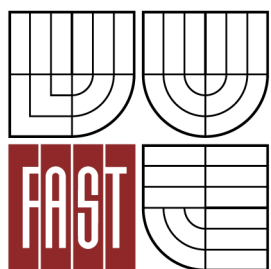




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ  
ÚSTAV STAVEBNÍ MECHANIKY

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING  
INSTITUTE OF STRUCTURAL MECHANICS

# MODELOVÁNÍ NÁHODNÉ TORZE A JEJÍ UČINEK VE SPEKTRÁLNÍ ANALÝZE

MODELING OF ACCIDENTAL TORSION AND ITS EFFECT ON SPECTRAL ANALYSIS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Zdeňka Šulerová

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. ZBYNĚK VLK, Ph.D.

BRNO 2012



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

**Studijní program** B3607 Stavební inženýrství  
**Typ studijního programu** Bakalářský studijní program s prezenční formou studia  
**Studijní obor** 3608R001 Pozemní stavby  
**Pracoviště** Ústav stavební mechaniky

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

**Student** Zdeňka Šulerová

**Název** Modelování náhodné torze a její účinek ve spektrální analýze

**Vedoucí bakalářské práce** Ing. Zbyněk Vlk, Ph.D.

**Datum zadání bakalářské práce** 30. 11. 2011

**Datum odevzdání bakalářské práce** 25. 5. 2012

V Brně dne 30. 11. 2011

.....  
prof. Ing. Drahomír Novák, DrSc.  
Vedoucí ústavu

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

## **Podklady a literatura**

Normy : ČSN EN 1998-1 - Eurokód 8

Bittnar Z., Šejnoha J. - Numerické metody mechaniky 1,2

## **Zásady pro vypracování**

Cílem práce je osvojit si zásady modelování konstrukcí vč. zatížení a hmot pro dynamické výpočty, seznámit se s normou ČSN EN 1998-1 (Eurokód 8) pojednávající o navrhování konstrukcí odolných proti zemětřesení. Hlavní důraz bude kladen na modelování a výpočet účinků od náhodné torze. Budou provedeny výpočty na několika modelech výškové budovy a dosažené výsledky budou porovnány.

## **Předepsané přílohy**

Licenční smlouva o zveřejňování vysokoškolských kvalifikačních prací

.....  
Ing. Zbyněk Vlk, Ph.D.  
Vedoucí bakalářské práce

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce se zabývá výpočtem betonové skeletové konstrukce na účinky seizmického zatížení. K výpočtu bude použita zjednodušená metoda pomoci příčných sil uvedená v normě EN 1998-1:2004 – Navrhování konstrukcí odolných proti zemětřesení. Výpočet bude proveden ručním výpočtem a výpočtový program RFEM. Těmito způsoby budou vypočítaná náhradní břemena a krouticí momenty působící na konstrukci a následně porovnány. Stěžejní částí bude zhodnocení účinků při náhodném rozložení hmoty, kterou udává norma, a námi zvolené rozložení hmoty, u které předpokládáme maximální deformace.

## **Klíčová slova**

zemětřesení, dynamické zatížení, spektrum pružné odezvy, rozdělení vodorovných seizmických sil, tvar kmitání, vlastní perioda, vlastní frekvence, torzní účinky

## **Abstract**

This bachelor thesis deals with the appraisal of concrete frame structures in seismic load effects. To calculate the simplified method will be used to support lateral forces specified in EN 1998-1:2004 - Design of structures for earthquake resistance. The calculation will be done by manual calculation and the calculation program RFEM. These alternative methods will be calculated loads and torques acting on the structure and subsequently compared. The main part of the bachelor's thesis is to evaluate the effects of the random distribution of mass, prescribed by the standard, and our chosen mass distribution, where we expect the maximum deformation.

## **Keywords**

earthquake, dynamic load, elastic response spectrum, distribution of horizontal seismic forces, mode of vibration, natural period, natural frequency, effects of torsion

### **Bibliografická citace VŠKP**

ŠULEROVÁ, Zdeňka. *Modelování náhodné torze a její účinek ve spektrální analýze*. Brno, 2012. 59 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavební mechaniky. Vedoucí práce Ing. Zbyněk Vlk, Ph.D..

**Prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracovala samostatně, a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 25.5.2012

.....  
podpis autora

### **Poděkování**

V této části bych ráda poděkovala vedoucímu bakalářské práce Ing. Zbyňku Vlčkovi, Ph.D za odborné vedení, cenné rady a čas strávený při zpracování bakalářské práce.

---

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod a cíl práce</b>	<b>13</b>
1.1	Úvod .....	13
1.2	Cíl práce.....	14
<b>2</b>	<b>Základní pojmy</b>	<b>15</b>
2.1	Zemětřesení .....	15
2.2	Dynamika.....	18
2.2.1	Definice .....	18
2.2.2	Rozdíly mezi statickým a dynamickým řešením .....	18
2.2.3	Základní vlastnosti a terminologie kmitání.....	18
<b>3</b>	<b>Postup výpočtu</b>	<b>20</b>
3.1	Rozdělení hmot.....	20
3.2	Seizmické zatížení .....	21
3.3	Metoda výpočtu pomocí příčných sil .....	23
<b>4</b>	<b>Modelování konstrukce v programu RFEM</b>	<b>26</b>
4.1	Popis konstrukce.....	26
4.2	Prostorový model v 3D .....	27
4.3	Prutový model v 1D.....	28
4.4	Výpočet vlastních frekvencí a vlastních tvarů.....	30
<b>5</b>	<b>Ruční výpočet</b>	<b>32</b>
5.1	Zatížení seizmické .....	32
5.2	Výpočet náhradních příčných sil .....	34
5.3	Výpočet deformací na prutu z náhradních sil.....	37
<b>6</b>	<b>Výpočet pomocí programu RFEM</b>	<b>39</b>
6.1	Prutový model.....	39
6.2	Prostorový model.....	43



6.2.1	Rovnoměrné rozdělení hmot.....	44
6.2.2	Vlastní nerovnoměrné rozdělení hmoty.....	46
<b>7</b>	<b>Vyhodnocení získaných výsledků</b>	<b>50</b>
7.1	Srovnání ručního výpočtu dle EC 8 s výpočtem v programu RFEM na prutovém modelu.....	50
7.2	Srovnání prutového a prostorového modelu.....	52
7.3	Srovnání náhodného a vlastního rozdělení hmot na prostorovém modelu.....	53
<b>8</b>	<b>Závěr</b>	<b>55</b>
	<b>Seznam použitých zdrojů</b>	<b>57</b>
	<b>Seznam zkratek</b>	<b>58</b>

## Seznam obrázků

Obr. 1	Mapa seizmických oblastí České republiky	21
Obr. 2	Půdorysné schéma	26
Obr. 3	Model posuzované konstrukce v 3D	27
Obr. 4	Znázornění nahrazení tíhy jednotlivých pater na uzly prutového modelu	28
Obr. 5	Model pro výpočet a) momentu setrvačnosti v ose x b) momentu setrvačnosti v ose y c) krouticího momentu setrvačnosti d) pro plochu průřezu	29
Obr. 6	Grafické znázornění a) 1. vlastního tvaru, prostorový model, $T_1 = 1,994s$ b) 2. vlastního tvaru, prostorový model, $T_2 = 1,436s$ c) 1. vlastního tvaru, prutový model, $T_1 = 1,963s$ d) 2. vlastního tvaru, prutový model, $T_2 = 1,428s$	31
Obr. 7	Hodnoty parametrů popisující spektrum pružné odezvy typu 1	32
Obr. 8	Doporučené spektrum pružné odezvy typu 1 pro základové pudy A-E	32
Obr. 9	Zobrazení vodorovných seizmických sil a deformací a) zatížení pro 1. tvar b) deformace pro 1. tvar c) zatížení pro 2. tvar d) deformace pro 2. tvar	37
Obr. 10	Zadání přídavných hmot v uzlech	39
Obr. 11	Zadání pro generování náhradních břemen	42
Obr. 12	Zadání pro nahodilé torzní účinky	43
Obr. 13	Rozložení hmoty ve směru osy y	47
Obr. 14	Rozložení hmoty ve směru osy x	47
Obr. 15	Výsledné posuny [mm] pro a) 1. vlastní tvar, ruční výpočet b) 1. vlastní tvar, výpočet programem RFEM c) 2. vlastní tvar, ruční výpočet d) 2. vlastní tvar, výpočet programem RFEM	51
Obr. 16	Znázornění nejvíce deformovaného uzlu	52

## Seznam tabulek

Tab. 1	Popis Mercalliho stupnice s uvedeným zrychlením povrchu	16
Tab. 2	Popis Richterovy stupnice (udává intenzitu pohybu země měřenou ve vzdálenosti 100 km od epicentra zemětřesení)	16
Tab. 3	Hodnoty $\varphi$ pro výpočet $\psi E, i$	21
Tab. 4	Stálá zatížení na jednotlivá patra	29
Tab. 5	Výsledné návrhové zatížení dle kombinace (3.1)	29
Tab. 6	Hodnoty pro prostorový model 3D	31
Tab. 7	Hodnoty pro prutový model 1D	31
Tab. 8	Základní hodnoty součinitele duktility $q_o$ pro systémy pravidelné po výšce	33
Tab. 9	Rozdělení vodorovných sil působící na $i$ -té uzly pro 1. a 2. vlastní tvar	35
Tab. 10	Rozdělení krouticích momentů působící na $i$ -tý uzel pro 1. a 2. vlastní tvar	36
Tab. 11	Výsledná pootočení jednotlivých uzlů konstrukce	38
Tab. 12	Vypočítané hodnoty pro 50 vlastních tvarů pomocí programu RFEM	40
Tab. 13	Faktory náhradních hmot	41
Tab. 14	Vypočítané hodnoty pro 50 vlastních tvarů pomocí programu RFEM	44
Tab. 15	Faktory náhradních hmot	45
Tab. 16	Velikost vlastních čísel a period pro vlastní rozložení hmoty	48
Tab. 17	Množství kmitající hmoty pro 50 vlastních tvarů	49

Tab. 18	Hodnoty náhradních břemen a momentů pro výpočet pomocí příčných sil a programem RFEM	50
Tab. 19	Srovnání deformací jednotlivých uzlů podle ručního výpočtu a výpočtu programem RFEM	51
Tab. 20	Srovnání deformací na prutovém a prostorovém modelu pro kombinaci všech vlastních tvarů a prvních dvou vlastních tvarů	53
Tab. 21	Deformace od náhodného rozdělení hmoty a od vlastního rozdělení hmoty	54

# 1 Úvod a cíl práce

## 1.1 Úvod

Téma bakalářské práce pojednává o dynamickém zatížení konstrukce způsobené zemětřesením. V problematice dynamického účinku nemám tolik odbornosti, protože je náplní navazujícího magisterského studia. Vyjdeme tedy ze zjednodušené metody výpočtu pomocí náhradních břemen a základních fyzikálních zákonitostí. Podkladem pro získání znalostí mi byla dostupná literatura, odborné články a informace od vedoucího bakalářské práce. Vzhledem k zajímavosti a neobvyklosti daného tématu je pravděpodobné, že se tomuto zaměření budu věnovat i v diplomové práci.

Posouzení stavebních konstrukcí z hlediska seizmického působení není v České republice až tak časté, jelikož se nachází v oblasti střední Evropy, kde jsou tektonické posuny malé a ke katastrofickému poškození konstrukcí nedochází.

Malé otřesy způsobené pohybem litosférických desek, které člověk prakticky nepostřehne, jsou velmi častým jevem.

Území s největší seizmickou aktivitou v České republice je Kraslicko v západních Čechách, mariánskolázeňský, podkrušnohorský a hronovsko-poříčský zlom a oblast Slezska. Nejsilnější zaznamenané otřesy nepřesáhly magnituda  $M=4,6$  [1].

Vstupem České republiky do Evropské unie se otevřel trh práce v zahraničí, proto je znalost seizmických účinků důležitá. Za hlavní oblast výrazně postiženou zemětřesením se považuje jižní část kontinentu (Itálie, Sicílie, Španělsko, Portugalsko, Řecko, Turecko), ale neméně podstatná je i východní Evropa v oblasti pásmového pohoří Karpat.

Od roku 2010 vešla v platnost nová norma pro posouzení konstrukcí v oblasti seizmicity, a to Eurokód 8 - EN1998:2004, který navazuje na ostatní evropské normy pro projektování stavebních konstrukcí a zdokonaluje předcházející normy [2]. Velká pozornost je zde věnována kritériím, která musejí konstrukce splňovat, jejich duktilitě a postupu statického návrhu.

S příchodem evropské normy došlo k výrazným změnám v oblasti seizmických map České republiky a s tím ke zvýšení finanční náročnosti na zesílení nosných konstrukcí staveb v oblastech ohrožených tímto zatížením [2].

Výsledné účinky zemětřesení závisí mimo jiné na rozložení hmot a torzní tuhosti konstrukce. Dle základního vztahu pro hmotnost vyplývá, že kolikrát větší hmotnost těleso má, tolikrát menší mu výsledná síla udělí zrychlení. Torzní tuhost omezuje vliv krouticích momentů, které vedou k nerovnoměrnému namáhání jednotlivých konstrukčních částí.

## 1.2 Cíl práce

Cílem této práce je výpočet konstrukce pomocí náhradních sil a krouticích momentů zjednodušenou metodou, která je uvedena v příslušné normě, srovnání s výsledky z programu RFEM a sledování změny vnitřních sil, posunu a pootočení při nejméně příznivém rozložení hmoty na konstrukci.

Lineární výpočet konstrukce od stanovených náhradních sil bude proveden programem pro statický výpočet a návrh konstrukcí RFEM. Systém RFEM bude také použit pro výpočet účinku seizmického zatížení, kde je Eurokód 8 zohledněn v přídatném modulu RF-DYNAM, který analyzuje vlastní kmitání a kmitání vlivem vnějšího buzení a umožňuje generování náhradních seizmických zatížení podle spektra odezvy v souladu s Eurokódem 8. Samotný program RFEM představuje komplexní řešení zadání pomocí metody konečných prvků.

K tomuto účelu bude vytvořen 3D model zadané výškové konstrukce a 1D prutový model, který bude mít srovnatelnou tuhost ve všech směrech jako 3D model. Do výpočtu bude zahrnuto zatížení od zemětřesení pomocí špičkového referenčního zrychlení, součinitele duktility, typu podloží a spektra odezvy.

Na začátku se seznámíme obecně se zemětřesením a dynamickým namáháním, dále s postupem výpočtu dle Eurokódu 8 a postupně přejdeme k řešení zadané konstrukce.

## 2 Základní pojmy

### 2.1 Zemětřesení

Dle [1] pod pojmem **zemětřesení** se rozumí rychlé, krátkodobé otřesy zemské kůry různé intenzity. Zemětřesení je zpravidla vázáno na geologicky mladé, tektonicky neklidné oblasti, okraje litosférických desek, nebo okolí velkých hlubinných zlomů.

**Ohnisko zemětřesení** je místo v zemské kůře nebo plášti, kde dané otřesy vznikají. Ohnisko samo o sobě není prostorově omezeno a může dosahovat velkých rozměrů, někdy i několika set kilometrů (dlouhá zlomová území, subdukční zóny). Proto jej nahrazujeme jedním bodem, **hypocentrem**, který představuje těžiště plochy ohniska. Kolmý průmět hypocentra na zemský povrch nazýváme **epicentrem**. Jde o bod na povrchu, který je nejbližší k oblasti vzniku otřesů. Vzdálenost mezi epicentrem a hypocentrem udává **hloubku ohniska** [1].

Zemětřesení je charakterizováno jednak velikostí (intenzitou), jednak silou (magnitudo) [1].

- Intenzita je hodnocena podle následků – podle toho, jak zemětřesení působí na obyvatelstvo v postižené oblasti, jaké vzniknou škody na stavbách a jaký je rozsah viditelných deformací zemského povrchu. Intenzita je tedy čistě subjektivní veličina závislá na určení míry škod, které vznikly v souvislosti s otřesy. Je důležité si uvědomit, že z tohoto důvodu je její velikost v každém místě pozorování odlišná a klesá se vzdáleností od epicentra. Jako měřítko intenzity zemětřesení je všeobecně používána upravená Mercalliho stupnice ( Tab. 1).
- Magnitudo je, oproti intenzitě, objektivně změřitelnou veličinou. Její hodnota je stanovena na základě pozorování mikroseizmických účinků zemětřesení, tedy těch, které registrují speciální přístroje – seismografy. Měřítkem velikosti seizmických vln je Richterova stupnice ( Tab. 2).

Mercalliho stupnice	Pojmenování	Popis
I	Nepozorovatelné	Člověk nerozpozná, pouze přístroje
II	Velmi slabé	Rozpoznatelné v horních patrech budov citlivými lidmi
III	Slabé	Vibrace, lustry se pohybují; srovnatelné s vibracemi způsobenými projíždějícím těžkým nákladním automobilem
IV	Mírné	Drnčení oken, cinkot příborů a nádobí, zdi vydávají praskavé zvuky
V	Málo silné	Lze rozpoznat v krajině, probouzí spící, praskání oken, kyvadlové hodiny se mohou zastavit
VI	Silné	Vrávorání při chůzi, padají předměty, rozbíjí se nádobí, praskliny v omítce
VII	Velmi silné	Lze jen obtížně stát, zvony zvoní, trhliny ve zdech
VIII	Bořivé	Padají komíny, poškození budov, pohybující se těžký nábytek
IX	Pustošivé	Panika, vážné poškození domů, větší trhliny v půdě
X	Ničivé	Zničené budovy, porušení přehrad, velké trhliny v půdě
XI	Katastrofické	Roztržení kolejí a potrubí, zničené mosty, změny terénu
XII	Globální	Velké předměty létají vzduchem, úplné zničení, rozsáhlé terénní změny

Tab. 1 Popis Mercalliho stupnice s uvedeným zrychlením povrchu

Magnitudo	Následky
1,2	Není cítit, lze pouze měřit přístroji
3	Nejmenší hodnota, kterou člověk rozpozná, bez poškození
4	Slabé zemětřesení
5	Slabé poškození budov blízko epicentra
6	Vážné poškození špatně postavených budov
7	Velké poškození budov
8	Téměř úplné zničení

Tab. 2 Popis Richterovy stupnice (udává intenzitu pohybu země měřenou ve vzdálenosti 100 km od epicentra zemětřesení)

Zemětřesení můžeme klasifikovat z několika hledisek. Kromě hodnocení intenzity a velikosti můžeme otřesy dělit podle původu vzniku a hloubky ohniska.

Podle vzniku dělíme zemětřesení na říťivá, vulkanická a tektonická [1].

- **Říťivá zemětřesení** vznikají řícením stropů různých podzemních dutin. Může se jednat o přírodní útvary (např. krasové jeskyně) nebo o člověkem vytvořené dutiny (opuštěné doly apod.). Říťivá zemětřesení mají pouze lokální dosah, přesto škody mohou být značné (např. obydlené průmyslové důlní oblasti).



- **Zemětřesení vulkanická** jsou vázána na přírodní dráhy vulkanického materiálu. Často doprovázejí nebo předcházejí sopečné erupce. Intenzita nebývá velická a většinou mají pouze lokální dopad. Charakteristický je výskyt otřesů ve skupinách (tzv. *zemětřesné roje*).
- **Zemětřesení tektonická** jsou nejčastějším a nejnebezpečnějším typem zemětřesení. Vznikem jsou vázána na poruchy v litosféře (zlomy, subdukce), kde často dochází k náhlým a intenzivním procesům, které uvolňují velké množství nahromaděné energie. Prostorový dopad otřesů může být obrovský a rozsah postižené oblasti až stovky km<sup>2</sup>.

Podle procentuálního vyjádření představují tektonická zemětřesení 90%, vulkanická 7% a říťivá asi 3% všech otřesů v zemském tělese.

Podle hloubky ohniska (obr. 3 a 5) rozlišujeme zemětřesení mělká, středně hluboká a hluboká [1].

- **Mělká zemětřesení** vznikají v zemské kůře a svrchní části pláště v hloubce do 60 km. Patří sem všechny říťivé, vulkanické i většina tektonických otřesů, spolu s projevy různých dalších procesů, jako je říćení skal, pád lavin nebo odpal náloží.
- **Středně hluboká zemětřesení** jsou charakteristická hloubkou hypocentra 60 - 300 km. Vznikají tedy výhradně v zemském plášti a jsou vázána především na okraje litosférických desek (subdukční zóny).
- **Hluboká zemětřesení** (nad 300 km) jsou generována výhradně ve významných subdukčních zónách, především v tichomořské oblasti.

## **2.2 Dynamika**

Dynamikou se zabývalo lidstvo již před mnoha lety, a to zejména dynamikou způsobenou přírodními vlivy, jako je vítr a zemětřesení. V dnešní době probíhá velký rozmach tohoto vědního oboru, a to zejména ze dvou příčin. Jednak přibývají nové zdroje dynamického namáhání staveb a druhá příčina je v samotné náročnosti stavebních konstrukcí [3].

### **2.2.1 Definice**

Dynamika je část mechaniky, která se zabývá příčinami pohybu hmotných objektů - bodů, těles, soustav těles. Jedním ze základních cílů dynamiky je určit pohyb hmotného bodu (případně tělesa nebo těles), známe-li síly na hmotný bod (těleso nebo tělesa) působící. Jde tedy o určení polohy a rychlosti hmotného bodu (tělesa nebo těles) v daném čase [4].

### **2.2.2 Rozdíly mezi statickým a dynamickým řešením**

Konstrukci či její část uvažujeme v obecném pohybu.

Hlavním rozdílem je, že při dynamickém řešení se zatížení a odezva konstrukce mění s časem, takže nemá pouze jedno řešení jako při statickém výpočtu, ale musí přinést komplexnější pohled na danou situaci [3].

Dalším rozdílem je, že výsledná přemístění konstrukce jsou spojena se zrychlením, která vyvolávají setrvačné síly.

### **2.2.3 Základní vlastnosti a terminologie kmitání**

Při seizmickém zatížení dochází ke kmitání konstrukce. Kmitající hmotný bod (těleso) vykoná jeden kmit, pokud projde celou dráhu a vrátí se do své původní polohy. U obecného kmitavého děje lze za jeden kmit považovat návrat do původního stavu systému [5]. V následujících kapitolách se bude vyskytovat terminologie z oblasti kmitání, a proto uvedeme a vysvětlíme základní pojmy.

- **Kmitání** – pohyb, při němž nabývá určující veličina střídavě hodnot větších a menších, než je rovnovážná hodnota sledované veličiny.
- **Volné kmitání** – kmitání, které koná těleso v případě nulové tlumící síly a bez působení vnějších sil, časový průběh vlastních kmitů je závislý pouze na vlastnostech tělesa, tedy jeho hmotnosti a charakteru vazební síly, která nutí těleso konat kmitavý pohyb [6].
- **Vlastní kmitání** – pohyb, při kterém soustava kmitá v některém z vlastních tvarů kmitání.
- **Vynucené kmitání** – na soustavu působí vnější síly proměnné v čase a místě, na jejichž vlastnostech a vlastnostech tělesa je závislý časový průběh.
- **Kruhová frekvence** – úhlová rychlost příslušného pohybu po kružnici s poloměrem rovným amplitudě.
- **Vlastní tvar** – tvar kmitání, při kterém systém klade nejmenší odpor vůči deformaci (amplitudě kmitání).
- **Vlastní frekvence** – počet kmitů za jednotku času.
- **Vlastní perioda** – nejkratší doba potřebná k vykonání jednoho kmitu.
- **Amplituda** – největší velikost okamžité výchylky.

### 3 Postup výpočtu

V této kapitole bude popsán výpočet seizmického účinku na konstrukci. Postup je převzat z ČSN EN 1998-1, Eurokód 8: Navrhování konstrukcí odolných proti zemětřesení [7].

Pro výpočet náhradních vodorovných sil působících na konstrukci je nutné uvažovat hmotu od vlastní tíhy a od proměnného zatížení konstrukce v kombinaci pro seizmické zatížení.

Velikost působící hmoty ovlivňuje kmitání konstrukce, tedy vlastní tvary a frekvence.

#### 3.1 Rozdělení hmot

Pro vyjádření seizmického účinku na konstrukci vycházíme z působící hmoty v těchto zatěžovacích stavech.

- Stálé zatížení  $G_k$  – vlastní tíhou, dle zvolených rozměrů a objemové hmotnosti materiálu.
- Proměnné zatížení  $Q_k$  – uvažováno dle ČSN EN 1991-1-1 Eurokód 1: Zatížení konstrukcí.

Setrvačné účinky působící hmoty návrhového seizmického zatížení je třeba počítat s ohledem na přítomnost hmot působících současně s tíhou.

$$\sum G_{k,j} + \sum \psi_{E,j} \times Q_{k,j} \quad (3.1)$$

$\psi_{E,i}$  součinitel kombinace pro  $i$ -té proměnné zatížení

$$\psi_{E,i} = \varphi \times \psi_{2,i} \quad (3.2)$$

Součinitel kombinace  $\psi_{E,i}$  zohledňující pravděpodobnost, že se zatížení  $Q_{k,j}$  nevykazuje během zemětřesení současně na celé konstrukci.

Hodnoty  $\psi_{2,i}$  jsou uvedeny v EN 1990:2000 a hodnoty  $\psi_{E,i}$  pro stavby a další typy konstrukcí jsou uvedeny v příslušných částech EN 1998.

Druh proměnného zatížení	Podlaží	$\varphi$
Kategorie A – C*	Střecha	1,0
	Podlaží se vzájemně závislým užitným zatížením	0,8
	Podlaží se vzájemně nezávislým užitným zatížením	0,5
Kategorie D – F* a archivy		1,0

\* Kategorie jsou definovány v EN 1991-1-1:2002

Tab. 3 Hodnoty  $\varphi$  pro výpočet  $\psi_{E,i}$

### 3.2 Seizmické zatížení

Seizmické zatížení představuje buzení vynucené pohybem (kinematické buzení), vnášené do konstrukce z podlaží přes její základy [7].

Pohyb při zemětřesení v daném místě na povrchu je popsán spektrem pružné odezvy na zrychlení podlaží [7].

Pro zjištění seizmického zatížení je nutné rozdělit území státu na seizmické oblasti podle stupně ohrožení. Mapa seizmických oblastí je rozlišena dle velikosti špičkového referenčního zrychlení  $a_{gr}$  pro podlaží typu A (Obr. 1).

Referenční špičkové zrychlení podlaží odpovídá referenční době návratu  $T_{NCR}$  seizmického zatížení příslušného požadavku vyloučení zřícení. Této referenční době návratu je přiřazen součinitel významu  $\gamma_1$  [7].



Obr. 1 Mapa seizmických oblastí České republiky

### Návrhové spektrum pružné odezvy

Návrhové spektrum pružné odezvy je redukováno zavedením součinitele duktility  $q$ , díky němu nemusíme provádět nelineární výpočet konstrukce, zohledňující disipační schopnost konstrukce.

Součinitel duktility představuje přibližně poměr seizmických sil, kterým by konstrukce musela odolávat ve stavu dokonale pružném při útlumu 5%, k seizmickým silám, které lze použít na konvenčním pružném modelu a při nichž konstrukce bezpečně vyhoví [7].

Spektrum odezvy je definováno zvlášť pro vodorovný a svislý směr buzení. Zpravidla se používá vodorovné buzení, protože svislé buzení bývá menší a konstrukce ve svislém směru je odolnější [2].

Návrhové spektrum pro vodorovné seizmické zatížení  $S_d(T)$  :

$$0 \leq T \leq T_B: \quad S_d(t) = a_g S \left[ \frac{2}{3} + \frac{T}{T_B} \left( \frac{2,5}{q} - \frac{2}{3} \right) \right] \quad (3.3)$$

$$T_B \leq T \leq T_C: \quad S_d(t) = a_g S \frac{2,5}{q} \quad (3.4)$$

$$T_C \leq T \leq T_D: \quad S_d(t) = \begin{cases} = a_g S \frac{2,5}{q} \left[ \frac{T_C}{T} \right] \\ \geq \beta a_g \end{cases} \quad (3.5)$$

$$T_D \geq T: \quad S_d(t) = \begin{cases} = a_g S \frac{2,5}{q} \left[ \frac{T_C T_D}{T^2} \right] \\ \geq \beta a_g \end{cases} \quad (3.6)$$

kde  $a_g$  návrhové zrychlení podloží typu A

$S$  součinitel podloží

$T_B$  nejmenší perioda kmitů, které přísluší konstantní hodnota pružného zrychlení

$T_C$  největší perioda kmitů, které přísluší konstantní hodnota spektra pružného zrychlení

$T_D$  doba kmitu, při níž začíná obor konstantní hodnoty spektra pružného posunu

$q$  součinitel duktility

$\beta$  spodní mez součinitele pro vodorovné návrhové spektrum, doporučená hodnota 0,2

### Součinitel duktility pro vodorovné seizmické zatížení

Pro respektování kapacity rozptylu energie je nutné uvažovat horní mez součinitele duktility stanoven dle následujícího vztahu:

$$q = q_o k_w \geq 1,5 \quad (3.7)$$

kde  $q_o$  je základní hodnota součinitele duktility, závislá na typu nosného systému a pravidelnosti po výšce

$k_w$  součinitel vyjadřující převládající tvar poruchy v systému se stěnami

### 3.3 Metoda výpočtu pomocí příčných sil

Eurokód 8 umožňuje nahrazení dynamického účinku obvyklým statickým řešením. Je nutné zjistit pohyb konstrukce a její zrychlení, které po vynásobení hmotností příslušné části konstrukce dá setrvačnou sílu působící na konstrukci [2].

Tento typ výpočtu může být zvolen pouze u pozemních staveb, jejichž odezva není v hlavních směrech výrazně ovlivněna tvary kmitání vyššími než základními. Tento požadavek se považuje za splněný, pokud základní periody vlastních kmitů  $T_1$  ve dvou směrech jsou menší než:

$$T_1 \leq \left[ \begin{array}{l} 4T_C \\ 2,0s \end{array} \right]$$

#### Smyková síla v základu

Seizmická smyková síla  $F_b$  v základu se určí pro každý vodorovný směr.

$$F_b = S_d(T_1) m \lambda \quad (3.8)$$

kde  $S_d(T_1)$  je pořadnice návrhového spektra při periodě kmitu  $T_1$

$T_1$  základní perioda vlastních kmitů vodorovného pohybu stavby v uvažovaném směru

$m$  celková hmotnost stavby nad základovou spárou nebo nad vrchem tuhého základu

$\lambda$  opravný součinitel, hodnota  $\lambda = 0,85$ , když  $T_1 \leq 2T_C$  a když má stavba více než 2 podlaží, jinak  $\lambda = 1,0$

**Stanovení základní periody vlastních kmitů  $T_1$** 

Základní periody vlastních kmitů  $T_1$  lze získat výpočtovým softwarem nebo některou z metod stavební dynamiky.

Pro stavby do 40m výšky může být tato hodnota přibližně stanovena podle následujícího výrazu:

$$T_1 = C_t H^{3/4} \quad (3.9)$$

kde  $C_t$  je 0,085 pro prostorové ocelové rámy odolávající momentům,  
0,075 pro prostorové betonové rámy a pro ocelové rámy s excentrickým vyztužením a 0,05 pro ostatní konstrukce

$H$  výška stavby v metrech od základové spáry nebo vrchu tuhého základu

Alternativní vyjádření hodnoty  $C_t$  pro konstrukce s betonovými nebo zděnými smykovými stěnami ve výrazu (3.9) je:

$$C_t = 0,075/\sqrt{A_c} \quad (3.10)$$

$$A_c = \sum [A_i (0,2 + (l_{wi}/H))^2] \quad (3.11)$$

kde  $A_c$  je celková efektivní plocha smykových stěn v prvním podlaží v  $m^2$

$A_i$  efektivní průřezová plocha  $i$ -té smykové stěny v  $m^2$  ve směru uvažované prvním podlaží

$l_{wi}$  délka  $i$ -té smykové stěny v prvním podlažní ve směru rovnoběžném s působícími silami v metrech, s omezením, že poměr  $l_{wi}/H$  nemá překročit 0,9

Alternativně je možno vyjádřit  $T_1$  (v sekundách) podle následujícího výrazu:

$$T_1 = 2\sqrt{d} \quad (3.12)$$

kde  $d$  je příčný pružný posun vrcholu stavby v metrech vlivem zatížení vlastní tíhou, působící ve vodorovném směru



### Rozdělení vodorovných seizmických sil

Základní tvar kmitání uvažujeme přibližně jako lineární.

Účinky seizmického zatížení musí být stanoveny na dvou rovinných modelech, zatížených vodorovnými silami  $F_i$  ve všech podlažích

$$F_i = F_b \frac{s_i m_i}{\sum_j s_j m_j} \quad (3.13)$$

kde  $F_b$       seizmická smyková síla v základu

$s_i, s_j$     posuny hmot  $m_i, m_j$  v základním tvaru

$m_i, m_j$    hmotnosti podlaží stanovené dle kombinace (3.1)

### Účinky krutu

K vystižení nepřesností polohy hmot a prostorových seizmických pohybů musí být počítáno s vyosením hmotového těžiště každého podlaží z nominální polohy v každém směru o náhodou excentricitu

$$e_{ai} = \pm 0,05 L_i \quad (3.14)$$

kde  $L_i$  je    rozměr podlaží kolmý ke směru seizmického zatížení

$e_{ai}$       náhodná excentricita hmoty i-tého podlaží

Při použití prostorového modelu jsou náhodné účinky krutu stanoveny jako obálka účinků od statických zatížení

$$M_{ai} = e_{ai} F_i \quad (3.15)$$

kde  $e_{ai}$  dle rovnice (3.14)

$F_i$     vodorovná síla působící na i-té podlaží

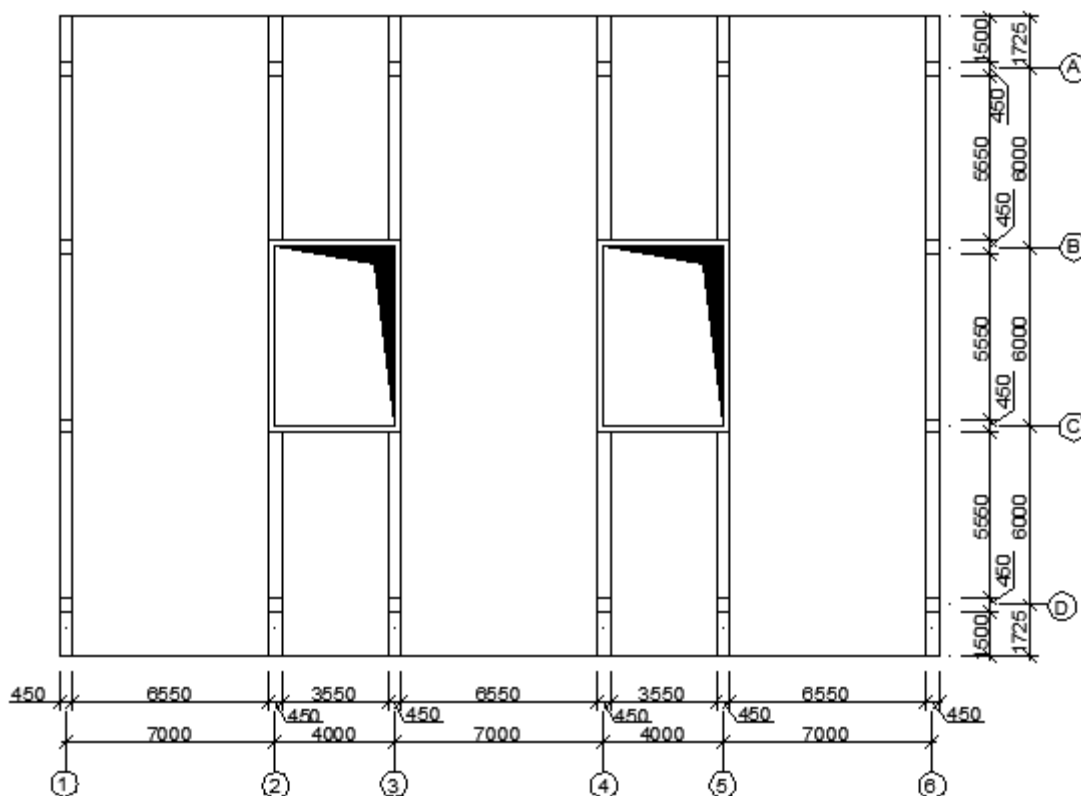
## 4 Modelování konstrukce v programu RFEM

### 4.1 Popis konstrukce

Pro posouzení jsme si zvolili betonovou skeletovou stavbu, která má jako hlavní nosné prvky železobetonové sloupy. Jedná se o výškovou budovu, jejíž odezva není v obou hlavních směrech výrazně ovlivněna tvary kmitání vyššími než základními a tímto splňuje podmínku pro metodu výpočtu pomocí příčných sil uvedenou v Eurokódu 8.

Nosné prvky jsou orientované příčně a podélnou tuhost stavby zajišťují ztužující stěnová jádra. Zatížení je zde přenášeno ze stropní konstrukce do průvlatku, přes sloupy až do základů.

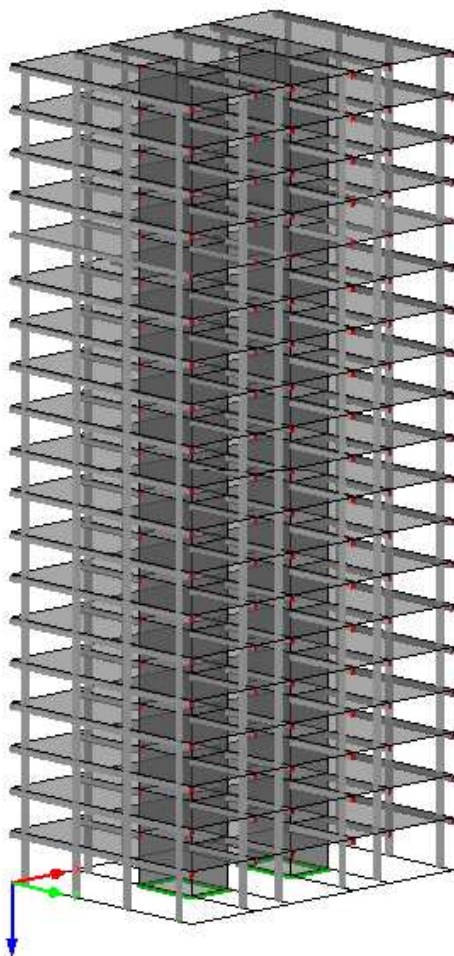
Půdorysné rozměry stavby jsou 21x29m s celkovou výškou 67,3m, konstrukční výška jednotlivých pater je 3,5m.



Obr. 2 Půdorysné schéma

## 4.2 Prostorový model v 3D

Pro vytvoření 3D modelu bylo nejdříve nutné se seznámit s uživatelským prostředím programu RFEM, jako učební pomůcka mi sloužili internetové stránky firmy Ing. Software Dlubal a jejich názorná videa.



Materiálové charakteristiky:

Beton C50/60

$E=37\,000\text{MPa}$

$G=15\,500\text{MPa}$

$\nu=0,200$

$\gamma=25\text{ kN/m}^2$

Průřezové charakteristiky:

Sloup:  $0,45 \times 0,45\text{m}$

Průvlak:  $0,45 \times 0,45\text{m}$

Deska:  $0,2 \times 29 \times 21\text{m}$

Jádro: tl.  $0,25\text{m}$

Obr. 3 Model posuzované konstrukce v 3D

Uvažujeme dokonale tuhé spojení sloupu se základovou konstrukcí, proto jsme za okrajové podmínky zvolili vetknutí.

Veškeré prvky jsou spojeny přes linie nebo uzly. Sloupy jsou modelovány jako prutové prvky, desky a stěny jako plocha konstantního průřezu a průvlaky jako žebra se spolupůsobící šířkou desky.

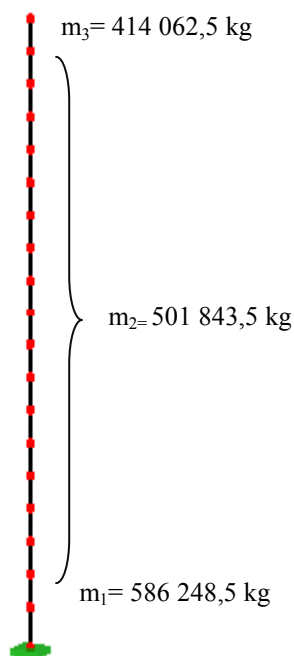
Ze zadaných materiálových a průřezových charakteristik je vlastní tíha a tedy i vlastní hmota konstrukce automaticky vypočtena programem RFEM. Spolupůsobící hmota z proměnného zatížení uvažována  $2\text{kN/m}^2$  byla zohledněna v jako přídavná hmota na plochu.

### 4.3 Prutový model v 1D

Stavby odpovídající kritériu pravidelnosti v půdorysu můžeme navrhovat jako rovinné modely s použitím zjednodušené metody výpočtu pomocí spektra odezvy (metoda příčných sil).

Model musí dostatečně zohledňovat rozdělení hmot a tuhosti konstrukce, aby všechny důležité tvary kmitání a setrvačné síly byly správně uvažovány při seizmickém zatížení [7].

Skutečnou konstrukci nahradíme svislou konzolou v patě vetknutou do základů. Na Obr. 4 vidíme rozdělení prutového modelu na uzly, ve kterých je soustředěna hmota z jednotlivých pater dle zmíněné kombinace (3.1)



Obr. 4 Znáornění nahrazení tíhy jednotlivých pater na uzly prutového modelu

Výpočet hmot od vlastní tíhy udává Tab. 4 a celkovou hmotu stavby nad základovou spárou včetně hmoty z proměnného zatížení dle kombinace (3.1) udává Tab. 5.

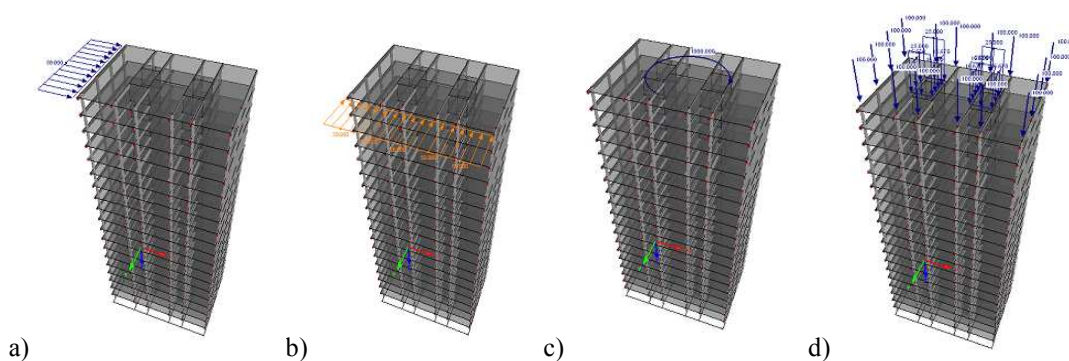
Patro	Zatížení vlastní tíhou				$\Sigma G_{k,i}$
	Deska [kg]	Sloupy [kg]	Průvlaky [kg]	Jádro [kg]	
první patro	280500	49005	51637,5	151250	532392,5
průběžná patra	280500	28350	51637,5	87500	447987,5
poslední patro	304500	14175	51637,5	43750	414062,5

Tab. 4 Stálá zatížení na jednotlivá patra

Patro	$\Sigma G_{k,i}$	$\varphi$	$\psi_{2,i}$	$\Sigma \psi_{E,j}$	$Q_{k,j}$ [kg/m <sup>2</sup> ]	Celková hmota pater dle (3.1)
první patro [m <sub>1</sub> ]	532392,5	0,8	0,6	0,48	200	586248,5
průběžná patra [m <sub>2</sub> ]	447987,5	0,8	0,6	0,48	200	501843,5
poslední patro [m <sub>3</sub> ]	414062,5	1	0	0	200	414062,5

Tab. 5 Výsledné návrhové zatížení dle kombinace (3.1)

Důležité je stanovit pro prutový model takové průřezové charakteristiky, aby tuhost modelu odpovídala tuhosti skutečné konstrukce. Pro výpočet těchto charakteristik jsem si zvolila jednotková zatížení působící na model 3D a z výsledných deformací zjistila momenty setrvačnosti ve všech směrech a nutnou plochu průřezu.



Obr. 5 Model pro výpočet a) momentu setrvačnosti v ose x b) momentu setrvačnosti v ose y c) kroučícího momentu setrvačnosti d) pro plochu průřezu

Výpočet charakteristik fiktivního průřezu:

$$\begin{aligned} \text{a) } u_x = 0,0553\text{m}; \quad u_x &= \frac{F_x L^3}{3E I_x} \\ I_x &= \frac{F_x L^3}{3E u_x} = \frac{1050 \times 67,3^3}{3 \times 37 \times 10^6 \times 0,0553} = 52,14\text{m}^4 \\ \text{b) } u_y = 0,0423\text{m}; \quad u_y &= \frac{F_y L^3}{3E I_y} \\ I_y &= \frac{F_y L^3}{3E u_y} = \frac{1450 \times 67,3^3}{3 \times 37 \times 10^6 \times 0,0423} = 94,13\text{m}^4 \\ \text{c) } \varphi_z = 1,02 \times 10^{-4} \text{ rad}; \quad \varphi_z &= \frac{M_z L}{G I_t} \\ I_t &= \frac{M_z L}{G \varphi_z} = \frac{100 \times 67,3}{15,5 \times 1,02 \times 10^{-4}} = 4,34\text{m}^4 \\ \text{d) } u_z = 0,0166\text{m}; \quad u_z &= \frac{N L}{E A} \\ A &= \frac{N L}{E u_z} = \frac{240 \times 67,3}{37 \times 10^6 \times 0,0166} = 0,0262\text{m}^2 \end{aligned}$$

#### 4.4 Výpočet vlastních frekvencí a vlastních tvarů

Dle [7] lze ke stanovení základní periody vlastních kmitů  $T_1$  užít některé z metod stavební dynamiky nebo pro stavby do 40m výšky přibližně stanovit hodnotu  $T_1$  dle již uvedeného výrazu (3.9) alternativně (3.12).

V našem případě má budova výšku větší než 40m (viz. 4.1) a výpočet vlastních tvarů pro modely 1D i 3D byl proveden v programu RFEM a jeho přídatným modulem RF-DYNAM Basic.

U prostorového modelu jsme na základě údajů o plochách a prutech zadané v hlavním programu RFEM nechali kmitat vlastní tíhu konstrukce se součinitelem 1,0 a u prutového modelu jsme zohlednili působící hmotu jako přídatné hmoty v uzlech. Účinek hmot v obou případech uvažujeme ve směrech  $x$ ,  $y$ ,  $z$ .

Výsledné hodnoty pro jednotlivé modely jsou uvedeny v následujících tabulkách.

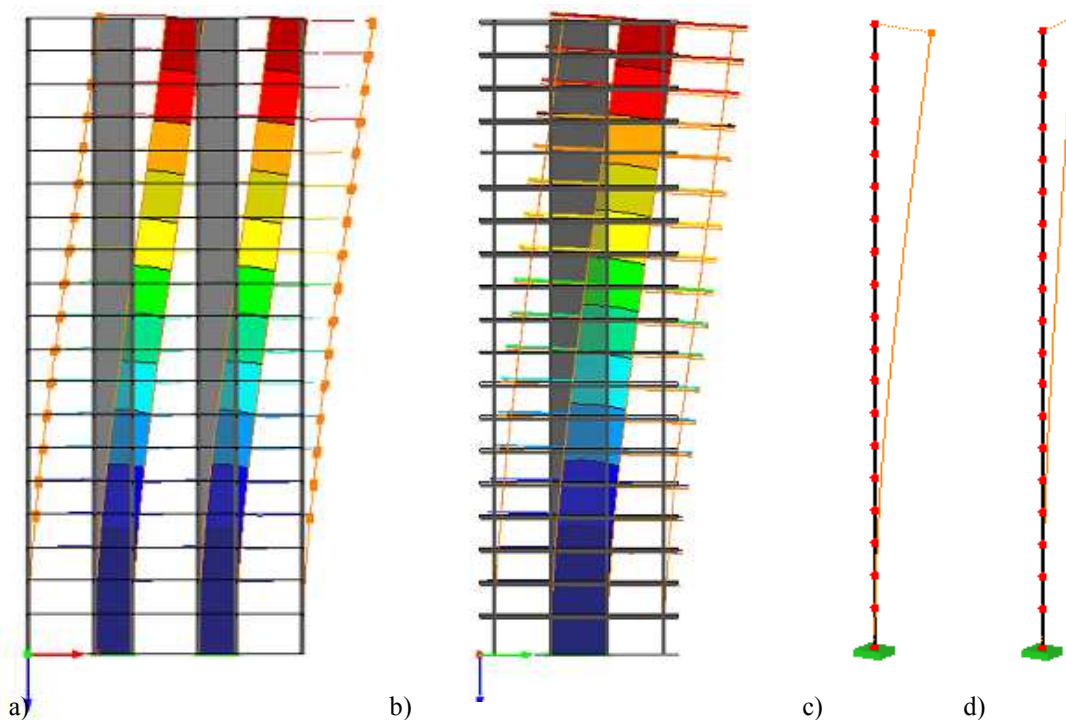
Vl. tvar	Vlastní číslo	Kruhává frekvence	Vlastní frekvence	Vlastní perioda
č.	$\lambda$ [ $1/s^2$ ]	$\omega$ [rad/s]	f [Hz]	T [s]
1	9,934	3,152	0,502	1,994
2	19,150	4,376	0,696	1,436

Tab. 6 Hodnoty pro prostorový model 3D

Vl. tvar	Vlastní číslo	Kruhává frekvence	Vlastní frekvence	Vlastní perioda
č.	$\lambda$ [ $1/s^2$ ]	$\omega$ [rad/s]	f [Hz]	T [s]
1	10,243	3,200	0,509	1,963
2	19,349	4,399	0,700	1,428

Tab. 7 Hodnoty pro prutový model 1D

Nejvíce konstrukci ovlivňují první dva vlastní tvary kmitání. Nejprve dojde k vychýlení na měkkí osu konstrukce. V našem případě celková tuhost konstrukce závisí na ztužujícím jádru, první tvar se tedy vychýlí na měkkí osu ztužujícího jádra. Druhý tvar je kolmý na tvar první. Znázornění vlastních tvarů udává Obr. 6.



Óbr. 6 Grafické znázornění a) 1. vlastního tvaru, prostorový model,  $T_1 = 1,994s$  b) 2. vlastního tvaru, prostorový model,  $T_2 = 1,436s$  c) 1. vlastního tvaru, prutový model,  $T_1 = 1,963s$  d) 2. vlastního tvaru, prutový model,  $T_2 = 1,428s$

## 5 Ruční výpočet

Ruční výpočet je proveden na prutovém modelu 1D, dle metody příčných sil

### 5.1 Zatížení seizmické

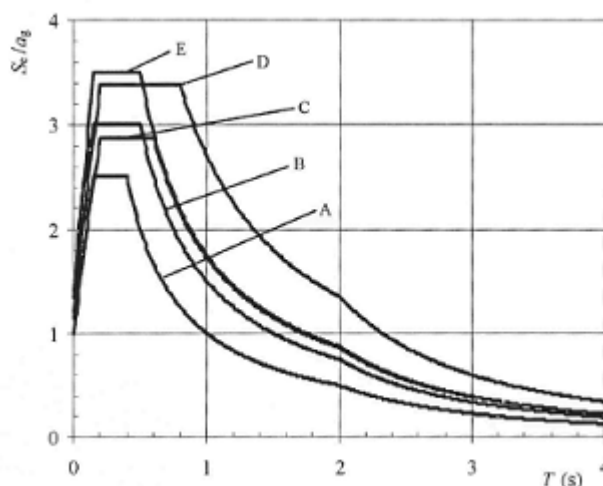
#### Návrhové spektrum pro vodorovné seizmické zatížení $S_d(T)$

Pro výpočet návrhového spektra je nutné určit počáteční parametry, jako je typ spektra a základové půdy a pro ně odpovídající hodnoty parametrů (Obr. 7).

Uvažujeme spektrum odezvy typu 1 a druh základové půdy C, což jsou mocné sedimenty středně ulehlého nebo ulehlého písku, štěrk nebo tuhý jíl v tloušťce od několika desítek do stovek metrů [7].

Typ základové půdy	S	$T_B$ [s]	$T_C$ [s]	$T_D$ [s]
A	1,0	0,15	0,4	2,0
B	1,2	0,15	0,5	2,0
C	1,15	0,20	0,6	2,0
D	1,35	0,20	0,8	2,0
E	1,4	0,15	0,5	2,0

Obr. 7 Hodnoty parametrů popisující spektrum pružné odezvy typu 1



Obr. 8 Doporučené spektrum pružné odezvy typu 1 pro základové půdy A-E



Součinitel ductility  $q$  pro vodorovné seizmické zatížení zjistíme vynásobením základní hodnoty součinitele ductility  $q_0$  z hodnot v Tab. 8 a součinitele  $k_w$  vyjadřující převládající tvar poruchy v systému se stěnami, který pro rámy a rámové náhrady duálních systémů nabývají hodnoty 1,0.

Hodnota součinitele ductility je určena typem nosné konstrukce, ductilitou budovy, pravidelností nárysu budovy a typem porušení výztužných prvků.

$$\begin{aligned} q &= q_0 k_w \geq 1,5 \\ &= 3,0 \alpha_u / \alpha_1 \times 1,0 \geq 1,5 \\ &= 3,0 \times 1,3 \times 1,0 \\ &= \mathbf{3,9} \end{aligned}$$

Pokud poměr  $\alpha_u / \alpha_1$  není odvozen pomocí zvláštního výpočtu, mohou se pro stavby pravidelné v půdorysu použít přibližné hodnoty, a to pro vícepodlažní rámy o více polích  $\alpha_u / \alpha_1 = 1,3$

Typ konstrukce	Třída ductility M	Třída ductility H
Rámový a duální systém, systém sdružených stěn	3,0 $\alpha_u / \alpha_1$	4,5 $\alpha_u / \alpha_1$
Systém nesdružených stěn	3,0	4,0 $\alpha_u / \alpha_1$
Systém poddajný v krutu	2,0	3,0
Systém obráceného kyvadla	1,5	2,0

Tab. 8 Základní hodnoty součinitele ductility  $q_0$  pro systémy pravidelné po výšce

kde  $\alpha_1$  je násobek návrhového vodorovného seizmického zatížení při vzniku prvního plastického kloubu v konstrukci

$\alpha_u$  násobek návrhového vodorovného seizmického zatížení při vzniku celkového plastického mechanismu

Velikost vlastní periody kmitů spadá pod rovnici (3.5). Dosazené hodnoty odpovídají parametrům pro návrhové spektrum typu 1 a druh půdy C. Špičkové referenční zrychlení podloží  $a_{gR}$  uvažujeme dle seizmické mapy ČR v okrese Znojmo  $0,04 \text{ m/s}^2$ . Hodnota návrhového zrychlení  $a_g$  je rovna  $a_{gR}$  vynásobeného součinitelem významu  $\gamma_1$ , který je v našem případě roven 1,0. Pro spodní mez součinitele vodorovné pružné odezvy  $\beta$  jsme ponechali doporučenou hodnotu 0,2.

- 1. tvar

$$T_C \leq T \leq T_D: \quad S_d(T) = \begin{cases} = a_g S \frac{2,5}{q} \left[ \frac{T_C}{T} \right] \\ \geq \beta a_g \end{cases}$$

$$0,8 \leq 1,963 \leq 2,0: \quad S_d(T) = 0,04 \times 1,15 \times \frac{2,5}{3,9} \times \left[ \frac{0,6}{1,963} \right] = \mathbf{0,0901 \text{ m/s}^2}$$

$$\geq 0,2 \times 0,04 = \mathbf{0,008 \text{ m/s}^2}$$

- 2. tvar

$$T_C \leq T \leq T_D: \quad S_d(T) = \begin{cases} = a_g S \frac{2,5}{q} \left[ \frac{T_C}{T} \right] \\ \geq \beta a_g \end{cases}$$

$$0,8 \leq 1,428 \leq 2,0: \quad S_d(T) = 0,04 \times 1,15 \times \frac{2,5}{3,9} \times \left[ \frac{0,6}{1,428} \right] = \mathbf{0,0124 \text{ m/s}^2}$$

$$\geq 0,2 \times 0,04 = \mathbf{0,008 \text{ m/s}^2}$$

## 5.2 Výpočet náhradních příčných sil

Smyková síla v základu  $F_b$

- 1. tvar

$$F_b = S_d(T) m \lambda$$

$$= 0,00901 \times (586248,5 + 17 \times 501843,5 + 414062,5) \times 0,85$$

$$= 72998,14 \text{ N}$$

- **2. tvar**

$$\begin{aligned}
 F_b &= S_d(T)m \lambda \\
 &= 0,0124 \times (586248,5 + 17 \times 501843,5 + 414062,5) \times 0,85 \\
 &= 100379,1N
 \end{aligned}$$

### Rozdělení vodorovných seizmických sil $F_i$

Velikost působících břemen, které nahrazují vodorovný účinek seizmického zatížení, je stanoven ze vztahu (3.12).

Posuny jednotlivých hmot  $s_i, s_j$  jsme získali z výpočtu programem RFEM a hmotnosti pater uvažujeme v základní kombinaci (3.1).

Pro přehlednost jsou náhradní vodorovné síly uspořádány do Tab. 9.

Náhradní břemena $F_i$ [kN]		
Uzel č.	1. vlastní tvar	2. vlastní tvar
797	0,00	0,00
800	0,07	0,10
801	0,21	0,29
802	0,42	0,58
803	0,71	0,97
804	1,05	1,44
805	1,46	2,00
806	1,91	2,62
807	2,40	3,30
808	2,93	4,02
809	3,50	4,81
810	4,10	5,63
811	4,71	6,48
812	5,34	7,35
813	5,99	8,24
814	6,65	9,14
815	7,31	10,05
816	7,99	10,98
817	8,65	11,89
818	7,62	10,48

Tab. 9 Rozdělení vodorovných sil působících na  $i$ -té uzly pro 1. a 2. vlastní tvar

### Účinky krutu

Uvažujeme dle vztahu (3.14), kde jsou účinky krutu vystiženy pomocí náhodné excentricity působící hmoty v každém podlaží o 5% délky podlaží kolmého ke směru seizmického zatížení [7].

U 1. vlastního tvaru působí náhradní břemeno na excentricitě:

$$\pm 0,05 \times 29 = 1,45m$$

U 2. vlastního tvaru působí náhradní břemeno na excentricitě:

$$\pm 0,05 \times 21 = 1,05m$$

Pro přehlednost jsou opět náhradní momenty krutu působící na konstrukci uspořádány do Tab. 10.

Účinky krutu [kNm]		
Uzel č.	1.vlastní tvar	2. vlastní tvar
797	0,000	0,000
800	0,102	0,101
801	0,305	0,303
802	0,609	0,607
803	1,023	1,019
804	1,523	1,517
805	2,111	2,102
806	2,764	2,752
807	3,482	3,467
808	4,244	4,226
809	5,071	5,050
810	5,942	5,916
811	6,834	6,805
812	7,748	7,715
813	8,684	8,647
814	9,642	9,601
815	10,599	10,554
816	11,579	11,529
817	12,536	12,483
818	11,050	11,003

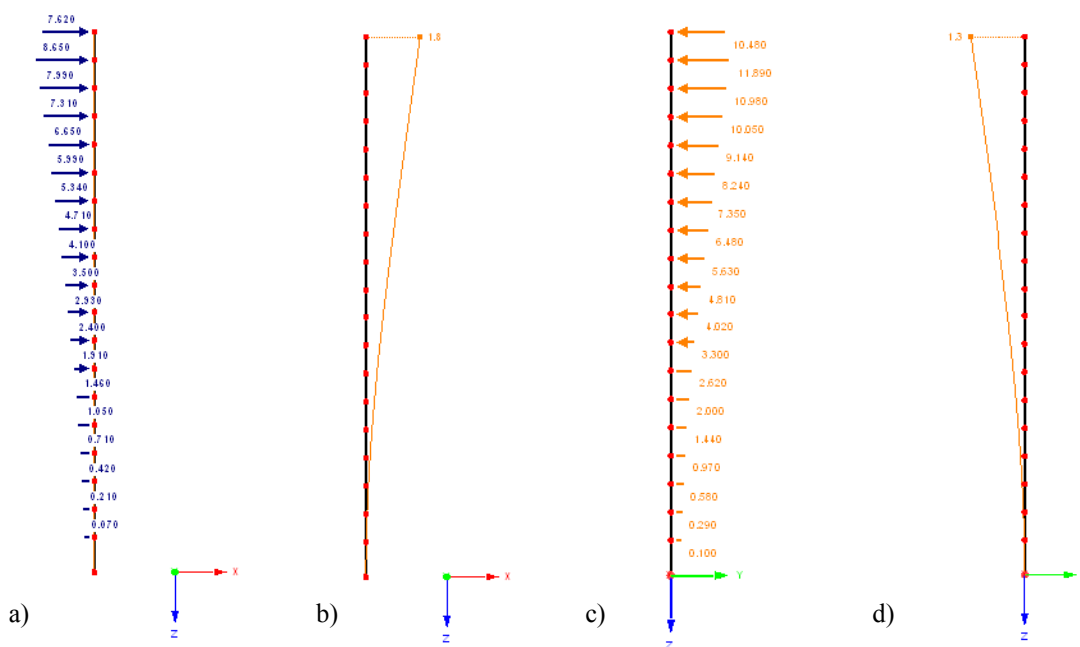
Tab. 10 Rozdělení krouticích momentů působící na i-tý uzel pro 1. a 2. vlastní tvar

### 5.3 Výpočet deformací na prutu z náhradních sil

Pro výpočet deformací byl opět použit výpočetní program RFEM.

Vygenerovanými silami a momenty jsem zatížila jednotlivá patra a lineárním výpočtem získala hledanou deformaci pro první dva vlastní tvary kmitání, tj. posun a pootočení konstrukce.

Maximální posuny jsou znázorněny na Obr. 9. a jednotlivé posuny pro každý uzel jsou uvedeny v Tab. 11. Pootočení konstrukce jsou malá a jejich grafické znázornění není možné, proto v Tab. 11 uvedeme výsledná pootočení v mrad pro každý uzel.



Obr. 9 Zobrazení vodorovných seizmických sil a deformací a) zatížení pro 1. tvar b) deformace pro 1. tvar c) zatížení pro 2. tvar d) deformace pro 2. tvar

Uzel č.	Pootočení $\Psi_z$ [mrad]		Posun $u$ [mm]	
	1. vlastní tvar	2. vlastní tvar	1. vlastní tvar	2. vlastní tvar
797	0	0	0,000	0,000
800	0,003	0,003	0,012	0,009
801	0,006	0,006	0,040	0,029
802	0,009	0,009	0,080	0,060
803	0,012	0,012	0,137	0,100
804	0,014	0,014	0,204	0,149
805	0,017	0,017	0,282	0,206
806	0,019	0,019	0,370	0,269
807	0,022	0,022	0,466	0,339
808	0,024	0,024	0,570	0,415
809	0,027	0,027	0,680	0,495
810	0,029	0,029	0,795	0,579
811	0,031	0,031	0,915	0,666
812	0,033	0,033	1,038	0,755
813	0,034	0,034	1,164	0,847
814	0,036	0,036	1,292	0,940
815	0,037	0,037	1,421	1,030
816	0,038	0,038	1,554	1,128
817	0,038	0,038	1,681	1,223
818	0,039	0,039	1,811	1,318

Tab. 11 Výsledná pootočení jednotlivých uzlů konstrukce

## 6 Výpočet pomocí programu RFEM

Program RFEM nám umožní výpočet seizmického účinku na konstrukce s vlivem více vlastních tvarů.

Pro výpočet pomocí příčných sil je nutné stanovit takový počet vlastních tvarů, aby součet faktorů náhradních hmot ve vodorovném směru byl větší než 90% celkové hmotnosti konstrukce.

Na uvažované modely a způsoby rozložení hmot je proveden výpočet a srovnání v kapitole 7.

### 6.1 Prutový model

Prutový model je stejný jako model pro ruční výpočet, tedy konzola vetknutá do základů (Obr. 4), zatížená v jednotlivých uzlech soustředěnou hmotou, jejichž velikost je uvedena v Tab. 5. Při výpočtu v programu RF-DYNAM zohledníme tuto hmotu v *Přídavných hmotách v uzlech*. Znárodnění zadání hodnot vidíme na Obr. 10.

Č.	Seznam uzlů s hmotou	Hmoty			Momenty hmot			Komentář
		$m_x$ [kg]	$m_y$ [kg]	$m_z$ [kg]	$I_x$ [kg.m <sup>2</sup> ]	$I_y$ [kg.m <sup>2</sup> ]	$I_z$ [kg.m <sup>2</sup> ]	
1	818	414062.50	414062.50	414062.50	0.00	0.00	0.00	
2	801-817	501843.50	501843.50	501843.50	0.00	0.00	0.00	
3	800	586248.50	590856.51	590856.51	0.00	0.00	0.00	
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								
11								
12								
13								
14								
15								
16								
17								
18								
19								
20								
21								
22								
23								
24								
25								

Obr. 10 Zadání přídavných hmot v uzlech

Jakmile máme zadané působící hmoty, můžeme nechat programem vypočítat velikost vlastní frekvence a periody pro zvolený počet vlastních tvarů. Postup zadání hodnot v RFEM je popsán v kapitole 4.4.

V následující tabulce jsou uvedeny výsledné hodnoty prvních a posledních 10 vlastních tvarů.

Vl. tvar č.	Vlastní číslo $\lambda$ [1/s <sup>2</sup> ]	Kruhová frekvence $\omega$ [rad/s]	Vlastní frekvence $f$ [Hz]	Vlastní perioda $T$ [s]
1	10,243	3,200	0,509	1,963
2	19,349	4,399	0,700	1,428
3	401,501	20,037	3,189	0,314
4	758,438	27,540	4,383	0,228
5	1317,819	36,302	5,778	0,173
6	3142,271	56,056	8,922	0,112
7	5935,667	77,043	12,262	0,082
8	11796,390	108,611	17,286	0,058
9	12040,944	109,731	17,464	0,057
10	22744,013	150,811	24,002	0,042
:				
:				
40	1196926,813	1094,042	174,122	0,006
41	1332635,747	1154,398	183,728	0,005
42	1769530,419	1330,237	211,714	0,005
43	1828037,848	1352,049	215,185	0,005
44	2424186,476	1556,980	247,801	0,004
45	2515049,116	1585,891	252,402	0,004
46	3106547,265	1762,540	280,517	0,004
47	3450355,902	1857,513	295,632	0,003
48	3838684,460	1959,256	311,825	0,003
49	4557535,681	2134,839	339,770	0,003
50	4576223,298	2139,211	340,466	0,003

Tab. 12 Vypočítané hodnoty pro 50 vlastních tvarů pomocí programu RFEM

Eurokódem 8 zadaná podmínka pro minimum kmitající hmoty je, pro námi zvolených 50 vlastních tvarů, splněna. Celkový počet kmitající hmoty udává Tab. 13.



Vl. tvar	Faktor náhradních hmot		
	$f_{mex}$ [-]	$f_{mey}$ [-]	$f_{mez}$ [-]
1	0,631	0,000	0,000
2	0,000	0,631	0,000
3	0,194	0,000	0,000
4	0,000	0,194	0,000
5	0,000	0,000	0,834
:			
:			
48	0,000	0,000	0,000
49	0,000	0,000	0,000
50	0,000	0,001	0,000
<b>Celkem</b>	<b>1,000</b>	<b>0,999</b>	<b>1,000</b>

Tab. 13 Faktory náhradních hmot

### Náhradní břemena

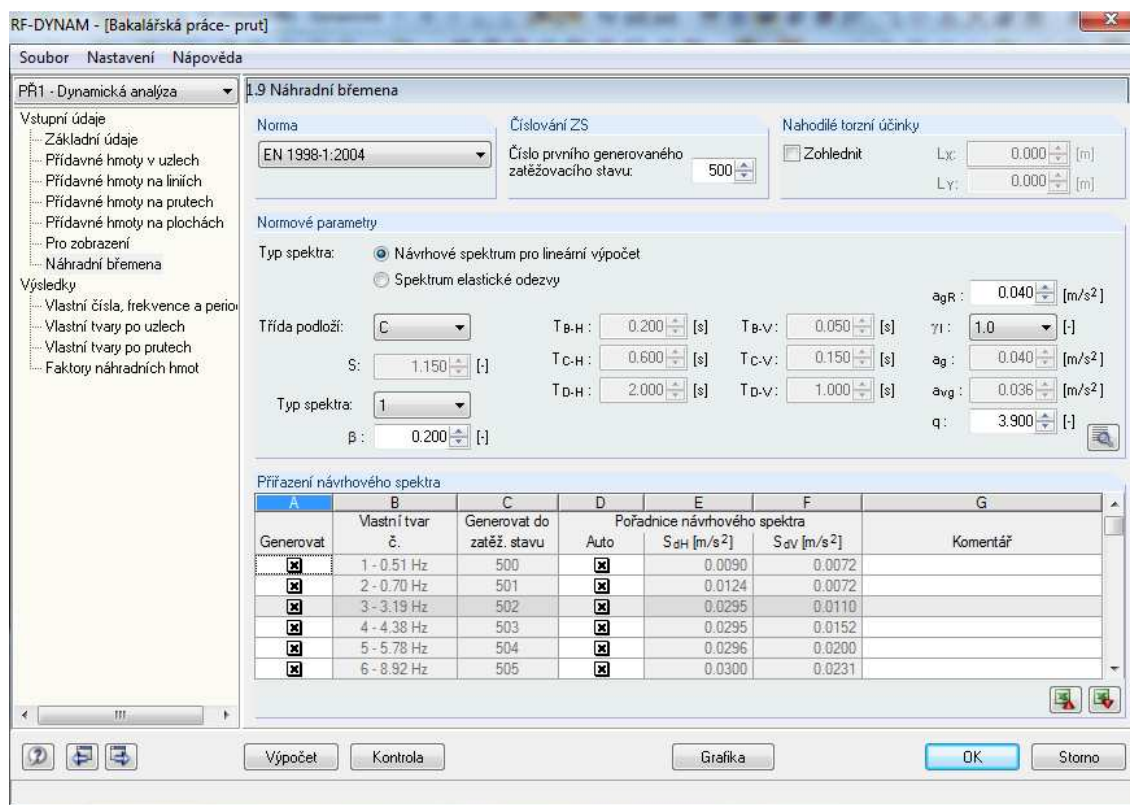
Pro výpočet náhradních břemen je nutné v základních údajích označit dialog *Náhradní břemena* a upravit vstupní údaje.

V závislosti na výběru ze seznamu *Norma* se mění ostatní parametry popisující seizmické zatížení.

Pro vygenerování náhradního zatížení dle EN 1998-1-2004 jsme zvolili stejné počáteční podmínky jako u ručního výpočtu, protože počítáme se stále stejným seizmickým účinkem.

Zvolili jsme návrhové spektrum pro lineární výpočet, typ spektra 1, třídu podloží C a k tomuto zadání byly automaticky převzaty příslušné hodnoty parametrů v souladu se zvolenou normou popisující dané spektrum (Obr. 11).

U spodní meze součinitele vodorovné pružné odezvy  $\beta$  jsme ponechali doporučenou hodnotu 0,2. Špičkové referenční zrychlení podloží  $a_{gR}$  odpovídá seizmické mapě ČR a v okrese Znojmo uvažujeme velikost 0,04. Výškové budovy se v závislosti na jejich významu pro ochranu veřejnosti dělí do 4 kategorií. Běžné stavby, jako jsou bytové domy, spadají do druhé kategorie a pro ně odpovídající hodnota součinitele významu  $\gamma$  je 1,0. Součinitel duktility  $q$ , vypočítaný dle (3.7) nabývá hodnoty 3,9.



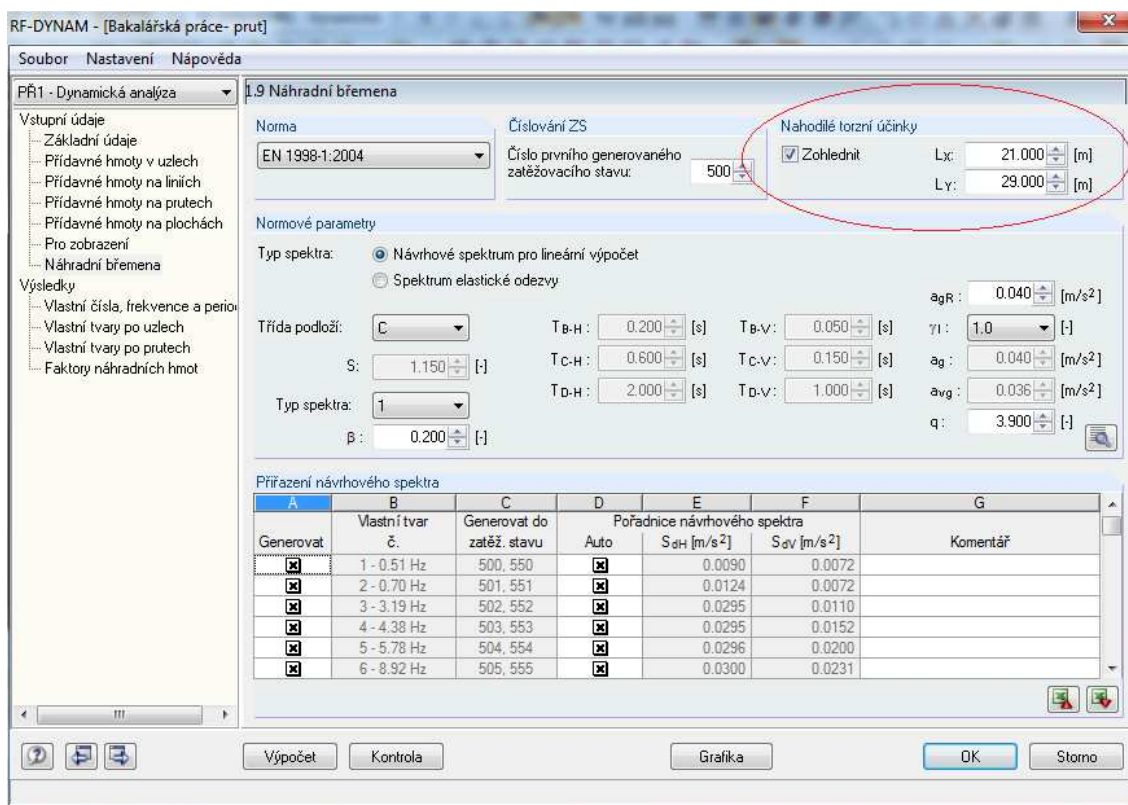
Obr. 11 Zadání pro generování náhradních břemen

Vygenerovaná náhradní břemena exportujeme zpět do hlavního programu RFEM, kde vytvoříme pro jednotlivé vlastní tvary zatěžovací stavy a kvadratickou kombinaci SRSS těchto zatěžovacích stavů.

### Torzní účinky

U modelu je možné stanovit torzní účinky pomocí momentů  $M_i$  působících kolem svislé osy v každém patře konstrukce.

Zohlednění provedeme v souladu s Eurokódem 8 potvrzením příslušné nabídky v hlavním dialogovém okně znázorněné na Obr. 12. Délky  $L_x$  a  $L_y$  odpovídají rozměrům  $L_i$ , což jsou půdorysné rozměry kolmé k seizmickému zatížení. Krouticí moment  $M_i$  je určený jako příslušné náhradní břemeno vynásobené ramenem o délce  $\pm 0,05L_i$ . V závěru modul zobrazí vypočtené momenty kolem vertikální osy, které při exportu do zatěžovacích stavů uvažujeme v kladném i záporném směru [8].



Obr. 12 Zadání pro nahodilé torzní účinky

Pro srovnání změny deformací v následující kapitole bude proveden jak výpočet bez torzních účinků a s torzními účinky.

## 6.2 Prostorový model

Prostorový model budeme počítat s rovnoměrným rozložením působící hmoty, kde torze bude zohledněna dle Eurokódu 8 a pro vlastní nerovnoměrné rozložení hmoty, u kterého předpokládáme vyvození největších deformací.

Oba tyto případy mají stejné počáteční parametry vyjadřující seizmický účinek jako prutový 1D model a výsledné hodnoty získané těmito postupy budou zpracovány a porovnány v kapitole 7.

### 6.2.1 Rovnoměrné rozdělení hmot

Hmota z vlastní tíhy konstrukce a z proměnného zatížení je rovnoměrně rozložena na každém patře konstrukce.

Pro takto rozloženou hmotu spočítáme programem vlastní frekvence a periody. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v Tab. 14.

Vl. tvar č.	Vlastní číslo	Kruhová frekvence	Vlastní frekvence	Vlastní perioda
	$\lambda$ [1/s <sup>2</sup> ]	$\omega$ [rad/s]	f [Hz]	T [s]
1	9,934	3,152	0,502	1,994
2	19,150	4,376	0,696	1,436
3	41,016	6,404	1,019	0,981
4	175,878	13,262	2,111	0,474
5	345,263	18,581	2,957	0,338
6	399,510	19,988	3,181	0,314
7	962,044	31,017	4,936	0,203
8	1126,217	33,559	5,341	0,187
9	1172,091	34,236	5,449	0,184
10	1282,982	35,819	5,701	0,175
:				
:				
40	5712,607	75,582	12,029	0,083
41	5756,447	75,871	12,075	0,083
42	5774,386	75,989	12,094	0,083
43	5848,653	76,476	12,172	0,082
44	5855,095	76,519	12,178	0,082
45	5862,859	76,569	12,186	0,082
46	5865,079	76,584	12,189	0,082
47	5924,135	76,968	12,250	0,082
48	5953,064	77,156	12,280	0,081
49	5955,657	77,173	12,282	0,081
50	5975,069	77,299	12,302	0,081

Tab. 14 Vypočítané hodnoty pro 50 vlastních tvarů pomocí programu RFEM

Množství kmitající hmoty pro rovnoměrné rozdělení hmoty je uvedeno v následující Tab. 15. Z hodnot vyplývá, že podmínka daná Eurokódem 8 je splněna.

VI. tvar č.	Faktor náhradních hmot		
	$f_{mex}$ [-]	$f_{mey}$ [-]	$f_{mez}$ [-]
1	0,680	0,000	0,000
2	0,000	0,668	0,000
3	0,000	0,000	0,000
4	0,168	0,000	0,000
5	0,000	0,185	0,000
:			
:			
48	0,000	0,000	0,000
49	0,000	0,000	0,000
50	0,001	0,000	0,000
Celkem	0,959	0,950	0,894

Tab. 15 Faktory náhradních hmot

### Náhradní břemena

Pro výpočet náhradních břemen je nutné opět v základních údajích označit dialogové okno *Náhradní břemena*. Vstupní parametry pro zadání seizmického zatížení jsou identické jako u výpočtu náhradních břemen na prutovém modelu. Program RF-DYNAM automaticky vygeneruje odpovídající síly a můžeme provést export do hlavního programu s vytvořením příslušných zatěžovacích stavů a kvadratických kombinací SRSS všech zatěžovacích stavů.

### Torzni účinky

Nepřesnost polohy hmot při zemětřesení zohledníme výpočtem uvedeným v Eurokódu 8, a to označením dialogového okna *Zohlednit náhodné torzní účinky*. Hodnoty  $L_x$  a  $L_y$  jsou shodné jako u prutového modelu. Program vygeneruje přídatné momenty  $M_i$ , kterými bude konstrukce zatížena.

### 6.2.2 Vlastní nerovnoměrné rozdělení hmoty

V předchozím případě byly nepřesnosti rozdělení hmot vystiženy vyosením hmotového těžiště každého podlaží o náhodnou excentricitu [7]. V Eurokódu 8 uvažují pohyb 5% hmoty v ose x a 5% hmoty v ose y.

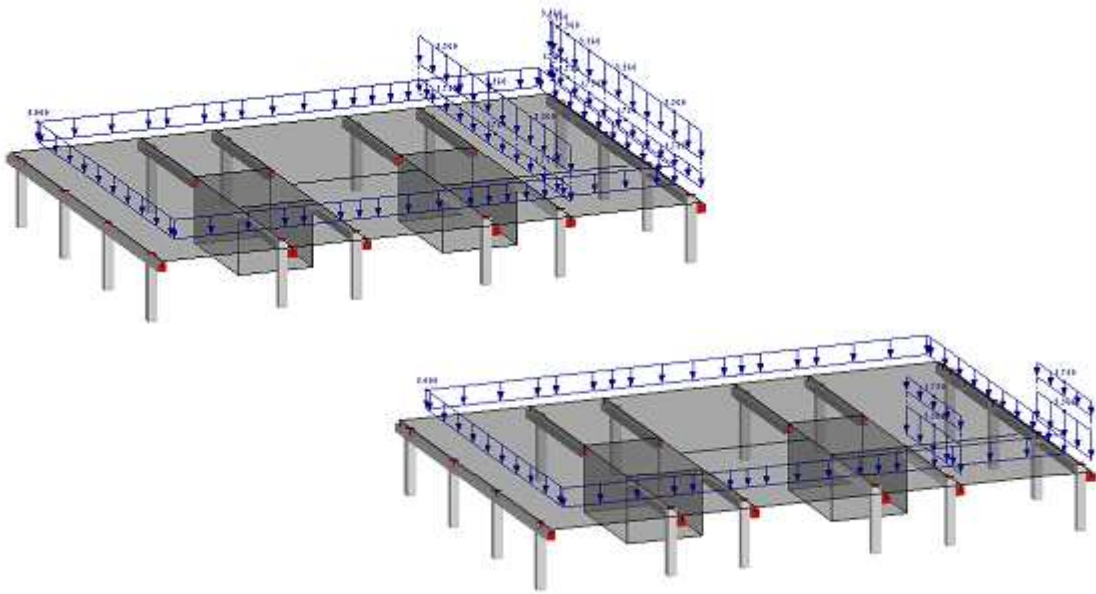
Pro naše modelování jsme zvolily součet těchto procent. Uvažujeme tedy s dvojnásobným množstvím hmoty desky (10%), které se může libovolně přemístit v ose x a y. U zbylých 90% hmoty desky, nepředpokládáme pohyb a působí jako rovnoměrné plošné zatížení.

Postupujeme tedy následovně:

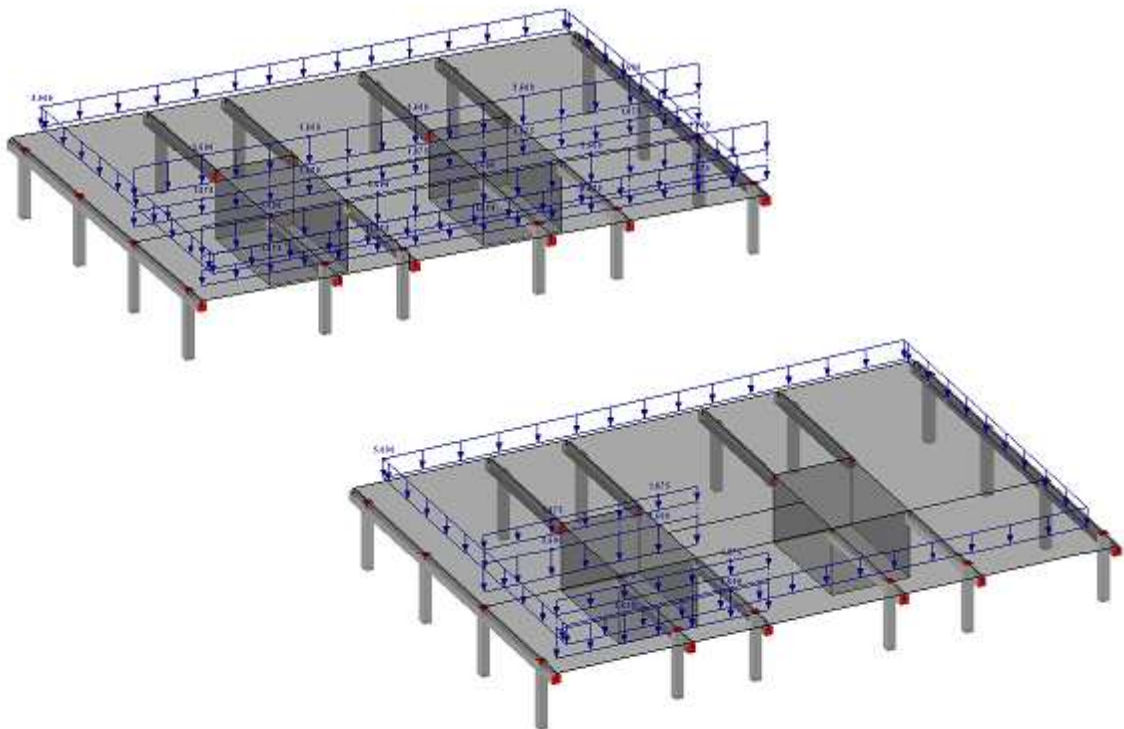
- plošným prvkům, tedy deskám, přiřadíme nové materiálové charakteristiky. Námí vytvořený vlastní materiál musí mít nulovou objemovou hmotnost
- spočítáme tíhu desky, kde objemovou hmotnost uvažujeme standardně  $2500 \text{ kg/m}^3$ , kterou převedeme na zatížení
- do výpočtu zavedeme plošné zatížení na desku, které bude odpovídat 90% vypočítaného zatížení
- zbylými 10% hmoty vlastní tíhy a hmoty z proměnného zatížení zatížíme určitou část konstrukce tak, jak předpokládáme výsledné největší deformace

Vypočítané zatížení umístíme na posuzovanou konstrukci ve všech patrech. Pro názornost je na Obr. 13 a Obr. 14 námi uvažované rozložení hmoty zobrazeno pouze pro jedno patro.

Velikost plošného zatížení odpovídá 90% vlastní tíhy desky, v našem případě je to  $4,5 \text{ kN/m}^2$ , proměnné zatížení uvažované  $2 \text{ kN/m}^2$  přepočítáme na rovnoměrné spojité zatížení jednotlivých linií. Vycházíme ze zatížené plochy, která je pro jednotlivé zatěžovací stavy různá, tedy i velikost zatěžovací šířky se liší. Z předcházejícího je patrné, že působící zatížení nebude ve směru osy x a y stejné. Tento postup platí i pro přepočet zbylých 10% hmotnosti z vlastní tíhy.



Obr. 13 Rozložení hmoty ve směru osy y



Obr. 14 Rozložení hmoty ve směru osy x

Pro takto rozložené zatížení, kterým jsme znázornili pohyb hmoty při seizmickém zatížení, vypočítáme deformace a pootočení a porovnáme s modelem, kde uvažujeme náhodné rozdělení hmoty (viz kapitola 7).

Velikost hmoty ovlivňuje vlastní frekvence a vlastní periody. Postup výpočtu je principiálně stejný jako v kapitole 4.4. V následující Tab. 16 můžeme vidět, jak se tyto hodnoty mění v závislosti na rozložení.

VI. tvar č.	Rozložení hmoty ve směru y PLNÉ		Rozložení hmoty ve směru y V ROHU		Rozložení hmoty ve směru x PLNÉ		Rozložení hmoty ve směru y V ROHU	
	Vlastní frekvence	Vlastní perioda	Vlastní frekvence	Vlastní perioda	Vlastní frekvence	Vlastní perioda	Vlastní frekvence	Vlastní perioda
	f [Hz]	T [s]	f [Hz]	T [s]	f [Hz]	T [s]	f [Hz]	T [s]
1	0,517	1,935	0,525	1,903	0,511	1,958	0,523	1,913
2	0,717	1,395	0,729	1,371	0,709	1,410	0,725	1,379
3	1,044	0,958	1,067	0,937	1,038	0,963	1,063	0,941
4	2,175	0,460	2,211	0,452	2,148	0,466	2,199	0,455
5	3,026	0,330	3,098	0,323	3,011	0,332	3,078	0,325
6	3,279	0,305	3,331	0,300	3,236	0,309	3,319	0,301
7	5,084	0,197	5,177	0,193	5,022	0,199	5,149	0,194
8	5,276	0,190	5,529	0,181	5,413	0,185	5,477	0,183
9	5,757	0,174	5,765	0,173	5,514	0,181	5,764	0,173
10	5,805	0,172	5,964	0,168	5,826	0,172	5,937	0,168
:								
:								
40	13,280	0,075	13,296	0,075	11,862	0,084	12,250	0,082
41	13,311	0,075	13,314	0,075	11,873	0,084	12,267	0,082
42	13,357	0,075	13,363	0,075	11,905	0,084	12,279	0,081
43	13,373	0,075	13,389	0,075	11,921	0,084	12,319	0,081
44	13,387	0,075	13,392	0,075	11,926	0,084	12,334	0,081
45	13,454	0,074	13,463	0,074	11,939	0,084	12,379	0,081
46	13,484	0,074	13,488	0,074	11,991	0,083	12,405	0,081
47	13,498	0,074	13,535	0,074	12,007	0,083	12,412	0,081
48	13,517	0,074	13,555	0,074	12,017	0,083	12,577	0,080
49	13,577	0,074	13,580	0,074	12,041	0,083	12,690	0,079
50	13,590	0,074	13,599	0,074	12,073	0,083	12,803	0,078

Tab. 16 Velikost vlastních čísel a period pro vlastní rozložení hmoty



Při vlastním nerovnoměrném rozložení hmoty musí být také splněna podmínka dle Eurokódu 8, tedy minimum kmitající hmoty. Následující Tab. 17 ukazuje, že zvolených 50 vlastních tvarů, je pro námi uvažované rozložení hmoty, dostačující.

Vl. tvar	Rozložení hmoty ve směru y PLNÉ		Rozložení hmoty ve směru y V ROHU		Rozložení hmoty ve směru x PLNÉ		Rozložení hmoty ve směru y V ROHU	
	$f_{mex} [-]$	$f_{mey} [-]$	$f_{mex} [-]$	$f_{mey} [-]$	$f_{mex} [-]$	$f_{mey} [-]$	$f_{mex} [-]$	$f_{mey} [-]$
1	0,679	0,000	0,679	0,000	0,679	0,000	0,679	0,000
2	0,000	0,667	0,000	0,667	0,000	0,667	0,000	0,667
3	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
4	0,168	0,000	0,168	0,000	0,168	0,000	0,168	0,000
5	0,000	0,168	0,000	0,182	0,000	0,185	0,000	0,181
:								
:								
48	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
49	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
50	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,003	0,000
$\Sigma$	<b>0,964</b>	<b>0,951</b>	<b>0,963</b>	<b>0,950</b>	<b>0,947</b>	<b>0,949</b>	<b>0,949</b>	<b>0,950</b>

Tab. 17 Množství kmitající hmoty pro 50 vlastních tvarů

### Náhradní břemena

Parametry a postup pro určení náhradních břemen je také stejný jako u prutového modelu. Po vygenerování odpovídajících sil provedeme opět export do hlavního programu RFEM s vytvořením příslušných zatěžovacích stavů a kvadratických kombinací SRSS.

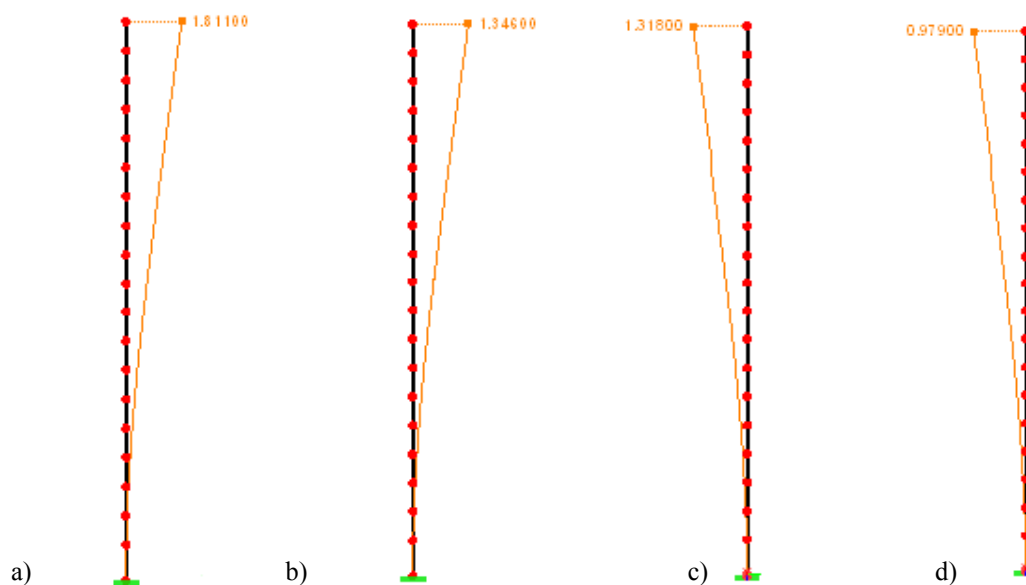
## 7 Vyhodnocení získaných výsledků

### 7.1 Srovnání ručního výpočtu dle EC 8 s výpočtem v programu RFEM na prutovém modelu

Velikost náhradních břemen a momentů vypočítaných ručním výpočtem pomocí příčných sil a programem RF-DYNAM udává Tab. 18. Jejich následným zatížením v jednotlivých uzlech prutu můžeme porovnat odchylky ve výsledných deformacích (Obr. 15) a posuny jednotlivých uzlů (Tab. 19.) Jelikož výsledné pootočení konstrukce je velmi malé a graficky špatně znázornitelné, uvedeme pouze výchylku pro jednotlivé uzly v Tab. 19. Srovnání provedeme pro první dva vlastní tvary kmitání.

Uzel č.	Náhradní břemena $F_i$ [kN]				Účinky krutu $M_i$ [kNm]			
	Ruční výpočet		Výpočet programem RFEM		Ruční výpočet		Výpočet programem RFEM	
	1. vlastní tvar	2. vlastní tvar	1. vlastní tvar	2. vlastní tvar	1. vlastní tvar	2. vlastní tvar	1. vlastní tvar	2. vlastní tvar
797	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
800	0,070	0,100	0,056	0,077	0,102	0,101	0,081	0,081
801	0,210	0,290	0,153	0,211	0,305	0,303	0,222	0,221
802	0,420	0,580	0,314	0,431	0,609	0,607	0,455	0,452
803	0,710	0,970	0,524	0,720	1,023	1,019	0,760	0,757
804	1,050	1,440	0,781	1,073	1,523	1,517	1,132	1,127
805	1,460	2,000	1,078	1,482	2,111	2,102	1,564	1,556
806	1,910	2,620	1,413	1,942	2,764	2,752	2,049	2,039
807	2,400	3,300	1,780	2,447	3,482	3,467	2,581	2,569
808	2,930	4,020	2,176	2,991	4,244	4,226	3,155	3,140
809	3,500	4,810	2,596	3,568	5,071	5,050	3,764	3,746
810	4,100	5,630	3,036	4,173	5,942	5,916	4,402	4,381
811	4,710	6,480	3,493	4,801	6,834	6,805	5,065	5,041
812	5,340	7,350	3,963	5,447	7,748	7,715	5,747	5,719
813	5,990	8,240	4,444	6,108	8,684	8,647	6,443	6,413
814	6,650	9,140	4,932	6,778	9,642	9,601	7,151	7,117
815	7,310	10,050	5,425	7,456	10,599	10,554	7,866	7,829
816	7,990	10,980	5,921	8,138	11,579	11,529	8,586	8,545
817	8,650	11,890	6,419	8,822	12,536	12,483	9,307	9,263
818	7,620	10,480	5,707	7,844	11,050	11,003	8,276	8,237

Tab. 18 Hodnoty náhradních břemen a momentů pro výpočet pomocí příčných sil a programem RFEM



Obr. 15 Výsledné posuny [mm] pro a) 1. vlastní tvar, ruční výpočet b) 1. vlastní tvar, výpočet programem RFEM c) 2. vlastní tvar, ruční výpočet d) 2. vlastní tvar, výpočet programem RFEM

Uzel č.	Posuny $u_x, u_y$ [mm]				Pootočení $\varphi_z$ [mrad]			
	Ruční výpočet		Výpočet programem RFEM		Ruční výpočet		Výpočet programem RFEM	
	1. vlastní tvar $u_x$	2. vlastní tvar $u_y$	1. vlastní tvar $u_x$	2. vlastní tvar $u_y$	1. vlastní tvar	2. vlastní tvar	1. vlastní tvar	2. vlastní tvar
797	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
800	0,012	0,009	0,009	0,007	0,003	0,003	0,002	0,002
801	0,040	0,029	0,030	0,022	0,006	0,006	0,005	0,005
802	0,080	0,060	0,061	0,044	0,009	0,009	0,007	0,007
803	0,137	0,100	0,102	0,074	0,012	0,012	0,009	0,009
804	0,204	0,149	0,152	0,111	0,014	0,014	0,011	0,011
805	0,282	0,206	0,210	0,153	0,017	0,017	0,012	0,012
806	0,370	0,269	0,275	0,200	0,019	0,019	0,014	0,014
807	0,466	0,339	0,346	0,252	0,022	0,022	0,016	0,016
808	0,570	0,415	0,423	0,308	0,024	0,024	0,018	0,018
809	0,680	0,495	0,505	0,367	0,027	0,027	0,02	0,02
810	0,795	0,579	0,591	0,430	0,029	0,029	0,021	0,021
811	0,915	0,666	0,679	0,494	0,031	0,031	0,023	0,023
812	1,038	0,755	0,771	0,561	0,033	0,033	0,024	0,024
813	1,164	0,847	0,864	0,629	0,034	0,034	0,026	0,026
814	1,292	0,940	0,959	0,698	0,036	0,036	0,027	0,027
815	1,421	1,030	1,055	0,768	0,037	0,037	0,027	0,027
816	1,554	1,128	1,152	0,838	0,038	0,038	0,028	0,028
817	1,681	1,223	0,249	0,909	0,038	0,038	0,029	0,029
818	1,811	1,318	1,346	0,979	0,039	0,039	0,029	0,029

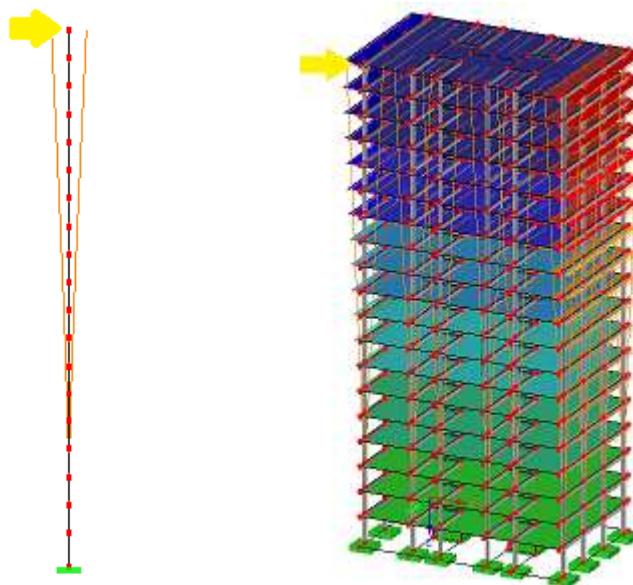
Tab. 19 Srovnání deformací jednotlivých uzlů podle ručního výpočtu a výpočtu programem RFEM

Z uvedeného vyplývá, že hodnoty vodorovných sil vypočítané dle příslušné metody, nahrazující účinky seizmického zatížení jsou přibližně o 35% větší než hodnoty získané programovým výpočtem, tudíž návrh na toto působící zatížení je neekonomické, avšak na straně bezpečné z hlediska dimenzování jednotlivých konstrukčních prvků, výztuží, spojů atd.

## 7.2 Srovnání prutového a prostorového modelu

Prostorové 3D znázornění posuzované konstrukce odpovídá prutovému 1D modelu, který má srovnatelnou tuhost ve všech směrech jako 3D model. Nový číselný průřez, vytvořený z vypočítaných průřezových charakteristik, jsme přiřadili prutovému modelu.

Tab. 20 udává maximální a minimální posun a pootočení konstrukce v směrech x, y, z. U prutového modelu je největší deformace dosaženo v hlavě prutu a u prostorového modelu se nejvíce vychýlí rohový uzel v nejvyšším nadzemním patře konstrukce. Znázornění na Obr.16.



Obr. 16 Znázornění nejvíce deformovaného uzlu

Srovnání deformací je provedeno pro prutový a prostorový model. Jelikož je konstrukce nejvíce ovlivněna prvními tvary kmitání uvedeme rozdíly mezi kombinací prv-

ních dvou vlastních tvarů a všemi 50 zvolenými tvary. Při uvažování torze se snažíme vychýlit konstrukci ze své rovnovážné polohy a proto i torze bude ovlivňovat výsledné deformace. Rozdíly ve výsledcích při výpočtu bez torze a s torzí jsou také uvedeny v Tab. 20.

Deformace	Směr	Prutový model				Prostorový model			
		Kombinace 1. a 2. vlastního tvaru		Kombinace všech vlastních tvarů		Kombinace 1. a 2. vlastního tvaru		Kombinace všech vlastních tvarů	
		bez torze	s torzí	bez torze	s torzí	bez torze	s torzí	bez torze	s torzí
Posuny [mm]	$u_x$	±1,34600	±1,34600	±1,34730	±1,34730	±1,31500	±1,35251	±1,32061	±1,36472
	$u_y$	±0,97900	±0,97900	±0,97949	±0,97949	±0,95000	±1,0023	±0,95197	±1,01242
	$u_z$	0,00000	0,00000	±0,01903	±0,01903	±0,11771	±0,11887	±0,12089	±0,12252
Pootočení [mrad]	$\varphi_x$	±0,02000	±0,02000	±0,02010	±0,02010	±0,01700	±0,01700	±0,01749	±0,01749
	$\varphi_y$	±0,02800	±0,02800	±0,02830	±0,02830	±0,02600	±0,02600	±0,02795	±0,02795
	$\varphi_z$	0,00000	±0,04101	0,00000	±0,08465	±0,00100	±0,00566	±0,00100	±0,00959

Tab. 20 Srovnání deformací na prutovém a prostorovém modelu pro kombinaci všech vlastních tvarů a prvních dvou vlastních tvarů

Hodnoty pro prutový a prostorový model v odpovídajících kombinacích jsou téměř srovnatelné, proto můžeme tvrdit, že prutový model plně odpovídá prostorovému modelu. Nejpatrnější rozdíl je vidět u posunu ve směru osy z, kdy pro kombinaci prvních dvou tvarů u prutového modelu je hodnota nulová a v ostatních případech je nenulová. Je to dáno tím, že 3D model působí jako prostorový tuhy celek a při naklonění budovy dojde i k posunu ve směru osy z. U obou modelů je vidět rozdíl mezi kombinací bez torze a s torzí. Nulová hodnota pootočení kolem osy z u 1D modelu bez torze je dána tím, že prut nebyl zatížen žádným zatížením ani vlastním tvarem, který vyvolává kroucení v daném směru.

### 7.3 Srovnání náhodného a vlastního rozdělení hmot na prostorovém modelu

Výsledné účinky zemětřesení závisí také na rozložení hmoty na konstrukci.

V rámci této práce jsme porovnali normou stanovený postup zohledňující nepřesné rozdělení hmoty s vlastním rozdělením hmoty (Obr. 13 a Obr. 14), u kterého předpoklá-

dáme největší vyvolané deformace. Nejsou to však jediné možné způsoby rozdělení hmoty po konstrukci.

Norma zohledňuje nepřesné rozdělení hmoty při seizmickém účinku vyosením hmotového těžiště každého podlaží z nominální polohy v každém směru o náhodnou excentricitu (viz. 6.1). Účinky krutu mohou být na prostorovém modelu stanoveny jako obálka momentu krutu kolem svislé osy každého podlaží [7].

Torzní účinky při náhodném rozdělení hmoty zohlední program RFEM výpočtem dle Eurokódu 8 a u vlastního rozdělení je dosaženo torzního účinku již zvoleným rozložením hmoty.

V Tab. 21 vidíme srovnání výsledných deformací pro tyto dva způsoby rozložení hmoty. Pootočení ve směru osy z bez účinků torze je řádově menší než s torzí. Hodnoty pootočení se v tomto směru při zohlednění torzních účinků pro oba způsoby rozložení hmoty výrazně neliší. Rozdíl v posunech mezi náhodným a vlastním rozdělení hmot je dán tím, že při modelování náhodné torze dle normy se zvýší nejen torzní účinek, ale i účinek ostatní působící zatížení.

Deformace	Směr	Náhodné rozdělení hmoty pomocí RFEM		Vlastní rozdělení hmoty			
		Rovnoměrné bez torze	Rovnoměrné s torzí	Zatížení v ose x plné	Zatížení v ose x v rohu	Zatížení v ose y plné	Zatížení v ose y v rohu
Posuny [mm]	$u_x$	1,32061	1,36472	1,29791	1,27886	1,32620	1,28816
	$u_y$	0,95170	1,01242	0,99846	0,95443	0,96568	0,96390
	$u_z$	0,12089	0,12252	0,11623	0,11399	0,11801	0,11543
Pootočení [mrad]	$\varphi_x$	0,01749	0,01749	0,01631	0,01559	0,01652	0,01559
	$\varphi_y$	0,02795	0,02795	0,02665	0,02663	0,02753	0,02663
	$\varphi_z$	0,00100	0,00959	0,01162	0,00990	0,00954	0,00995

Tab. 21 Deformace od náhodného rozdělení hmoty a od vlastního rozdělení hmoty

## 8 Závěr

Náplní této bakalářské práce bylo modelování náhodné torze při seizmickém zatížení a posouzení jejich účinků na konstrukci. Výslednému zhodnocení předcházelo mnoho výpočtových kroků.

Nejprve jsme vytvořili 3D model posuzované konstrukce. Jedná se o výškovou budovu s betonovým skeletovým systémem pravidelného obdélníkového půdorysu. Při splnění kritérií, popisující pravidelnost v půdoryse i po výšce, můžeme pro výpočet seizmických účinků použít zjednodušenou metodu s použitím spektra odezvy (metoda příčných sil).

Pro tento výpočet bylo nutné nahradit prostorovou konstrukci prutovým modelem, který svojí tuhostí odpovídá 3D modelu. Metodou příčných sil jsme vypočítali náhradní vodorovné síly působící na jednotlivá patra a lineárním výpočtem zjistili výsledné deformace konstrukce (tj. posun a pootočení). Obdobný výpočet jsme provedli ve výpočtovém programu RF-DYNAM Basic. Z výsledků vyplynulo, že metodou uvedenou v příslušné normě získáme větší návrhové síly a tím také větší účinek na konstrukci. Tento postup výpočtu je tedy bezpečný, ale ekonomicky nevýhodný z hlediska konstrukčního návrhu jednotlivých prvků.

Při seizmické aktivitě dochází ke kmitání hmoty. V programu RFEM jsme simulovali seizmické účinky pomocí spektra pružné odezvy a získali vlastní frekvenci a periodu pro každý vlastní tvar. Hodnoty deformací na prostorovém a prutovém modelu byly téměř shodné, a proto můžeme říct, že prutový model měl odpovídající tuhost jako model prostorový.

Jedny z důležitých činitelů, které se podílejí na průběhu dynamického namáhání, jsou rozdělení hmot a torzní účinky. Proto jsme porovnali normou stanovený postup výpočtu účinků krutu, který nahrazuje nerovnoměrné rozložení hmoty působením přídatných momentů a námi zvolené rozložení hmoty. Z výsledků je patrné, že není možné navrhovat konstrukci bez účinku torze, protože hodnoty pootočení ve svislém směru jsou řádově nižší než s vlivem torze. Při zohlednění torze, ať už dle Eurokódu 8 nebo vlastním rozložením hmoty dostaneme téměř shodná pootočení. Musíme však zvážit fakt, že norma předpokládá pohyb 5% hmoty v každém směru a my počítali s dvojná-

sobným množstvím. Rozdíl je však patrný u posunu konstrukce v jednotlivých směrech. Modelování náhodné torze dle Eurokódu 8 nezvýší pouze torzní účinky, ale i účinek sil na konstrukci, a proto se zvýší veškeré hodnoty deformací konstrukce. Naopak vlastním rozdělením můžeme návrhové síly zmenšit a tedy i výsledné posuny konstrukce budou menší.

Závěrem tedy můžeme říct, že pokud známe předem, jaké bude rozložení hmoty na konstrukci, můžeme si tuto situaci sami namodelovat a v obecných případech, kdy nejsme schopni sami rozložit působící hmotu, využijeme zohlednění náhodné torze dle Eurokódu 8. Oba tyto postupy jsou z hlediska návrhu konstrukce bezpečné.



## Seznam použitých zdrojů

- [1]. Zemětřesení. *Přídorní katastrofy a environmentální hazardy*. [Online] [Citace: 19. 5 2012.] <http://www.sci.muni.cz/~herber/quake.htm>.
- [2]. **Fischer, Ondřej**. Nová norma pro navrhování konstrukcí odolných proti účinkům zemětřesení. *Časopis stavebnictví*. [Online] 16. březen 2009. [Citace: 30. duben 2012.] [http://www.casopisstavebnictvi.cz/nova-norma-pro-navrhovani-konstrukci-odolnych-proti-ucinkum-zemetreseni\\_N2126](http://www.casopisstavebnictvi.cz/nova-norma-pro-navrhovani-konstrukci-odolnych-proti-ucinkum-zemetreseni_N2126).
- [3]. **Baťa, M, Plachý, V a Trávníček, F**. *Dynamika stavebních konstrukcí*. Bratislava : ALFA, 1987.
- [4]. Wikipedia. *Dynamika*. [Online] [Citace: 19. 5 2012.] <http://cs.wikipedia.org/wiki/Dynamika>.
- [5]. Wikipedia. *Kmitání*. [Online] [Citace: 25. 5 2012.] <http://cs.wikipedia.org/wiki/Kmit%C3%A1n%C3%AD>.
- [6]. **Koktavý, Bohumil**. *Mechanické kmitání a vlnění*. Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 1999.
- [7]. ČSN EN 1998-1. *Eurokód 8: Navrhování konstrukcí odolných proti zemětřesení*. Praha : Český normalizační institut, 2006.
- [8]. **Harazín, J**. Rozdělení náhodných torzních účinků v RF-/DYNAM Addition II. *Dlupal blog*. [Online] 3. 5 2012. [Citace: 19. 5 2012.] <https://www.dlupal.de/blog/1720/rozdeleni-nahodnych-torznich-ucinku-v-rf-dynam-addition-ii/>.

## Seznam zkratk

$A_c$	je celková efektivní plocha smykových stěn v prvním podlaží v $m^2$
$A_i$	efektivní průřezová plocha i-té smykové stěny v $m^2$ ve směru
$F_b$	seizmická smyková síla v patě, v základu
$F_i$	vodorovná síla působící na i-té podlaží
$G_{k,j}$	stálé zatížení
$L_i$	je rozměr podlaží kolmý ke směru seizmického zatížení
$Q_{k,j}$	proměnné zatížení
$S_d(T_1)$	je pořadnice návrhového spektra při periodě kmitu $T_1$
$T_1$	základní perioda vlastních kmitů vodorovného pohybu stavby
$T_B$	nejmenší perioda kmitů, které přísluší konstantní hodnota pružného zrychlení
$T_C$	největší perioda kmitů, které přísluší konstantní hodnota spektra pružného
$T_D$	doba kmitu, při níž začíná obor konstantní hodnoty spektra pružného posunu
$T_{NCR}$	referenční doba návratu referenčního seizmického zatížení při požadavku vyloučení zřícení
$a_g$	návrhové zrychlení podloží typu A
$a_{gr}$	referenční špičkové zrychlení podloží typu A
$e_{ai}$	náhodná excentricita hmoty i-tého podlaží
$l_{wi}$	délka i-té smykové stěny v prvním podlaží směru rovnoběžném
$m_i$	hmotnosti i-tého podlaží
$s_i, s_j$	posuny hmot $m_i$ v základním tvaru kmitání stavby
$\gamma_1$	součinitel významu
$\psi_{E,i}$	součinitel kombinace pro i-té proměnné zatížení
A	plocha průřezu
d	je příčný pružný posun vrcholu stavby v metrech vlivem zatížení vlastní
E	Youngův modul pružnosti
f	vlastní frekvence
G	modul pružnosti ve smyku
$I_t$	krouticí moment setrvačnosti = $5,751m^4$

$I_x, I_y$	momenty setrvačnosti ve směru osy $x, y$
$M$	magnitudo
$q$	součinitel duktility
$S$	součinitel podloží
$T$	perioda vlastních kmitů pružné soustavy s jedním stupněm volnosti
$u_x, u_y, u_z$	posuny ve směru osy $x, y, z$
$\gamma$	objemová hmotnost
$\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$	pootočení kolem osy $x, y, z$
$\nu$	Poissonův součinitel
$\lambda$	vlastní číslo
$\omega$	kruhová frekvence
$H$	výška stavby v metrech od základové spáry nebo vrchu tuhého základu
$S$	součinitel podloží
$m$	celková hmotnost stavby nad základovou spárou nebo nad vrchem
$q$	součinitel duktility
$\beta$	spodní mez součinitele pro vodorovné návrhové spektrum
$\lambda$	opravný součinitel, hodnota $\lambda = 0,85$ , když $T_1 \leq 2T_C$ a když má