



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

# STACIONÁRNÍ DRTIČ ŽELEZOBETONOVÝCH PANELŮ - ANALÝZA DYNAMICKÝCH ÚČINKŮ DO ZÁKLADŮ STROJE

STATIONARY CRUSHER CONCRETE PANELS - ANALYSIS OF DYNAMIC EFFECTS IN THE MACHINE FOUNDATIONS

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Andrej Macejka

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Miroslav Škopán, CSc.

BRNO 2019

## Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství  
Student: **Bc. Andrej Macejka**  
Studijní program: Strojní inženýrství  
Studijní obor: Automobilní a dopravní inženýrství  
Vedoucí práce: **doc. Ing. Miroslav Škopán, CSc.**  
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

### **Stacionární drtič železobetonových panelů - analýza dynamických účinků do základů stroje**

#### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Analýza dynamických účinků, které jsou přenášeny z drtiče panelů do základů stroje a návrh na jejich snížení. Drtič je gravitační buchar s hmotností beranu 5000 kg, který dopadá z výšky 1 m.

#### **Cíle diplomové práce:**

Tvorba simulačního modelu v software MARC.

Vytvoření MKP modelu dynamických účinků v software MARC.

Na základě výpočtových výsledků návrh parametrů základu s co nejnižšími dynamickými účinky do okolí.

#### **Seznam doporučené literatury:**

SHIGLEY, Joseph E., Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS. Konstruování strojních součástí. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2010. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-2629-0.

LAW, Averill M. Simulation modeling and analysis. 4th ed. London: McGraw-Hill, c2007. McGraw-Hill series in industrial engineering and management science. ISBN 0071255192.

POLICKÝ, Zdeněk. Úpravárenské stroje. Brno: Vysoké učení technické, 1987.

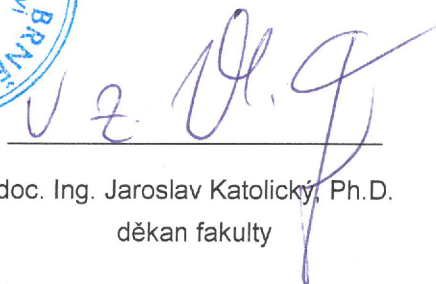
PACAS, Bohuslav. a kol., Dynamika stavebních a zemědělských strojů. Praha STNL, 1987.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19.

V Brně, dne 26. 10. 2018



prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.  
ředitel ústavu



doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## ABSTRAKT

Diplomová práca pojednáva o návrhu parametrov základu gravitačného bucharu Davon na drvenie železo-betónových panelov s hmotnosťou závažia 5t. Hlavným predmetom skúmania je havarijný stav kedy medzi baranom a šabotou nie je spracovaný materiál. Pri návrhu a analýze bude použitá simulácia úderu pomocou metódy konečných prvkov, pričom je nutné dodržať zadanú únosnosť pôdy.

## KLÍČOVÉ SLOVÁ

Buchar, MKP, základ stroja, gravitačný buchar, drvič

## ABSTRACT

This diploma thesis is concerned with design and proposal of parameters of drop hammer Davon for crushing of steel reinforced concrete panels with weight of the ram 5 t. The main topic is an emergency condition when there is no crushed material between ram and anvil. The design is established by simulation of an impact by finite element analysis with respect to required ground bearing capacity.

## KEYWORDS

Drop hammer, FEM, machine foundation, crusher



## **BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA**

MACEJKA, Andrej. Stacionární drtič železobetonových panelů - analýza dynamických účinků do základů stroje. Brno, 2019. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. 68 s. Vedoucí diplomové práce Miroslav Škopán.

## ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Prehlasujem že som túto diplomovú prácu vypracoval samostatne pod vedením vedúceho diplomovej práce pána doc. Ing. Miroslava Škopána, CSc. a Ing. Lukáša Zeizingera, s použitím literatúry uvedenej v zozname.

V Brně dne 24. května 2019

.....

Andrej Macejka

## POĎAKOVANIE

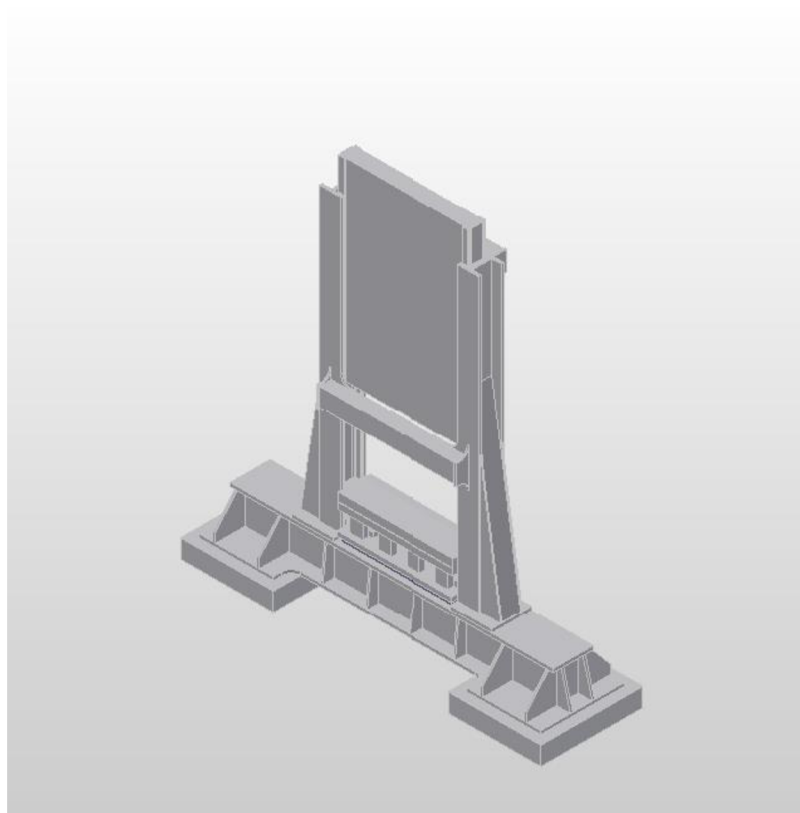
Ďakujem za podporu a cenné rady pri vypracovávaní diplomovej práce pánovi doc. Ing. Miroslavovi Škopánovi, CSc. a Ing. Lukášovi Zeizingerovi, ktorý mi pomohli pri riešení tejto práce. Ďalej by som chcel poďakovať svojej rodine za podporu pri štúdiu vysokej školy.

## OBSAH

Úvod .....	9
1 Ciele práce .....	10
2 Zadané parametre .....	11
3 Buchary.....	12
3.1 Gravitačný buchar Davon .....	12
4 Základ stroja .....	13
4.1 Dynamické účinky do základu budovy .....	14
4.2 Základ gravitačného bucharu .....	15
5 Návrh .....	19
5.1 Materiály základu .....	21
5.2 Analytický model bucharu .....	22
6 Výpočet pomocou metódy konečných prvkov .....	36
6.1 Konečno-prvková sieť .....	36
6.2 Okrajové parametre MKP .....	43
6.3 Zaťažovací stav .....	49
7 Vyhodnotenie .....	50
7.1 MKP analýza.....	50
Záver.....	55
Seznam použitých zkratok a symbolů .....	58
Zoznam príloh .....	61

## ÚVOD

Spracovanie materiálu nárazom patrí medzi najstaršie procesy v strojárstve. Medzi stroje ktoré pracujú na tomto princípe a pri pohybe nástroja využívajú voľný pád patria gravitačné buchary. Bežne sú gravitačné buchary používané na tvárnenie materiálu a výrobu produktu. Buchar analyzovaný v tejto práci je používaný na drvenie železo-betónových panelov, ktoré už nie sú ďalej potrebné a je nutné ich zlikvidovať a recyklovať. Pri tomto procese drvenia je kinetická energia barana pri kontakte s drveným materiálom premenená na deformáciu a deštrukciu. Značná časť energie ktorá nie je využitá na rozpojovanie materiálu je prenesená a pohltaná samotným rámom, základom stroja a okolím. Prenesená energia do okolia či už vo forme akustického tlaku alebo mechanických vibrácií je veľmi nežiadúca a môže viesť k poškodeniu budov, zdravia ľudí alebo samotného stroja. Časť stroja ktorá tomuto nežiadúcemu efektu zabraňuje je základ stroja, ktorý je aj predmetom návrhu v tejto práci, pričom je riešený výhradne stav kedy medzi baranom a šabotou nie je žiadny spracovávaný materiál. Tento stav je havarijný a znamená, že je všetka kinetická energia pohltaná strojom, základom stroja a okolím. Návrh základu je nutné vykonávať so zreteľom na realizovateľnosť, rozumnú zástavbovú veľkosť a únosnosť pôdy pod strojom.



*Obr. 1 Gravitačný buchar (drvič) Davon bez základu*

# 1 CIELE PRÁCE

Cieľom diplomovej práce je vypracovať konečno-prvkový model gravitačného bucharu na drvenie železobetónových panelov v programe MARC. Na základe dynamickej MKP analýzy v tomto programe a analytického výpočtu o jednom a troch stupňoch voľnosti určiť vhodné parametre a konštrukciu základu stroja, aby nedošlo k prekročeniu zadanej únosnosti pôdy.

## 2 ZADANÉ PARAMETRE

Tab. 1 Zadané parametre

Hmotnosť barana	5000kg
Výška voľného pádu barana	1 m
Únosnosť pôdy	R5 podľa ČSN 72 1001
Materiál rámu	S355J2

Tab. 2 Únosnosť pôdy podľa ČSN 72 1001

Zatriedenie skalných hornín podľa pevnosti			Únosnosť $R_t$ MPa		
Trieda	Pevnosť $\sigma_c$ (MPa)	Pevnosť	Stredná hodnota diskontinuit- vzdialenosť (mm)		
			Veľmi malá až malá >600	Stredná až veľká 600 až 60	Veľmi veľká až extrémne veľká <60
R1	> 150	veľmi vysoká	8	4	2,5
R2	50 až 150	vysoká	4	2	1,2
R3	15 až 50	stredná	1,6	0,8	0,5
R4	5 až 15	nízka	0,8	0,4	0,25
R5	1,5 až 5	veľmi nízka	0,6	0,3	0,2
R6	0,5 až 1,5	extrem. nízka	0,4	0,25	0,15

Tab. 3 Vlastnosti oceli S355J2

Oceľ S355J2	
Druh oceli	Nelegovaná akostná konštrukčná oceľ
Označenie podľa ČSN EN 10027-2	1.0577
Medza klzu $R_{eH}$	355-275 MPa
Medza pevnosti $R_m$	450-630 MPa
Youngov modul pružnosti	190-210 GPa
Poissonova konštanta	0.27-0.3
Hustota	7850 kg/m <sup>3</sup>

### 3 BUCHARY

Buchar je stroj využívajúci kinetickú energiu nahromadenú v padajúcej časti stroja na deformačnú prácu, skladá sa z rámu, barana a šaboty. [1]

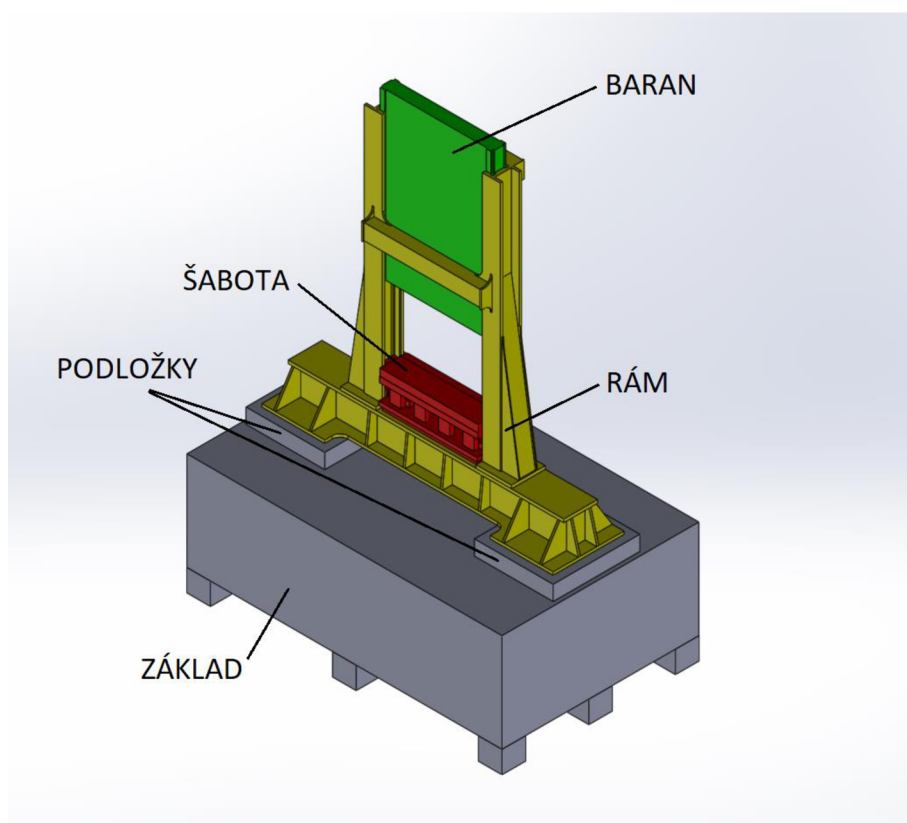
Buchary sa delia podľa typu stroja na jednočinné a dvojčinné, alebo na šabotové a bezšabotové.

U bezšabotového protiúderového bucharu nahradzuje šabotu spodný baran, ktorý sa pohybuje proti hornému baranu. Šabotové buchary majú šabotu uloženú v základe stroja.

U jednočinných bucharov pohyb barana spôsobuje gravitačné zrýchlenie. U dvojčinných bucharov je pohyb nadol urýchľovaný energiou pary, vzduchu, plynu, kvapaliny alebo pružiny. Baran sa do vrchnej časti zdvíha pomocou pohonu stroja, pričom jeho pádová rýchlosť býva obvykle 4 až 8 m.s<sup>-1</sup>. Veľkosť a pracovná schopnosť je udávaná prácou (energiou), ktorú vykoná baran bucharu pri jedinom najsilnejšom údere. Táto práca sa nazýva rázová alebo úderová práca bucharu. [2]

#### 3.1 GRAVITAČNÝ BUCCHAR DAVON

Buchar analyzovaný v tejto práci má baran, ktorý padá voľným pádom, je to teda gravitačný buchar. Od bežných typov bucharov, ktoré sa využívajú hlavne na tvárnenie kovových materiálov sa líši druhom pracovnej činnosti a konštrukciou. Buchar Davon sa používa na drvenie železo-betónových panelov. Použitý je zvarovaný rám, ktorý je ľahší a menej tuhý ako bežne používaný a šabota je výrazne ľahšia voči baranu. Pracovná frekvencia úderov je 0,1-0,6 Hz. Zdvih barana na hor je vykonávaný elektromechanicky alebo pomocou priamočiareho hydromotora. Stroj je ovládaný človekom (operátorom), ktorý má za úlohu posúvanie drveného materiálu do stroja a zároveň uvoľňovanie barana.



Obr. 2 Zostava bucharu Davon



## 4 ZÁKLAD STROJA

Základy pre strojné zariadenie bývajú vyhotovené špeciálne podľa typu zariadenia, hlavne podľa jeho hmotnosti a rozsahu frekvencií pracovných vibrácií [3]. Ich úloha je pevné stavenie stroja v pracovnej polohe a izolovanie vibrácií prenášaných do okolia. Na obrázku 3. sú schematicky znázornené vyhotovenia základu.

### BLOKOVÝ ZÁKLAD

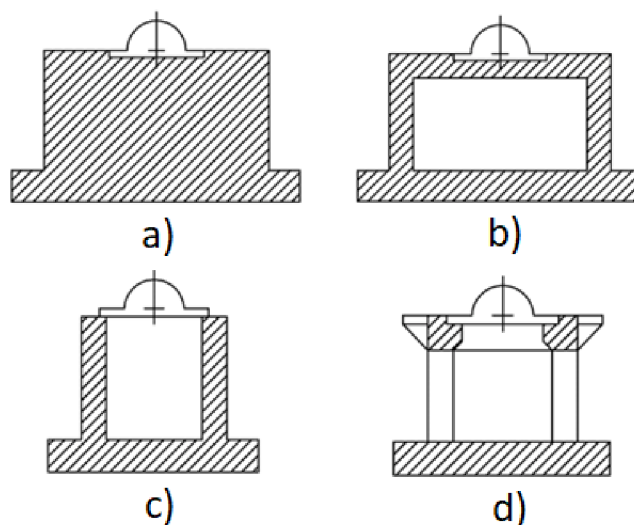
Je charakteristický veľkou váhou, tuhosťou a vysokou vlastnou frekvenciou. Hodí sa preto najmä pre ťažké zariadenia s nízkou frekvenciou pracovných vibrácií (napríklad lis, buchary). (obr. 3 a)

### KAZETOVÝ ZÁKLAD

Je charakteristický nižšou váhou, tuhosťou a vyššou vlastnou frekvenciou. (obr. 3 b)

### ZÁKLAD STENOVÝ A STĹPOVÝ

Je základ s nižšou váhou a nižšou vlastnou frekvenciou. Základy tohoto typu sa hodia najmä pre stroje s vysokou vlastnou frekvenciou (napríklad turbíny). (obr. 3 c, d)



Obr. 3 Typy základov strojného zariadenia. a) blokový základ, b) kazetový základ, c) stenový základ, d) stĺpový základ [3]

## 4.1 DYNAMICKÉ ÚČINKY DO ZÁKLADU BUDOVY

Problémy s neprístupnými mechanickými vibráciami môžu byť veľmi závažné a ich odstraňovanie finančne a časovo náročné. Medzi obvyklé technologické zariadenia ktoré vyžadujú posúdenie z hľadiska dynamických účinkov patria najmä: parné a plynové turbíny, generátory, alternátory, čerpadlá, kompresory, žeriavy, dopravníky, vibrácie potrubia, lisy a buchary. Bežne sa môžeme stretnúť aj so zdrojmi ktoré sa nachádzajú mimo posudzovanú konštrukciu, napr. električková, automobilová, železničná doprava ktoré sa ďalej šíria a môžu vyvolať poškodenie okolitých budov. Viditeľné poruchy stavebných konštrukcií nastávajú obvykle keď amplitúdy posuvov pri kmitaní nadzemných častí dosahujú rádov desiatín milimetra [4].

Z hľadiska charakteru vyvedených dynamických zaťažovacích účinkov môžeme rozlíšiť [4]:

- rotačné stroje – zdrojom vibrácii je nevyvážená hmota
- piestové stroje - zdrojom vibrácii je periodický translačný, alebo rotačný pohyb
- zariadenia vyvodzujúce rázy – zdrojom vibrácii sú silové pulzy v dĺžke trvania rádu jednotiek až desiatok milisekúnd spôsobené dopadajúcou hmotou

### 4.1.1 PREDIKCIA DYNAMICKEJ ODOZVY POMOCOU DYNAMICKÝCH VÝPOČTOV

Dynamické výpočtové analýzy sú užitočnou pomôckou umožňujúcou zhodnotenie návrhu technického riešenia alebo základu zariadenia pod strojom vyvodzujúcim dynamické účinky do okolia, prípadne identifikáciu problému.

Podmienkou pravdivého dynamického výpočtu, ktorý realisticky modeluje predpokladané dynamické chovanie, sú korektné a kompletne vstupné podklady. Ďalej je nutné definovať útlm sústavy.

Dynamické výpočty sa obvykle robia metódou konečných prvkov na komplexných, spravidla 3D výpočtových modeloch, zahrňujúcich celý posudzovaný problém [4].

### 4.1.2 OPATRENIA K ZNÍŽENIU MECHANICKÝCH VIBRÁCIÍ A ANTIVIBRAČNÝ IZOLAČNÝ SYSTÉM

Medzi základné princípy vedúce k redukcii šírenia dynamických účinkov do okolia patria [4]:

- dostatočná hmotnosť základu – v prípade blokových základov na zemine je obvykle odporúčané aby hmotnosť základu bola približne 2,5 násobok hmotnosti technologického zariadenia
- dôsledné oddelenie základových konštrukcií stroja od základových konštrukcií a podláh budov dilatačnými špárami a tlmičmi vibrácií.

### 4.1.3 PASÍVNE TLMIČE VIBRÁCIÍ

Pasívne tlenie vibrácií odkazujú na izoláciu alebo zmiernenie vibrácií pomocou pasívnych techník, ako sú gumové podložky, alebo mechanické pružiny. Dnes existuje široký výber pasívnych tlmiačich prvkov vhodných pre rôzne aplikácie. Bežné pasívne izolačné systémy sú:

- Pneumatické, alebo vzduchové izolátory – nádoba so stlačeným vzduchom, použitie ako tmiče automobilov alebo tmiče priemyselného vybavenia
- Mechanické pružiny a pružinové tmiče – používané pre vysoké namáhanie napr. v tlmiačich systémoch budov a v priemysle. Niekedy sú použité v kombinácii s betónovým blokom
- Podložky alebo pláty z flexibilného materiálu ako napríklad guma, korok, pena, a laminované materiály. Tieto sú používané pod strojné zariadenia, vo vozidlách, alebo budovách ako tmiče zvuku a vibrácií.
- Odlievané a lepené gumové a elastomérové izolátory alebo úchyty – sú používané ako úchyty zariadený ako napríklad motor v automobile.

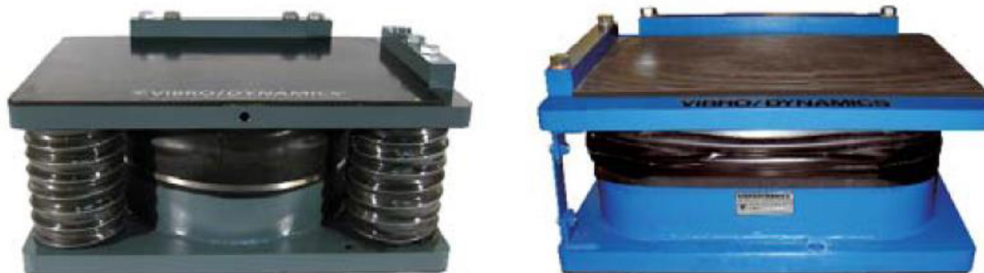
## 4.2 ZÁKLAD GRAVITAČNÉHO BUCARU

Budiaci impulz u gravitačného bucharu, ktorý vybudzuje mechanické vibrácie je vyvolaný krátkym a energickým úderom barana do šaboty. Tento úder vyvolá osciláciu bucharu, ktorá je ďalej prenášaná cez upevňovací systém a základ do pôdy na ktorej je buchar usadený a do okolia.

Pre tlenie účinkov gravitačného bucharu sú používané blokové základy ktoré sa skladajú z betónového bloku, ktorý je uložený na elastomérových vrstvených izolátoroch (obr.6), alebo visko-elastických izolátoroch (obr.5). Betónový blok môžeme nazvať aj zotrvačná hmota [5].

**ELASTOMÉROVÉ IZOLÁTORY** sú väčšinou vyhotovené ako špeciálna vrstvená pryž, pričom žiadané vlastnosti tejto pryže sú vysoký materiálový útlm, odolnosť voči olejom, vysoká únosnosť. Výhoda elastomérových izolátorov je nízka cena, lepšia izolácia o 60-80% ako v prípade tradičného dubového dreva, ale izolácia od okolia nie je taká dobrá ako v prípade visko-elastických tlmiačov a je nutné zväčšenie zotrvačnej hmotnosti. Elastomérové izolátory sú náchylné na opotrebenie v prípade kontaminácie abrazívnymi časticami. [6]

**VISKO-ELASTICKÉ IZOLÁTORY** sa skladajú z pružín a viskózneho tmiča (obr.5). Tieto izolátory poskytujú oveľa väčšiu izolačnú schopnosť ako elastomérové izolátory. V minulosti boli buchary posadené na veľkých hranoloch z dubového dreva, ktorý neposkytujú dnes už dostatočný útlm a od tohto spôsobu sa upúšťa. [6].



*Obr. 5 Visko-elastický izolátor firmy Vibrodynamics [5]*

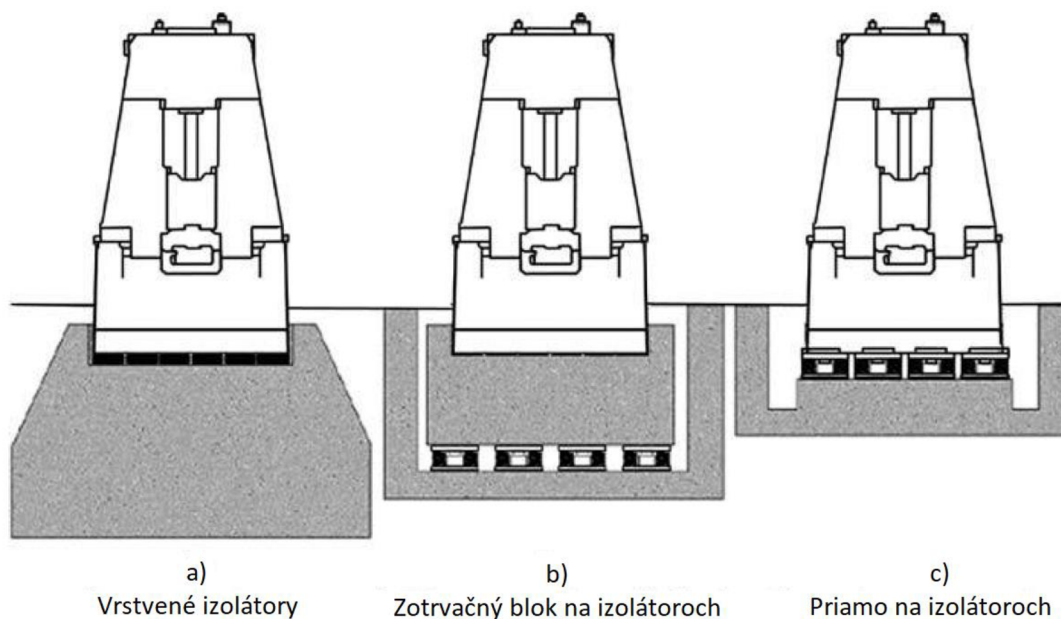


*Obr. 6 Vrstvený elastomérový izolátor [6]*



*Obr. 7 Modulárne elastomérové izolátory firmy Vibrodynamics. Napravo celok v ochrannom obale chrániaci proti kontaminácii [5]*

System tmený pomocou vrstvených elastomérových izolátorov (Obr. 8 a) výrazne znižuje vertikálny pohyb stroja po údere, avšak len v obmedzenej miere a tak je nutná veľká zotrvačná hmotnosť. Dokáže stlmiť vibrácie o 20-60% [6]. V prípade visko-elastických izolátorov (obr. b, c) je tmenie oveľa výraznejšie. Upevňovací systém je navrhnutý tak že dovoľuje vertikálny pohyb celku. V niektorých prípadoch je možné usadenie bucharu priamo na visko-elastické izolátory, ale najväčší útlm dosiahneme kombináciou s betónovým základom blokového typu.



Obr. 8 Typy základov bucharu [6]



*Obr. 9 Inštalácia elastomérových vrstvených izolátorov pre buchar s 10t baranom, firma Vibrodynamics [5]*

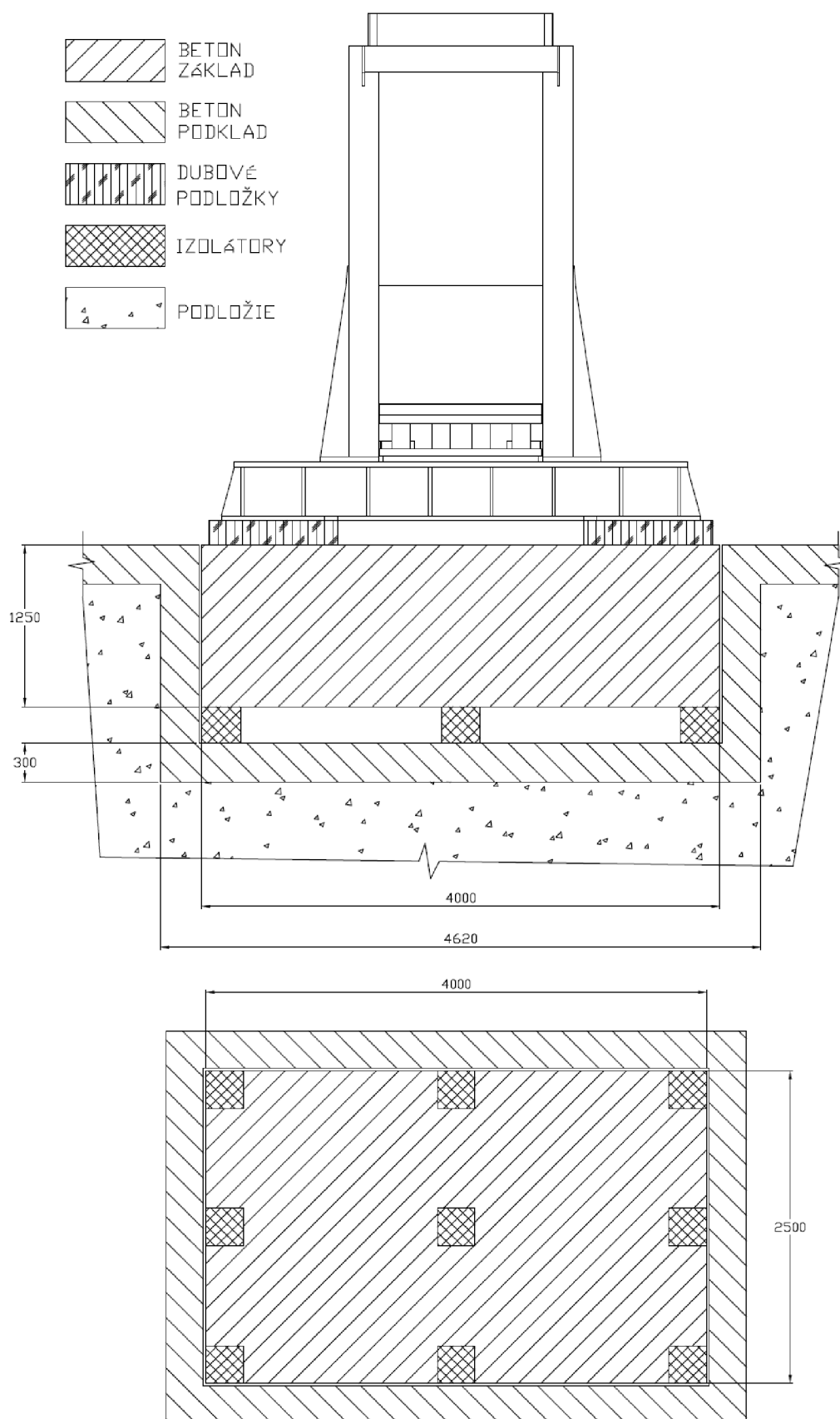
## 5 NÁVRH

Pri návrhu základu gravitačného bucharu Davon musíme brať do úvahy hlavne požiadavku na neprekročenie povoleného zaťaženia pôdy (tab. 3) a navrhnuť základ ktorý ovplyvní okolie mechanickými vibráciami čo najmenej. Z predchádzajúcej rešerše vyplýva, ako by mal výsledný základ vyzeráť. Bude použitý betónový blok (blokový základ), nakoľko sa jedná o stroj vybudzujúci vibrácie o nízkej frekvencii. Aby nedošlo k zvýrazneniu vibrácií v základe, musí mať tento základ čo najviac odlišnú vlastnú frekvenciu, v tomto prípade betónový blok, ktorý má vysokú tuhosť a veľkú hmotnosť má aj vysokú vlastnú frekvenciu. Ďalej bude použitá vybetónovaná jama, ktorá bude slúžiť ako podklad pre uloženie a ukotvenie izolátorov a v určitej miere rozloží sily od izolátorov. Hrúbka stien a betónového podkladu jamy je zvolená 300mm. Návrh tvaru a rozmery sú zrejmé z obr. 10

Izolátory budú použité visko-elastické, nakoľko majú najväčšiu schopnosť útlmu. Výhoda je aj ľahšie modelovanie vlastností tohto tlmiča vďaka takmer lineárnym charakteristikám pružín a tlmiča, na rozdiel od elastomérových izolátorov, kde ich charakteristiky tuhosti a útlmu sú zložitejšie. Pre čo najväčší útlm budú medzi baran a základ umiestnené ešte podložky z dubového dreva vo forme dosiek zaťažovaných v tangenciálnom smere na smer vlákien.

Pri návrhu je použitý analytický model bucharu o jednom a troch stupňoch voľnosti a následne model konečných prvkov vytvorený v programe NX I-deas a riešený pomocou programu Marc Mentat.





Obr. 10 Zjednodušený nákres základového systému gravitačného bucharu Davon



## 5.1 MATERIÁLY ZÁKLADU

### 5.1.1 BETÓNOVÝ BLOK

Typický betónový blok sa môže javiť ako dokonale tuhý voči pôde na ktorej leží, ale nie je tomu tak. V našom výpočte uvažujeme betón s určitými fyzikálnymi vlastnosťami ako Youngov modul pružnosti, hustota. Tieto hodnoty ako aj pevnosť betónu sú uvedené v tab. 4. Betón pre blokový základ by mal mať podľa dostupnej literatúry pevnosť min. 15 MPa. Týmto požiadavkám s presahom vyhovuje trieda C20/25. Betonáž by mala byť vykonaná v priebehu jednej operácie. Oceľová výstuž by mala byť zhotovená z 16-25 mm tyčí v troch smeroch a 200-300cm od seba. Pevnosť a detailný technologický postup výroby betónového bloku ale nie je predmetom tejto práce preto sa mu venujem len okrajovo. [7]

### 5.1.2 PODLOŽKY Z DUBOVÉHO DREVA

Pre zväčšenie útlmu celku sú medzi rám bucharu a základ umiestnené dubové podložky. Dubové drevo je tradične používané ako materiál pre tlmenie strojných zariadení a to najmä pre svoju kombináciu vlastností ako je relatívne vysoká pevnosť, pružnosť a relatívne vysoký materiálový útlm. V našom prípade budú použité podložky zaťažené tangenciálne na smer vlákien, z toho vyplývajú materiálové parametre uvedené v tab. 4.

Tab. 4 Materiálové parametre základu [8], [9], [10]

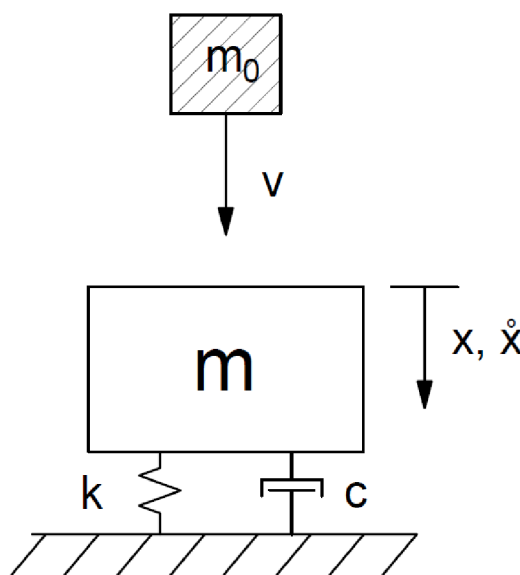
	<b>Beton s výstužou C20/25</b>	<b>Dubové drevo</b>
Objemová hmotnosť	$\rho_b = 2400 \text{ kg/m}^3$	$\rho_d = 690 \text{ kg/m}^3$
Modul pružnosti	$E_b = 30 \text{ GPa}$	$E_{dub} = 1 \text{ GPa}$
Pevnosť	$f_{ck} = 20 - 25 \text{ MPa}$	$\sigma_d = 52 - 69 \text{ MPa}$

## 5.2 ANALYTICKÝ MODEL BUCARU

Dynamické chovanie bucharu môže byť vymodelované matematicky a týmto predpovedané jeho správanie. Pri matematickej analýze modelu je buchar rozdelený na jednotlivé diskkrétne prvky, pričom každý z nich je nositeľom konkrétnej energie. Týmto prvkami sú hmotné body, ktoré sú nositeľmi kinetickej energie, nehmotné pružiny, ktoré sú nositeľmi potenciálnej energie a nehmotné tlmiče, ktoré disipujú energiu. [11] Pohybové rovnice takejto sústavy tvorí potom sústava obyčajných diferenciálnych rovníc s budením na pravej strane. Hlavnou vlastnosťou takehoto modelu je konečný stupeň voľnosti. Najjednoduchšia je pritom sústava o jednom stupni voľnosti (Obr. 10), ktorá sa používa pre hrubý odhad zložitej sústavy, kde sa zaujímate o najnižšie vlastné frekvencie sústavy [12]. Pri modeli o troch stupňoch voľnosti je výpočet sústavy zložitejší, ale viac sa zhoduje s realitou.

### 5.2.1 VÝPOČET O JEDNOM STUPNI VOĽNOSTI

Model o jednom stupni voľnosti je zostavený tak, že hmotnosť celého bucharu aj so základom je uvažovaná ako hmotnosť  $m$ . Do tejto hmotnosti ale nie je započítaná hmotnosť barana, lebo uvažujeme že po náraze dôjde k odrazeniu a baran nebude oscilovať spolu s bucharom a základom. Počiatočná podmienka je vypočítaná ako počiatočná rýchlosť celku  $v_0$ , ktorá vychádza zo zákona zachovania energie a zákona zachovania hybnosti (rov. 5.4, 5.5). Vo výpočte nie je uvažovaná tuhosť a tlmenie rámu a základu, ale iba tuhosť a tlmenie samotných izolátorov  $k$  a  $c$ . Do výpočtu nie je zahrnuté materiálové tlmenie rámu, podložiek ani základu a predpokladá sa, že všetka kinetická energia barana bude prenesená nárazom do rámu a základu. Týmto pádom môžeme predpokladať že v reálnom prípade pri rovnakej hodnote tuhosti izolátorov bude maximálna amplitúda celku nižšia.



Obr. 10 Výpočtová schéma bucharu o jednom stupni voľnosti

**VÝPOČET ZÁKLADU**

$a = 2,5 \text{ m}$  ... hĺbka základu

$b = 4 \text{ m}$  ... šírka základu

$c = 1,25 \text{ m}$  ... výška základu

$\rho_b = 2400 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$  ... hustota betónu

$$V = a \cdot b \cdot c = 12,5 \text{ m}^3 \quad (1)$$

$$m_{\text{základ}} = \rho_b \cdot V = 3 \cdot 10^4 \text{ kg} \quad (2)$$

kde:

$V$  ... objem základu [ $\text{m}^3$ ]

$m_{\text{základ}}$  ... hmotnosť základu [kg]

Rýchlosť barana pri náraze vychádzajúca zo zákona zachovania energie a rýchlosť celku po náraze barana vychádzajúca zo zákona zachovania hybnosti.

$h = 1 \text{ m}$  ... výška voľného pádu barana

$m_{\text{baran}} = 5000 \text{ kg}$  ... hmotnosť barana

$m_{\text{rám}} = 4551 \text{ kg}$  ... hmotnosť rámu bucharu

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} = 4,429 \text{ m/s} \quad (3)$$

$$v_0 = \frac{m_{\text{baran}} \cdot v}{m_{\text{rám}} + m_{\text{základ}} + m_{\text{baran}}} = 0,56 \text{ m/s} \quad (4)$$

kde:

$v$  ... rýchlosť barana pri dopade [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]

$v_0$  ... rýchlosť celku po náraze barana [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]

Pre popis tlmenia systému je používané pomerné tlmenie  $D$ , ktoré udáva v akej miere je energia po vybudení disipovaná. Pomerné tlmenie je bezrozmerná veličina a môžeme ho vyjadriť ako [14]:

$$D = \frac{c}{c_c} \quad (5)$$

kde:

$c$  ... skutočné tlmenie systému [Ns/m]

$c_c$  ... kritické tlmenie systému [Ns/m]

$D$  ... pomerné tlmenie [-]

Kritické tlmenie je také, v ktorého prípade dôjde k zastavenie kmitajúceho systému v čo najkratšom možnom čase.

Rozlišujeme štyri základne stavy na základe miery útlmu popísané pomerným tlmením  $D$ , a to [14] :

**Bez tlmenia**  $D = 0$

**Podkriticky tlmené**  $0 < D < 1$

**Kriticky tlmené**  $D = 1$

**Nadkriticky tlmené**  $D > 1$

Uvažujeme že tlmenie bude 15%, to znamená že percentuálny podiel na konci každého  $n$ -tého cyklu bude  $0,85^n$  krát počiatočná energia [14].

$$\Delta E_n = E_n - E_{n+1} \quad (6)$$

$$\frac{\Delta E_n}{E_n} = e^{\frac{4\pi D}{\sqrt{1-D^2}}} = 0,15 = 15\% \quad (7)$$

$$\Rightarrow D = 0,013$$

kde:

$\Delta E_n$  ... disipovaná energia za jednu periódu [J]

$E_n$  ... energia počiatočnej periódy [J]

Chceme vypočítať maximálnu výchylku systému  $A_{max}$ , potrebujeme teda nájsť extrém funkcie amplitúdy. Z toho dôvodu funkciu popisujúcu výchylku systému v čase zderivujeme a postavíme rovno nule. Z rovnice vyjadríme čas  $t$  a ten dosadíme do rovnice. Získame tak rovnicu pre určenie maximálnej amplitúdy  $A_{max}$  [13]. Za túto maximálnu amplitúdu si volíme hodnotu, ktorú považujeme za adekvátnu výchylku systému. V tomto prípade zvolíme hodnotu 10 mm, čo je hodnota, ktorá je prijateľná z hľadiska nadväznosti bucharu na ďalšej technológii, ako sú podávače, dopravníky atď. Na základe tohto prepokladu vyjadríme z rovnice vyjadríme tuhosť  $k$ .

$$A = \frac{v}{\omega \cdot \sqrt{1-D^2}} \cdot e^{-\frac{D}{\omega}t} \sin \cdot \omega_z \cdot \sqrt{1-D^2} \cdot t \quad (8)$$

$$\frac{dA}{dt} = 0 \Rightarrow t = \frac{\tan^{-1} \cdot \frac{\sqrt{1-D^2}}{D}}{\omega_z \cdot \sqrt{1-D^2}} \quad (9)$$

$$A_{max} = \frac{v \cdot m_{baran}}{\sqrt{k_i \cdot (m_{rám} + m_{základ})}} \exp\left(\frac{-D}{\sqrt{1-D^2}} \tan^{-1} \frac{\sqrt{1-D^2}}{D}\right) \quad (10)$$

$$= 10 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$\Rightarrow k_i = 11 \cdot 10^7 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

kde:

$A$  ... amplitúda [m]

$A_{max}$  ... maximálna amplitúda [m]

$t$  ... čas [s]

$k_i$  ... tuhosť izolátorov [ $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ ]

Následne môžeme získať netlmenú a tlmenú vlastnú frekvenciu.

$$\omega_z = \sqrt{\frac{k_i}{(m_{rám} + m_{základ})}} = 55.677 \text{ rad/s} \quad (11)$$

$$\omega_n = \omega_z \sqrt{1-D^2} = 55.676 \text{ rad/s} \quad (12)$$

$$f_0 = \frac{\omega_n}{2\pi} = 8,86 \text{ s}^{-1} \quad (13)$$

kde:

$\omega_z$  ... vlastná uhlová rýchlosť netlmených vibrácií [rad/s]

$\omega_n$  ... vlastná uhlová rýchlosť tlmených vibrácií [rad/s]

$f_0$  ... vlastná frekvencia tlmených vibrácií [ $s^{-1}$ ]

Z pomerného tlmenia získaného v rovnici **XX** získame pomocou vzťahu **XX** tlmenie izolátora

$$D = \frac{c_i}{2\sqrt{k_i \cdot (m_{rám} + m_{základ})}} \Rightarrow c = D \cdot 2\sqrt{k_i \cdot (m_{rám} + m_{základ})} \quad (14)$$

$$c_i = 4,59 \cdot 10^4 \frac{N \cdot s}{m}$$

kde:

$c_i$  ... tlmenie izolátorov [ $\frac{N \cdot s}{m}$ ]

#### VÝPOČET TLAKU NA PÔDU

$$F = k_i \cdot A_{max} = 1,23 \cdot 10^6 N \quad (15)$$

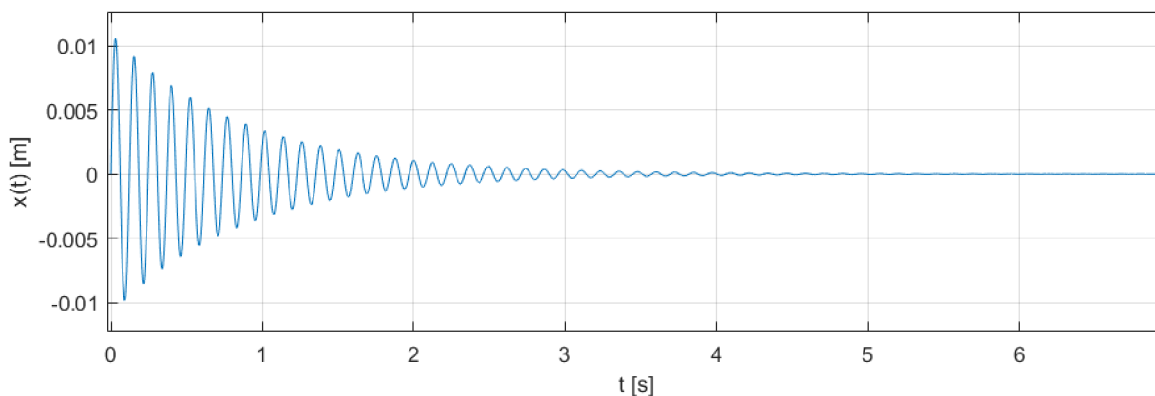
$$\sigma = \frac{F}{S} = \frac{F}{y \cdot x} = 0,123 \cdot 10^6 Pa \quad (16)$$

kde:

$F$  ... sila na podložie [N]

$\sigma$  ... tlak na podložie [Pa]

$\sigma < R_t$  ... vypočítaný tlak na pôdu od základu je menší ako maximálna dovolená únosnosť pôdy triedy R5 pri veľmi veľkej hodnote diskontinuit  $R_t = 0,2 MPa$ .



Obr. 11 Graf amplitúdy v čase modelu o 1° voľnosti

Amplitúdová charakteristika bola získaná a vykreslená vo výpočtovom programe Matlab. Z grafu závislosti amplitúdy na čase je zřejmé že k úplnému zastaveniu bucharu by teoreticky prišlo po asi 5-6 sekundách.

#### VYHODNOTENIE

Z výpočtu boli zistené parametre izolátora  $k_i = 11 \cdot 10^7 \text{ N/m}$  a  $c_i = 4,59 \cdot 10^4 \text{ Ns/m}$  (rov. 10, 14)

Model s jedným stupňom voľnosti je nepresný a od reálneho stavu sa môže líšiť, a to hlavne preto, lebo neboli zahrnuté pružnosti a materiálové útlmy ostatných prvkov bucharu ako rám a základ. Môžeme ale predpokladať že hodnoty budú rádovo podobné a umožnia nám bližší odhad počiatočných hodnôt pre výpočet pomocou MKP.

### 5.2.2 VÝPOČET O TROCH STUPŇOCH VOĽNOSTI

Schéma (obr. 13) predstavuje kmitajúcu sústavu s diskretnými parametrami o troch stupňoch ( $n = 3$ ) voľnosti, ktorá simuluje dynamiku bucharu. Výpočet bude použitý na zistenie presnejších hodnôt vlastnej frekvencie, ktoré sú dôležité na nastavenie parametrov pre MKP výpočet.

Tuhosti rámu a základu boli kvôli zložitejšiemu tvaru a charakteru zaťaženia zistené na základe statickej MKP analýzy, kde boli prvky zaťažené silou a pomocou zisteného pretvorenia vypočítané tuhosti (obr. 12,13). Statická MKP analýza bola riešená v programe I-deas, pričom je použitý rovnaký model ako v prípade hlavnej dynamickej analýzy (viz. ods. 5.3.1). V prípade rámu bolo použité plošné zaťaženie na uzly na povrchu šaboty o hodnote  $F_y = 50 \text{ kN}$  a zistené maximálne pretvorenie v mieste pod zaťažením a v smere zaťaženia  $\delta_r = 12,8 \text{ mm}$ . Následne bola zistená tuhosť rámu podľa vzťahu 17. V prípade zisťovania tuhosti základu je základ zaťažený v mieste styku podložiek bucharu plošným zaťažením o veľkosti  $F_{y_1} = 50 \text{ kN}$  na každej podložke. Následne je odčítaná hodnota pretvorenia v strede podložky, čo je približne priemerná hodnota pretvorenia v mieste styku podložky základu o hodnote  $\delta_z = 0,075 \text{ mm}$ . Tuhosti pre výpočet o troch stupňoch voľnosti sú zistené podľa vzťahov:

$$k_1 = \frac{F_y}{\delta_r} = 3,9 \cdot 10^6 \text{ N/m} \quad (17)$$

$$k_3 = \frac{F_{y_1}}{\delta_z} + \frac{F_{y_1}}{\delta_z} = 1,3 \cdot 10^9 \text{ N/m} \quad (18)$$

kde:

$k_1$  ... tuhosť rámu bucharu [N/m]

$k_3$  ... tuhosť základu [N/m]

$F_y$  ... Sila na šabotu pri zisťovaní jej tuhosti [N]

$F_{y_1}$  ... Sila na základ v mieste styku s podložkou pri zisťovaní jeho tuhosti [N]

$\delta_r$  ... Pretvorenie rámu bucharu pod zaťažením [mm]

$\delta_z$  ... Pretvorenie základu pod zaťažením [mm]



Tuhosť dubových podložiek bola vďaka jednoduchšiemu charakteru zaťaženia vypočítaná podľa vzťahu:

$x_p = 1 \text{ m}$  ... šírka podložky

$y_p = 0,29 \text{ m}$  ... výška podložky

$z_p = 1,1 \text{ m}$  ... hĺbka podložky

$$k_{2,1} = \frac{E_{dub} \cdot x_p \cdot z_p}{u} = 1,1 \cdot 10^9 \text{ N/m} \quad (19)$$

kde:

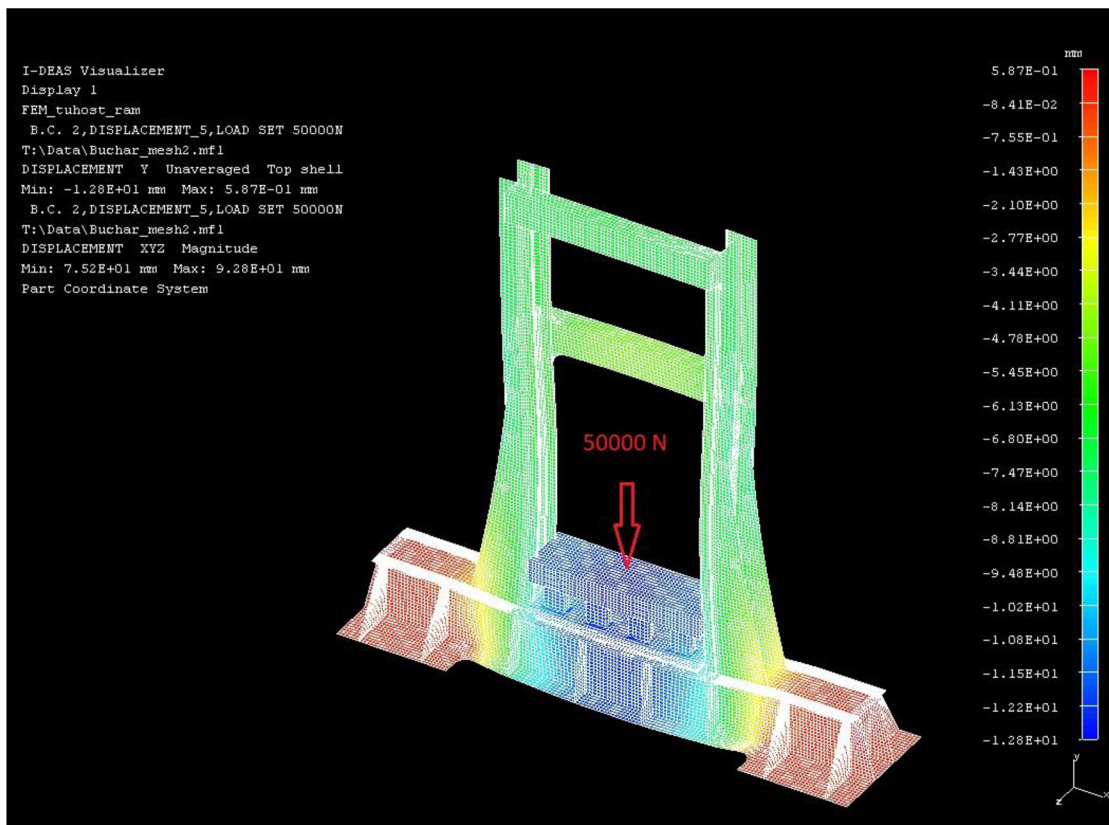
$k_{2,1}$  ... tuhosť jednej dubovej podložky [N/m]

Potom pre tuhosť dvoch podložiek paralelne platí:

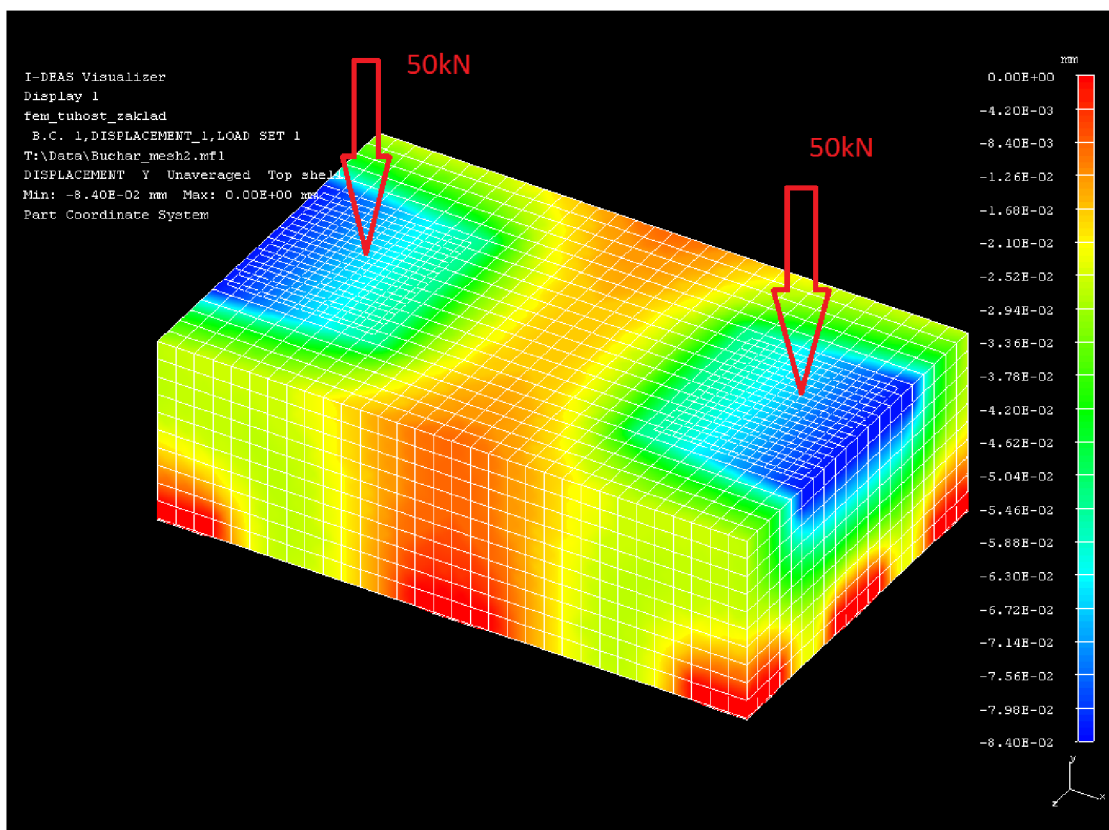
$$k_2 = k_{2,1} + k_{2,1} = 2,2 \cdot 10^9 \text{ N/m} \quad (20)$$

kde:

$k_2$  ... tuhosť dvoch dubových podložiek paralelne [N/m]



Obr. 12 Statická MKP analýza pre zistenie tuhosti rámu  $k_1$ . Zatiaženie 50kN na šabotu. Zistené pretvorenie vo vertikálnom smere 12,8mm



Obr. 13 Statická MKP analýza pre zistenie tuhosti základu  $k_3$ . Zatiaženie 50kN na miesta kde je usadený buchar. Zistené pretvorenie vo vertikálnom smere v priemere 0,075 mm

$m_0 = 5000 \text{ kg}$  ... hmotnosť barana

$m_1 = 4551 \text{ kg}$  ... hmotnosť rámu bucharu

$m_2 = 288 \text{ kg}$  ... hmotnosť podložiek

$m_3 = 30000 \text{ kg}$  ... hmotnosť základu

$k_1 = 3,9 \cdot 10^6 \text{ N/m}$  ... tuhosť rámu bucharu

$k_2 = 2,2 \cdot 10^9 \text{ N/m}$  ... tuhosť podložiek

$k_3 = 1,3 \cdot 10^9 \text{ N/m}$  ... tuhosť základu

$k_i = 10,8 \cdot 10^7 \text{ N/m}$  ... tuhosť izolátorov

$k_{eq} = 6,8 \cdot 10^7 \text{ N/m}$  ... ekvivalentná tuhosť  $k_i$  a  $k_3$

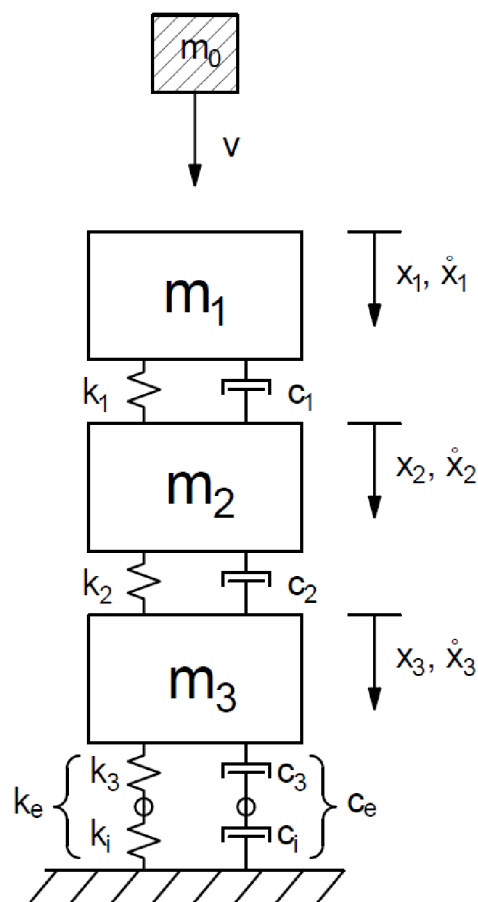
$c_1$  ... tlmenie rámu bucharu [Ns/m]

$c_2$  ... tlmenie podložiek [Ns/m]

$c_3$  ... tlmenie základu [Ns/m]

$c_i$  ... tlmenie izolátoru [Ns/m]

$c_{eq}$  ... ekvivalentná tuhosť  $c_i$  a  $c_3$  [Ns/m]



Obr. 14 Výpočtová schéma o 3° voľnosti

K matematickému popisu zadanej sústavy použijeme pohybové rovnice. Tieto rovnice sa dajú zostaviť viacerými spôsobmi, najbežnejšia je metóda uvoľňovania a metóda použitia La-grangeových rovníc 2. druhu (rov. 21)

Lagrangeová rovnica 2. druhu:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial E_k}{\partial \dot{x}_i} \right) - \frac{\partial E_k}{\partial x_i} + \frac{\partial E_D}{\partial \dot{x}_i} + \frac{\partial E_p}{\partial x_i} = F_i(t) \quad \text{pre } (i = 1, 2, 3) \quad (21)$$

Kinetická energia sústavy:

$$E_k = \frac{1}{2} (m_1 \dot{x}_1^2 + m_2 \dot{x}_2^2 + m_3 \dot{x}_3^2) \quad (22)$$

Disipatívna funkcia sústavy:

$$E_D = \frac{1}{2} [c_1 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1)^2 + c_2 (\dot{x}_3 - \dot{x}_2)^2 + c_{eq} \dot{x}_3^2] \quad (23)$$

Potenciálna energia sústavy:

$$E_p = \frac{1}{2} [k_1(x_2 - x_1)^2 + k_2(x_3 - x_2)^2 + k_e x_3] \quad (24)$$

Po dosadení, derivácii a elementárnych úpravách dostaneme pohybové rovnice v nasledujúcom tvare:

$$m_1 \ddot{x}_1 - k_1(x_2 - x_1) - c_1(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) = F_1 \quad (25)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 + k_1(x_2 - x_1) - k_2(x_3 - x_2) + c_1(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) - c_2(\dot{x}_3 - \dot{x}_2) = 0 \quad (26)$$

$$m_3 \ddot{x}_3 + k_2(x_3 - x_2) + k_{eq} x_3 - c_2(\dot{x}_3 - \dot{x}_2) + c_{eq} \dot{x}_3 = 0 \quad (27)$$

Sústava je popísaná tromi diferenciálnymi pohybovými rovnicami druhého rádu. K prehľadnejšiemu zápisu využijeme matice [12].

Maticový zápis:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = \mathbf{F}(t) \quad (28)$$

kde:

$\mathbf{M}$  ... matica hmotnosti

$\mathbf{C}$  ... matica tlmenia

$\mathbf{K}$  ... matica tuhosti

$\ddot{\mathbf{x}}$  ... vektor zrýchlenia

$\dot{\mathbf{x}}$  ... vektor rýchlosti

$\mathbf{x}$  ... vektor polohy

$\mathbf{F}(t)$  ... vektor budiacich síl

(29)

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \ddot{x}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 & -c_1 & 0 \\ -c_1 & c_1 + c_2 & -c_2 \\ 0 & -c_2 & c_e + c_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 & -k_1 & 0 \\ -k_1 & k_1 + k_2 & -k_2 \\ 0 & -k_2 & k_e + k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Matica tuhosti a tlmenia má z dôvodu paralelného radenia pružín a tlmičov rovnaký tvar.

### PROPORCIONÁLNE (RAYLEIGHOVO) TLMENIE

V prípade matice  $C$  nepoznáme jednotlivé koeficienty  $c_i$  a je veľmi obťažné ich určiť. Preto pre ich získanie použijeme proporcionálne alebo Rayleighovo tmenie. Tento prístup je široko používaný na modelovanie disipujúcich síl v komplexných inžinierskych problémoch. Proporcionálne tmenie vychádza z lineárnej kombinácie matice hmotnosti a tuhosti, pričom tieto matice sú vynásobené príslušnými koeficientami  $\alpha, \beta$  (rov.30) [15].

$$C = \alpha \mathbf{M} + \beta \mathbf{K} \quad (30)$$

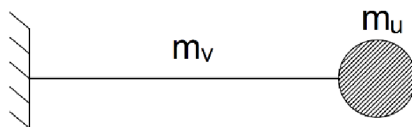
Kde  $\alpha, \beta$  sú skaláry,  $\alpha \mathbf{M}$  predstavuje konštrukčné tmenie závislé na rozložení hmotnosti v sústave a  $\beta \mathbf{K}$  nahradzuje materiálové tmenie dané materiálovými vlastnosťami. Koeficienty proporcionálneho tmenia sú väčšinou vypočítané z experimentálne určených hodnôt. Vo väčšine prípadov pri návrhu zariadenia tieto hodnoty známe nie sú. Pre potreby analytického výpočtu, alebo analýzy MKP sú volené odhadom, prípadne v iteráciách. Platí, že keď  $C = \alpha \mathbf{M} \dots$  ( $\beta = 0$ ) vyšším módom bude priradené veľmi malé tmenie, zatiaľ čo v prípade, keď  $C = \beta \mathbf{K} \dots$  ( $\alpha = 0$ ) vyššie módy budú silno tmené. Z toho vyplýva, že pridelením vhodných hodnôt  $\alpha, \beta$  je možné filtrovať alebo zachovať vyššie módy, pričom parameter  $\alpha$  je ľahšie manipulovateľný. Niektoré všeobecne používané hodnoty sú [16]:

- $\alpha = 0,05 \dots$  veľmi malé tmenie
- $\alpha = 2,5 \dots$  pozorovateľné tmenie
- $\alpha = 5-10 \dots$  výrazné tmenie
- $\alpha > 10 \dots$  veľmi výrazné tmenie

Módy v prípade proporcionálneho tmenia si zachovávajú tvar ako v prípade netlmeného systému [16].

### KMITANIE HMOTNEJ PRUŽINY (RAYLEIGHOVA METÓDA)

Keď uvažujeme sústavu o  $n$ -stupňoch voľnosti popisanú vyššie tak jej jednotlivé prvky predstavujú diskkrétne hmotné body kmitajúce na nehmotných pružinách. V skutočnosti v prípade kmitajúcej sústavy gravitačného bucharu idem o hmotné pružiny so spojitou rozloženou hmotnosťou. Preto pre bližší popis kmitajúcej sústavy bude použitá Rayleighova metóda, ktorá sústreďuje zotrvačné účinky hmotného prvku do miesta diskkrétnej hmotnosti pomocou určitého súčiniteľa hmotnosti  $\gamma$  ktorým budú vynásobené hmotnosti v matici tuhosti. Tento získame vyjadrením podielu pružných prvkov na celkovej kinetickej energii sústavy. V prípade bucharu kde jeho prvky sú tzv. "ťažké" pružiny a  $m_v/m_u \rightarrow \infty$  vychádza tento súčiniteľ  $\gamma = 0,405$  [17]



Obr. 15

Potom pre vlastnú frekvenciu takejto sústavy platí [17]:

$$\omega = \sqrt{\frac{k_r}{m_u + \gamma \cdot m_v}} \quad (31)$$

kde:

$m_v$  ... hmotnosť pružiny [kg]

$m_u$  ... hmotnosť závažia na konci pružiny [kg]

$\gamma$  ... Rayleighov súčiniteľ hmotnosti [-]

$k_r$  ... tuhosť pružiny [N/m]

$\omega$  ... vlastná uhlová frekvencia [rad/s]

### **VOLNÉ NETLMENÉ KMITANIE**

Z dôvodu obťažného riešenia výpočtu o troch stupňoch voľnosti budeného impulzom sily (nárazom barana na šabotu) budú pre potreby tejto práce vypočítané vlastné frekvencie voľných netlmených kmitov. Pri riešení takejto sústavy uvažujeme nulové budiace sily ( $F(t) = 0$ ) a nulové tlmenie. Pohybová rovnica (28) prejde teda do tvaru [12]:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = 0 \quad (32)$$

Za predpokladu harmonického kmitania sústavy má riešenie rov. (32) tvar:

$$\mathbf{x} = \mathbf{u}e^{i\omega t} \quad (33)$$

kde  $\mathbf{u}$  je vektor amplitúd harmonických kmitov a  $\omega$  je uhlová frekvencia.

Postupnou deriváciou podľa času získame z rov. (33) rovnicu:

$$\ddot{\mathbf{x}} = -\omega^2 \mathbf{u}e^{i\omega t} \quad (34)$$

Dosadením rovníc (33) a (34) do rovnice (35) a následnou úpravou dostaneme:

$$(\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M})\mathbf{u} = 0 \quad (35)$$

Podmienkou netriviálneho riešenia je :

$$\det|\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M}| = 0 \quad (36)$$

Tento determinant sa nazýva frekvenčný a jeho rozvinutím dostaneme charakteristickú alebo frekvenčnú rovnicu n-tého stupňa pre  $\omega^2$  [12]:

$$a_n \omega^{2n} + a_{n-1} \omega^{2(n-1)} + \dots + a_1 \omega^2 + a_0 \quad (37)$$

Korene tejto rovnice predstavujú vlastné uhlové frekvencie sústavy, ktoré radíme vzostupne:

$$0 \leq \omega_1 \leq \omega_2 \leq \dots \leq \omega_n$$

Pre pozitívne definitnú matice  $\mathbf{K}$  a  $\mathbf{M}$  sú vlastné uhlové frekvencie nezáporné hodnoty.

Po výpočte vo výpočtovom programe dostávame netlmené vlastné frekvencie sústavy gravitačného bucharu:

$$\begin{aligned}\omega_1 &= 44,06 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1} & f_1 &= 7,01 \text{ s}^{-1} \\ \omega_2 &= 77,67 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1} & f_2 &= 12,36 \text{ s}^{-1} \\ \omega_3 &= 4367,57 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1} & f_3 &= 695,12 \text{ s}^{-1}\end{aligned}$$

kde:

$\omega_1$  ... je prvá vlastná uhlová frekvencia sústavy [rad/s]

$\omega_2$  ... je druhá vlastná uhlová frekvencia sústavy [rad/s]

$\omega_3$  ... je tretia vlastná uhlová frekvencia sústavy [rad/s]

$f_1$  ... je prvá vlastná frekvencia sústavy [ $\text{s}^{-1}$ ]

$f_2$  ... je druhá vlastná frekvencia sústavy [ $\text{s}^{-1}$ ]

$f_3$  ... je tretia vlastná frekvencia sústavy [ $\text{s}^{-1}$ ]

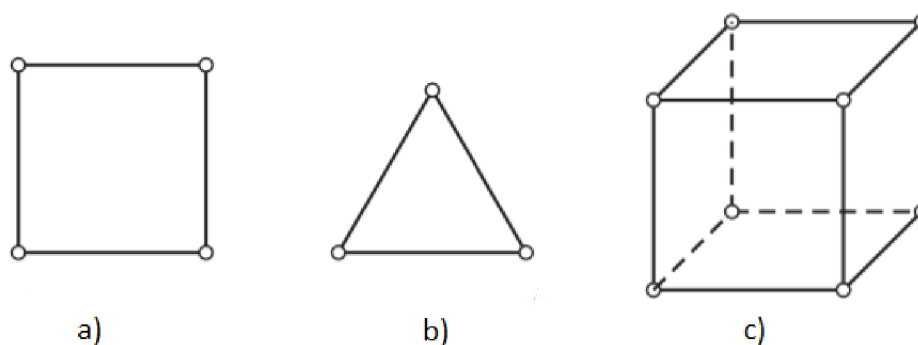
## 6 VÝPOČET POMOCOU METÓDY KONEČNÝCH PRVKOV

Metóda konečných prvkov je numerická metóda slúžiaca na simuláciu priebehu napätia, deformácií, vlastných frekvencií, prúdení tepla, tekutín, javov elektromagnetizmu. Jej princíp spočíva v diskretizácii spojitého kontinua do určitého konečného počtu prvkov. MKP dovoľuje vykonávať výpočty, ktoré by neboli analytickým prístupom pre svoju zložitosť možné, alebo by neboli dostatočne presné.

Konečno-prvkový model je vytvorený v programe NX I-deas a početne riešený v programe Marc Mentat.

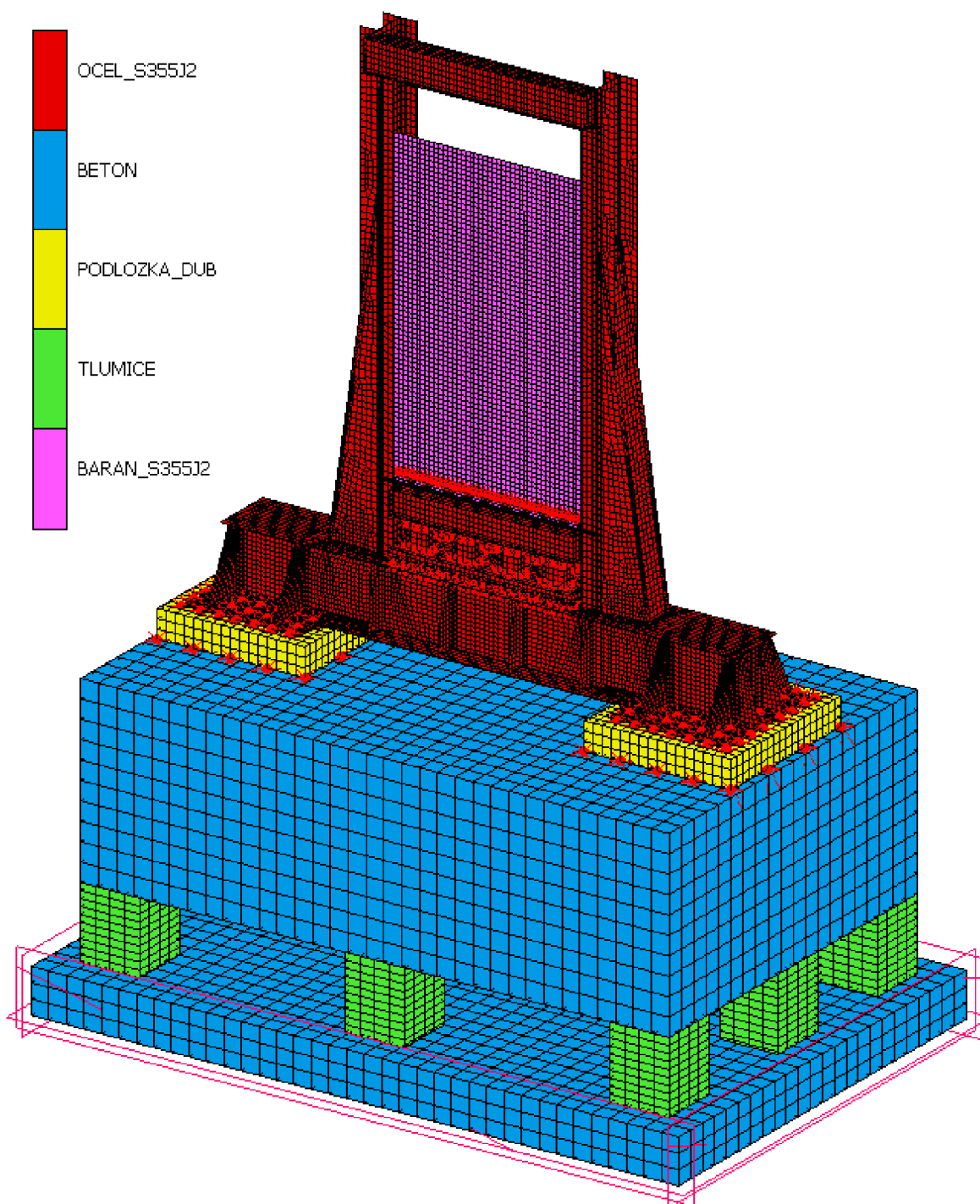
### 6.1 KONEČNO-PRVKOVÁ SIEŤ

Kvôli rozumnému výpočtovému času, nakoľko sa jedná o dynamickú analýzu je konečno-prvková sieť vytvorená s ohľadom na nie veľmi veľký počet prvkov a uzlov. Vytvorená sieť sa skladá z 47028 uzlov a 39886 prvkov. Hybridná sieť je zložená z časti z mapovaných plošných štvoruholníkových a trojuholníkových prvkov (obr. 15a, b) a z priestorových prvkov (obr. 15c). Mechanické vlastnosti materiálov sú uvedené v tabuľke 3,4. Tieto prvky sú spojené kontaktom (viz. odst. 5.3.2) alebo pomocou RBE2 (Rigid Body Element, Form 2) spojovacích prvkov (v obr. 16, 17, 18, 19, 20, 23, 26, 27 zobrazené červenou farbou). RBE2 spojovací prvky distribuuje sily z jedného nezávislého uzlu do viacerých závislých uzlov s dokonalou tuhosťou tohto spojovacieho prvku, čo znamená že na každý zo závislých uzlov je prenesená sila rovnaká. Pri RBE2 spojovacom prvku rozhodujeme ktoré z jeho 6 stupňov voľnosti má tento prvok preniesť [19]. V tomto prípade sú nastavené RBE2 prvky aby prenášali všetkých 6 stupňov voľnosti.



Obr. 15 a) 2D štvoruzlový štvoruholník, b) 2D trojuzlový trojuholník c) 8-uzlový hexadrón [18]

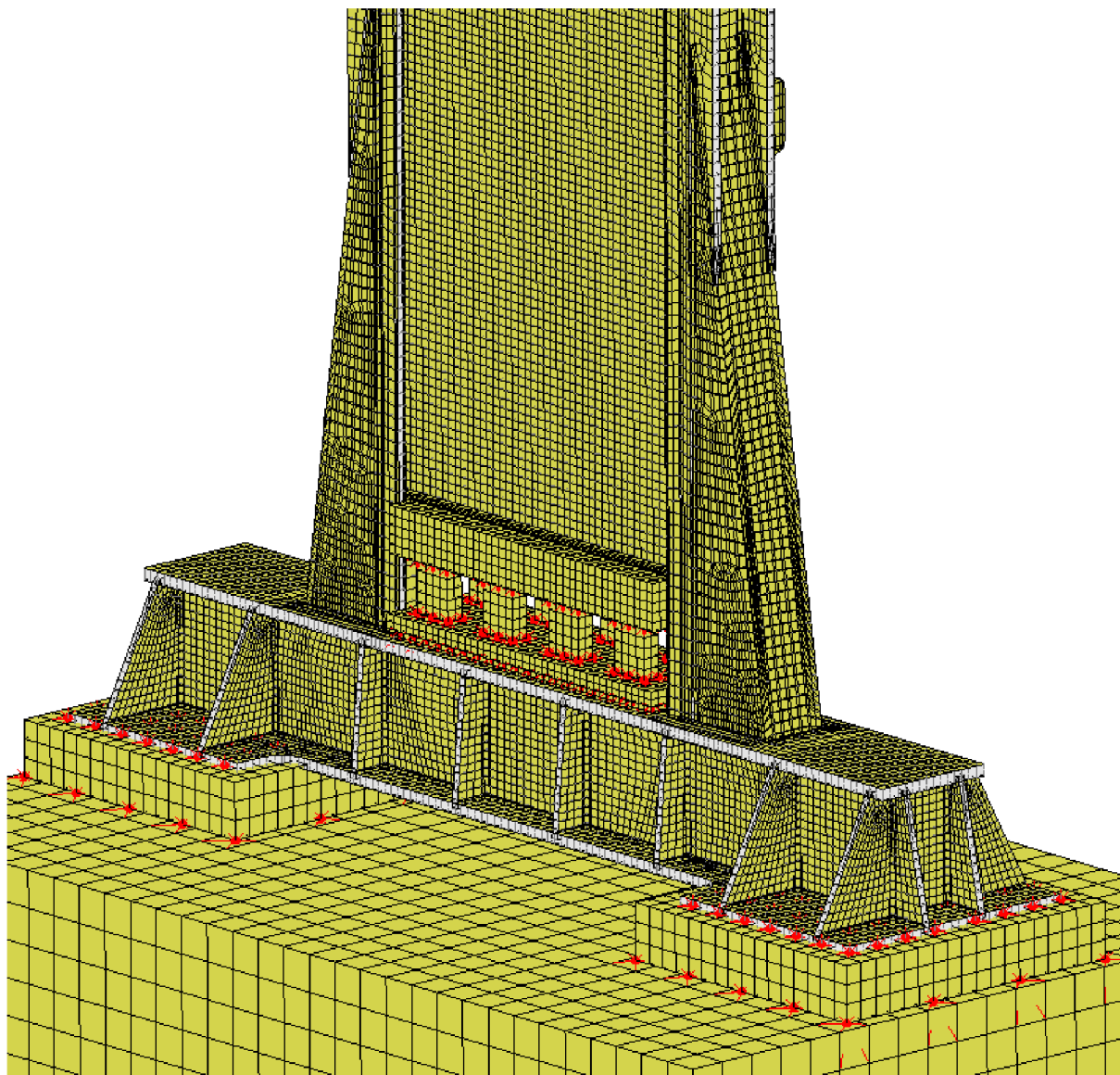




*Obr. 16 Konečno-prvková sieť gravitačného bucharu Davon s priradenými materiálmi*

### 6.1.1 RÁM BUCHARU

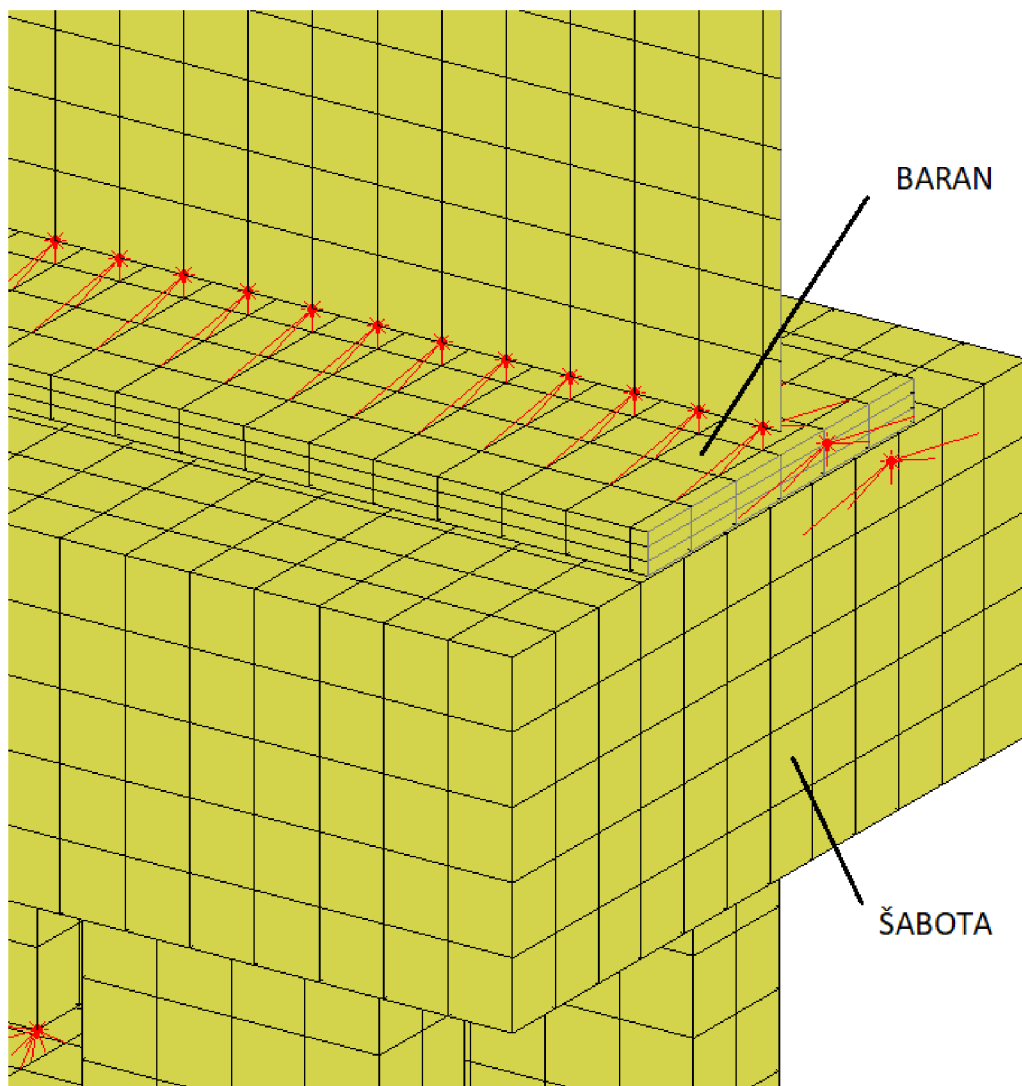
Má konštrukciu zo zvarovaných oceľových profilov a plechov, a je vhodný na sieťovanie práve plošnými prvkami, ktorým je následne priradená určitá hrúbka (obr. 16). Niektoré zložitejšie plochy sú sieťované pomocou voľnej siete.



*Obr. 17 Detail rámu bucharu. Expandovaný pohľad na plošné elementy*

### 6.1.2 BARAN

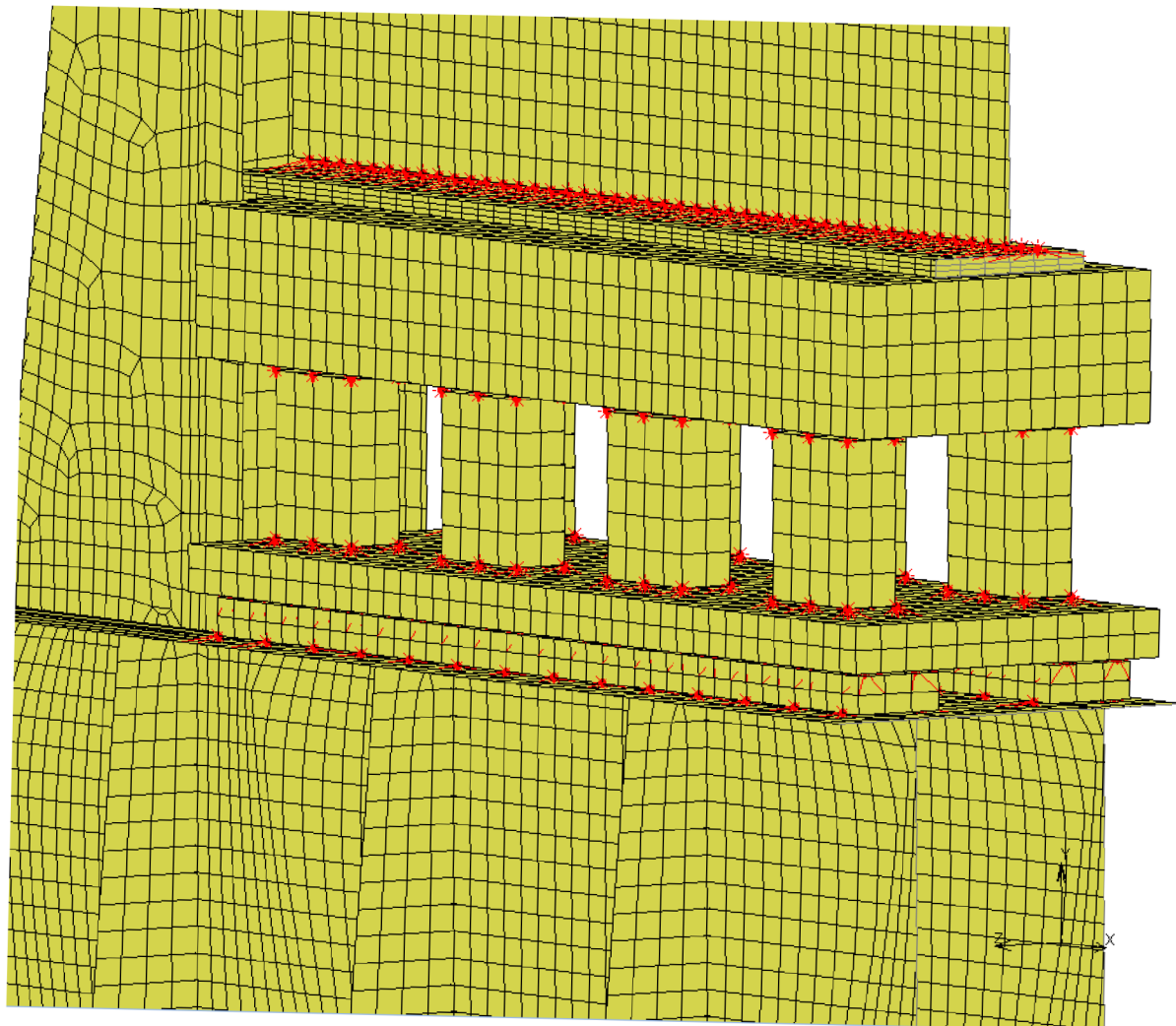
Je vytvorený pomocou hybridnej plošnej a objemovej siete ktoré sú spojené pomocou RBE2 prvkov. Časť barana ktorá je v okamihu nárazu v kontakte so šabotou je z objemových prvkov (obr. 18). Baran a šabota sú pred zahájením výpočtu od seba vzdialené 5 mm kvôli zníženiu počtu počiatočných prázdnych cyklov bez kontaktu.



Obr. 18 Detail barana a šaboty v reze

### 6.1.3 ŠABOTA

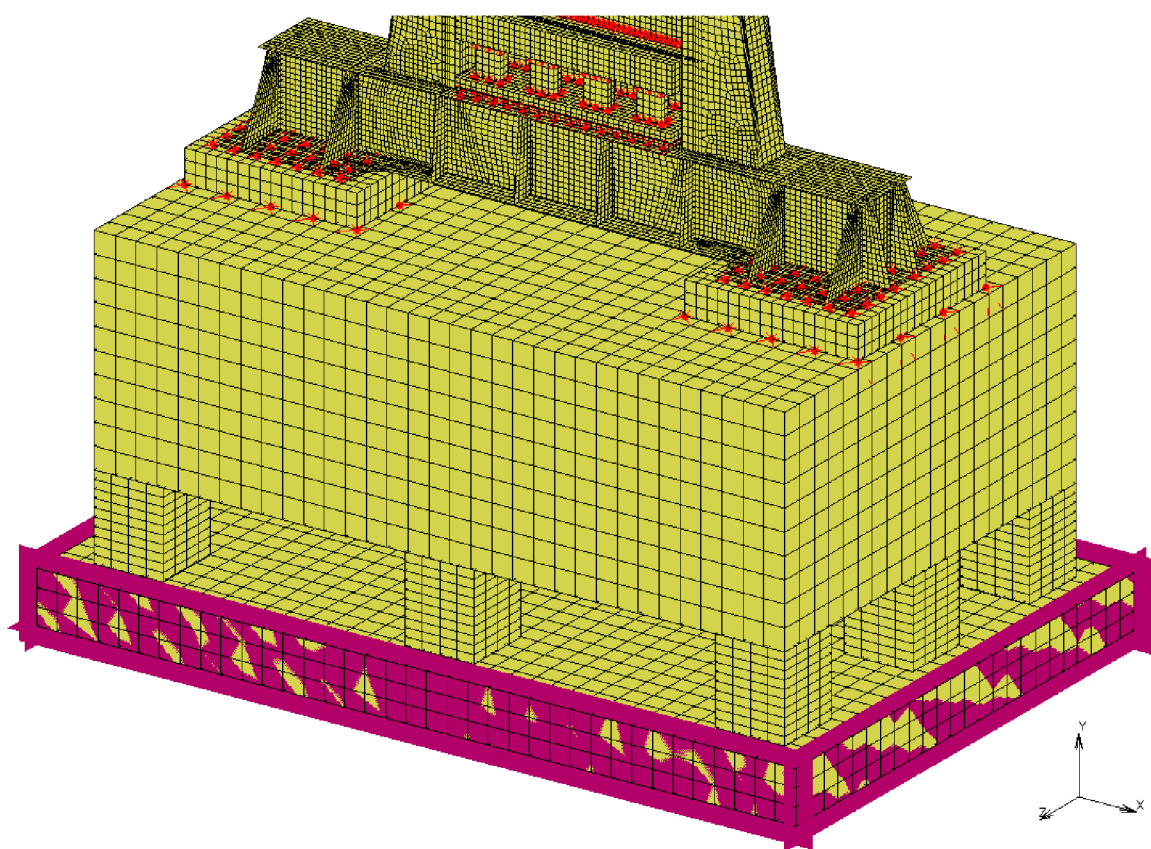
Je vytvorená pomocou objemových prvkov spojených RBE2 prvkami, popísaným vyššie.



*Obr. 19 Detail šaboty*

#### 6.1.4 ZÁKLAD

Základ je tvorený objemovou sieťou spojenou s podložkami rámu pomocou RBE2 prvkov. Betónový blok je tvorený sieťou s väčšími prvkami nakoľko hustota siete tejto časti výrazne ovplyvňuje počet konečných prvkov celku a tým aj výpočtový čas. Zároveň pre potreby tohto výpočtu nie je nutné, aby základ prenášal vysoké frekvenčné módy, ktoré by vyžadovali jemnejšiu sieť. V spodnej časti je namodelovaná časť betónového podkladu jamy, v ktorej bude usadený základ bucharu. Táto časť je obklopená rovinami s ktorými je betónový podklad spojený lepeným kontaktom. Práve kontakt (viz odst. 5.3.2) spodnej roviny a časti betónového podkladu bude rozhodujúci pri posudzovaní tlaku na pôdu pod podkladom.



Obr. 20 Detail základu bucharu

### 6.1.5 IZOLÁTORY

Sú vymodelované ako hranoly s rozmermi  $f = 0,4 \text{ m}$ ,  $g = 0,4 \text{ m}$ ,  $h = 0,49 \text{ m}$ , kde  $h$  je výška. Ich tuhosť je zadaná ako Youngov modul pružnosti vypočítaný podľa tuhosti  $k_i = 10,8 \cdot 10^7 \text{ N/m}$  deviatich izolátorov paralelne podľa vzťahu:

$$k_{i_1} = \frac{k_i}{9} = 12 \cdot 10^6 \text{ N/m} \quad (35)$$

$$E_i = \frac{h \cdot k_{i_1}}{f \cdot g} = 3,797 \cdot 10^4 \text{ Pa} \quad (36)$$

kde:

$k_{i_1}$  ... tuhosť jedného izolátora

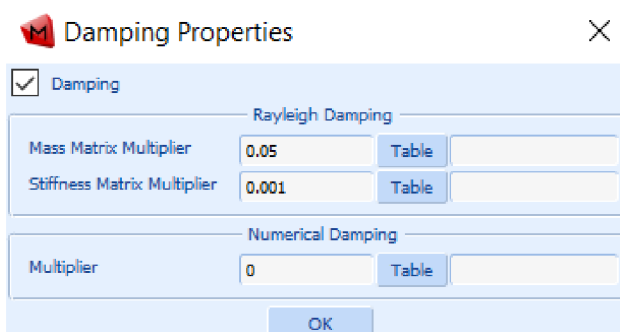
$E_i$  ... Youngov modul pružnosti jedného izolátora



## 6.2 OKRAJOVÉ PARAMETRE MKP

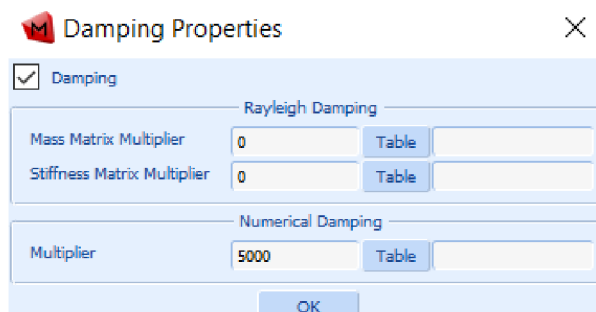
### 6.2.1 TLMENIE

Všetkým materiálom je priradené materiálové tlmenie (damping) podľa Rayleighovej metódy popísanej vyššie (rov. 31). Hodnoty koeficientov volíme:  $\alpha = 0,05$  (mass matrix multiplier),  $\beta = 0,001$  (stiffness matrix multiplier). Koeficient  $\alpha$  má vplyv hlavne na vyššie frekvenčné módy ktoré nie sú pre nás potrebné, preto má  $\alpha$  vyššiu hodnotu ako  $\beta$ . Zároveň však koeficienty majú nízke, konzervatívne hodnoty tlmenia, nakoľko kvôli absencii akýchkoľvek experimentálnych meraní reálneho správania bucharu nemáme tieto hodnoty na základe čoho určiť.



Obr. 21 Nastavenie materiálového tlmenia základu, rámu a dubových podložiek v Marc-u

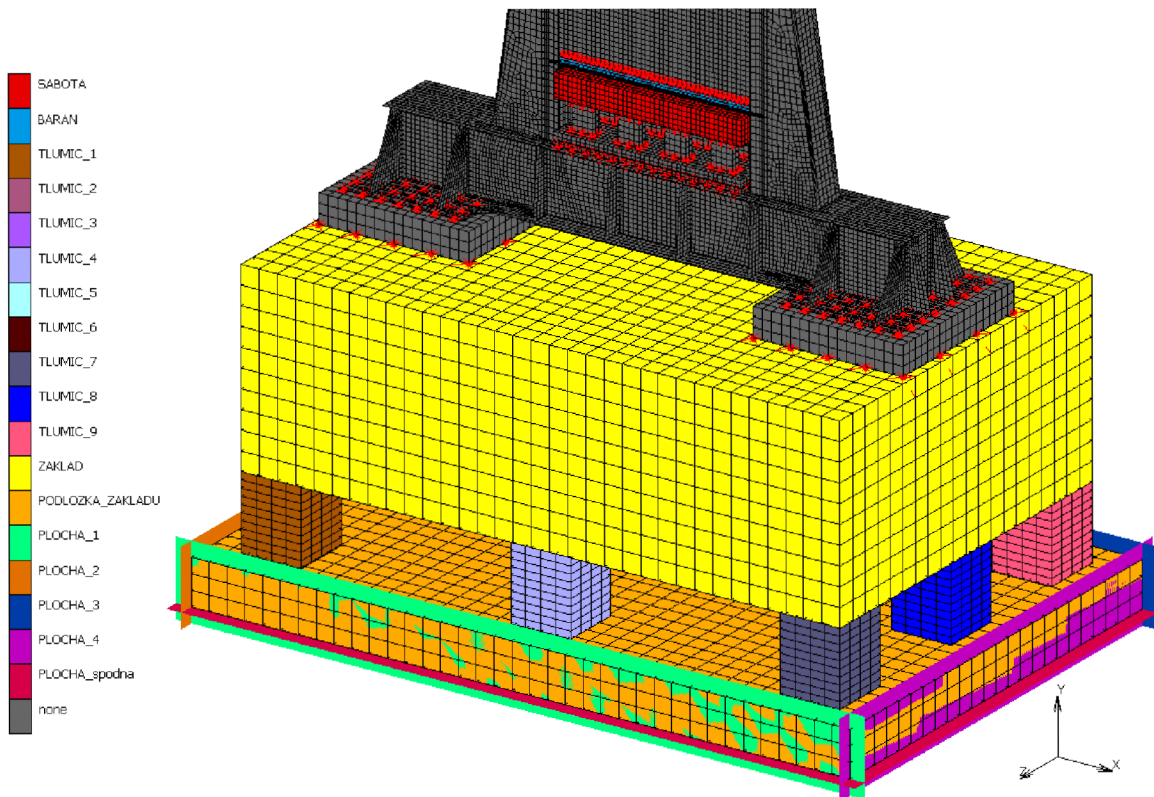
Tlmenie izolátorov je určené v analytickom výpočte na  $4,59 \cdot 10^4 \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}$ , ale pre výpočet MKP je zvolená konzervatívna hodnota  $5 \cdot 10^3 \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}$ . Takáto hodnota je zvolená z dôvodu chýbajúceho experimentálneho merania tlmenia systému a nezadaného potrebného času do zastavenia oscilácii systému, preto na základe dostupných údajov nie je možné presne určiť aký by mal byť útlm použitých izolátorov.



Obr. 22 Nastavenie tlmenia izolátorov

## 6.2.2 KONTAKT

Model má 18 kontaktných telies (contact bodies) (obr. 23), z toho 13 sieťovaných (deformovateľných) a 5 geometrických (nedeformovateľných). (Viz. prílohu 2)



Obr. 23 Kontaktné telesá

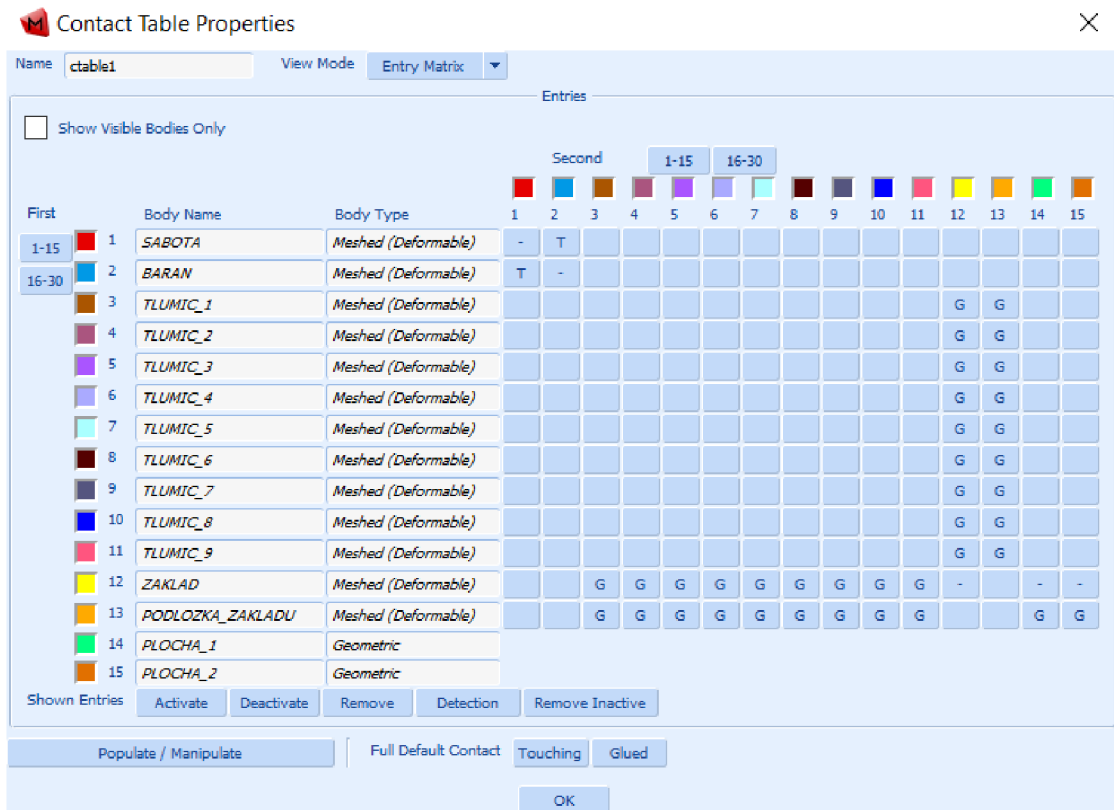
Medzi kontaktnými telesami sú kontaktné interakcie:

**Touching**- dotykový kontakt medzi dvoma telesami kde môže dochádzať k vzájomnému pohybu týchto telies, medzi ktorými je trenie.

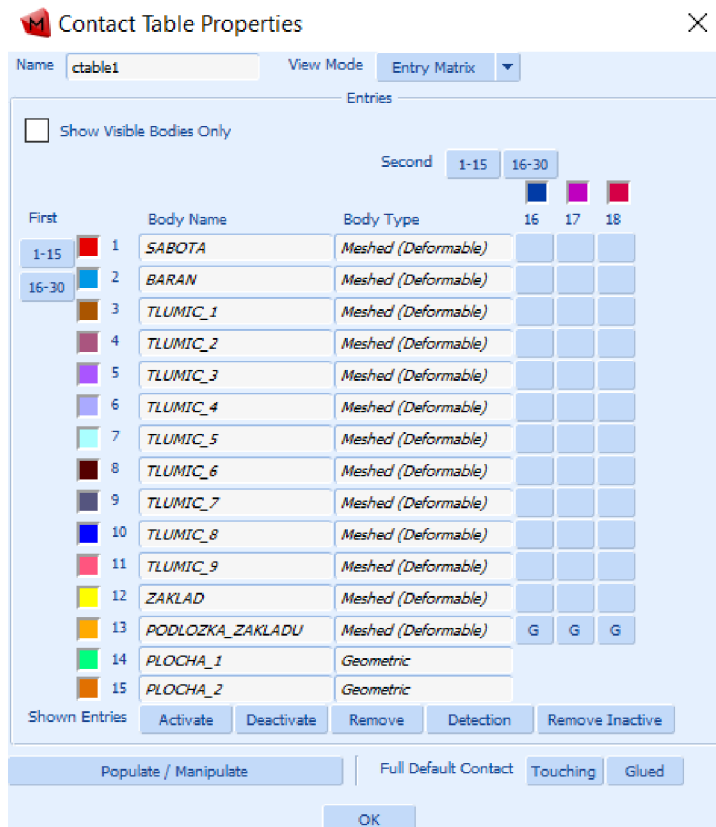
**Glued**- lepený kontakt medzi dvoma telesami kde tieto sú pevne spojené a nedochádza k vzájomnému pohybu.

Pre kontakt barana so šabotou je zvolený dotykový kontakt s trením. Pre základ, spodok základu a tlmiče je zvolený lepený kontakt. Tieto parametre sú nastavené v kontaktnej tabuľke (obr. 24, 25).





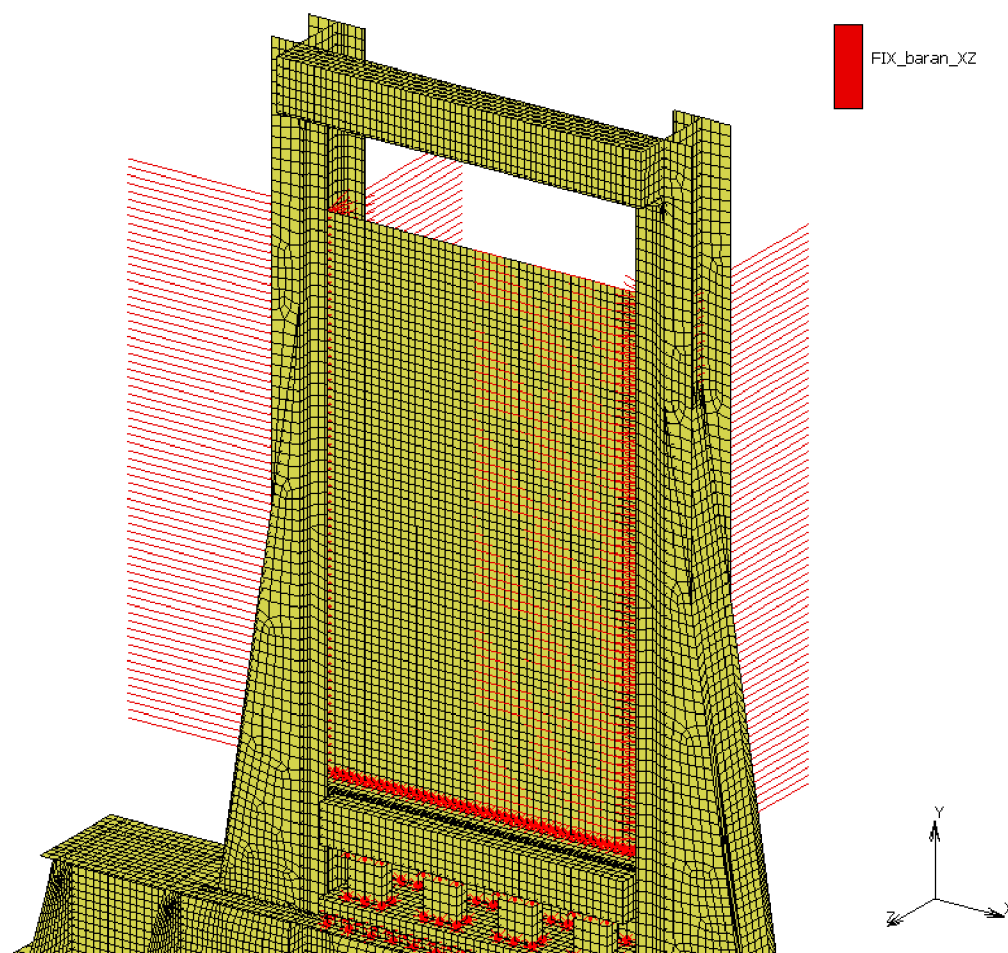
Obr. 24 Kontaktná tabuľka 1. časť



Obr. 25 Kontaktná tabuľka 2. časť

### 6.2.3 OKRAJOVÉ PODMIENKY

V prípade okrajových podmienok (boundary conditions) je zabránené horizontálnemu posunu barana v ose X a Z. Zabránenie posuvu celku a ukotvenie základu je vykonané pomocou kontaktu nehybných plôch so spodkom základu.



Obr. 26 Okrajové podmienky

#### 6.2.4 POČIATOČNÉ PODMIENKY

V rámci počiatocných podmienok (initial conditions) je určená počiatocná rýchlosť barana  $4,429 \text{ m/s}$ , ktorá je vypočítaná podľa rovnice (3). Ďalej je určené predpätie izolátorov od vlastnej hmotnosti bucharu:

$$\sigma_i = \frac{(m_{\text{rám}} + m_{\text{základ}}) \frac{g}{9}}{w \cdot v} = 2,373 \cdot 10^5 \text{ Pa} \quad (37)$$

kde:

$\sigma_i$ ...napätie od vlastnej tiaže v jednom izolátore

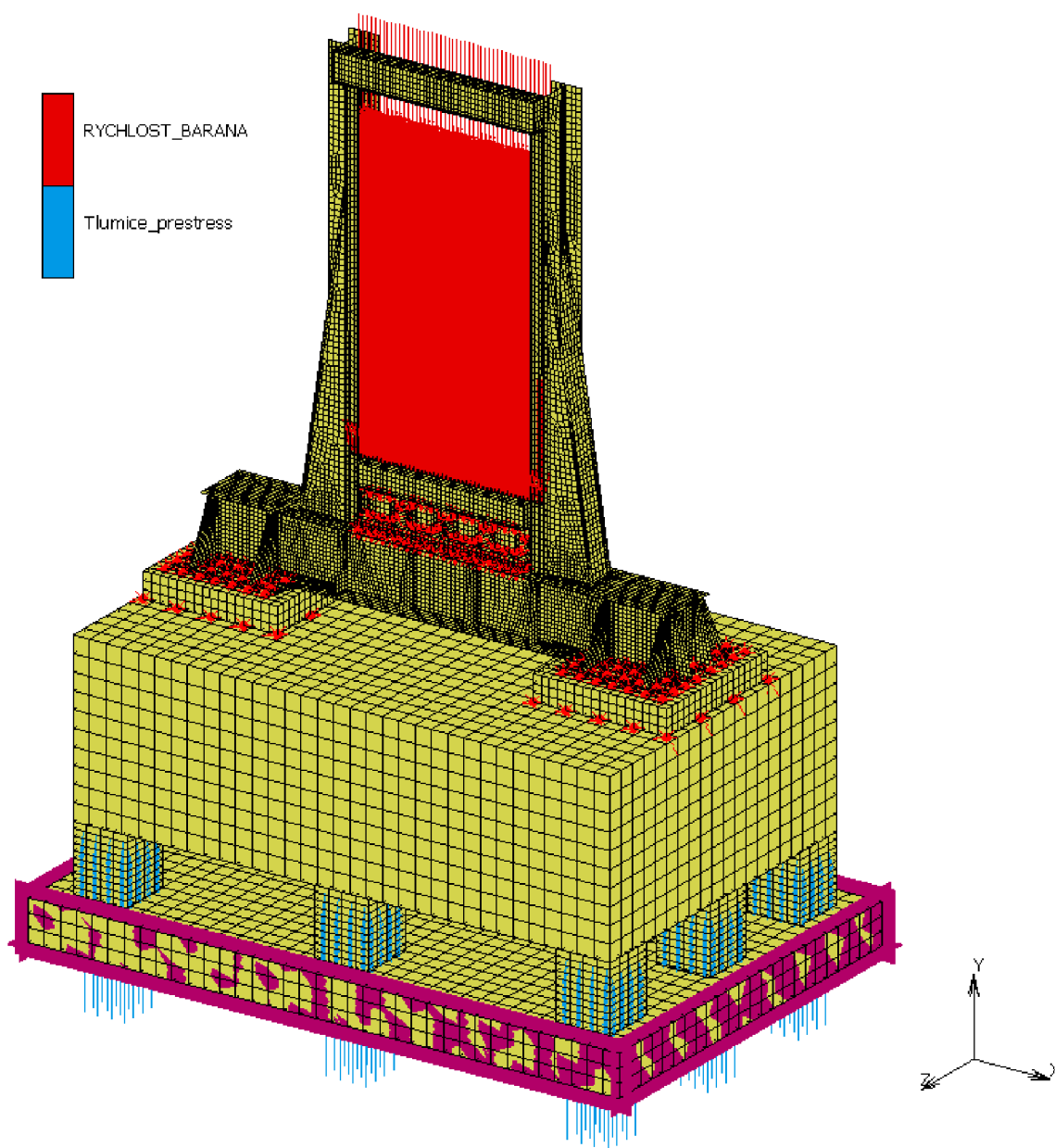
$m_{\text{rám}} = 4551 \text{ kg}$  ... hmotnosť rámu

$m_{\text{základ}} = 30 \text{ t}$  ... hmotnosť základu

$g = 9,81 \text{ m/s}^2$ ... tiažové zrýchlenie

$w = 0,4 \text{ m}$  ... šírka izolátora

$v = 0,4 \text{ m}$  ... hĺbka izolátora

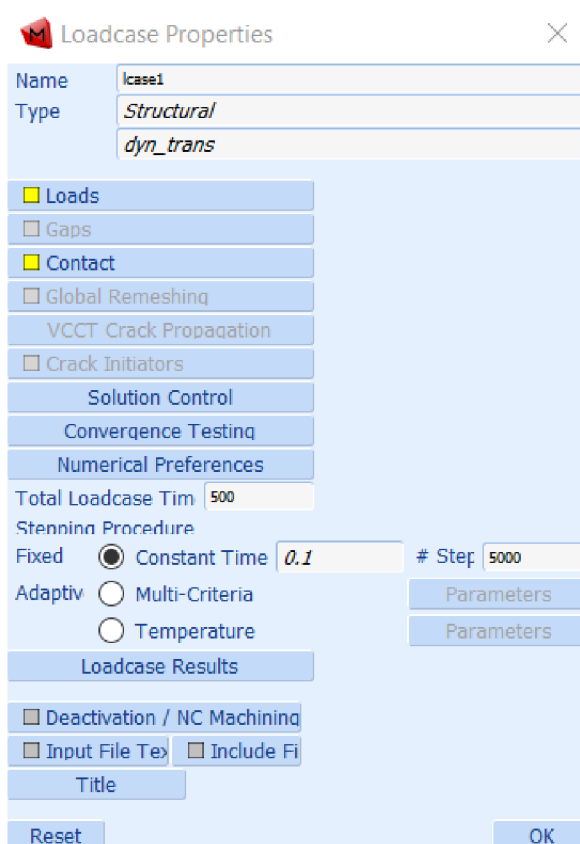


*Obr. 27 Počiatočné podmienky*

### 6.3 ZAŤAŽOVACÍ STAV

Zaťažovací stav (loadcase) je riešený ako dynamický prechodný (dynamic transient), ktorý je používaný keď je potrebné vyhodnotiť dynamickú odozvu na nejaké časovo závislé zaťaženie. Odozva ako posun, napätie, rýchlosť a zrýchlenie v závislosti na čase je výslednom tohto dynamicky prechodného zaťažovacieho stavu. Rozdiel oproti statickému je, že sú brané do úvahy aj zotrvačné sily a tlmenie.

Zaťažovací stav má trvanie 500 ms, časový krok 0,1 ms, 5000 krokov. Čas analýzy bol určený na základe analytického výpočtu o troch stupňoch voľnosti, z ktorého vyšla najnižšia vlastná frekvencia  $f_1 = 4,41 \text{ s}^{-1}$ , vďaka čomu v môžeme predpokladať, že buchar v zvolenom čase vykoná minimálne 2 periódy kmitov.



Obr. 28 Zaťažovací stav (loadcase)

## 7 VYHODNOTENIE

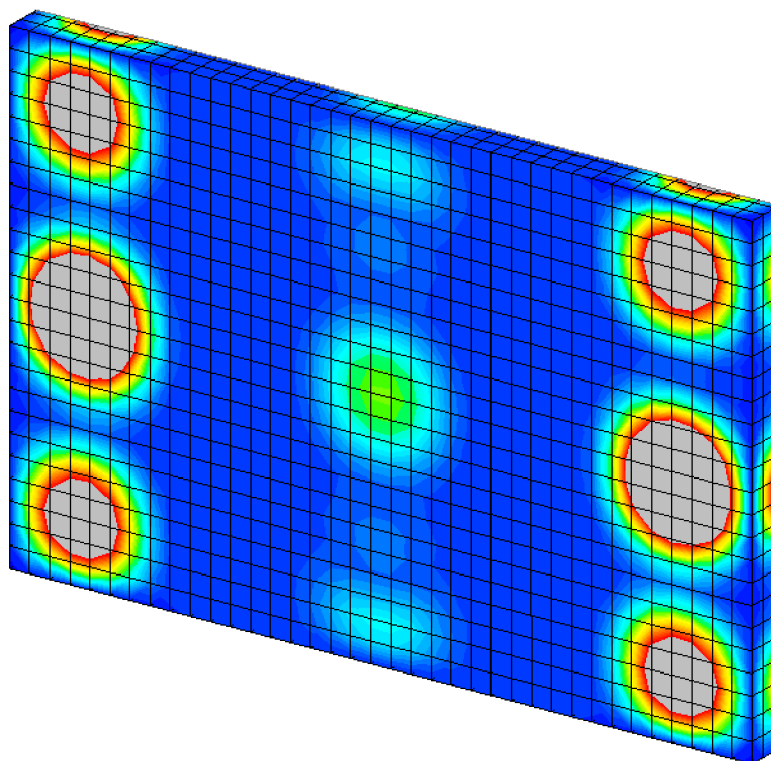
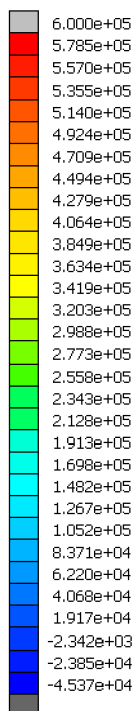
V rámci vyhodnotenia sa jedná o zhodnotenie vhodnosti použitia navrhnutej tuhosti izolátorov, tvaru a hmotnosti základu v reálnom gravitačnom bucharu, pričom vychádzame z analýzy pomocou metódy konečných prvkov. Hlavným zadaným parametrom, ktorý musíme dodržať je únosnosť pôdy, pričom nebolo presne definované či sa jedná o pôdu obsahujúcu veľké alebo malé diskontinuity (tab. 2). Uvažujeme, že miesto pre umiestnenie bucharu je vybrané so zreteľom na vyššiu kvalitu podkladu a podklad bude čiastočne zhutnený, preto uvažujeme únosnosť  $R_t = 0,6 \text{ MPa}$ .

### 7.1 MKP ANALÝZA

#### 7.1.1 TLAK NA PODLOŽIE

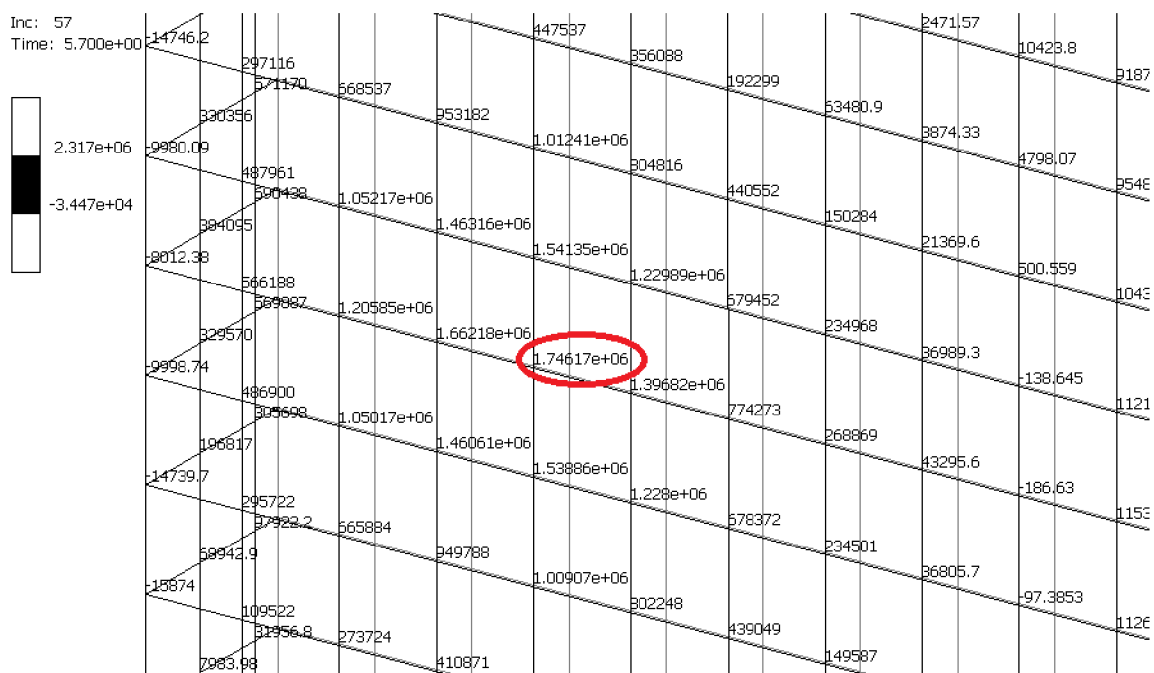
Ako bolo už zmienené vyššie, miesto nášho záujmu je kontakt spodnej časti betónového podkladu s podložkou ktorá predstavuje dokonale tuhú rovinu. Na obrázku (29.) vidíme výsledok MKP analýzy v čase  $5.7 \text{ ms}$  čo je  $4,57 \text{ ms}$  po náraze barana na šabotu (baran je v kontakte so šabotou po  $1.13 \text{ ms}$ ), kedy je napätie na podložie maximálne. Uvažujeme napätie podľa von Mises hypotézy (alebo aj HMM), pričom táto hypotéza rozhoduje o stave napätosti na základe mernej energie napätosti [20]. Na veľkej časti povrchu je napätie pod limitom, avšak sú určité uzly kde napätie dosahuje až  $1,75 \text{ MPa}$  (obr. 30). Takéto napätie, ktoré je nad limitom o  $1,15 \text{ MPa}$  sa v reálnom prípade pravdepodobne neobjaví, pretože v prípade MKP modelu je betónový podklad uložený priamo na dokonale tuhej podložke a v reálnom prípade by došlo k rozloženiu napätia betónovou podkladovou doskou na relatívne mäkké podložie. K ďalšiemu zmenšeniu napätia by došlo pri namodelovaní betónového podkladu ako celku aj s bočnými stenami (obr. 10).

Inc: 57  
Time: 5.700e+00



lcase1  
Equivalent Von Mises Stress

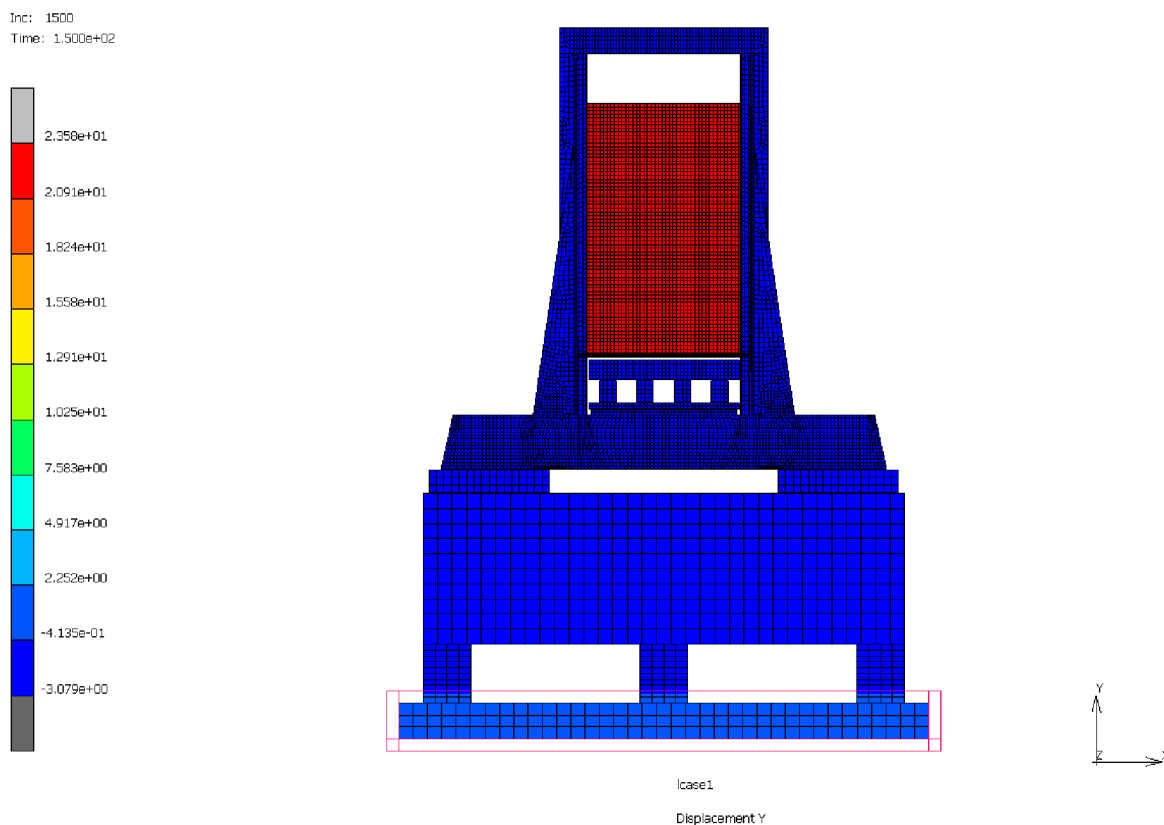
Obr. 29 Tlak na podložie, MKP v čase 5,7 ms



Obr. 30 Tlak na podložie, MKP v čase 5,7 ms, hodnoty v uzloch.

### 7.1.2 VÝCHYLKA

Maximálna výchylka podľa analytického výpočtu o jednom stupni voľnosti je  $10\text{ mm}$ . V prípade MKP analýzy bola zistená maximálna výchylka základu  $3\text{ mm}$  v čase  $150\text{ ms}$ .



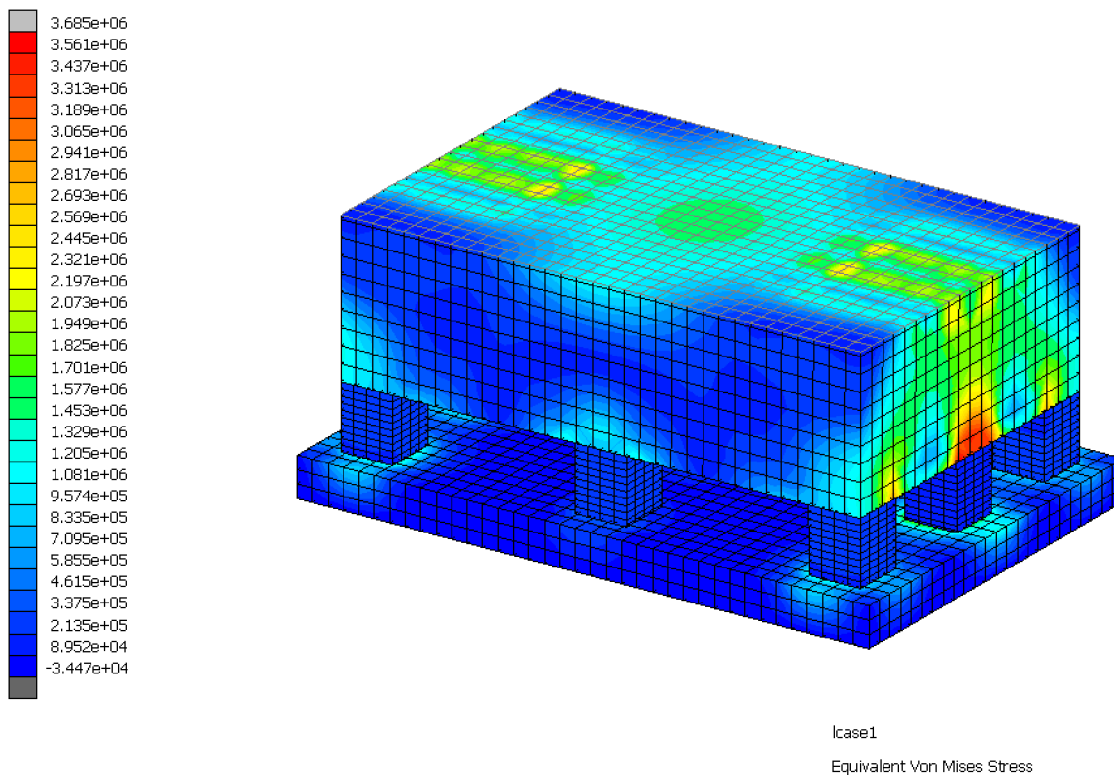
Obr. 31 Výchylka základu v čase  $150\text{ ms}$



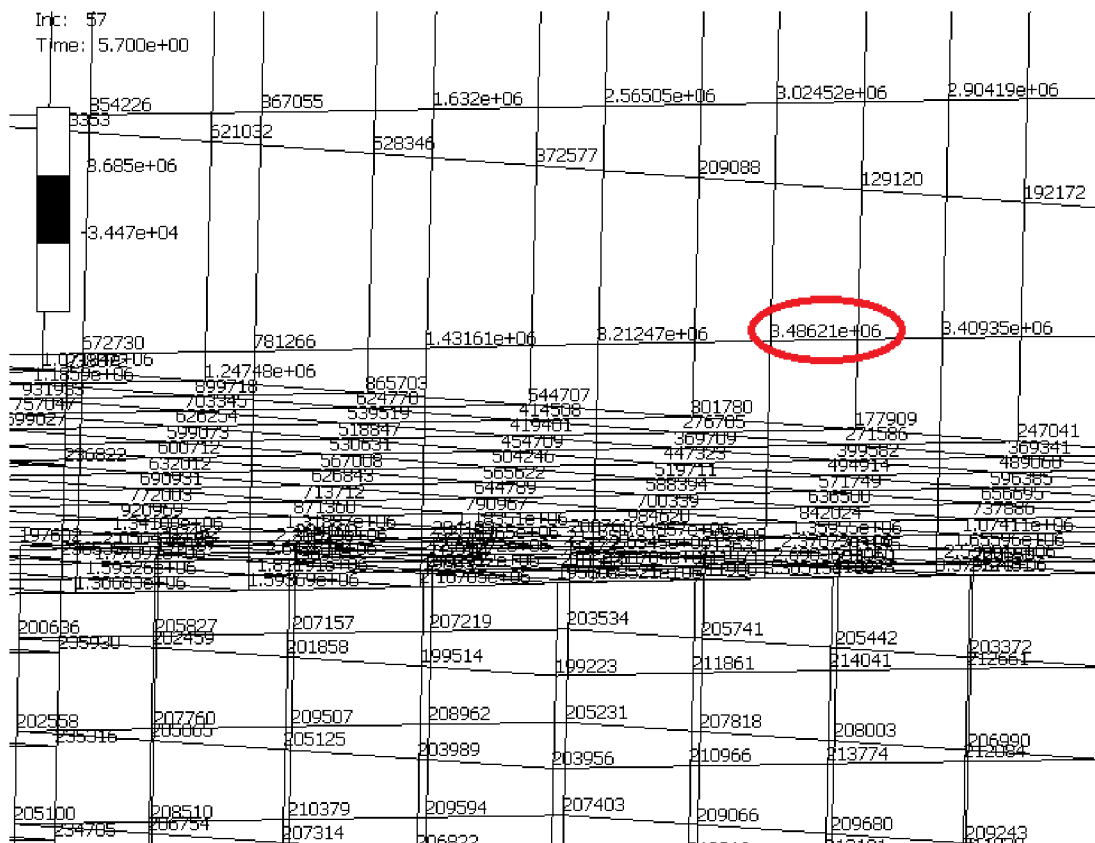
### 7.1.3 PEVNOSŤ BETÓNU

Z obrázku 31 vyplýva, že maximálne napätie v základe má hodnotu  $3,5 \text{ MPa}$ .

Inc: 57  
Time: 5.700e+00



Obr. 32 Napätie v základe, MKP v čase 5,7 ms



Obr. 33 Napätie v základe, MKP v čase 5,7 ms, hodnoty v uzloch

## ZÁVER

Na začiatku diplomovej práce bola vypracovaná krátka rešerš týkajúca sa konštrukcie základov gravitačných bucharov a možností ich tlmenia od okolia. Bol popísaný základný princíp fungovania gravitačného bucharu a jeho konštrukcia, taktiež konštrukcia mnou riešeného gravitačného bucharu na drvenie železo-betónových panelov.

V nasledujúcej časti bol vypracovaný analytický výpočet o jednom a troch stupňoch voľnosti. Na základe týchto výpočtov bol určený prvotný návrh tuhosti a tlmenia izolátorov a určené vlastné frekvencie kmitov gravitačného bucharu potrebné pre nastavenie parametrov výpočtu MKP. Návrhová tuhosť a tlmenie izolátorov sú  $k_i = 11 \cdot 10^7 \text{ N/m}$  a  $c_i = 4,59 \cdot 10^4 \text{ Ns/m}$ , v prípade MKP výpočtu je návrhová tuhosť jedného izolátora  $k_{i-1} = 12 \cdot 10^6 \text{ N/m}$ . MKP model bol vytvorený s ohľadom na primeraný čas výpočtu a presnosť výsledku v programe MARC, pričom bola použitá hybridná sieť z plošných a priestorových prvkov a kontakt sieťovaných telies. Maximálna výchylka základu bucharu v prípade analytického modelu o jednom stupni voľnosti je 10 mm, v prípade analýzy MKP bola zistená maximálna výchylka 3 mm pri rovnakej tuhosti izolátorov. Z tohto výsledku je možné si vytvoriť približný obraz v akej miere je energia od úderu barana prenášaná do celku. Z modelu MKP bolo zistené, že pri navrhnutých parametroch dochádza v určitých uzloch (obr. 30) k prekročeniu tlaku na pôdu o 1,15 MPa a dosiahlo hodnotu 1,75 MPa. Tento jav môže byť dôsledok toho, že tlak bol posudzovaný ako kontakt betónového podkladu a dokonale tuhej plochy, kde by v prípade kontaktu betónového podkladu a podložia s určitou mierou elasticity prišlo k rozloženiu napätia na väčšiu plochu. Zároveň bola namodelovaná len časť betónového podkladu, ktorá mala v tom prípade nižšiu tuhosť a tým aj menšiu možnosť rozložiť lokalizované napätie od kontaktu izolátorov. S prihliadnutím na tieto skutočnosti je pravdepodobné že tlak na podložie by v reálnom prípade neprekročil zadanú hodnotu 0,6 MPa. Následne bolo posúdené napätie v betónovom základe ktoré dosiahlo hodnotu 3,5 MPa, pričom pevnosť použitého betónu (tab. 4) je minimálne 20 MPa.

Pre dosiahnutie presnejšieho výsledku by bolo v budúcnosti vhodné zohľadniť skutočnosti popísané vyššie, a to: namodelovať betónový podklad základu ako celok s bočnými stenami, zakomponovať do modelu interakciu v kontakte podkladového betónu a podložia ako zeminy s určitou elasticitou. Pre zníženie tlaku na pôdu by ďalej bolo možné s pripustením väčšej výchylky základu znížiť tuhosť izolátorov. Ďalej by bolo možné zväčšiť rozmery, teda aj váhu betónového základového bloku, zväčšiť kontaktnú plochu s podloží, alebo zvýšiť hrúbku, a tuhosť betónového podkladu.

## POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] KOVÁČ, Andrej a Rudolf BEDŘICH. Tvárniace stroje 1. 1. Bratislava: Alfa, 1989.
- [2] NOVOTNÝ, Karel. VÝROBNÍ STROJE A ZAŘÍZENÍ: TVÁŘECÍ STROJE. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, odbor tváření, Technická 2, 616 69 BRNO, 2002.
- [3] Different Types of Machine Foundations and their Uses [online]. July 24, 2014. Dostupné z: <https://theconstructor.org/geotechnical/types-of-machine-foundations/8258/>
- [4] LUKAVEC, Martin. Dynamické účinky technologických strojních zařízení na základy budov [online]. 2008 [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: [https://www.casopisstavebnictvi.cz/dynamicke-ucinky-technologickyh-strojnich-zarizeni-na-zaklady-budov\\_A1501\\_I09\\_08](https://www.casopisstavebnictvi.cz/dynamicke-ucinky-technologickyh-strojnich-zarizeni-na-zaklady-budov_A1501_I09_08)
- [5] Shock Isolation Systems for Forging Hammers: Viscous Damped Spring Mounts. Broadview, IL, USA: Vibro/Dynamics, 2017.
- [6] WANG, Guoqiang; DONG, Zuomin. Design optimization of low impact transmission foundation for forging hammers. Engineering computations, 2006, 23.2: 166-186.
- [7] SITHARAM, T. G. Advanced foundation engineering. Taylor & Francis, a CRC title, part of the Taylor & Francis imprint, a member of the Taylor & Francis Group, the academic division of T&F Informa, plc, 2018.
- [8] SUCHÁNEK, Tomáš a Karel LABOUTKA, Hodnoty fyzikálních veličin vybraných stavebních materiálů: Železobeton [online]. 2001 [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/58-hodnoty-fyzikalnich-velicin-vybranych-stavebnich-materialu>
- [9] ŠMÍŘÁKOVÁ, Martina, Pevnostní třídy betonů a jejich charakteristiky [online]. [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <https://homen.vsb.cz/~jan731/Betonove%20konstrukce/Tabulka%20pevnosti%20betonu.pdf>
- [10] HOLČÁK, Martin, 2007. Vybrané fyzikální a mechanické vlastnosti dubu. Brno. Bakalářská práce. Mendelova Zemědělská a Lesnická Univerzita v Brně. Vedoucí práce Ing. Vladimír Gryc, Ph.D.
- [11] BREPTA, Rudolf, Ladislav PŮST a František TUREK. Mechanické kmitání. 1. Praha: Sobotáles, 1994. ISBN 80-901684-8-5.
- [12] KRATOCHVÍL, Ctirad a Jaromír SLAVÍK. Mechanika těles: dynamika. 2. Brno: CERM, 2007. ISBN 80-214-2260-2.

- [13] FULAN, Pan. Theory and Experiment of Hammer Foundation Vibration. 1. Beijing, China: Fifth Design and Research Institute, 1988.
- [14] KELLY, S.Graham. Mechanical Vibrations: Theory and Applications, SI edition. 1. Stamford USA: Cengage Learning, 2012. ISBN 978-1-4390-6214-2.
- [15] ADHIKARI, Sondipon; PHANI, A. Srikantha. Rayleigh's Classical Damping Revisited. 2004.
- [16] Applying Rayleigh Damping to a Model [online]. 2012 [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: [http://download.autodesk.com/us/algorithm/userguides/mergedProjects/setting\\_up\\_the\\_analysis/nonlinear/Analysis\\_Parameters/Applying\\_Rayleigh\\_Damping\\_to\\_a\\_Model\\_%28Nonlinear%29.htm](http://download.autodesk.com/us/algorithm/userguides/mergedProjects/setting_up_the_analysis/nonlinear/Analysis_Parameters/Applying_Rayleigh_Damping_to_a_Model_%28Nonlinear%29.htm)
- [17] PACAS, Blahoslav. Teorie stavebních strojů. 2. Praha: STNL, 1986.
- [18] MURÍN, Justín, Vladimír KUTIŠ a Juraj HRABOVSKÝ. Metóda Konečných Prvkov, Vybrané Kapitoly pre mechatronikov. 1. Bratislava: Slovenská Technická Univerzita v Bratislave, 2014. ISBN 978-80-227-4298-6.
- [19] The concise guide to Nastran Rigid Elements: EnDuraSim Pty Ltd. [online]. 2008 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <http://www.endurasim.com.au/wp-content/uploads/2015/02/EnDuraSim-Rigid-Elements.pdf>
- [20] Von Mises yield criterion [online]. 2019 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Von\\_Mises\\_yield\\_criterion](https://en.wikipedia.org/wiki/Von_Mises_yield_criterion)

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

$a$	[m]	Hĺbka základu
$\ddot{x}$	[m/s <sup>2</sup> ]	Vektor zrýchlenia
$\dot{x}$	[m/s]	Vektor rýchlosti
$A$	[m]	Amplitúda
$A_{max}$	[m]	Maximálna amplitúda
$b$	[m]	Šírka základu
$c$	[m]	Výška základu
$C$	[Ns/m]	Matica tlmenia
$c_1$	[Ns/m]	Tlmenie rámu bucharu
$c_2$	[Ns/m]	Tlmenie Podložiek
$c_3$	[Ns/m]	Tlmenie základu
$c_c$	[Ns/m]	Kritické tlmenie systému
$c_{eq}$	[Ns/m]	Ekvivalentná tuhosť
$c_i$	[Ns/m]	Tlmenie izolátorov
$D$	[-]	Pomerné tlmenie
$E_b$	[GPa]	Modul pružnosti betónu
$E_D$	[J]	Disipatívna funkcia sústavy o 3 stupňoch voľnosti
$E_{dub}$	[GPa]	Modul pružnosti dubu
$E_i$	[Pa]	Youngov modul pružnosti jedného izolátora
$E_i$	[Pa]	Youngov modul pružnosti jedného izolátora
$E_k$	[J]	Kinetická energia sústavy o 3 stupňoch voľnosti
$E_n$	[J]	Energia počiatkovej periódy
$E_p$	[J]	Potenciálna energia sústavy o 3 stupňoch voľnosti
$f$	[m]	Hĺbka izolátora
$F$	[N]	Sila na podložie
$F(t)$	[N]	Vektor sily
$f_0$	[s <sup>-1</sup> ]	Vlastná frekvencia tlmených vibrácií
$f_{ck}$	[MPa]	Pevnosť betónu
$F_y$	[N]	Sila na šabotu pri zisťovaní jej tuhosti
$F_{y_1}$	[N]	Sila na základ v mieste styku s podložkou pri zisťovaní jeho tuhosti

$g$	[m]	Šírka izolátora
$h$	[m]	Výška izolátora
$K$	[N/m]	Matica tuhosti
$k_1$	[N/m]	Tuhosť rámu bucharu
$k_2$	[N/m]	Tuhosť dvoch dubových podložiek paralelne
$k_{2_1}$	[N/m]	Tuhosť jednej dubovej podložky
$k_3$	[N/m]	Tuhosť základu
$k_{eq}$	[N/m]	Ekvivalentná tuhosť základu a izolátorov sériovo
$k_i$	[N/m]	Tuhosť izolátorov
$k_{i_1}$	[N/m]	Tuhosť jedného izolátora
$k_{i_1}$	[N/m]	Tuhosť jedného izolátora
$k_r$	[N/m]	Tuhosť pružiny
$M$	[kg]	Matica hmotnosti
$m_0$	[kg]	Hmotnosť barana
$m_1$	[kg]	Hmotnosť rámu bucharu
$m_2$	[kg]	Hmotnosť podložiek
$m_3$	[kg]	Hmotnosť základu
$m_{baran}$	[kg]	Hmotnosť barana
$MKP$		Metóda konečných prvkov
$m_{rám}$	[kg]	Hmotnosť rámu bucharu
$m_u$	[kg]	Hmotnosť závažia na konci pružiny
$m_v$	[kg]	Hmotnosť pružiny
$m_{základ}$	[kg]	Hmotnosť základu
RBE2		Spojovací prvkov v metóde konečných prvkov
$R_t$	[MPa]	Únosnosť pôdy
$t$	[s]	Čas
$v$	[m/s]	Rýchlosť barana pri dopade
$V$	[m <sup>3</sup> ]	Objem základu
$v_0$	[m/s]	Rýchlosť celku po náraze barana
$x$	[m]	Vektor polohy
$x_p$	[m]	Hĺbka podložky
$y_p$	[m]	Výška podložky
$z_p$	[m]	Šírka podložky

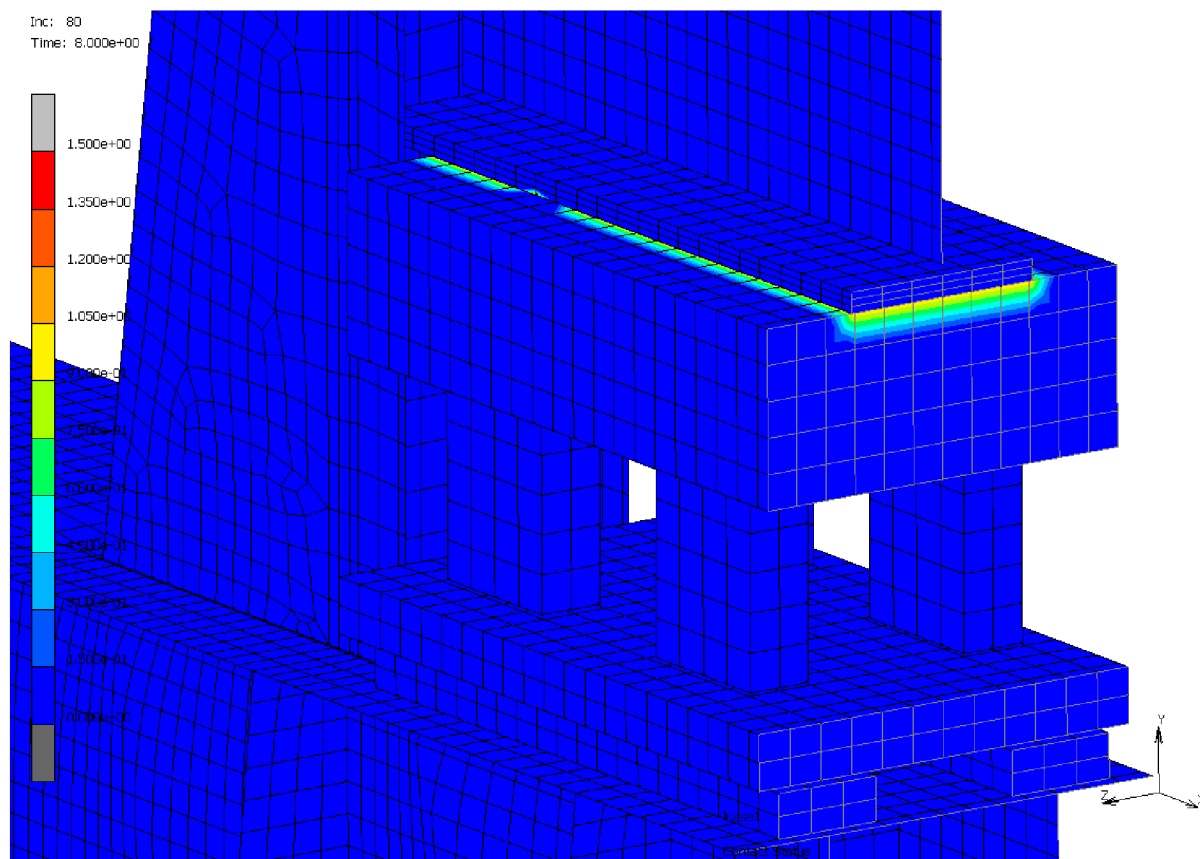
$\alpha$	[-]	Koeficient Reyleighovho tlmenia pre konštrukčné tlmenie
$\beta$	[-]	Koeficient Reyleighovho tlmenia pre materiálové tlmenie
$\gamma$	[-]	Rayleighov súžinitel hmotnosti
$\Delta E_n$	[J]	Disipovaná energia za jednu periódu
$\delta_r$	[mm]	Pretvorenie rámu bucharu pod zaťažéním
$\delta_z$	[mm]	Pretvorenie základu pod zaťažéním
$\rho_b$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Objemová hmotnosť betónu C20/25
$\rho_d$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Objemová hmotnosť dubu
$\sigma$	[Pa]	Tlak na podložie
$\sigma_d$	[MPa]	Pevnosť dubu
$\omega$	[rad/s]	Vlastná uhlová frekvencia
$\omega_1$	[rad/s]	Prvá vlastná uhlová frekvencia pri výpočte o 3 stupňoch voľnosti
$\omega_2$	[rad/s]	Druhá vlastná uhlová frekvencia pri výpočte o 3 stupňoch voľnosti
$\omega_3$	[rad/s]	Tretia vlastná uhlová frekvencia pri výpočte o 3 stupňoch voľnosti
$\omega_n$	[rad/s]	Vlastná uhlová rýchlosť tlmených vibrácií
$\omega_z$	[rad/s]	Vlastná uhlová rýchlosť netlmených vibrácií



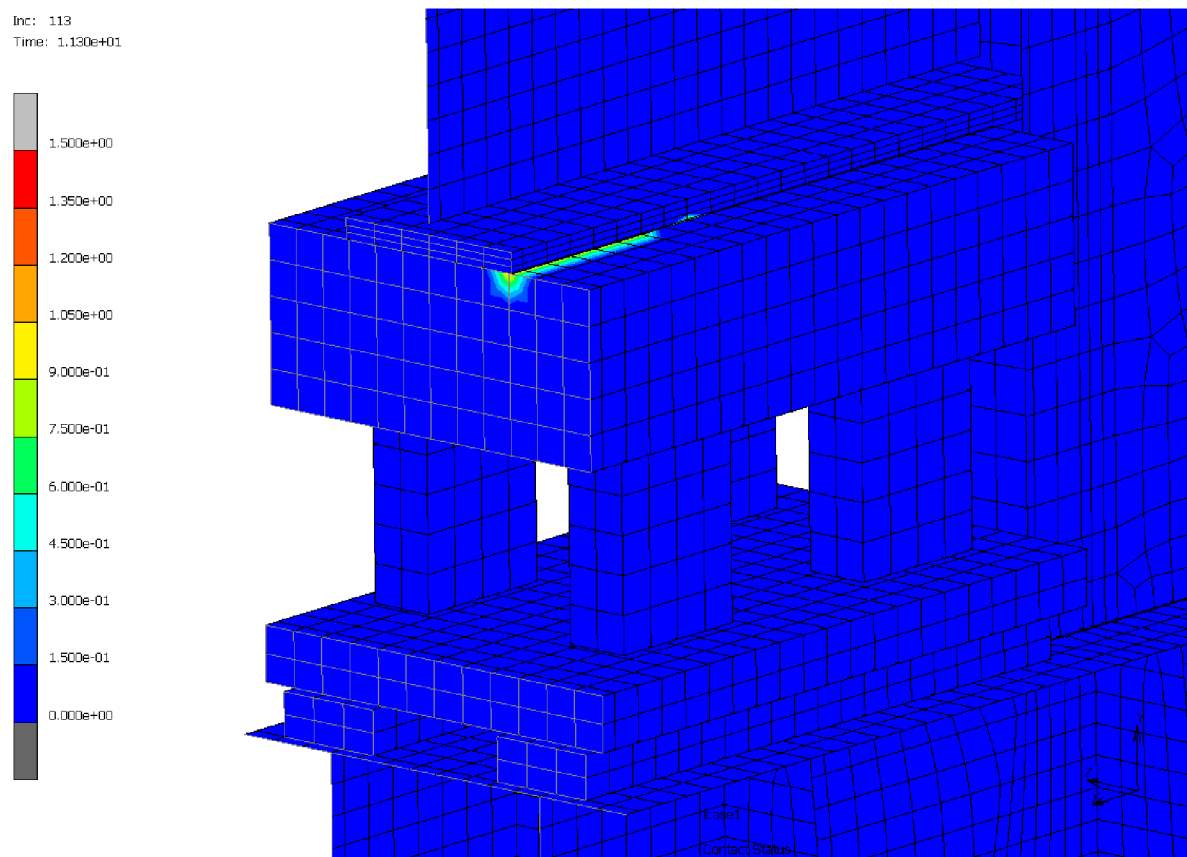
## ZOZNAM PRÍLOH

Príloha 1	Stav kontaktu barana a šaboty po náraze
Príloha 2	Stav kontaktu barana a šaboty tesne pred odrazom barana od šaboty
Príloha 3	Stav kontaktov
Príloha 4	Normálové sily pri náraze barana na šabotu
Príloha 5	Normálové sily pri náraze barana na šabotu
Príloha 6	Napätie v ráme bucharu
Príloha 7	Bod zvratu baranu
Príloha 8	Deformácia rámu bucharu tesne po náraze

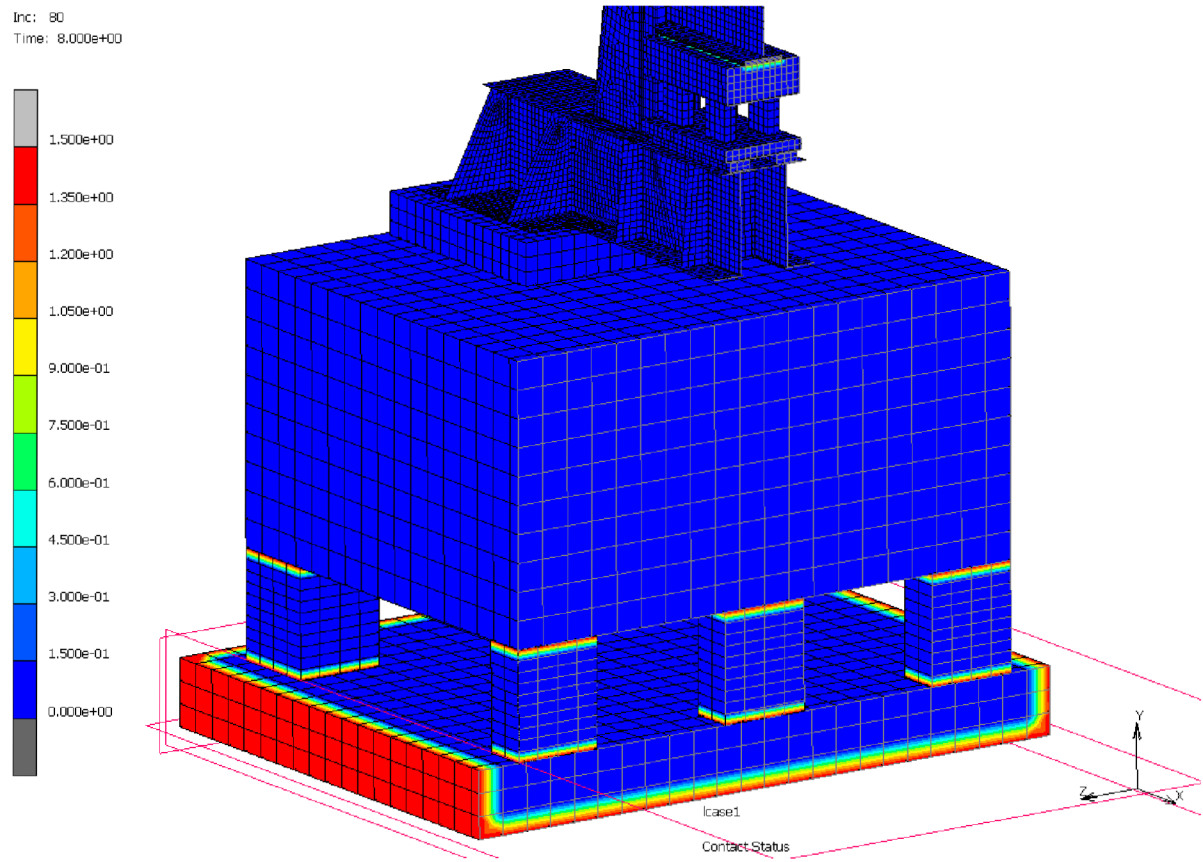
Príloha 1 - Stav kontaktu barana a šaboty tesne po náraze, čas 8 ms.



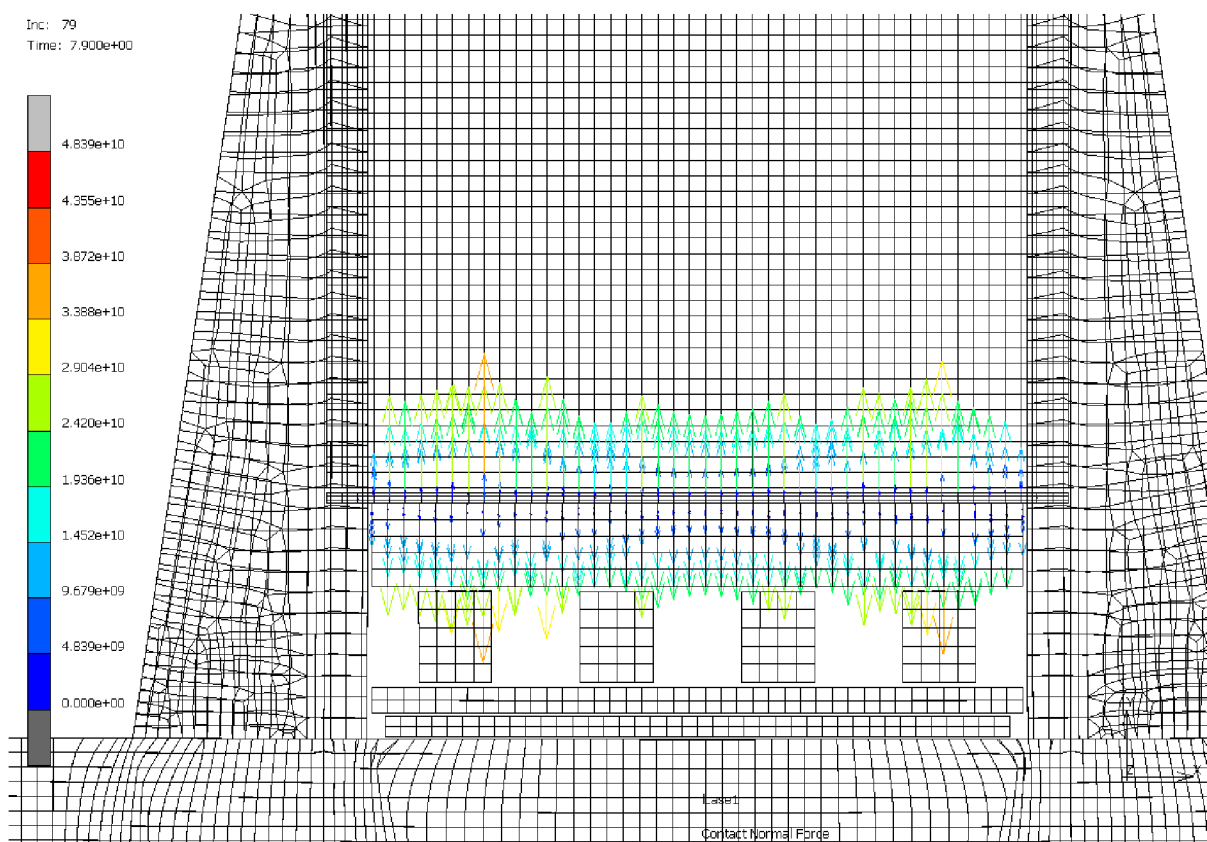
## Príloha 2 - Stav kontaktu tesne pred odrazom barana od šaboty, čas 11,3 ms.



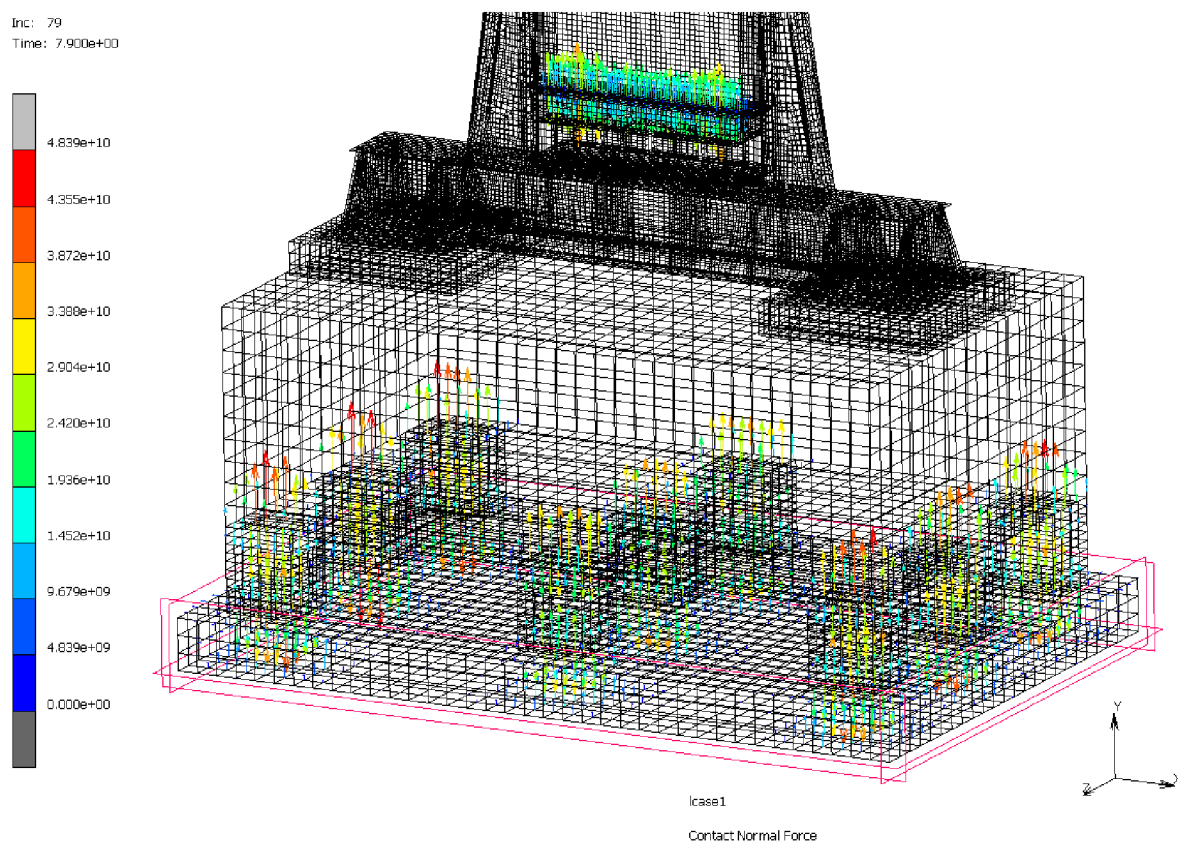
Príloha 3 – Stav kontaktov medzi izolátormi a základom, izolátormi a podložkou základu, podložkou základu a kontaktnými rovinami.



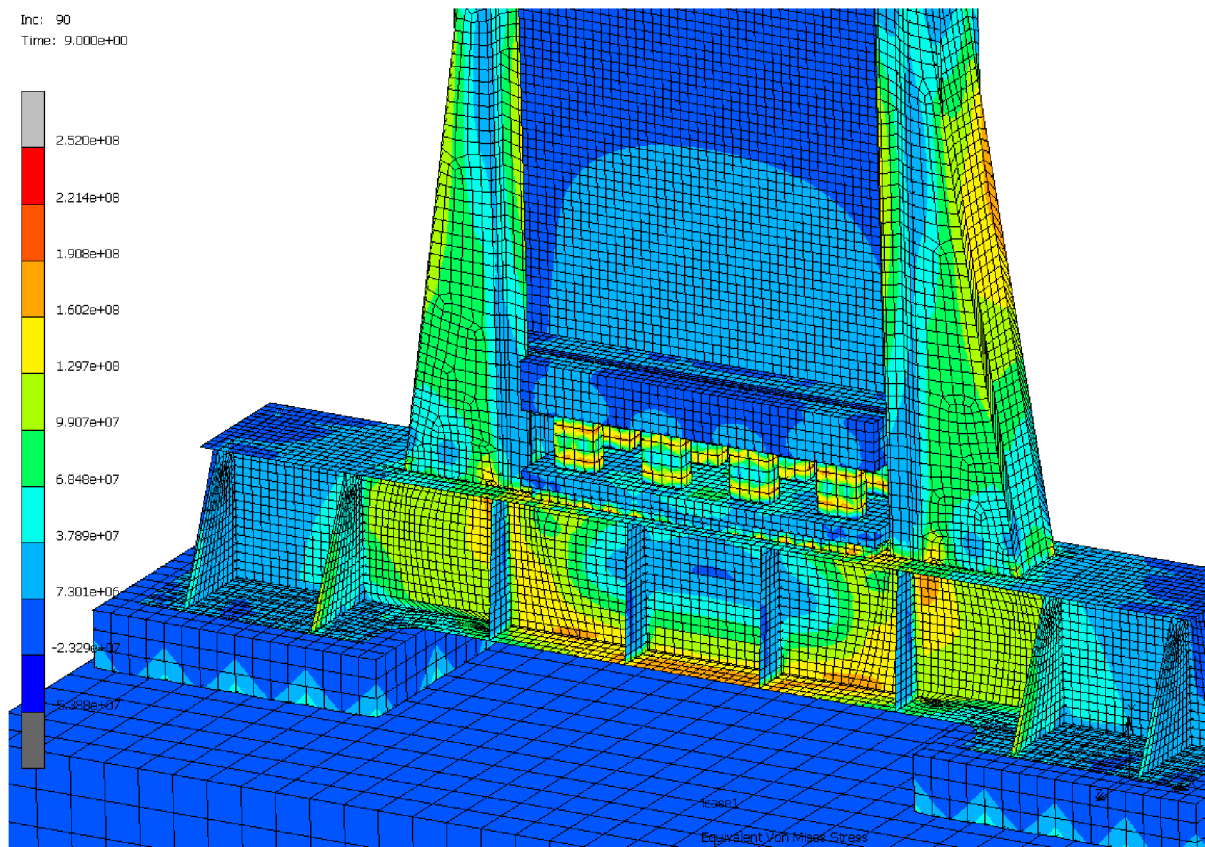
## Príloha 4 – Vektory normálovej sily pri náraze barana na šabotu, najvyššia hodnota 40 MN.



## Príloha 5 – Vektory normálových kontaktných síl pri náraze barana na šabotu

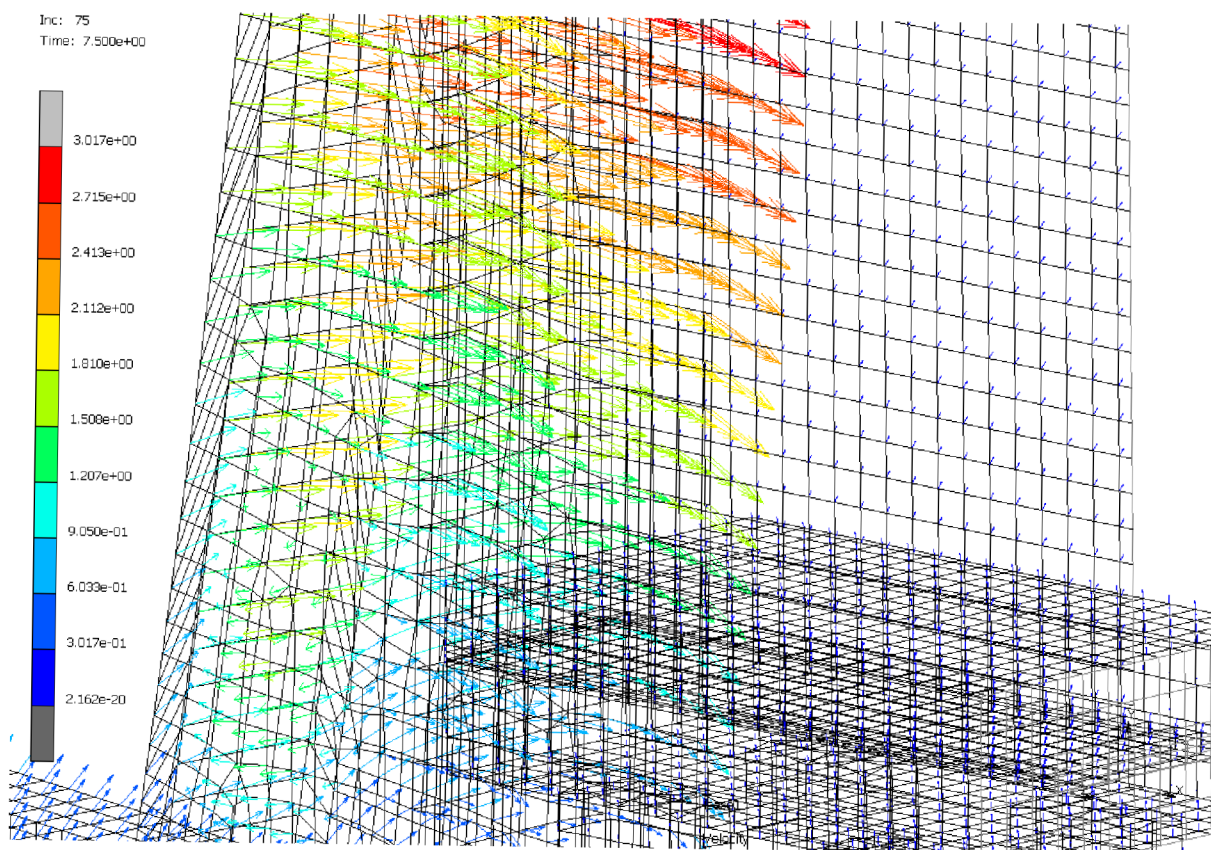


Príloha 6 – Napätie v ráme bucharu dosahuje maximálnej hodnoty okolo 200 MPa, Medza klzu použitej ocele je 355-275 MPa (tab. 3).





Príloha 7 – Baran dosiahne bodu zvratu, kedy je jeho rýchlosť nulová po asi  $6,47\text{ ms}$  po kontakte barana a šaboty (baran je v kontakte so šabotou po  $1,13\text{ ms}$  od začiatku analýzy).





## Príloha 8 – Deformácia rámu bucharu tesne po náraze. Mierka deformácie 1:20.

