

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE

Stavebná fakulta

Ing. Lenka Uhlířová

Autoreferát dizertačnej práce

STATICKÁ A DYNAMICKÁ ANALÝZA NÁDRŽÍ

na získanie akademického titulu philosophiae doctor - PhD.

V doktorandskom študijnom programe: aplikovaná mechanika

Miesto: Bratislava

Dátum: 31.05.2020

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

Predkladateľ: **Ing. Lenka Uhlířová**

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. Jozef Melcer, DrSc.**

Katedra stavebnej mechaniky
Stavebná fakulta Žilinskej univerzity v Žiline
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina

Doc. Ing. Kamila Kotrasová, PhD.

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

Prof. Ing. Martin Krejsa, PhD.

Katedra stavební mechaniky
Fakulta stavební, VŠB - Technická univerzita Ostrava
Ludvíka Podéště 1875/17, 708 00 Ostrava-Poruba

Autoreferát bol rozoslaný:

.....

Obhajoba dizertačnej práce sa konáo.....hod.
na Katedre stavebnej mechaniky Stavebnej fakulty STU v Bratislave.

prof. Ing. Stanislav Unčík, PhD.

Dekan SvF STU v Bratislave

Obsah autoreferátu:

1	Úvod	4
1.1	Pravouhlé nádrže	4
2	Ciele a metodika dizertačnej práce	5
3	Numerické príklady statickej analýzy	6
4	Dynamické riešenie	8
4.1	Metóda konečných prvkov	8
4.2	Hydrodynamické správanie kvapaliny	9
4.3	Seizmické zaťaženie	10
4.3.1	Metóda spektier odozvy ako spôsob výpočtu	10
4.4	Numerické príklady modálnej analýzy nádrží bez použitia interakcie medzi konštrukciou a jej náplňou	10
4.5	Dynamická analýza otvorenej nádrže s využitím FSI	12
4.5.1	Modálna analýza	12
4.5.2	Spektrálna analýza	14
4.5.3	Metóda priamej integrácie v čase	15
4.5.4	Spektrum odozvy odvodené z akcelerogramu	17
4.6	Dynamická analýza otvorenej nádrže s využitím interakcie konštrukcie a podložia (SSI)	17
4.6.1	Modálna analýza nádrže na podloží s konkrétnou tuhosťou	18
4.6.2	Spektrálna analýza nádrže na podloží s konkrétnou tuhosťou	19
5	Záver	20
	Zoznam použitej literatúry	21
	Zoznam prác autora	22

1 Úvod

Nárast životnej úrovne a neustály tlak na zlepšenie kvality životného prostredia spôsobujú stále častejší záujem o trvale udržateľný rozvoj Zeme.

Nádrže sa v súčasnosti využívajú na uskladnenie rôznych látok a produktov. V podobe síl sa využívajú napríklad v poľnohospodárstve a priemyselnej výrobe, kde sa v nich môže skladovať sypký materiál ako zrno, múka, ale aj stavebné hmoty napr. cement. Môžeme pomocou nich uskladniť rôzne kvapalné a plynné látky. Najčastejšie slúžia ako zásobníky pitnej vody, nádrže na úpravu odpadovej vody, ale aj na uskladnenie rôznych, vysoko toxických, ropných a chemických tekutín. Často sú zásobníky využívané ako fermentory (bioreaktory), používané pri výrobe bioplynu, ako zásobníky požiarnej vody, či sprinklerove nádrže v budovách.

V súčasnej dobe sa stretávame s nedostatkom pitnej vody vo svete. Preto je budovanie objektov slúžiacich na skladovanie pitnej vody, zachytávanie dažďovej vody a čistenie odpadovej vody základnou prioritou. Nádrže musia mať dokonale nepriepustné dno i steny, aby nedošlo k úniku kalu, ani plyných látok do podlažia. V opačnom prípade by hrozila kontaminácia pôdy a vody. V konečnom dôsledku by bolo ohrozené aj zdravie ľudí. Nádrže musia odolať nie len statickému zaťaženiu od ich náplne, ale aj zaťaženiu dynamickému. Z mnohých dynamických zaťažení máme na mysli hlavne zemetrasenie.

Dnes sa väčšinou navrhujú valcové železobetónové nádrže, ale v tejto práci sa venujem statickej a dynamickej analýze pravouhlých, konkrétne obdĺžnikových nádrží, ktoré budú slúžiť ako zásobníky vody, prípadne ako odkaľovacie nádrže potrebné pre proces čistenia odpadových vôd.

1.1 Pravouhlé nádrže

Železobetónové pravouhlé nádrže sa využívajú hlavne pre objemy 50 až 50000 m³. Opisom a použitím pravouhlých nádrží sa zaoberá aj [1] a [2]. Keď sa porovnajú valcové a kvádrové nádrže, zistíme, že steny pravouhlých nádrží sú vo vodorovnom smere namáhané staticky nepriaznivejšie vplyvom kombinácie ohybu a ťahu. Najkritickejším miestom sú pritom rohy, preto im treba venovať väčšiu pozornosť.

Netreba však zabúdať, že aj kvádrové nádrže majú svoje prednosti, ktoré sa dostávajú do popredia hlavne pri veľkokapacitných nádržiach (nad 1500 m³). Medzi hlavné výhody patria:

- Lepšie využitie stavebného priestoru
- Jednoduchšie debniace práce a zastrešenie
- Menšia citlivosť na jednostranne pôsobiace zaťaženie

Podľa pôdorysných rozmerov sa určí vnútorné riešenie nádrže. Pri rozsiahlejších nádržiach vo vnútri nájdeme aj vnútorné podporné rámy (nosníky a stĺpy). Nádrže môžu byť navrhnuté ako jednokomorové, alebo viackomorové, odporúča sa dodržať pomer strán pôdorysu jednej komory 4:3.

Na výstavbu veľkých typizovaných nádrží je vhodné využiť prefabrikované prvky. Hlavnými konštrukčnými prvkami sú steny, dno a strop. Steny bývajú konštantnej hrúbky, ale pri väčších výškach sa zvyknú používať rebrá na ich stuženie.

2 Ciele a metodika dizertačnej práce

Práca sa zameriava na statickú aj dynamickú analýzu pravouhlých nádrží. Cieľom práce bolo:

- analýza modelovania dynamického zaťaženia seizmicitou rôznymi spôsobmi a ich porovnanie vo výpočtovom modeli MKP
- využitie fluidných prvkov pri modelovaní náplne nádrže
- zohľadnenie interakcie medzi kvapalinou a stenami nádrže (FSI)
- zohľadnenie interakcie medzi konštrukciou nádrže a pružným podložím (SSI).

Metodicky bolo pri riešení dizertačnej práce postupované nasledovne. Najprv analýza súčasnej problematiky v oblasti pravouhlých nádrží. Potom výber matematického riešenia, kde z numerických úloh sme použili metódu konečných prvkov (MKP). Následne výber softvéru pre samotnú výpočtovú analýzu. Pri výpočte boli použité programy RFEM a ANSYS. Oba tieto programy pracujú na základe metódy konečných prvkov a výsledky z nich sa porovnali.

Pre statickú analýzu boli použité tri druhy nádrže s rôznou geometriou. Všetky boli nadzemné, železobetónové a pevne spojené s tuhým alebo pružným podkladom.

Pri dynamickej analýze bol použitý len program ANSYS a náplň bola modelovaná pomocou fluidných prvkov. Podrobná analýza už prebiehala na jednom type nádrže. Najprv bola riešená modálna analýza na zistenie vlastných tvarov nádrže a ich frekvencie. Nasledovala spektrálna analýza pri zaťažení normovým spektrom odozvy. Nakoniec bola nádrž zaťažená „akcelerogramom“ prírodného zemetrasenia (Varpalota, 1995, Maďarsko), kedy bola na výpočet použitá metóda priamej integrácie v čase. Riešený bol aj vplyv tlmenia materiálu.

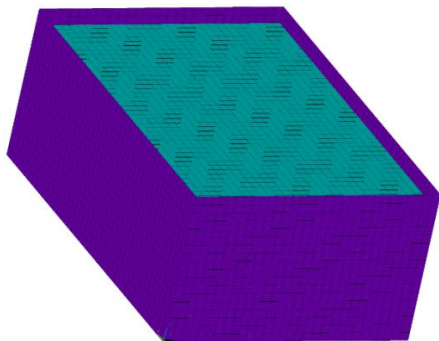
3 Numerické príklady statickej analýzy

V príklade boli riešené monolitické, nadzemné, pravouhlé, železobetónové nádrže. Prvá je otvorená nádrž (Obr. 3.1) s pôdorysom tvaru obdĺžnika s rozmermi 7,5 m x 11 m a výškou 4,5 m. Druhá nádrž má rovnaké rozmery, ale je uzavretá (Obr. 3.2). Posledná nádrž má technologické využitie ako usadzovacia nádrž (Obr. 3.3) s pôdorysnými rozmermi 1,5 m x 11 m a s výškou 2 m.

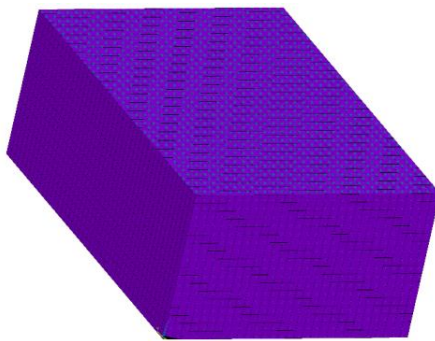
Hrúbka stien pri všetkých troch riešených nádržiach je 0,2 m a hrúbka základovej dosky 0,5 m, čo ju radí medzi tuhé základové dosky. Stropná doska uzavretej nádrže má hrúbku 0,2 m. Betón je triedy C25/30 a výstuž B500B. Podopretie bude riešené ako plošné, pevné.

Voda bola modelovaná pomocou hydrostatického zaťaženia (RFEM, ANSYS) a fluidných prvkov (ANSYS).

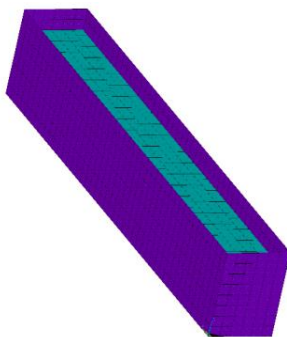
Na nasledujúcich obrázkoch sa nachádzajú modely jednotlivých nádrží.



Obr. 3.1 Model otvorenej nádrže



Obr. 3.2 Model zatvorenej nádrže



Obr. 3.3 Model usadzovacej nádrže

Výsledky z oboch programov, RFEM aj ANSYS, sú na záver uvedené v porovnávacích tabuľkách, ktoré boli spracované samostatne pre každý z troch typov nádrže (Tab.3.1 – 3.3). Z oboch programov boli získané hodnoty pre zaťaženie hydrostatickým tlakom vyjadreným pomocou hydrostatického trojuholníka (Hs. T.) a z programu ANSYS aj hodnoty, keď bola voda modelovaná pomocou fluidných prvkov (FLUID).

Najprv je uvedená maximálna deformácia nádrže u , nasledujú jej zložky pre maximálnu deformáciu v smere osi x a maximálnu deformáciu v smere osi y . V posledných dvoch stĺpcoch sú vypísané maximálne hodnoty vodorovných merných momentov m_x a zvislých merných momentov m_y na stenách.

Tab. 3.1 Porovnanie výsledkov pri 1. type nádrže – Otvorená nádrž

	u [mm]	u_x [mm]	u_y [mm]	m_x [kNm/m]	m_y [kNm/m]
RFEM - Hs. T.	7,617	7,617	1,767	37,882	73,708
ANSYS - Hs. T.	7,644	7,644	1,773	33,341	64,456
ANSYS - FLUID	7,625	7,625	1,832	33,254	64,334

Tab. 3.2 Porovnanie výsledkov pri 2. type nádrže – Uzavretá nádrž

	u [mm]	u_x [mm]	u_y [mm]	m_x [kNm/m]	m_y [kNm/m]
RFEM - Hs. T.	1,303	1,303	1,076	23,983	44,458
ANSYS - Hs. T.	1,301	1,301	1,078	19,436	36,760
ANSYS - FLUID	1,300	1,300	1,077	19,425	36,742

Tab. 3.3 Porovnanie výsledkov pri 3. type nádrže – Usadzovacia nádrž

	u [mm]	u_x [mm]	u_y [mm]	m_x [kNm/m]	m_y [kNm/m]
RFEM - Hs. T.	0,163	0,163	0,012	1,437	5,593
ANSYS - Hs. T.	0,172	0,172	0,013	1,207	4,401
ANSYS - FLUID	0,172	0,172	0,013	1,207	4,395

Z tabuliek je zrejmé, že hodnoty deformácie pri použití oboch spôsobov zaťaženia, ako aj pri použití oboch programov, sú temer totožné. To platí pre celkovú deformáciu u [mm], aj pre jej jednotlivé zložky u_x [mm], u_y [mm].

Zároveň je vidieť, že aj hodnoty merných momentov na stenách nádrže vo vodorovnom smere m_x sú si podobné, takže nezáleží na tom, ktorý z programov, resp. z použitých dvoch spôsobov zohľadnenia kvapaliny

využijeme. Menšie odchýlky vznikli z dôvodu, že v programe RFEM je maximálna hodnota pre okraj konečného prvku, kým v programe ANSYS je táto maximálna hodnota v ťažisku elementu.

4 Dynamické riešenie

Konštrukcie zaťažené dynamickými účinkami [3, 4] sú vystavené časovo premennému zaťaženiu. Konštrukcie rozlišujeme podľa počtu dynamických stupňov voľnosti na:

- Sústava s 1 stupňom voľnosti (SDOF)
- Sústava s viac stupňami voľnosti (MDOF)
- Rovnomerne rozložená hmota

Základy dynamiky sa viažu k francúzskemu matematikovi a fyzikovi Jeanovi Baptiste Le Rond d'Alembertovi, ktorý v roku 1743 vydal knihu *Pojednanie o dynamike*, ktorou začal svoju prácu na objasňovaní dynamických javov. Zostavil pohybové rovnice dynamického systému, ktoré definuje tzv. d'Alembertov princíp (4.2). Ten vychádza z 2. Newtonovho pohybového zákona (4.1).

$$F(t) = -\frac{d}{dt} \left(m \frac{dv(t)}{dt} \right) \quad (4.1)$$

$$F_I(t) = -m \frac{d^2v(t)}{dt^2} \quad (4.2)$$

Kde $F_I(t)$ je zotrvačná sila, $v(t)$ je premiestnenie v čase t :

4.1 Metóda konečných prvkov

Metódu konečných prvkov (MKP) môžeme z hľadiska predošlého členenia metód dynamiky zaradiť do skupiny metód pre riešenie sústav s konečným počtom stupňov voľnosti. V bežnej praxi je väčšina používaných výpočtových programov založená práve na tejto metóde. Medzi prednosti MKP patrí možnosť relatívne jednoducho zaviesť do výpočtu lokálne odlišné vlastnosti modelu, či už sú to rozdielne materiálové charakteristiky, ľubovoľná geometria modelu alebo nelineárna odozva v časti konštrukcie. Možno povedať, že z hľadiska programovania je tiež jednoduchá a preto našla v praxi široké uplatnenie. S jej pomocou sa riešia aj dynamické účinky [3], [5]. V metóde konečných prvkov sú vyjadrené pretvorenia ľubovoľnej konštrukcie prostredníctvom konečného počtu diskrétnych premiestnení.

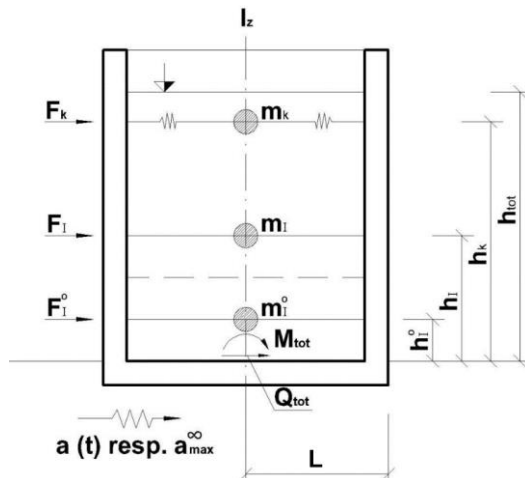
Pri použití metódy konečných prvkov je prvým krokom rozdelenie konštrukcie na konečné prvky. Koncové body prvkov, pomocou ktorých sú prvky vzájomne pospájané, sa nazývajú uzlové body. Premiestnenia týchto uzlových bodov sa stávajú tzv. zovšeobecnenými súradnicami konštrukcie

alebo môžeme tiež povedať, že sú to stupne voľnosti konštrukcie. Deformovaný tvar celej konštrukcie po prvkoch môže byť vyjadrený prostredníctvom zovšeobecnených súradníc a vhodných funkcií pretvorenia, tvarových funkcií, niekedy tiež označovaných interpolačnými funkciami. Tvarové funkcie definujú deformovaný tvar prvku. Priebeh pretvorenia po prvku je potom zostavený kombináciou súčinnu niekoľkých tvarových funkcií a ich parametrov – uzlových premiestnení. Výhody takéhoto postupu sú:

- Počet zovšeobecnených súradníc, stupňov voľnosti, sa dá meniť delením na prvky
- Tvarové funkcie sú väčšinou rovnaké a potom je podstatne zjednodušený aj samotný výpočet
- Sústava rovníc je pásová

4.2 Hydrodynamické správanie kvapaliny

Pri dynamickom zaťažení je prostredníctvom základu celková hmota kvapaliny v nádrži M_{tot} zrýchlená v horizontálnom smere. Vtedy sa jej časť správa ako impulzová hmota m_i , pevne spojená so stenou nádrže. Keď je nádrž tuhou konštrukciou, pohyb kvapaliny m_i je synchronizovaný s pohybom dna nádrže. Priamym dôsledkom seizmického budenia je ale aj kmitanie voľnej hladiny kvapaliny. Tá sa správa ako konvektívna hmota m_k , spojená so stenou nádrže pružne, preto má jej pohyb autonómny nízkofrekvenčný charakter. Rozdelenie hmoty kvapaliny v nádrži je na obr. 4.1. Výsledný hydrodynamický tlak $p(z,t)$ je preto zložený z tlaku impulzového $p_i(z,t)$, ktorý vyvolá hmota m_i a z tlaku konvektívneho $p_c(z,t)$, ktorý vyvolá hmota m_k .



Obr. 4.1 Veličiny výpočtu hydrodynamických účinkov na nádrž [6]

4.3 Seizmické zaťaženie

Seizmické zaťaženie spôsobené tzv. zemetrasením je horizontálne zaťaženie pôsobiace na konštrukcie. Prírodná seizmicita vznikne pri náhlom uvoľnení nahromadenej energie v dôsledku pohybu litosferických dosiek, vulkanickej, krasovej činnosti. Pri ľudskej činnosti hovoríme technickej a priemyselnej seizmicite.

Ide o nebezpečný jav, ktorý sa ľudia snažia pozorovať a predpovedať jeho výskyt. Aby sa zemetrasenia dali roztriediť, vzniklo viacero stupníc, ktoré určujú, akú silu ktoré zemetrasenie malo. Na výpočet miery uvoľnenej energie pri seizmickej činnosti slúži tzv. magnitúdo – M . Pri výpočtoch seizmických účinkov na konštrukciu, používame 3 základné metódy – kvázi statické riešenie, metóda spektier, priama integrácia v čase.

4.3.1 Metóda spektier odozvy ako spôsob výpočtu

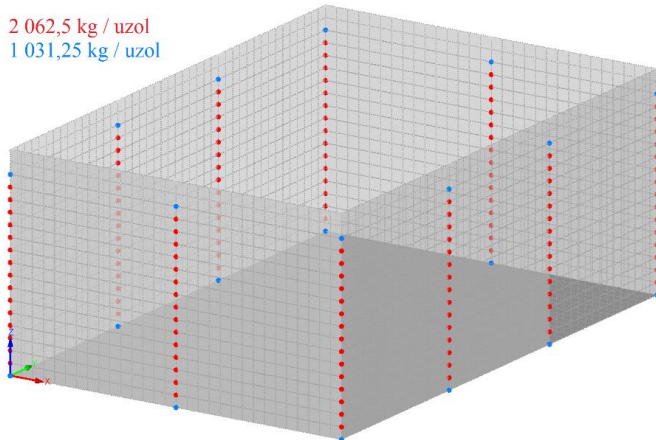
Metóda spektier odozvy je podrobnejšie rozobratá v [4]. Ide v súčasnosti o najpoužívanejšiu metódu výpočtu konštrukcií zaťažených seizmickým zaťažením.

V prvom kroku riešime konštrukciu ako systém s jedným stupňom voľnosti (SDOF) a získame vlastnú frekvenciu kmitania a vlastné tvary. Ide o modálnu analýzu konštrukcie. Po skončení modálnej analýzy prejdeme k analýze spektrálnej. Typy návrhových spektier sú: spektrum zrýchlení, spektrum rýchlosti a spektrum premiestnení. Každý vlastný tvar prispieva určitou časťou k celkovému výsledku a je treba spraviť kombináciu týchto príspevkov.

4.4 Numerické príklady modálnej analýzy nádrží bez použitia interakcie medzi konštrukciou a jej náplňou

Modely nádrží sú zhodné s nádržami popísanými v kapitole 3. Pre každý typ nádrže boli dynamické účinky počítané v programe RFEM pomocou prídavného modulu RF-Dynam Pro, ako aj v programe ANSYS. Vypočítaných bolo prvých šesť vlastných frekvencií.

V programe RFEM bolo možné rátať iba frekvencie pre prázdnu nádrž a pre nádrž naplnenú vodou, kde voda bola nahradená hmotou v uzloch (viď Obr. 4.2).



Obr. 4.2 Rozmiestnenie hmoty na obvodovom plášti otvorenej nádrže

V programe ANSYS boli pre každý typ nádrže vyrátane prípady pre prázdnu nádrž a pre nádrž naplnenú vodou, ktorú už je v tomto programe možné zohľadniť dvomi spôsobmi. V prvom bola voda nahradená hmotou v uzloch a v druhom bola voda modelovaná priamo cez fluidné prvky.

Na správne odčítanie vlastných frekvencií nádrží naplnených fluidnými prvkami treba dať lepší pozor, pretože pomedzi hodnotami vlastných tvarov nádrže, nájdeme aj hodnoty vlastných frekvencií samotnej náplne nádrže, pri ktorých sa táto uvádza do pohybu (špliechanie).

Pre porovnanie výsledkov získaných z oboch programov, boli hodnoty vlastných frekvencií vypísané do tabuliek 4.1 – 4.3. V tomto porovnaní vidíme mierne rozdiely vo výsledkoch. Pomocou modelu, kde náplň nádrže nenahradzujeme len zaťažením, resp. hmotou, môžeme získať rozdielne výsledky a preto by sme nemali v praxi zanedbávať žiadny z týchto výpočtov.

Tab. 4.1 Vlastné frekvencie otvorenej nádrže

Tvar č.	RFEM		ANSYS		
	Vlastná frekvencia f [Hz]		Vlastná frekvencia f [Hz]		
	Prázdna	S hmotami	Prázdna	S hmotami	S fluidami
1	8,801	4,380	8,808	4,380	5,758
2	9,231	4,564	9,238	4,564	6,051
3	12,721	6,255	12,732	6,254	8,476
4	14,060	6,708	14,074	6,707	8,792
5	17,747	8,314	17,772	8,312	11,793
6	19,506	8,637	19,537	8,635	12,000

Tab. 4.2 Vlastné frekvencie zatvorenej nádrže

Tvar č.	RFEM		ANSYS		
	Vlastná frekvencia f [Hz]		Vlastná frekvencia f [Hz]		
	Prázdna	S hmotami	Prázdna	S hmotami	S fluidami
1	12,068	10,347	12,072	10,347	10,944
2	20,257	12,057	20,261	12,062	14,763
3	26,481	12,990	26,536	12,975	15,573
4	30,907	13,201	30,960	13,196	16,152
5	32,546	14,156	32,633	14,129	17,445
6	34,144	14,261	34,205	14,229	19,966

Tab. 4.3 Vlastné frekvencie odkal'ovacej nádrže

Tvar č.	RFEM		ANSYS		
	Vlastná frekvencia f [Hz]		Vlastná frekvencia f [Hz]		
	Prázdna	S hmotami	Prázdna	S hmotami	S fluidami
1	31,647	26,377	31,275	26,036	26,312
2	31,762	26,469	31,390	26,129	27,800
3	40,107	33,212	39,590	32,737	33,274
4	40,478	33,503	39,966	33,031	35,215
5	53,567	43,971	52,880	43,314	44,403
6	54,174	44,426	53,496	43,775	46,818

4.5 Dynamická analýza otvorenej nádrže s využitím FSI

Z predošlých modelov nádrží bol pre ďalšie výpočty vybraný 1. typ (otvorená nádrž). Na rozdiel od predošlej kapitoly, je vo výpočte zohľadnená interakcia medzi stenami nádrže a kvapalinou (fluidnými prvkami). Tie sú spojené so stenami nádrže pomocou kontaktných elementov, čo predstavuje najpresnejšie zohľadnenie FSI (interakcie konštrukcie s fluidnými prvkami).

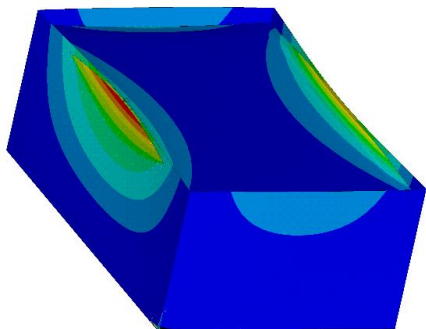
4.5.1 Modálna analýza

Z modálnej analýzy sme získali vlastné tvary a ich frekvencie. Bolo potrebné oddeliť vlastné tvary, pri ktorých dochádza len k zvlnieniu hladiny vody od vlastných tvarov, pri ktorých kmitá aj samotná konštrukcia nádrže. Prvých 6 vlastných tvarov aj s hodnotami ich frekvencií vidíme na Obr. 4.3 - Obr. 4.8. Porovnanie s modelom bez zohľadnenia FSI je v tabuľke 4.4.

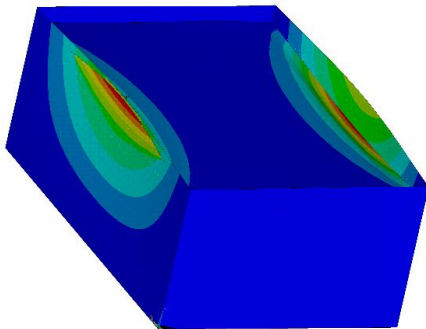
Tab. 4.4 Hodnoty frekvencií vlastných tvarov nádrže

Vl. tvar č.	f (bez FSI)	f (s FSI)	Percentuálny podiel (bez/s FSI)
1	5,758 Hz	5,920 Hz	97,26 %
2	6,051 Hz	6,216 Hz	97,35 %
3	8,476 Hz	8,699 Hz	97,44 %
4	8,792 Hz	9,039 Hz	97,27 %
5	11,793 Hz	12,133 Hz	97,20 %
6	12,000 Hz	12,475 Hz	96,19 %

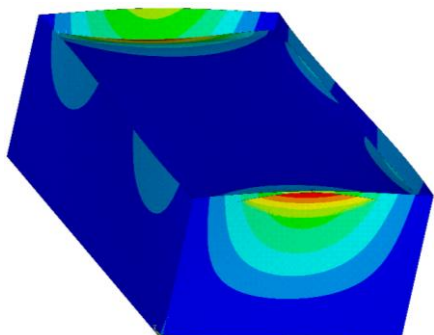
Vzhľad vlastných tvarov pri nádrži bez zohľadnenia FSI je rovnaký ako na Obr. 4.3 – 4.8. Rozdiel je len v hodnote frekvencií vlastných tvarov.



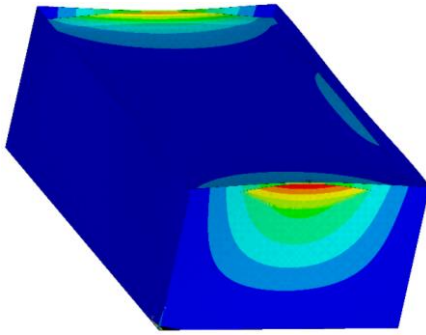
Obr. 4.3 Vlastný tvar č. 1
($f = 5,920$ Hz)



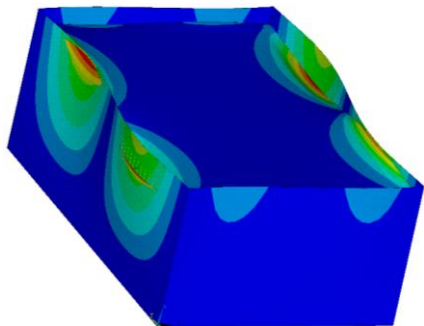
Obr. 4.4 Vlastný tvar č. 2
($f = 6,216$ Hz)



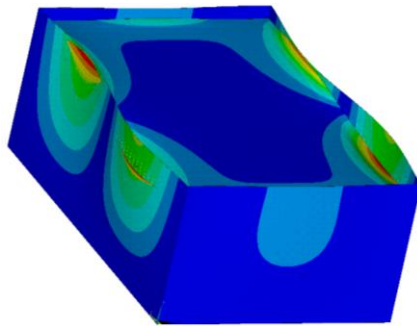
Obr. 4.5 Vlastný tvar č. 3
($f = 8,699$ Hz)



Obr. 4.6 Vlastný tvar č. 4
($f = 9,039$ Hz)



Obr. 4.7 Vlastný tvar č. 5
($f = 12,133$ Hz)



Obr. 4.8 Vlastný tvar č. 6
($f = 12,475$ Hz)

4.5.2 Spektrálna analýza

Po získaní výsledkov modálnej analýzy konštrukcie nasleduje spektrálna analýza. Nádrž bola posudzovaná pre všetky kombinácie spektier odozvy (typ spektra 1 aj 2). Využité boli pritom kombinácie všetkých kategórií podložia a hodnoty seizmického zrýchlenia na Slovensku.

Tu sú zobrazené výsledky pre prípad spektra odozvy typu 1, s konštrukciou umiestnenou na podloží kategórie C. Riešené boli všetky štyri typy oblastí seizmického zaťaženia na Slovensku. Z riešenia spektrálnej analýzy nás zaujímali hodnoty merných momentov v stenách m_x a m_y , veľkosť celkových deformácií, ako aj jednotlivých deformácií v smere osi x a v smere osi y . Výsledky sú zhrnuté v porovnávacích tabuľkách 4.5 a 4.6, kde môžeme vidieť, že čím je vyššia kategória podložia, alebo hodnota seizmického zrýchlenia, tým je väčšie samotné seizmické zaťaženie konštrukcie.

Tab. 4.5 Porovnanie výsledkov spektrálnej analýzy pre budenie v smere osi x

a_{gR} [m/s^2]	u_x [mm]	u_y [mm]	u [mm]	m_x [kNm/m]	m_y [kNm/m]
0,40	1,741	0,229	2,833	5,297	10,192
0,63	2,741	0,360	4,461	8,340	16,049
0,86	3,740	0,492	6,088	11,382	21,902
1,10	4,785	0,629	7,789	14,561	28,021

Ak zaťaženie pôsobí v smere osi x , tak na stenách v smere tohto pôsobenia (kratšie steny) vzniká pri deformácii jednoduchá vlna. Na stenách kolmých na smer pôsobenia zaťaženia (dlhšie steny) vzniká polvlna. Maximálny merný moment m_y vzniká v mieste votknutia, v strede dĺžky stien kolmých na smer pôsobenia zaťaženia (dlhšie steny). Maximálny merný moment m_x vzniká v hornom rohu stien.

Tab. 4.6 Porovnanie výsledkov spektrálnej analýzy pre budenie v smere osi y

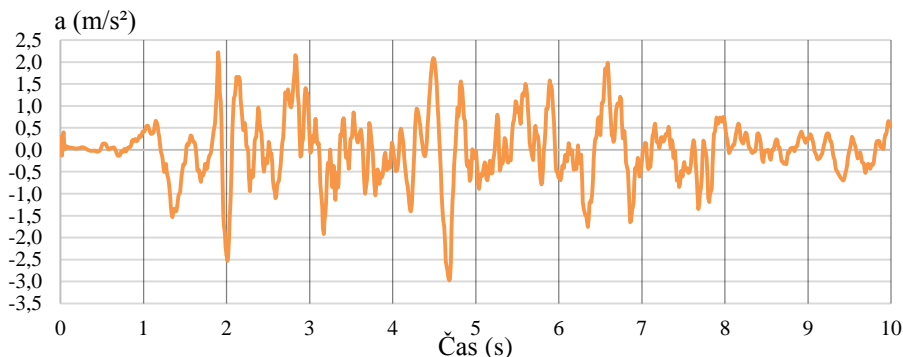
a_{gR} [m/s^2]	u_x [mm]	u_y [mm]	u [mm]	m_x [kNm/m]	m_y [kNm/m]
0,40	0,275	0,780	1,296	3,241	5,976
0,63	0,434	1,229	2,041	5,104	9,411
0,86	0,592	1,677	2,785	6,965	12,842
1,10	0,757	2,145	3,563	8,911	16,430

Ak zaťaženie pôsobí v smere osi y, tak na stenách v smere tohto pôsobenia (dlhšie steny) vzniká pri deformáciách jednoduchá vlna. Na stenách kolmých na smer pôsobenia zaťaženia (kratšie steny) vzniká polvlna. Maximálny merný moment m_y vzniká v mieste votknutia, v strede dĺžky stien kolmých na smer pôsobenia zaťaženia (kratšie steny). Maximálny merný moment m_x vzniká v strede hornej hrany kratších stien.

4.5.3 Metóda priamej integrácie v čase

Teoretickému riešeniu metódy priamej integrácie v čase (metóda step-by-step) sa venuje [3, 4]. Táto metóda spočíva v tom, že sa správanie sústavy na konci časového kroku odvodí z podmienok na začiatku toho istého kroku. Časový krok je veľmi malý a musíme pri ňom zadať zmenu zrýchlenia v danom časovom kroku. Integráciou zrýchlenia získame funkciu rýchlosti a integráciou funkcie rýchlosti dostaneme funkciu premiestnenia.

Vstupnou hodnotou pre dynamický výpočet bol akcelerogram zemetrasenia (Varpalota, 1995, Maďarsko), ktorý je uvedený na Obr. 4.9. Celkový čas jeho pôsobenia je 10 s, pričom časový krok je 0,01 s.



Obr. 4.9 Akcelerogram použitého zemetrasenia (Varpalota 1995, Maďarsko)

V literatúre [3] je podrobne vysvetlené ako sa tlmenie zohľadňuje vo výpočtoch. Rozhodli sme sa použiť Rayleighovo proporcionálne tlmenie.

$$\begin{Bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{Bmatrix} = \frac{2 \times \xi}{\omega_1 + \omega_k} \begin{Bmatrix} \omega_1 \omega_k \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (4.3)$$

- ξ - hodnota tlmenia v %
 a_0 - alfa (α) = proporcionálne tlmenie k matici hmotnosti
 a_1 - beta (β) = proporcionálne tlmenie k matici tuhosti
 ω_1 - uhlová frekvencia (odvodená z hodnoty frekvencie 1. vl. tvaru)
 ω_k - uhlová frekvencia (odvodená z hodnoty frekvencie 2. vl. tvaru)

Pre porovnanie sme zvolili tlmenia s hodnotou 2%, 5% a 7%. Pre každé z nich bola vypočítaná a zadaná do programu hodnota α a β (Tab. 4.7).

Tab. 4.7 Hodnoty α a β pre zadanie Reyleighovho proporcionálneho tlmenia

Tlmenie	α	β
2 %	0,741525	0,000539
5 %	1,853812	0,001348
7 %	2,595337	0,001887

Po prebehnutí výpočtu najprv zistíme, kedy nastala maximálna hodnota premiestnenia v čase. Pri 2% tlmení to je v čase 6,88 s. Pre tento čas boli následne vypísané deformácie nádrže v smere osi x a v smere osi y. Na konštrukcii boli vykreslené aj merné ohybové momenty v stenách nádrže m_x a m_y . Voda v sledovanom čase (6,88 s) dosiahla najväčšiu deformáciu v smere osi z 118,851 mm.

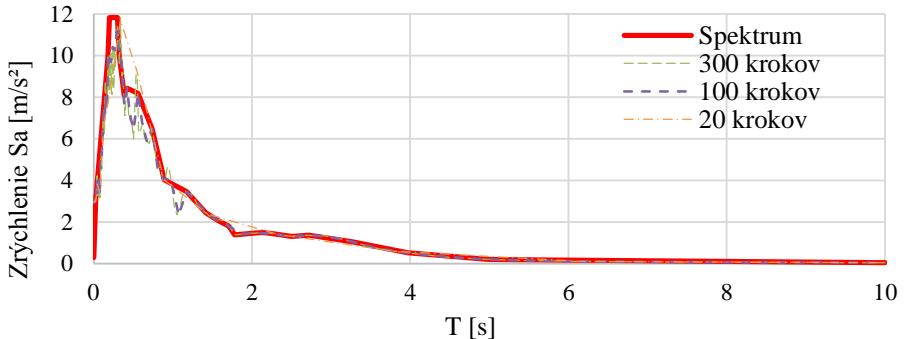
Následne bol určený čas s maximálnou deformáciou nádrže pre každú veľkosť tlmenia. Maximálne hodnoty deformácií stien nádrže, u_x , u_y , veľkosť vlny náplne nádrže a hodnoty maximálnych merných momentov v stenách m_x , m_y sú uvedené v tabuľke 4.8. Môžeme si tu všimnúť, že s narastajúcou hodnotou tlmenia klesá časový krok, v ktorom je dosiahnutá maximálna deformácia.

Tab. 4.8 Porovnanie výsledkov pri zaťažení nádrže akcelerogramom s rôznym tlmením

Tlmenie	0%	2%	5%	7%
Max. u v čase	7,97 s	6,88 s	2,13 s	2,13 s
u_x [mm]	35,186	15,429	12,927	12,166
u_y [mm]	3,162	1,377	1,174	1,101
m_x [kNm/m]	101,847	46,004	37,843	35,723
m_y [kNm/m]	188,319	87,527	72,412	68,371
Vlna [mm]	162,788	118,851	34,498	33,414

4.5.4 Spektrum odozvy odvodené z akcelerogramu

Ďalším krokom bolo vytvorenie spektier odozvy zo zaťaženia akcelerogramom. Keďže ako bolo spomenuté, pre konštrukcie zo železobetónu je typické tlmenie 2%, spomínané spektrum odozvy sme vytvorili práve pre tento prípad (Obr. 4.10).



Obr. 4.10 Spektrum odozvy odvodené z akcelerogramu s 2% tlmením

V tabuľke 4.9 je vidieť, že pri použití zaťaženia akcelerogramom s 2% tlmením a pri zaťažení spektrom odozvy odvodeným z tohto akcelerogramu, je rozdiel vo výsledných deformáciách aj merných momentoch v stenách. Hodnoty získané spektrálnou analýzou sú väčšie. Tým sa potvrdzuje správnosť vytvorenia spektra odozvy, pretože existuje predpoklad, že výsledky získané zo spektra odozvy majú byť väčšie.

Tab. 4.9 Porovnanie výsledkov pri zaťažení nádrže spektrom odozvy odvodeným z akcelerogramu s tlmením 2 %

	Akcelerogram	Spektrum
u_x [mm]	15,429	16,839
u_y [mm]	1,377	2,217
m_x [kNm/m]	46,004	51,054
m_y [kNm/m]	87,527	90,651

4.6 Dynamická analýza otvorenej nádrže s využitím interakcie konštrukcie a podlažia (SSI)

Zohľadnenie interakcie konštrukcie a podlažia je možné tak, že konštrukciu uložíme na jeden z troch matematicko – fyzikálnych modelov podlažia [7]:

- Jednparametrický model podložia - Winklerov model
- Dvojparametrický model podložia - Pasternakov model
- Pružný polpriestor – Boussinesqueov model

Rozhodli sme sa použiť Winklerov model, pri ktorom bola zadávaná tuhosť podložia, resp. tuhosť podpery v mieste základu.

4.6.1 Modálna analýza nádrže na podloží s konkrétnou tuhosťou

Podložie pod nádržou bolo zohľadnené pomocou pružín pod základovou doskou nádrže. Výpočet prebehol 6-krát, vždy s inou tuhosťou pružín. Priradená tuhosť pružín bola postupne $k = 1000 \text{ kN/m}^3$, 2000 kN/m^3 , 5000 kN/m^3 , 9000 kN/m^3 , 15000 kN/m^3 a 30000 kN/m^3 . Voda je modelovaná pomocou fluidných prvkov. Pri modálnej analýze nás zaujímajú vlastné tvary konštrukcie a hodnoty ich frekvencií. Hodnoty vlastných frekvencií sú v Tab. 4.10 pre všetky skúmané tuhosti podložia.

Zo všetkých vlastných tvarov bolo potrebné tak ako v predošlých výpočtoch odfiltrovať vlastné tvary kmitania podliehajúce efektu špliechania. Zároveň treba brať do úvahy aj tuhosť podložia, ktorá spôsobuje, že medzi základné vlastné tvary konštrukcie sa dostali aj vlastné tvary ovplyvnené podložím. Išlo o vlastné tvary, pri ktorých nádrž kmitala pozdĺž zvislej osi z, alebo vykresľovali stav, pri ktorom poklesli len niektoré rohy nádrže. Dostaneme tak vlastné tvary konštrukcie nádrže, ktoré nás zaujímali (kmitanie vo vodorovnom smere).

Kmitanie vo vodorovnom smere bolo pre nás zaujímavé, pretože sme vychádzali z modelu nádrže, ktorá bola pevne pripojená k podložke. V princípe tak platí, že vlastné tvary uvedené v Tab. 4.10 sú vlastné tvary konštrukcie, ktoré majú vzhľad ako na Obr. 4.3 – Obr. 4.8, je ich preto možné porovnávať.

Tab. 4.10 Porovnanie frekvencií vlastných tvarov pri rôznej tuhosti podložia

Tvar č.	Vlastná frekvencia f [Hz]						
	1000	2000	5000	9000	15000	30000	Pevné
1	5,716	5,740	5,869	6,355	5,452	5,553	5,758
2	6,770	6,871	7,220	7,762	8,612	10,132	6,051
3	8,888	8,918	9,018	9,181	9,478	10,310	8,476
4	8,930	8,955	9,045	9,218	9,687	11,739	8,792
5	11,106	11,123	11,176	11,263	11,437	12,255	11,793
6	12,562	12,585	12,661	12,778	12,997	13,787	12,000

S narastajúcou tuhosťou podlažia rastú aj hodnoty frekvencií vlastných tvarov. Z uvedených tuhostí podlažia sme zvolili jednu (30000 kN/m^3), s ktorou budeme vo výpočtoch pokračovať. Pri tejto tuhosti podlažia bola vyriešená aj modálna analýza, ktorá rátala s interakciou medzi konštrukciou a náplňou (s SSI aj s FSI). Frekvencie vlastných tvarov sú v Tab. 11.

Tab. 4.11 Vlastné tvary a ich frekvencie pri tuhosti podlažia 30000 kN/m^3

Vl. tvar č.	f (SSI bez FSI)	f (SSI s FSI)
1	5,758 Hz	5,920 Hz
2	6,051 Hz	6,216 Hz
3	8,476 Hz	8,699 Hz
4	8,792 Hz	9,039 Hz
5	11,793 Hz	12,133 Hz
6	12,000 Hz	12,475 Hz

4.6.2 Spektrálna analýza nádrže na podlaží s konkrétnou tuhosťou

Nasleduje spektrálna analýza, aby sme zistili vplyv seizmického zaťaženia od návrhového spektra odozvy. Počítame s vplyvom SSI aj FSI.

Z riešenia spektrálnej analýzy sa získajú hodnoty merných momentov v stenách m_x a m_y , veľkosť celkových deformácií u , ako aj jednotlivých deformácií v smere osi x a v smere osi y . Výsledky všetkých výpočtov sú zhrnuté v porovnávacích tabuľkách 4.12 a 4.13.

Tab. 4.12 Porovnanie výsledkov spektrálnej analýzy pri buzení v smere osi x

$a_{gR} [\text{m/s}^2]$	$u_x [\text{mm}]$	$u_y [\text{mm}]$	$u [\text{mm}]$	$m_x [\text{kNm/m}]$	$m_y [\text{kNm/m}]$
0,40	2,700	0,334	4,709	19,124	23,641
0,63	4,251	0,527	7,414	30,111	37,223
0,86	5,802	0,719	10,118	41,094	50,800
1,10	7,423	0,920	12,945	52,574	64,992

Tab. 4.13 Porovnanie výsledkov spektrálnej analýzy pri buzení v smere osi y

$a_{gR} [\text{m/s}^2]$	$u_x [\text{mm}]$	$u_y [\text{mm}]$	$u [\text{mm}]$	$m_x [\text{kNm/m}]$	$m_y [\text{kNm/m}]$
0,40	0,196	1,091	1,983	7,250	7,240
0,63	0,308	1,718	3,123	11,417	11,401
0,86	0,420	2,344	4,262	15,580	15,558
1,10	0,538	2,999	5,452	19,933	19,904

Nakoľko nádrž nie je pevne podoprená, ale jej podložie má definovanú tuhosť, maximálne merné momenty m_x vznikajú pri buzení v smere osi x v základovej doske nádrže. Pri buzení v smere osi y vznikajú v základovej doske nádrže maximálne merné momenty m_y .

5 Záver

Z porovnania výsledkov statickej analýzy vidíme, že sú v princípe rovnaké, bez ohľadu na použitý program, alebo spôsob modelovania zaťaženia od náplne. Použitie programu ANSYS a fluidných prvkov, je náročné, pre prax možno zbytočne zložité. Pokiaľ potrebujeme iba statickú analýzu nádrže, je klasické riešenie so zaťažením hydrostatickým trojuholníkom dostatočne presné v porovnaní s využitím fluidných prvkov.

Z analýzy výsledkov modálnej analýzy bolo vidieť, že pri prázdnych nádržiach, aj pri nádržiach s hmotami v uzloch sú vlastné tvary získané z oboch programov rovnaké. Odlišné boli ale v prípade porovnania frekvencií nádrží s hmotnými bodmi a nádrží s fluidnými prvkami (rozdiel cca 30%).

Otvorenú nádrž sme vymodelovali ešte presnejšie, aby sa model čo najviac blížil skutočnosti. Pri hydrodynamickom správaní kvapaliny bola zohľadnená interakcia konštrukcie a kvapaliny (FSI). Na úvod boli porovnané frekvencie vlastných tvarov nádrže bez zohľadnenia FSI a s ním. Výsledky sa líšili len mierne (cca 3,5%).

Ďalším krokom dynamickej analýzy konštrukcie bola spektrálna analýza. Z riešení pre každú oblasť nás zaujímali hodnoty maximálnych deformácií, stav napätosti konštrukcie resp. vnútorných síl. Keď tieto hodnoty porovnáme s hodnotami získanými zo statickej analýzy, môžeme vidieť, že statické pôsobenie zaťaženia je nepriaznivejšie, t.j. sledované hodnoty sú pri statickej analýze väčšie.

Poslednou časťou dynamickej analýzy bolo využitie metódy priamej integrácie v čase. Vo výsledkoch bol nájdený čas, kedy bola deformácia stien najväčšia a v tomto čase boli vykreslené aj maximálne merné momenty v stenách. Rovnako boli zistené aj výsledky zaťaženia konštrukcie akcelerogramom pri zohľadnení tlmenia materiálu. Následne bolo zo zvoleného akcelerogramu vytvorené spektrum odozvy s 2% útlmom, aby bolo možné porovnať výsledné deformácie stien nádrže, ako aj veľkosť merných momentov v stenách s pôvodným akcelerogramom pri zohľadnenom tlmení materiálu. Pri spektre odozvy sa očakáva, že je na strane bezpečnosti a tým pádom je konštrukcia akoby viac namáhaná. Tieto predpoklady boli výpočtami potvrdené.

Použité spôsoby modelovania majú svoje opodstatnenie aj v praxi, pretože môžeme konštrukciu navrhnuť oveľa presnejšie. Použitím fluidných prvkov, kontaktných elementov a presnej tuhosti podložia, sa modelom približujeme reálnej konštrukcii. Môžeme tak presnejšie určiť vplyv zaťaženia na konštrukciu.

Zoznam použitej literatúry

- [1] GRAMBLIČKA, Š. - BILČÍK, J.: Betónové konštrukcie: Nádrže. Bratislava: STU v Bratislave, 2004. 283 s. ISBN 80-227-2014-3
- [2] ZICH, M. – KLUSÁČEK, L. – SEČKÁŘ, M. – LANÍKOVÁ, I.: Vodohospodárske konstrukce – Modul M02 - Nádrže a potrubí, BRNO: VUT v Brne, 2012, 48 s.
- [3] SOKOL, M. – TVRDÁ, K.: Dynamika stavebných konštrukcií. Bratislava: STU v Bratislave 2011, s. 212. ISBN 978-80-227-3587-2
- [4] JUHÁSOVÁ, E.: Pôsobenie seizmických pohybov na stavebné konštrukcie. Bratislava: Veda 1985, s. 264.
- [5] FLESCHE, R.: Baudynamik praxisgerecht: Band 1 – Berechnungsgrundlagen, Viesbaden und Berlin, 1993. 543 s. ISBN 3-7625-3010-6
- [6] BALÁŽ, Ľ.: Statická a dynamická analýza valcových nádrží. Dizertačná práca. 2016.
- [7] JENDŽELOVSKÝ, N. Modelovanie základových konštrukcií v MKP. Bratislava 2009, 94 s. ISBN 978-80-227-3025-9

Zoznam prác autora

Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách

UHLÍŘOVÁ, Lenka. Influence of Wind on the Office Building Westend Square. In *XVII Meždunarodna naučna konferencija VSU'2017 : dokladi. Tom I. Sofia, Bulgaria, 8 - 9 juni 2017* = 17-th International scientific conference VSU'2017, proceedings. Volume I. Sofia, Bulgaria, 8 - 9 June 2017. 1. vyd. Sofia : University of Structural Engineering and Architecture (VSU) "L. Karavelov", 2017, S. 118-123. ISSN 1314-071X.

UHLÍŘOVÁ, Lenka - JENDŽELOVSKÝ, Norbert. Hydrodynamic Loading of Rectangular Tanks. In *XVII Meždunarodna naučna konferencija VSU'2017 : dokladi. Tom I. Sofia, Bulgaria, 8 - 9 juni 2017* = 17-th International scientific conference VSU'2017, proceedings. Volume I. Sofia, Bulgaria, 8 - 9 June 2017. 1. vyd. Sofia : University of Structural Engineering and Architecture (VSU) "L. Karavelov", 2017, S. 124-129. ISSN 1314-071X.

UHLÍŘOVÁ, Lenka - JENDŽELOVSKÝ, Norbert. Analysis of Natural Frequencies of the Rectangular Tank Considering Interaction between Subsoil and Structure. In *SGEM 2018. 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference. Volume 18. Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining : conference proceedings. Albena, Bulgaria, 2 July - 8 July 2018*. 1. vyd. Sofia : STEF 92 Technology, 2018, S. 19-25. ISSN 1314-2704. ISBN 978-619-7408-36-2. V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85058889907 ; DOI: 10.5593/sgem2018/1.2/S02.003.

UHLÍŘOVÁ, Lenka. Fluid-Structure Interaction in a Rectangular Tank. In *XVIII Jubilejna Meždunarodna naučna konferencija "Stroitel'stvo i architektura" VSU'2018 - Volume 1 [elektronický zdroj] : sbornik dokladi. Sofia, Bulgaria, 18 - 20 oktombri 2018* = 18th Anniversary International Scientific Conference by Construction and Architecture VSU'2018 - Volume 1, proceedings. Sofia, Bulgaria, 18 - 20 October 2018. 1. vyd. Sofia : University of Structural Engineering and Architecture (VSU) "L. Karavelov", 2018, online, s. 703-708. ISSN 1314-071X.

UHLÍŘOVÁ, Lenka. Using 3D Elements in Modeling of a Rectangular Tank. In *XVIII Jubilejna Meždunarodna naučna konferencija "Stroitel'stvo i architektura" VSU'2018 - Volume 1 [elektronický zdroj] : sbornik dokladi. Sofia, Bulgaria, 18 - 20 oktombri 2018* = 18th Anniversary International Scientific Conference by Construction and Architecture VSU'2018 - Volume

1, proceedings. Sofia, Bulgaria, 18 - 20 October 2018. 1. vyd. Sofia : University of Structural Engineering and Architecture (VSU) "L. Karavelov", 2018, online, s. 709-714. ISSN 1314-071X.

UHLÍŘOVÁ, Lenka - JENDŽELOVSKÝ, Norbert. Analysis of a Tank Used for the Purposes of Ecological Purification of Water. In *SGEM 2018. 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference. Volume 18. Nano, Bio and Green - Technologies for a Sustainable Future : conference proceedings. Vienna, Austria, 3 - 6 December 2018*. 1. vyd. Sofia : STEF 92 Technology, 2018, S. 613-619. ISSN 1314-2704. ISBN 978-619-7408-71-3. V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85063086930 ; DOI: 10.5593/sgem2018V/6.4/S10.076.

UHLÍŘOVÁ, Lenka. Interakcia kvapaliny a koňtrukcie pravouhlej nádrže. In *Juniorstav 2019 [elektronický zdroj] : sborník příspěvků. 21. odborná konference doktorského studia s mezinárodní účastí. Brno, ČR, 31. 1. 2019 = Juniorstav 2019, proceedings of the 21st International Conference of doctoral Students*. 1. vyd. Brno : ECON publishing, 2019, USB klíč, s. 265-269. ISBN 978-80-86433-71-4.

UHLÍŘOVÁ, Lenka - JENDŽELOVSKÝ, Norbert. Spectral Analysis of the Rectangular Tank. In *SGEM 2019. 19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference. Volume 19. Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining : conference proceedings. Albena, Bulgaria, 30 June - 6 July 2019*. 1. vyd. Sofia : STEF 92 Technology, 2019, S. 485-492. ISSN 1314-2704. ISBN 978-619-7408-77-5. V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85073685209 ; DOI: 10.5593/sgem2019/1.2/S02.062.

UHLÍŘOVÁ, Lenka - PREKOP, Ľubomír. Analysis of Submerged Piles and a Layered Subsoil. In *SGEM 2019. 19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference. Volume 19. Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining : conference proceedings. Albena, Bulgaria, 30 June - 6 July 2019*. 1. vyd. Sofia : STEF 92 Technology, 2019, S. 51-56. ISSN 1314-2704. ISBN 978-619-7408-77-5. V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85073686739 ; DOI: 10.5593/sgem2019/1.2/S02.007.

UHLÍŘOVÁ, Lenka - JENDŽELOVSKÝ, Norbert. Earthquake Effects on the Sedimentation Tank. In *SGEM 2019. 19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference. Volume 19. Nano, Bio and Green - Technologies for a Sustainable Future : conference proceedings. Vienna, Austria, 9 - 11*

December, 2019. 1. vyd. Sofia : STEF 92 Technology, 2019, S. 413-420. ISSN 1314-2704. ISBN 978-619-7408-99-7.

Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách

UHLÍŘOVÁ, Lenka. Účinky extrémneho vetra na výškovú budovu. In *New Trends in Statics and Dynamics of Buildings [elektronický zdroj] : conference proceedings. 14th International Conference. Bratislava, Slovakia, 13. - 14. 10. 2016*. 1. vyd. Bratislava : Slovak University of Technology in Bratislava, 2016, CD-ROM, [6] s. ISBN 978-80-227-4613-7.

UHLÍŘOVÁ, Lenka. Statické pôsobenie kvapaliny na pravouhlú nádrž. In *Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering [elektronický zdroj] : 27th Annual PhD Student Conference on Applied Mathematics, Applied Mechanics, Geodesy and Cartography, Landscaping, Building Technology, Theory and Structures of Buildings, Theory and Structures of Civil Engineering Works, Theory and Environmental Technology of Buildings, Water Resources Engineering. 25. October 2017, Bratislava, Slovakia*. 1. vyd. Bratislava : Spektrum STU, 2017, CD-ROM, s. 107-112. ISBN 978-80-227-4751-6.

UHLÍŘOVÁ, Lenka. Analýza hydrostatického zaťaženia pravouhlej nádrže. In *New Trends in Statics and Dynamics of Buildings [elektronický zdroj] : conference proceedings. 15th International Conference. Bratislava, Slovakia, 19. - 20. 10. 2017*. 1. vyd. Bratislava : Slovak University of Technology in Bratislava, 2017, CD-ROM, [6] s. ISBN 978-80-227-4732-5.

UHLÍŘOVÁ, Lenka. Vplyv naplnenia vodnej nádrže na jej frekvenciu. In *New Trends in Statics and Dynamics of Buildings [elektronický zdroj] : conference proceedings. 16th International Conference. Bratislava, Slovakia, 18. - 19. 10. 2018*. 1. vyd. Bratislava : Spektrum STU, 2018, online, [5] s. ISBN 978-80-227-4845-2.

UHLÍŘOVÁ, Lenka. Vplyv hrúbky stien nádrže na jej frekvenciu. In *Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering [elektronický zdroj] : 28th Annual PhD Student Conference on Applied Mathematics, Applied Mechanics, Building Technology, Geodesy and Cartography, Landscaping, Theory and Environmental Technology of Buildings, Theory and Structures of Buildings, Theory and Structures of Civil Engineering Works, Water Resources Engineering. October 24th 2018, Bratislava*. 1. vyd.

Bratislava : Spektrum STU, 2018, CD-ROM, s. 84-88. ISBN 978-80-227-4864-3.

UHLÍŘOVÁ, Lenka - JENDŽELOVSKÝ, Norbert. Dynamic Analysis of Rectangular Tank Using Response Spectra. In *New Trends in Dynamics of Structures : conference proceedings. 37th International Conference on Vibroengineering. Bratislava, Slovakia, 25-26th April 2019*. 1. vyd. Kaunas : JVE International, 2019, S. 99-104. ISSN 2345-0533. V databáze: DOI: 10.21595/vp.2019.20657 ; SCOPUS: 2-s2.0-85065865339.

UHLÍŘOVÁ, Lenka. Spektrálna analýza pravouhlej odkaľovacej nádrže. In *Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering [elektronický zdroj] : 29th Annual PhD Student Conference on Applied Mathematics, Applied Mechanics, Building Technology, Geodesy and Cartography, Landscaping, Theory and Environmental Technology of Buildings, Theory and Structures of Buildings, Theory and Structures of Civil Engineering Works, Water Resources Engineering. October 16th 2019, Bratislava*. 1. vyd. Bratislava : Spektrum STU, 2019, CD-ROM, s. 54-59. ISBN 978-80-227-4972-5.

UHLÍŘOVÁ, Lenka - JENDŽELOVSKÝ, Norbert. Rectangular reinforced concrete tank loaded by seismic load. In *4th International Scientific Conference Structural and Physical Aspects of Construction Engineering (SPACE 2019) [elektronický zdroj] : Štrbské Pleso, Slovakia, November 13-15, 2019*. 1. vyd. Londýn : EDP Sciences, 2020, online, [7] s., art. no. 00008. ISSN 2261-236X. V databáze: DOI: 10.1051/mateconf/202031000008.

JENDŽELOVSKÝ, Norbert - UHLÍŘOVÁ, Lenka. Rectangular tank under the seismic load. In *Dynamics of Civil Engineering and Transport Structures and Wind Engineering - DYN-WIND'2020 [elektronický zdroj] : Vyhne, Slovak Republic, May 24-28, 2020*. 1. vyd. Londýn : EDP Sciences, 2020, online, [7] s., art. no. 00022. ISSN 2261-236X. V databáze: DOI: 10.1051/mateconf/202031300022.