

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
Stavebná fakulta

Ing. Ľubomír BALÁŽ

Autoreferát dizertačnej práce

Statická a dynamická analýza valcových nádrží

na získanie akademického titulu philosophiae doctor - PhD.

v doktorandskom študijnom programe: 5.1.7. aplikovaná mechanika

Miesto a dátum: Bratislava, máj 2016

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia na Katedre stavebnej mechaniky, Stavebnej fakulty STU v Bratislave.

Predkladateľ: Ing. Ľubomír Baláž

Katedra stavebnej mechaniky, Stavebná fakulta STU v Bratislave
Radlinského 11, 810 05 Bratislava

Školiteľ: Prof. Ing. Norbert Jendželovský, PhD.

Katedra stavebnej mechaniky, Stavebná fakulta STU v Bratislave
Radlinského 11, 810 05 Bratislava

Oponenti: Prof. Ing. RNDr. Mgr. Jozef Sumec, DrSc.

Katedra stavebnej mechaniky, Stavebná fakulta STU v Bratislave
Radlinského 11, 810 05 Bratislava

Doc. Ing. Kamila Kotrasová, PhD.

Ústav inžinierskeho staviteľstva, Stavebná fakulta TU v Košiciach
Vysokoškolská 4, 042 00 Košice

Ing. Zdeněk Čada, Ph.D.

SVS FEM s.r.o.,
Škrochova 3886/42, 615 00 Brno-Židenice

Autoreferát bol rozoslaný:

Obhajoba dizertačnej práce sa konáo.....hod.

na Katedre stavebnej mechaniky Stavebnej fakulty STU v Bratislave

prof. Ing. Stanislav Unčík, PhD.

Dekan Stavebnej fakulty STU v Bratislave

Obsah autoreferátu

1. Úvod.....	1
2. Ciele dizertačnej práce	2
3. Metodika práce a skúmania.....	3
4. Statická a dynamická analýza valcových nádrží.....	4
4.1. Matematická formulácia dynamickej úlohy.....	5
4.2. Dynamická analýza pomocou objemových prvkov	7
4.3. Analýza modelu reálnej železobetónovej konštrukcie.....	8
4.4. Spektrálna analýza valcovej nádrže	10
5. Experimentálne overenie výsledkov analýzy.....	12
5.1. Experimentálne meranie reálnych konštrukcií.....	13
5. Výsledky a záver.....	14
6. Zoznam použitej literatúry	16
6. Zoznam prác autora.....	17
7. Obsah dizertačnej práce	20

1. Úvod

Stúpajúca životná úroveň a narastajúce požiadavky na kvalitu životného prostredia majú za následok, že spoločnosť sa začína zaujímať o technológie udržateľného rozvoja zeme. Sem patrí už dlhodobo starostlivosť o pitnú vodu. V tejto oblasti sú to predovšetkým nádrže na pitnú vodu. Na opačnej strane je to potom čistenie odpadových vôd a budovanie čistiacich staníc. V posledných rokoch dochádza k rozvoju získavania energie pomocou druhotných zdrojov. Ide o výrobu bioplynu z biomasy a biologického odpadu. Taktiež sa v stiesnených podmienkach miest začali vďaka svojmu výhodnému tvaru používať ako požiarne a sprinklerové nádrže, umiestnené predovšetkým pod terénom. V týchto menovaných oblastiach sa stretávame s konštrukciou železobetónových nádrží.

Valcové nádrže sa využívajú skoro vo všetkých odvetviach národného hospodárstva, či už ako nádrže na vodu alebo na iné kvapaliny. Pri súčasnej technológii výstavby má približne 70% všetkých nádrží kruhový pôdorys. Ich rozdelenie nie je jednoduché, pretože sa pri ich výstavbe používajú rôzne materiály, majú rôzne tvary a účely použitia. Správna voľba materiálu a tvaru má priamy vplyv na koncepciu konštrukcie, statickú funkciu a technológiu výstavby.

Valcový tvar nádrží je veľmi výhodný zo statického a ekonomického hľadiska. Zo statického hľadiska sú valcové nádrže vhodné preto lebo obvodové steny sú vo vodorovnom smere namáhané len tlakom alebo len ťahom, pričom v ostatných nádržiach je namáhanie kombinované. Valcová nádrž je vhodná aj z hľadiska spotreby materiálu, pretože v porovnaní s inými tvarmi, pri rovnakom objeme majú menší rozmer a tým aj menší objem obvodových stien.

Určitou nevýhodou valcových nádrží je pomerne zložité debnenie stien, ktoré sa však v súčasnosti odstraňuje novými technologickými postupmi debniacich prác. Jednotlivé nádrže sa často združujú do skupín napríklad ako sústava v čistiarni odpadových vôd alebo sústava vodojemov [7]. Valcové nádrže sú tiež citlivé na jednostranné bočné tlaky, ktoré vyvolávajú v obvodových stenách prídavné ohybové momenty, na ktoré nie sú steny vo väčšine prípadov dimenzované.

Ako zásobárne vody (vodojemy) sa využívajú monolitické železobetónové nádrže. Hlavne pre malé a stredne veľké obsahy od 50 až do 1000 m³ kvapaliny a bežne sa robia s priemerom 3,0 až 15,0 m. Výška hladiny kvapaliny býva 2,5 až 6,0 m. Na technologické čistenie odpadovej vody sa používajú zväčša nádrže pôdorysne väčšieho priemeru s menšou výškou. V oblasti bioplynového hospodárstva sú to zase nádrže s objemom od 300 až do 10500 m³, ktoré sú charakteristické nafúknutou membránou, pod ktorou sa zberá bioplyn. Ich objem závisí od toho v ktorej časti výrobného procesu sú umiestnené. Môžu byť použité ako uskladňovacie nádrže, miešacie nádrže, plniace zásobníky alebo ako fermentory.

Pri nádržiach s malým obsahom náplne (do 200m³) sa stropná doska ukladá len na valcovú stenu nádrže, t.j. bez strednej podpory. V nádržiach s väčším obsahom treba pri zastropení vložiť jednu alebo viac vnútorných podpier. Používa sa monolitický alebo prefabrikovaný strop so stropných panelov.

Konštrukcia dna valcových nádrží závisí od kvality podlažia, účinkov podzemnej vody, funkcie a veľkosti nádrže a vlastností skladovanej kvapaliny. Dno nádrže ktoré leží priamo na teréne, máva rôznu hrúbku podľa stlačiteľnosti zeminy. V stlačiteľných zeminách má doska dna pomerne veľkú hrúbku a predpokladá sa, že dno je na pružnom podklade. V nestlačiteľných zeminách sa môže navrhovať tenké (membránové) dno a zvislé nosné prvky - steny a stĺpy sa ukladajú na vlastný základ.

Funkcia nádrže je vo všetkých prípadoch závislá na pevnosti konštrukcie ale aj na vzniku trhlin a priepustnosti betónu, a preto sa musí každá časť posudzovať z hľadiska únosnosti (MSU) aj z hľadiska vzniku trhlin (MSP) a tiež sa musí predpísať presné zloženie a konzistencia betónu.

Samotné projektovanie valcových nádrží na kvapaliny má niekoľko špecifických parametrov, na ktoré treba brať ohľad ešte pred začatím samotných prác. V mnohých prípadoch sa uskladňujú agresívne látky, ktoré majú negatívny vplyv na povrchovú vrstvu betónu a spôsobujú, že výstuž po čase koroduje. Druhým aspektom je únik takýchto látok von z nádrže cez vzniknuté trhliny a následná kontaminácia okolitej pôdy a spodných vôd.

2. Ciele dizertačnej práce

Predložená dizertačná práca je zameraná na analýzu valcových nádrží pri statickom a dynamickom zaťažení. Zvolená výpočtová metóda ovplyvňuje presnosť výpočtu, potrebný čas na výpočet, náročnosť procesu statického výpočtu ale aj zvolenie okrajových podmienok. V tejto práci je analyzovaných niekoľko druhov konštrukcií a taktiež niekoľko možných spôsobov výpočtu pomocou analytických výpočtov a viacerých počítačových programov. Všetky reálne konštrukcie, ktoré budeme analyzovať v tejto práci sú železobetónové valcové nádrže, ktoré majú pevne spojené dno so stenami. Z tohto dôvodu budeme pri analýze uvažovať ohybový stav napätosti.

1. Prvým dôvodom pre podrobnú analýzu valcových nádrží, ktorá bola podkladom pre napísanie tejto práce je snaha uľahčiť komplikované výpočty a návrhy týchto konštrukcií.
2. Porovnať vhodnosť matematických modelov pre statickú a dynamickú analýzu riešenej problematiky v závislosti na požadovanej presnosti výsledkov.
3. Analyzovať vplyv interakcie valcovej nádrže s náplňou a súčasne interakciu celej konštrukcie s podložím.
4. Predložiť numerické a matematické modely valcových nádrží s jasne špecifikovanými možnosťami ich zjednodušeného riešenia pre využitie v praxi.
5. Experimentálnymi meraniami na reálnych konštrukciách valcových nádrží, overiť niektoré výsledky numerických riešení.
6. Stanovenie podmienok na vytvorenie modelu pre optimálny návrh konštrukcie z hľadiska šírky trhlín, ktorá je pri valcových nádržiach rozhodujúca.

3. Metodika práce a skúmania

Pri tejto analýze sa zameriame na statickú a dynamickú analýzu valcových nádrží. Ide o nádrže umiestnené na povrchu, bez vonkajšieho zasypania a bez stropnej dosky. Pri tejto práci sa sústredíme na veličiny, ktoré sú potrebné pre kompletný návrh konštrukcie. V statickej časti analýzy sme zameraný na porovnanie klasických výpočtových metód. Tieto metódy sú zakomponované vo všetkých programoch určených na statický návrh a posúdenie konštrukcie, tak ako sme to prezentovali v druhej kapitole a ešte postupne budeme v piatej kapitole. Pre elimináciu nesprávneho vytvoreného modelu jedným programom budú niektoré analýzy spracované viacerými programami a ich výsledky a vzájomné odchýlky porovnávané. Výsledky počítačových analýz sa pokúsime overiť aj experimentálnym meraním na vybraných modeloch. Výsledky experimentálnych meraní budeme postupne prezentovať.

Ako podklad pre vytvorenie modelov použitých na analýzu boli reálne konštrukcie nachádzajúce sa v stavebnej praxi. Pre kompletnú analýzu sme použili tri reálne konštrukcie železobetónových valcových nádrží, tieto modely sú označené ako M1 - M3. A jeden model oceľovej nádrže ktorý bol reprezentovaný oceľovým barelom na voľu, tento model je označený ako M4.

Jedná sa predovšetkým o ohybový moment m_x , priečnu silu v_x , obvodovú ťahovú normálovú silu n_y v stene nádrže a deformáciu konštrukcie u , ktoré sú potrebné pri komplexnom statickom a dynamickom výpočte. Pri seizmickom výpočte sa k spomínaným veličinám pridávajú vlastné frekvencie a tvary kmitania pri plnej aj prázdnej nádrži. Použitím rôznych kombinácií modelov pri viacerých metódach výpočtu dostávame množstvo výsledkov vhodných na porovnanie a následné stanovenie ideálneho modelu pre požadovaný výpočet. Taktiež sme pri niektorých modeloch a analýzach vyskúšali zmenu hrúbky konštrukcie a sledovali zmeny výsledkov na takýchto upravených modeloch.

V nasledujúcich tabuľkách sú charakterizované všetky štyri modely pomocou ich rozmerov a materiálových vlastností, ktoré sú použité vo výpočte. Každý zo štyroch modelov je definovaný podľa obr. 3.1.

<i>model M1</i>		<i>betón C30/37</i>			
D_v	h_v	t_D	t_S	h_N	D_S
20,0 m	8,0 m	0,6 m	0,6 m	8,6 m	20,6 m

Tab. 3.3.1 Skutočné rozmery konštrukcie valcovej nádrže - model M1

<i>model M2</i>		<i>betón C30/37</i>			
D_v	h_v	t_D	t_S	h_N	D_S
8,23 m	6,0 m	0,4 m	0,4 m	6,4 m	8,63 m

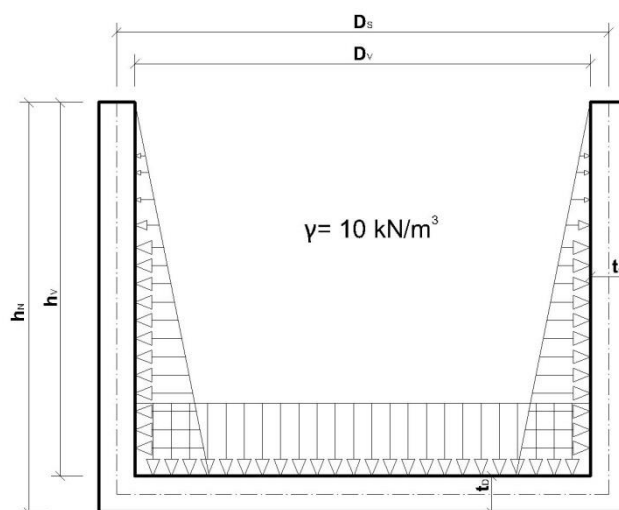
Tab. 3.2 Skutočné rozmery konštrukcie valcovej nádrže - model M2

<i>model M3</i>		<i>betón C30/37</i>			
D_v	h_v	t_D	t_S	h_N	D_S
32,0 m	8,0 m	0,3 m	0,28 m	8,3 m	32,28 m

Tab. 3.3 Skutočné rozmery konštrukcie valcovej nádrže - model M3

<i>model M4</i>		<i>ocel' S235</i>			
D_v	h_v	t_D	t_S	h_N	D_S
0,56 m	0,87 m	1,1 mm	1,1 mm	-	-

Tab. 3.4 Skutočné rozmery konštrukcie valcovej nádrže - model M4



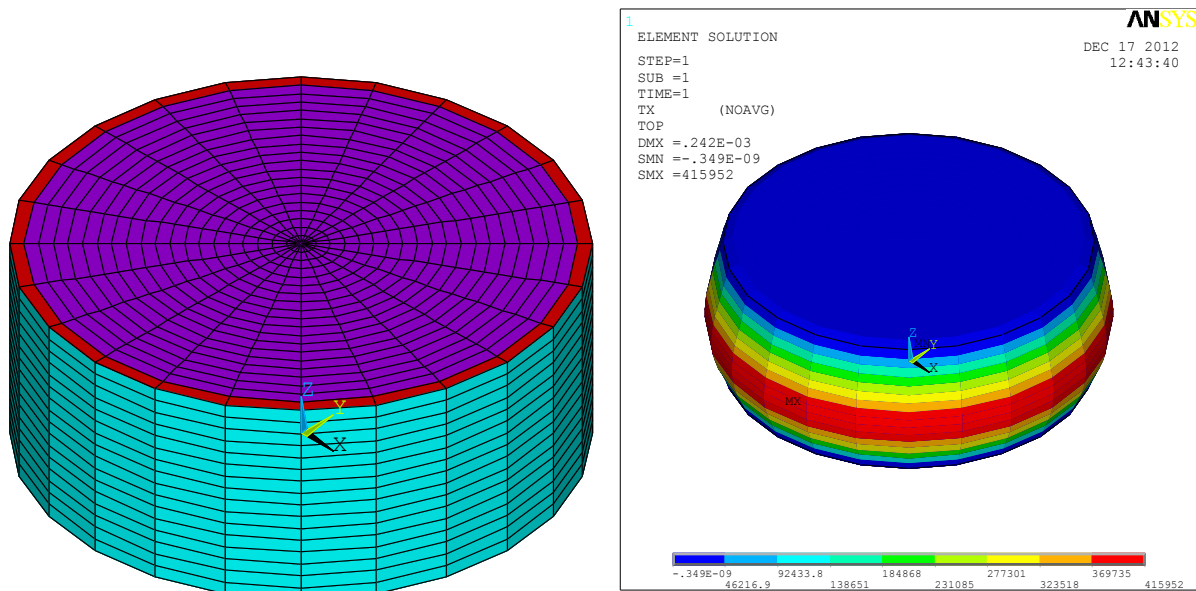
Obr. 3.1. Schéma modelu s popisom veličín

4. Statická a dynamická analýza valcových nádrží

Veľmi obľúbená, a čoraz viac uplatňovaná je metóda konečných prvkov. Pre riešenie týchto úloh boli uplatňované tri základné prístupy, ktoré sa líšia voľbou uzlových parametrov. V tomto zmysle aplikoval ako prvý MKP na problematiku valcových nádrží s poddajnými stenami v roku 1969 N. Edwards. Zaujímavú metódu vypracovali tiež Haroun s Housnerom [2]. Princíp spočíva v kombinácii MKP aplikované na nádrž a klasického riešenia pre impulzný tlak pomocou nekonečných radov. Odozva steny sa potom určuje pomocou princípu virtuálnej práce. Nelineárne úlohy sú riešené v prácach Belytscho a Liu pomocou Lagrangeových – Eulerových rovníc pre kvapalinu.

V hlavnej časti predkladanej práce sa venujeme využitiu objemových konečných prvkov, ktorými je modelovaná voda. Zaťaženie nádrže budeme modelovať pomocou dvoch druhov objemových kvapalinových prvkov z knižnice programu ANSYS. Tieto prvky budú svojimi vlastnosťami reprezentovať náplň konštrukcie.

V prvej fáze sme valcové nádrže postupne zaťažovali tlakom náplne, ktorý bol reprezentovaný hydrostatickým zaťažením. Vo všetkých prípadoch bola na výpočet zaťaženia použitá objemová hmotnosť vody - 10kN/m^3 [8,9]. Následne sme použili objemové prvky FLUID30 a FLUID80 na statickú analýzu konštrukcie. Na obr. 4.1 je prezentovaný model konštrukcie s priebehom obvodových ťahov v stene nádrže.



Obr. 4.4.1 Model konštrukcie valcovej nádrže a priebeh obvodových ťahov v stene

4.1. Matematická formulácia dynamickej úlohy

V terminológii matematického numerického modelovania daného dynamického procesu je pohyb konštrukcie popísaný vektorom n zovšeobecnených premiestnení u . Inerciálne, elastické a disipatívne vlastnosti (disipácia energie) konštrukcie sú popísané maticami hmotnosti M , tuhosti K a tlmenia C . Zaťaženie je popísané vektorom zovšeobecnených síl f , ktorého prvky f_i sú definované zložitými funkciami času a zovšeobecnenými premiestneniami, rýchlosti a zrýchlenia. Na základe experimentov môžeme predpokladať, že tieto funkcie f_i môžeme v prvom priblížení po linearizácii definovať ako súčet času $f_i(t)$ a lineárnej funkcie zovšeobecnených zrýchlení $f_i(\ddot{u})$, ktorú môžeme vyjadriť ako súčin vektorov $\ddot{u}$ zovšeobecnených zrýchlení a štvorcovej matice M_w konštantných súčiniteľov. Pohyb konštrukcie môžeme teda popísať lineárnou maticovou pohybovou rovnicou s príslušnými okrajovými podmienkami s odvolaním sa na článok [3,4].

$$(M + M_w)\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = f(t) \quad (4.1)$$

M - matica súčiniteľov hmotnosti diskretizovanej konštrukcie

M_w - matica súčiniteľov hmotnosti časti diskretizovanej kvapaliny

K - matica súčiniteľov tuhosti diskretizovanej konštrukcie

C - matica súčiniteľov tlmenia diskretizovanej konštrukcie

$f(t)$ - vektor zovšeobecnených síl pôsobiach na konštrukciu

u - vektor zovšeobecnených premiestnení

Pohybová rovnica (4.1) je základnou rovnicou pre výpočet dynamickej odozvy konštrukcie pri styku s kvapalinou, ktorá je založená na princípe prídavnej hmotnosti kvapaliny M_w . Pri tomto postupe sa dynamická odozva konštrukcie rieši modálnou a spektrálnou analýzou, alebo metódou

priameho integrovania pohybových rovníc konštrukcie. Matica hmotnosti je vytvorená pripočítaním matice prídavnej hmotnosti kvapaliny k matici hmotnosti konštrukcie.

Odvozenie diferenciálnej akustickej vlnovej rovnice (4.2) je založené na vete o zachovaní hybnosti a na rovnici kontinuity, pri zohľadnení požadovaných podmienok:

- kvapalina je stlačiteľná, izotropná a homogénna
- kvapalina je lineárna a dokonale pružná
- priemerná hustota a tlak sú stále v celej kvapalinovej oblasti
- nedochádza k prúdeniu kvapaliny
- kvapalina je v kontakte s konštrukciou

platí diferenciálna rovnica:

$$\frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = \nabla^2 p \quad (4.2)$$

kde v rovnici (4.2) je c rýchlosť šírenia zvuku v kvapaline

Diferenciálnu rovnicu diskretizujeme pre danú kvapalinovú oblasť. Do diskretizovanej pohybovej rovnice musíme zaviesť člen predstavujúci tlmenie sústavy. Po zavedení konštrukcie väzby medzi kvapalinou a konštrukciou dostaneme pohybovú rovnicu v úplnom diskretnom tvare :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M} & \mathbf{0} \\ \mathbf{M}_c & \mathbf{M}_p \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{u}} \\ \ddot{\mathbf{p}} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{C}_p \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{u}} \\ \dot{\mathbf{p}} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K} & \mathbf{K}_c \\ \mathbf{0} & \mathbf{K}_p \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{u} \\ \mathbf{p} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{f}_e(t) \\ \mathbf{w}(t) \end{Bmatrix} \quad (4.3)$$

$\mathbf{M}$ - matica súčiniteľov hmotnosti diskretizovanej konštrukcie

$\mathbf{K}$ - matica súčiniteľov tuhosti diskretizovanej konštrukcie

$\mathbf{C}$ - matica súčiniteľov tlmenia diskretizovanej konštrukcie

$\mathbf{M}_p$ - matica súčiniteľov hmotnosti kvapaliny

$\mathbf{K}_p$ - matica súčiniteľov tuhosti kvapaliny

$\mathbf{C}_p$ - matica súčiniteľov tlmenia v kvapaline

$\mathbf{M}_c$ - matica súčiniteľov hmotnostných (inerciálnych) interakcií

$\mathbf{K}_c$ - matica súčiniteľov elastických interakcií

$\mathbf{f}(t)$ - vektor zovšeobecnených síl pôsobiacich na konštrukciu

$\mathbf{w}(t)$ - vektor zovšeobecneného zaťaženia v bodoch kvapalinovej oblasti

Sústava pohybových rovníc sa najčastejšie rieši pomocou metódy priamej integrácie. Systém ANSYS poskytuje jeden z možných postupov integrácie - Newmarkova metóda.

Modálna analýza nesymetrického zväzku rovníc:

Pri modelovaní pomocou prvku FLUID30 nám vzniká nesymetrická matica hmotnosti aj tuhosti. Zovšeobecnený problém vlastných čísiel nesymetrického zväzku ($\mathbf{K}^*, \mathbf{M}^*$) [15] vychádza zo sústavy homogénnych rovníc s nulovou pravou stranou.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M} & \mathbf{0} \\ \mathbf{M}_c & \mathbf{M}_p \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{u}} \\ \ddot{\mathbf{p}} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{C}_p \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{u}} \\ \dot{\mathbf{p}} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K} & \mathbf{K}_c \\ \mathbf{0} & \mathbf{K}_p \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{u} \\ \mathbf{p} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{Bmatrix} \quad (4.4)$$

Modálna analýza symetrickej sústavy rovníc:

Pri použití prvku FLUID80 vychádzame z Lagrangeovej teórie, pričom platí rovnica (4.1). Tento typ analýzy sa využíva k určeniu vlastných tvarov kmitania a vlastných frekvencií konštrukcie. Vychádza sa z riešenia pohybových rovníc pre netlmený systém.

$$[\mathbf{M}]\{\ddot{\mathbf{u}}\} + [\mathbf{K}]\{\mathbf{u}\} = \mathbf{0} \quad (4.5)$$

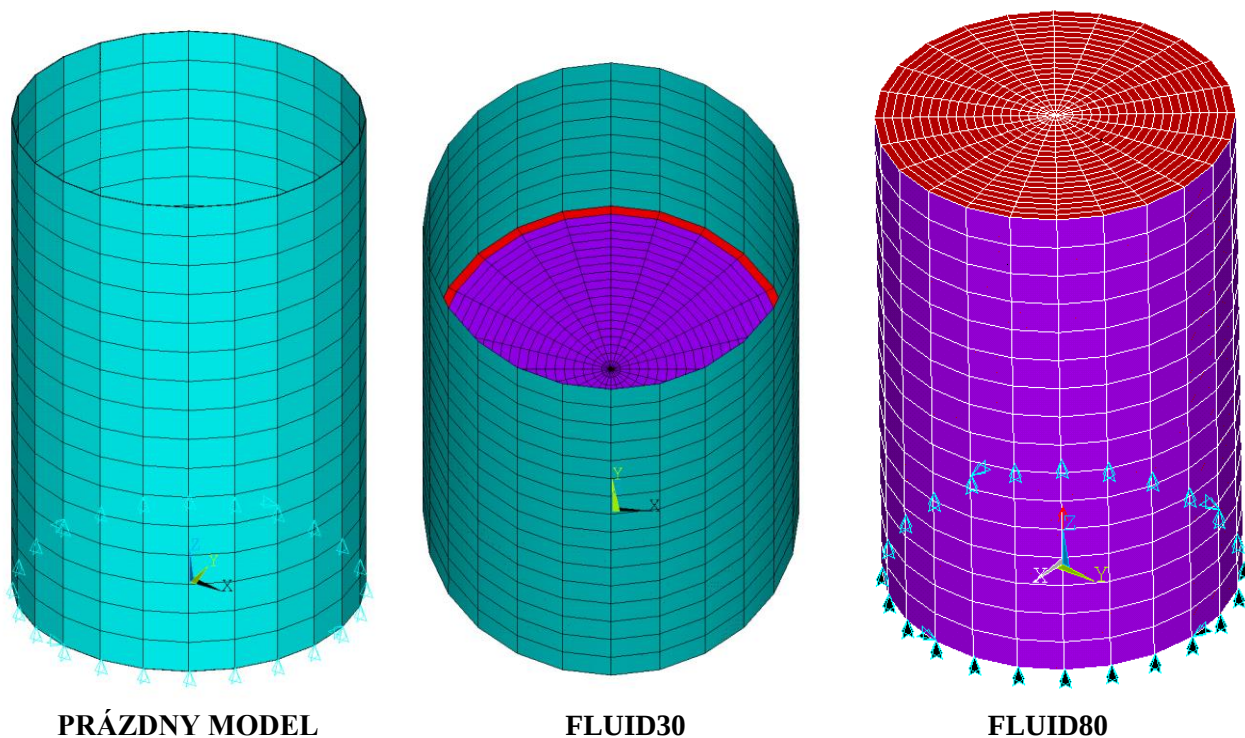
4.2. Dynamická analýza pomocou objemových prvkov

Valcovú škrupinu v tomto prípade reprezentovala oceľová nádrž na vodu, ktorú sme mali k dispozícii aj na prvý experiment v laboratóriu. Vzhľadom k experimentálnej vzorke sme vytvorili model valcovej nádrže.

Predstavená vzorka bola skúšaná v troch krokoch:

1. Prázdna nádrž
2. Nádrž naplnená do polovice svojej výšky
3. Plná nádrž

Podľa principiálnych teoretických vedomostí popísaných v predchádzajúcich kapitolách sme vytvorili konečnoprvkový model valcovej nádrže (plechového suda) podľa preddefinovaných parametrov reálnej vzorky. Samotná oceľová konštrukcia bola vytvorená prvkom SHELL63 a kvapalinová náplň postupne prvkom FLUID30 a FLUID80. Získané hodnoty boli následne porovnané a sú zobrazené v tabuľke 4.1.



Obr. 4.2 Výpočtové modely konštrukcie oceľovej nádrže

<i>PRVÁ VLASTNÁ FREKVENCIA KONŠTRUKCIE</i>		
<i>PRÁZDNY MODEL</i>	<i>FLUID30</i>	<i>FLUID80</i>
20,99 Hz	40,48 Hz	45,64 Hz

Tab. 4.1 Hodnoty vlastných frekvencií

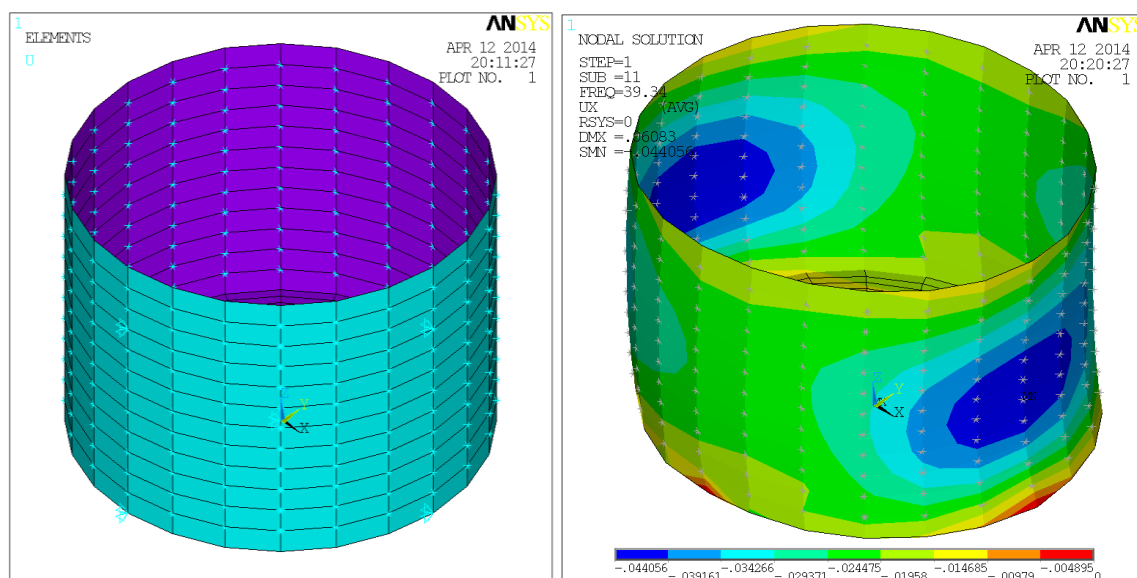
4.3. Analýza modelu reálnej železobetónovej konštrukcie

V tejto časti budeme prezentovať výpočet vlastných tvarov a frekvencií valcovej nádrže označenej ako model M2, pričom sme použili štyri odlišné teórie počítačového modelovania náplne valcovej nádrže. Všetky tieto modely boli postupne analyzované na pevnom podklade aj pružnom podloží. Parametre výpočtu pružného podkladu boli prevzaté z reálnej konštrukcie štrkového vankúša pod valcovou nádržou. Podložie bolo modelované Winklerovým modelom podložia [12].

Náplň v nádrži sme postupne modelovali štyrmi spôsobmi:

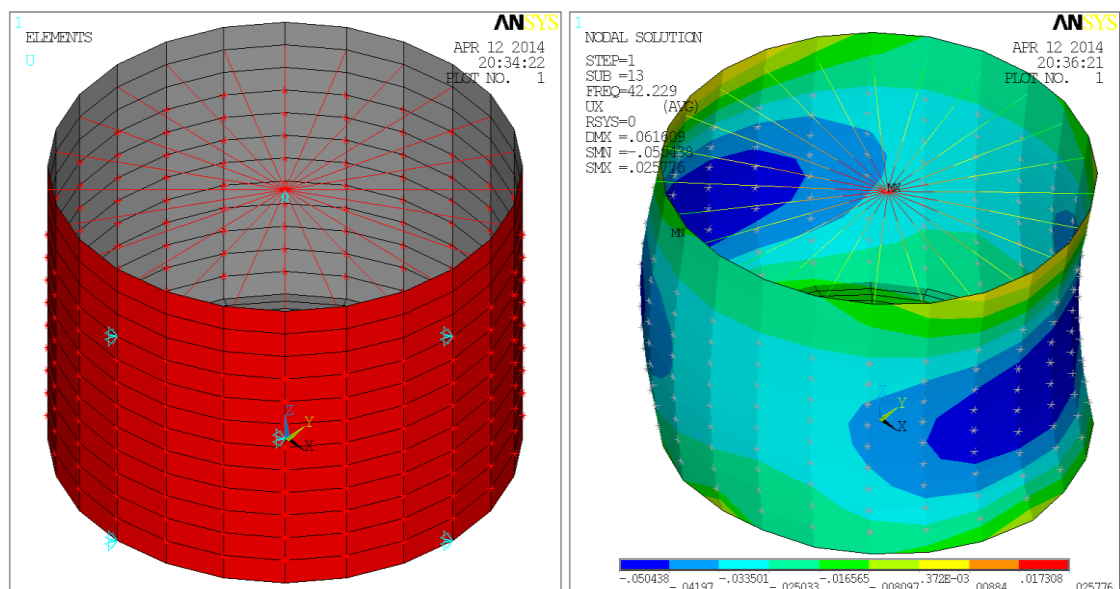
Hmota rozdelená do hmotných bodov po plášti nádrže [1,11]. Rozdelením hmoty na dve časti, spodná hmota pevne spojená s konštrukciou a druhá hmota pri hornom povrchu spojená cez pružné prvky s plášťom [6]. V treťom a štvrtom modeli bol objem kvapalinovej oblasti modelovaný pomocou elementov FLUID30 a FLUID80, tieto prvky sú špeciálne určené na modelovanie tekutiny. Postupne sme určili prvé vlastné tvary a frekvencie valcovej nádrže, ktorej výpočtový model bol stanovený podľa parametrov skutočnej konštrukcie.

V tejto časti je hmota vody rovnomerne rozdelená do uzlov plášťa valcovej nádrže. Na obr. 4.3 je prezentovaný model konštrukcie a prvý vlastný tvar kmitania s frekvenciou 39,34 Hz.



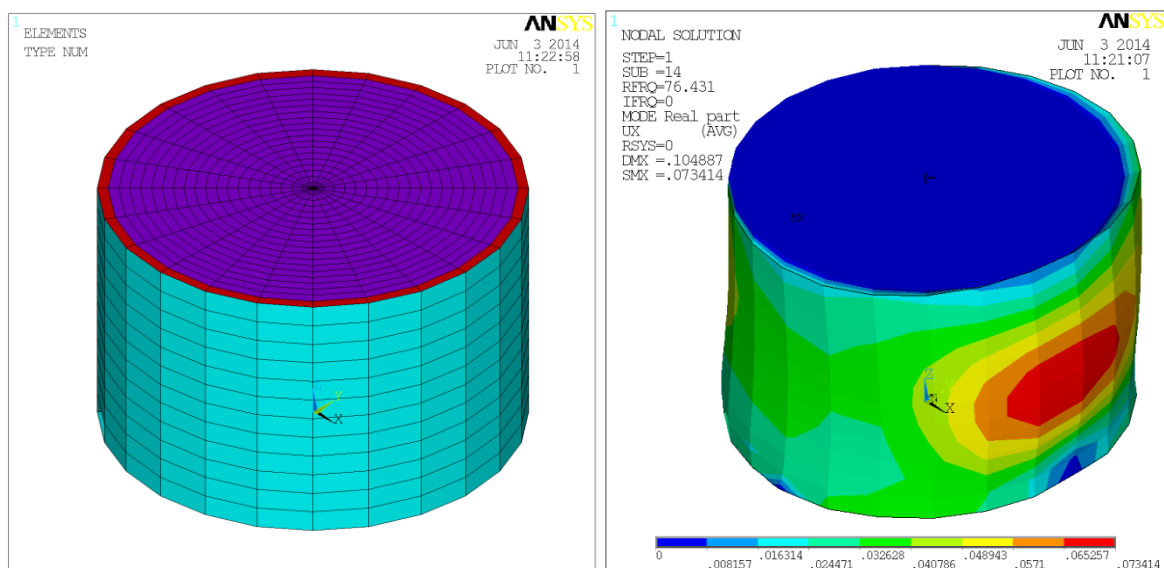
Obr. 4.3 Model valcovej nádrže a prvý tvar kmitania – pružné podoprenie

Pre druhý model bola aj hmota vody rozdelená na dve časti. Spodná voda bola pevne pripojená do uzlov plášťa nádrže a zvyšná hmota pri hornom povrchu je pružne pripojená ku konštrukcii. Takéto rozdelenie hmoty je často označované ako Housner-Epsteinova metóda výpočtu interakcie konštrukcie s kvapalinou. Na nasledujúcom obr. 4.4 je prezentovaný prvý vlastný tvar kmitania s frekvenciou 42,22 Hz.



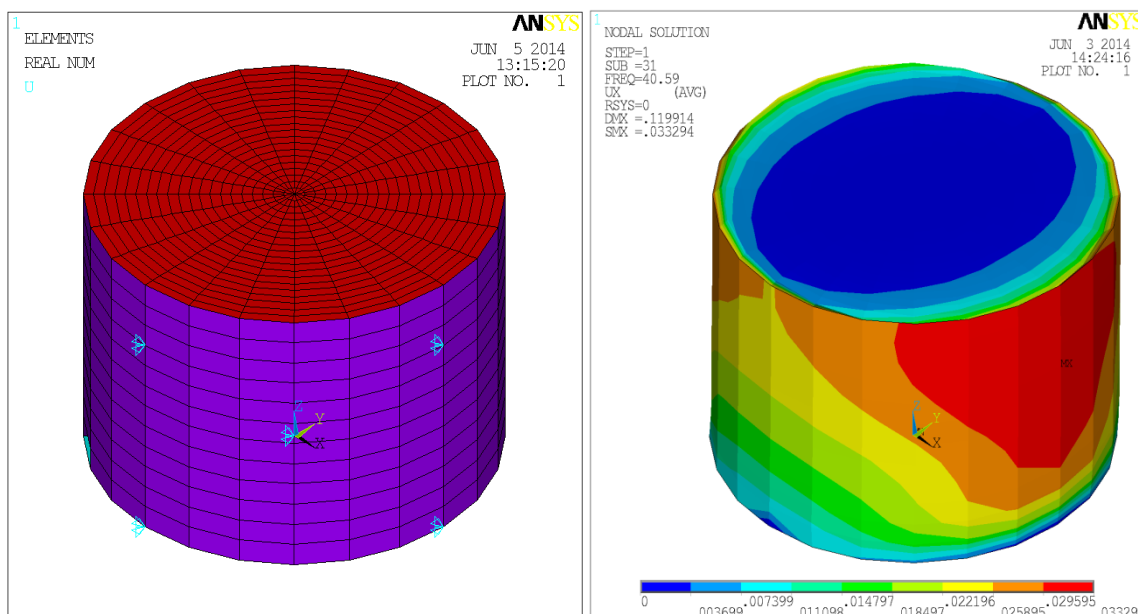
Obr. 4.4 Model valcovej nádrže a prvý tvar kmitania – pružné podoprenie

Tretia časť bola venovaná modelovaniu náplne (vody v nádrži) pomocou objemového kvapalinového prvku FLUID30. V uzloch, ktoré nie sú v kontakte s poddajným telesom nádrže sa stupne voľnosti odpovedajúce posunutiam odoberú. Delenie na prvky, ktoré sú v kontakte s plášťom objektu "vonkajšia voda" a na tie ktoré nie sú v kontakte s nádržou – "vnútorná voda"(na obr. 5.8 – fialová farba). Vlastný tvar kmitania s frekvenciou 76,43 Hz je uvedený n obr. 4.5.



Obr. 4.5 Model valcovej nádrže a prvý tvar kmitania – pružné podoprenie

V poslednom prípade sme pristúpili k modelovaniu konštrukcie pomocou objemového kvapalinového prvku FLUID80. Model takejto valcovej nádrže spolu s prvým vlastným tvarom kmitania a frekvenciou 40, 59Hz uvedený na obr.4.6.



Obr. 4.6 Model valcovej nádrže a prvý tvar kmitania – pružné podoprenie

V ďalšej časti sme overili hodnotu prvej vlastnej frekvencie podľa empirických vzťahov. Išlo o vzťah pre nádrž s pevným podopretím (5.31) a o nádrž s pružným podopretím (5.32).

$$f = \sqrt{\frac{3 \cdot EI}{4 \cdot \pi^2 \cdot h^3 \cdot m}} \quad (4.4)$$

$$f = \frac{1}{4 \cdot \pi^2} \cdot \frac{3 \cdot EI \cdot \pi \cdot r^2 \cdot k}{h^2 \cdot (\pi \cdot r^4 \cdot h \cdot k + 12 \cdot EI) \cdot m} \quad (4.5)$$

Porovnávali štyri spôsoby modelovania náplne valcovej nádrže s výpočtom pomocou vzťahov (4.4) a (4.5), a ich vplyv na veľkosť vlastných frekvencií. Pri tejto analýze sme použili pevné aj pružné podložie pod základovou doskou plnej valcovej nádrže. Numerickým modelovaním v metóde konečných prvkov sme spresnili výpočet vlastných frekvencií plnej valcovej nádrže podľa vzťahov (4.4) a (4.5), ktoré sa nachádzajú v literatúre a technických normách. Tretí model je rádovo odlišný od ostatných pretože pri tomto výpočte vzniká nesymetrická sústava rovníc z čoho vzniká náročný výpočet vlastných čísel a vlastných vektorov. Z tohto dôvodu je zložité hľadanie vlastných frekvencií kmitania valcovej nádrže.

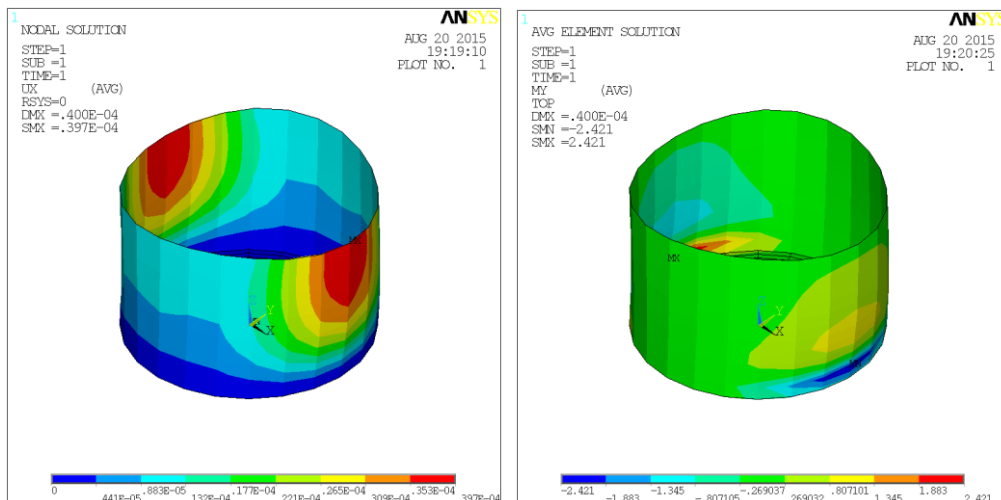
4.4. Spektrálna analýza valcovej nádrže

Na stanovenie odozvy nádrže sa použijú numerické metódy založené na hydrodynamických rovniciach s odpovedajúcimi okrajovými podmienkami. Problémom kmitania kvapaliny vo valcovej nádrži spôsobeného vodorovným impulzom sa zaoberal už v roku 1949 Jacobsen, L. S. a riešil tlaky kmitajúcej kvapaliny na steny nádrže, riešenie hľadal v tvare nekonečných radov pomocou Besselových funkcií.

Seizmická analýza nádrží uskladňujúcich kvapaliny si vyžaduje špeciálny návrh. Aplikovaním týchto špeciálnych postupov sa vypočítajú jednak hydrodynamické tlaky a aj výsledné hydrodynamické účinky, ktoré vzniknú pôsobením kvapaliny na nádrž, aby boli splnené podmienky pre návrh konštrukcie z vodonepriepustného betónu [5]. Ako podklad pre výpočtový model bola použitá reálna valcová nádrž, ktorej parametre ako modelu číslo M2 boli podrobne opísané v kapitole 3. Výpočtový model konštrukcie bol urobený pomocou MKP vo výpočtovom prostredí

ANSYS. Pri seizmickom zaťažení konštrukcie boli použité tieto vstupné parametre: Súčiniteľ významnosti konštrukcie $\gamma_1 = 1,0$. Spektrum typu I. pre kategóriu podlažia typu B, kde je parameter $S_a = 2,0$. Všetky ostatné parametre sú prevzaté z normy [7]. Smer seizmického zrýchlenia bol v smere osi X. Súčiniteľ útlmu ŽB konštrukcií pre pomerný útlm 5%.

Pri kvázistatickom riešení sme modelovali hydrodynamické zaťaženie od zemetrasenia v zmysle teoretických vzťahov popísaných v druhej kapitole dizertačnej práce. Vo výpočtovom modeli bolo použité zaťaženie pre zrýchlenie $1,0\text{m/s}^2$ [10].



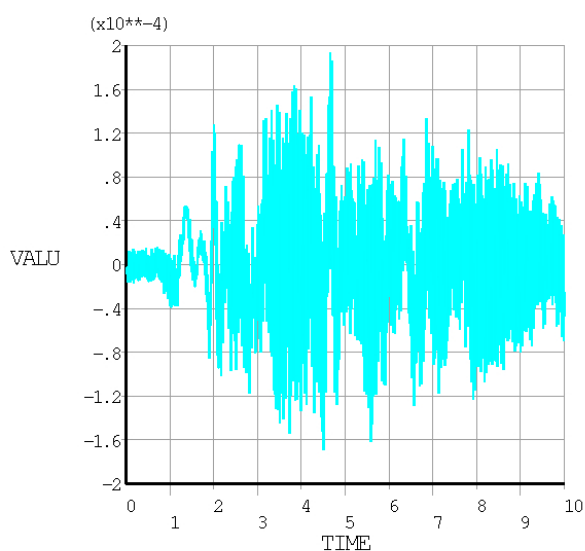
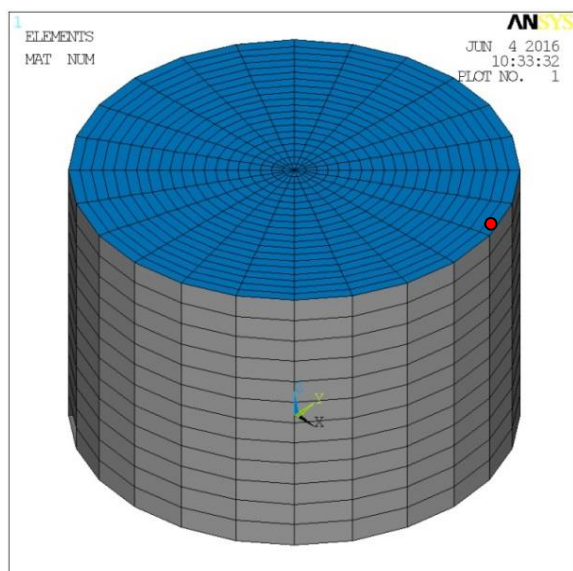
Obr. 4.7 Deformácia v smere osi x (m) a ohybový moment m_y (kNm/m)

Základné riešenie bolo vypočítané pre hrúbku steny plášťa nádrže 400mm. Pre určitý druh optimalizácie konštrukcie sme urobili výpočet aj pre hrúbku steny 300 a 200 mm. V nasledujúcej tabuľke je uvedený maximálny vodorovný posun u_s na hornej hrane nádrže v smere osi X a maximálna hodnota merného ohybového momentu m_y na spodnom okraji steny tesne nad votknutím do dna nádrže.

hrúbka steny	u_s (mm)	m_y (kNm/m)
400 mm	0,0397	2,421
300 mm	0,0675	1,653
200 mm	0,1370	0,916

Tab. 4.2 Vodorovný posun steny nádrže a priebeh ohybových momentov

V tejto časti bol pri analýze použitý skutočný záznam zemetrasenia v podobe akcelerogramu. Na modelované náplne nádrže, ktorá bola označená ako model M2 bol použitý objemový kvapalinový prvok FLUID80.



Výpočtový model a deformácia bodu číslo 12458 v čase (m)

Sledovali sme najväčšiu výchylku v bode číslo 12458 v smere osi X. Bod číslo 12458 je bod na hornej hrane konštrukcie (obr. 5.34 vľavo - označený červenou). Na obr. 5.34 je záznam vodorovnej deformácie v čase. Maximálna výchylka je v čase $t = 4,66$ s.

5. Experimentálne overenie výsledkov analýzy

V snahe určiť ktorý výpočtový postup je prijateľnejší na určovanie vlastných tvarov a frekvencií valcových nádrží sme pristúpili k experimentálnemu meraniu prvej vzorky (oceľový sud). Je to model oceľovej nádrže, ktorú pre naše potreby reprezentuje plechový sud.



Obr. 5.1 Pripravená vzorka na experimentálne meranie + detail akcelerometra

Táto prvotná analýza podáva obraz o dôležitosti správneho výberu, konečných prvkov pre modelovanie kvapaliny. V každom prípade je dôležité podrobiť výsledky analýzy experimentálnym meraniam, ktoré nám potvrdia alebo vyvrátia vhodnosť použitých prvkov na daný typ problému.

<i>PRVÁ VLASTNÁ FREKVENCIA</i>		
<i>“FLUID30”</i>	<i>“FLUID80”</i>	<i>“EXPERIMENT”</i>
40,48 Hz	45,64 Hz	43,103 Hz

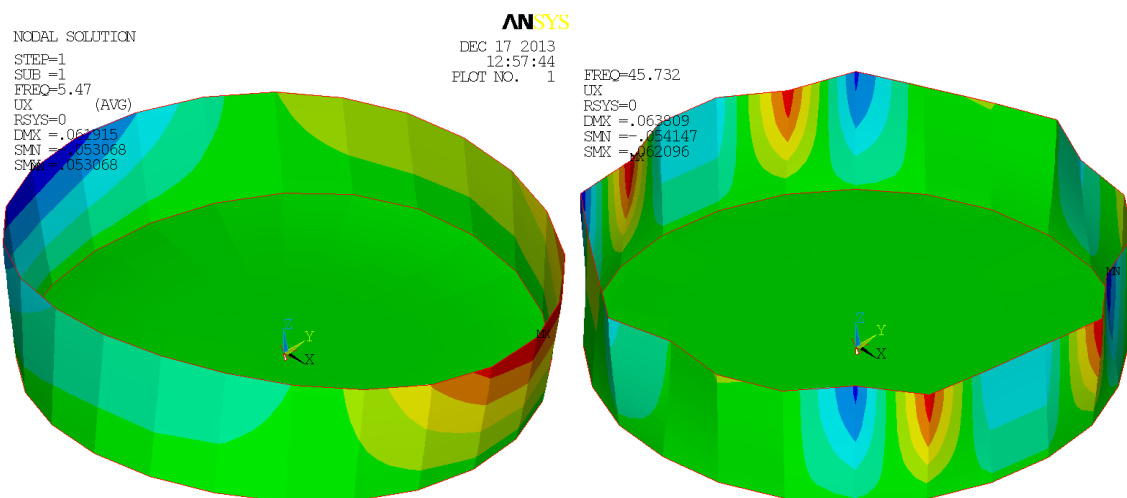
Tab. 5.1 Vlastné frekvencie pre plný sud

5.1. Experimentálne meranie reálnych konštrukcií

Pri meraní, ktoré sme mali možnosť realizovať, sme použili päť akcelerometrov, umiestnených na stene nádrže z vnútornej strany. Do steny valcovej nádrže v kolmom smere sme vnášali budiacu silu dreveným trámom 100mm x 100mm x 800mm o hmotnosti 2,0 kg. Úder nasledoval postupne pri každom akcelerometri v dvoch sériách a následne sme zaznamenávali hodnoty na všetkých piatich snímačoch.



Obr. 5.2 Reálna konštrukcia valcovej nádrže



Obr. 5.3 Prvý vlastný tvar kmitania - vľavo, lokálny tvar kmitania horného prstenca-vpravo

Z výsledkov experimentu vieme určiť periódu kmitania pre všetky naše snímače $T = 0,022$ sekundy. Tejto perióde zodpovedá frekvencia $45,45 \text{ Hz}$. Experimentálnym meraním sa nám nepodarilo vybudovať prvý vlastný tvar kmitania, vybudili sme len 20 lokálny tvar kmitania horného prstenca nádrže, ktorý je na obr. 5.3 vpravo.

5. Výsledky a záver

Výsledkom komplexnej analýzy konštrukcií valcovej nádrže je identifikovanie prioritných veličín, ktoré sú potrebné pre kompletný návrh, vhodne zvolená metóda a spôsob modelovania v závislosti na požadovaných výsledkoch.

Podstatnú časť práce tvorí analýza reálnych modelov valcových nádrží, ktoré slúžia na uskladnenie rôzneho zväčša tekutého materiálu. Správny návrh takejto **inžinierskej** konštrukcie je veľmi dôležitý, pretože aj malé poškodenia konštrukcie môže mať veľké biologické následky čo spôsobuje veľké finančné škody. Vo väčšine prípadov je sanácia konštrukcie takmer nemožná alebo príliš drahá.

- 1) Pri statickej analýze nemá radikálny vplyv na presnosť výsledkov zvolená výpočtová metóda modelovania konštrukcie ani druh zvoleného programu, ktorý je na výpočet použitý.
- 2) Komplexný výpočtový model konštrukcie musí byť vytvorený pre statické účely aj z vplyvom podlažia. Model na pružnom podlaží je nevyhnutný na dosiahnutie vnútorných síl a deformácií v základovej doske valcovej nádrže.
- 3) Pri dynamickej analýze konštrukcií nádrže je veľkosť vnútorných síl a deformácií v oblasti 10% až 20% výsledkov statickej analýzy.
- 4) Zvolený model pri seizmickej analýze má vplyv na presnosť výpočtu ale aj na náročnosť tvorby modelu a jeho výpočet. Platí, že čím je model zložitejší tým sú výsledky presnejšie a čas a náročnosť sa zväčšujú.
- 5) Pri dynamickej analýze vznikli nesymetrické výsledky oproti rotačne symetrickým výsledkom pri statickej analýze.
- 6) Na vykompenzovanie nesymetrických výsledkov dynamickej analýzy a upustenie od časovo aj odborne náročného seizmického výpočtu odporúčame aplikovať na symetrické výsledky dynamickej analýzy uplatniť koeficient **1,25**. To znamená navýšenie veľkostí všetkých vnútorných síl (ohybový moment, priečna sila, odvodový ťah) o 25%.
- 7) Správne nadimenzovanie konštrukcií na takto upravené vnútorné sily bezpečne vyhovie všetkým požiadavkám kladeným na takýto druh konštrukcie.

Predložená dizertačná práca je zameraná na statickú a dynamickú analýzu valcových nádrží. Hlavným cieľom dlhodobej práce je správne špecifikovať výpočtový model pre zvolený druh zaťaženia a vhodne aplikovať jeho účinky na konštrukciu. Všetky výpočty, analýzy, skúmania a experimenty boli urobené a aplikované na skutočné konštrukcie zo stavebnej praxe. Jednalo sa predovšetkým o tri železobetónové valcové nádrže používané v procese spracovania biologického odpadu a jednu oceľovú nádrž, ktorú pre naše účely reprezentoval plechový barel na vodu.

Prvá časť bola venovaná statickej analýze valcových nádrží a skúmaniu vnútorných síl a deformácií od vnútorného zaťaženia. Ako prvý bol vytvorený výpočtový model valcovej nádrže a čiastočne zautomatizovaný zjednodušený výpočet vnútorných síl a deformácií. Pri ďalšom postupe boli použité programy SCIA ENGINEER a RFEM, ktoré sú prioritne vyvinuté pre statický,

dynamický návrh a dimenzovanie konštrukcií. Spomínané programy neobsahujú objemové prvky, takže bolo vnútorné zaťaženie náplňou (vodou) reprezentované pomocou hydrostatického tlaku. Program ANSYS obsahuje kvapalinové priestorové objemové prvky a tak mohli byť k analýze pomocou hydrostatického tlaku pridané dve možnosti modelovania pomocou konečných prvkov FLUID30 a FLUID80 (Eulerovský alebo Lagrangeovský prístup). Sledované veličiny všetkých modelov boli vzájomne porovnávané a hlavným výsledkom statickej časti riešenej úlohy bolo zistenie, že zvolená výpočtová metóda, spôsob zaťaženia konštrukcie, náročnosť výpočtového modelu nemá vplyv na presnosť výsledkov, náročnosť výpočtu ani čas.

Dynamická analýza bola zameraná na výpočet vlastných frekvencií, vlastných tvarov kmitania, deformácií a vnútorných síl od seizmického zaťaženia. V tejto časti bolo analyzovaných niekoľko možných spôsobov zaťaženia konštrukcie a následného dynamického výpočtu. Programy používané v praxi (SCIA ENGINEER, RFEM) používajú na priradenie hmoty náplne do uzlov plášťa zaťaženie hydrostatickým tlakom. V programe ANSYS je okrem klasických prístupov možné použiť už spomínané objemové prvky. Analýzou sme dospeli k záveru, že objemový prvok FLUID30 na dynamickú analýzu nie je vhodný. Ako výpočtovo spoľahlivý prvok sa môže použiť kvapalinový prvok FLUID80. Po určení vlastných tvarov a frekvencií kmitania sme pristúpili k výpočtu vnútorných síl a deformácií od seizmického zaťaženia. V prvom prípade boli modely zaťažené pomocou spektra odozvy, ktoré bolo prevzaté z normy a aplikované na oblasť Slovenska a konkrétne miesto výstavby. V druhej časti sme konštrukciu zaťažili akcelerogramom skutočného zemetrasenia, tak aby maximálna hodnota zrýchlenia bola približne zhodná z maximálnymi hodnotami na našom území.

Po sérii výpočtov a analýz sme pristúpili k experimentálnym meraniam, ktoré boli najskôr odladené na laboratórnej vzorke (model M4 – oceľová nádrž). Merania a výpočty prebiehali pri prázdnej konštrukcii a postupne aj pri rôznej úrovni hladiny vody v sude. Pri dvoch nezávislých experimentoch sme dosiahli prijateľné výsledky vypočítaných a nameraných vlastných frekvencií. Tieto nepresnosti prisudzujeme drobnej odchýlke reálneho a výpočtového modelu a zvoleným okrajovým podmienkam. Aj napriek tomuto konštatovaniu považujem výsledky za použiteľné.

V druhej fáze experimentálnych meraní sme pristúpili k reálnej konštrukcii a meraniam priamo na stavbe. Venovali sme sa železobetónovej valcovej nádrži (model M1). Pri tejto konštrukcii sme sa stretli s problémom dostatočného vybudenia tak mohutnej konštrukcie bez toho aby došlo k jej poškodeniu. V tomto prípade sa nám nepodarilo vybudieť kmitanie celej konštrukcie, ale len čiastočné kmitanie horného prstenca nádrže. Tento malý neúspech môžeme pripísať veľkosti konštrukcie a možným nástrojom na vybudenie kmitania.

Séria niekoľkých výpočtových modelov a analýz preukázala, že je potrebné venovať pozornosť výberu modelu a spôsobu zaťaženia konštrukcie. V princípe platí, že čím lepšie výsledky požadujem, tým náročnejšie je vytvorenie modelu a vyžaduje si viac času a finančných prostriedkov.

6. Zoznam použitej literatúry

1. Ambarcumjan, S.A.: Teorija anizotropnykh obloček. Moskva 1961
2. Haroun, M. A. – Housner, G. W.: Earthquake Response of Deformable Liquid Storage Tanks. J. Appl. Mech., 1987, vol. 48, pp. 411-418
3. Salajka, V. Odezva nádrží s kapalinou na seizmické buzení. In Technické listy 2007. 1. Brno, Czech Republic: 2007. s.1-2. ISBN: 978-80-01-04176- 5 (in Czech).
4. Salajka, V., Kala, J., Čada, Z., Hradil, P.: Modification of response spectra by probabilistic approach, European Safety and Reliability Conference, ESREL 2014; Wroclaw; Poland; 14 September 2014 through 18 September 2014; Code 107147
5. Bilčík, J., - Gramblička, Š.: Betónové konštrukcie - Nádrže. Bratislava STU, SvF. 2004. 283 s., ISBN 80-227-2014-3.
6. Epstein, H. I.: Seismic Design of Liquid-Storage Tanks. J. Struct. Div., Proc. ASCE, 1976, VOL. 102, PP, 1689-1673.
7. STN EN 1998- 1 *Navrhovanie konštrukcií na seizmickú odolnosť, časť 4:Silá, nádrže a potrubia*. Bratislava: Slovenský ústav technickej normalizácie. 2010.
8. Kaiser, J.: Škrupinové konštrukcie – Nové výpočtové metódy v stavebnej mechanike. Bratislava 1981.
9. Šmerda, Z.: výpočty železobetónových nádrží a zásobníku. Praha, SNTL 1974
10. Sokol, M., Tvrdá, K.: Dynamics of building structures, Bratislava 2011. STU Publishing, 212 pages. ISBN 978-80-227-3587-2 (in Slovak)
11. Kotrasová, K., Kormaníková, E.: Frequency analysis of fluid in rectangular ground- supported tank, 12th International Multidisciplinary Scientific GeoConference and EXPO, SGEM 2012; Varna; Bulgaria; Volume 3, 2012, Pages 693-698 17 June 2012
12. Kotrasová, K., Kormaníková, E.: Frequency analysis of the base plate on Winkler model subsoil model, Pozemné komunikácie a dráhy 1-2/2010 roč.6, ISSN 1336-7501. (in Slovak)
13. Štrunc, A.: Řešení dynamického chování naplněných nádrží metodou konečných prvků. Výzkumná zpráva č. Pk 3193 Zp, k.p. VE ŠKODA, Plzeň, 1985.
14. Veletsos, A. S. – Yu Tang: Dynamics of Vertically Excited Liquid Storage Tanks. J. Struct. Engng, Proc. ASCE 1986, col. 112, No. 6.
15. Mrózek, M., Nevařil, A., Čada, Z., Bratřka, M.: Contemporary approaches to seismic analysis of tank with fluid, In: Engineering mechanics 2009 : National conference with international participation. Svratka, CR, 11.-14.5.2009. – Praha, Czech Republic, 2009. ISBN 978-80-86246-35-2. - S. 186-187.

6. Zoznam prác autora

Vedecké práce v zahraničných časopisoch registrovaných v databázach Web of Science alebo SCOPUS

JENDŽELOVSKÝ, Norbert - BALÁŽ, Ľubomír. Analysis of Cylindrical Tanks under the Seismic Load. In *Key Engineering Materials*. Vol. 691, (2016), s. 285-296. ISSN 1013-9826. V databáze: SCOPUS ; DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.691.285. Kategória B

Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách

BALÁŽ, Ľubomír. Modelovanie steny a zaťaženia valcovej nádrže. In *Juniorstav 2013 [elektronický zdroj] : 15. odborná konferencia doktorského studia s mezinárodní účastí. Brno, ČR, 7. 2. 2013*. Brno : Vysoké učení technické v Brně, 2013, s.CD-ROM, [10] s. ISBN 978-80-214-4670-0.

BALÁŽ, Ľubomír. Statická analýza steny valcovej škrupiny. In *Modelování v mechanice 2013 [elektronický zdroj] : Sborník příspěvků vědecké konference. Ostrava, ČR, 22.-23.5.2013*. 1.vyd. Ostrava : VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2013, s.CD-ROM, [11]s. ISBN 978-80-248-2985-2.

BALÁŽ, Ľubomír. Vplyv podložia na vlastné frekvencie konštrukcií valcových nádrží. In *Juniorstav 2014 [elektronický zdroj] : 16. odborná konferencia doktorského studia s mezinárodní účastí. Brno, ČR, 30. 1. 2014*. 1. vyd. Brno : Vysoké učení technické v Brně, 2014, CD ROM, [8] s. ISBN 978-80-214-4851-3.

JENDŽELOVSKÝ, Norbert - BALÁŽ, Ľubomír. Reinforced Concrete Cylindrical Tank – Numerical Modeling Fluid Element. In *14th International Scientific Conference VSU'2014. Volume II. : Proceedings. Sofia, Bulgaria, 5. - 6. 6. 2014*. Sofia : University of Structural Engineering and Architecture "L.Karavelov", 2014, P. 125-130. ISSN 1314-071X.

JENDŽELOVSKÝ, Norbert - BALÁŽ, Ľubomír. Modelovanie dynamického zaťaženia valcových nádrží. In *Modelování v mechanice 2015 [elektronický zdroj] : sborník příspěvků vědecké konference. Ostrava, ČR, 28. - 29. 5. 2015*. 1. vyd. Ostrava : Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2015, CD-ROM, [6] s. ISBN 978-80-248-3756-7.

JENDŽELOVSKÝ, Norbert - BALÁŽ, Ľubomír. Statické a dynamické zaťaženie železobetónovej valcovej nádrže. In *23rd SVSFEM ANSYS Users'Group Meeting and Conference 2015 [elektronický zdroj] : 10.-12.6.2015, Hustopeče, Česká republika*. 1. vyd. Brno : SVS FEM, 2015, online, s. 70-75. ISBN 978-80-905525-2-4.

Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách

BALÁŽ, Ľubomír. Analýza konštrukčného systému EXOSKELET. In *New Trends in Statics and Dynamics of Buildings [elektronický zdroj] : 10th International Conference. Bratislava, Slovak Republic, 3.-5.10.2012*. Bratislava : STU v Bratislave, 2012, s.233-236. ISBN 978-80-227-3786-9.

BALÁŽ, Ľubomír - VYSKOČ, Eduard. Návrh a zhotovenie štrkového podkladu s ohľadom na kvalitu podložia. In *New Trends in Statics and Dynamics of Buildings : proceedings of 11th International Conference. Bratislava, SR, 3. - 4. 10. 2013*. 1. vyd. Bratislava : Slovak University of Technology, 2013, s.1-4. ISBN 978-80-227-4040-1.

BALÁŽ, Ľubomír - JENDŽELOVSKÝ, Norbert. Dynamic analysis of a cylindrical tank. In *Dynamics of Civil Engineering and Transport Structures and Wind Engineering DYN-WIND 2014 : proceedings of the 6th International Scientific Conference. Donovaly, SR, 26. - 29. 5. 2014*. 1. vyd. Žilina : Žilinská univerzita, 2014, S. 16-20. ISBN 978-80-554-0844-6.

BALÁŽ, Ľubomír. Valcové nádrže -- numerické modelovanie a experimentálne zistenie vlastných frekvencií. In *Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering [elektronický zdroj] : 23rd Annual PhD student conference*. Bratislava, SR, 30. 10. 2013. Bratislava : Nakladateľstvo STU, 2013, s.CD-ROM, s.91-97. ISBN 978-80-227-4102-6.

BALÁŽ, Ľubomír. Účinky seizmického zaťaženia na konštrukciu valcovej nádrže. In *Advances in architectural, civil and environmental engineering [elektronický zdroj] : 24rd Annual PhD Student Conference on Architecture and Construction Engineering, Building Materials, Structural Engineering, Water and Environmental Engineering, Transportation Engineering, Surveying, Geodesy, and Applied Mathematics*. 1. vyd. Bratislava : Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2014, CD-ROM, s. 77-81. ISBN 978-80-227-4301-3.

BALÁŽ, Ľubomír. Modelovanie dynamického zaťaženia – železobetónové valcové nádrže. In *Advances in architectural, civil and environmental engineering [elektronický zdroj] : 25rd Annual PhD Student Conference on Architecture and Construction Engineering, Building Materials, Structural Engineering, Water and Environmental Engineering, Transportation Engineering, Surveying, Geodesy, and Applied Mathematics*. Bratislava, SR, 28. 10. 2015. 1. vyd. Bratislava : Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2015, CD-ROM, s. 96-101. ISBN 978-80-227-4514-7.

JENDŽELOVSKÝ, Norbert - BALÁŽ, Ľubomír. Vlastné frekvencie oceľových nádrží. In *New Trends in Statics and Dynamics of Buildings : proceedings of 11th International Conference*. Bratislava, SR, 3. - 4. 10. 2013. 1. vyd. Bratislava : Slovak University of Technology, 2013, s.73-76. ISBN 978-80-227-4040-1.

JENDŽELOVSKÝ, Norbert - BALÁŽ, Ľubomír. Modelovanie podložia valcovej nádrže. In *Structural and Physical Aspects of Civil Engineering [elektronický zdroj] : 2nd International Conference. Proceedings. Štrbské Pleso, SR, 27.-29.11.2013*. Žilina : Technická univerzita, 2013, s.CD-ROM, [5] s. ISBN 978-80-553-1488-4.

JENDŽELOVSKÝ, Norbert - BALÁŽ, Ľubomír. Modeling of a Gravel Base under the Cylindrical Tank. In *Advanced Materials Research : 2nd International Conference on Structural and Physical Aspects of Civil Engineering, SPACE 2013, Vysoké Tatry, SR, 27. - 29. 11. 2013*. Vol. 969, (2014), s. 249-252. ISSN 1022-6680. V databáze: SCOPUS. Kategória A

JENDŽELOVSKÝ, Norbert - BALÁŽ, Ľubomír. Numerical Modeling of Cylindrical Tank and Compare with Experiment. In *Applied Mechanics and Materials: 6th International Scientific Conference on Dynamic of Civil Engineering and Transport Structures and Wind Engineering, DYN-WIND 2014, Donovaly, SR, 25. - 29. 5. 2014*. Vol. 617, (2014), s. 148-151. ISSN 1660-9336. V databáze: SCOPUS. Kategória A

JENDŽELOVSKÝ, Norbert - BALÁŽ, Ľubomír. Plné valcové nádrže - dynamická analýza. In *New Trends in Statics and Dynamics of Buildings [elektronický zdroj]: proceedings of 12th International Conference*. Bratislava, SR, 16. - 17. 10. 2014. 1. vyd. Bratislava : Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2014, CD ROM, [9] s. ISBN 978-80-227-4259-7.

JENDŽELOVSKÝ, Norbert - BALÁŽ, Ľubomír. Dynamická analýza železobetónovej valcovej nádrže. In *22nd SVSFEM ANSYS Users' Group Meeting and Conference 2014 [elektronický zdroj] : proceedings, Jasná, SR, 25. - 27. 6. 2014*. Brno : SVS FEM, 2014, online, s. 87-95. ISBN 978-80-905525-1-7.

JENDŽELOVSKÝ, Norbert - BALÁŽ, Ľubomír. Modeling of a Filled Cylindrical Tank and the Dynamic Analysis of Its Eigenfrequencies. In *Applied Mechanics and Materials : Trends in Statics and Dynamic of Construction - selected, peer reviewed papers from the 12th International Conference*, Bratislava, SR, 16. - 17. 10. 2014. Vol. 769, (2015), s. 212-217. ISSN 1660-9336.

JENDŽELOVSKÝ, Norbert - BALÁŽ, Ľubomír. Vplyv zemetrasenia na valcové nádrže. In *New Trends in Statics and Dynamics of Buildings [elektronický zdroj] : proceedings of 13th International Conference*. Bratislava, Slovakia, 15. - 16. 10. 2015. 1. vyd. Bratislava : Slovak University of Technology in Bratislava, 2015, CD-ROM, [6] s. ISBN 978-80-227-4463-8.

JENDŽELOVSKÝ, Norbert - BALÁŽ, Ľubomír. The Effects of Earthquake on the Cylindrical Tanks. In *Applied Mechanics and Materials : Trends in Statics and Dynamics of Construction II. Selected, peer reviewed papers from the 13th International Conference on New Trends in Statics and Dynamics of Buildings*, Bratislava, SR, 15. - 16. 10. 2015. Vol. 837, (2016), s. 10-15. ISSN 1660-9336.

KONEČNÁ, Lenka - BALÁŽ, Ľubomír. Určenie prvých vlastných frekvencií ocelevej valcovej nádrže s kvapalinou. In *New Trends in Statics and Dynamics of Buildings [elektronický zdroj] : proceedings of 12th International Conference*. Bratislava, SR, 16. - 17. 10. 2014. 1. vyd. Bratislava : Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2014, CD ROM, [4] s. ISBN 978-80-227-4259-7.

KONEČNÁ, Lenka - BALÁŽ, Ľubomír. Determination of Eigenfrequencies of Steel Cylindrical Storage Tank. In *Applied Mechanics and Materials : Trends in Statics and Dynamic of Construction - selected, peer reviewed papers from the 12th International Conference*, Bratislava, SR, 16. - 17. 10. 2014. Vol. 769, (2015), s. 218-224. ISSN 1660-9336.

VYSKOČ, Eduard - BALÁŽ, Ľubomír. Praktické skúsenosti z návrhu a realizácie kruhových nádrží bioplynového hospodárstva. In *New Trends in Statics and Dynamics of Buildings [elektronický zdroj] : 10th International Conference*. Bratislava, Slovak Republic, 3.-5.10.2012. Bratislava : STU v Bratislave, 2012, s.237-240. ISBN 978-80-227-3786-9.

Odborné práce v zahraničných zborníkoch (konferenčných aj nekonferenčných)

JENDŽELOVSKÝ, Norbert - BALÁŽ, Ľubomír. EXOSKELETON Structural System - Analysis of Tall Building. In *13th International scientific conference VSU' 2013. Volume 1 : Proceedings*. Sofia, Bulgaria, 6.-7.6.2013. Sofia : L.Karavelov Civil engineering higher school Sofia, 2013, s.283-286.

JENDŽELOVSKÝ, Norbert - BALÁŽ, Ľubomír. Analýza oceľových nádrží. In *21st SVS FEM ANSYS Users' Group Meeting and Conference 2013 [elektronický zdroj] : Luhačovice, Czech Republic*, 12.-14.6.2013. Brno : SVS FEM, 2013, s.[6] s. ISBN 978-80-905525-0-0.

Odborné práce v domácich zborníkoch (konferenčných aj nekonferenčných)

BALÁŽ, Ľubomír - SOLČIANSKY, Roman - VYSKOČ, Eduard. Posúdenie prevádzky kameňolomu Mýtna - Hrby na okolitú zástavbu. In *Zakladanie stavieb 2014 : zborník príspevkov zo 16. konferencie, Stará Lesná, SR, 7. - 9. 10. 2014*. Trnava : Spolok statikov Slovenska, 2014, S. 17-22. ISBN 978-80-89655-04-5.

VYSKOČ, Eduard - BALÁŽ, Ľubomír. Problémy návrhu a realizácie kruhových nádrží bioplynového hospodárstva. In *Statika stavieb 2013 : Zborník príspevkov z 18. konferencie. Piešťany, SR, 14.-15.3.2013*. Bratislava : Spolok statikov Slovenska, 2013, s.295-298. ISBN 978-80-89655-00-7.

VYSKOČ, Eduard - SOLČIANSKY, Roman - BALÁŽ, Ľubomír. Hutnené zásypy - skúsenosti z praxe. In *Zakladanie stavieb 2013 : Zborník príspevkov z 15. konferencie. Stará Lesná, SR, 7.-9.10.2013*. Bratislava : Spolok statikov Slovenska, 2013, s.123-126. ISBN 978-80-89655-01-4.

7. Obsah dizertačnej práce

1.	ÚVOD	16
2.	HISTÓRIA A SÚČASNÝ STAV RIEŠENEJ PROBLEMATIKY	19
2.1.	Historický prehľad riešenej problematiky	19
2.1.1	Statické pôsobenie	19
2.1.2	Dynamické pôsobenie	26
2.2.	Súčasný stav riešenej problematiky	32
2.2.1	Statické pôsobenie zaťaženi	32
2.2.2	Dynamika valcovej nádrže – STN EN	42
3.	CIELE ZÁVEREČNEJ PRÁCE	46
4.	METODIKA PRÁCE A SKÚMANIA	47
5.	STATICÁ A DYNAMICKÁ ANALÝZA VALCOVÝCH NÁDRŽÍ	49
5.1.	Metóda konečných prvkov (MKP) v dynamickej interakcii kvapaliny s nádržou	49
5.2.	Matematická formulácia dynamickej úlohy	50
5.2.1	Základy akustiky a diskretizácia pohybovej rovnice	52
5.2.2	Diskretizácia kvapalinovej oblasti	53
5.2.3	Konštrukcia väzby medzi kvapalinou a konštrukciou	53
5.2.4	Modálna analýza nesymetrického zväzku rovníc	55
5.2.5	Modálna analýza symetrickej sústavy rovníc	56
5.3.	Statická analýza pomocou objemových prvkov	57
5.3.1	Záver a zhodnotenie výsledkov	60
5.4.	Dynamická analýza pomocou objemových prvkov	61
5.4.1.	Modelová rada “A“	62
5.4.2	Modelová rada “B“	63
5.4.3	Modelová rada “C“	65
5.5.	Analýza modelu reálnej železobetónovej konštrukcie	66
5.5.1	Model železobetónovej valcovej nádrže M2	66
5.6.	Spektrálna analýza valcovej nádrže	72
5.6.1	Riešenie kvázistatické – pevné podoprenie	74
5.6.2	Riešenie cez hmoty – pevné podoprenie	76
5.6.3	Riešenie fluidnými konečnými prvkami – pevné podoprenie	78
5.6.4	Zhodnotenie výsledkov analýzy	78
5.6.5	Riešenie cez hmoty – pružné podopretie	79
5.6.6	Kvázi – statická analýza – pružné podopretie	79
5.6.7	Výsledky výpočtu deformácií a vnútorných síl na pružnom podloží	79
5.7.	Priama integrácia v čase	82
5.8.	Záver numerickej analýzy	83
6.	EXPERIMENTÁLNE OVERENIE VÝSLEDKOV ANALÝZY	85
6.1.	Model oceľovej valcovej nádrže M4	85
6.2.	Druhý experiment s modelom M4	88
6.2.1	Zhodnotenie dosiahnutých výsledkov	90
6.3.	Modelovanie pružného podkladu pod valcovú nádrž M1	91
6.3.1	Typy modelov podložia	93
6.4.	Numerické riešenie vlastných frekvencií	93
6.5.	Experimentálne meranie reálnej konštrukcie	95
6.5.1.	Záznam akcelerometrov	97
7.	VÝSLEDKY PRÁCE A DISKUSIA	102
8.	ZÁVER	105
9.	POUŽITÁ LITERATÚRA	107
10.	PUBLIKÁCIE AUTORA	112

