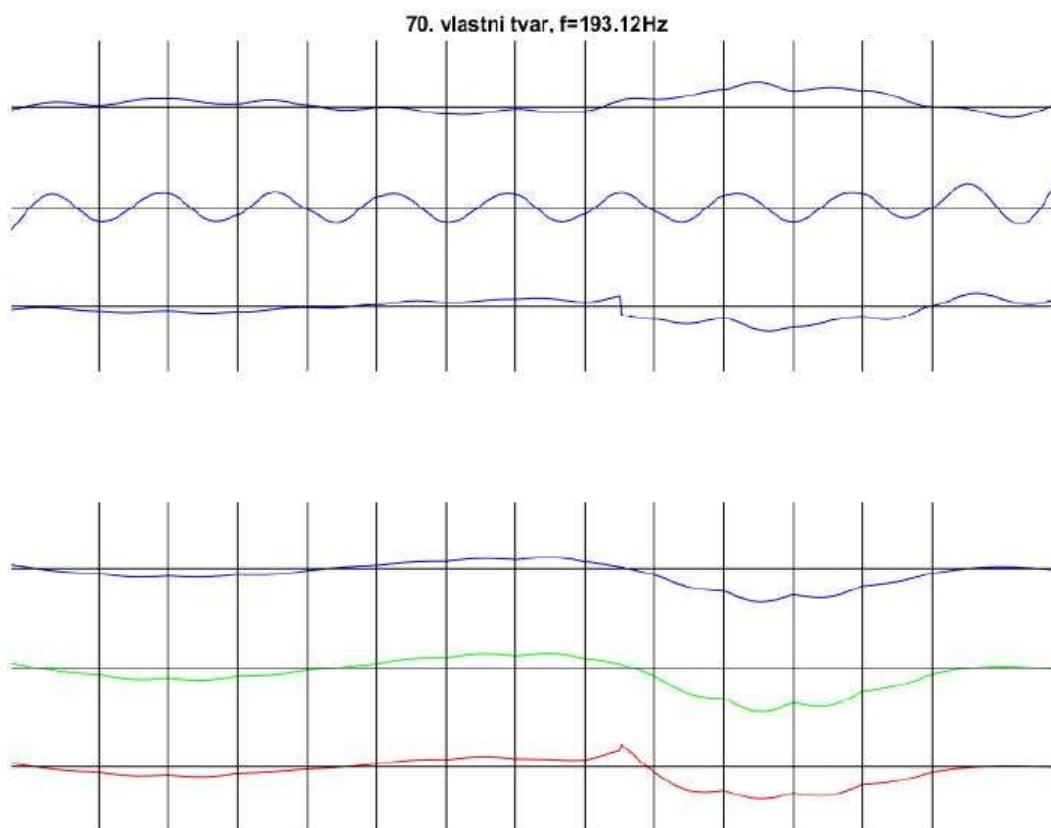


*Graf 42: Model M5*

Vlastní tvary adekvátní k 69. vlastnímu tvaru modelu M2:

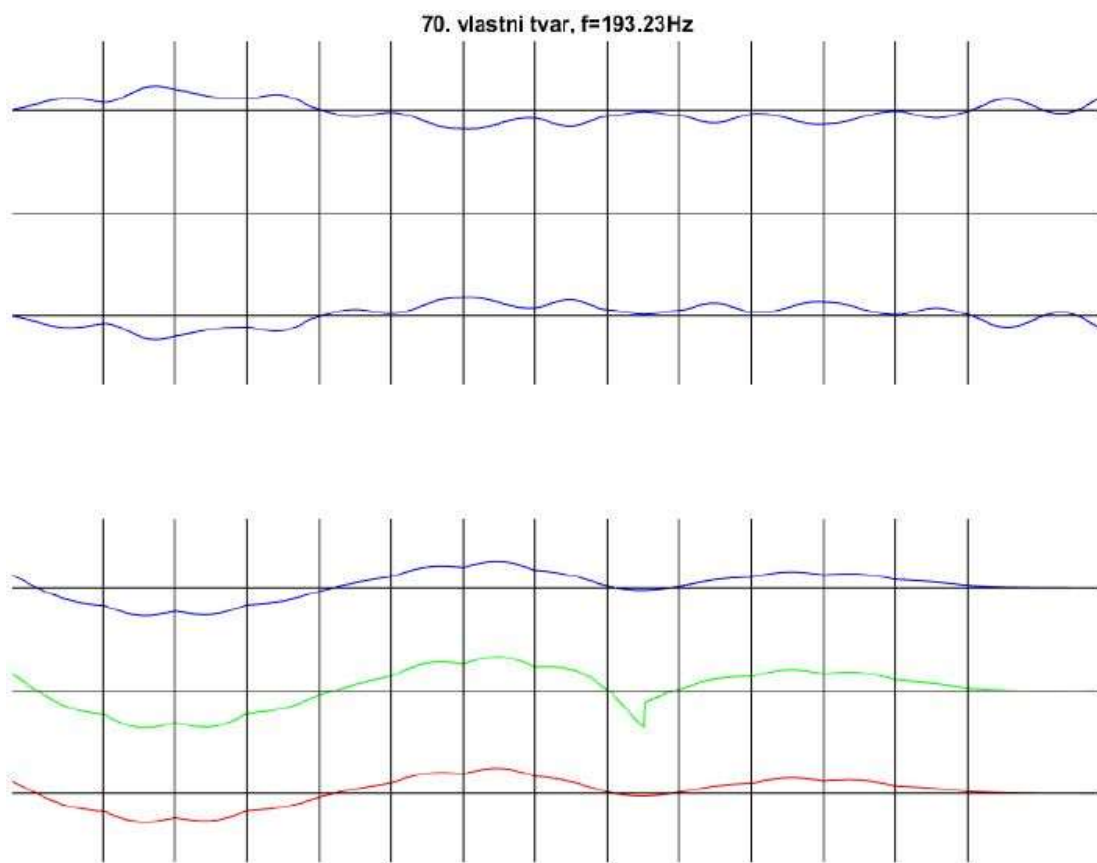


*Graf 43: Model M5*

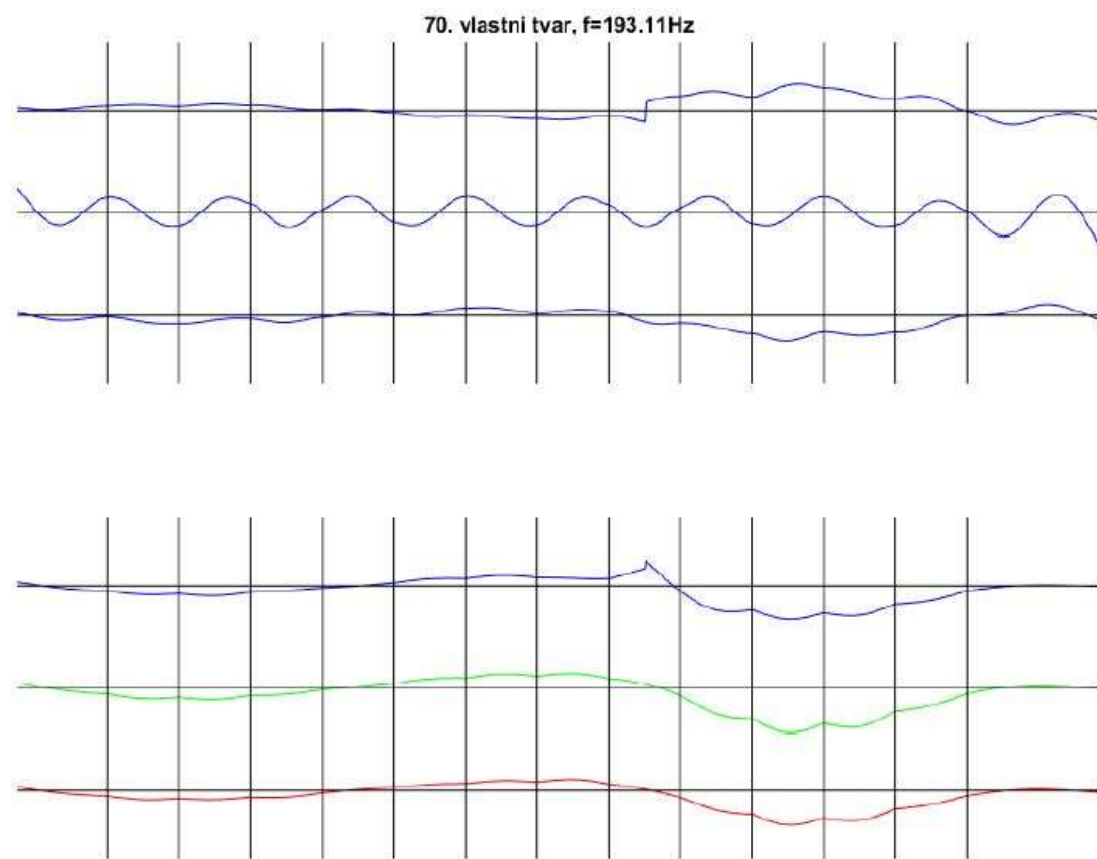


*Graf 44: Model M3*



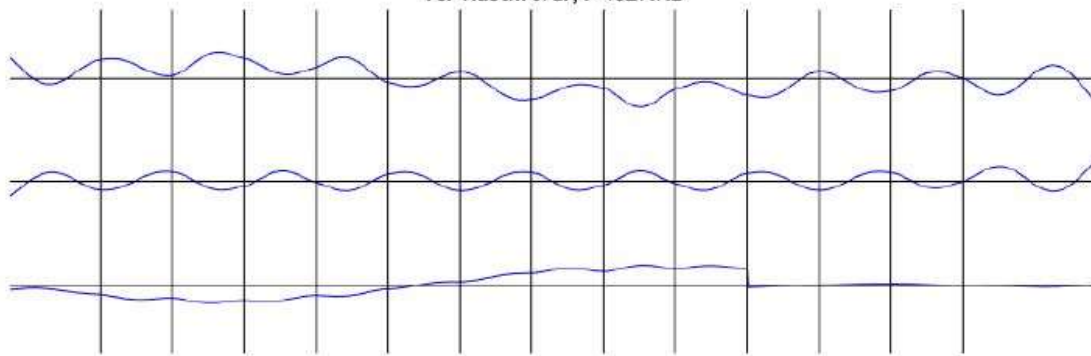


*Graf 45: Model M4*



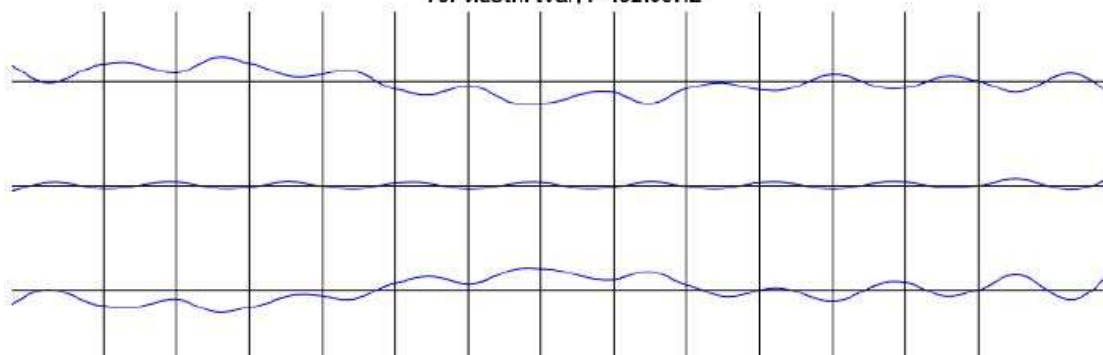
*Graf 46: Model M5*

70. vlastní tvar,  $f=192.4\text{Hz}$



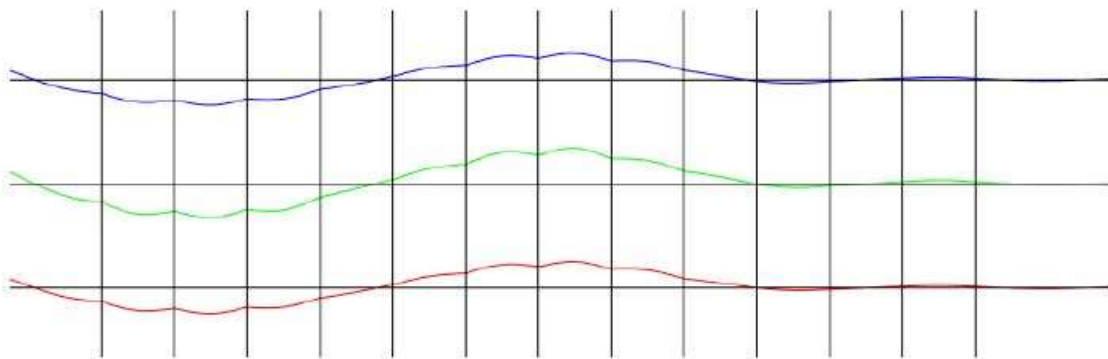
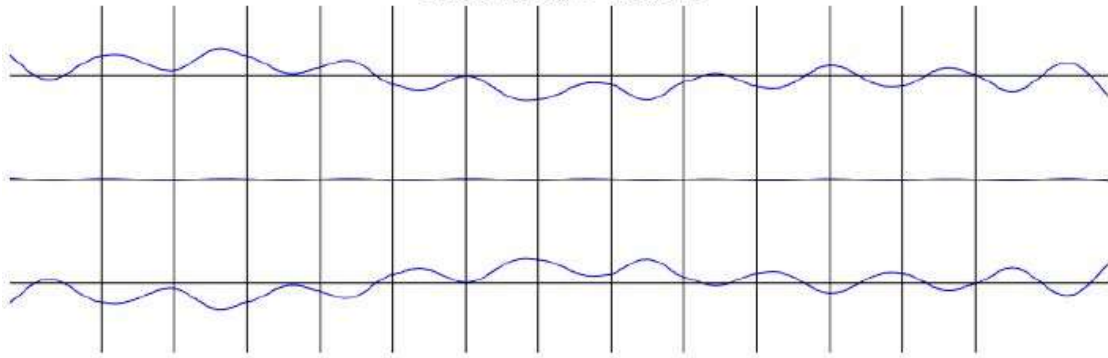
Graf 47: Model M6

70. vlastní tvar,  $f=192.95\text{Hz}$



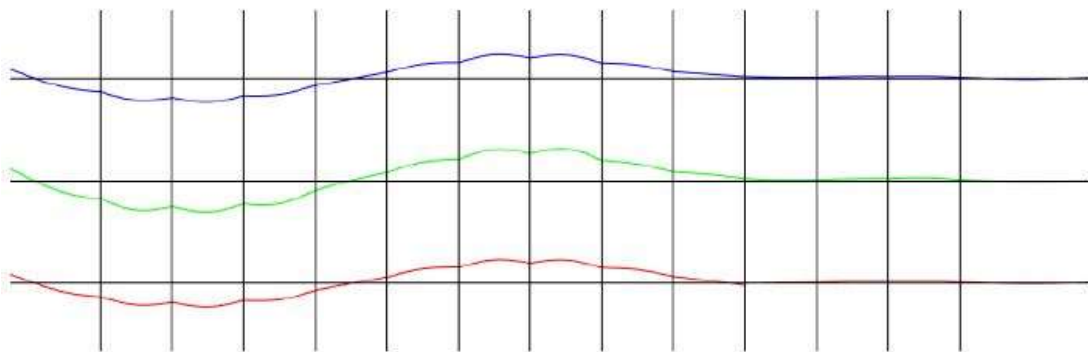
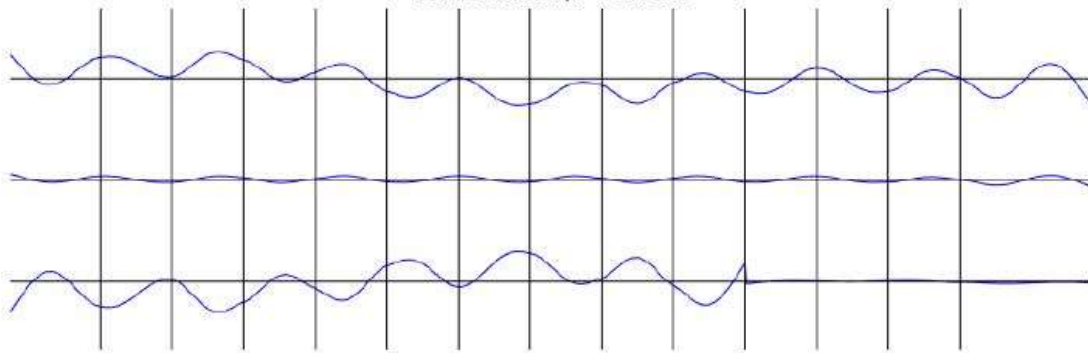
Graf 48: Model M7

69. vlastní tvar,  $f=192.92\text{Hz}$



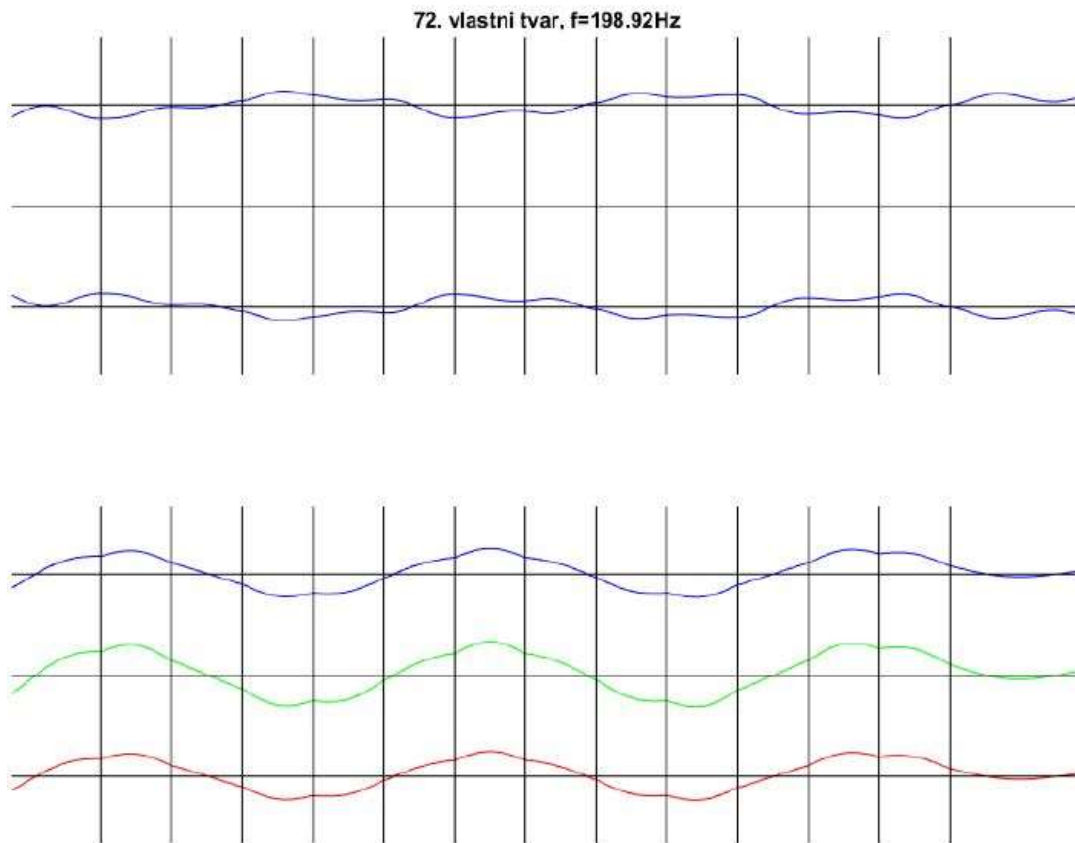
*Graf 49: Model M8*

73. vlastní tvar,  $f=193.18\text{Hz}$

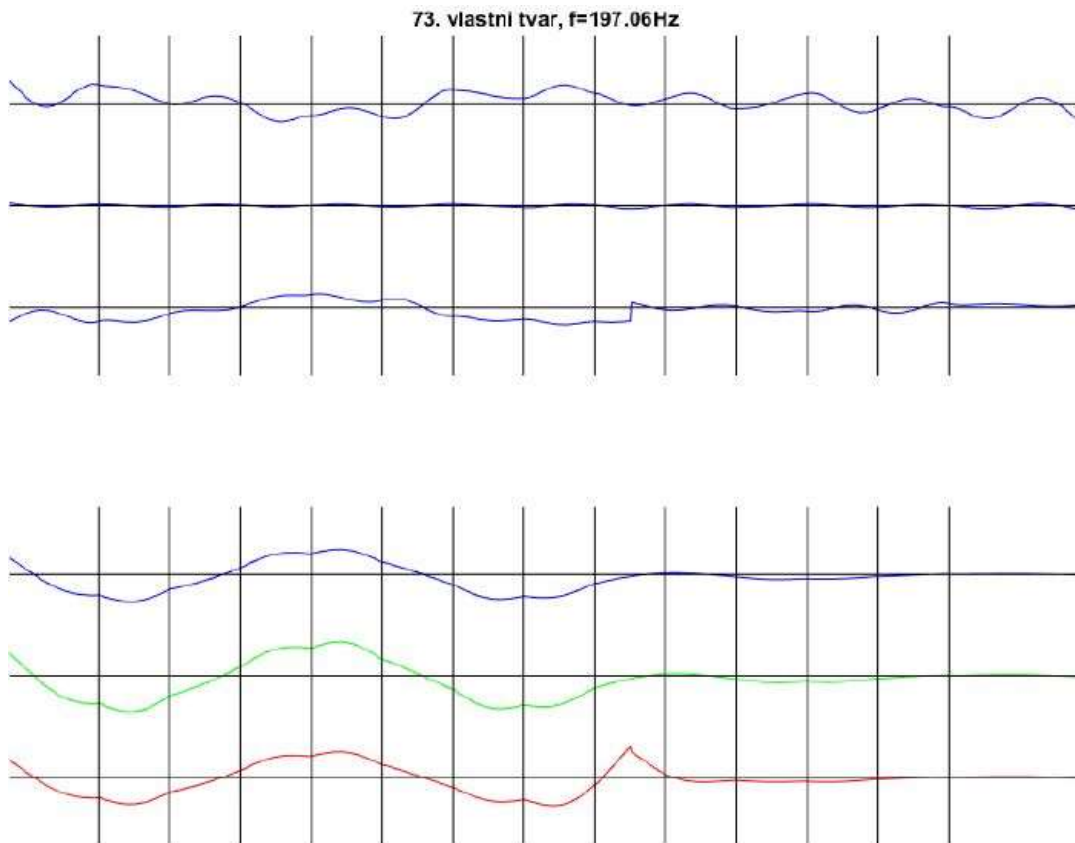


*Graf 50: Model M9*

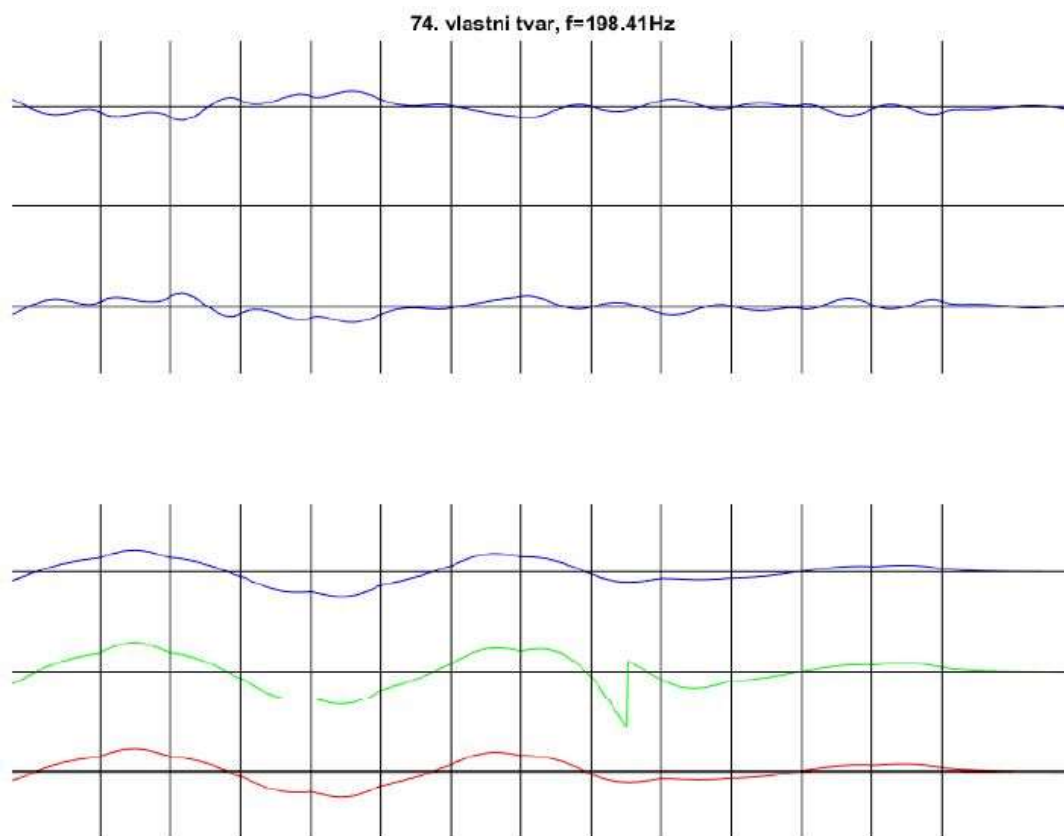
Vlastní tvary adekvátní k 72. vlastnímu tvaru modelu M2:



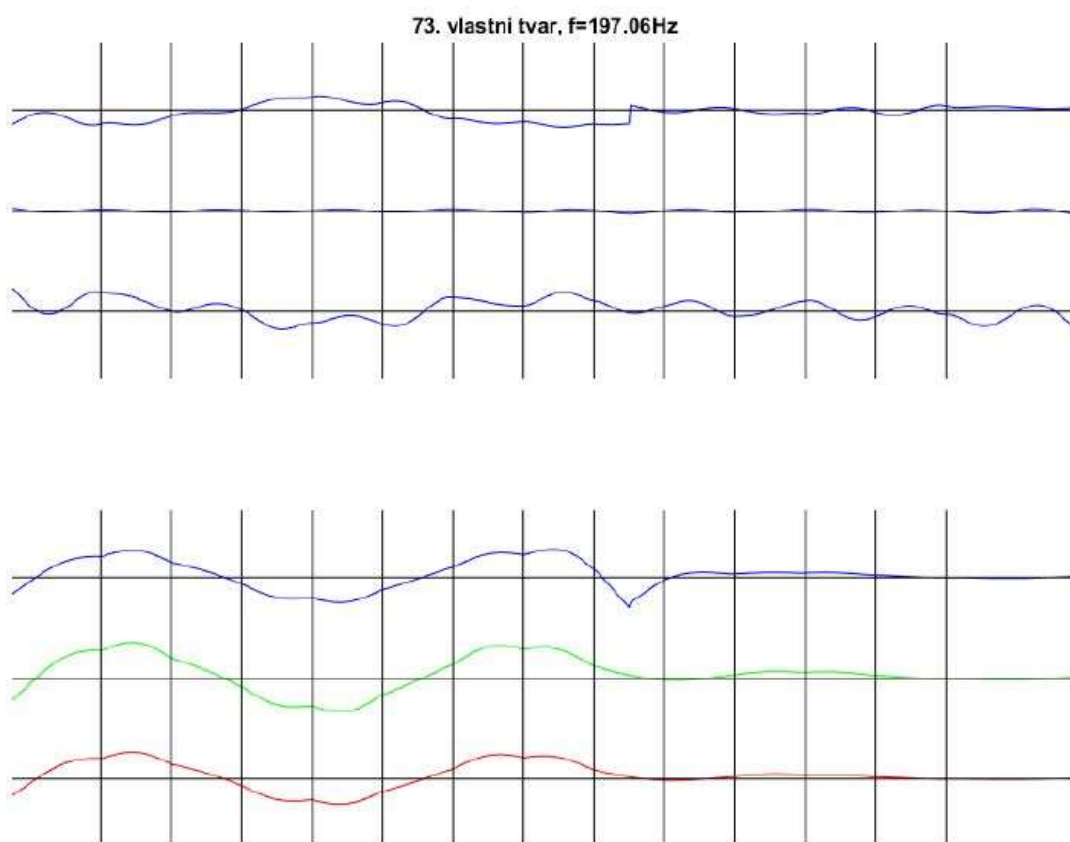
*Graf 51: Model M2*



*Graf 52: Model M3*

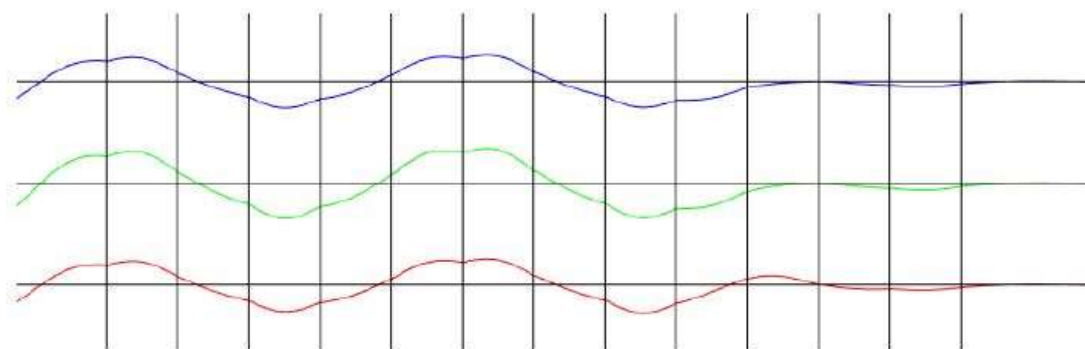
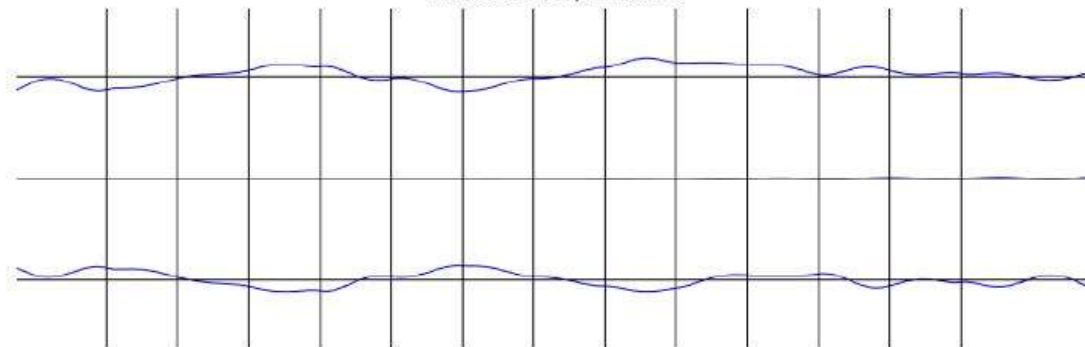


*Graf 53: Model M4*



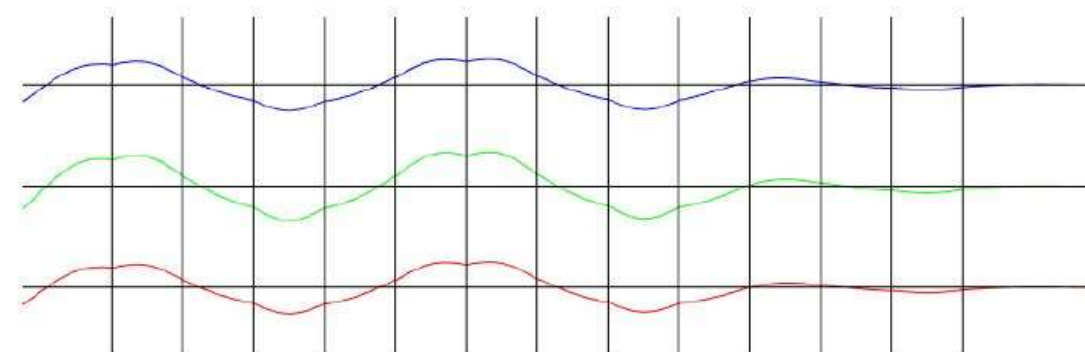
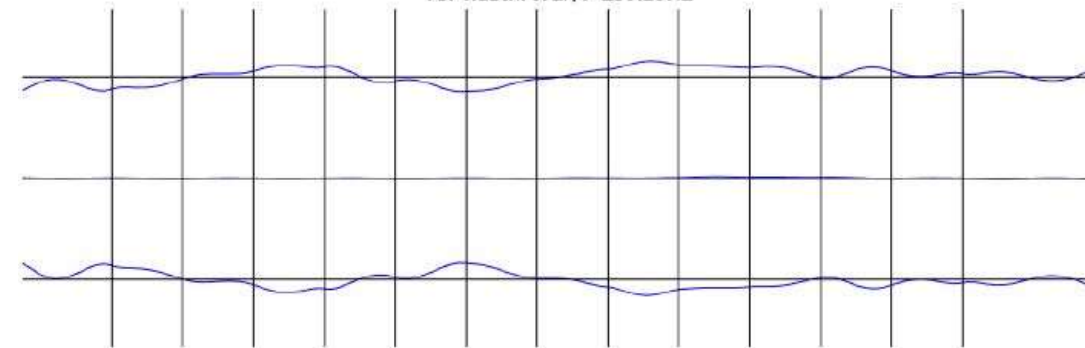
*Graf 54: Model M5*

74. vlastní tvar,  $f=200.2\text{Hz}$



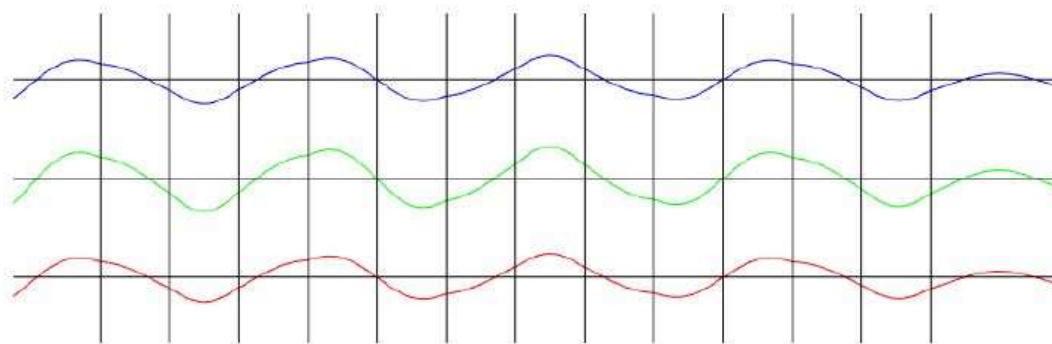
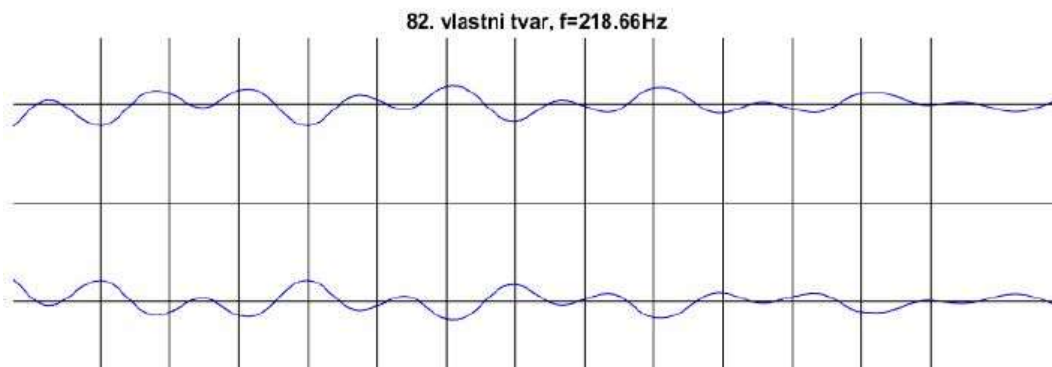
*Graf 55: Model M7*

73. vlastní tvar,  $f=200.23\text{Hz}$

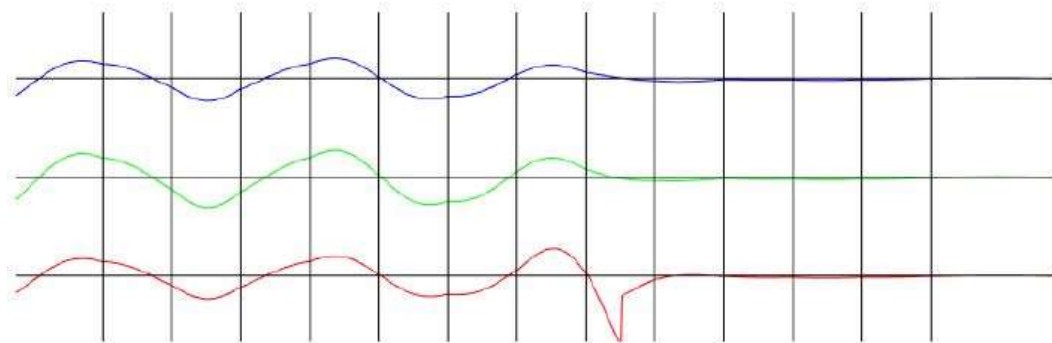
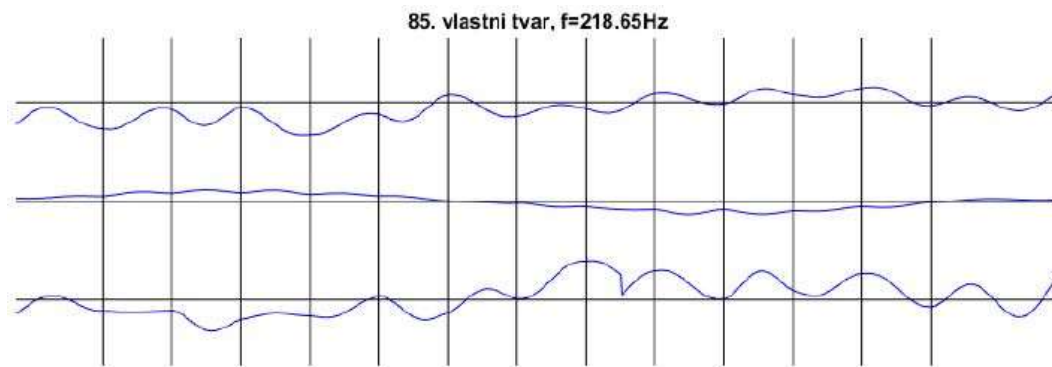


*Graf 56: Model M8*

Vlastní tvary adekvátní k 82. vlastnímu tvaru modelu M2:

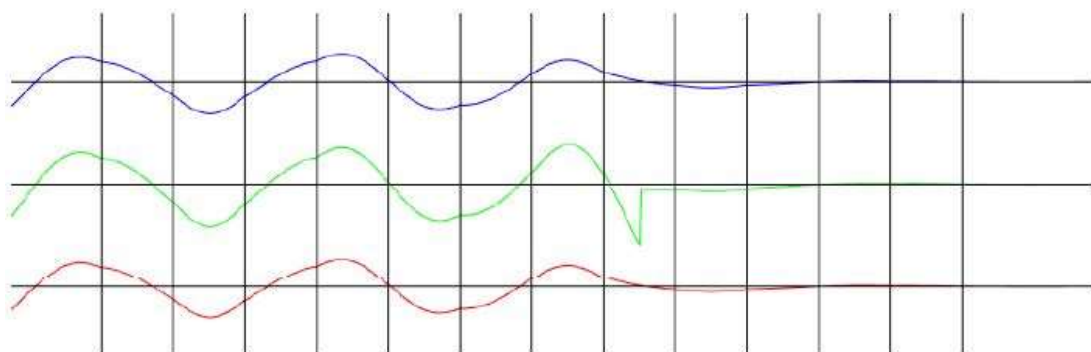
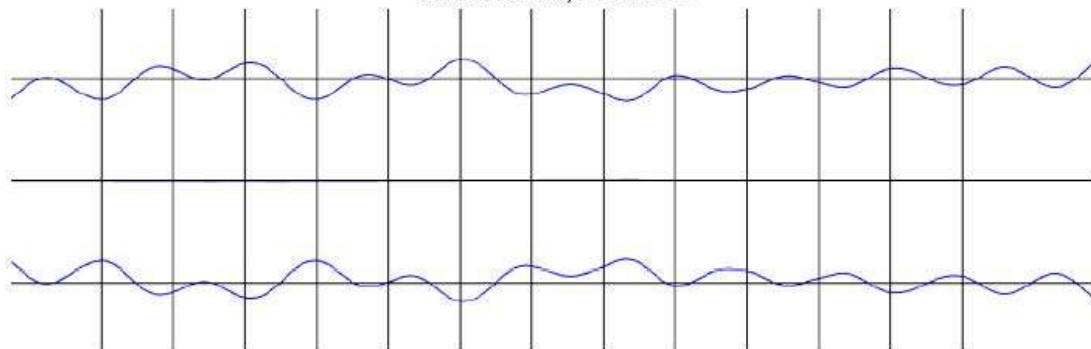


*Graf 57: Model M2*



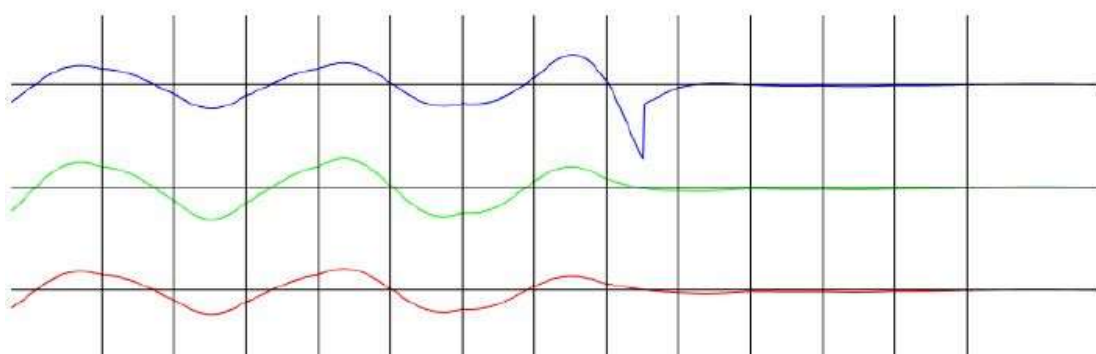
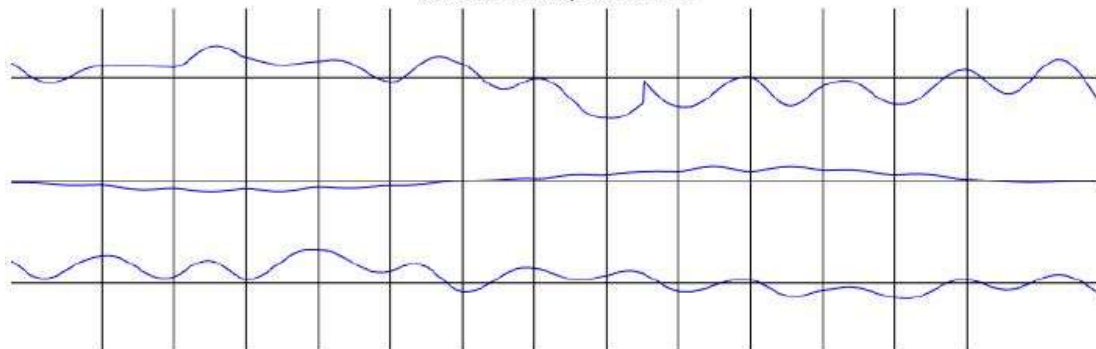
*Graf 58: Model M3*

84. vlastní tvar,  $f=218.12\text{Hz}$



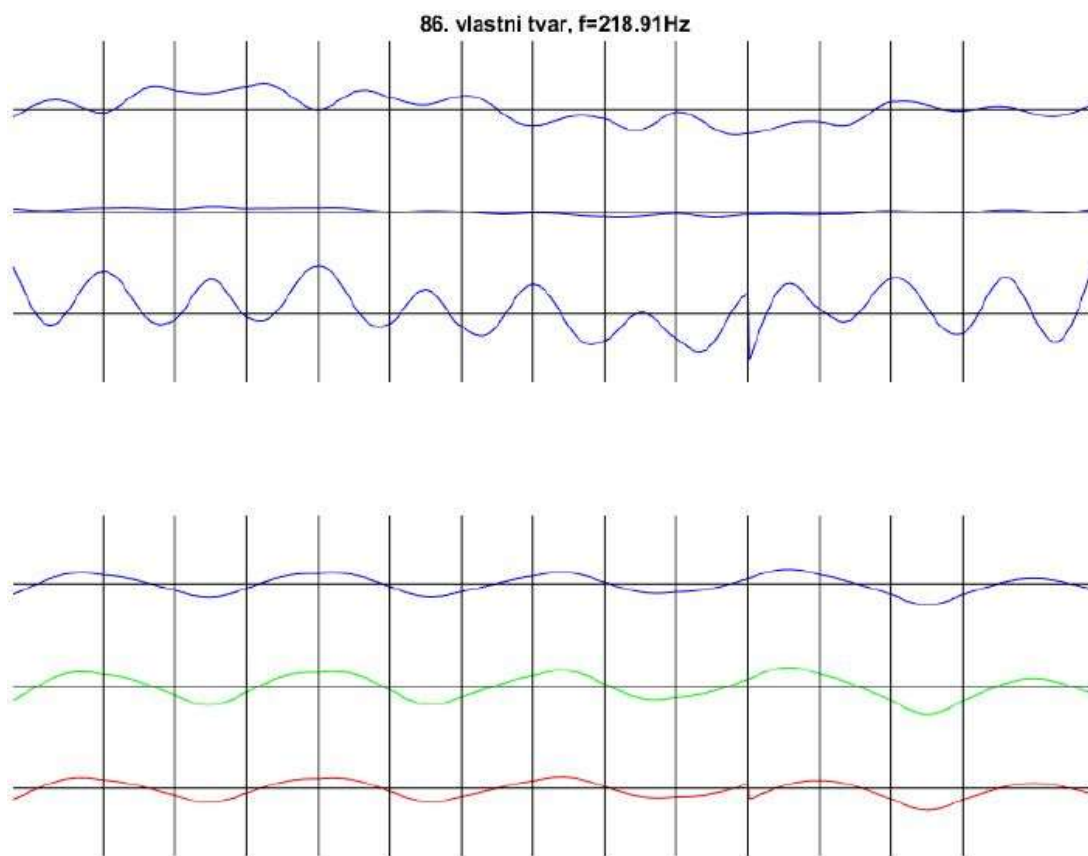
*Graf 59: Model M4*

85. vlastní tvar,  $f=218.66\text{Hz}$

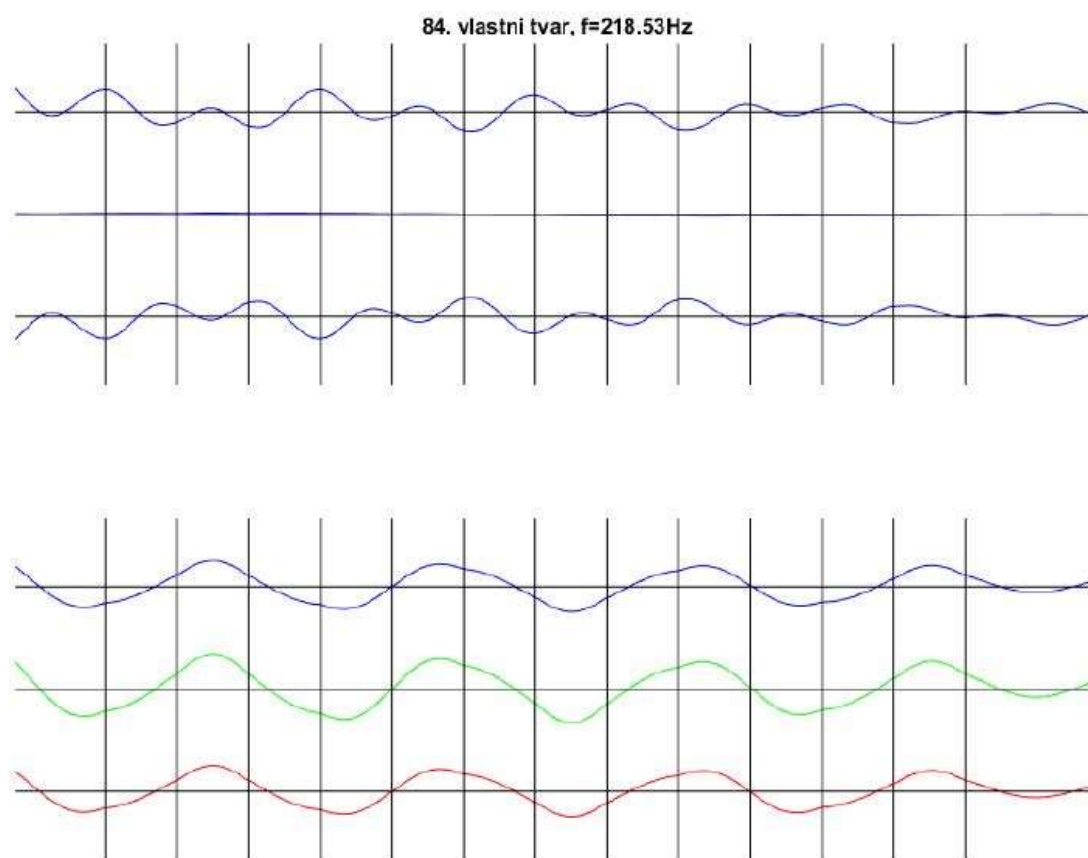


*Graf 60: Model M5*



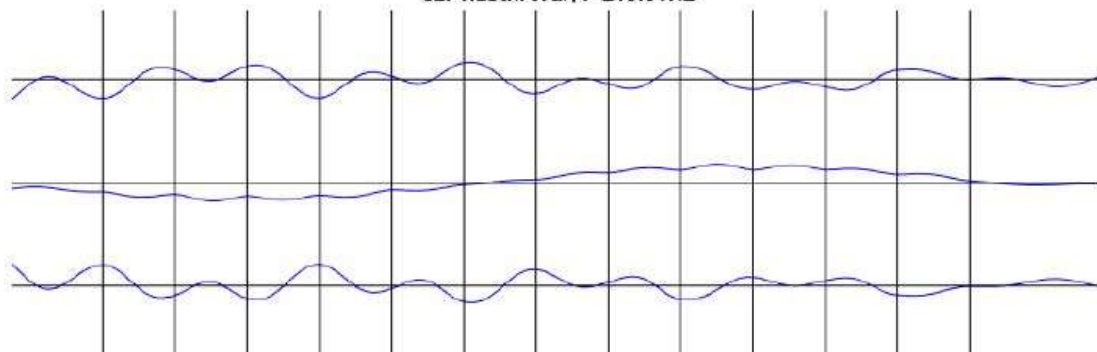


*Graf 61: Model M6*



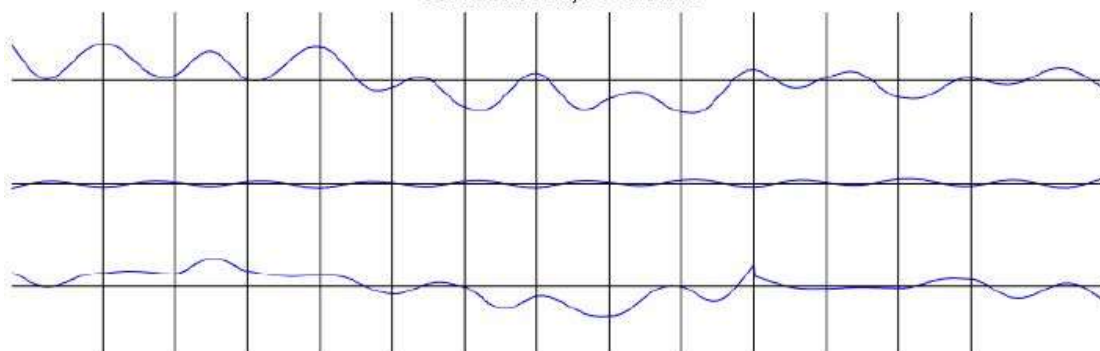
*Graf 62: Model M7*

82. vlastní tvar,  $f=218.31\text{Hz}$

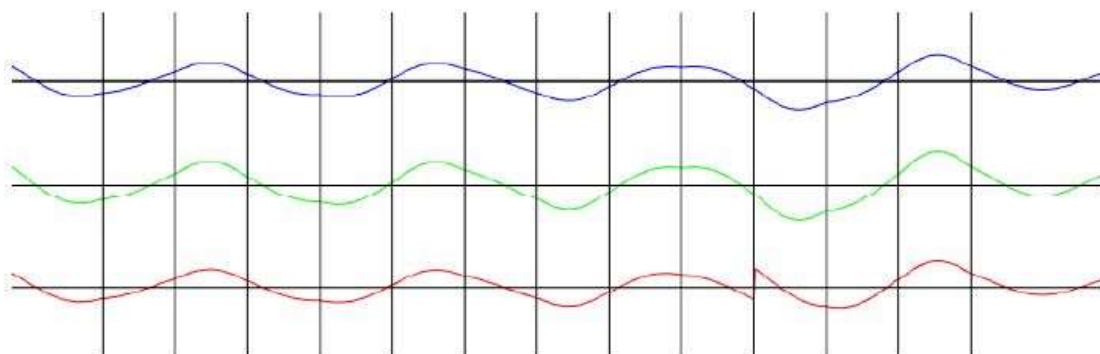


Graf 63: Model M8

88. vlastní tvar,  $f=220.81\text{Hz}$



Graf 64: Model M9



## 7.8 Závěry z analýzy poškození

Poškození mají vliv pouze na malou část MZ, pro indikaci poškození by proto bylo nutné osadit běžně používanými snímači (akcelerometry, snímače dráhy, tenzometry) všechny lamely ve středech všech polí a pod všemi podporami. Na příkladu zkoumaného segmentu by to znamenalo osadit celkem 3 lamely\*(12 polí + 13 podpor) = 75 snímačů, což není z hlediska kapacity kanálů ústředny reálné. Dostupné ústředny mají kapacitu 16 nebo 32 kanálů.

První variantou snížení počtu potřebných snímačů je osazení pouze místa s největší pravděpodobností poruchy. Z experimentálního měření v 1, na MZ v Ejovicích v roce 2015 (předchozí část projektu) bylo zjištěno, že nejpoškozenější část MZ závěru byla, podle očekávání, v oblasti pod pravým jízdním pruhem, kterým projíždí nejvíce TNV. Pro monitoring by tedy mohla být osazena pouze tato část závěru, na zkoumaném segmentu by pak bylo potřeba osadit jen  $3*(3+3)=18$  snímačů, což už je z hlediska kapacity ústředny reálné. Jako nejvhodnější snímače pro toto vychází z výše rozebrané analýzy poškození akcelerometry osazené přímo na lamelách.

Další možností snížení potřebného počtu snímačů je využití pomocné konstrukci, jejíž jednorázový kolaps bude indikovat poškození. V příčném směru by pak nebylo potřeba osazovat snímači všechny lamely. Kolaps by bylo možné sledovat například pomocí snímačů dráhy. Pomocná konstrukce by byla optimalizována tak, aby k jejímu kolapsu došlo pouze v případě poškození MZ, pak by jakékoliv nenulové čtení na snímačích dráhy znamenalo identifikaci poruchy a nemuselo by se při výměně provádět nulové čtení.

Progresivní variantou pro sledování poškození je použití fotoelektrických senzorů. Senzor sestává z přijímače, který by byl umístěn na závěrné zídce, a vysílače, který by se osadil na koncový příčník, viz Obr. 107 vlevo. V případě poruchy konstrukce by její deformovaná část při zatížení dopravou přerušila laserový paprsek mezi vysílačem a přijímačem. Paprsek je kuželovitý, což poskytuje dostatečnou vůli pro příjem paprsku i v případě natočení koncového příčníku nebo sednutí opěry. Umístění senzorů by bylo optimalizováno tak, aby jakékoli přerušování paprsku znamenalo poškození MZ. Snímač byl ve spolupráci se společností INSET s.r.o. vyzkoušen na Segmentu MZ pro experiment s pozitivním výsledkem, signalizace nadměrných průhybů v pořádku fungovala.



Obr. 107: Vlevo přijímač a vysílač fotoelektrického snímače, vpravo kuželovitý paprsek

## 8 Závěr

V rámci diplomové práce byl navržen nový typ mostního závěru se sníženou hlučností a progresivními prvky, který vychází z lamelového mostního závěru s roštovým roznášecím mechanismem. Díky progresivní variantě svařované lamely bylo možné použít horní pásnici speciálního tvaru, který zajišťuje snížení hlučnosti bez nutnosti přidávání rombických prvků, které znesnadňují údržbu. Další progresivní prvek v podobě kluzného zedexového bloku umožňuje jednoduchou konstrukci roznášecího mechanismu. Díky nízkému součiniteli tření zabezpečuje plynulý pohyb lamel po traverze a traverzy v krabicích a zároveň má vysokou pevnost v tlaku pro odolávání dopravnímu zatížení. V neposlední řadě byly na lamely umístěny tlumicí profily, které nejen dále snižují hlučnost, ale také zvyšují součinitel útlumu.

Navržená konstrukce byla vyrobena a následně experimentálně ověřena. Všechny prvky splňují svou funkčností předpoklady z návrhu, s výjimkou úložných elastomerových bloků, pro které bude muset být v budoucnu použit materiál s vyšším modulem pružnosti. Zkoušený segment bez problémů vyhověl na svislé zatížení MSÚ popsané normou, při zkoušce do porušení bylo dokonce dokázáno, že vydrží minimálně čtyřnásobek předepsaného zatížení. Z vyhodnocení modální analýzy vyplývá závěr, že tlumicí profily dvojnásobně zvyšují součinitel útlumu konstrukce, což je u cyklického dynamického zatížení velmi přínosné.

Z provedené analýzy poškození lze vyslovit závěr, že při poškození konstrukce se porucha projevuje pouze na malém úseku. Tento fakt je nutné uvážit při návrhu inteligentních prvků, které průběžně sledují stav mostního závěru a případně indikují jeho poruchu. Pro monitorování celé konstrukce pomocí snímačů dráhy nebo akcelerometrů by bylo zapotřebí použít enormní množství snímačů a drahou ústřednu pro jejich zapojení a zpracování záznamu. Jako vhodná, progresivní varianta pro indikátory poškození se nabízejí fotoelektrické (laserové) snímače, kterých je nutné použít výrazně méně a zároveň je možné je zapojit sériově a snížit tak potřebný počet kanálů v ústředně, díky čemuž významně klesne cena za systém indikace poškození.

## Zdroje

- [1] Bittnar, Z., Šejnoha J.: *Numerické metody mechaniky 1*, Praha, 1992
- [2] ETAG N° 032: Expansion joints for road bridges, Parts 1,6,8, <https://www.eota.eu/en-GB/content/etags-used-as-ead/26/>
- [3] Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 2: Zatížení mostů dopravou, ČSN EN 1991-2, 2005
- [4] Frýba L.: *Dynamika železničních mostů*, Praha, 1992
- [5] Katalog MZ Freyssinet: [http://www.freyssinet.cz/251-mostni\\_zavery](http://www.freyssinet.cz/251-mostni_zavery)
- [6] Máca, J.: *Přednášky z předmětu Dynamika stavebních konstrukcí 1*, Praha, 2014
- [7] Polák, M., Plachý, T. a kol.: *Odborná zpráva projektu Progresivní mostní závěr s nízkou hlučností a inteligentními prvky programu ALFA TAČR za rok 2016, přílohy 5 a 6*, Praha, 2016
- [8] Pošvářová M.: *Analýza stavu mostních závěrů – Žďákovský most*, 2009, dostupné z <http://www.silnice-zeleznice.cz/clanek/analyza-stavu-mostnich-zaveru-zdakovsky-most>
- [9] Referenční projekty Mageba: <http://www.mageba-group.com/en/804/References.htm>
- [10] Šafář R., Kukaň V., Drahorád M., Foglar M.: *Betonové mosty 1*, Praha, 2010
- [11] Tichá, L., Cívínová, Z., Morysková, M., Trtíková, I., Němečková, L.: *Jak psát závěrečné vysokoškolské práce*, Praha, 2014
- [12] TP 86: Mostní závěry: <http://www.pjpk.cz>
- [13] TKP 23: Mostní závěry: <http://www.pjpk.cz>

## Použité programy

- [1] CsiBridge 2015, educational version, síťová licence ČVUT
- [2] Autodesk AutoCAD 2016, studentská verze
- [3] Nemetschek Scia Engineer 2016, studentská verze
- [4] MS Office 365, studentská verze
- [5] MathWorks MATLAB R2015a, síťová licence ČVUT

## Seznam příloh

### Segment MZ pro experiment

příloha č.	název přílohy
01	PŮDORYSY A PŮDORYSNÉ ŘEZY
02	PŘÍČNÉ A PODÉLNÉ ŘEZY
03	DETAIL LAMELY
04	DETAILY OCELOVÝCH KONSTRUKCÍ KRABIC
05	DETAILY ŘÍDÍCÍHO SYSTÉMU A TRAVERZY

### Segment MZ pro zkušební stand

příloha č.	název přílohy
01	PŮDORYSNÝ ŘEZ MAXIMÁLNÍ DILATAČNÍ SPÁROU
02	PŮDORYSNÝ ŘEZ MINIMÁLNÍ DILATAČNÍ SPÁROU
03	PŮDORYS
04	PŘÍČNÉ ŘEZY
05	PODÉLNÉ ŘEZY
06	DETAIL LAMELY
07	DETAILY OCELOVÝCH KONSTRUKCÍ KRABIC
08	DETAILY ŘÍDÍCÍHO SYSTÉMU A TRAVERZY

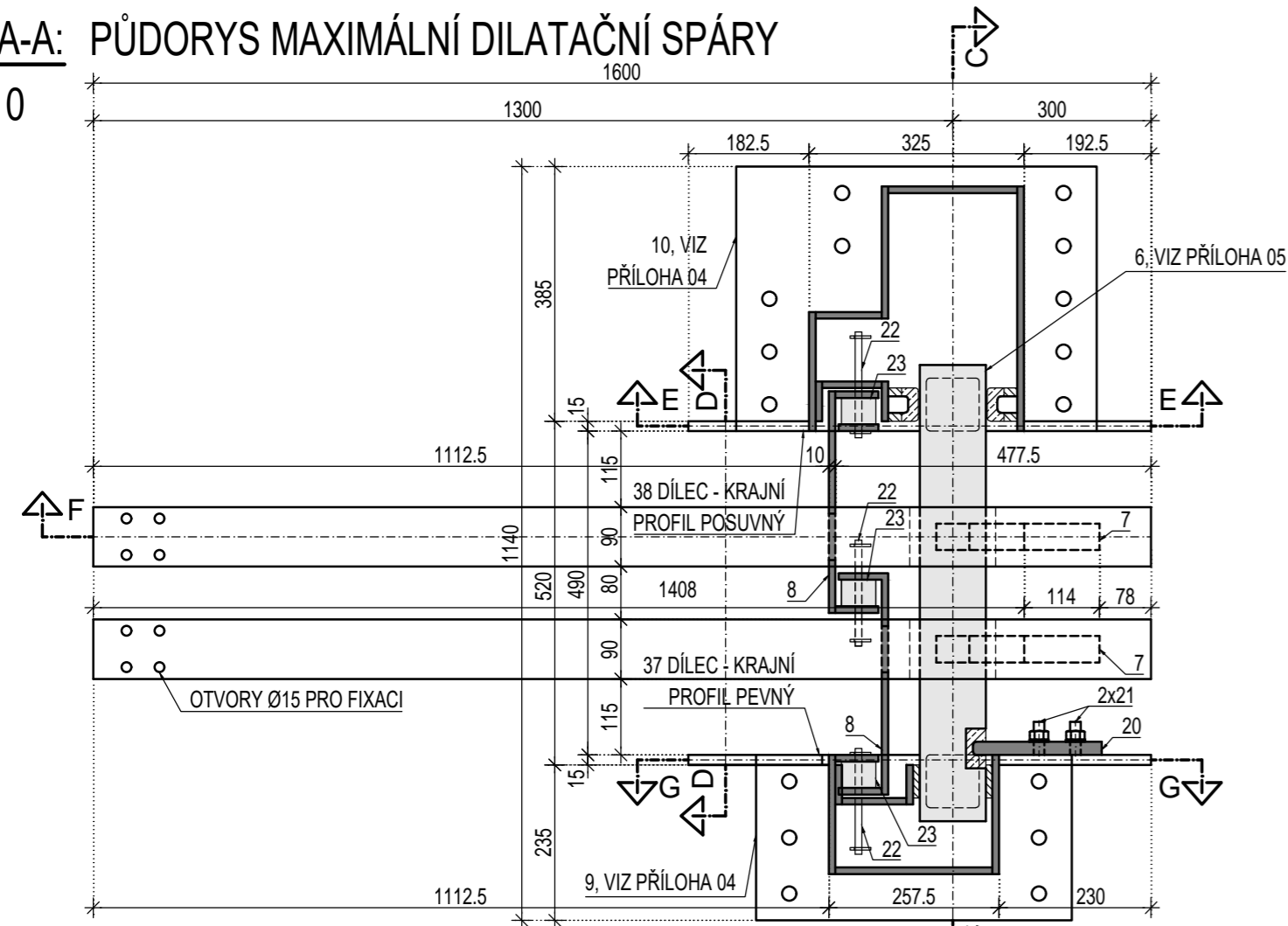
### Zkušební stand

příloha č.	název přílohy
01	VÝKRES TVARU
02	VÝKRES VÝZTUŽE
03	VÝKRES TVARU OCELOVÉ KONSTRUKCE

# PŮDORYSY A PŮDORYSNÉ ŘEZY 1:10

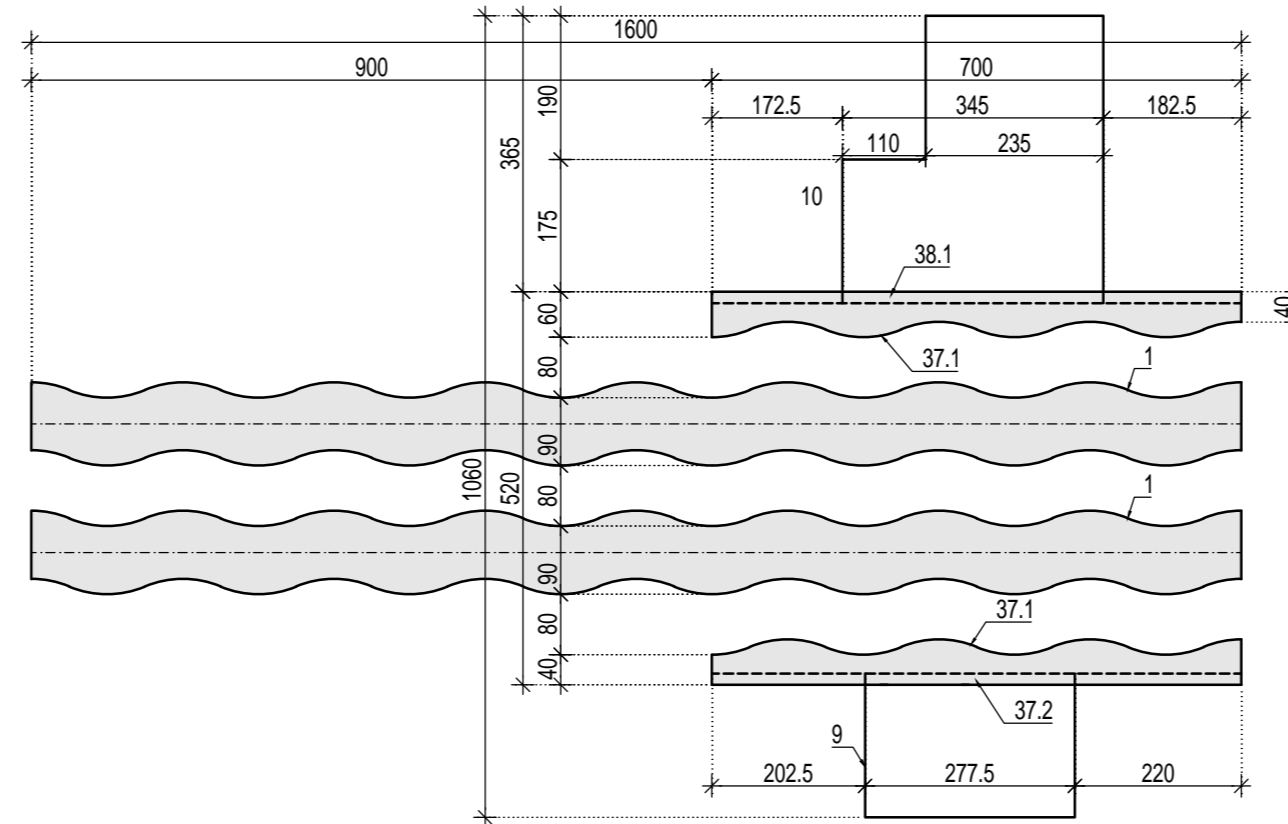
ŘEZ A-A: PŮDORYS MAXIMÁLNÍ DILATAČNÍ SPÁRY

M 1:10



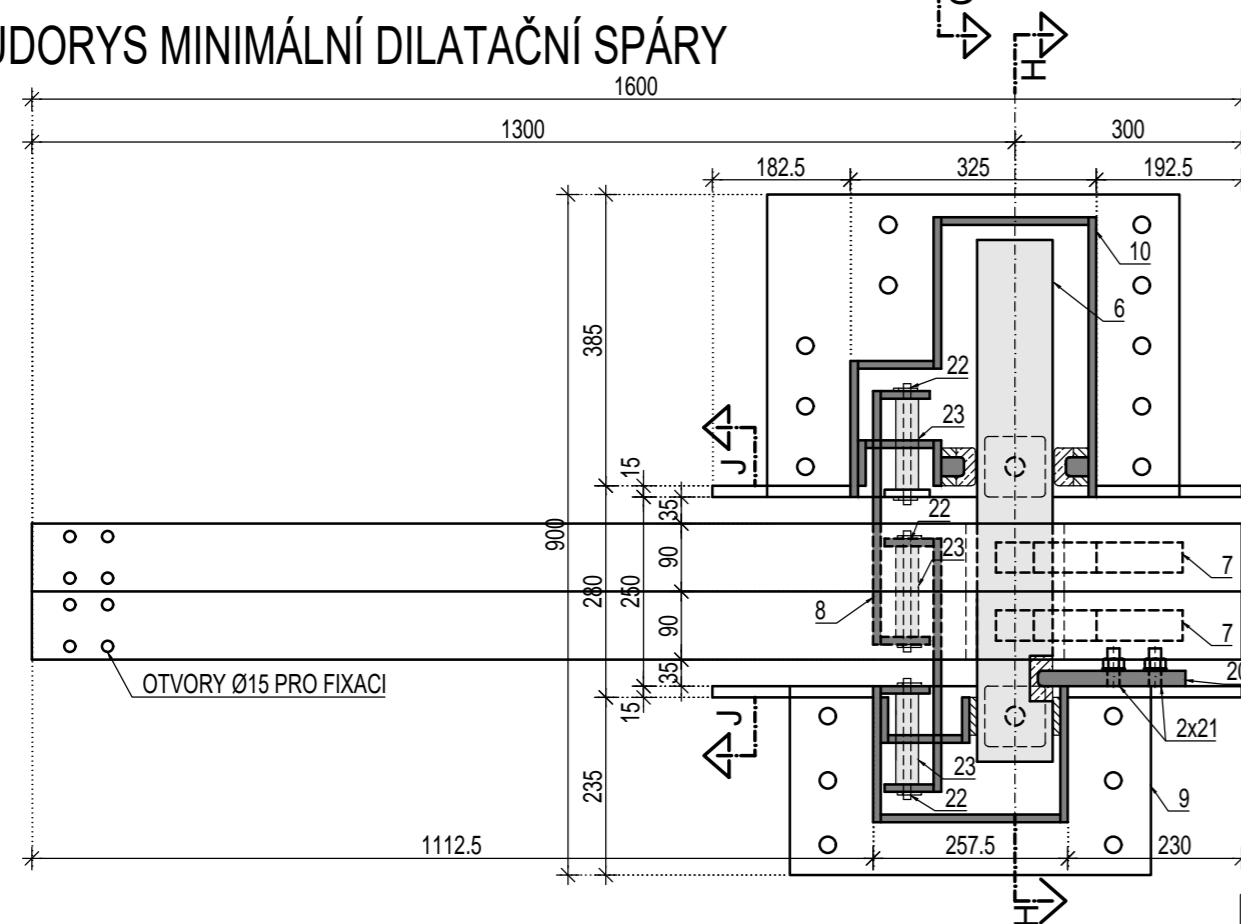
PŮDORYS: MAXIMÁLNÍ DILATAČNÍ SPÁRA

M 1:10



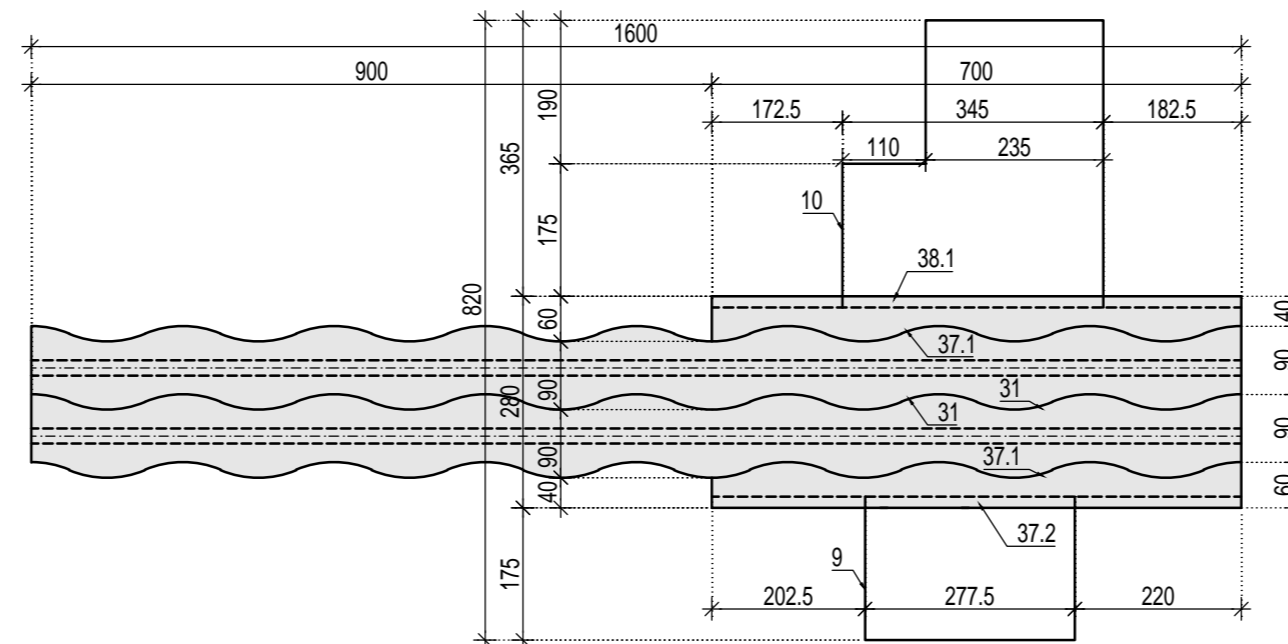
ŘEZ B-B: PŮDORYS MINIMÁLNÍ DILATAČNÍ SPÁRY

M 1:10



PŮDORYS: MINIMÁLNÍ DILATAČNÍ SPÁRA

M 1:10



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE



FAKULTA STAVEBNÍ - KATEDRA OCELOVÝCH A DŘEVĚNÝCH KONSTRUKCÍ

VYPRACOVAL  
Bc. JIŘÍ KAŠPÁREK

VEDOUCÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE  
doc. Ing. PAVEL RYJÁČEK, Ph.D.

TÉMA DIPLOMOVÉ PRÁCE  
PROGRESIVNÍ MOSTNÍ ZÁVĚR S INTELIGENTNÍMI PRVKY

MĚŘÍTKO  
1:10

SEGMENT MZ PRO LABORATORNÍ ZKOUŠKU

DATUM  
LEDEN 2017

OBSAH PŘÍLOHY  
PŮDORYSY A PŮDORYSNÉ ŘEZY

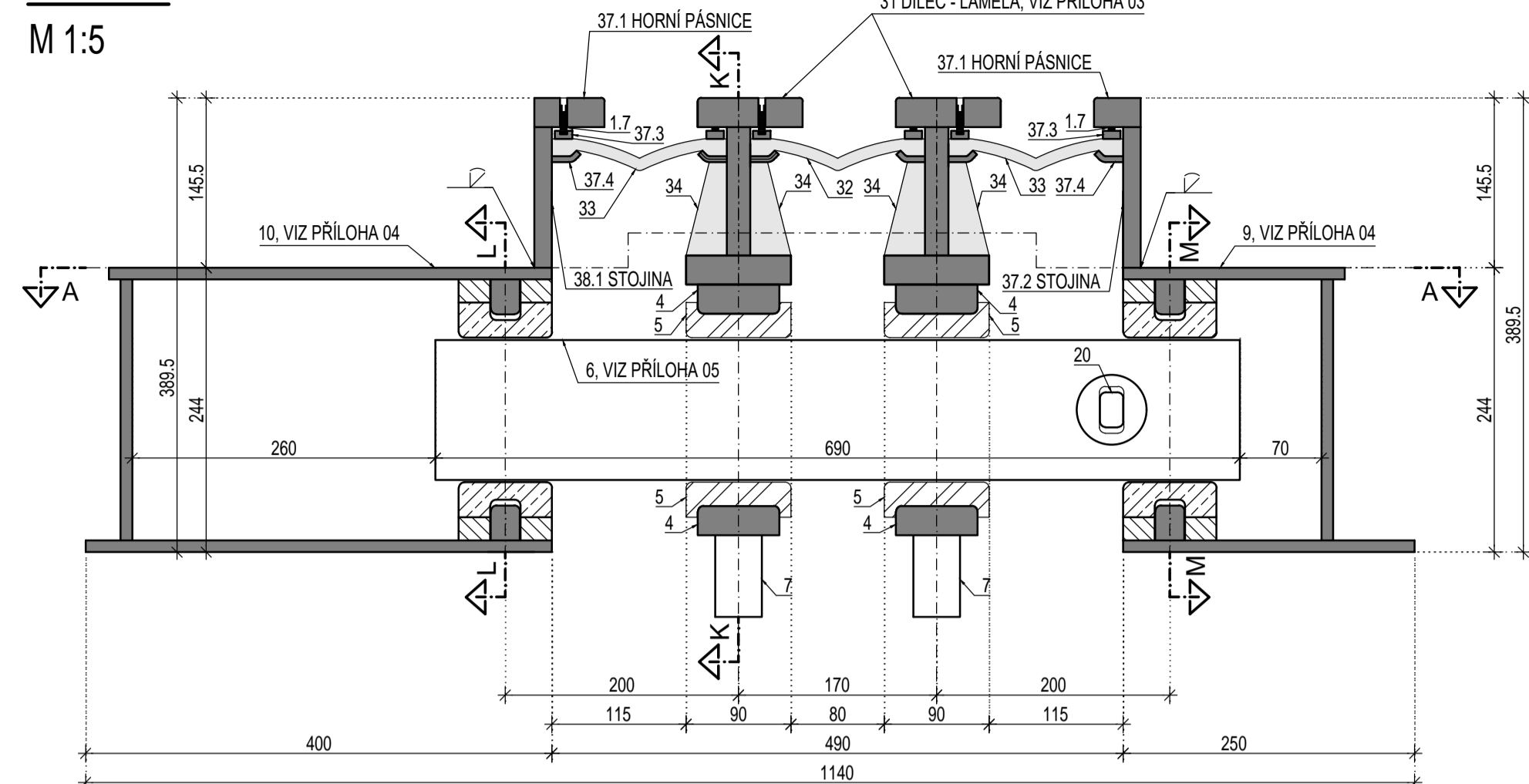
POČET FORMÁTŮ  
3 x A4

ČÍSLO PŘÍLOHY

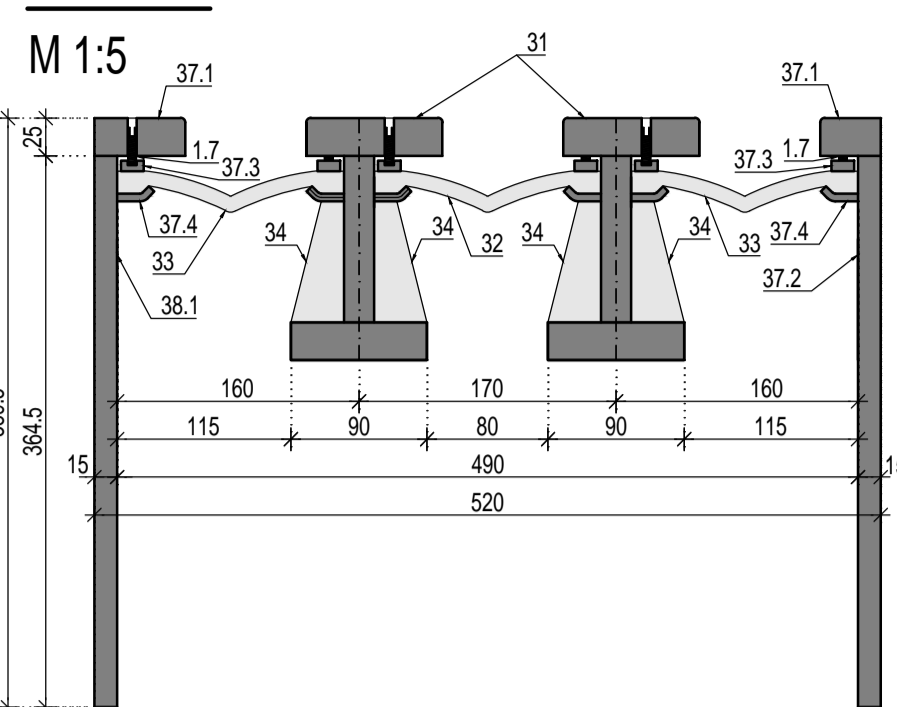
01

## PŘÍČNÉ ŘEZY M 1:5

ŘEZ C-C: MAXIMÁLNÍ SPÁRA V MÍSTĚ KRABICE

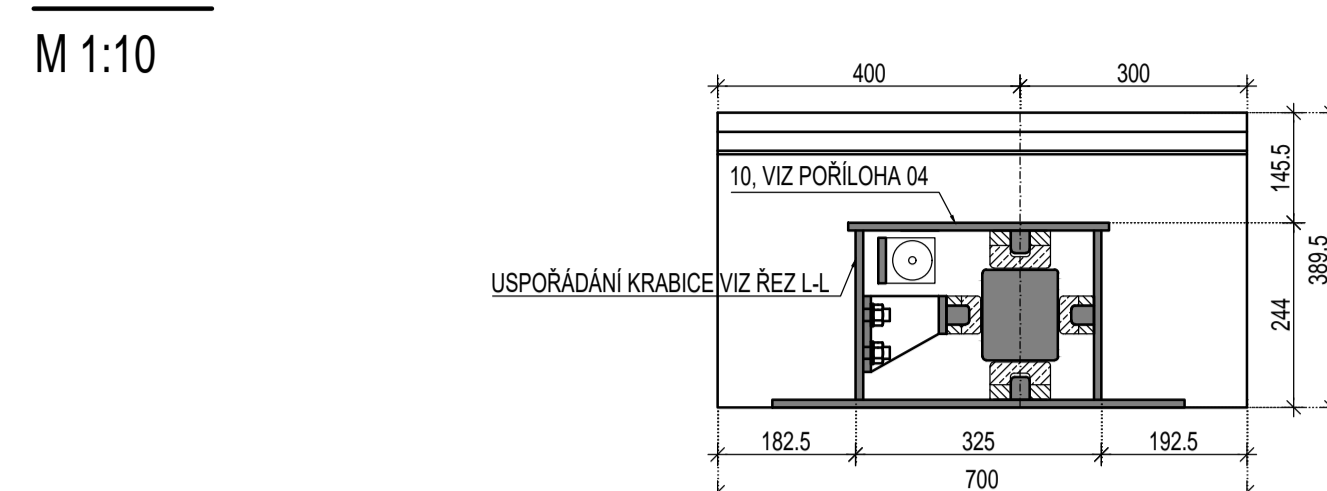


ŘEZ D-D: MAXIMÁLNÍ SPÁRA V POLI

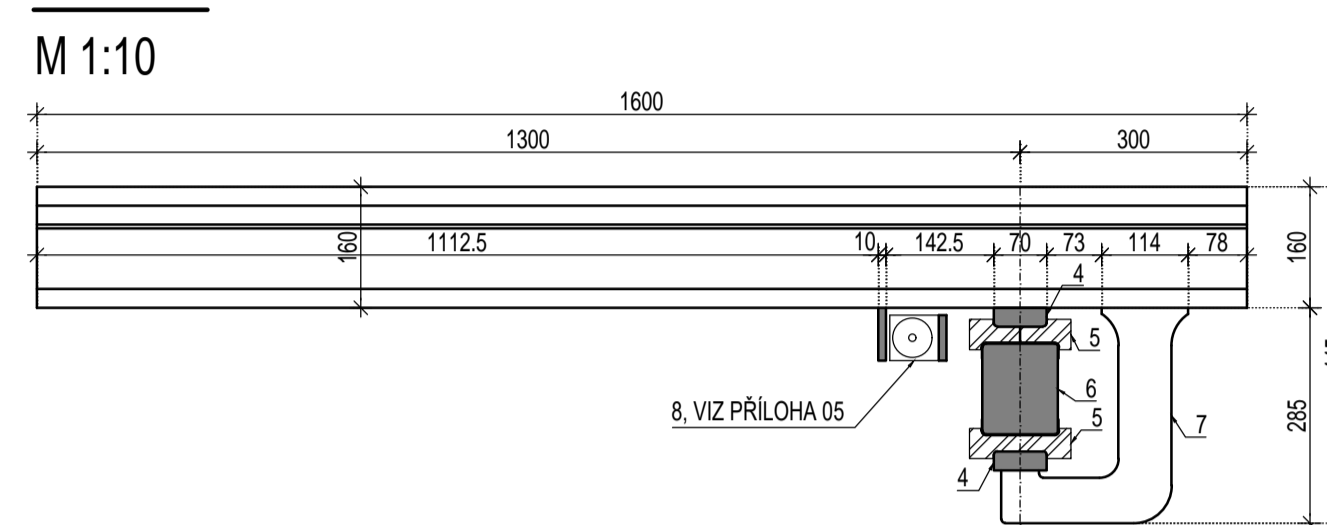


## PODÉLNÉ ŘEZY M 1:10

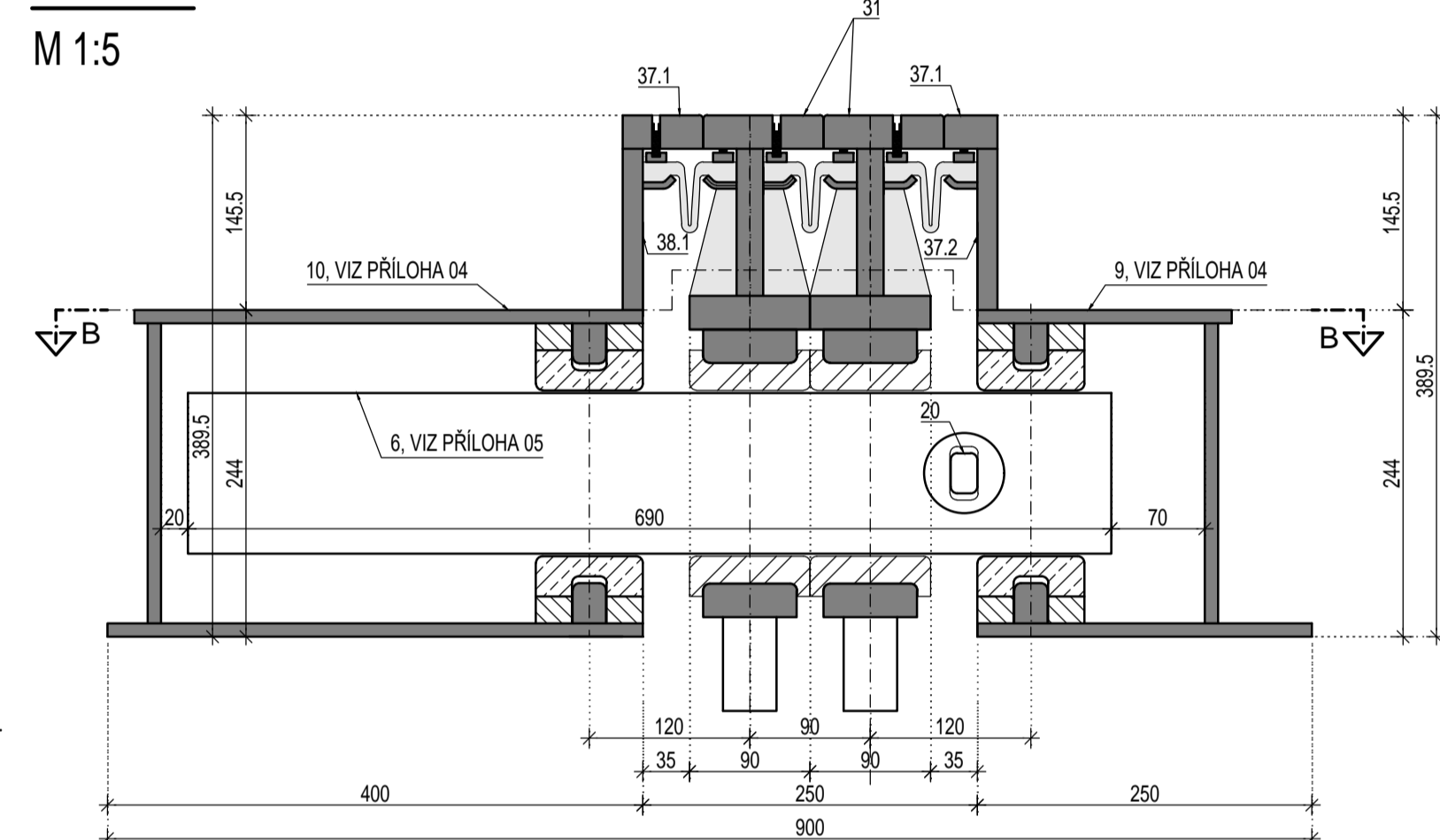
ŘEZ E-E: PODÉLNÝ ŘEZ V MÍSTĚ POSUVNÉ KRABICE



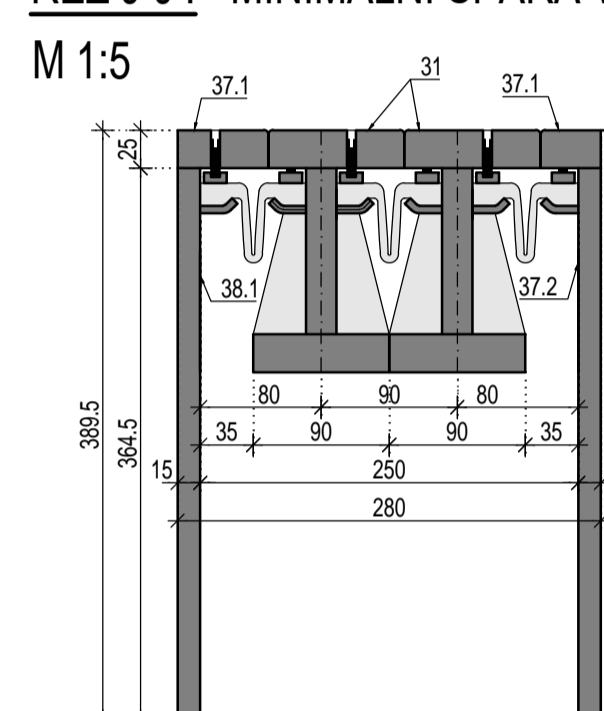
ŘEZ F-F: PODÉLNÝ ŘEZ LAMELOU



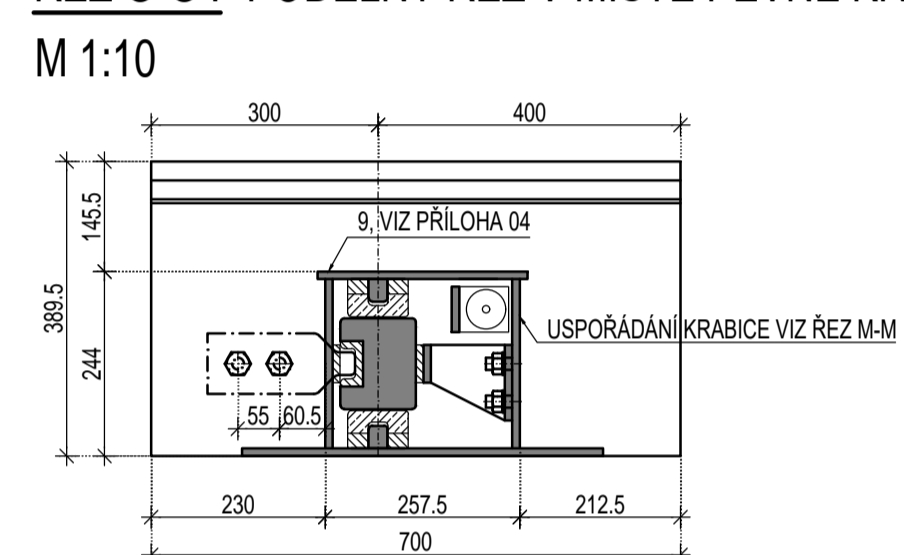
ŘEZ H-H: MINIMÁLNÍ SPÁRA V MÍSTĚ KRABICE



ŘEZ J-J: MINIMÁLNÍ SPÁRA V POLI

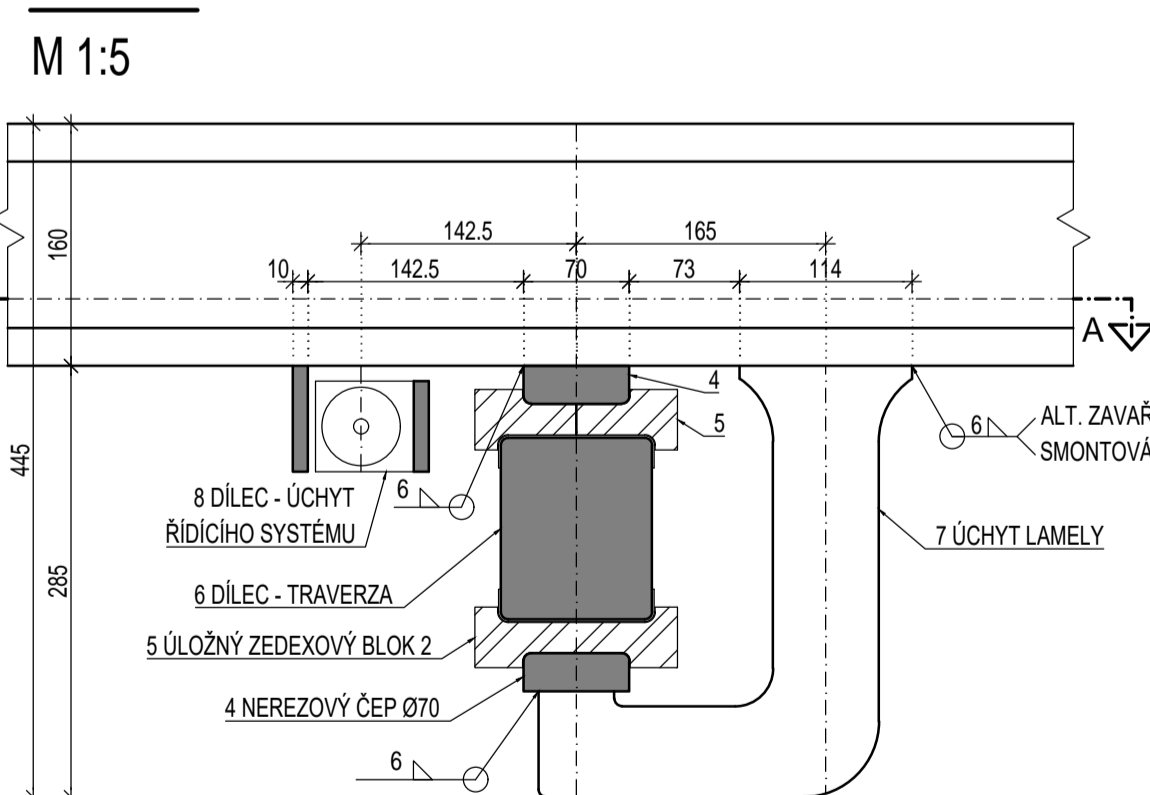


ŘEZ G-G: PODÉLNÝ ŘEZ V MÍSTĚ PEVNÉ KRABICE

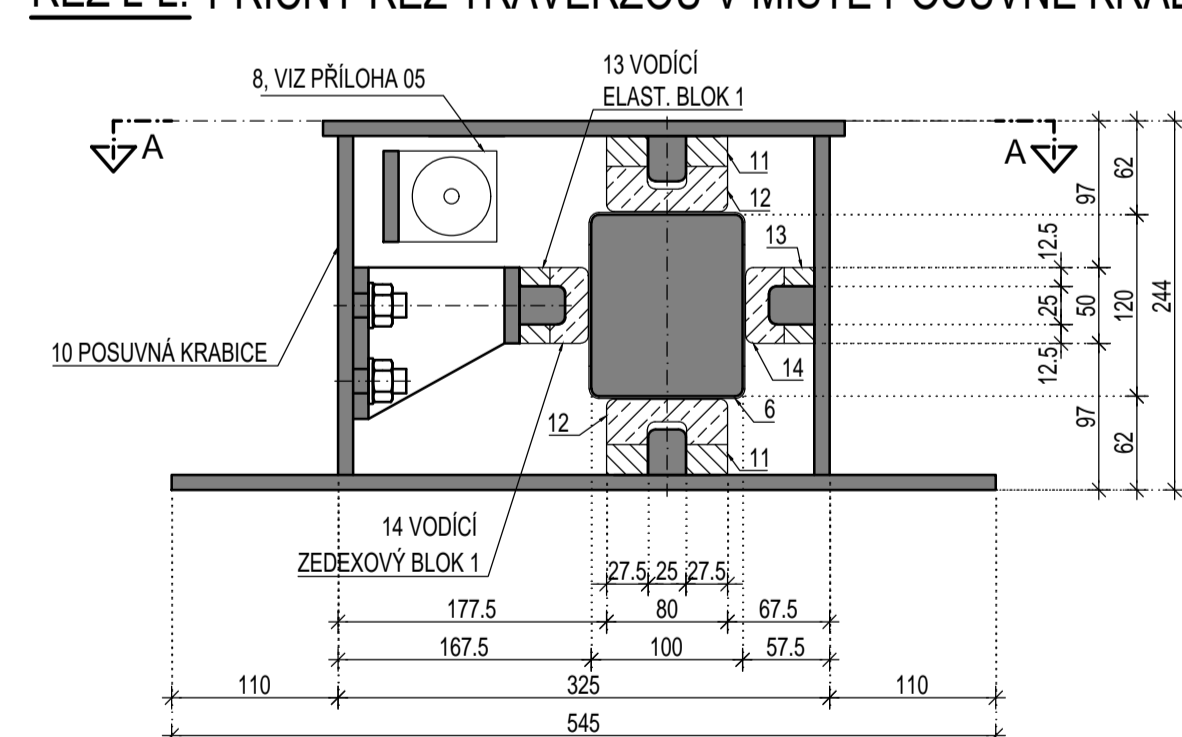


## PŘÍČNÉ ŘEZY TRAVERZOU M 1:5

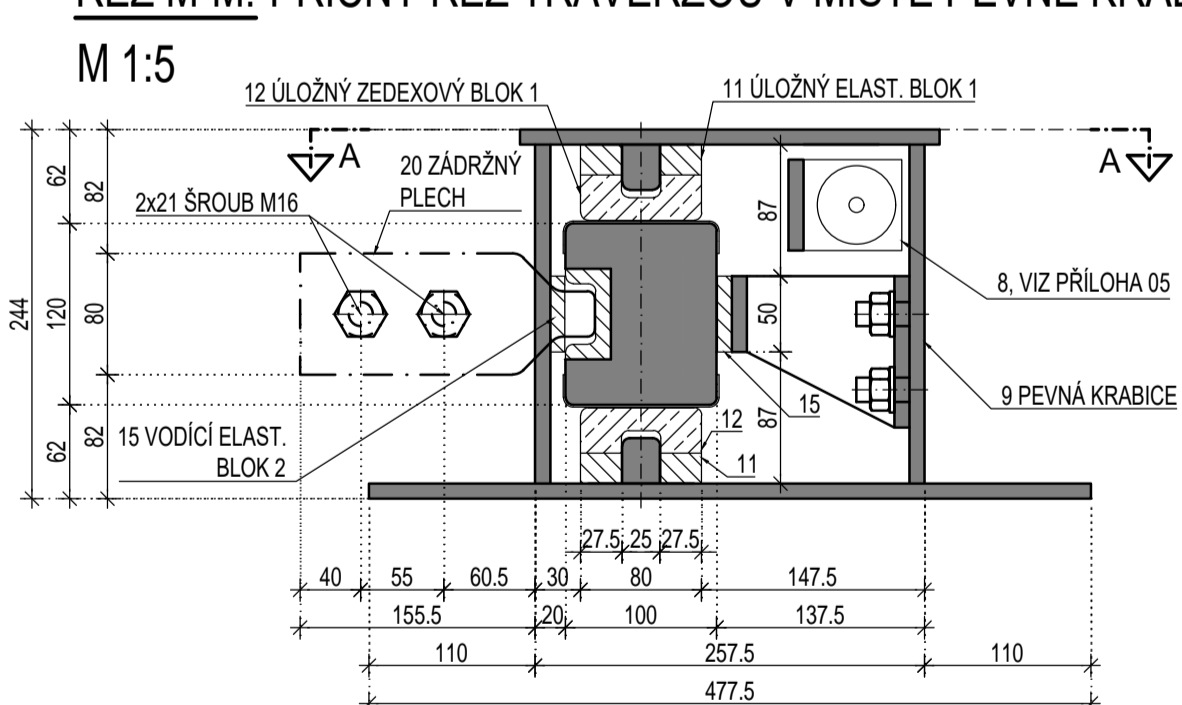
ŘEZ K-K: PŘÍČNÝ ŘEZ TRAVERZOU V POLI



ŘEZ L-L: PŘÍČNÝ ŘEZ TRAVERZOU V MÍSTĚ POSUVNÉ KRABICE



ŘEZ M-M: PŘÍČNÝ ŘEZ TRAVERZOU V MÍSTĚ PEVNÉ KRABICE



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STAVEBNÍ - KATEDRA OCELOVÝCH A DŘEVĚNÝCH KONSTRUKCÍ



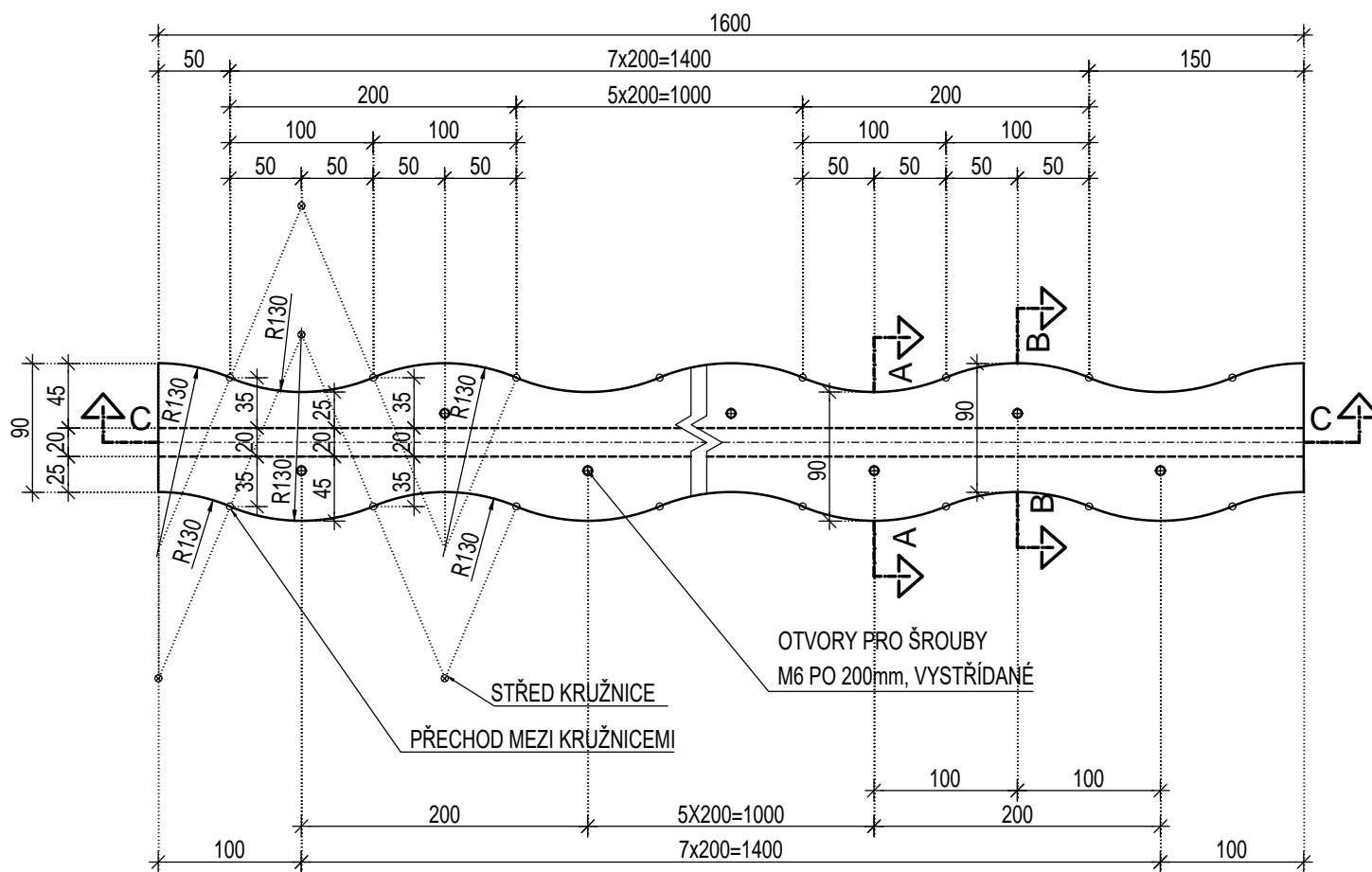
VYPRACOVAL Bc. JIŘÍ KAŠPÁREK	VEDOUCÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE doc. Ing. PAVEL RYJÁČEK, Ph.D.	MĚŘÍTKO 1:5, 1:10
TEMA DIPLOMOVÉ PRÁCE PROGRESIVNÍ MOSTNÍ ZÁVĚR S INTELIGENTNÍMI PRVKY		DATUM LEDEN 2017
SEGMENT MZ PRO LABORATORNÍ ZKOUŠKU		POČET FORMÁTŮ 8 x A4
OBSAH PŘÍLOHY PŘÍČNÉ A PODÉLNÉ ŘEZY		ČÍSLO PŘÍLOHY 02



# DETAIL LAMELY M 1:1, M 1:5

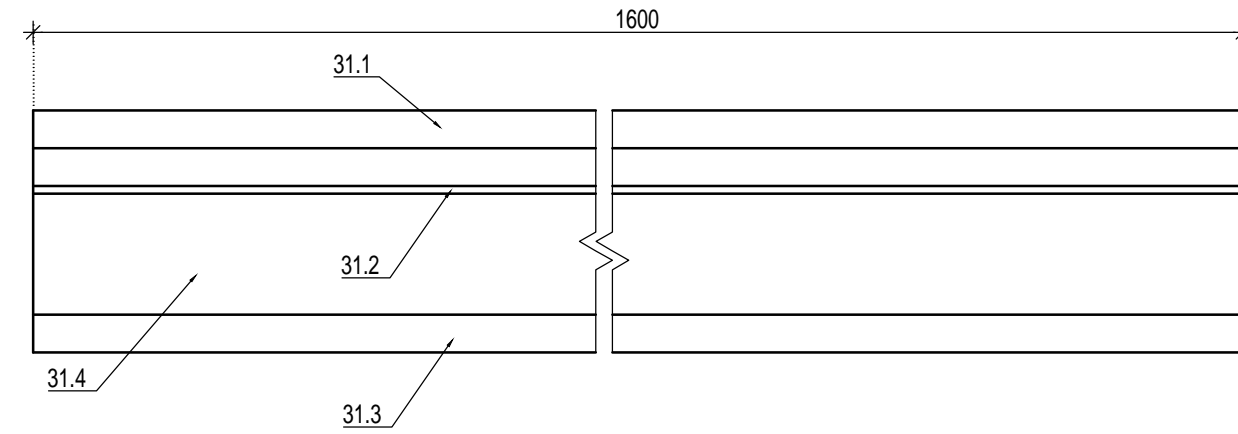
## PŮDORYS HORNÍ PÁSNICE:

M 1:5



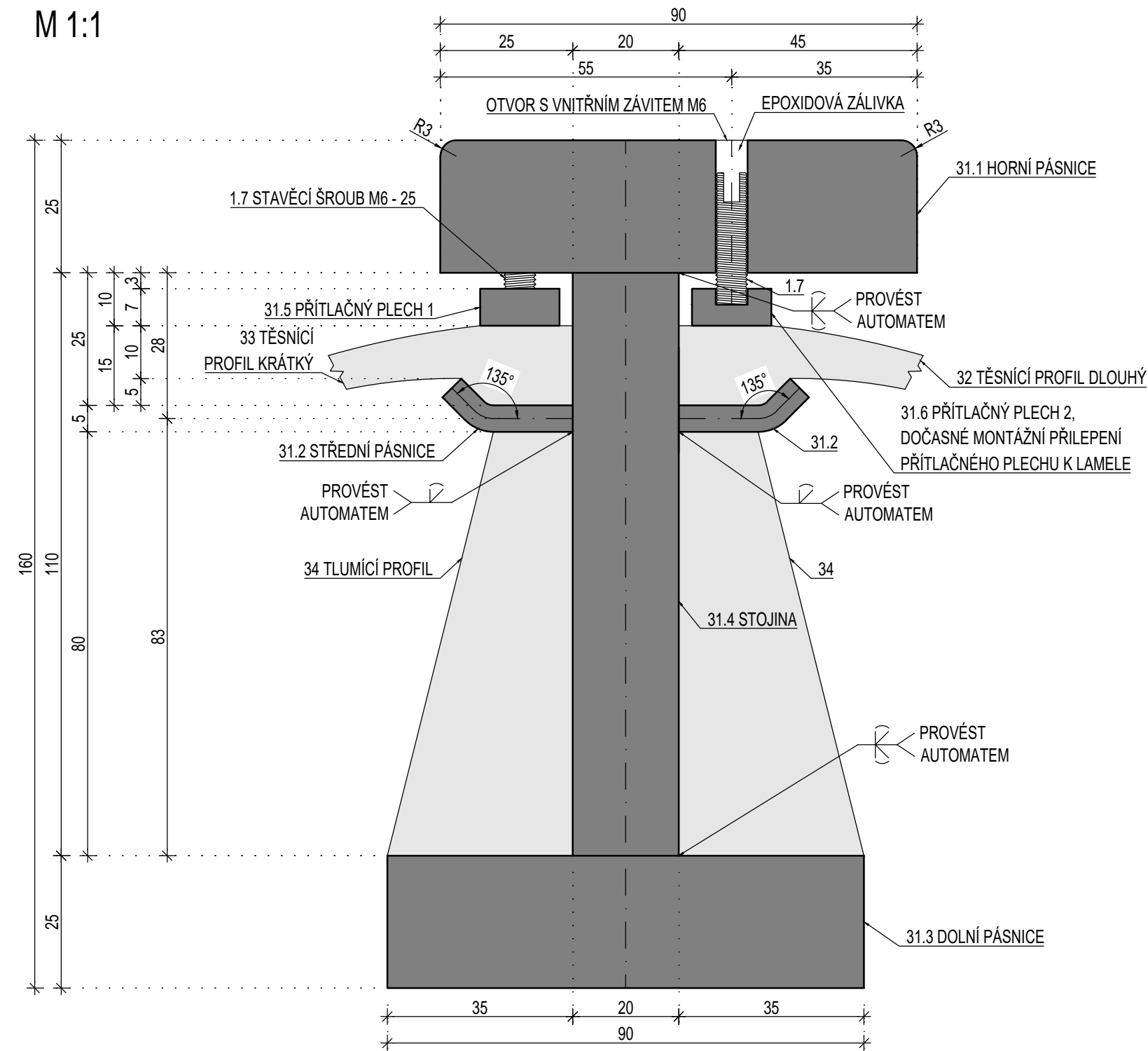
## ŘEZ C-C: PODÉLNÝ ŘEZ

M 1:5



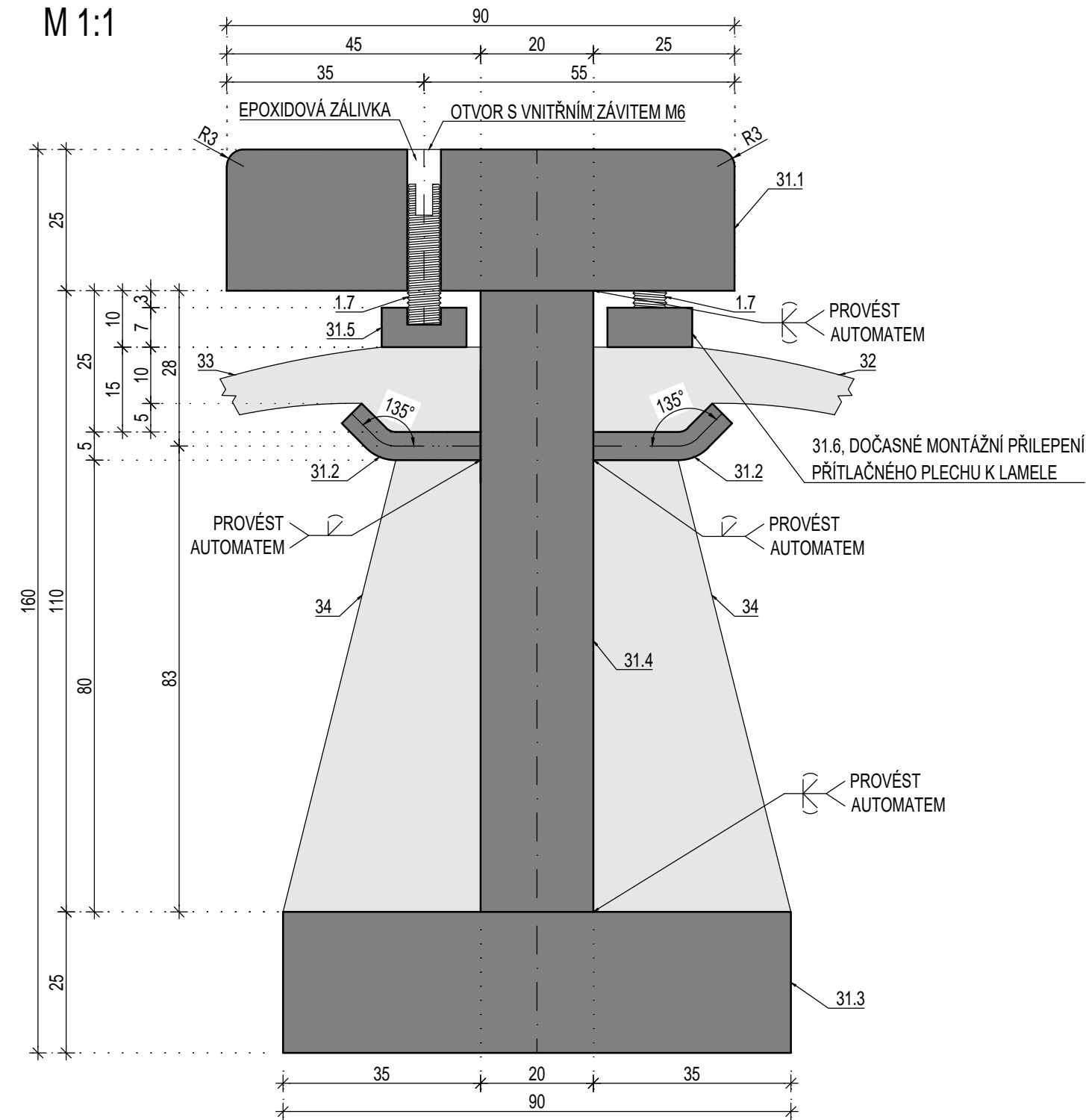
## ŘEZ A-A: PŘÍČNÝ ŘEZ

M 1:1



## ŘEZ B-B: PŘÍČNÝ ŘEZ

M 1:1



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STAVEBNÍ - KATEDRA OCELOVÝCH A DŘEVĚNÝCH KONSTRUKCÍ



VYPRACOVAL  
Bc. JIŘÍ KAŠPÁREK

VEDOUcí DIPLOMOVÉ PRÁCE  
doc. Ing. PAVEL RYJÁČEK, Ph.D.

TÉMA DIPLOMOVÉ PRÁCE  
PROGRESIVNÍ MOSTNÍ ZÁVĚR S INTELIGENTNÍMI PRVKY

MĚŘÍTKO  
1:1, 1:5

SEGMENT MZ PRO LABORATORNÍ ZKOUŠKU

DATUM  
LEDEN 2017

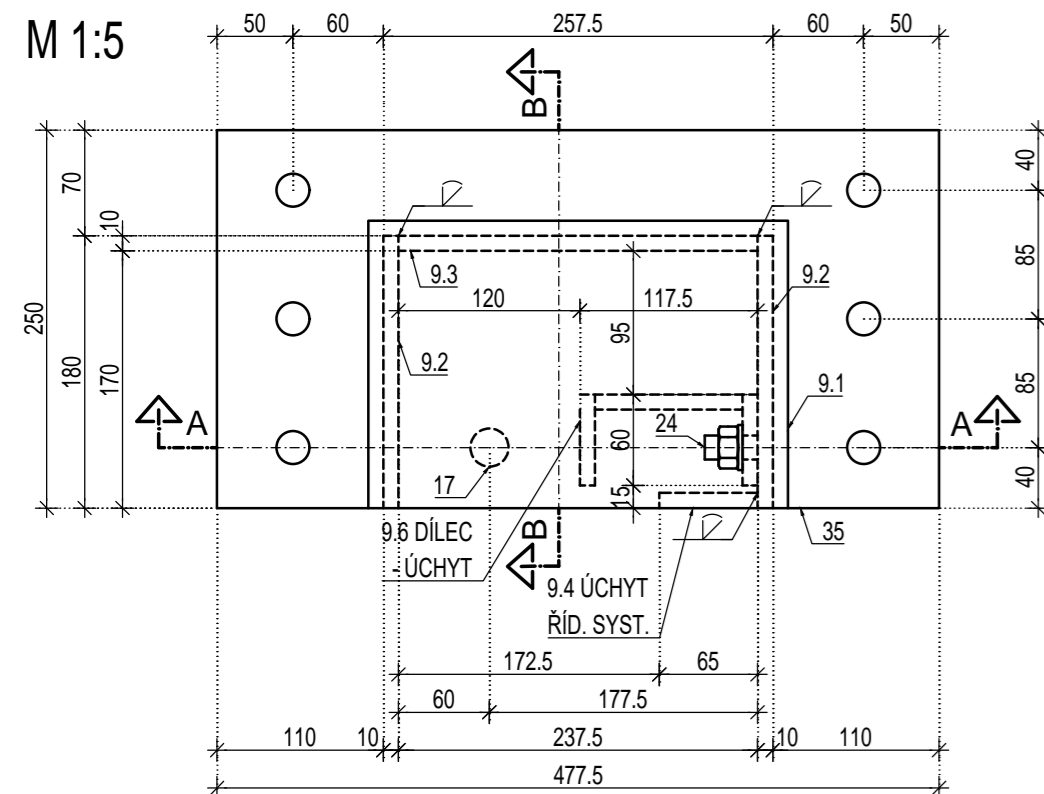
OBSAH PŘÍLOHY  
DETAIL LAMELY

POČET FORMÁTŮ  
4 x A4

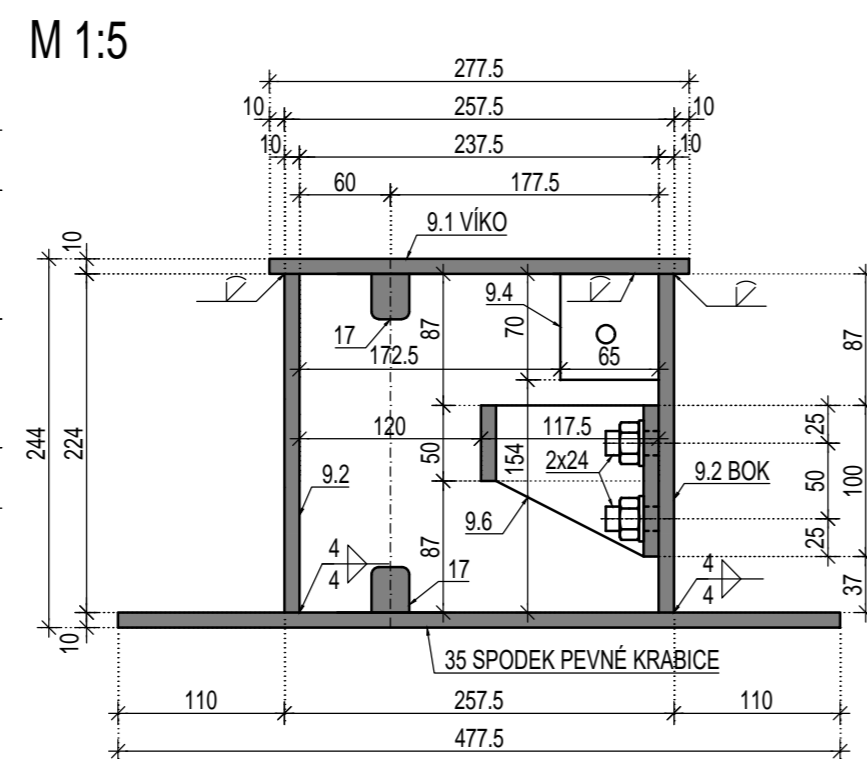
ČÍSLO PŘÍLOHY  
03

# DETAILY OCELOVÝCH KONSTRUKCÍ KRABIC M 1:5

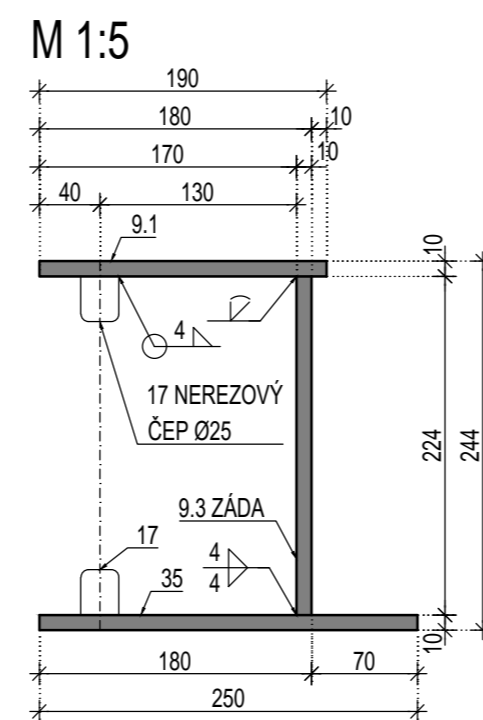
**PŮDORYS: PEVNÁ KRABICE**



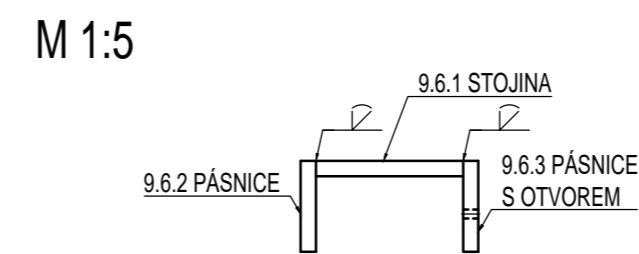
**ŘEZ A-A: PŘÍČNÝ ŘEZ**



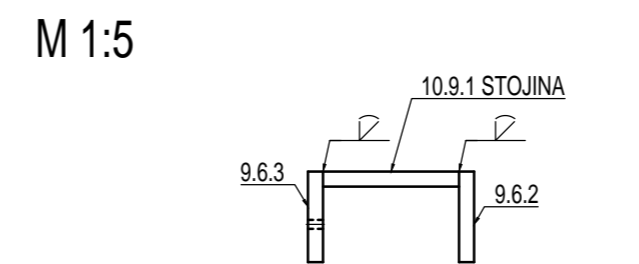
**ŘEZ B-B: PODÉLNÝ ŘEZ**



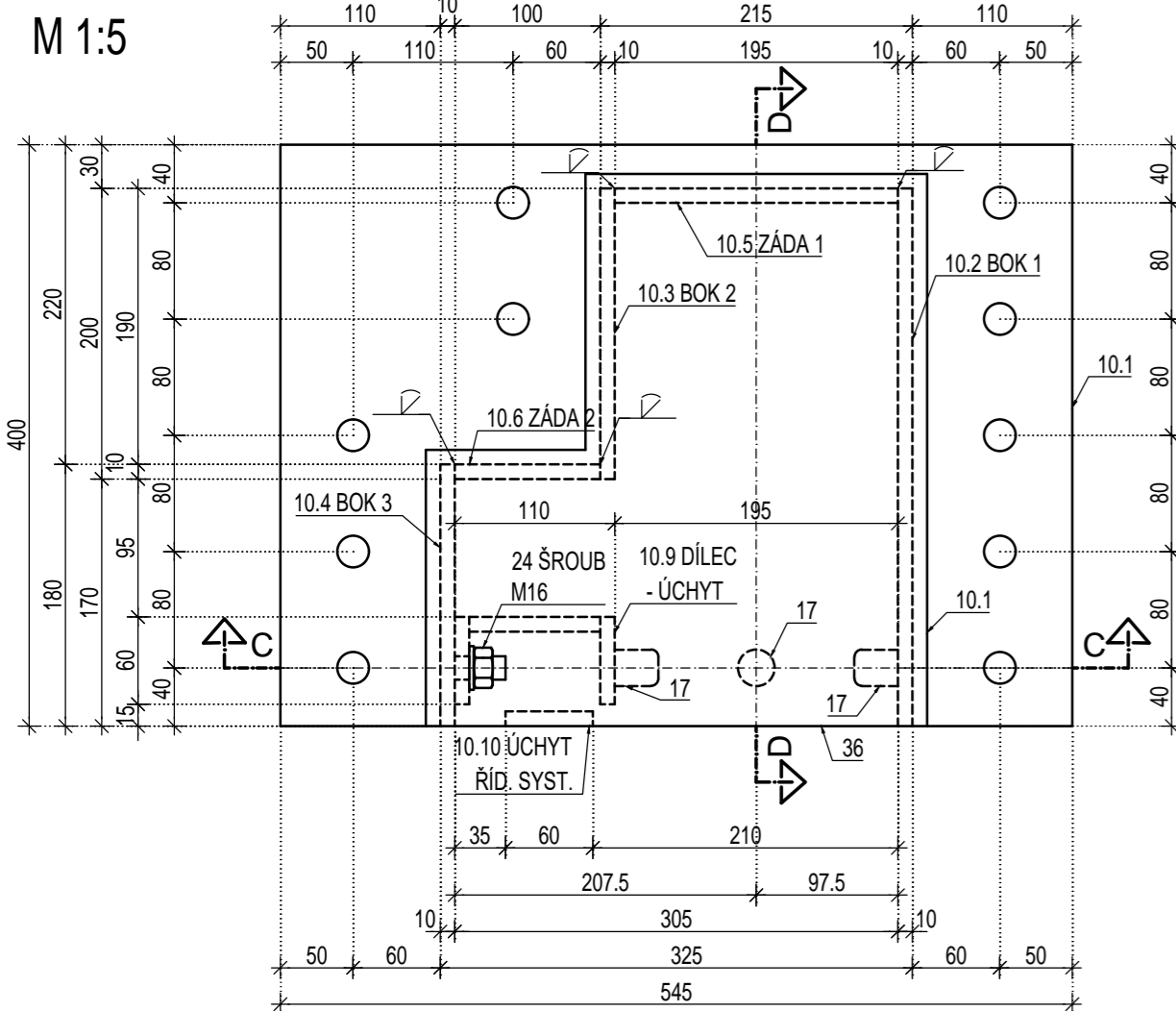
**PŮDORYS: SKLADBA DÍLCE 9.6**



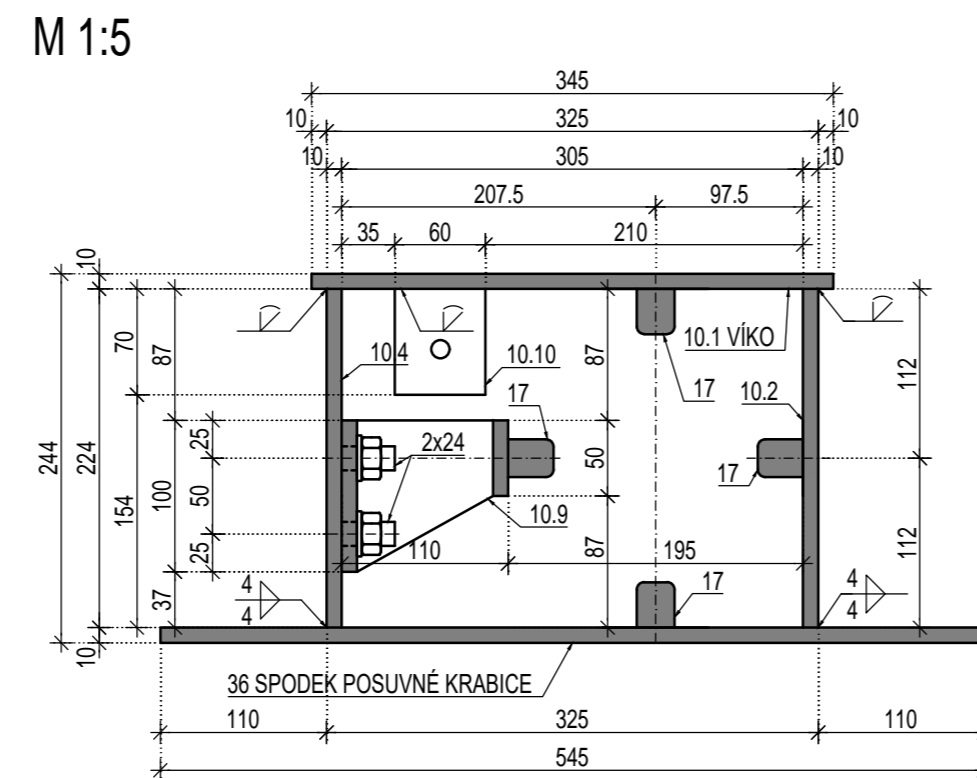
**PŮDORYS: SKLADBA DÍLCE 10.9**



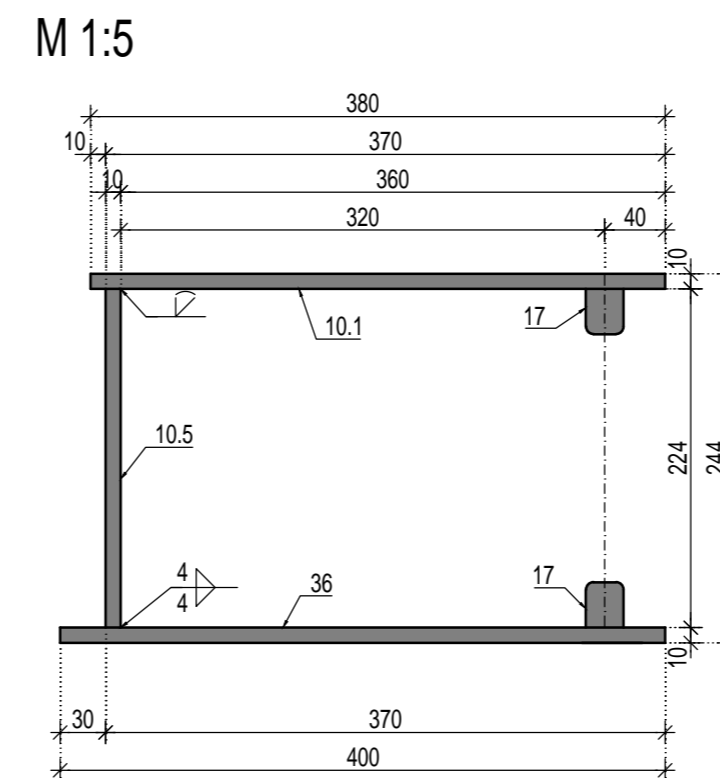
**PŮDORYS: POSUVNÁ KRABICE**



**ŘEZ C-C: PŘÍČNÝ ŘEZ**



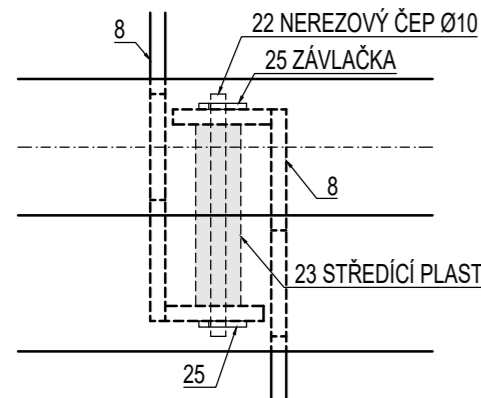
**ŘEZ D-D: PODÉLNÝ ŘEZ**



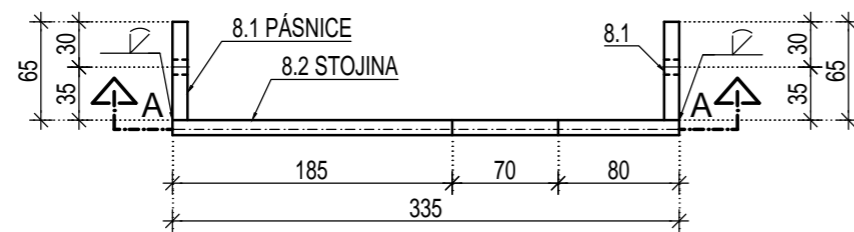
<b>ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE</b> FAKULTA STAVEBNÍ - KATEDRA OCELOVÝCH A DŘEVĚNÝCH KONSTRUKCÍ			
VYPRACOVAL Bc. JIŘÍ KAŠPÁREK		VEDOUCÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE doc. Ing. PAVEL RYJÁČEK, Ph.D.	
TÉMA DIPLOMOVÉ PRÁCE <b>PROGRESIVNÍ MOSTNÍ ZÁVĚR S INTELIGENTNÍMI PRVKY</b>		MĚŘÍTKO 1:5	DATUM LEDEN 2017
<b>SEGMENT MZ PRO LABORATORNÍ ZKOUŠKU</b>		POČET FORMÁTŮ 3 x A4	ČÍSLO PŘÍLOHY <b>04</b>
OBSAH PŘÍLOHY <b>DETAILY OCELOVÝ KONSTRUKCÍ KRABIC</b>			

# DETAIL ŘÍDÍCÍHO SYSTÉMU M 1:5

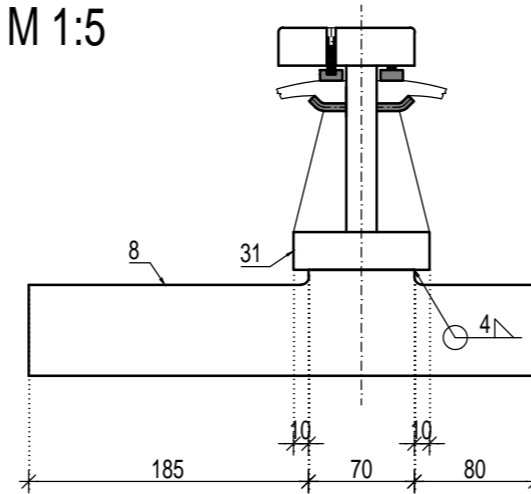
PŮDORYS: PŘÍPOJ NA LAMELY  
M 1:5



PŮDORYS: SKLADBA DÍLCE 8  
M 1:5

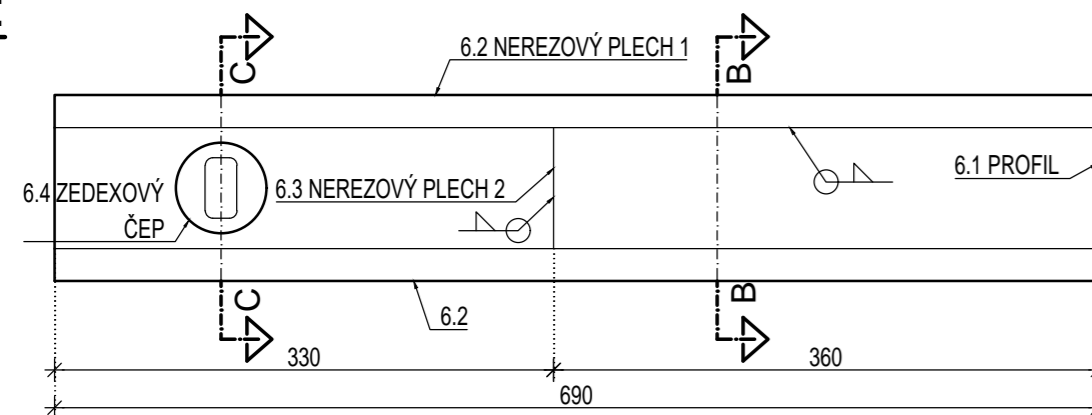


ŘEZ A-A: PŘÍČNÝ ŘEZ PŘÍPOJEM NA LAMELU  
M 1:5

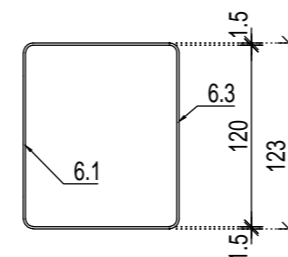


# DETAIL SKLADBY TRAVERZY M 1:5

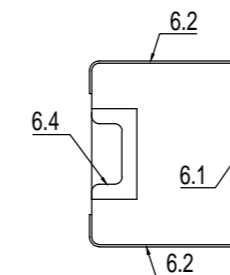
POHLED:  
M 1:5



ŘEZ B-B: PŘÍČNÝ ŘEZ  
M 1:5

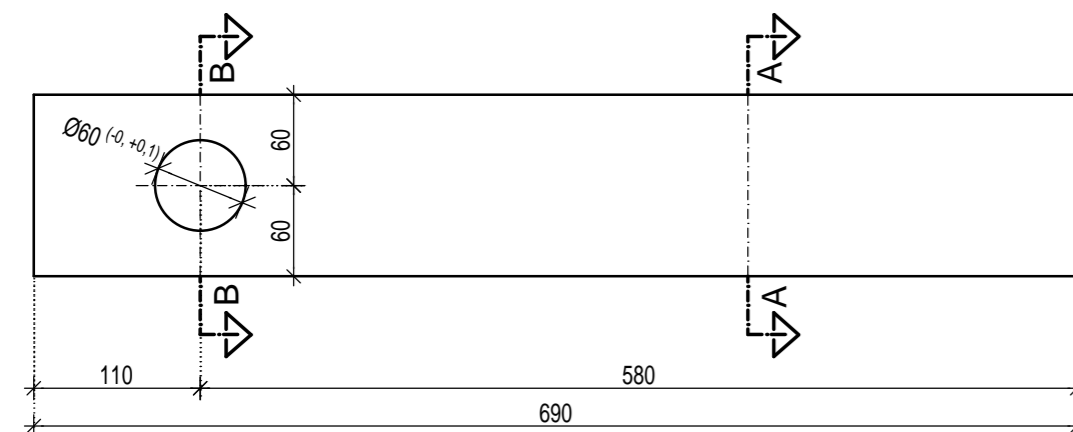


ŘEZ C-C: PŘÍČNÝ ŘEZ  
M 1:5

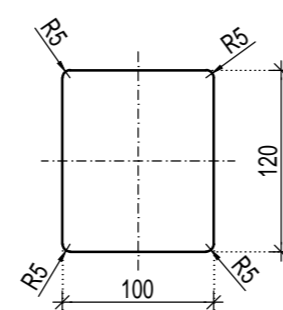


# DETAIL PROFILU TRAVERZY M 1:5

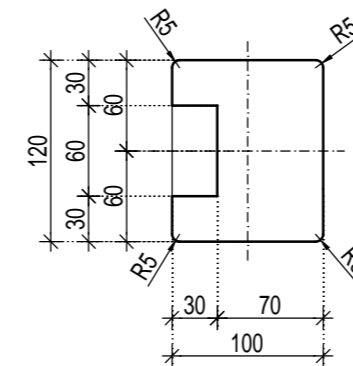
POHLED:  
M 1:5



ŘEZ A-A: PŘÍČNÝ ŘEZ  
M 1:5



ŘEZ B-B: PŘÍČNÝ ŘEZ V MÍSTĚ OTVORU  
M 1:5



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE



FAKULTA STAVEBNÍ - KATEDRA OCELOVÝCH A DŘEVĚNÝCH KONSTRUKCÍ

VYPRACOVAL  
Bc. JIŘÍ KAŠPÁREK

VEDOUcí DIPLOMOVÉ PRÁCE  
doc. Ing. PAVEL RYJÁČEK, Ph.D.

TÉMA DIPLOMOVÉ PRÁCE  
PROGRESIVNÍ MOSTNÍ ZÁVĚR S INTELIGENTNÍMI PRVKY

MĚŘÍTKO  
1:5

SEGMENT MZ PRO LABORATORNÍ ZKOUŠKU

DATUM  
LEDEN 2017

OBSAH PŘÍLOHY  
DETAILY ŘÍDÍCÍHO SYSTÉMU A TRAVERZY

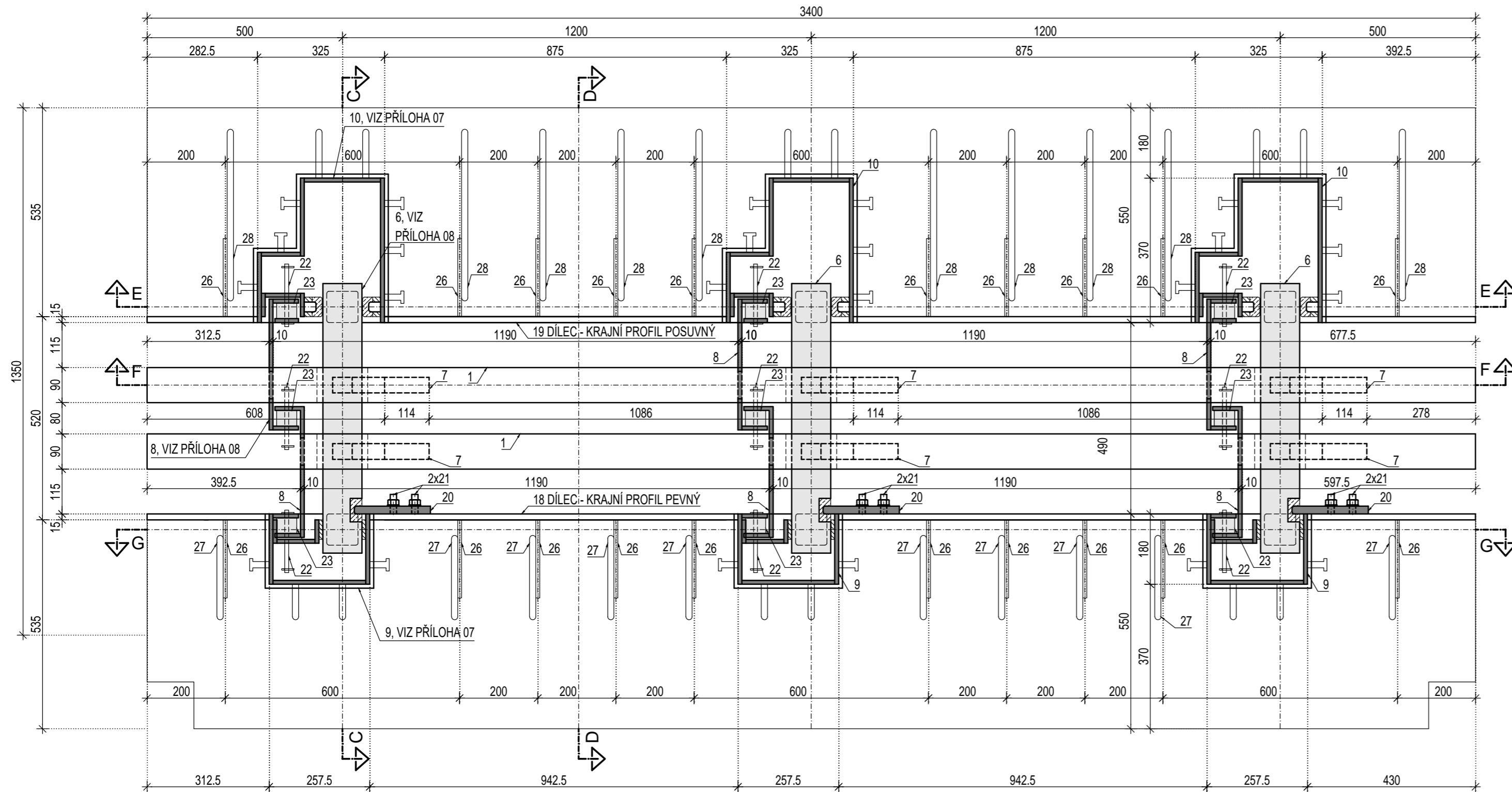
POČET FORMÁTŮ  
3 x A4

ČÍSLO PŘÍLOHY  
05

# PŮDORYSNÝ ŘEZ MAXIMÁLNÍ DILATAČNÍ SPÁROU 1:10

ŘEZ A-A: PŮDORYS MAXIMÁLNÍ DILATAČNÍ SPÁRY

M 1:10

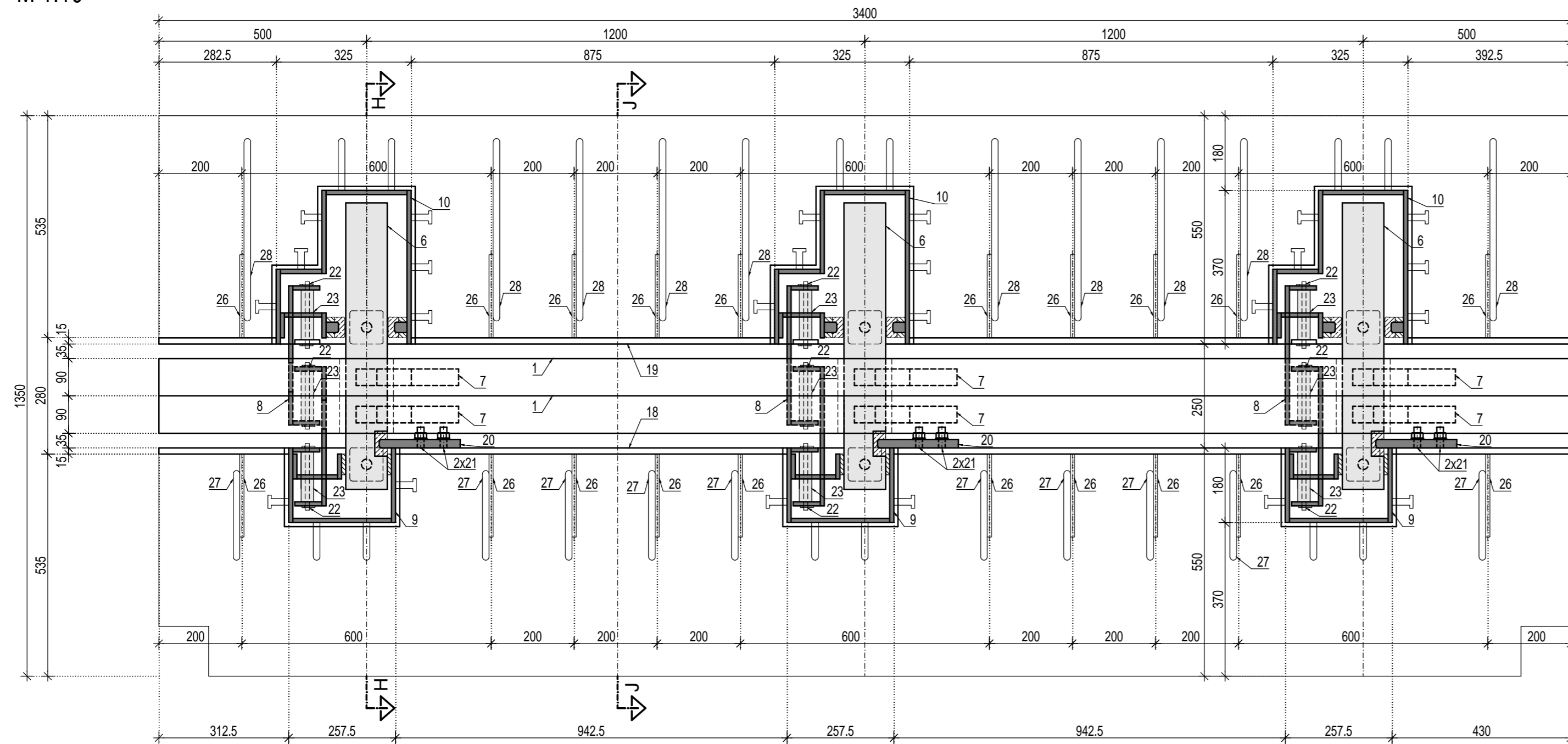


<b>ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE</b> FAKULTA STAVEBNÍ - KATEDRA OCELOVÝCH A DŘEVĚNÝCH KONSTRUKCÍ			
VYPRACOVAL Bc. JIŘÍ KAŠPÁREK		VEDOUCÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE doc. Ing. PAVEL RYJÁČEK, Ph.D.	
TÉMA DIPLOMOVÉ PRÁCE <b>PROGRESIVNÍ MOSTNÍ ZÁVĚR S INTELIGENTNÍMI PRVKY</b>		MĚŘÍTKO 1:10	DATUM LEDEN 2017
<b>SEGMENT MZ PRO ZKUŠEBNÍ STAND</b>		POČET FORMÁTŮ 3 x A4	
OBSAH PŘÍLOHY <b>PŮDORYSNÝ ŘEZ MAXIMÁLNÍ DILATAČNÍ SPÁROU</b>		ČÍSLO PŘÍLOHY <b>01</b>	

# PŮDORYSNÝ ŘEZ MINIMÁLNÍ DILATAČNÍ SPÁROU M 1:10

ŘEZ B-B: PŮDORYS MINIMÁLNÍ DILATAČNÍ SPÁRY

M 1:10

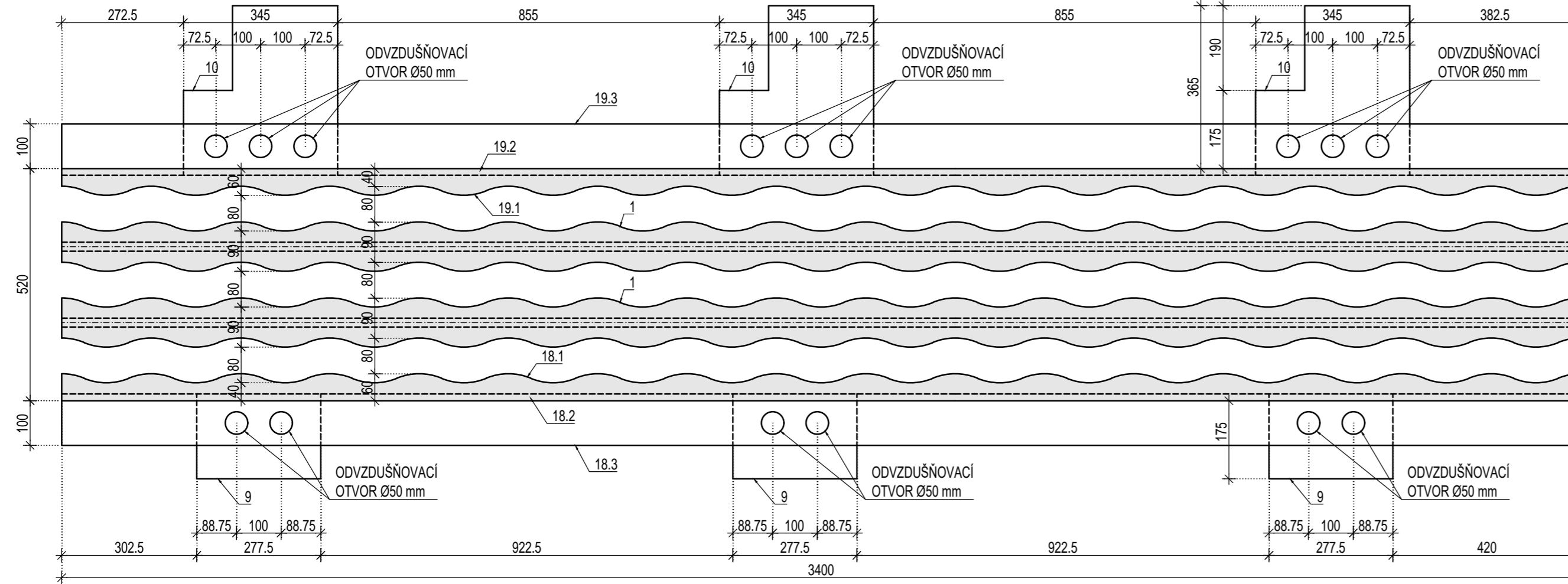


<b>ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE</b> FAKULTA STAVEBNÍ - KATEDRA OCELOVÝCH A DŘEVĚNÝCH KONSTRUKCÍ			
VYPRACOVAL Bc. JIŘÍ KAŠPÁREK		VEDOUCÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE doc. Ing. PAVEL RYJÁČEK, Ph.D.	
TÉMA DIPLOMOVÉ PRÁCE PROGRESIVNÍ MOSTNÍ ZÁVĚR S INTELIGENTNÍMI PRVKY		MĚŘÍTKO 1:10	DATUM LEDEN 2017
SEGMENT MZ PRO ZKUŠEBNÍ STAND		POČET FORMÁTŮ 3 x A4	ČÍSLO PŘÍLOHY 02
OBSAH PŘÍLOHY PŮDORYSNÝ ŘEZ MINIMÁLNÍ DILATAČNÍ SPÁROU			

# PŮDORYS M 1:10

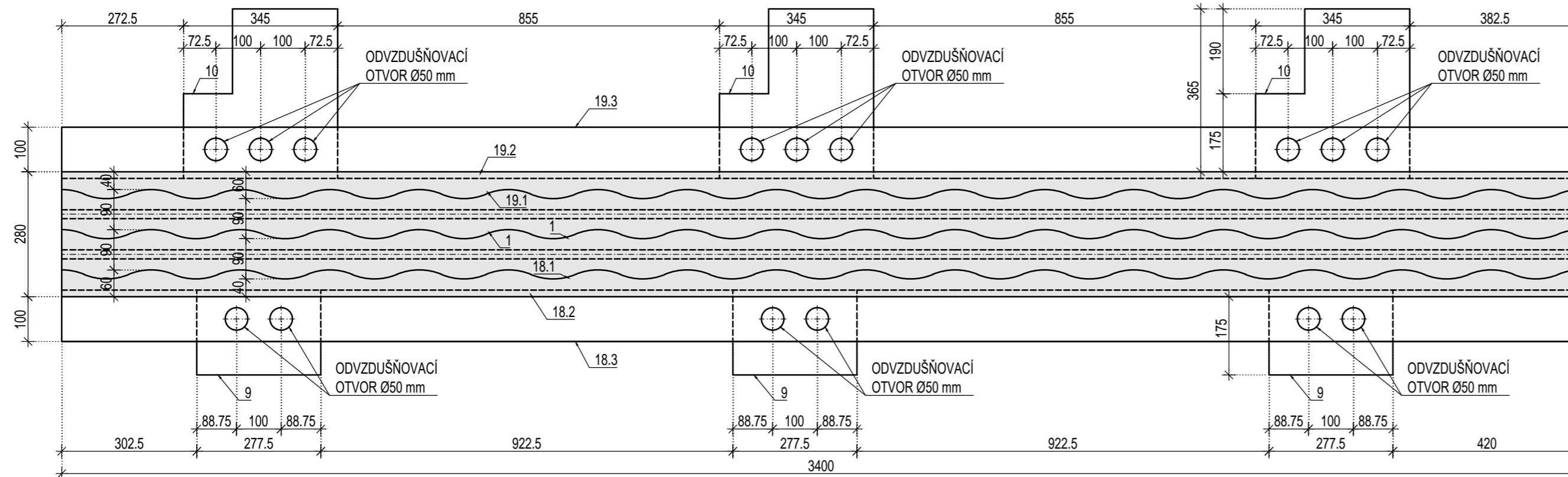
## PŮDORYS: MAXIMÁLNÍ DILATAČNÍ SPÁRA

M 1:10



## PŮDORYS: MINIMÁLNÍ DILATAČNÍ SPÁRA

M 1:10



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE



FAKULTA STAVEBNÍ - KATEDRA OCELOVÝCH A DŘEVĚNÝCH KONSTRUKCÍ

VYPRACOVAL  
Bc. JIŘÍ KAŠPÁREK

VEDOUcí DIPLOMOVÉ PRÁCE  
doc. Ing. PAVEL RYJÁČEK, Ph.D.

TÉMA DIPLOMOVÉ PRÁCE  
PROGRESIVNÍ MOSTNÍ ZÁVĚR S INTELIGENTNÍMI PRVKY

MĚŘÍTKO  
1:10

SEGMENT MZ PRO ZKUŠEBNÍ STAND

DATUM  
LEDEN 2017

OBSAH PŘÍLOHY

PŮDORYSY

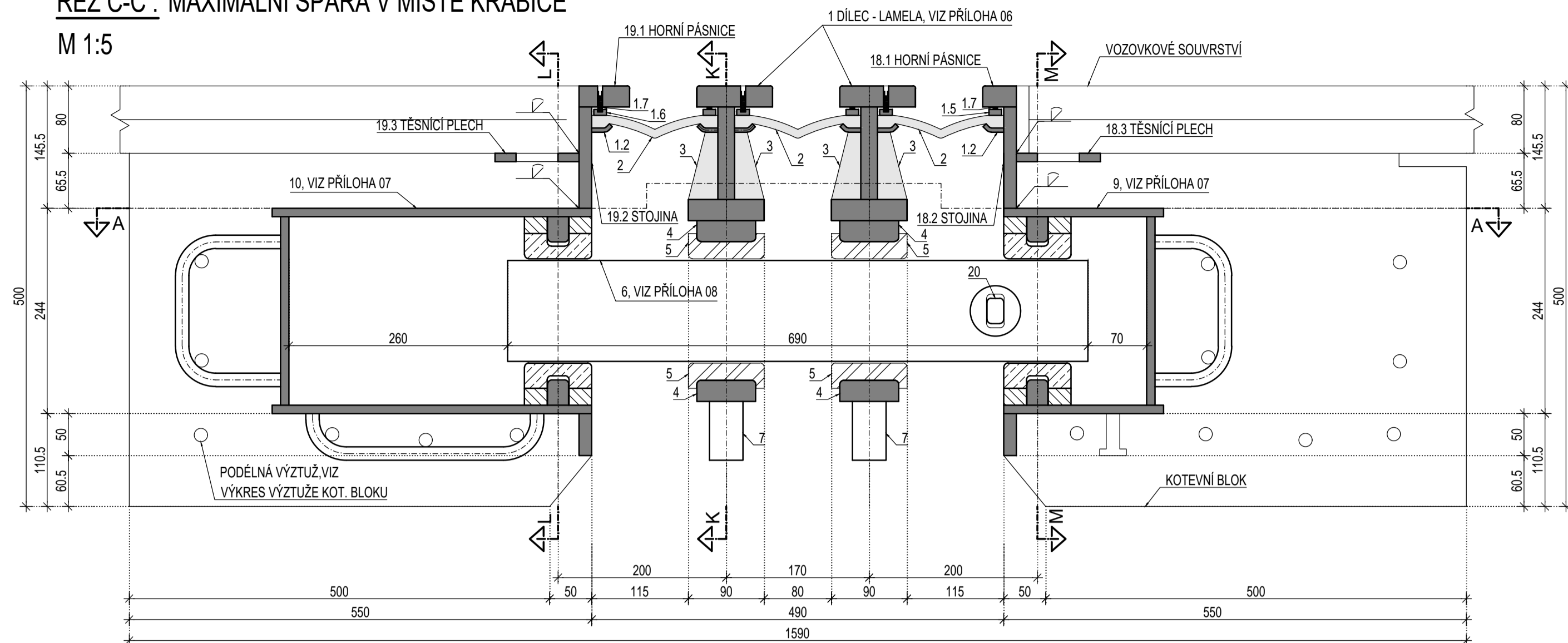
ČÍSLO PŘÍLOHY

03

# PŘÍČNÉ ŘEZY M 1:5

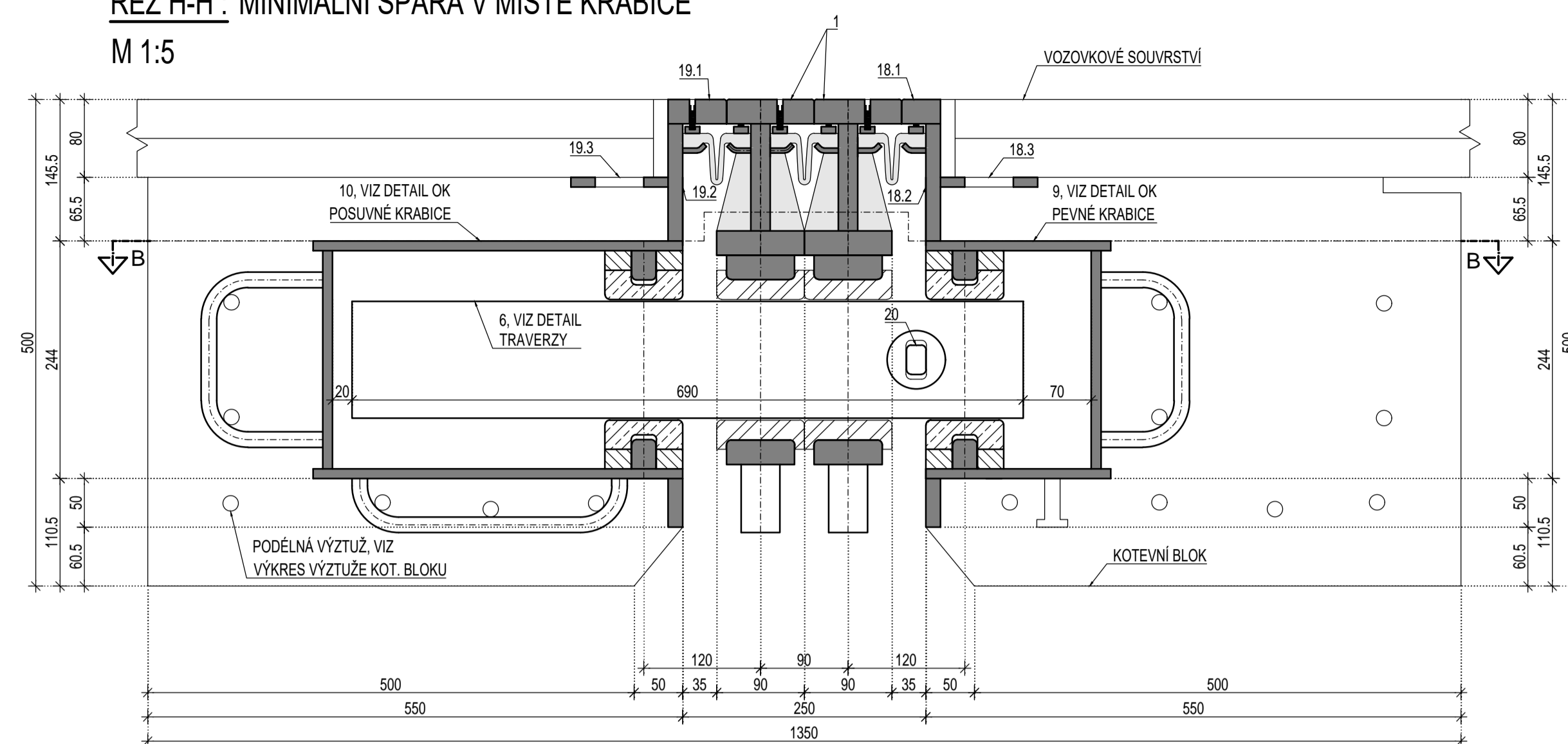
**ŘEZ C-C : MAXIMÁLNÍ SPÁRA V MÍSTĚ KRABICE**

M 1:5



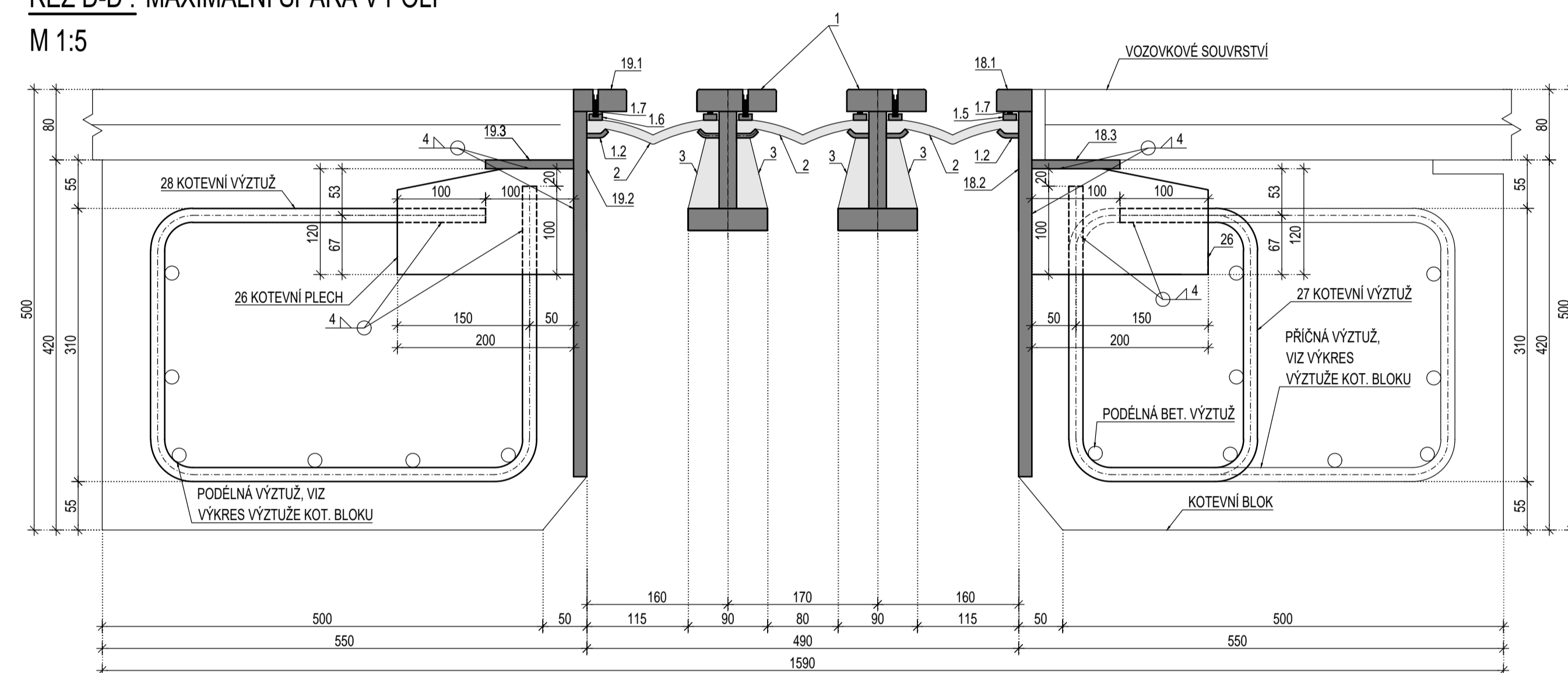
**ŘEZ H-H : MINIMÁLNÍ SPÁRA V MÍSTĚ KRABICE**

M 1:5



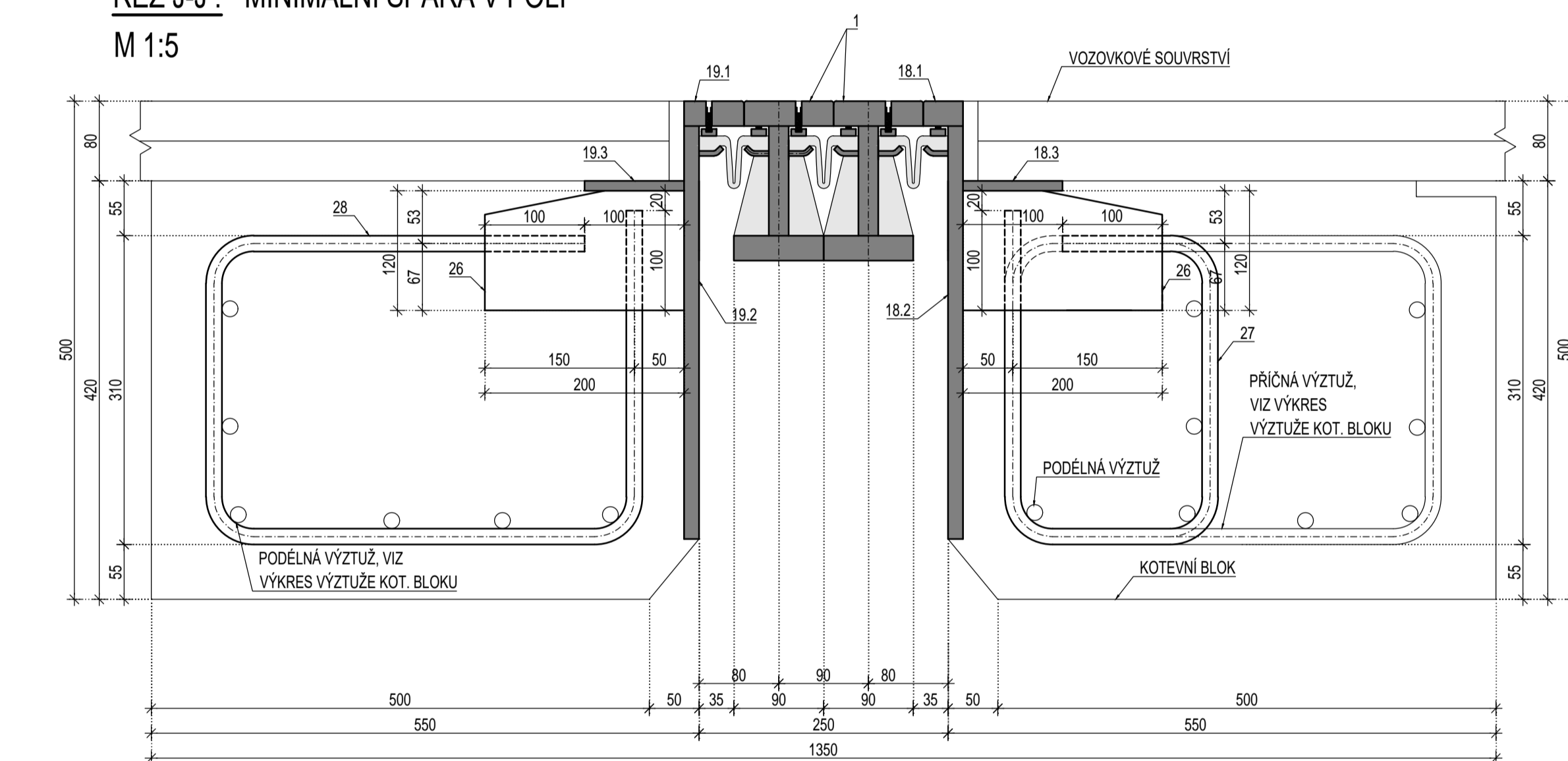
**ŘEZ D-D : MAXIMÁLNÍ SPÁRA V POLI**

M 1:5



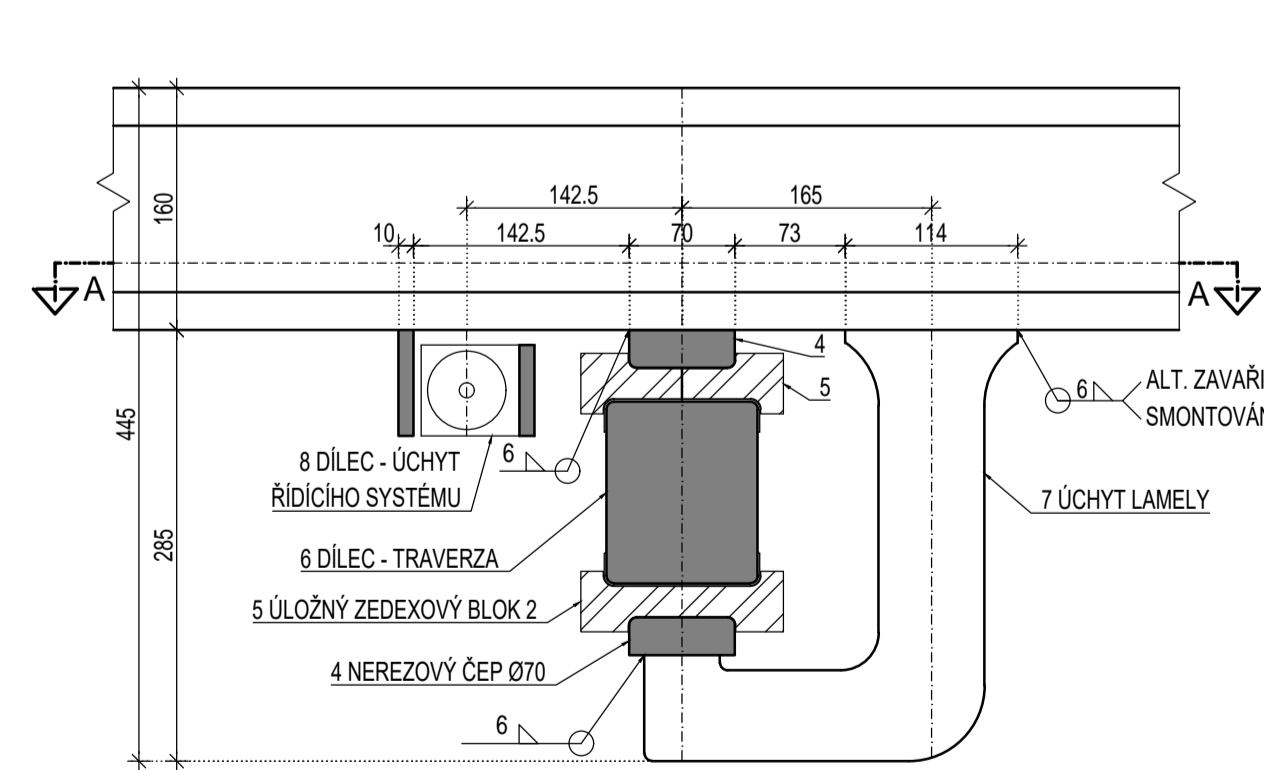
**ŘEZ J-J : MINIMÁLNÍ SPÁRA V POLI**

M 1:5



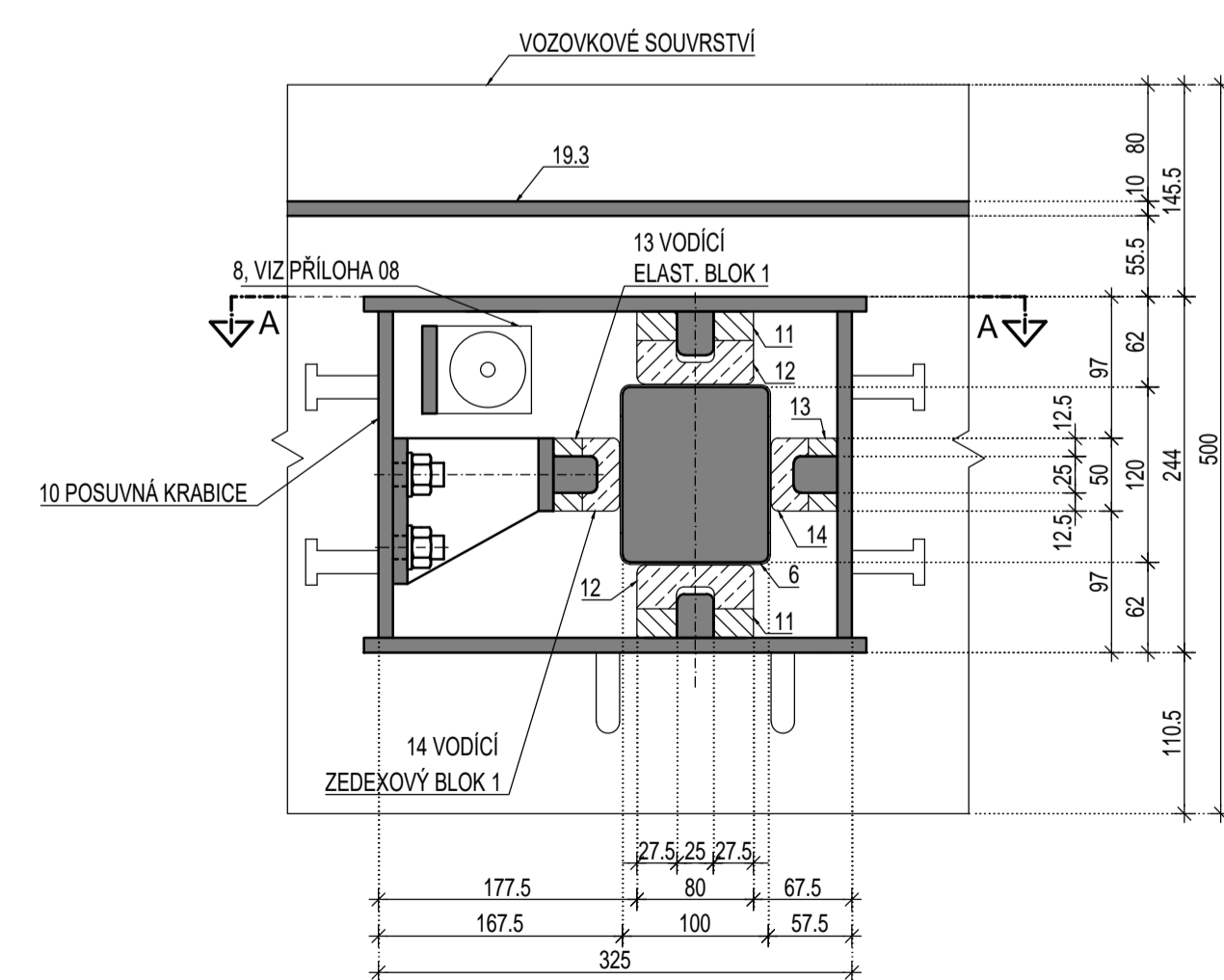
**ŘEZ K-K: PŘÍČNÝ ŘEZ TRAVERZOU V POLI**

M 1:5



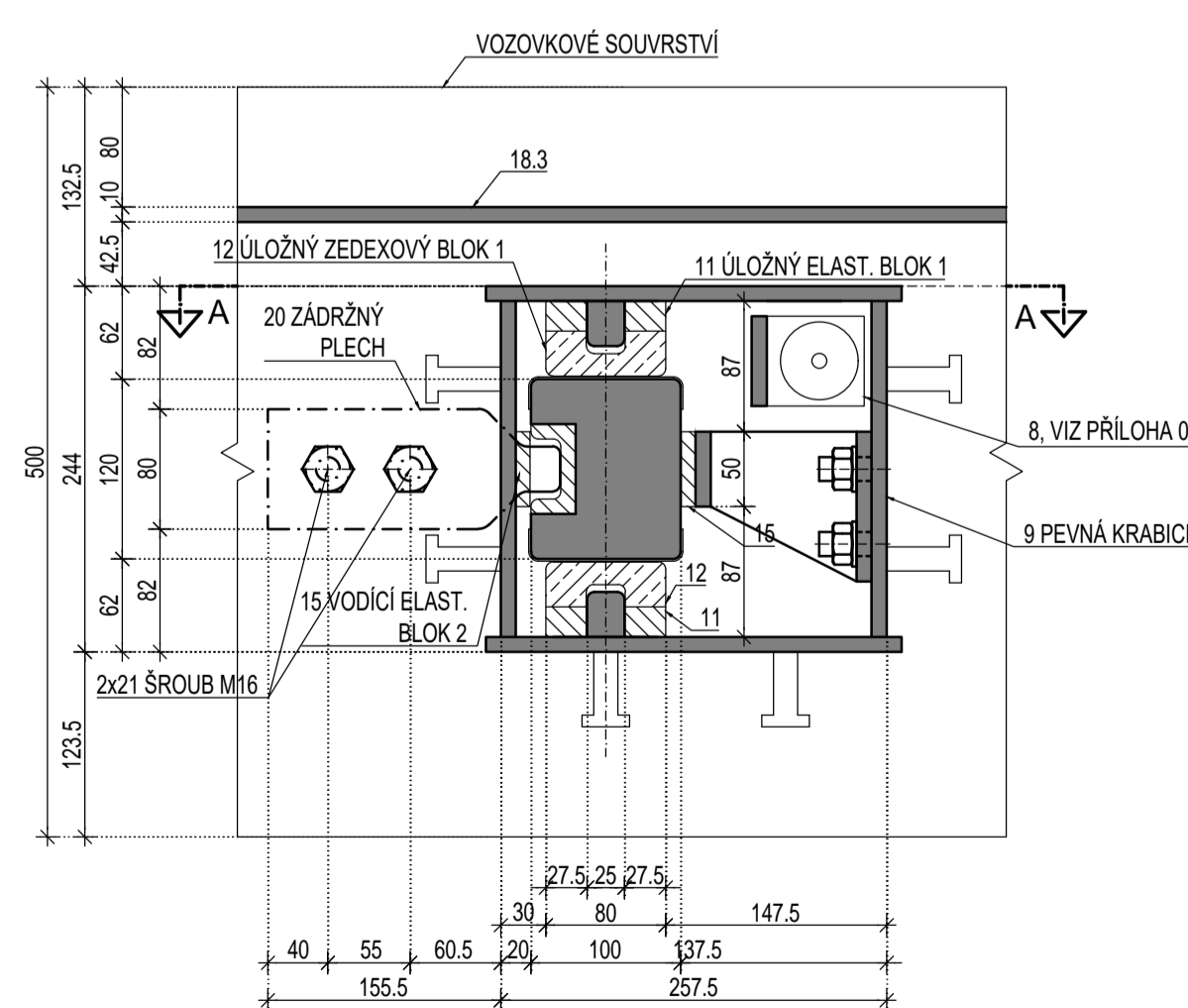
**ŘEZ L-L: PŘÍČNÝ ŘEZ TRAVERZOU V MÍSTĚ POSUVNÉ KRABICE**

M 1:5



**ŘEZ M-M: PŘÍČNÝ ŘEZ TRAVERZOU V MÍSTĚ PEVNÉ KRABICE**

M 1:5

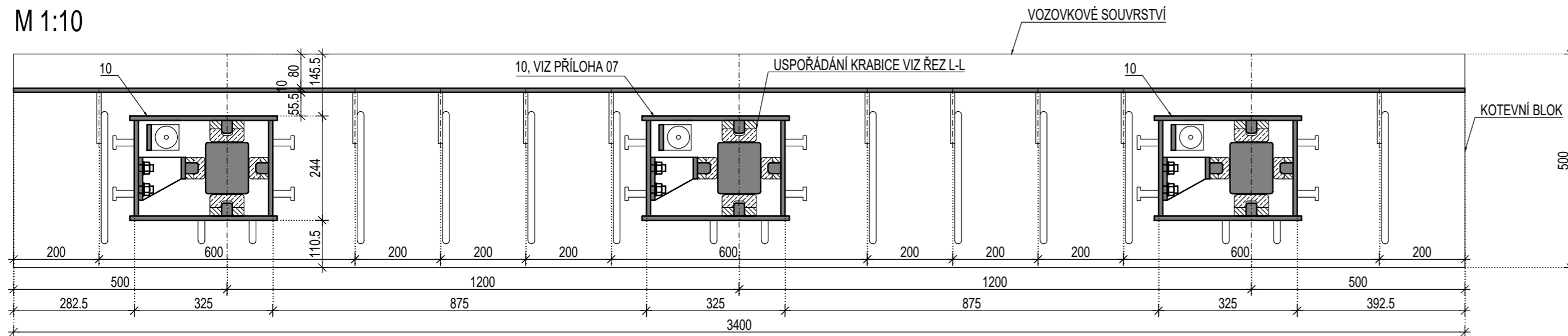


<b>ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE</b> FAKULTA STAVEBNÍ - KATEDRA OCELOVÝCH A DŘEVĚNÝCH KONSTRUKCÍ			
VYPRACOVAL Bc. JIŘÍ KAŠPÁREK	VEDOUCÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE doc. Ing. PAVEL RYJÁČEK, Ph.D.	MĚŘÍTKO 1:5	DATUM LEDEN 2017
TÉMA DIPLOMOVÉ PRÁCE PROGRESIVNÍ MOSTNÍ ZÁVĚR S INTELIGENTNÍMI PRVKY		POČET FORMÁTŮ 10 x A4	ČÍSLO PŘÍLOHY 04
SEGMENT MZ PRO ZKUŠEBNÍ STAND		PŘÍČNÉ ŘEZY	

# PODÉLNÉ ŘEZY M 1:10

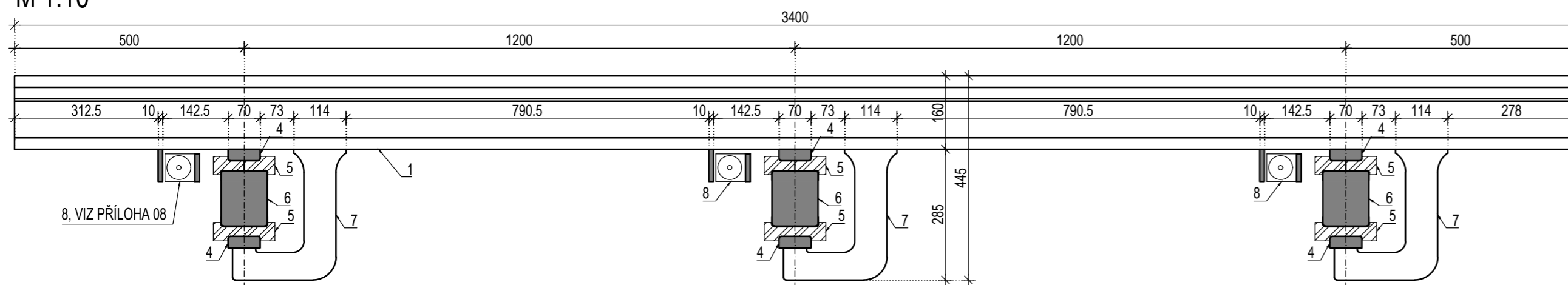
## ŘEZ E-E : PODÉLNÝ ŘEZ V MÍSTĚ POSUVNÉ KRABICE

M 1:10



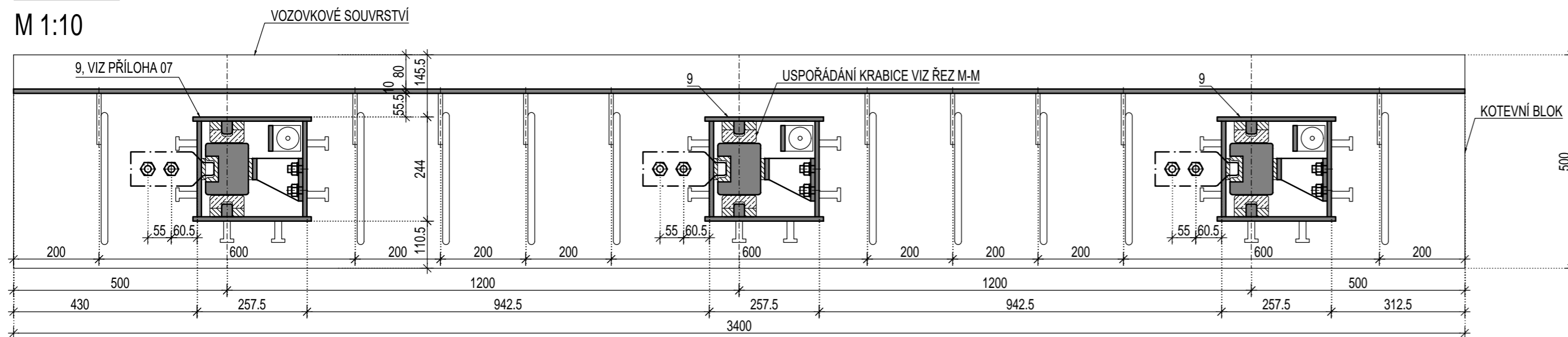
## ŘEZ F-F : PODÉLNÝ ŘEZ LAMELOU

M 1:10



## ŘEZ G-G : PODÉLNÝ ŘEZ V MÍSTĚ PEVNÉ KRABICE

M 1:10



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE



FAKULTA STAVEBNÍ - KATEDRA OCELOVÝCH A DŘEVĚNÝCH KONSTRUKCÍ

VYPRACOVAL  
Bc. JIŘÍ KAŠPÁREK

VEDOUcí DIPLOMOVÉ PRÁCE  
doc. Ing. PAVEL RYJÁČEK, Ph.D.

TÉMA DIPLOMOVÉ PRÁCE  
PROGRESIVNÍ MOSTNÍ ZÁVĚR S INTELIGENTNÍMI PRVKY

MĚŘÍTKO  
1:10

SEGMENT MZ PRO ZKUŠEBNÍ STAND

DATUM  
LEDEN 2017

OBSAH PŘÍLOHY  
PODÉLNÉ ŘEZY

POČET FORMÁTŮ  
3 x A4

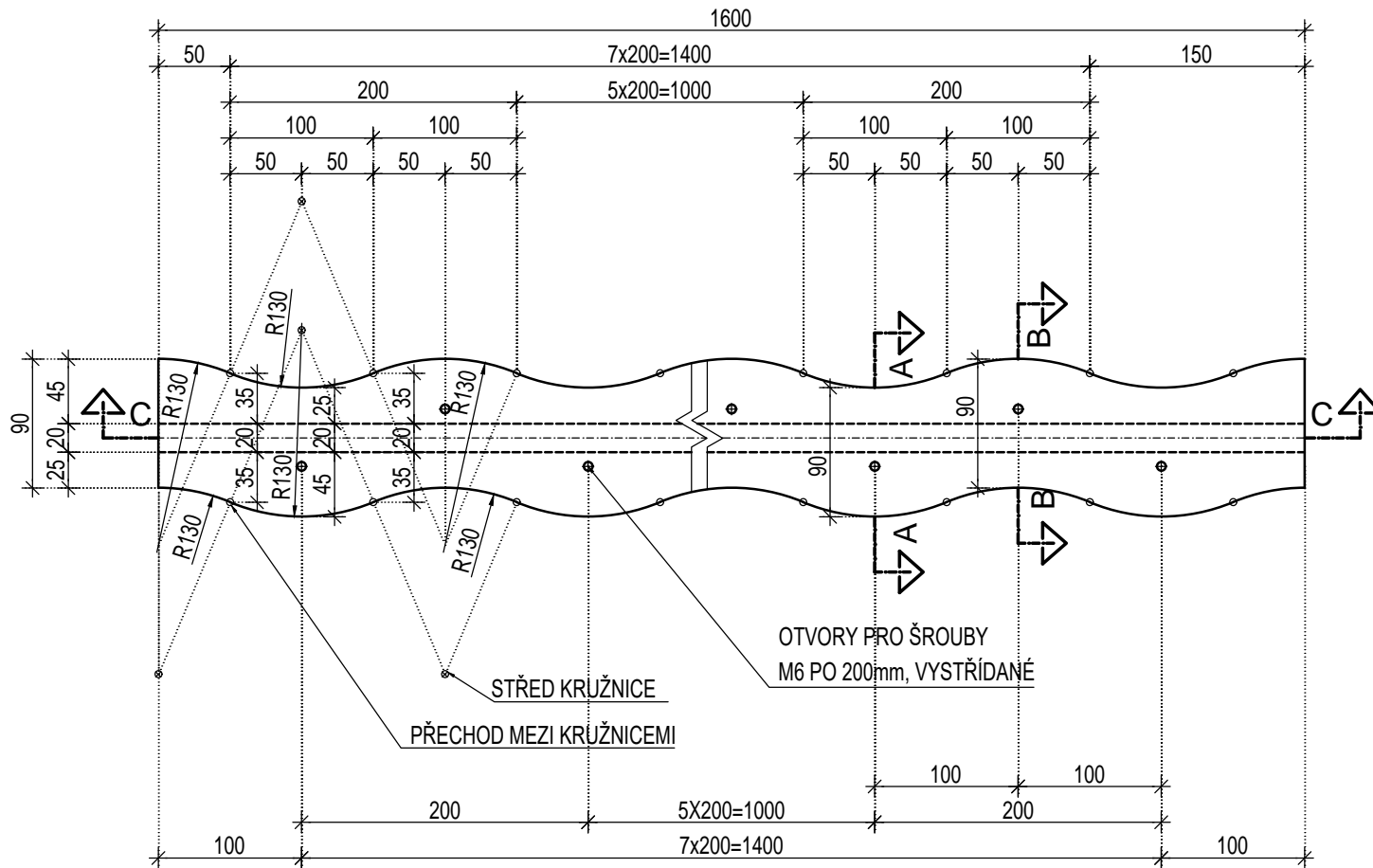
ČÍSLO PŘÍLOHY  
05



# DETAIL LAMELY M 1:1, M 1:5

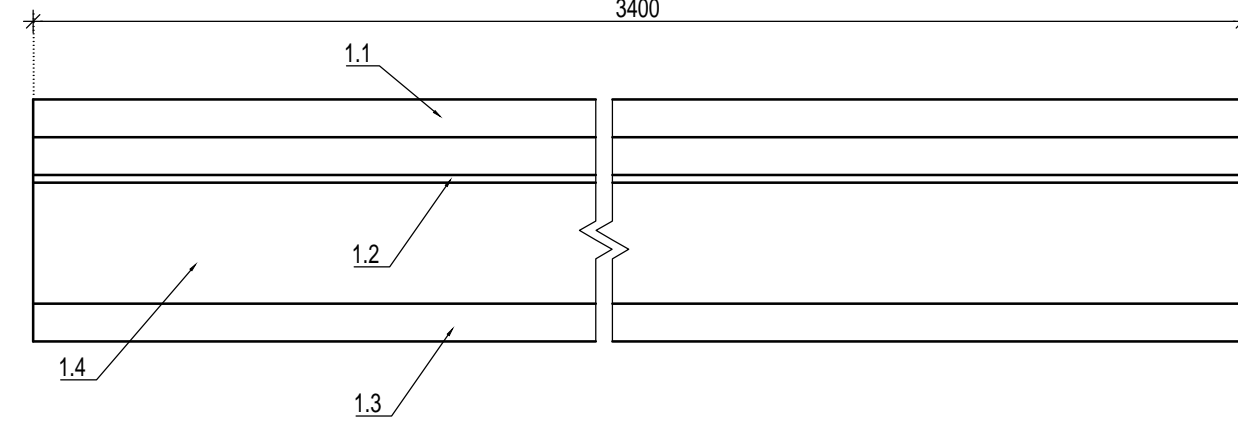
## PŮDORYS HORNÍ PÁSNICE:

M 1:5



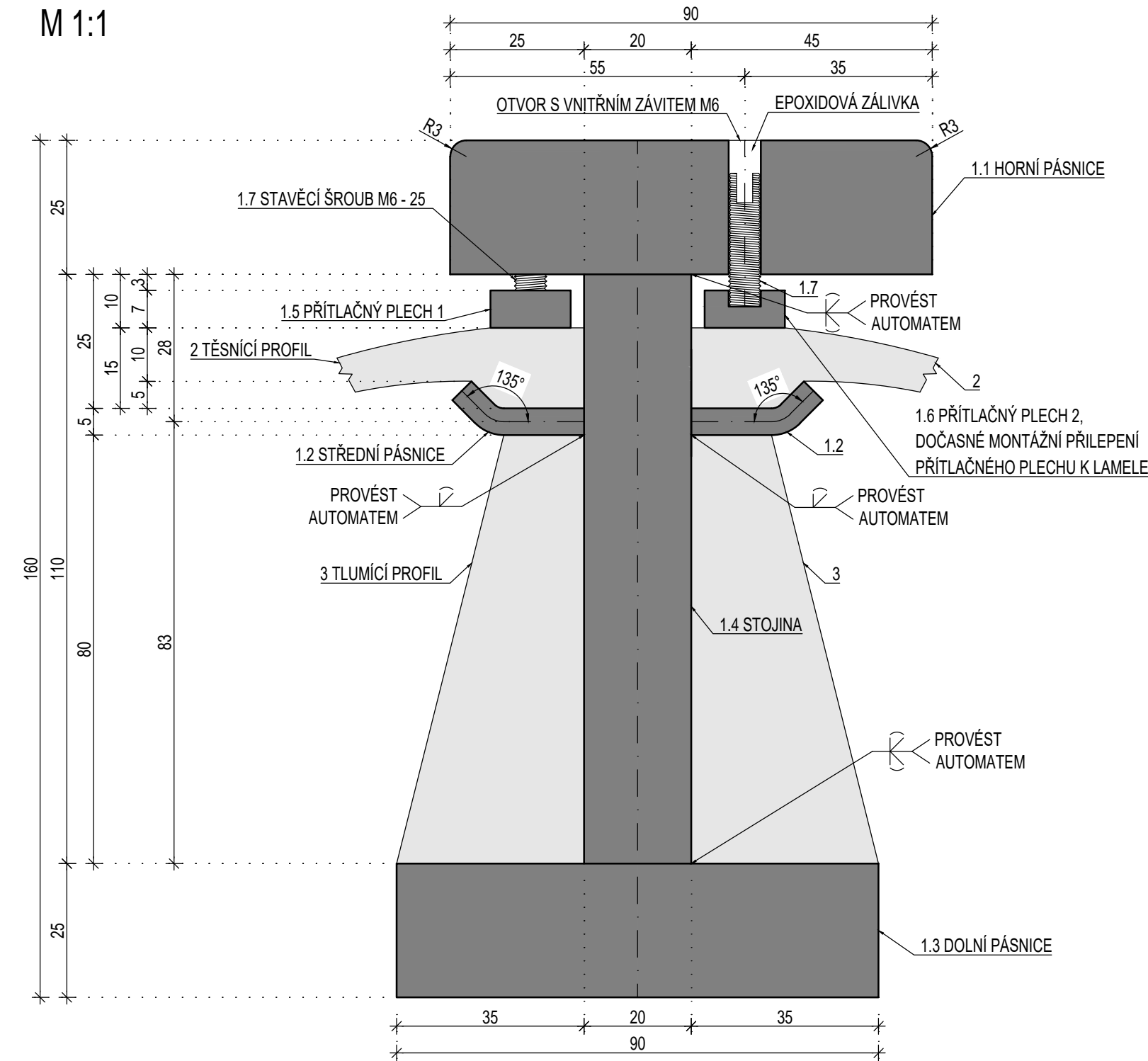
## ŘEZ C-C: PODÉLNÝ ŘEZ

M 1:5



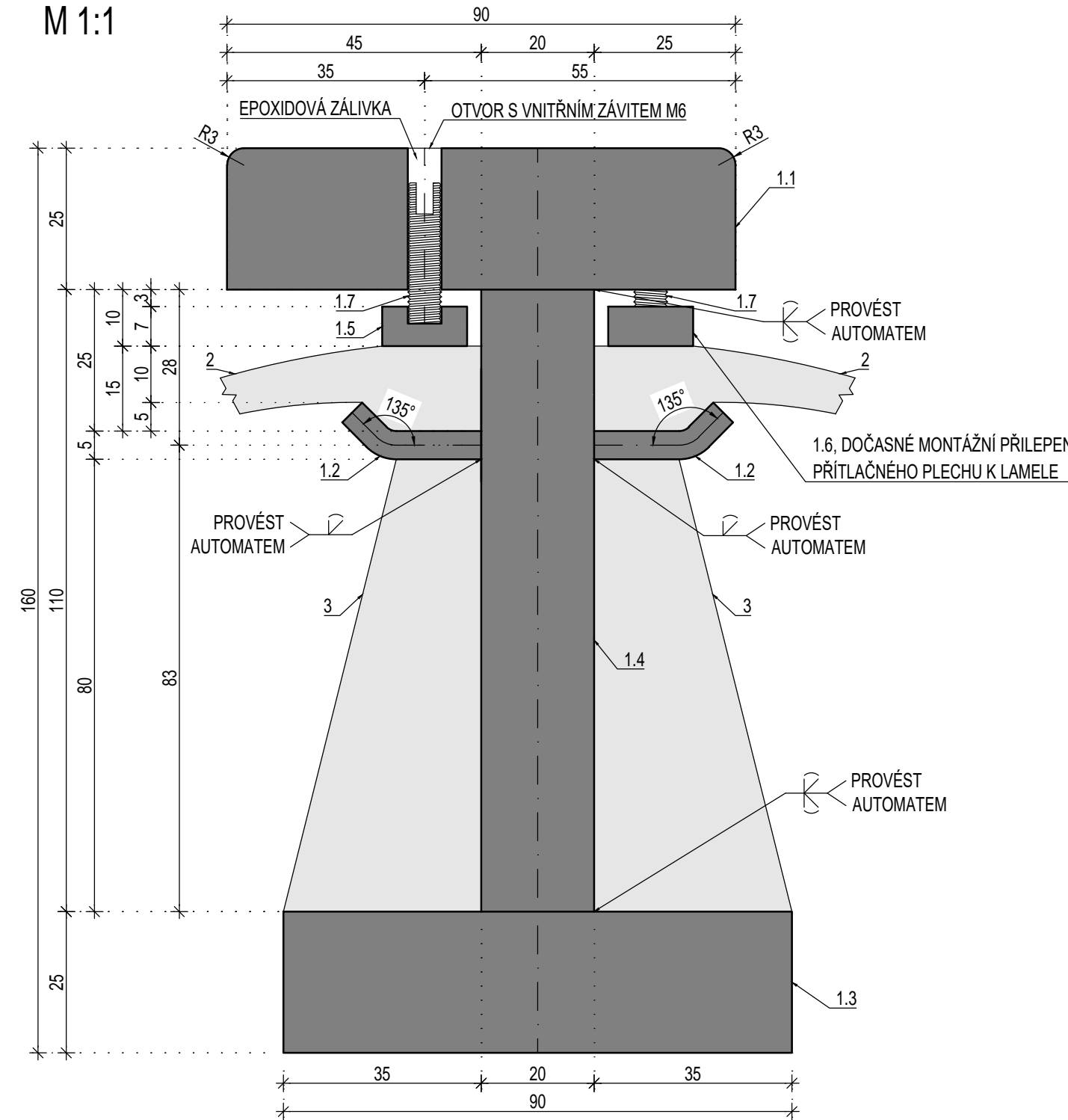
## ŘEZ A-A: PŘÍČNÝ ŘEZ

M 1:1



## ŘEZ B-B: PŘÍČNÝ ŘEZ

M 1:1



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STAVEBNÍ - KATEDRA OCELOVÝCH A DŘEVĚNÝCH KONSTRUKCÍ



VYPRACOVAL  
Bc. JIŘÍ KAŠPÁREK

VEDOUcí DIPLOMOVÉ PRÁCE  
doc. Ing. PAVEL RYJÁČEK, Ph.D.

TEMA DIPLOMOVÉ PRÁCE  
PROGRESIVNÍ MOSTNÍ ZÁVĚR S INTELIGENTNÍMI PRVKY

MĚŘÍTKO  
1:1, 1:5

SEGMENT MZ PRO ZKUŠEBNÍ STAND

DATUM  
LEDEN 2017

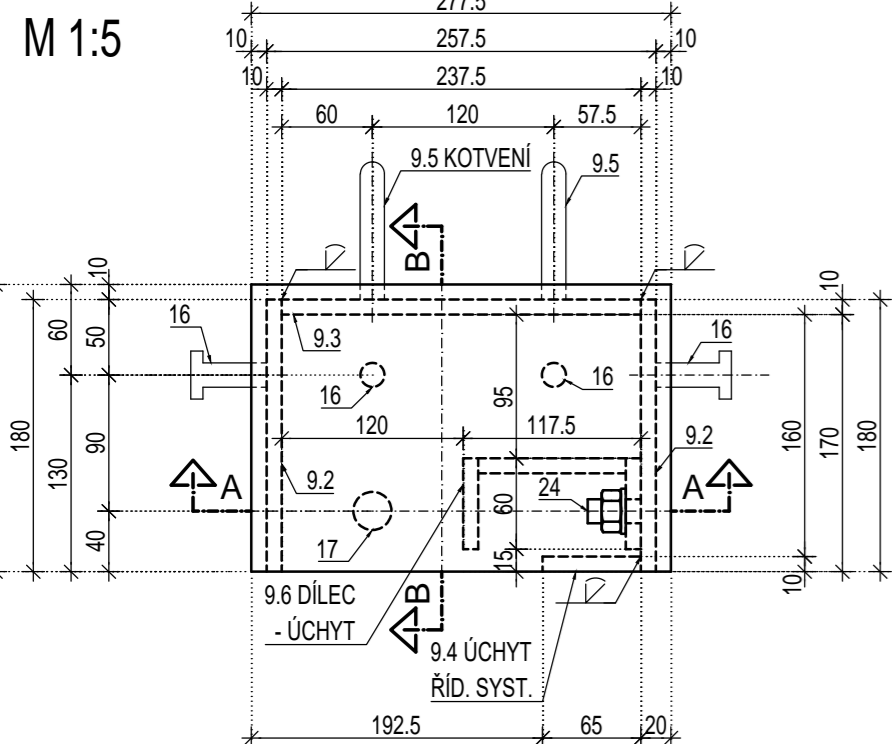
OBSAH PŘÍLOHY  
DETAIL LAMELY

POČET FORMÁTŮ  
4 x A4

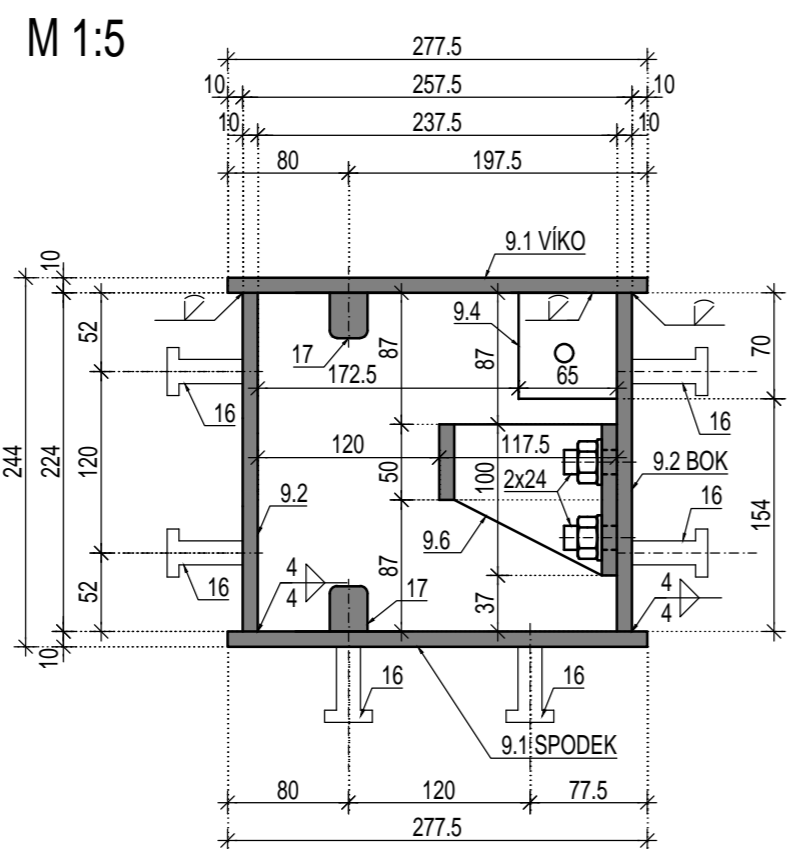
ČÍSLO PŘÍLOHY  
06

# DETAILY OCELOVÝCH KONSTRUKCÍ KRABIC M 1:5

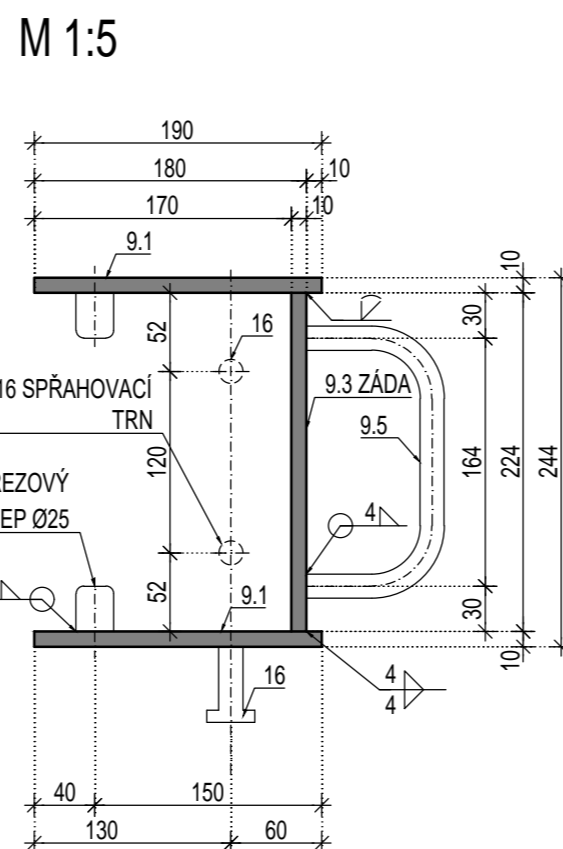
**PŮDORYS: PEVNÁ KRABICE**



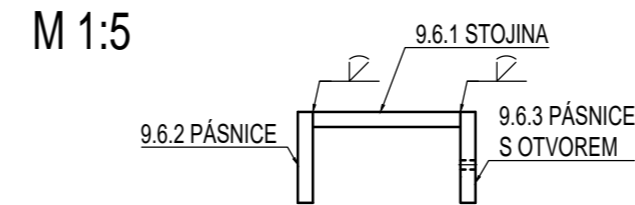
**ŘEZ A-A: PŘÍČNÝ ŘEZ**



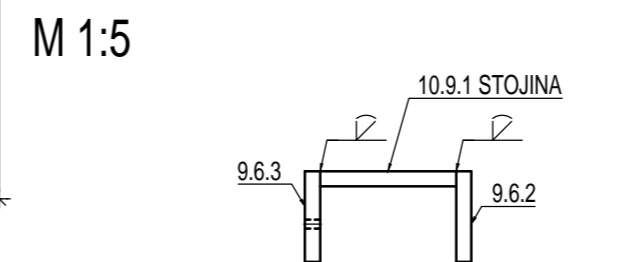
**ŘEZ B-B: PODÉLNÝ ŘEZ**



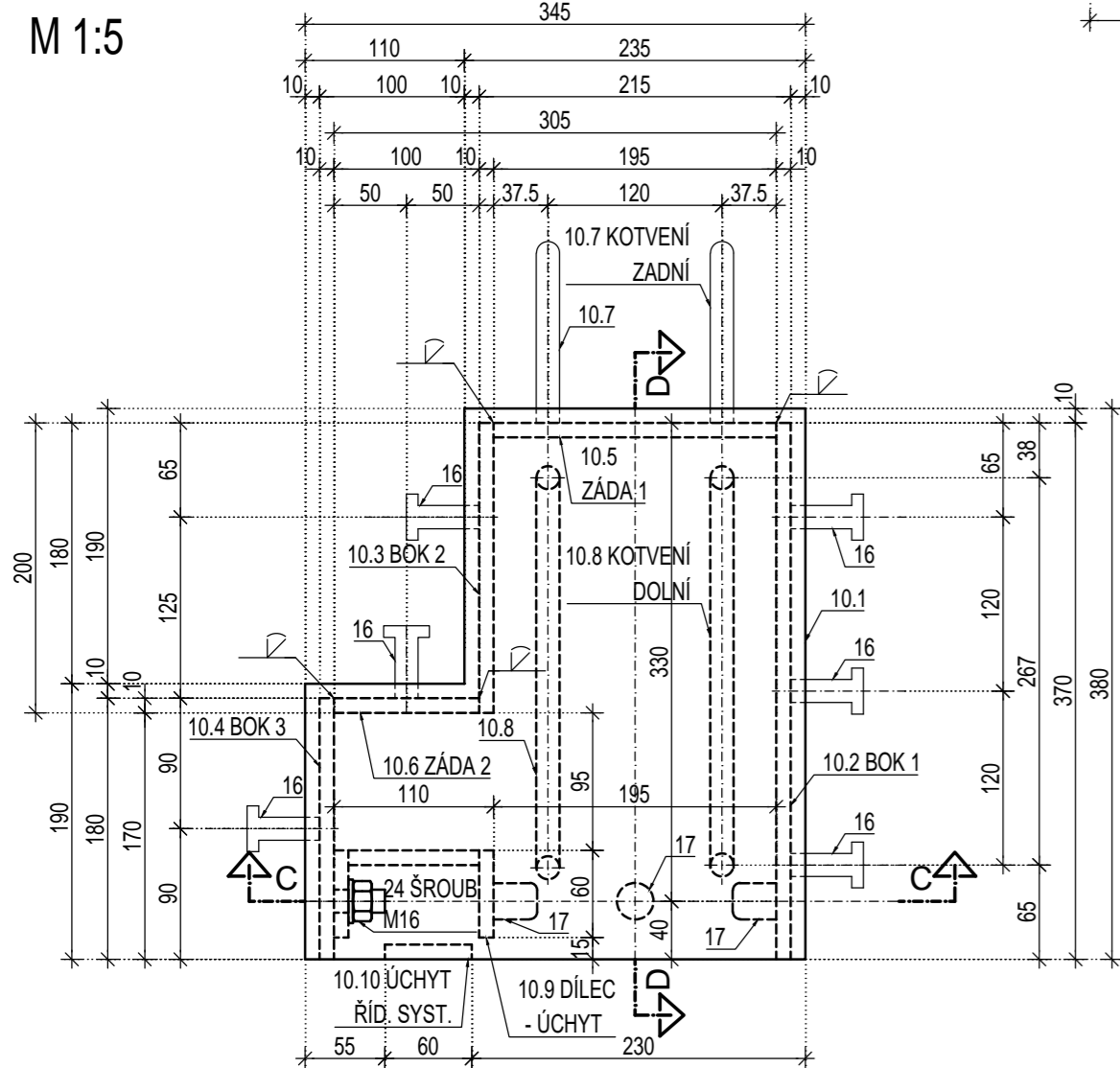
**PŮDORYS: SKLADBA DÍLCE 9.6**



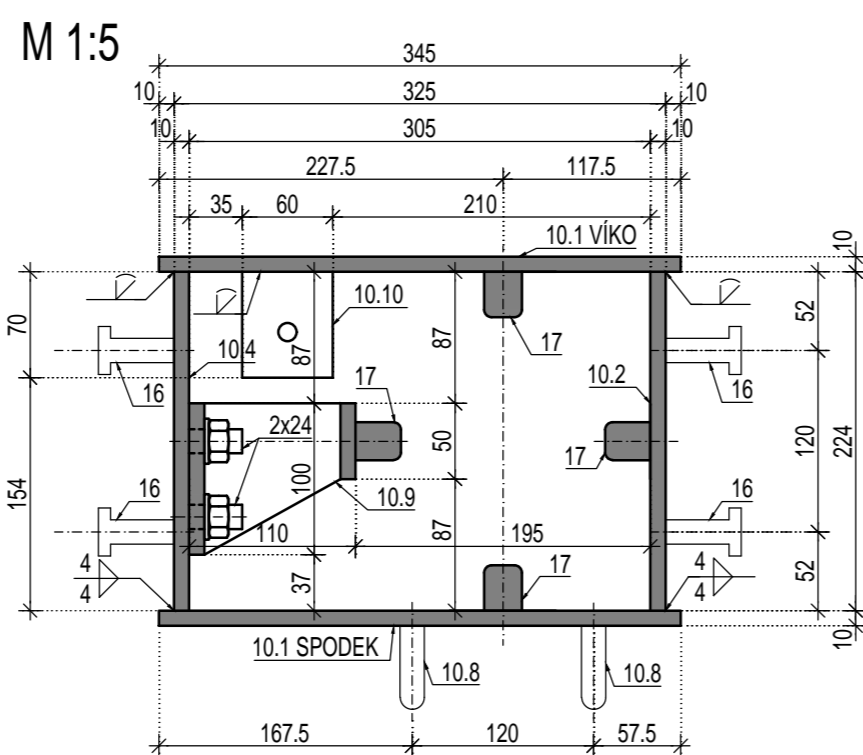
**PŮDORYS: SKLADBA DÍLCE 10.9**



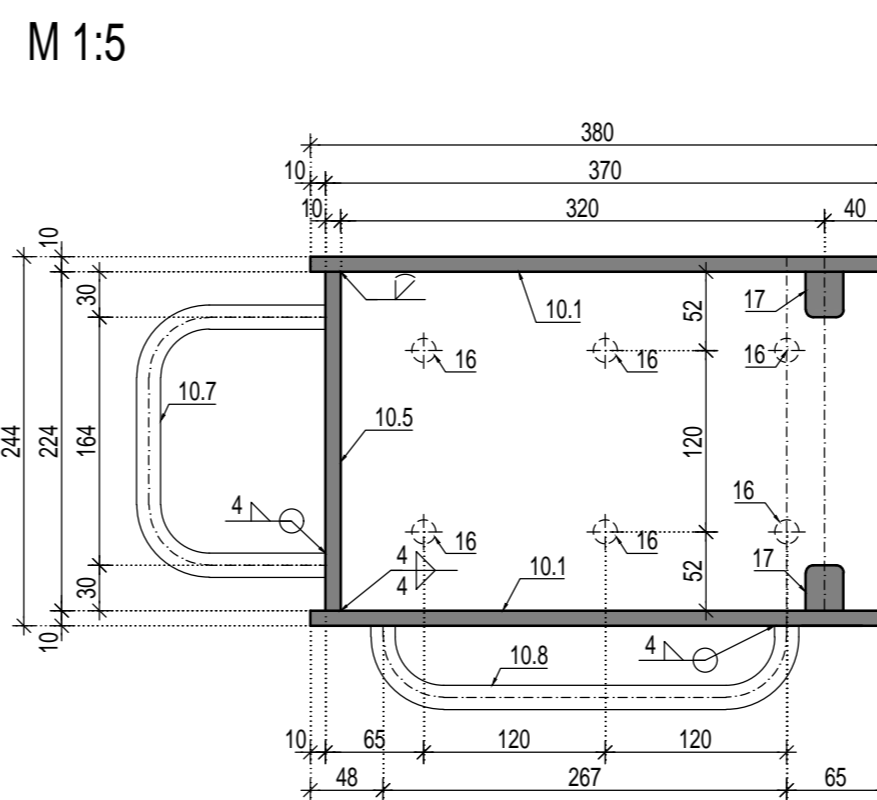
**PŮDORYS: POSUVNÁ KRABICE**



**ŘEZ C-C: PŘÍČNÝ ŘEZ**



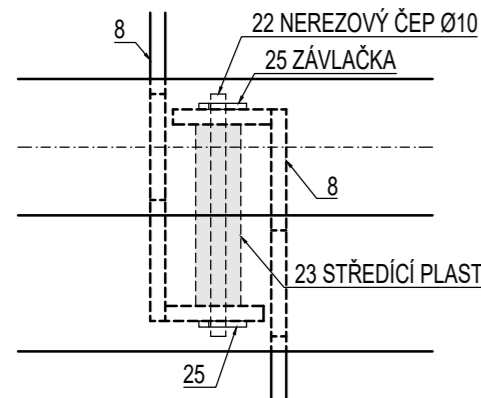
**ŘEZ D-D: PODÉLNÝ ŘEZ**



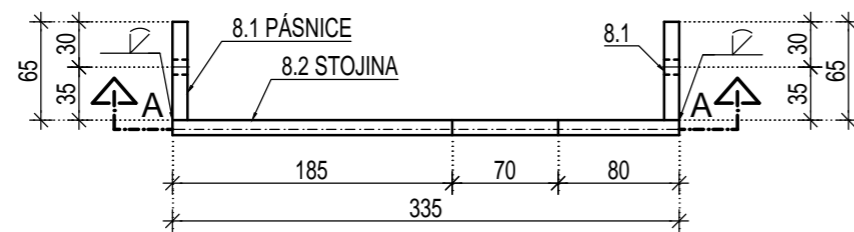
<b>ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE</b> 	
FAKULTA STAVEBNÍ - KATEDRA OCELOVÝCH A DŘEVĚNÝCH KONSTRUKCÍ	
VYPRACOVAL <b>Bc. JIŘÍ KAŠPÁREK</b>	VEDOUCÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE <b>doc. Ing. PAVEL RYJÁČEK, Ph.D.</b>
TÉMA DIPLOMOVÉ PRÁCE <b>PROGRESIVNÍ MOSTNÍ ZÁVĚR S INTELIGENTNÍMI PRVKY</b>	MĚŘÍTKO 1:5
<b>SEGMENT MZ PRO ZKUŠEBNÍ STAND</b>	DATUM LEDEN 2017
OBSAH PŘÍLOHY <b>DETAILY OCELOVÝCH KONSTRUKCÍ KRABIC</b>	POČET FORMÁTŮ 3 x A4
	ČÍSLO PŘÍLOHY <b>07</b>

# DETAIL ŘÍDÍCÍHO SYSTÉMU M 1:5

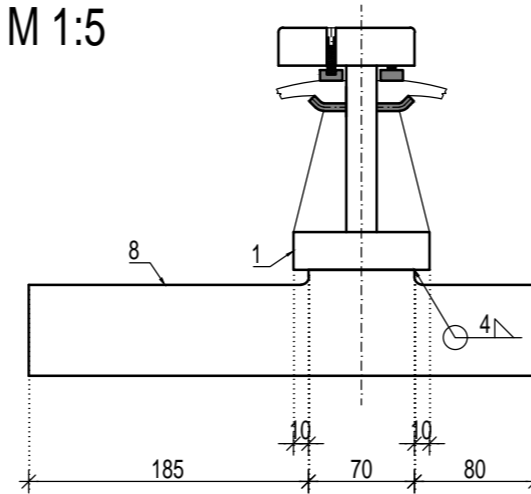
PŮDORYS: PŘÍPOJ NA LAMELY  
M 1:5



PŮDORYS: SKLADBA DÍLCE 8  
M 1:5

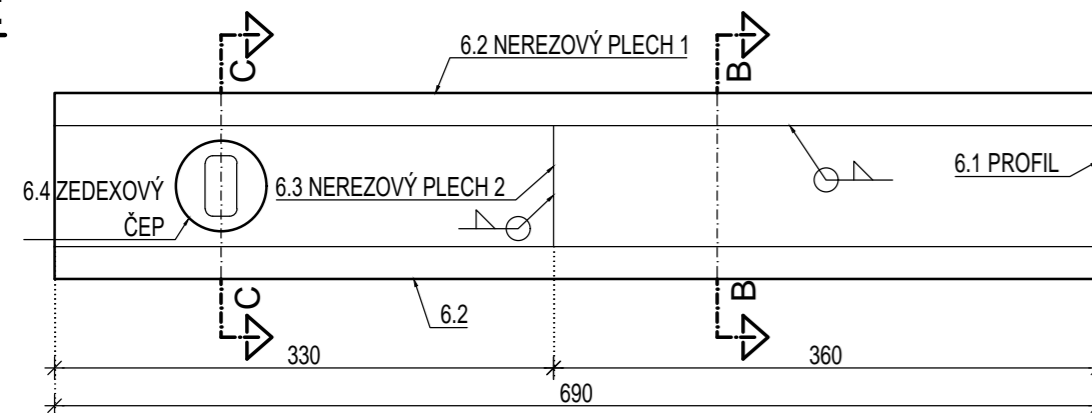


ŘEZ A-A: PŘÍČNÝ ŘEZ PŘÍPOJEM NA LAMELU  
M 1:5

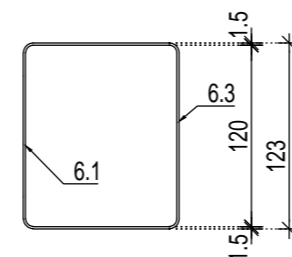


# DETAIL SKLADBY TRAVERZY M 1:5

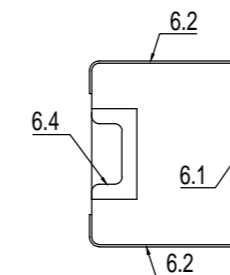
POHLED:  
M 1:5



ŘEZ B-B: PŘÍČNÝ ŘEZ  
M 1:5

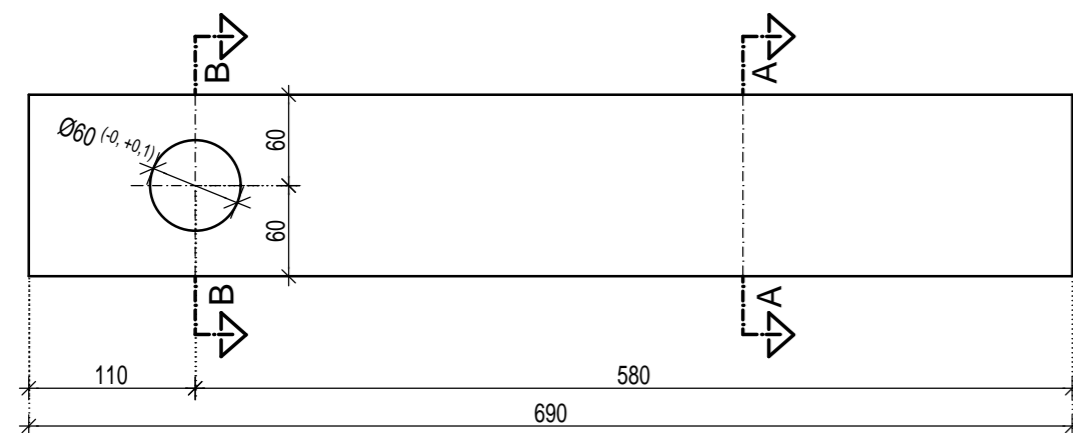


ŘEZ C-C: PŘÍČNÝ ŘEZ  
M 1:5

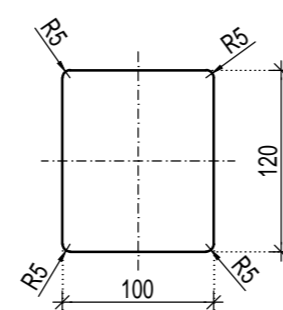


# DETAIL PROFILU TRAVERZY M 1:5

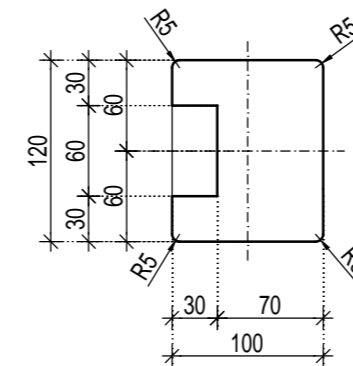
POHLED:  
M 1:5




ŘEZ A-A: PŘÍČNÝ ŘEZ  
M 1:5



ŘEZ B-B: PŘÍČNÝ ŘEZ V MÍSTĚ OTVORU  
M 1:5

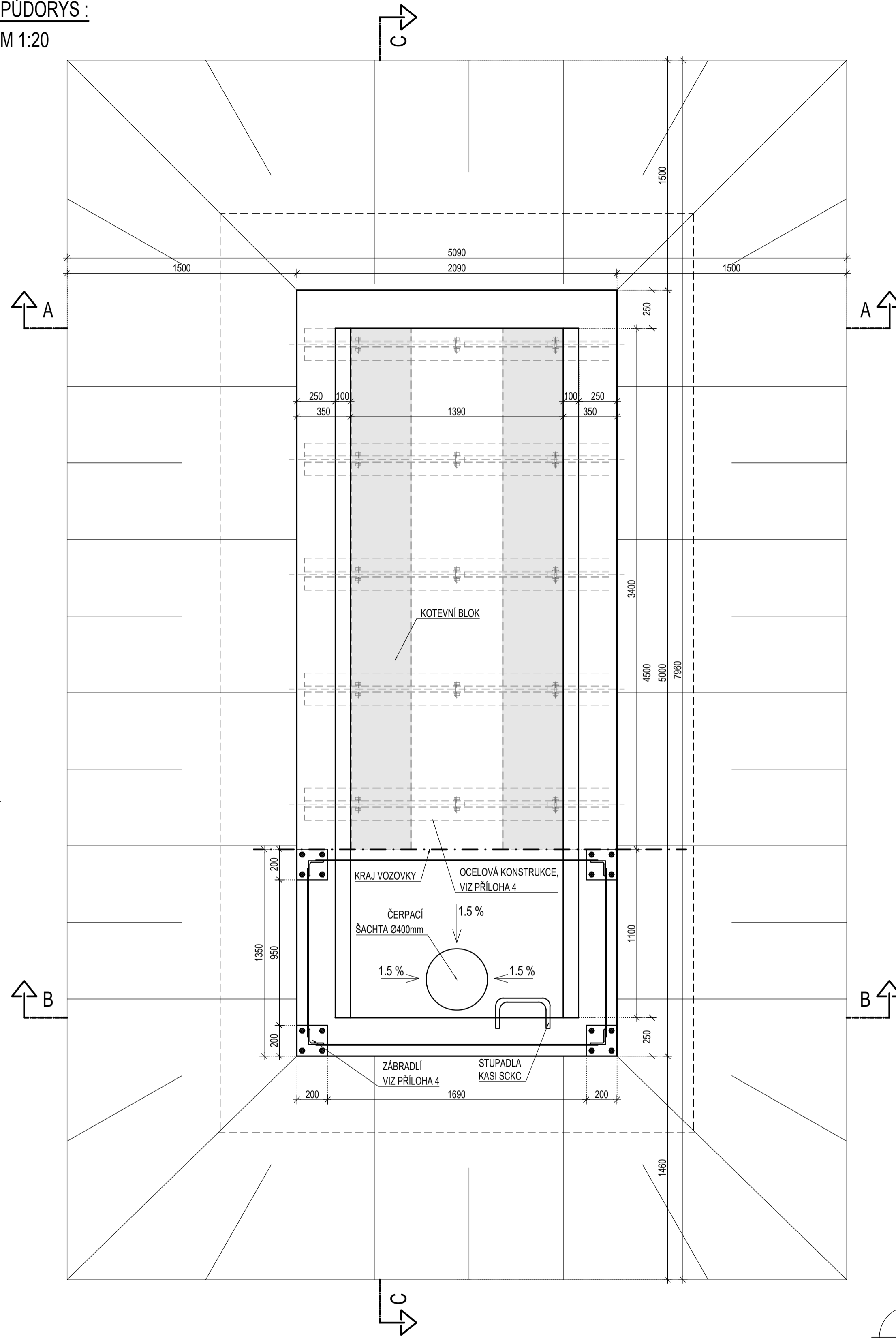


<b>ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE</b> FAKULTA STAVEBNÍ - KATEDRA OCELOVÝCH A DŘEVĚNÝCH KONSTRUKCÍ			
VYPRACOVAL Bc. JIŘÍ KAŠPÁREK		VEDOUCÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE doc. Ing. PAVEL RYJÁČEK, Ph.D.	
TÉMA DIPLOMOVÉ PRÁCE <b>PROGRESIVNÍ MOSTNÍ ZÁVĚR S INTELIGENTNÍMI PRVKY</b>		MĚŘÍTKO 1:5	DATUM LEDEN 2017
<b>SEGMENT MZ PRO ZKUŠEBNÍ STAND</b>		POČET FORMÁTŮ 3 x A4	ČÍSLO PŘÍLOHY <b>08</b>
OBSAH PŘÍLOHY <b>DETAILY ŘÍDÍCÍHO SYSTÉMU A TRAVERZY</b>			

# VÝKRES TVARU

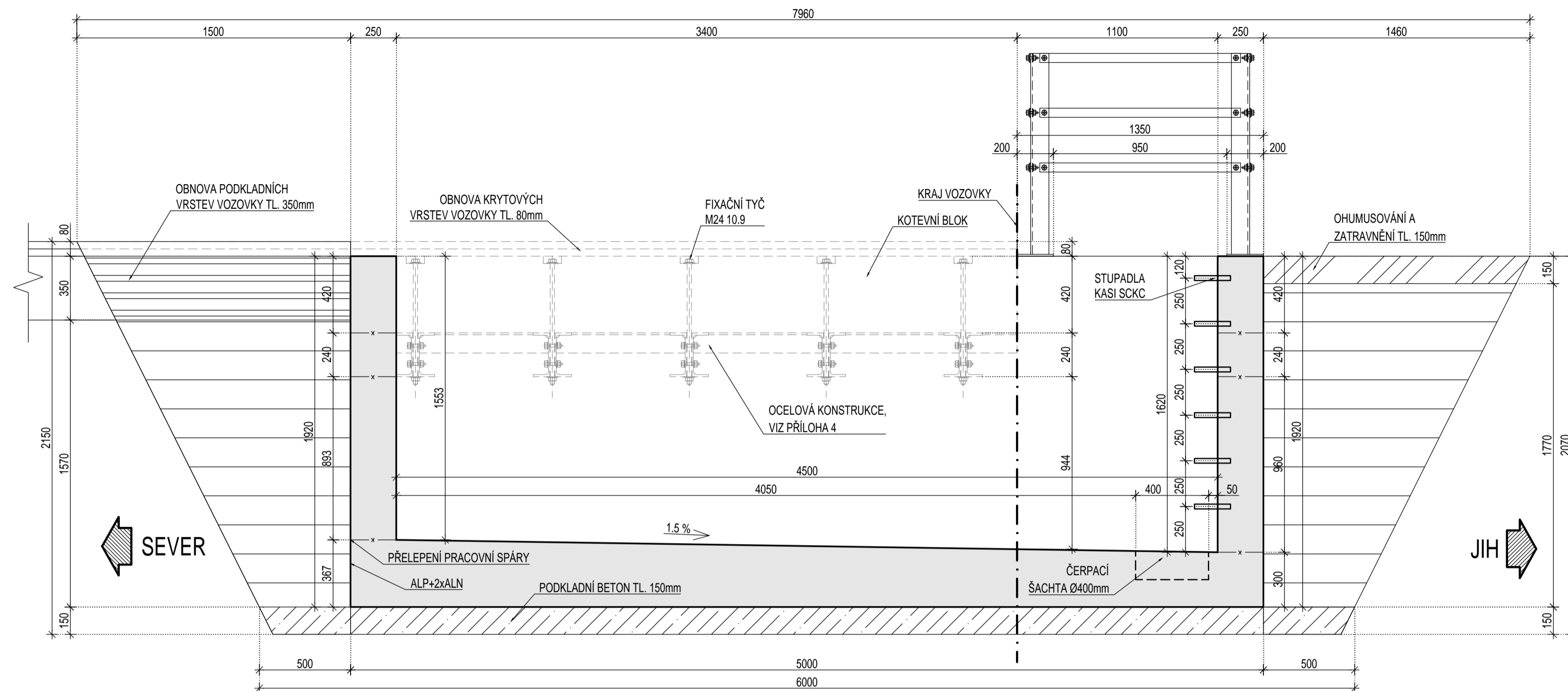
PŮDORYS:

M 1:20



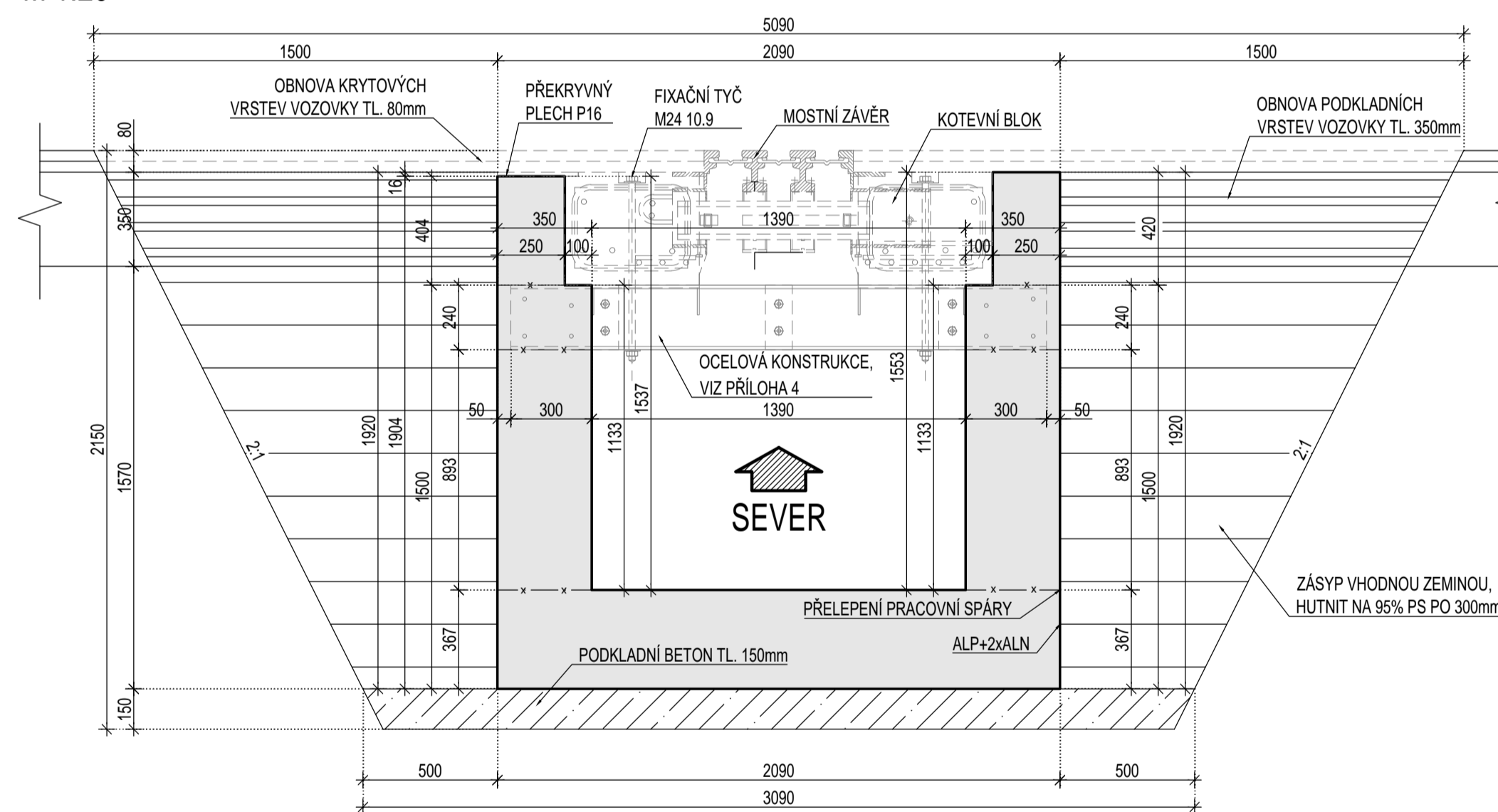
ŘEZ C-C: PODÉLNÝ ŘEZ

M 1:20



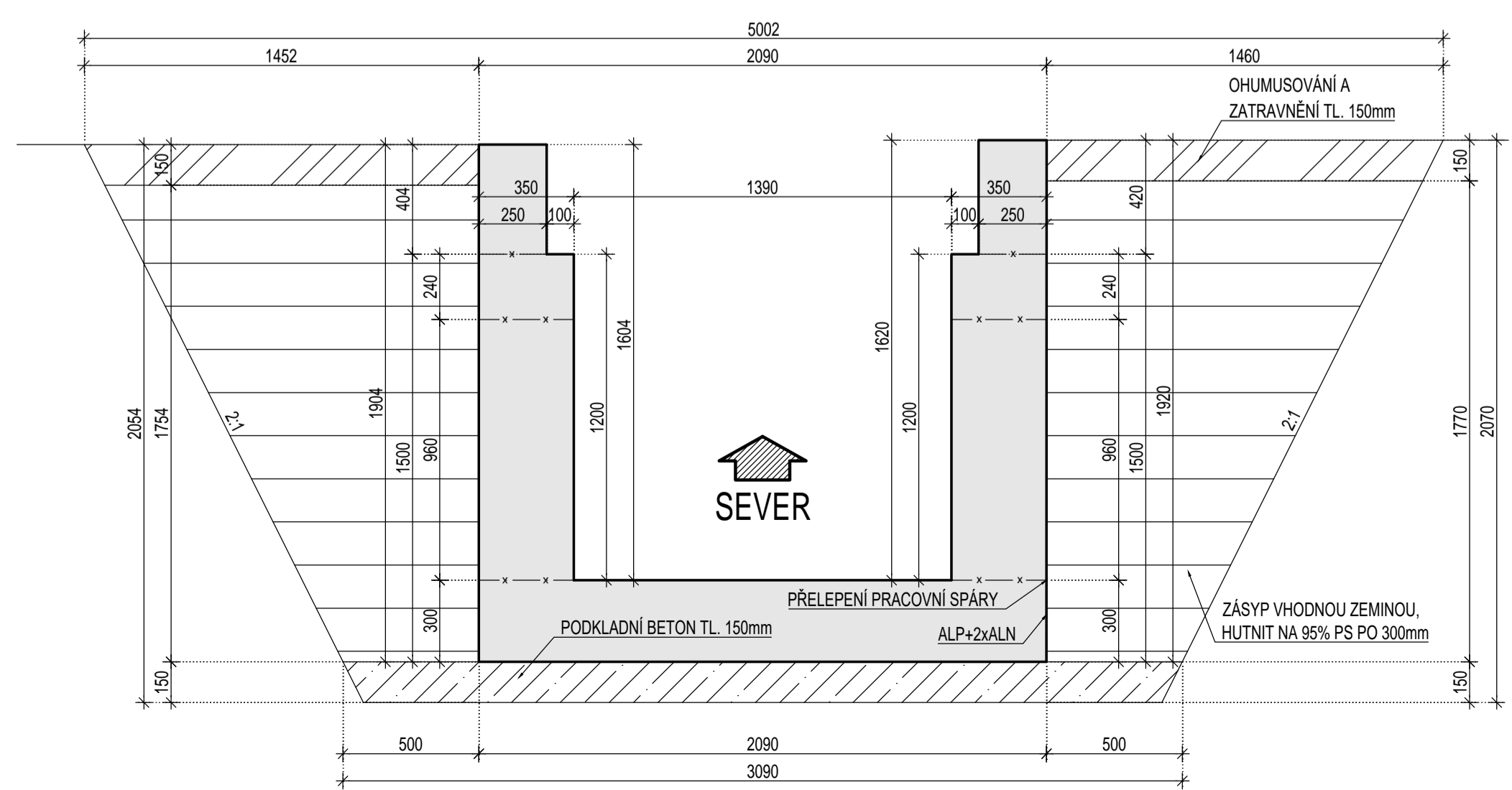
ŘEZ A-A: PŘÍČNÝ ŘEZ

M 1:20



ŘEZ B-B: PŘÍČNÝ ŘEZ

M 1:20



## POZNÁMKY:

- MOSTNÍ ZÁVĚR, KOTEVNÍ BLOKY, FIXAČNÍ TYČE, PŘEKRYVNÉ PLECHY A KRYCÍ VRSTVY VOZOVKY BUDOU ŘEŠENY A ZPRACOVÁNY AŽ V DALŠÍ ČÁSTI PROJEKTU
- VNĚJŠÍ POVRCH STĚN KONSTRUKCE JE OPATŘEN OCHRANNÝM ASFALTOVÝM NÁTĚREM A VŠECHNY PRACOVNÍ SPÁRY JSOU PŘELEPENY

## VÝKAZ MATERIÁLŮ:

<b>1. BETONY</b>			
NOSNÁ KONSTRUKCE	C 30/37 XD1, XF2 (CZ, F.2) Cl 0,4-Dmax 16 S3	9,8 m <sup>3</sup>	
PODKLADNÍ BETON	C 16/20	2,7 m <sup>3</sup>	
<b>2. VYBAVENÍ</b>			
STUPADLA KASÍ	SCKC	6 ks	
ČERPACÍ ŠACHTA	1x PE TRUBKA DN 400 dl. 150mm+2x VÍKO		
<b>4. VÝKOPY</b>			
OBJEM VYKOPANÉHO MATERIÁLU		56,5 m <sup>3</sup>	
<b>5. ZÁSYPY</b>			
ZÁSYP VHDNÝM MATERIÁLEM		32,2 m <sup>3</sup>	

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STAVEBNÍ - KATEDRA OCELOVÝCH A DŘEVĚNÝCH KONSTRUKCÍ



VYPRACOVAL: Bc. JIŘÍ KAŠPÁREK

VEDOUCÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE: doc. Ing. PAVEL RYJÁČEK, Ph.D.

TEMA DIPLOMOVÉ PRÁCE: PROGRESIVNÍ MOSTNÍ ZÁVĚR S INTELIGENTNÍMI PRVKY

MĚŘÍTKO: 1:20

ZKUŠEBNÍ STAND

DATUM: LEDEN 2017

VÝKRES TVARU

POČET FORMÁTŮ: 8 x A4

01

# VÝKRES VÝZTUŽE

## POZNÁMKY:

- VÝZTUŽ V PŘÍPADNÉ KOLIZI S JINÝMI PRVKY V KONSTRUKCI BUDE LOKÁLNĚ UPRAVENA NA STAVBĚ DLE POTŘEBY.
- PŘEDEPSANÉ KRYTÍ BUDE ZAJIŠTĚNO BETONOVÝMI DISTANČNÍKY.
- ROZDĚLENÍ VÝZTUŽE JE KÓTOVÁNO NA OSU VÝZTUŽE
- VEŠKERÁ VÝZTUŽ JE VÁZANA
- ROZMÍSTĚNÍ, STYKOVÁNÍ A KOTVENÍ VÝZTUŽE VYCHÁZÍ Z VÝSLEDKŮ STAT. VÝPOČTU A ZE ZÁSAD UVEDENÝCH V ČSN 73 6206

## VÝKAZ MATERIÁLŮ:

### 1. BETONY

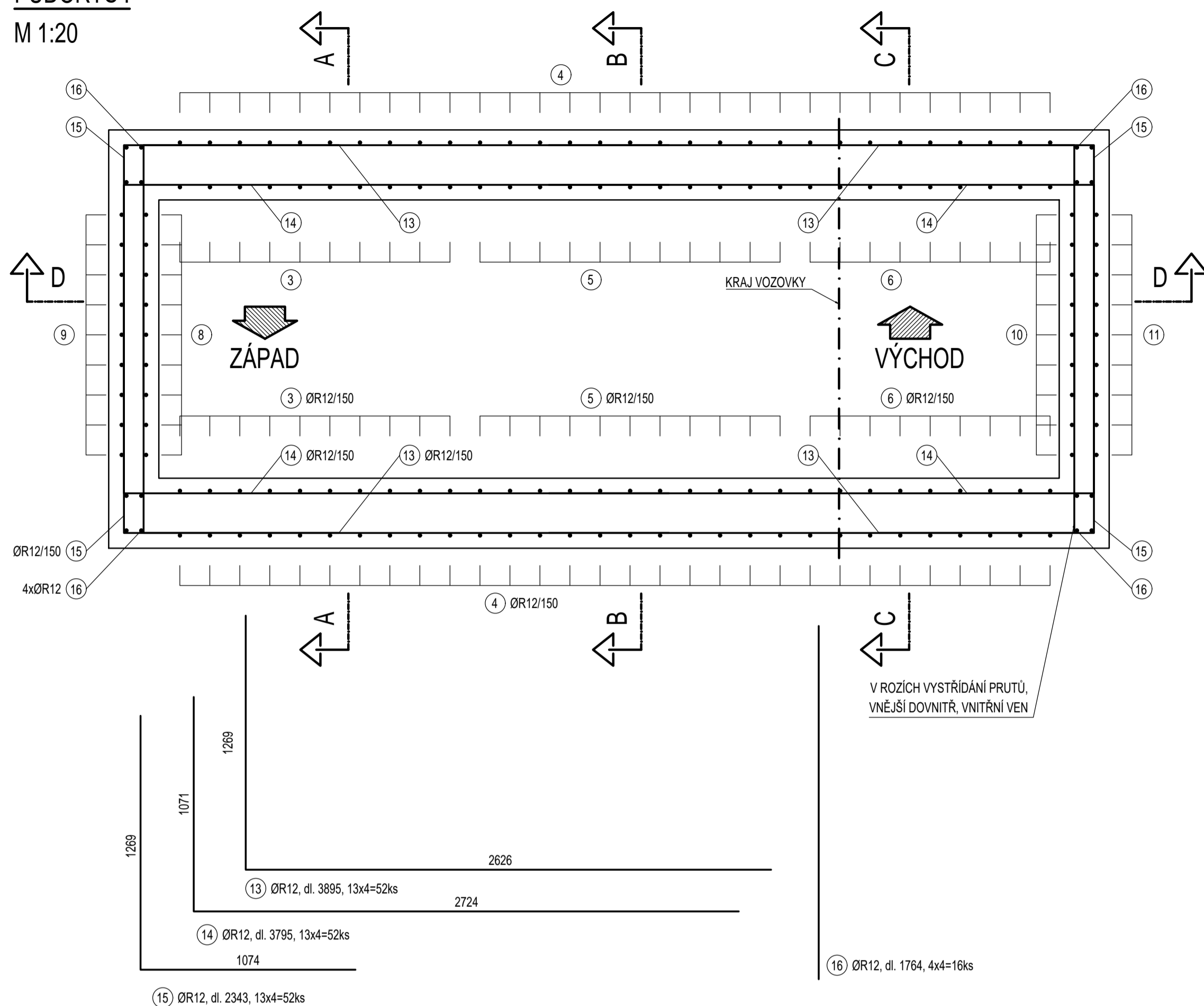
NOSNÁ KONSTRUKCE C 30/37 XD1, XF2(CZ.F.2) CI 0,4-Dmax 16 S3

### 2. BETONÁŘSKÁ VÝZTUŽ

B 500 B  
KRYTÍ VÝZTUŽE JMENOVITĚ 50 mm/ MINIMÁLNĚ 40 mm

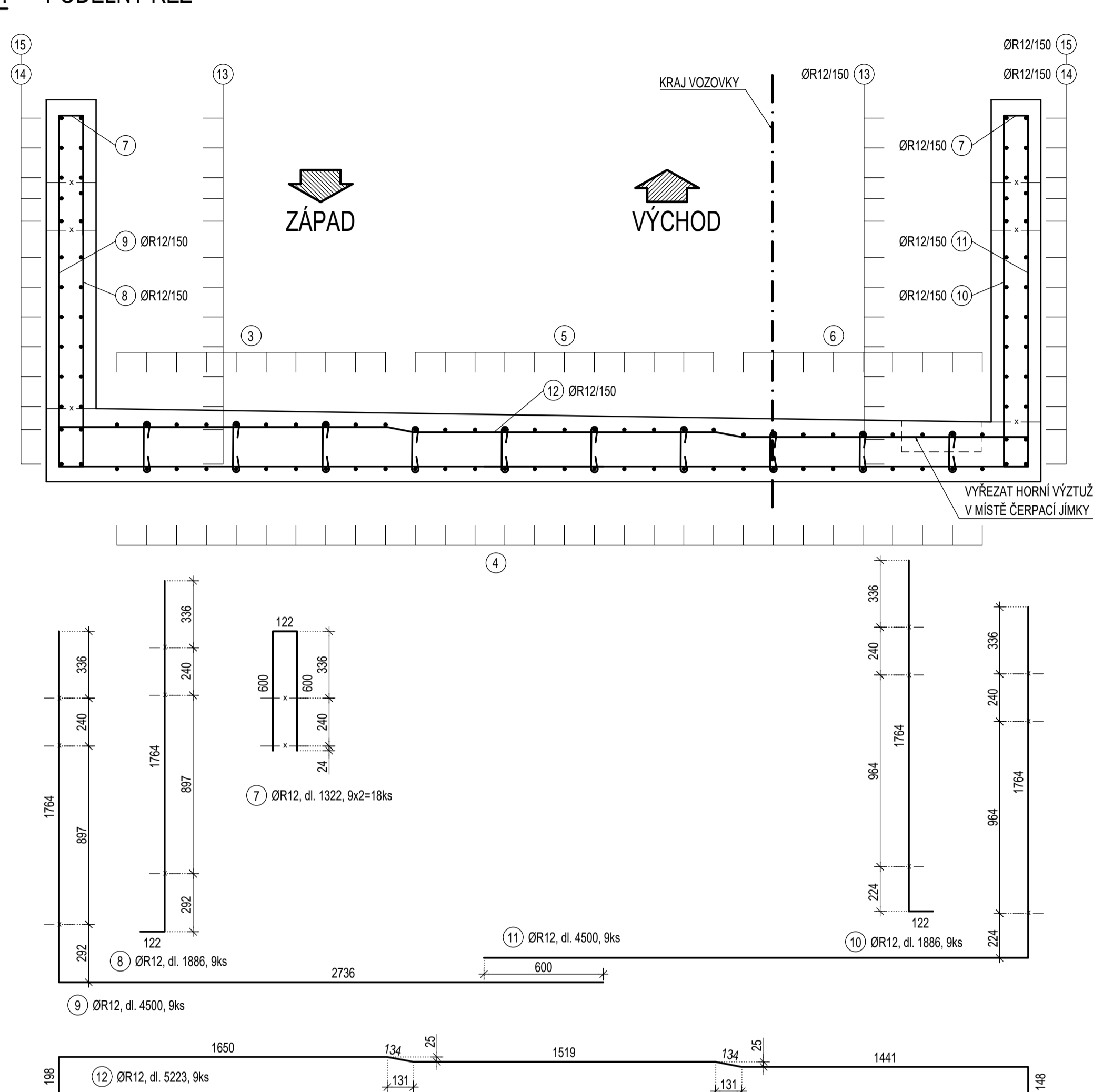
## PŮDORYS:

M 1:20



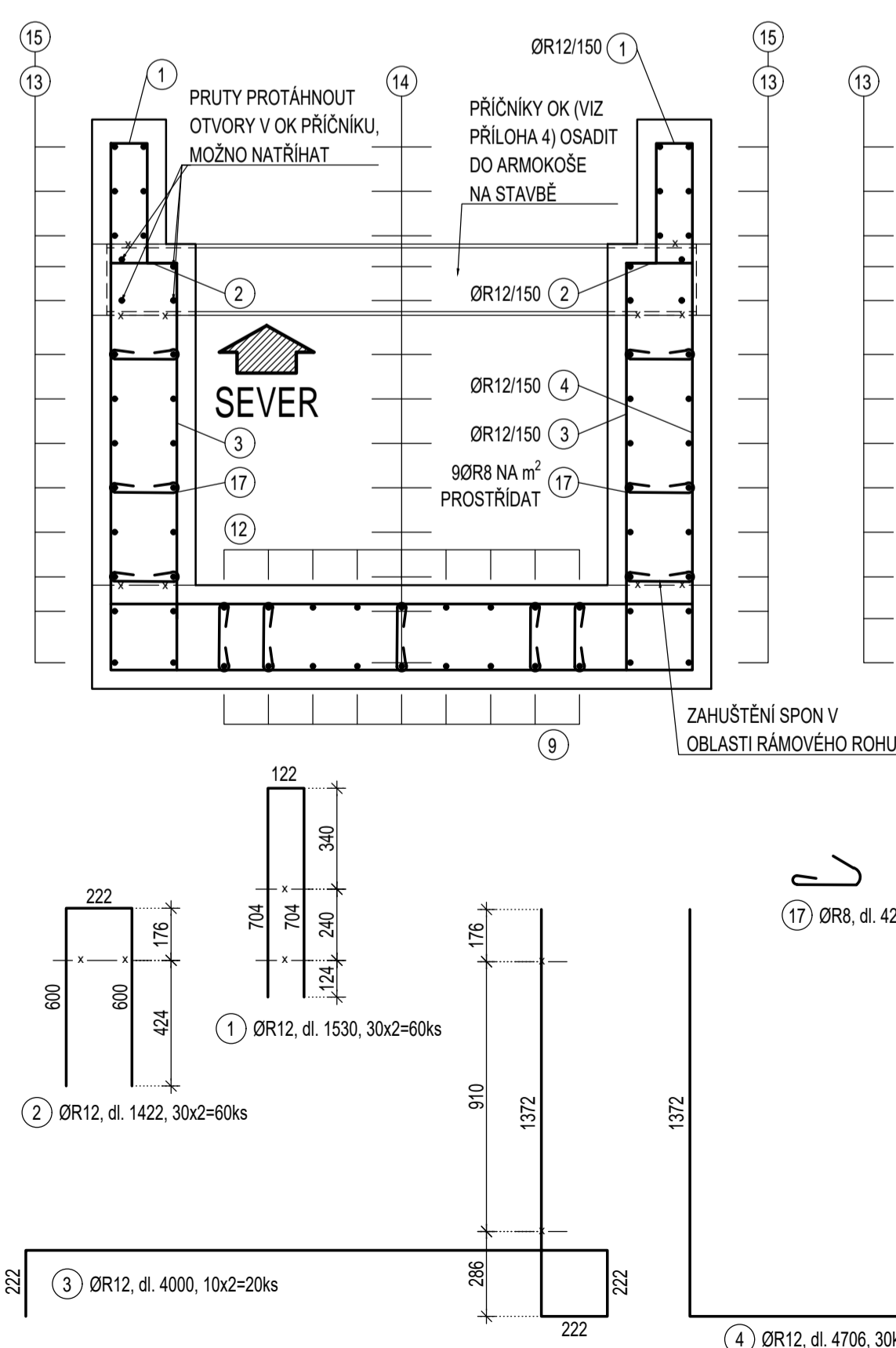
## ŘEZ D-D: PODÉLNÝ ŘEZ

M 1:20



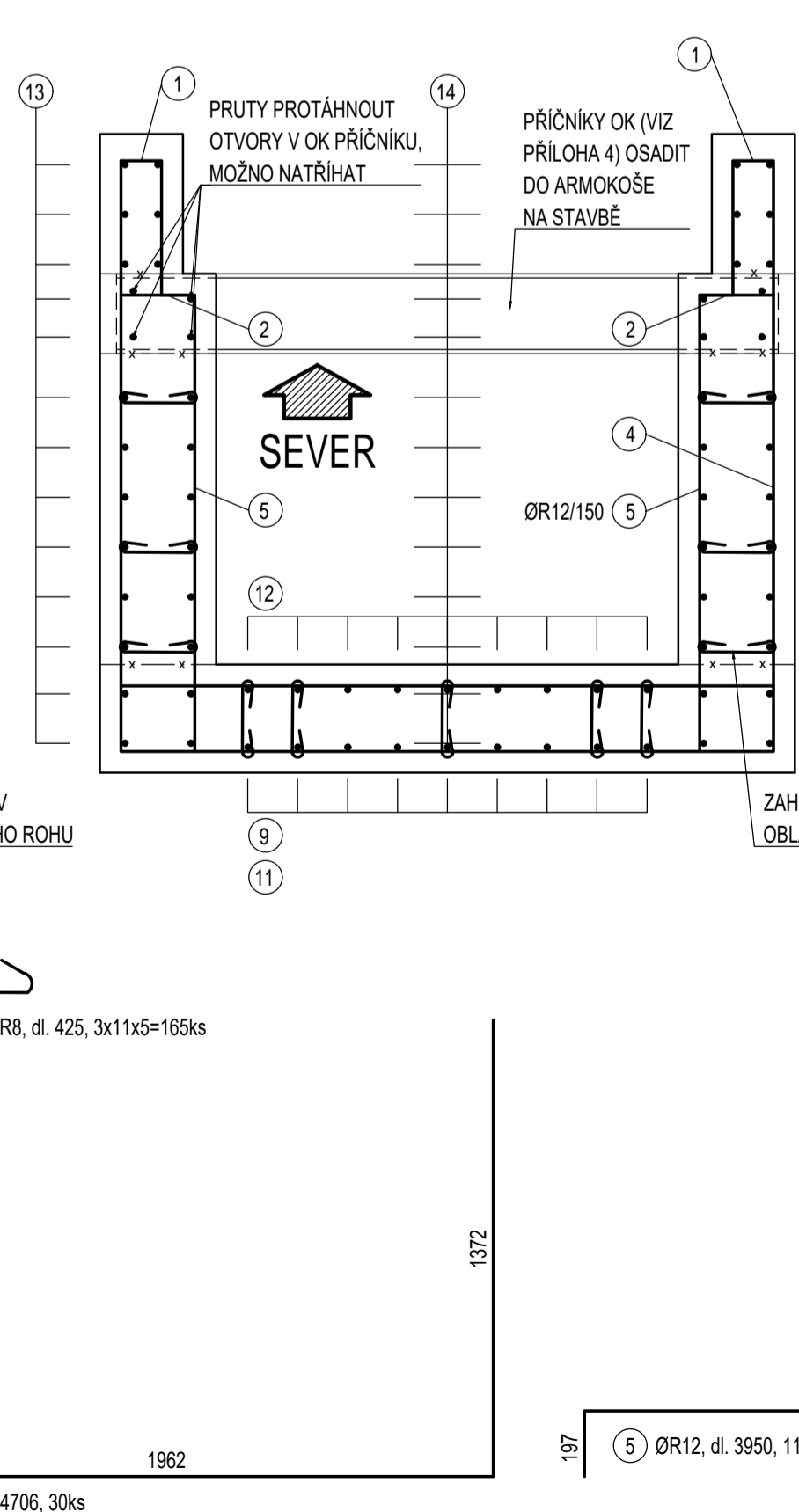
## ŘEZ A-A: PŘÍČNÝ ŘEZ

M 1:20



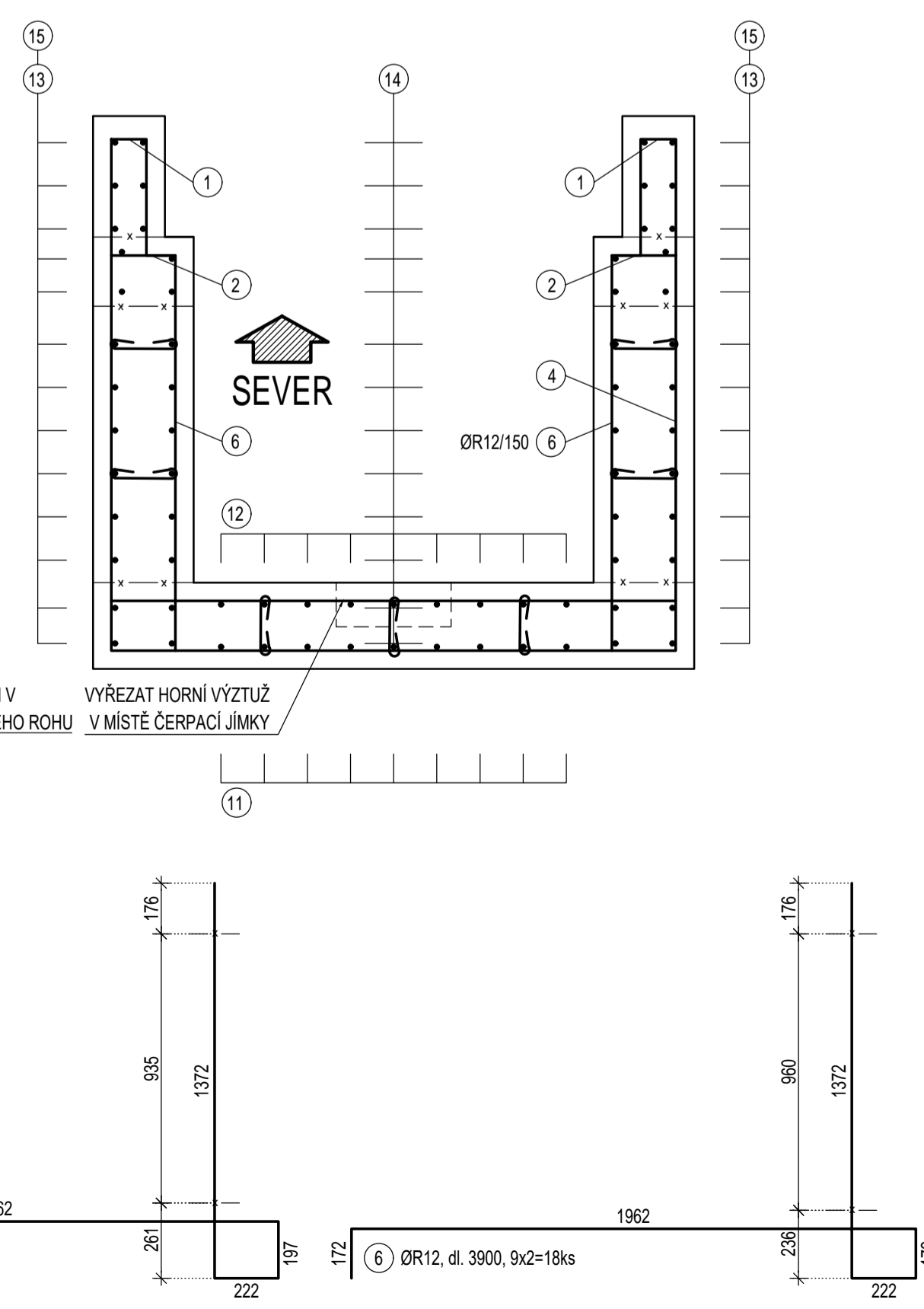
## ŘEZ B-B: PŘÍČNÝ ŘEZ

M 1:20



## ŘEZ C-C: PŘÍČNÝ ŘEZ

M 1:20



## VÝKAZ VÝZTUŽE:

POLOŽKA	Ø	DĚLKA	POČET	8	10	12	16	20	25	
ČÍSLO	OCEL	[mm]	[m]	[ks]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	
1	R	12	1.530	60						
2	R	12	1.422	60						
3	R	12	4.000	20						
4	R	12	4.706	30						
5	R	12	3.950	22						
6	R	12	3.900	18						
7	R	12	1.322	18						
8	R	12	1.886	9						
9	R	12	4.500	9						
10	R	12	1.886	9						
11	R	12	4.500	9						
12	R	12	5.223	9						
13	R	12	3.895	56						
14	R	12	3.795	56						
15	R	12	2.343	52						
16	R	12	1.764	16						
17	R	8	0.425	165	70,13					
CELK. DELKA DLE PROF.				[m]	70,13	0,00	1321,85	0,00	0,00	0,00
HMOTNOST PRO 1 bm				[kg/bm]	0,395	0,617	0,888	1,578	2,466	3,853
HMOTNOST DLE PROF.				[kg]	28	0	1174	0	0	0
HMOTNOST CELKEM				[kg]			1201			

## ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STAVEBNÍ - KATEDRA OCELOVÝCH A DŘEVĚNÝCH KONSTRUKCÍ



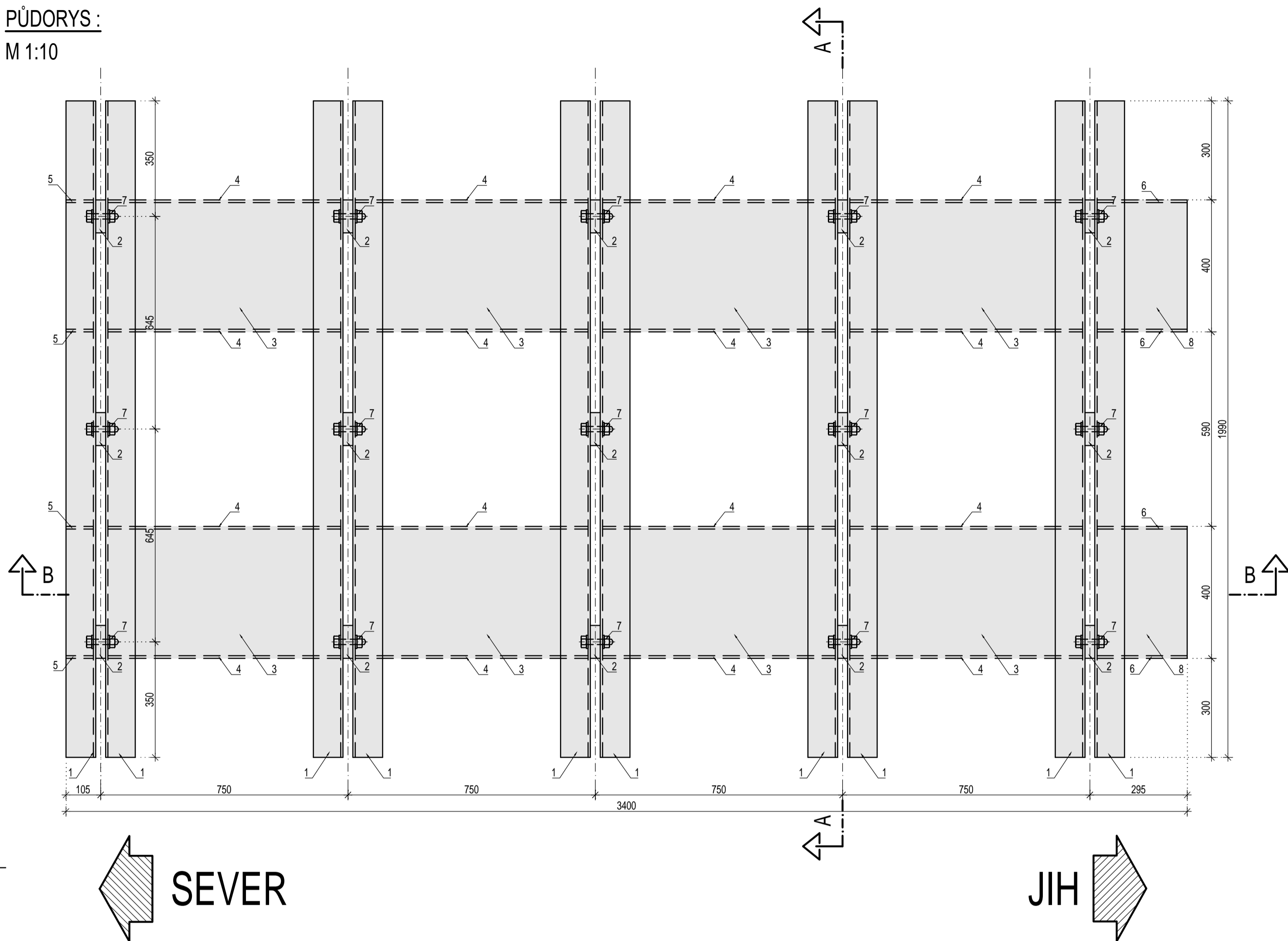
VYPRACOVAL Bc. JIŘÍ KAŠPÁREK	VEDOUCÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE doc. Ing. PAVEL RYJÁČEK, Ph.D.	MĚŘÍTKO 1:20
TEMA DIPLOMOVÉ PRÁCE PROGRESIVNÍ MOSTNÍ ZÁVĚR S INTELIGENTNÍMI PRVKY		DATUM LEDEN 2017
ZKUŠEBNÍ STAND		POČET FORMÁTŮ 8 x A4
OBSAH PŘÍLOHY VÝKRES VÝZTUŽE		ČÍSLO PŘÍLOHY 02

# VÝKRES TVARU OCELOVÉ KONSTRUKCE

POZNÁMKY:

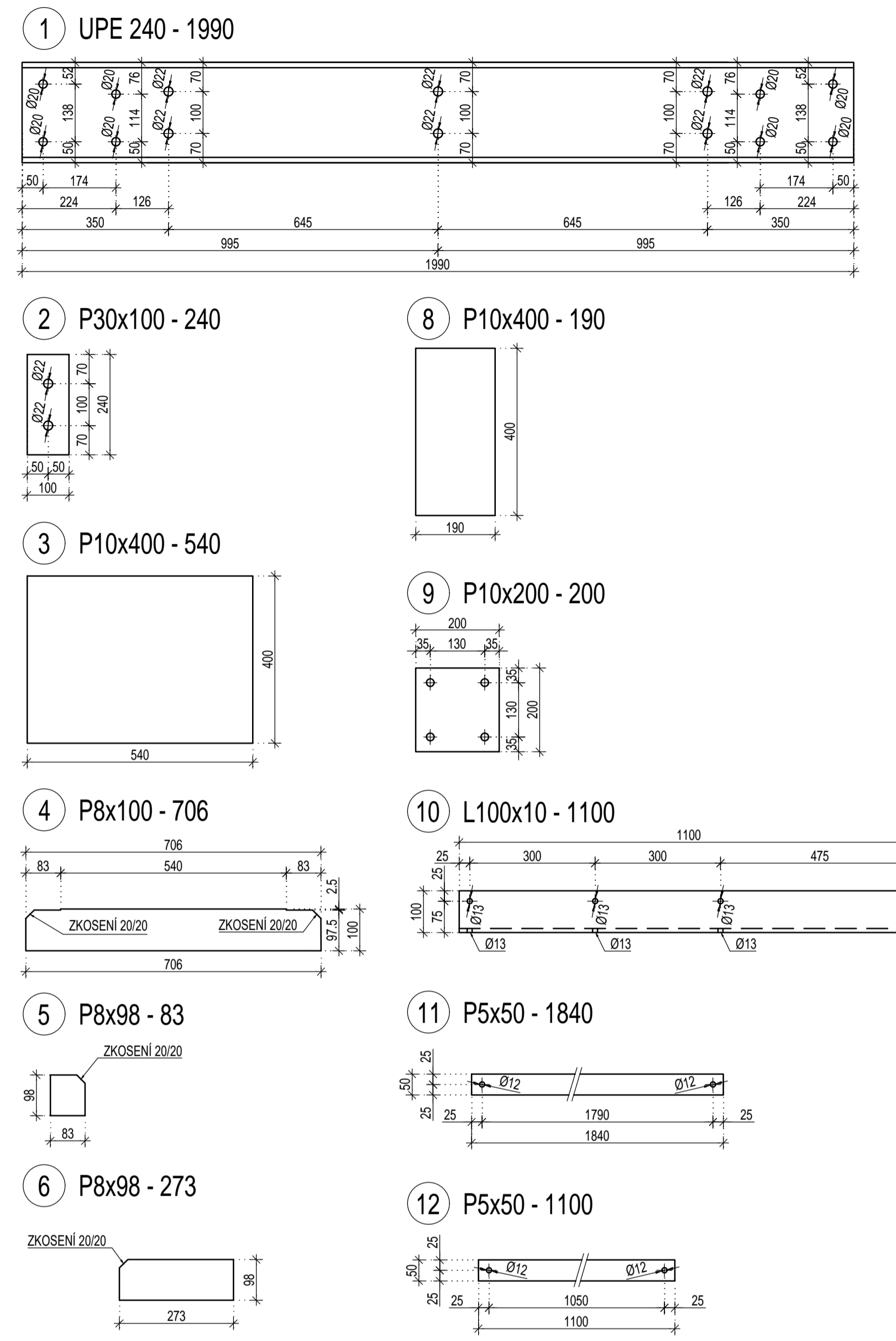
PŮDORYS:

M 1:10



SPECIFIKACE PRVKŮ PRO VÝROBU:

M 1:10

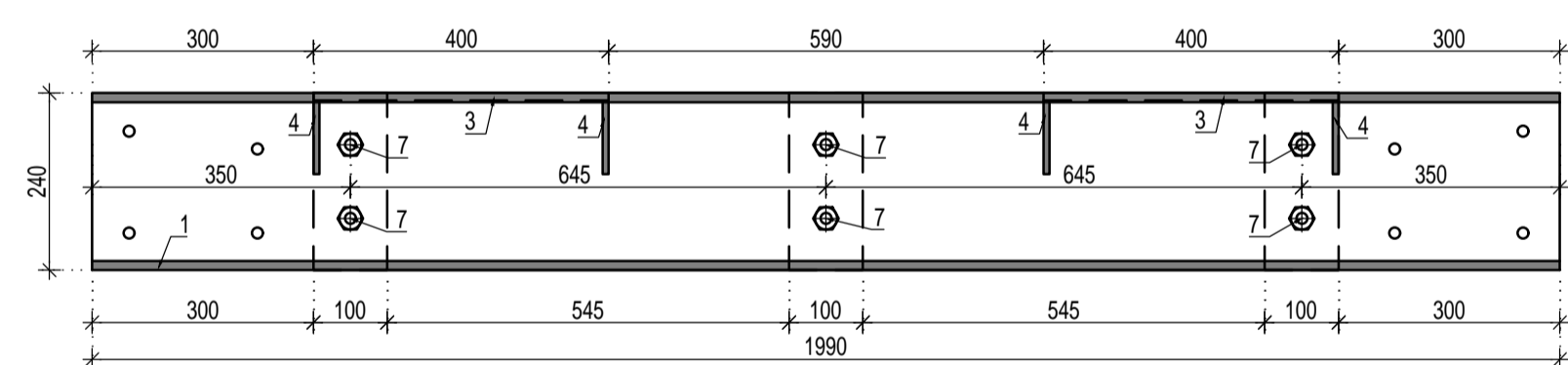


VÝKAZ MATERIÁLŮ:

1. OCEL		
OCELOVÁ KONSTRUKCE	S 355 J2+N	959 kg
ZÁBRADLÍ	S 235 JR	26 kg
SROUBY	10.9.	21 kg
<b>CELKEM</b>		<b>1006 kg</b>

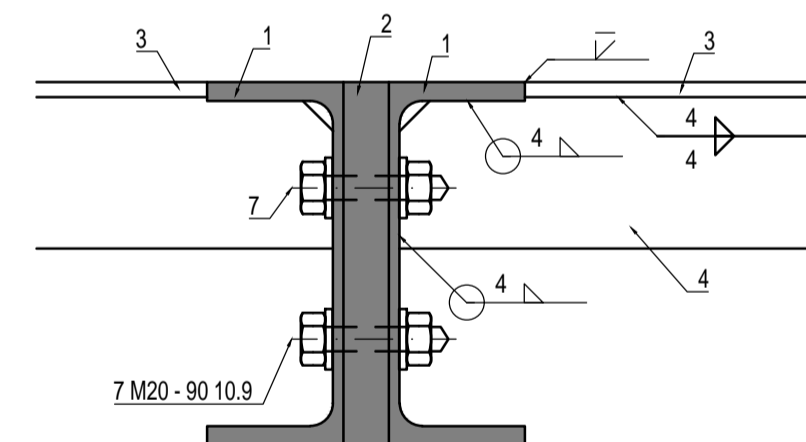
ŘEZ A-A: PŘÍČNÝ ŘEZ

M 1:10



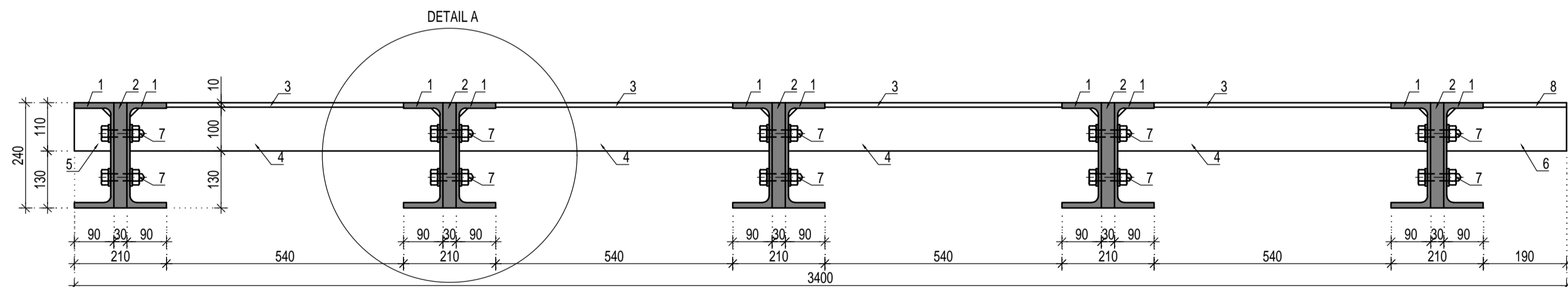
DETAIL A PŘÍPOJŮ OCELOVÉ KONSTRUKCE

M 1:5



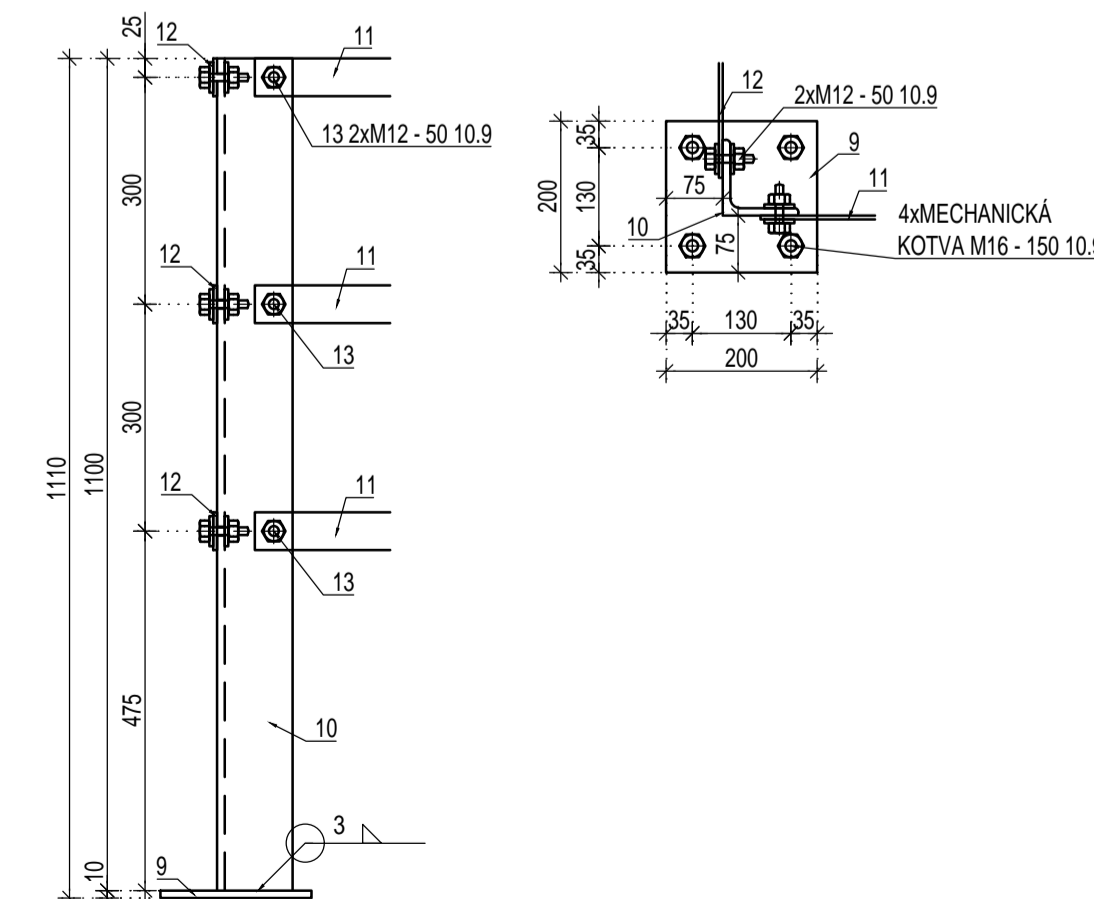
ŘEZ B-B: PODÉLNÝ ŘEZ

M 1:10



VÝKRES ZÁBRADLÍ

M 1:10



<b>ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE</b> FAKULTA STAVEBNÍ - KATEDRA OCELOVÝCH A DŘEVĚNÝCH KONSTRUKCÍ			
VYPRACOVAL Bc. JIŘÍ KAŠPÁREK		VEDOUCÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE doc. Ing. PAVEL RYJÁČEK, Ph.D.	
TEMA DIPLOMOVÉ PRÁCE PROGRESIVNÍ MOSTNÍ ZÁVĚR S INTELIGENTNÍMI PRVKY		MĚŘÍTKO 1:20	DATUM LEDEN 2017
ZKUŠEBNÍ STAND		POČET FORMÁTŮ 8 x A4	
OBSAH PŘELOHY VÝKRES TVARU OCELOVÉ KONSTRUKCE		ČÍSLO PŘELOHY <b>03</b>	