

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA APLIKOVANÝCH VĚD

KATEDRA MECHANIKY

ODDĚLENÍ STAVITELSTVÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Statická a dynamická analýza železobetonové horní desky
základu turbosoustrojí na projekt Värö, Švédsko

Vypracoval:

Bc. Vojtěch Herejk

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Petr Kěsl

Akademický rok:

2015 / 2016

Datum odevzdání:

29. srpna 2016

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Vojtěch HEREJK**
Osobní číslo: **A14N0026P**
Studijní program: **N3607 Stavební inženýrství**
Studijní obor: **Stavitelství**
Název tématu: **Statická a dynamická analýza železobetonové horní desky základu turbosoustrojí na projekt Värö, Švédsko**
Zadávací katedra: **Katedra mechaniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

A) Úvodní část s popisem objektu a použitých řešení.

B) Projekt:

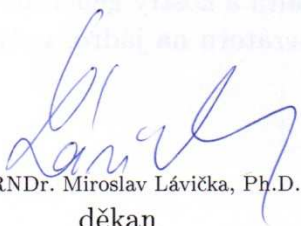
1. Dynamický výpočet horní desky základu TG. Statický výpočet horní desky základu TG. Návrh výztuže základu. Stanovení pružinových prvků potřebných pro podepření horní desky.
2. Obsah statické a dynamické analýzy: Vyšetření vynuceného kmitání, vlastních tvarů a frekvence horní desky základu TG. Návrh úprav za účelem snížení úrovně vibrací na přípustnou míru. Výpočet a posouzení dlouhodobých deformací základu a deformací od teploty. Návrh a posouzení deformace pružinových prvků. Výpočet a posouzení svislý posuvů a pootočení příčníků pod stojany ložisek.
3. Zásady pro vypracování: Rozměrový výkres základu. Zatěžovací plán. Náhrada statoru turbíny. Náhrada rotorové soustavy použitá pro výpočet kritických otáček. Tuhosti uložení rotorů (stojany/ložiska/olejový film). Náhrada jádra a kostry generátoru, specifikace jejich pružného spojení a rozdělení hmotnosti generátoru na jádro, vnější kostru a rám. Rozložení teploty na základu.

Rozsah grafických prací: **projekt skládající se z výkresů a textových zpráv**
Rozsah kvalifikační práce: **50-60 stran A4 včetně příloh**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**
Seznam odborné literatury:


1. ČSN EN 1990 - Zásady navrhování stavebních konstrukcí.
2. ČSN EN 1991 - Zatížení stavebních konstrukcí.
3. ČSN EN 1992 - Navrhování betonových konstrukcí.
4. **NORMY POUŽITÉ PRO ANALÝZU : Eurokódy - Eurokód 1: Zatížení konstrukcí ČSN ISO 10816-1 - Vibrace - Hodnocení vibrací strojů na základě měření na nerotujících částech - Část 1: Všeobecné směrnice, ČSN ISO 10816-2 - Vibrace - Hodnocení vibrací strojů na základě měření na nerotujících částech - Část 2: Parní turbíny a generátory ...**

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Kesl**
Katedra mechaniky

Datum zadání diplomové práce: **15. června 2015**
Termín odevzdání diplomové práce: **20. prosince 2015**


Doc. RNDr. Miroslav Lávička, Ph.D.
děkan




Prof. Ing. Vladislav Laš, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. června 2015

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Statická a dynamická analýza železobetonové horní desky základu turbosoustrojí na projekt Värö, Švédsko** vypracoval samostatně za pomoci odborných konzultací s vedoucím diplomové práce a za použití odborné literatury a norem uvedených v příloženém seznamu.

V Blovicích, dne 22. 8. 2016

.....

Bc. Vojtěch Herejk

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval panu Ing. Petru Keslovi a panu Ing. Aleši Štruncovi, Csc. za cenné rady, velikou trpělivost a společně strávený čas při konzultacích diplomové práce. Dále bych rád poděkoval mé rodině, která mě během studia podporovala.

Abstrakt

Tématem diplomové práce je vypracování statické a dynamické analýzy horní železobetonové desky základu turbosoustrojí na projekt Värö, Švédsko. Další částí této práce je návrh výztuže základu a stanovení pružinových prvků potřebných pro podepření horní desky. Obsah diplomové práce je v souladu s platnými českými normami a vyhláškami.

Základ turbosoustrojí byl analyzován metodou konečných prvků studentskou verzí programu Dlubal RFEM 5. Výkresová dokumentace byla vyhotovena ve studentské verzi programu Nemetschek Allplan 2013.

Klíčová slova:

Železobetonová konstrukce, základ točivých strojů, parní turbína, dynamické účinky strojů, zatěžovací stavy, vibrace, modální analýza, vlastní tvary, statické posouzení, návrh výztuže, deformace, pružinové prvky, projektová dokumentace, technická zpráva

Abstract

The subject of this master's thesis is processing of static and dynamic analysis of reinforced concrete upper turbo-generator foundation on the project Värö, Sweden. Next tasks are reinforcement design and selection of spring units to be needed for supporting upper turbo-generator foundation. The content of this work corresponds to current Czech norms and regulations.

The turboset foundation was analysed by FEM with a student version of program Dlubal RFEM 5. Drawings were drawn up using a student version of program Nemetschek Allplan 2013.

Keywords:

Concrete structure, foundation for rotating machine, steam turbine, dynamic effect of machines, load cases, mechanical vibration, modal analysis, mode shapes, structural analysis, reinforcement design, deformation, spring units, project documentation, technical report

Obsah

ÚVOD	11
1. POPIS KONSTRUKCE	12
1.1. Konstrukce základu turbosoustruj	12
1.2. Údaje o turbosoustruj	14
2. VSTUPNÍ DATA ANALÝZY	16
2.1. Materiálové charakteristiky	16
2.1.1. Železobetonový základ	16
2.1.2. Turbosoustruj	17
2.2. Pružinové prvky Gerb	17
2.3. Ložiska rotorů turbíny a generátoru	18
2.4. Stojany turbíny	18
3. STATICKÁ ANALÝZA KONSTRUKCE	19
3.1. Prostorový model desky základu	19
3.2. Zatěžovací stavy pro statickou analýzu	23
3.3. Návrh a posouzení pružinových prvků Gerb	32
3.4. Výpočet a posouzení deformací od teploty	39
3.5. Výpočet a posouzení dlouhodobých deformací v důsledku dotvarování betonu	48
3.6. Deformace v ostatních zatěžovacích stavech	60
3.7. Návrh výztuže horní desky základu	67
3.7.1. Model konstrukce	67
3.7.2. Zatěžovací stavy	68
3.7.3. Kombinace zatěžovacích stavů	70
3.7.4. Návrhové vnitřní síly	82
3.7.5. Dimenzování výztuže	91
4. DYNAMICKÁ ANALÝZA KONSTRUKCE	117
4.1. Modelování turbosoustruj náhradními tělesy	117
4.1.1. Model rotorů turbíny a generátoru	117
4.1.2. Model statoru generátoru	119
4.1.3. Model statoru turbíny a ložiskových stojanů	120
4.1.4. Model ložisek turbíny a generátoru	123
4.1.5. Model desky s turbosoustrujím	125
4.2. Dynamické zatěžovací stavy	128
4.3. Modální analýza soustavy	141

4.4.	Vynucené kmitání soustavy	169
4.4.1.	Stanovení mezních výpočetních hodnot harmonické rychlosti kmitání	169
4.4.2.	Stanovení amplitud budících sil turbosoustrojí.....	170
4.4.3.	Útlum soustavy.....	173
4.4.4.	Body odezvy.....	174
4.4.5.	Kombinace dynamických zatěžovacích stavů.....	175
4.4.6.	Nastavení přesnosti výpočtu	176
4.4.7.	Vypočtené hodnoty amplitud rychlostí vibrací	177
4.4.8.	Zhodnocení vynuceného kmitání	221
ZÁVĚR		222
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY		224
SEZNAM POUŽITÝCH NOREM A VYHLÁŠEK		224
INTERNETOVÉ ZDROJE		225
POUŽITÝ SOFTWARE		225
KOMPLETNÍ SEZNAM PŘÍLOH		226

Úvod

V diplomové práci se zabývám návrhem pružně uložené horní železobetonové desky základu turbosoustrojí pro elektrárnu ve městě Värö ve Švédsku. Hlavním cílem práce je dynamická a statická analýza soustavy složené z horní základové desky a turbogenerátorového soustrojí, které je tvořeno parní turbínou o výkonu 50 MW a generátorem.

V části práce věnované statické analýze jsem provedl návrh a posouzení pružinových prvků GERB na maximální přípustné zatížení a stlačení. Dále se zabývám posouzením dlouhodobých deformací v místech uložení ložiskových stojanů vlivem působení vlastní tíhy základu a stroje a dotvarování betonu. V dalším bodě diplomové práce kontroluji deformace vzniklé nárůstem teploty uvnitř turbínového otvoru. Podle výsledků statické analýzy jsem navrhl výztuž základu na smykové a ohybové namáhání.

Dynamické výpočty jsou provedeny metodou konečných prvků na komplexním prostorovém výpočtovém modelu zahrnující pružně uloženou horní desku základu včetně velkokapacitních pružinových izolátorů GERB a strojního zařízení, které je zavedeno do výpočtu vymodelováním náhradních těles, odpovídající turbíně, generátoru, rotorům a ložiskovým stojanům. Prvním krokem je výpočet vlastních frekvencí a tvarů kmitání – tzv. modální analýza soustavy. Výstupem dynamické analýzy je zhodnocení rychlosti vibrací na povrchu betonu pod ložiskovými stojany a v rozích desky, a to v provozních otáčkách strojního zařízení i v jeho přechodových stavech při najíždění a odstavování.

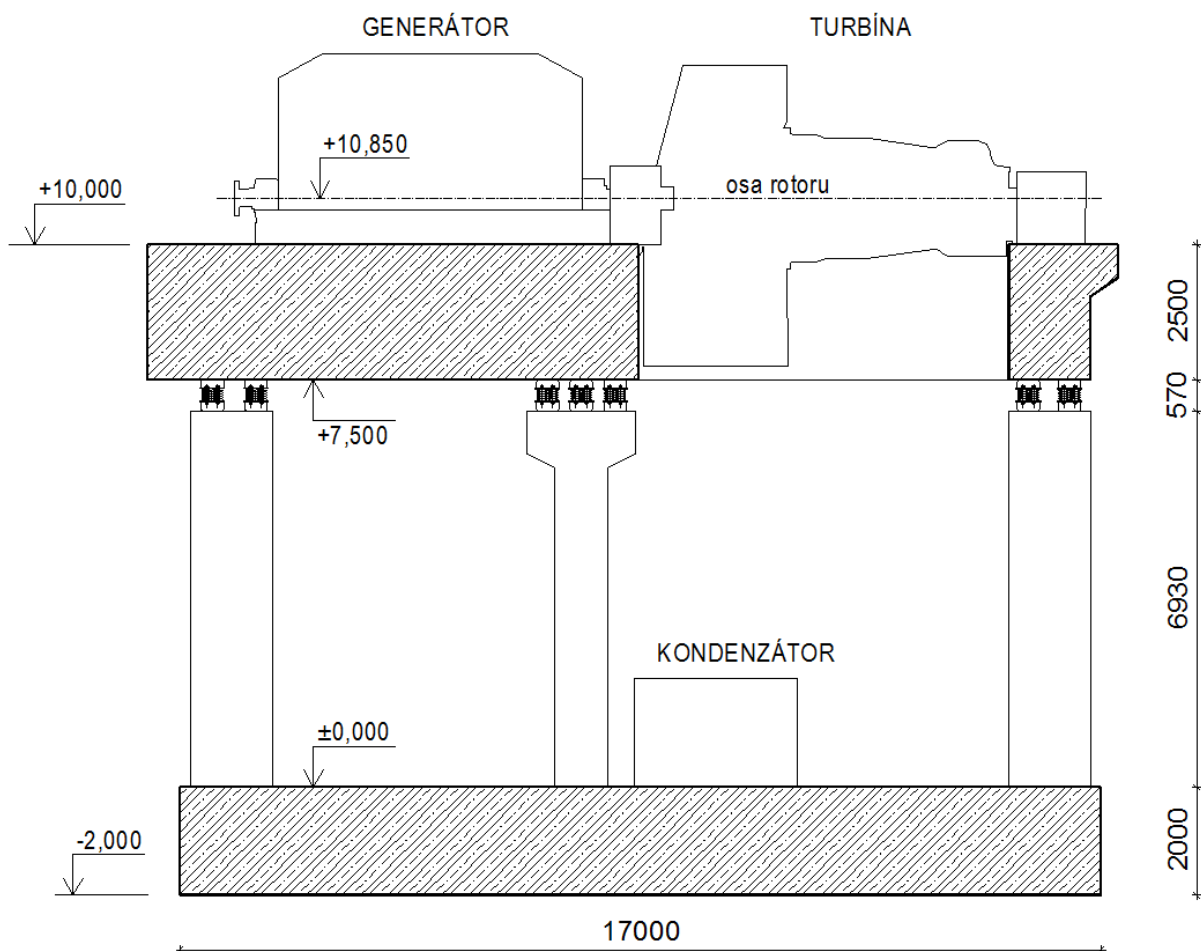
Ve výkresové části diplomové práce jsou zpracovány půdorysy a řezy navržené horní desky základu. Výkresová dokumentace je přiložena k práci jako příloha.

1. Popis konstrukce

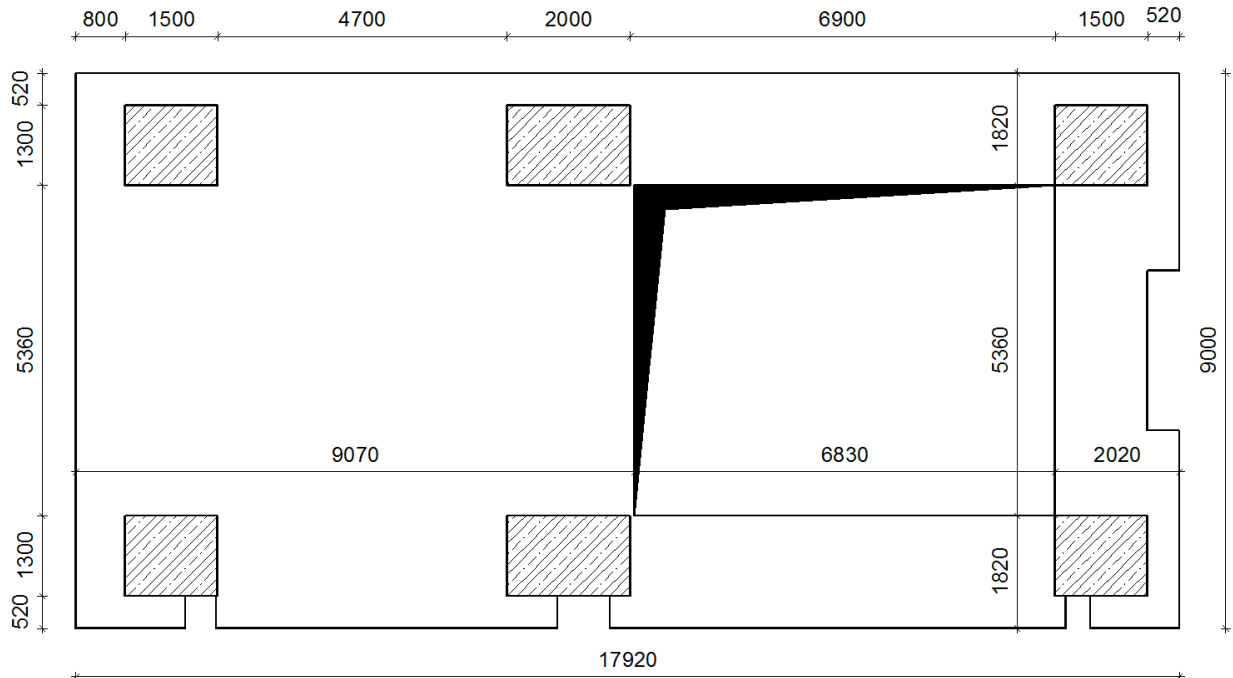
1.1. Konstrukce základu turbosoustrojí

Železobetonová konstrukce základu turbosoustrojí na projekt Värö, Švédsko se skládá ze spodní desky, šesti sloupů a horní desky. Horní deska je uložena na pružinových izolátorech GERB. Povrch horní desky je členitý a je v ní navržen otvor pro turbínu.

Obr.: Podélný řez základem



Obr.: Půdorys horní desky s umístěním sloupů spodní konstrukce

**Technické parametry konstrukce základu:**

- **Spodní deska**
 - půdorysné rozměry: 17,0 x 8,6 m
 - tloušťka: 2,0 m

- **Sloupy**
 - obdélníkové průřezy: 1,5 x 1,3 m; 1,0 (2,0) x 1,3 m
 - výška: 6,93 m

- **Horní deska**
 - půdorysné rozměry: 17,92 x 9,0 m
 - tloušťka: 2,5 m
 - půdorysné rozměry otvoru pro turbínu: 6,83 x 5,36 m

- **Celková výška konstrukce od základové spáry:** 12,0 m

- **Celková hmota horní desky:** 607,57 t
- **Celkový objem horní desky:** 243 m³

- **Navržená třída betonu:** C 30/37, XC1
- **Navržená výztuž:** B 500 B

Technologický postup realizace:

Železobetonová konstrukce základu je navržena jako monolitická. Betonáž horní desky základu je navržena v 1 záběru, pracovní spáry nejsou přípustné. Konstrukce základu turbosoustrojí bude oddělena od okolních konstrukcí dilatačními spárami o tloušťce minimálně 20 mm.

Výstavba celé základové konstrukce bude realizována ve 4 etapách:

1. spodní deska
2. šestice sloupů
3. instalace prvků Gerb
4. horní deska s betonáží v 1 záběru

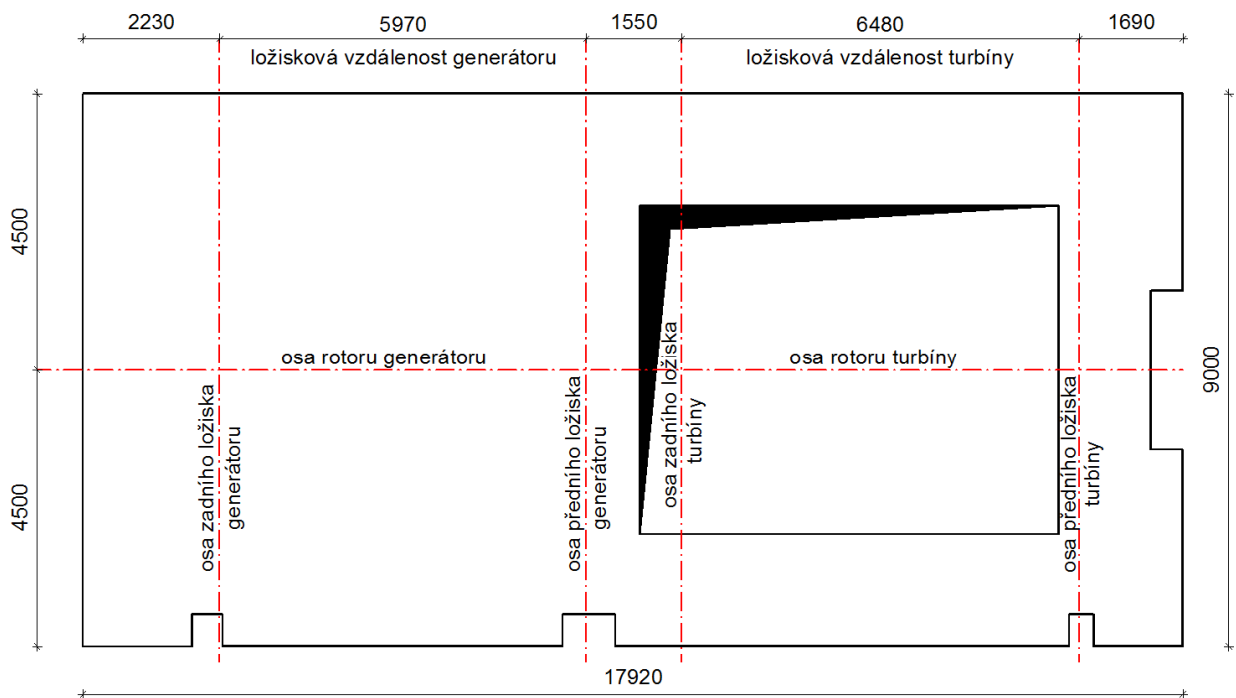
1.2. Údaje o turbosoustrojí

- **Konfigurace:** turbína Doosan Škoda Power, generátor Siemens
- **Popis turbíny:**
 - Typ turbíny: parní turbína
 - Výkon turbíny: 50 MW
 - Zatřídění turbíny podle
 - počtu těles: jednotělesová
 - počtu plášťů: dvouplášťová
 - tlaku páry: kondenzační
 - Provozní otáčky: 3 000 ot. /min.
 - Frekvence: 50 Hz
- **Hmotnosti rotorů:**
 - Rotor turbíny: 30,96 t
 - Rotor generátoru: 20,26 t
- **Hmotnosti statorů:**
 - Stator turbíny: 141,51 t
 - Stator generátoru: 90,12 t

○ Celková hmota turbosoustrojí: 282,85 t

○ Poloha turbosoustrojí vzhledem k horní desce základu:

Obr.: Osy rotorů a ložisek generátoru a turbíny



Osa rotorů turbíny a generátoru leží 0,85 m nad horním povrchem desky základu, což odpovídá výškové kótě +10,850 ve výkresové dokumentaci. V podélném směru desky je osa rotorů v polovině šířky horní desky základu, tedy 4,5 m od krajů desky.

Vzdálenost os předních a zadních ložisek turbíny, tzv. ložisková vzdálenost, je 6,48 m. Ložisková vzdálenost generátoru je 5,97 m.

2. Vstupní data analýzy

V projektu jsou použity následující fyzikální jednotky:

- jednotky délky: $[m], [cm], [mm]$
- jednotky síly: $[N], [kN]$
- jednotky tlaku: $[Pa], [MPa], [GPa]$
- jednotka času: $[s]$
- jednotka teploty: $[^{\circ}C]$
- jednotky hmotnosti: $[kg], [t]$
- jednotka frekvence: $[Hz]$
- úhlové jednotky: $[^{\circ}], [rad]$

Pozn.: V celém projektu je uvažováno tíhové zrychlení: $g = 10 \text{ m/s}^2$

2.1. Materiálové charakteristiky

2.1.1. Železobetonový základ

- **Navržená třída betonu: C 30/37**
 - stupeň vlivu prostředí: XC1
 - charakteristická pevnost betonu v tlaku: $f_{ck} = 30 \text{ MPa}$
 - objemová hmotnost železobetonu: $\rho_c = 2\,500 \text{ kg/m}^3$
 - modul pružnosti - statický: $E_c = 33 \text{ GPa}$
 - modul pružnosti - dynamický: $E_{dyn} = 36 \text{ GPa}$
 - Poissonův součinitel: $\nu = 0,2$
 - součinitel teplotní roztažnosti: $\alpha = 1,0 \cdot 10^{-5} \text{ 1/}^{\circ}C$
- **Navržená betonářská výztuž: B 500 B**
 - charakteristická mez kluzu: $f_{yk} = 500 \text{ MPa}$
 - třída tažnosti: B – vysoká
 - objemová hmotnost oceli: $\rho_s = 7\,850 \text{ kg/m}^3$
 - návrhová hodnota modulu pružnosti: $E_s = 200 \text{ GPa}$

2.1.2. Turbosoustrojí

- **Stator turbíny a stator generátoru:** **materiál - konstrukční ocel**
 - náhradní objemová hmotnost udávaná dodavatelem: $\rho_S = 7\,800\text{ kg/m}^3$
 - modul pružnosti v tahu: $E = 210\text{ GPa}$
 - Poissonův součinitel: $\nu = 0,3$
 - modul pružnosti ve smyku: $G = 80,769\text{ GPa}$

- **Rotor turbíny:** **materiál - konstrukční ocel**
 - náhradní objemová hmotnost udávaná dodavatelem: $\rho_S = 8\,334\text{ kg/m}^3$
 - modul pružnosti v tahu: $E_S = 210\text{ GPa}$
 - Poissonův součinitel: $\nu = 0,3$
 - modul pružnosti ve smyku: $G = 80,769\text{ GPa}$

- **Rotor generátoru:** **materiál - konstrukční ocel**
 - náhradní objemová hmotnost udávaná dodavatelem: $\rho_S = 9\,338\text{ kg/m}^3$
 - modul pružnosti v tahu: $E_S = 210\text{ GPa}$
 - Poissonův součinitel: $\nu = 0,3$
 - modul pružnosti ve smyku: $G = 80,769\text{ GPa}$

2.2. Pružinové prvky Gerb

V projektu jsou navrženy celkem 4 typy pružinových prvků Gerb. Jejich tuhosti vstupující do výpočtů jsou převzaty z technických listů firmy Gerb a jsou uvedené v následující tabulce.

Označení	Maximální přípustné zatížení	Tuhost ve vertikálním směru	Tuhost v horizontálním směru
	F_{\max} [kN]	k_v [kN/m]	k_h [kN/m]
TVN-595	595	18 610	2 900
TVN-754	754	23 560	3 620
TVN-912	912	28 510	4 340
TN-1479	1475	46 220	6 820

Prvky TVN obsahují viskózní tlumiče, ale útlum byl při výpočtu zanedbán. Prvky s tlumičem jsou navrženy pouze pro snížení vibrací v přechodových stavech na nízkých frekvencích.

2.3. Ložiska rotorů turbíny a generátoru

V ložiscích rotorů turbíny a generátoru vstupují do výpočtů tuhosti olejového filmu. Značení tuhostí je dle dodavatele:

Směr xx – svisle, vertikálně

Směr yy – vodorovně, horizontálně

Matice tuhosti [kN/m] olejového filmu použitých ložisek je ve tvaru: $K = \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} \\ k_{yx} & k_{yy} \end{bmatrix}$

○ **Přední ložisko turbíny:** $K = \begin{bmatrix} 2\,832\,000 & 0 \\ 0 & 499\,500 \end{bmatrix}$

○ **Zadní ložisko turbíny:** $K = \begin{bmatrix} 1\,983\,000 & 0 \\ 0 & 380\,900 \end{bmatrix}$

○ **Přední a zadní ložisko generátoru:** $K = \begin{bmatrix} 1\,970\,240 & 0 \\ 0 & 294\,270 \end{bmatrix}$

2.4. Stojany turbíny

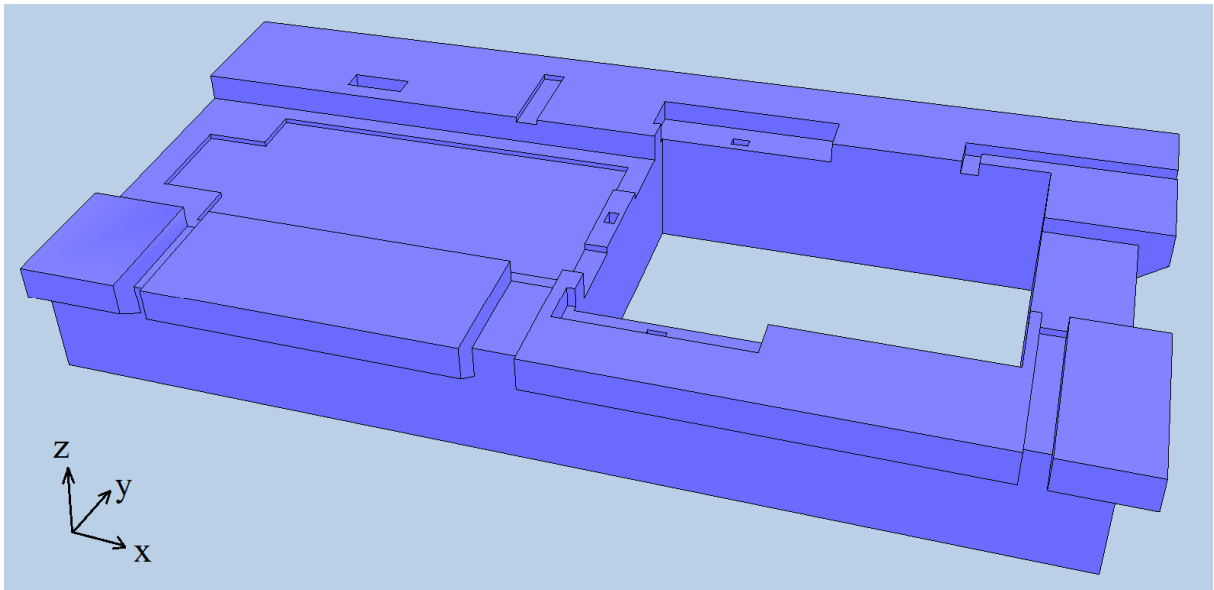
Hodnoty tuhostí uložení jsou stejné ve vertikálním i horizontálním směru:

$$k_v = k_h = 1,5 \cdot 10^6 \text{ kN/m}$$

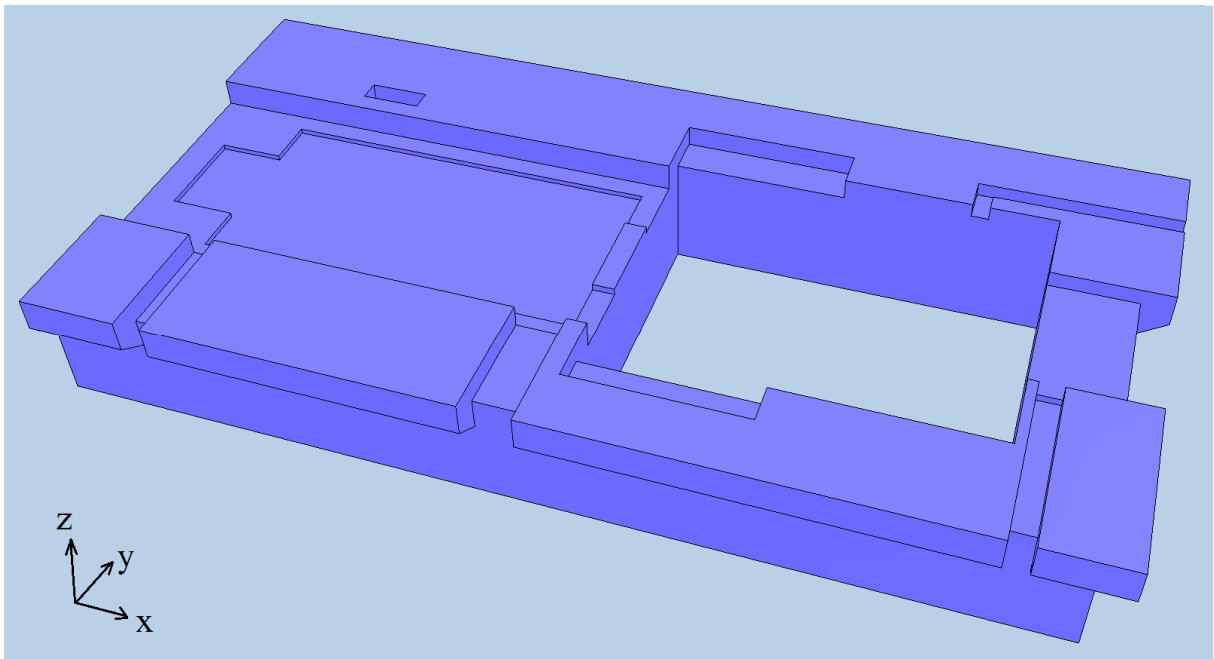
3. Statická analýza konstrukce

3.1. Prostorový model desky základu

Obr.: Navržená horní deska základu turbosoustrůj dle výkresu tvaru



Obr.: Vymodelovaná horní deska základu turbosoustrůj v MKP-programu



Globální souřadný systém 3D modelu

Každá ze 3 souřadných os je označena a její značení bude stejné v celém projektu:

Globální souřadná osa	Označení osy pro celý projekt	Poznámka
osa x	axiální	osa je rovnoběžná s osou rotoru, podélný směr desky
osa y	horizontální	osa je rovnoběžná s osami všech ložisek, příčný směr desky
osa z	vertikální	–

Rozdíly mezi deskou dle výkresu tvaru a MKP-modelem

Do prostorového modelu základové desky v programu Dlubal RFEM nebylo zahrnuto několik částí členitého horního povrchu desky, jejichž rozměry jsou velmi malé oproti rozměrům konstrukce, a tudíž nemají vliv na výsledky. Rozdíly mezi základovou deskou dle výkresu tvaru a MKP-modelem jsou patrné ze 2 obrázků na předchozí straně. Dále nebyly do modelu zahrnuty otvory sloužící pro vedení potrubí. Jejich průměr je několik centimetrů a procházejí deskou mezi pruty výztuže.

Souřadnice vymodelovaných uzlů

Vymodelovaným uzlům ležícím na spodním povrchu desky byla přiřazena z -ová souřadnice $z = 0 \text{ mm}$. Uzly ležící na horním členitém povrchu desky mají z -ové souřadnice od $z = 1\,900 \text{ mm}$ do $z = 2\,500 \text{ mm}$.

Prostorový model desky

Uzly byly spojeny liniemi, ze kterých byly vytvořeny všechny ohraničující plochy pro těleso. Všem plochám byl přiřazen stejný materiál jako tělesu, beton C 30/37 s materiálovými charakteristikami dle Eurokódu 2. Tělesu byla přiřazena objemová tíha 25 kN/m^3 a ohraničujícím plochám tělesa objemová tíha 0 kN/m^3 .

Modelování pružinových prvků Gerb

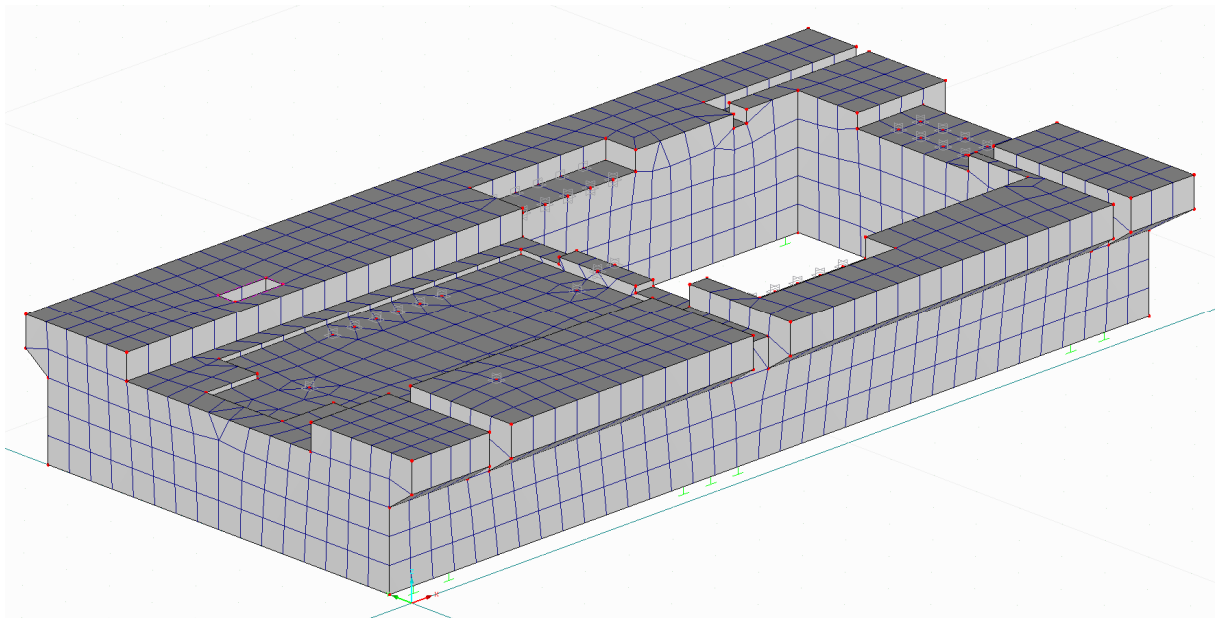
Prvky Gerb byly vymodelovány jako uzlové podpory – pružiny s tuhostí ve 3 směrech. Tuhost v horizontálním směru y je shodná s tuhostí v axiálním směru x . Hodnoty tuhostí viz předchozí kapitola **2.2. Pružinové prvky Gerb**.

Volba vygenerování sítě prvků

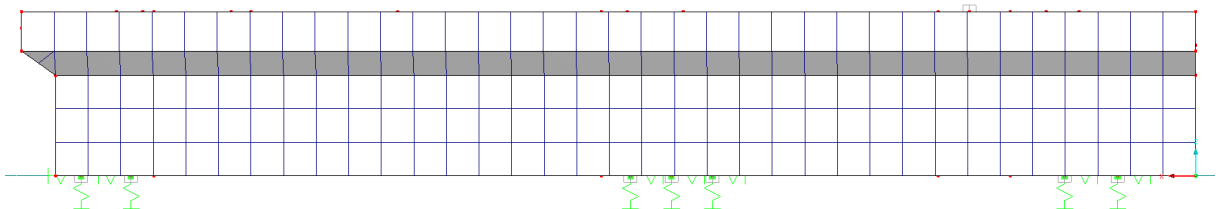
Program Dlubal RFEM generuje síť konečných prvků podle předem definovaných pravidel uživatelem. Přesnost výpočtu a jeho časová náročnost je nejvíce ovlivněna volbou délky konečných prvků (hustotou sítě). Těleso je rozděleno na prostorové 3D elementy tak, aby tam kde to je možné, měly stejnou délku stran do všech 3 směrů a tvořily krychle. Při nastavení sítě prvků byly vzaty v úvahu rozměry konstrukce základu a délka prvků byla zvolena 0,5 m. Při nejnižší a nejvyšší tloušťce desky 1,9 m až 2,5 m odpovídá počtu 4 až 5 elementů nad sebou, což je pro přesnost výpočtu dostačující.

Požadovaný tvar konečných prvků jsou čtyřúhelníky a jsou generovány stejné čtverce v místech, kde to je možné. V místech, kde nebylo možné vytvořit čtyřúhelníky, jsou vytvořeny trojúhelníky.

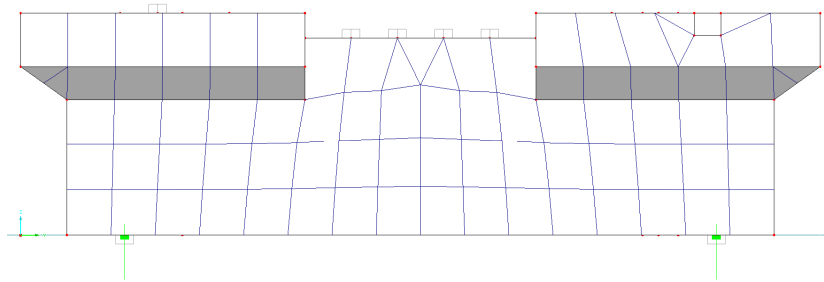
Obr.: Izometrický pohled na vymodelovanou desku základu



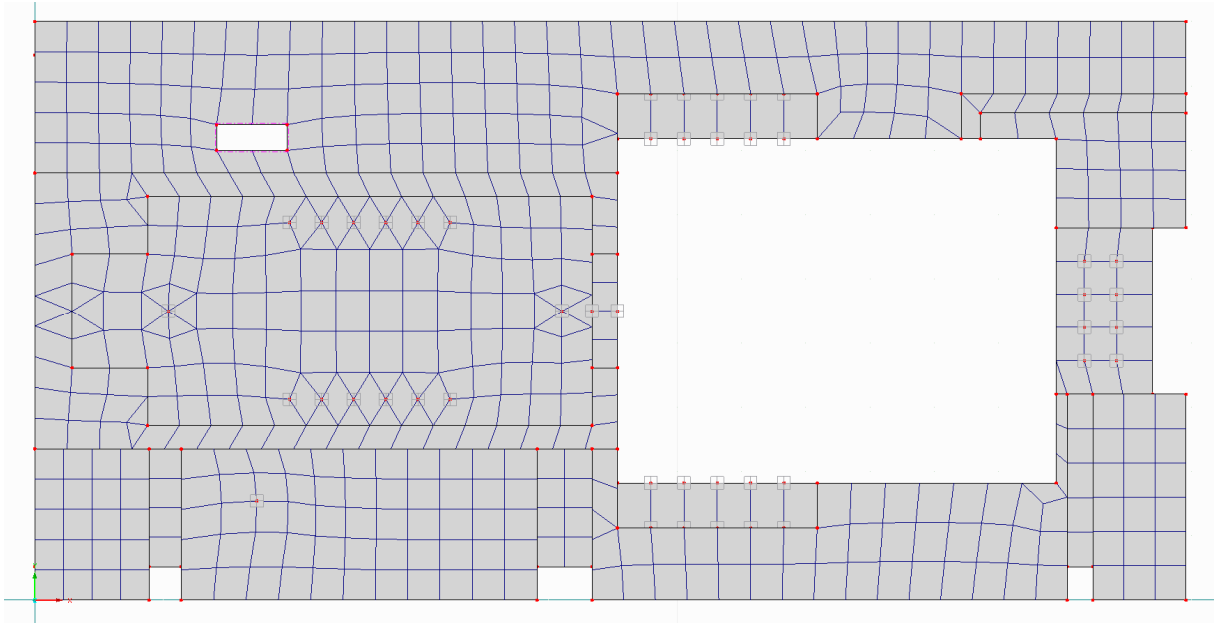
Obr.: Boční pohled na vymodelovanou desku základu



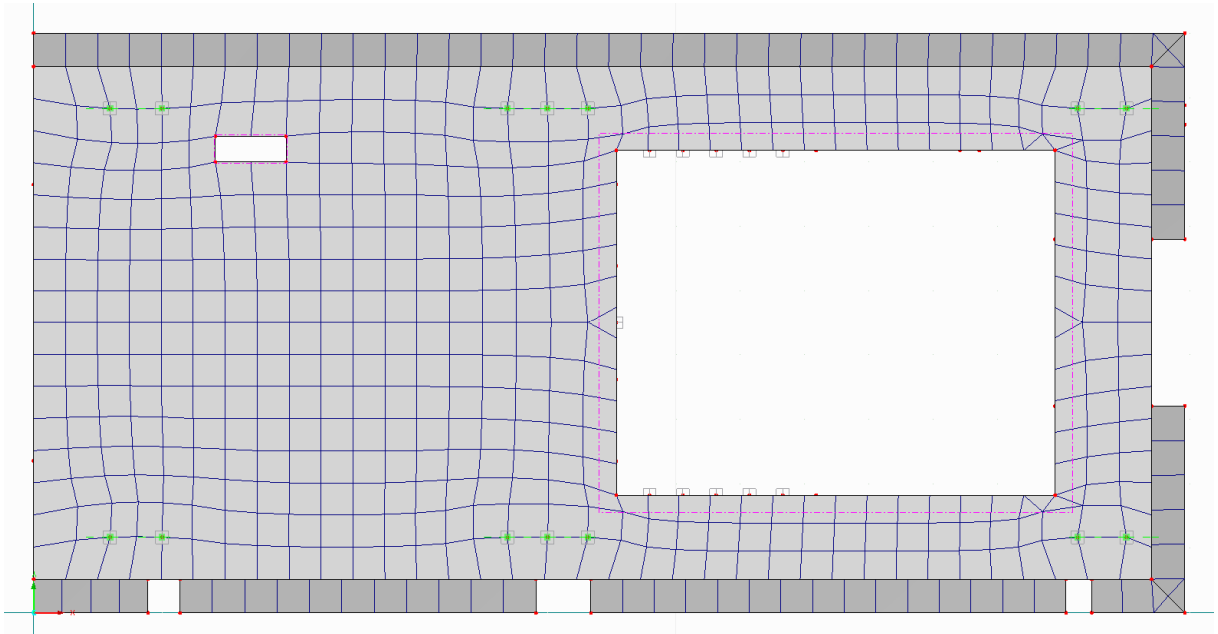
Obr.: Přední pohled na vymodelovanou desku základu



Obr.: Půdorys horního povrchu vymodelované desky základu



Obr.: Půdorys dolního povrchu vymodelované desky základu



3.2. Zatěžovací stavy pro statickou analýzu

Do statické analýzy vstupuje celkem 15 zatěžovacích stavů (ZS), které jsou uvedeny v následující tabulce.

Označení ZS	Název zatěžovacího stavu
ZS 1	Vlastní tíha horní desky základu a turbosoustrojí
ZS 2	Užitné zatížení
ZS 3	Rovnoměrná změna teploty celé desky o ± 15 °C
ZS 4	Nerovnoměrné zvýšení teploty uvnitř turbínového otvoru
ZS 5	Třecí síly
ZS 6	Zkrat generátoru
ZS 7	Dynamické budící síly od rotorů – axiálně
ZS 8	Dynamické budící síly od rotorů – vertikálně – stojan generátoru č. 1
ZS 9	Dynamické budící síly od rotorů – horizontálně – stojan generátoru č. 1
ZS 10	Dynamické budící síly od rotorů – vertikálně – stojan generátoru č. 2
ZS 11	Dynamické budící síly od rotorů – horizontálně – stojan generátoru č. 2
ZS 12	Dynamické budící síly od rotorů – vertikálně – stojan turbíny č. 1
ZS 13	Dynamické budící síly od rotorů – horizontálně – stojan turbíny č. 1
ZS 14	Dynamické budící síly od rotorů – vertikálně – stojan turbíny č. 2
ZS 15	Dynamické budící síly od rotorů – horizontálně – stojan turbíny č. 2

Tab.: Součinitele zatěžovacích stavů

Označení ZS	Minimální součinitel	Maximální součinitel
ZS 1	+0,90	+1,35
ZS 2	0	+1,50
ZS 3	-1,50	+1,50
ZS 4	0	+1,50
ZS 5	-1,50	+1,50
ZS 6	-1,70	+1,70
ZS 7	0	+25,00
ZS 8 až ZS 15	-25,00	+25,00

○ Popis zatěžovacích stavů

ZS 1 – Vlastní tíha horní desky základu a turbosoustrojí

Vlastní tíha horní desky základu je vypočtena automaticky programem při zadání objemové hmotnosti železobetonu 2500 kg/m^3 . Vlastní tíha turbosoustrojí je nahrazena zatížením osamělými břemeny [kN] působícími do uzlů vymodelované desky.

Pozn.: Do tohoto statického zatěžovacího stavu je kromě vlastní tíhy turbosoustrojí (tvořeného statorem a rotorem turbíny a generátoru) zahrnuto také zatížení od kondenzátoru, potrubí, izolací a dalších prvků tvořící zařízení elektrárny. V dynamické analýze je oproti tomu turbosoustrojí vymodelováno náhradními tělesy o ekvivalentní vlastní tíze statorů a rotorů turbíny a generátoru, ale vlastní tíha kondenzátoru a dalších prvků, které nespoluúčastní při kmitání, se v ní neuplatní.

ZS 2 – Užité zatížení

Je zadána charakteristická hodnota užitého zatížení 10 kN/m^2 . Užité zatížení je uvažováno pouze na přístupných plochách desky, tj. na krajích při obou delších stranách desky.

ZS 3 – Rovnoměrná změna teploty celé desky o $\pm 15 \text{ }^\circ\text{C}$

Jedná se o rovnoměrné ohřátí celé desky ($+15 \text{ }^\circ\text{C}$) anebo rovnoměrné ochlazení celé desky ($-15 \text{ }^\circ\text{C}$). Zatížení základové desky teplotou v tomto zatěžovacím stavu vyjadřuje možné změny teplot v hale elektrárny. Zadané zatížení teplotou s kladným součinitelem $+1,50$ platí pro ohřívání a se záporným součinitelem $-1,50$ pro ochlazování.

ZS 4 – Nerovnoměrné zvýšení teploty uvnitř turbínového otvoru

Za provozu stroje dochází ke zvýšení teploty desky základu. Největší nárůst teploty je pod ložiskovými stojany turbíny, a to $+20 \text{ }^\circ\text{C}$. Nárůst teploty v zadaných bodech po ploše desky je dle podkladů od dodavatele. Pro určení nárůstu teploty mimo zadané body je užito lineární interpolace.

ZS 5 – Třecí síly

Třecí síly [kN] jsou zadány v místech uložení turbíny a jsou vyvozeny teplotní dilatací. Zadané třecí síly s kladným součinitelem $+1,50$ platí pro ohřívání a se záporným součinitelem $-1,50$ pro ochlazování.

ZS 6 – Zkrat generátoru

Jedná se o mimořádné zatížení. Při zkratovém momentu jsou zadány reakce [kN] v místech kotvení generátoru. Součinitel $\pm 1,70$ byl užít z německé normy DIN 4024.

ZS 7 až ZS 15 – Dynamické budící síly od rotorů

Všechny budící síly v axiálním, horizontálním a vertikálním směru jsou zadány jako náhradní statické síly do statorů. Výpočet jejich velikostí, poloha působení a obrázky těchto 9 zatěžovacích stavů jsou uvedeny v kapitole **4.2. Dynamické zatěžovací stavy**.

Výpočet dynamického součinitele:

Dynamický součinitel δ se pro provozní frekvenci stroje 50 Hz vypočte dle následujícího vztahu:

$$\delta = \frac{1}{2 \cdot \xi}$$

, kde ξ vyjadřuje procenta kritického útlumu (tzv. poměrný útlum). Jedná se o bezrozměrnou veličinu.

Rozlišujeme 3 druhy útlumu:

- $\xi > 1$... nadkritický útlum
- $\xi = 1$... kritický útlum
- $\xi < 1$... podkritický útlum (uplatní se v našem případě u stavebních konstrukcí)

Při rezonanci jsou uvažovány 3% kritického útlumu: $\xi = 0,03$

Tato hodnota je dostatečně konzervativní pro zajištění bezpečnosti konstrukce.

Uvažovaná hodnota dynamického součinitele bude tedy:

$$\delta = \frac{1}{2 \cdot \xi} = \frac{1}{2 \cdot 0,03} = 16,67$$

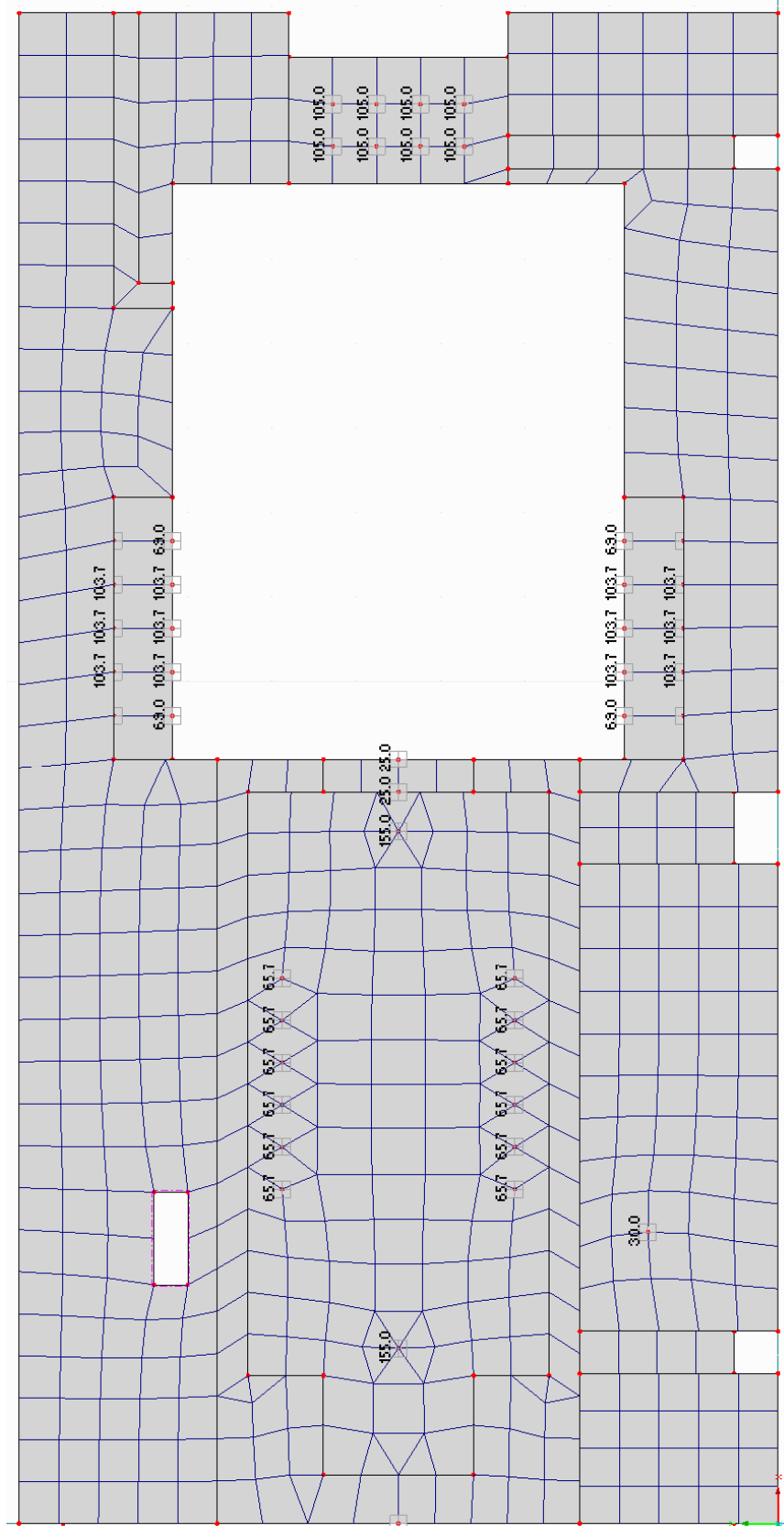
Mimořádné zatížení – upadnutí lopatky:

V budících silách s dynamickým součinitelem $\delta = 16,67$ jsou již zahrnuty síly vyvolané upadnutím lopatky. Samostatný zatěžovací stav s budícími silami vyvozenými upadnutím lopatky proto nebyl vytvořen.

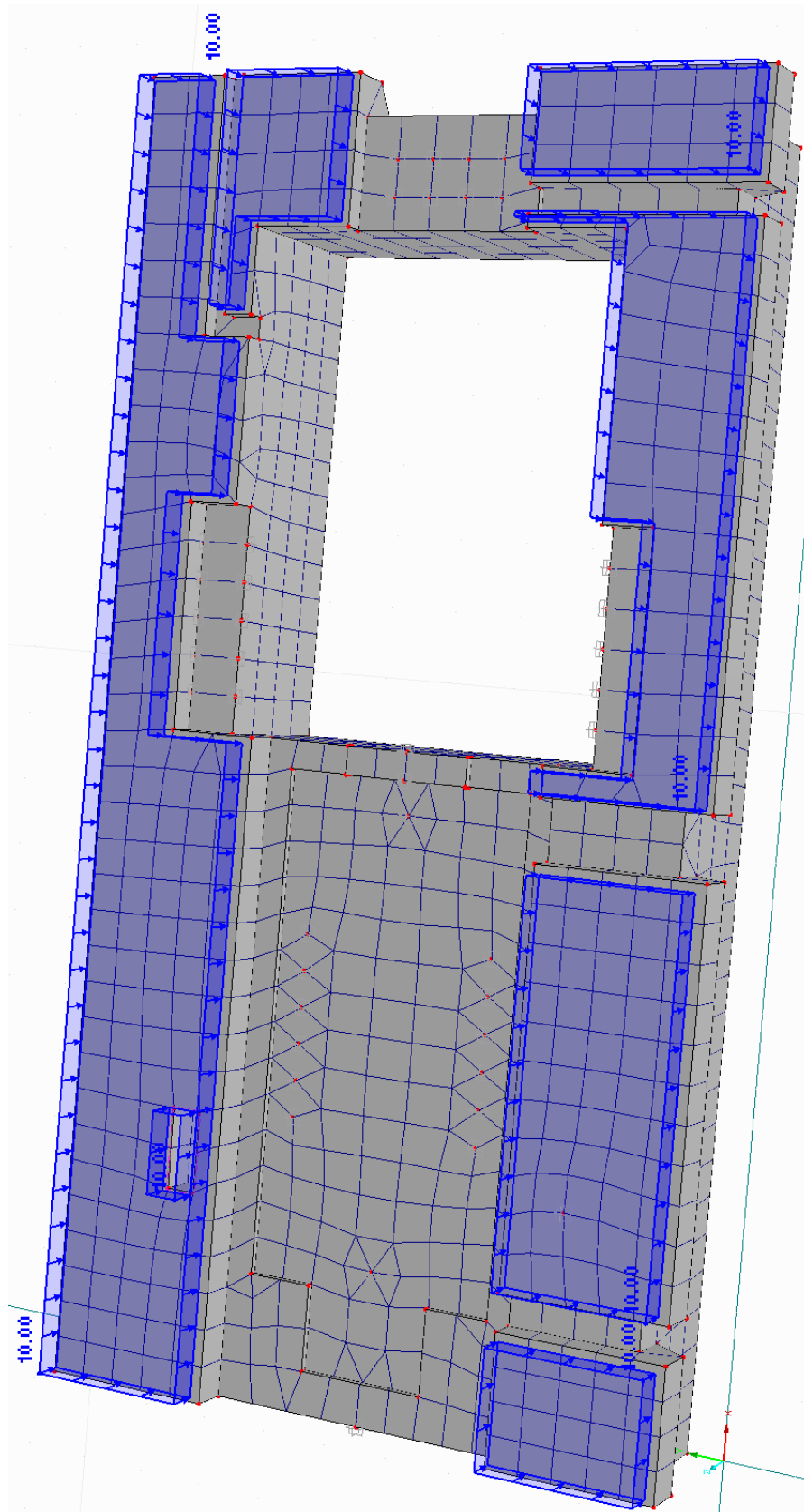
Součinitel pro zatěžovací stavy ZS 7 až ZS 15 – Dynamické budící síly od rotorů:

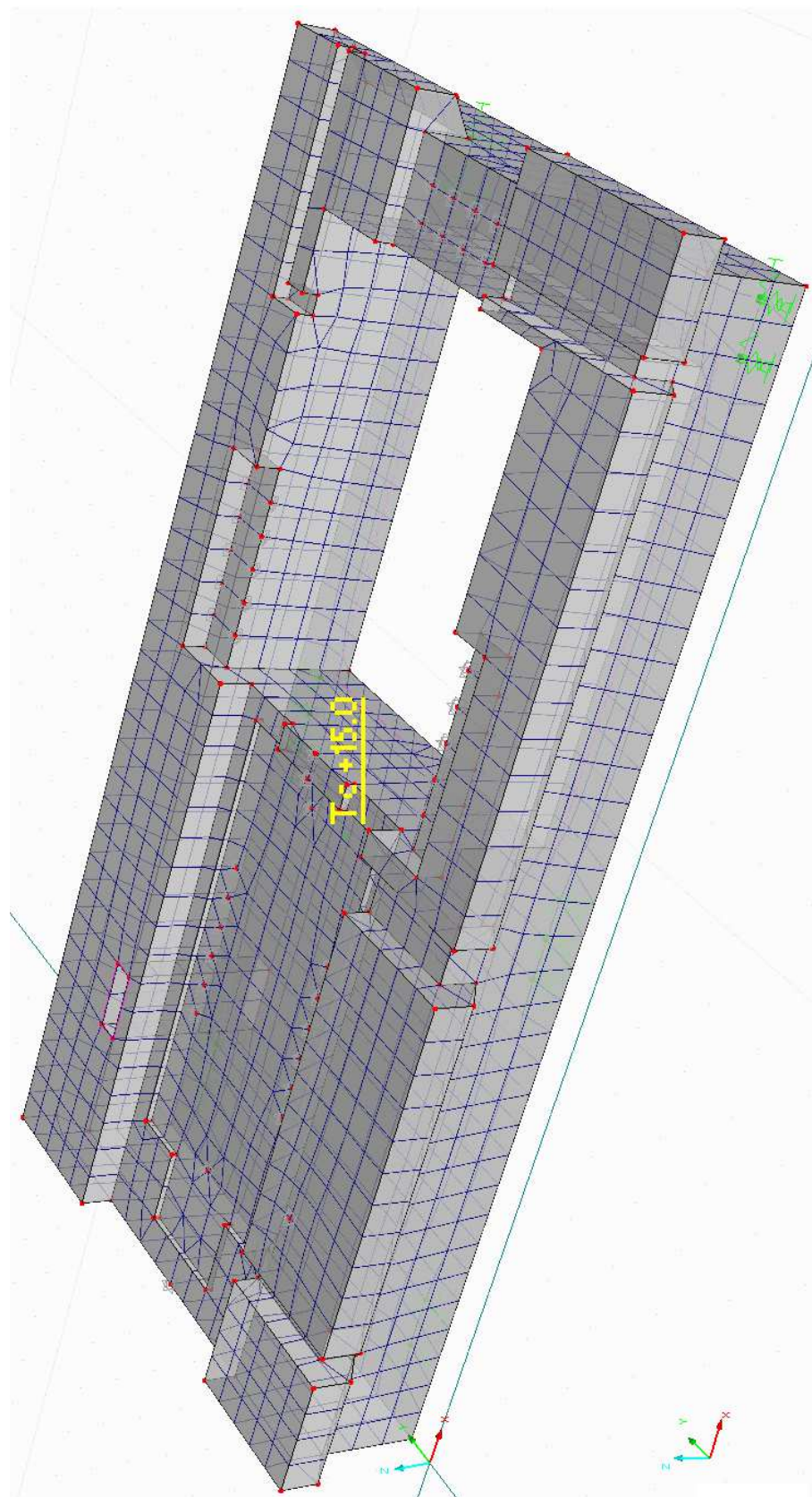
Vypočte se vynásobením dynamického součinitele δ součinitelem 1,50 dle Eurokódu:

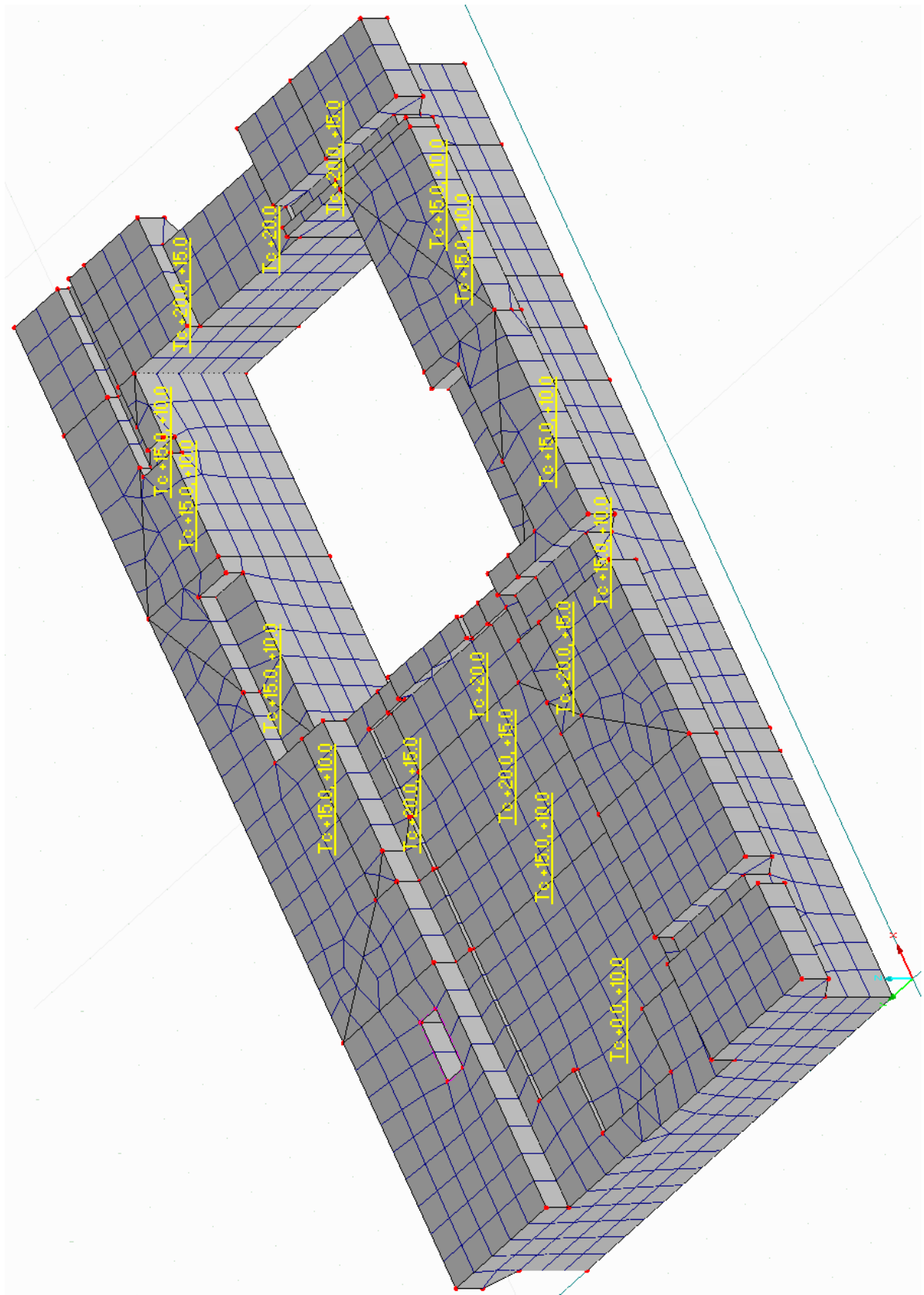
$$\gamma = 16,67 \cdot 1,5 = \mathbf{25}$$

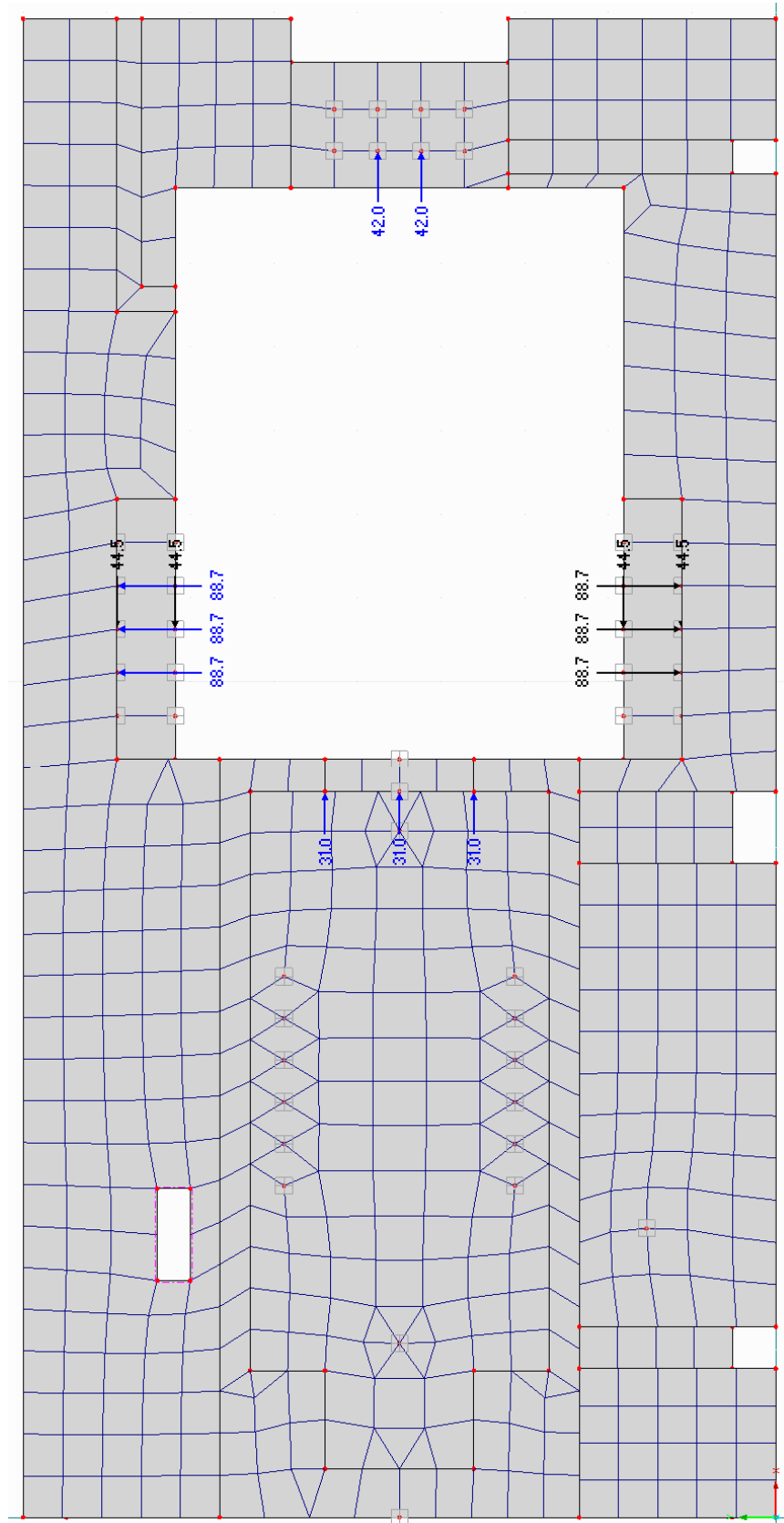
ZS 1 – Vlastní tíha horní desky základu a turbosoustrojí

ZS 2 – Užitéčné zatížení

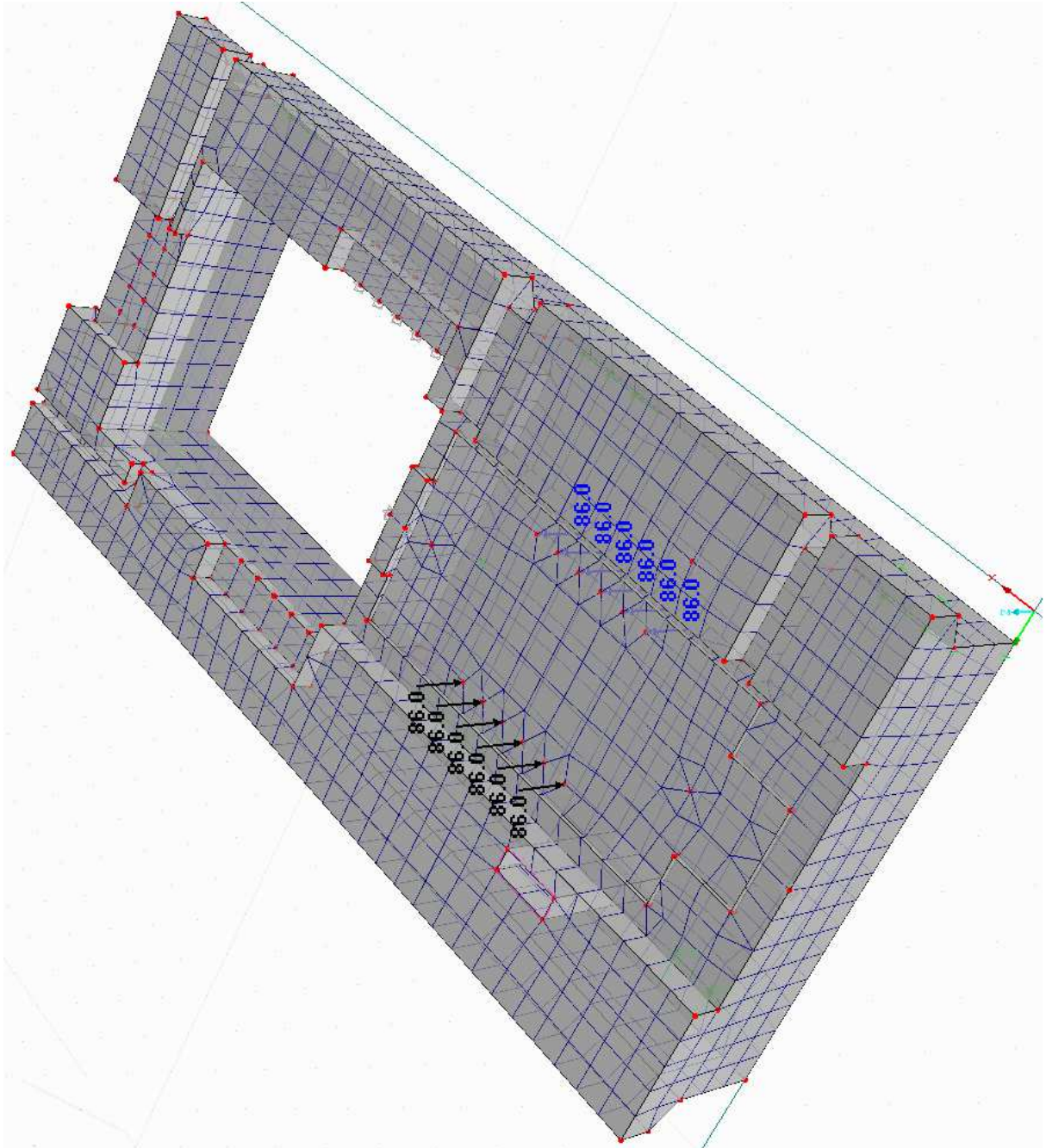


ZS 3 – Rovnoměrná změna teploty celé desky o $\pm 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 

ZS 4 – Nerovnoměrné zvýšení teploty uvnitř turbínového otvoru

ZS 5 – Třecí síly (ohřívání stroje)

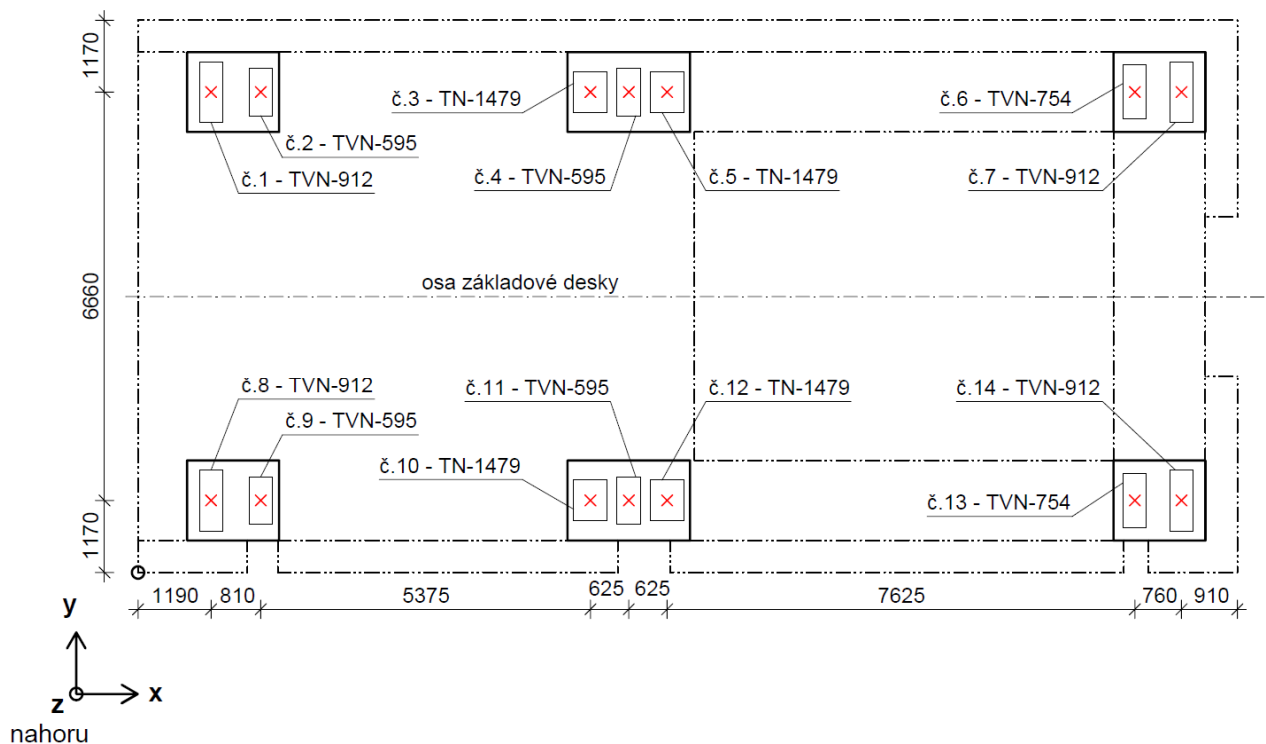
ZS 6 – Zkrat generátoru



3.3. Návrh a posouzení pružinových prvků Gerb

Při návrhu podepření základové desky pružinovými prvky Gerb platí pravidlo, že při navržení prvků na jedné straně desky musí být zrcadlově dle osy základové desky navrženy na druhé straně prvky stejné. Dle této osy je základová deska zatížena symetricky.

Obr.: Půdorys navržených pružinových prvků Gerb, jejich očíslování a těžiště jednotlivých prvků (červený křížek)



Pozn.: Přesná poloha navržených prvků Gerb vůči sloupům, na kterých jsou uloženy, a vůči konstrukci horní desky základu je zakreslena ve výkresové dokumentaci – výkres **D.1.2.3 Půdorys navržených pružinových prvků Gerb.**

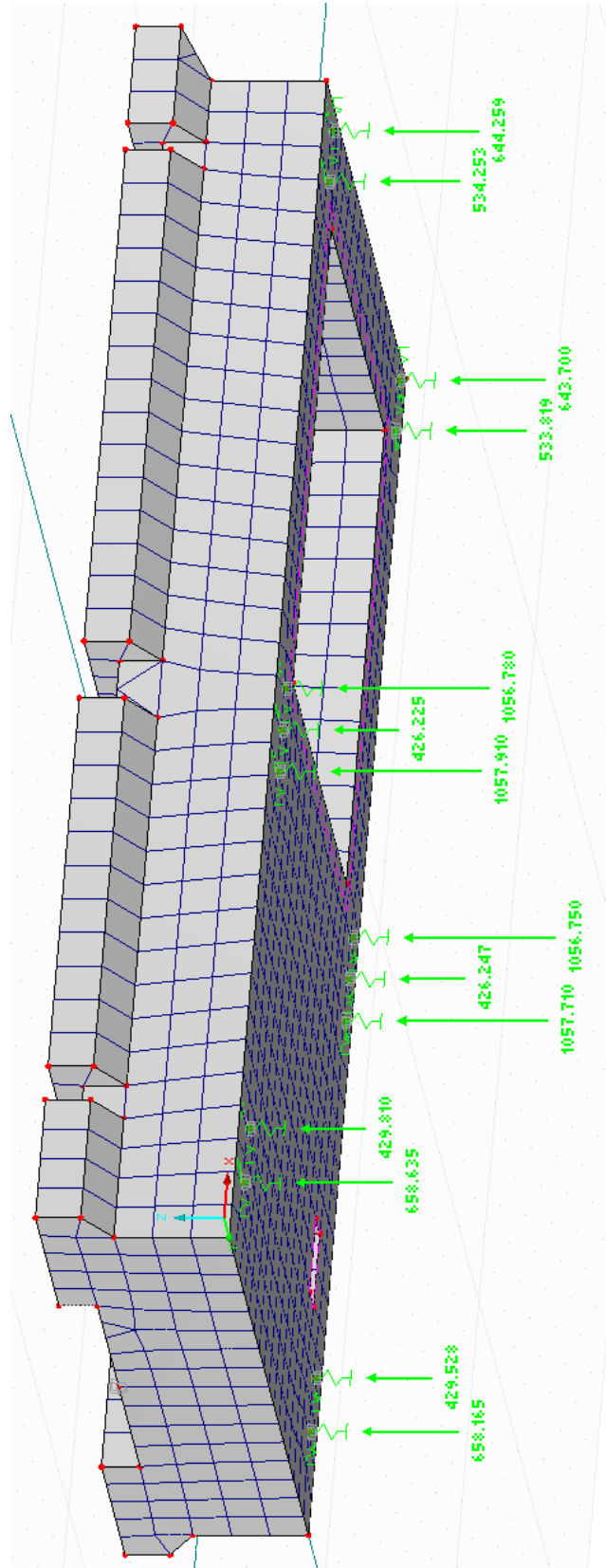
○ Posouzení pružinových prvků Gerb na maximální přípustné zatížení

Posouzení prvků Gerb se provádí porovnáním maximálního přípustného zatížení na jednotlivé prvky udávaného výrobcem v [kN] a velikostí jednotlivých reakcí ve vertikálním směru pružinových podpor v prostorovém modelu desky (bez vymodelovaného turbosoustrojí), které se získají ze statického zatěžovacího stavu **ZS 1 - Vlastní tíha horní desky základu a turbosoustrojí**. Tento zatěžovací stav obsahuje všechna stálá zatížení – vlastní tíhu desky základu, turbosoustrojí, kondenzátoru, potrubí, izolací a dalších prvků tvořící zařízení elektrárny. Pro posouzení prvků Gerb je součinitel zatěžovacího stavu roven 1,00.

Tab.: Posouzení pružinových prvků Gerb na maximální přípustné zatížení

Číslo prvku	Číslo uzlu v modelu	Označení řady prvků výrobcem	Maximální přípustné zatížení	Vertikální reakce pružinové podpory	Posouzení	Rezerva
			F_{\max} [kN]	R_z [kN]		
1	140	TVN-912	912	658,165	vyhovuje	27,8%
2	142	TVN-595	595	429,528	vyhovuje	27,8%
3	144	TN-1479	1475	1057,710	vyhovuje	28,3%
4	146	TVN-595	595	426,247	vyhovuje	28,4%
5	148	TN-1479	1475	1056,750	vyhovuje	28,4%
6	150	TVN-754	754	533,819	vyhovuje	29,2%
7	152	TVN-912	912	643,700	vyhovuje	29,4%
8	139	TVN-912	912	658,635	vyhovuje	27,8%
9	141	TVN-595	595	429,810	vyhovuje	27,8%
10	143	TN-1479	1475	1057,910	vyhovuje	28,3%
11	145	TVN-595	595	426,225	vyhovuje	28,4%
12	147	TN-1479	1475	1056,780	vyhovuje	28,4%
13	149	TVN-754	754	534,253	vyhovuje	29,1%
14	151	TVN-912	912	644,259	vyhovuje	29,4%

Obr.: Velikosti vertikálních reakcí pružinových podpor [kN] získané z prvního zatěžovacího stavu na prostorovém modelu desky (bez vymodelovaného turbosoustrojí)



○ Posouzení pružinových prvků Gerb na maximální přípustné stlačení

Pružinové prvky Gerb jsou navrženy tak, aby jejich stlačení bylo rovnoměrné po celé ploše desky.

Dle výrobce je limitní hodnota stlačení navržených pružinových prvků Gerb **32 mm** při zatížení vlastní tíhou konstrukce (odpovídá **ZS 1 - Vlastní tíha horní desky základu a turbosoustrojí**). Součinitel ZS 1 je roven 1,00.

Limitní hodnota stlačení pro mimořádné zatížení zkratem generátoru spolu s vlastní tíhou konstrukce je **48 mm** (odpovídá kombinaci zatěžovacích stavů **ZS 1 - Vlastní tíha horní desky základu a turbosoustrojí** a **ZS 6 - Zkrat generátoru**). Budou vypočteny dva případy zatížení zkratem generátoru pro součinitele ve vertikálním směru +1,00 a -1,00.

Tab.: Vytvořené kombinace zatěžovacích stavů pro posouzení maximálního přípustného stlačení

Označení kombinace	Popis	Zatěžovací stav a jeho součinitel		Zatěžovací stav a jeho součinitel	
		ZS 1	+1,00	ZS 6	+1,00
KZS 1	pouze vlastní tíha	ZS 1	+1,00	-	-
KZS 2	vlastní tíha + zkrat generátoru	ZS 1	+1,00	ZS 6	+1,00
KZS 3	vlastní tíha + zkrat generátoru	ZS 1	+1,00	ZS 6	- 1,00

Tab.: Posouzení pružinových prvků Gerb na maximální přípustné stlačení – KZS 1

Číslo prvku	Číslo uzlu v modelu	Označení řady prvků výrobcem	Maximální přípustné stlačení	Vypočtené stlačení	Posouzení	Rezerva
			$ u_{z,max} $ [mm]	$ u_z $ [mm]		
1	140	TVN-912	32	23,09	vyhovuje	27,8%
2	142	TVN-595	32	23,08	vyhovuje	27,9%
3	144	TN-1479	32	22,88	vyhovuje	28,5%
4	146	TVN-595	32	22,90	vyhovuje	28,4%
5	148	TN-1479	32	22,86	vyhovuje	28,6%
6	150	TVN-754	32	22,66	vyhovuje	29,2%
7	152	TVN-912	32	22,58	vyhovuje	29,4%
8	139	TVN-912	32	23,10	vyhovuje	27,8%
9	141	TVN-595	32	23,10	vyhovuje	27,8%
10	143	TN-1479	32	22,89	vyhovuje	28,5%
11	145	TVN-595	32	22,90	vyhovuje	28,4%
12	147	TN-1479	32	22,86	vyhovuje	28,6%
13	149	TVN-754	32	22,68	vyhovuje	29,1%
14	151	TVN-912	32	22,60	vyhovuje	29,4%

Tab.: Posouzení pružinových prvků Gerb na maximální přípustné stlačení – KZS 2

Číslo prvku	Číslo uzlu v modelu	Označení řady prvků výrobcem	Maximální přípustné stlačení	Vypočtené stlačení	Posouzení	Rezerva
			$ u_{z,max} $ [mm]	$ u_z $ [mm]		
1	140	TVN-912	48	24,15	vyhovuje	49,7%
2	142	TVN-595	48	24,15	vyhovuje	49,7%
3	144	TN-1479	48	23,93	vyhovuje	50,1%
4	146	TVN-595	48	23,94	vyhovuje	50,1%
5	148	TN-1479	48	23,89	vyhovuje	50,2%
6	150	TVN-754	48	23,59	vyhovuje	50,9%
7	152	TVN-912	48	23,50	vyhovuje	51,0%
8	139	TVN-912	48	22,04	vyhovuje	54,1%
9	141	TVN-595	48	22,03	vyhovuje	54,1%
10	143	TN-1479	48	21,84	vyhovuje	54,5%
11	145	TVN-595	48	21,86	vyhovuje	54,5%
12	147	TN-1479	48	21,83	vyhovuje	54,5%
13	149	TVN-754	48	21,75	vyhovuje	54,7%
14	151	TVN-912	48	21,68	vyhovuje	54,8%

Tab.: Posouzení pružinových prvků Gerb na maximální přípustné stlačení – KZS 3

Číslo prvku	Číslo uzlu v modelu	Označení řady prvků výrobcem	Maximální přípustné stlačení	Vypočtené stlačení	Posouzení	Rezerva
			$ u_{z,max} $ [mm]	$ u_z $ [mm]		
1	140	TVN-912	48	22,01	vyhovuje	54,1%
2	142	TVN-595	48	22,01	vyhovuje	54,1%
3	144	TN-1479	48	21,84	vyhovuje	54,5%
4	146	TVN-595	48	21,86	vyhovuje	54,5%
5	148	TN-1479	48	21,83	vyhovuje	54,5%
6	150	TVN-754	48	21,72	vyhovuje	54,8%
7	152	TVN-912	48	21,65	vyhovuje	54,9%
8	139	TVN-912	48	24,17	vyhovuje	49,6%
9	141	TVN-595	48	24,16	vyhovuje	49,7%
10	143	TN-1479	48	23,94	vyhovuje	50,1%
11	145	TVN-595	48	23,95	vyhovuje	50,1%
12	147	TN-1479	48	23,90	vyhovuje	50,2%
13	149	TVN-754	48	23,61	vyhovuje	50,8%
14	151	TVN-912	48	23,52	vyhovuje	51,0%

Závěr: Všechny navržené pružinové podpory horní desky základu VYHOVUJÍ na maximální přípustné zatížení a stlačení.

3.4. Výpočet a posouzení deformací od teploty

Jsou vypočteny deformace ze zatěžovacího stavu **ZS 4 – Nerovnoměrné zvýšení teploty uvnitř turbínového otvoru.**

Při modelování musí být dodrženy následující pravidla:

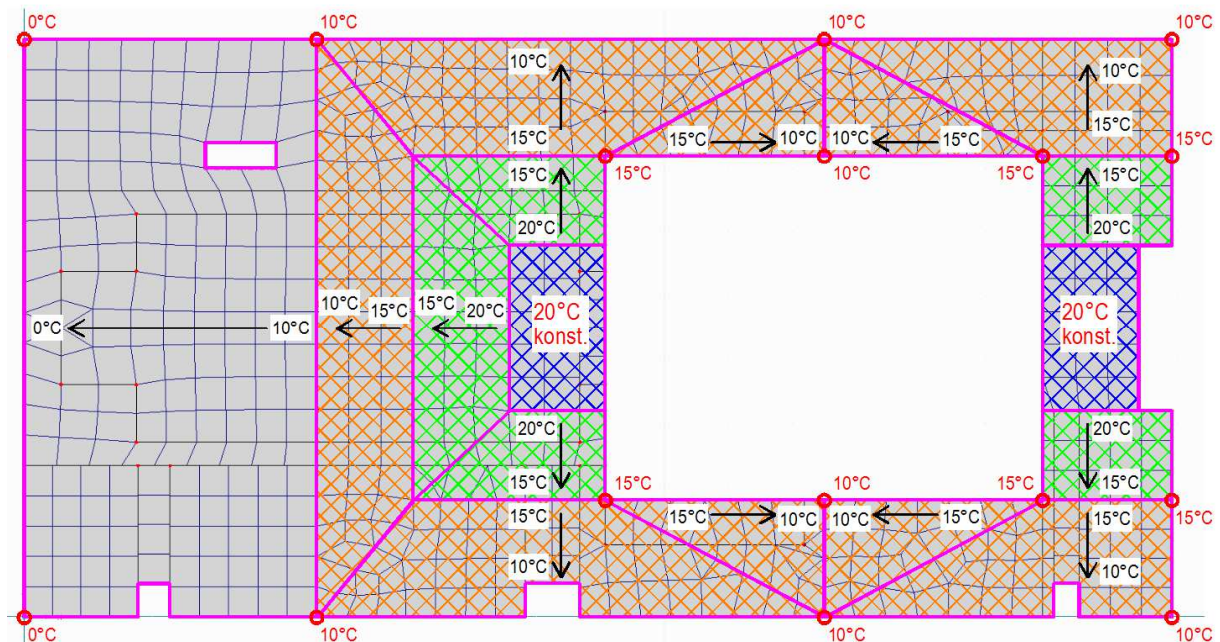
- všechny teploty jsou vyjádřeny jako relativní nárůst teploty vůči okolní teplotě
- plochy pod ložiskovými stojany mají konstantní nárůst teploty o $+20\text{ °C}$
- pro určení teploty v jakémkoliv místě mezi zadanými body bude užito lineární interpolace
- rozložení teploty ve vertikálním směru z bude uvažováno všude konstantní od horního povrchu desky ke spodnímu povrchu desky

Vymodelování teplotní úlohy

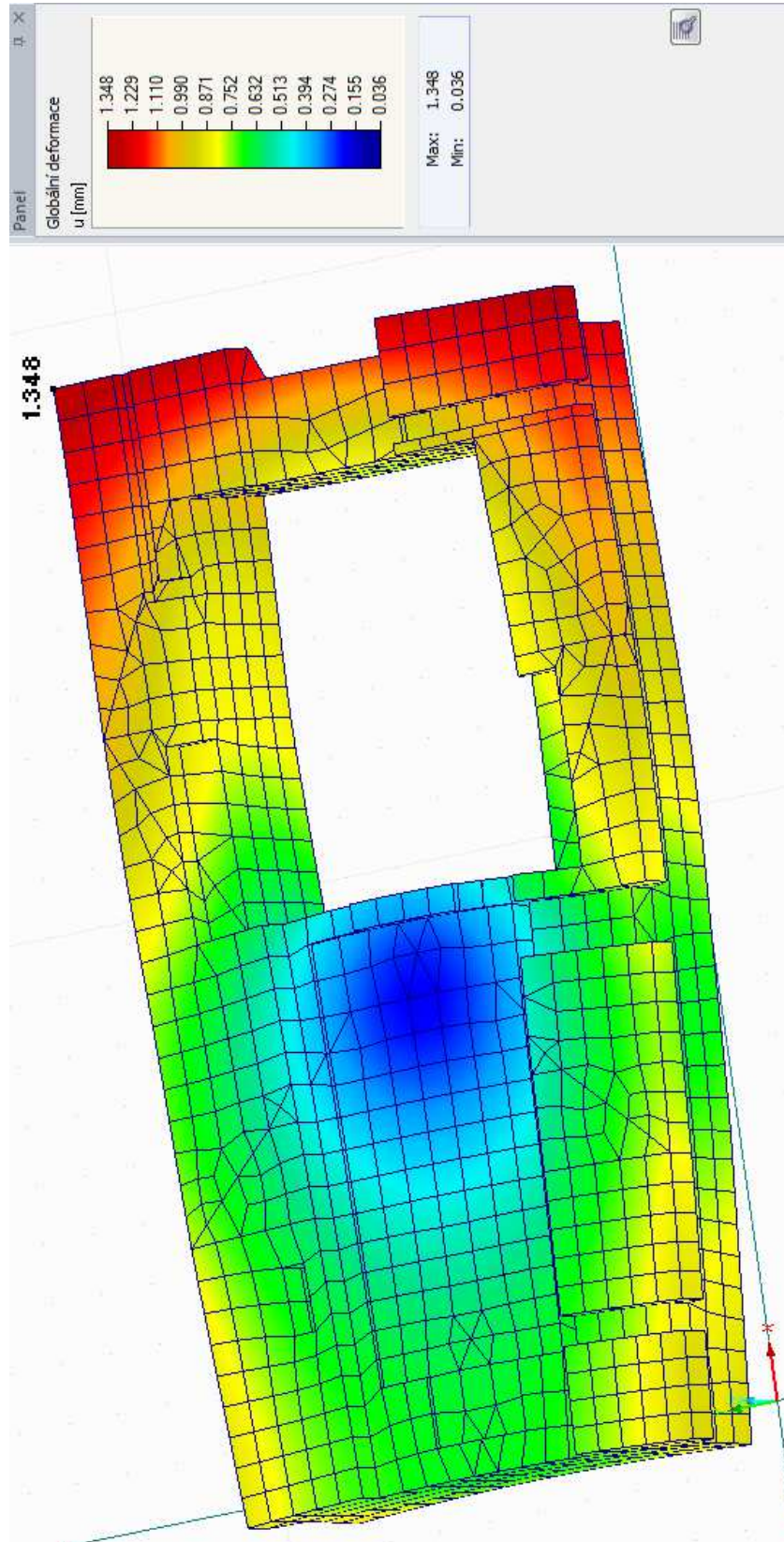
Vymodelované těleso desky základu bylo rozděleno na celkem 17 menších těles, do kterých bylo zadáno zatížení lineárním nebo konstantním nárůstem teploty ve směrech x a y . Na následujícím obrázku je znázorněno rozložení teploty po ploše desky a jsou vyznačeny:

- fialově plnými čarami rozdělení desky základu na 17 menších těles
- červeně body zadané dodavatelem, jedná se o nárůsty teploty o $+15\text{ °C}$, $+10\text{ °C}$ a 0 °C
- modrou šrafovou konstantní nárůst teploty o $+20\text{ °C}$ pod ložiskovými stojany
- zelenou šrafovou lineární nárůst teploty o $+15\text{ °C}$ až $+20\text{ °C}$
- oranžovou šrafovou lineární nárůst teploty o $+10\text{ °C}$ až $+15\text{ °C}$

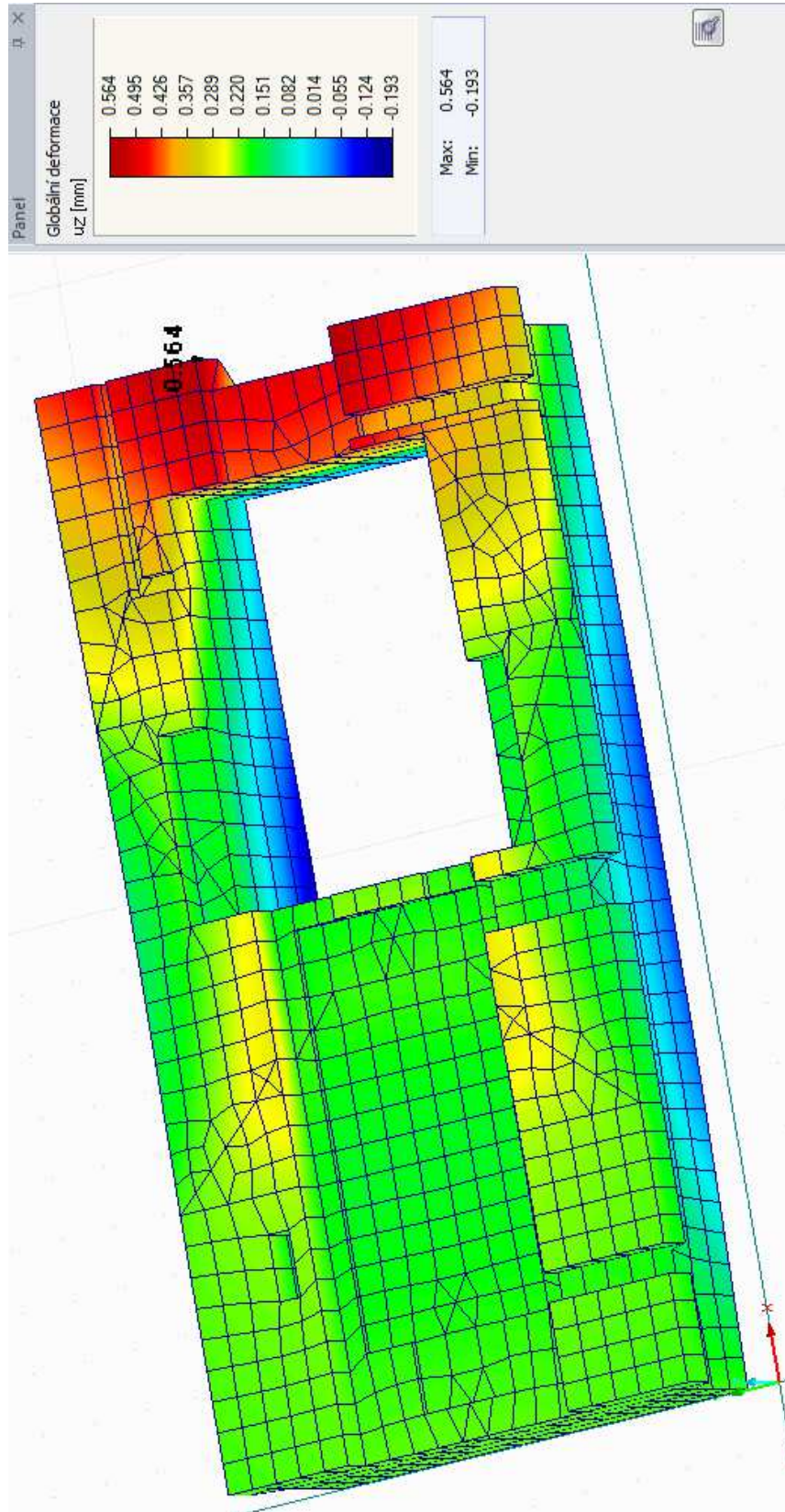
Obr.: Zatížení teplotou po ploše desky



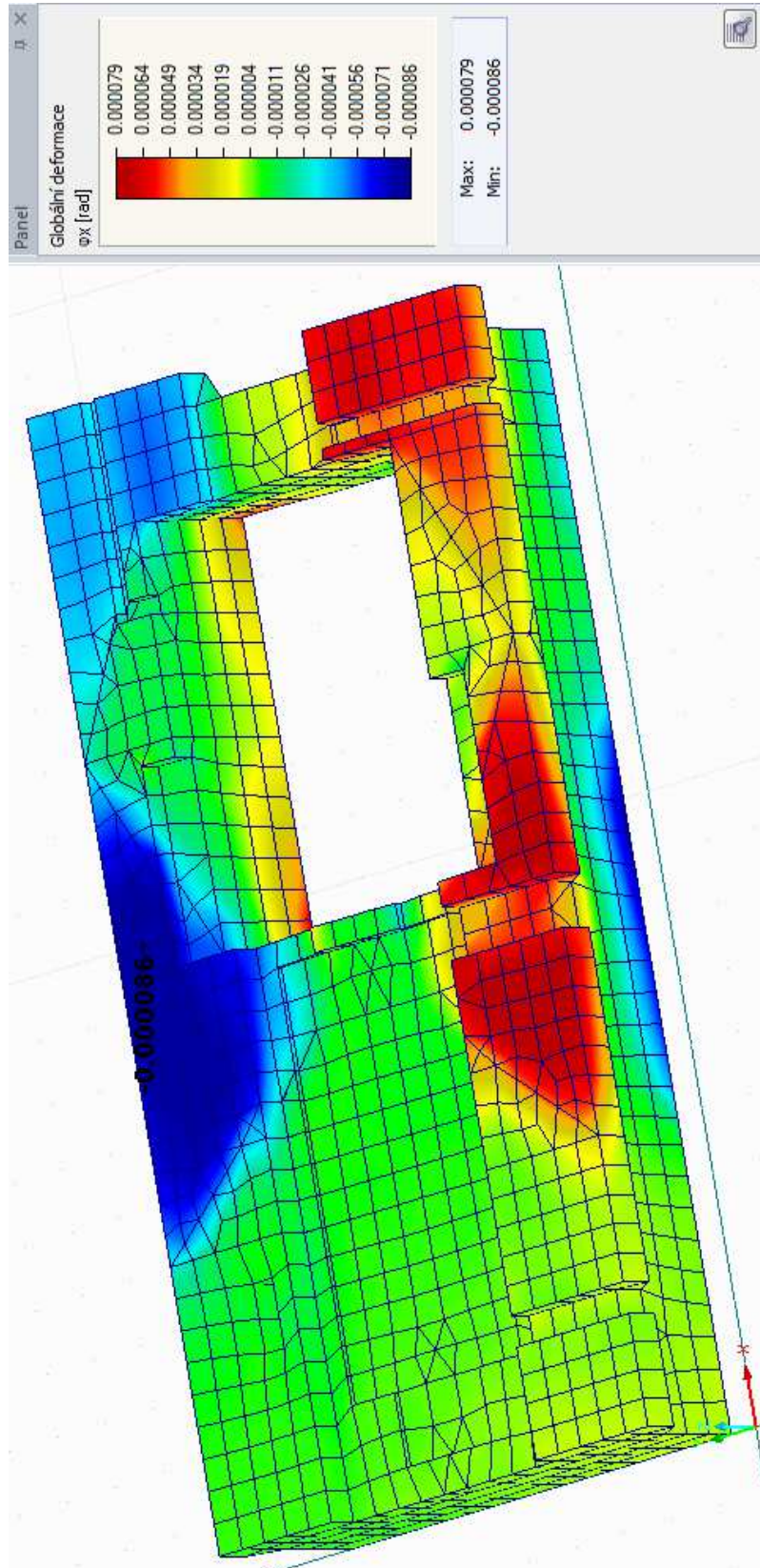
Obr.: Deformace od nerovnoměrného zvýšení teploty uvnitř turbínového otvoru – celkový posun



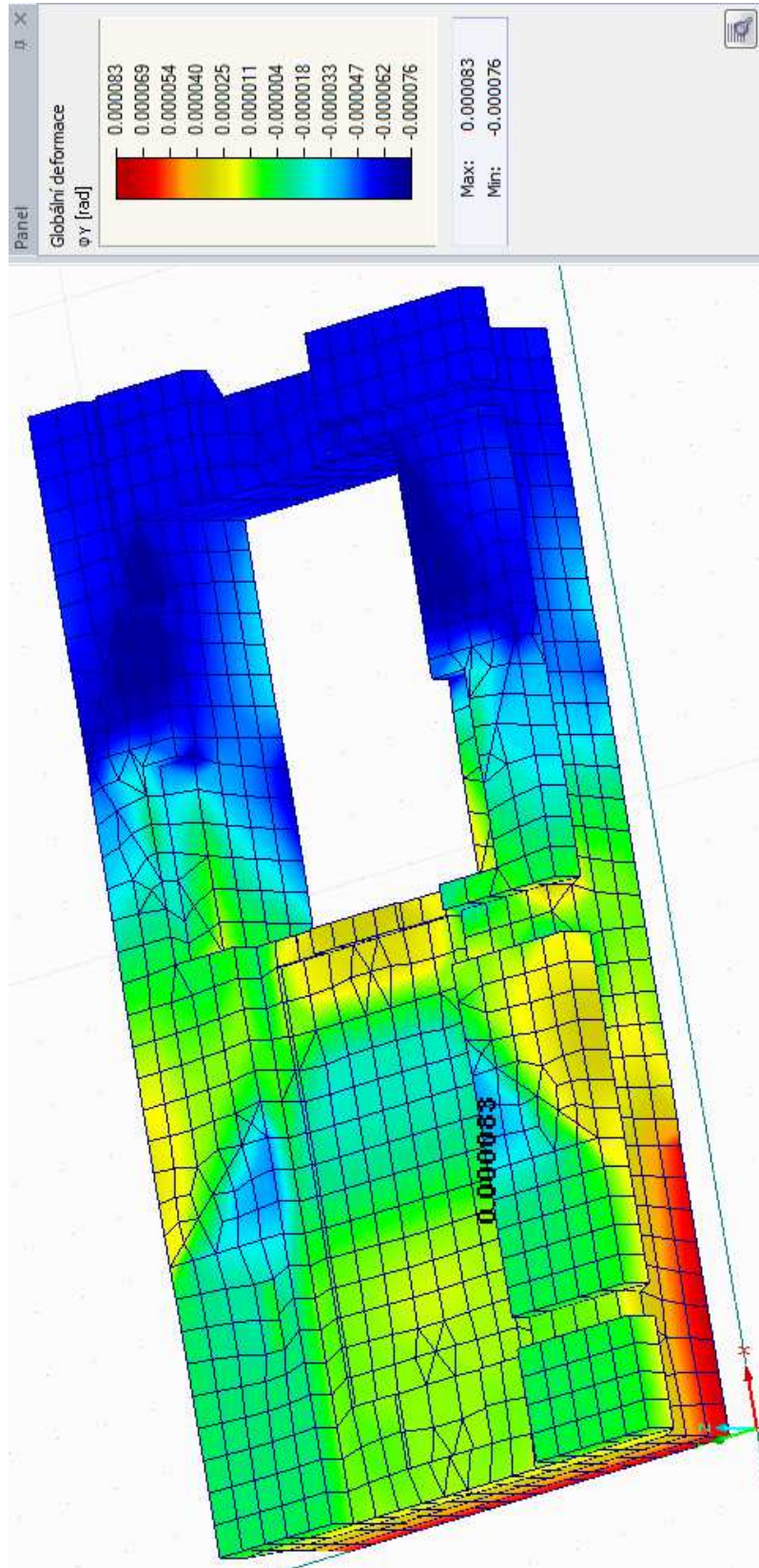
Obr.: Deformace od nerovnoměrného zvýšení teploty uvnitř turbínového otvoru – posun ve směru globální osy z



Obr.: Deformace od nerovnoměrného zvýšení teploty uvnitř turbínového otvoru – pootočení okolo globální osy x



Obr.: Deformace od nerovnoměrného zvýšení teploty uvnitř turbínového otvoru – pootočení okolo globální osy y



○ Posouzení deformací od teploty

Musí být splněny 2 následující kritéria určená dodavatelem stroje:

- Kritérium posuvů:

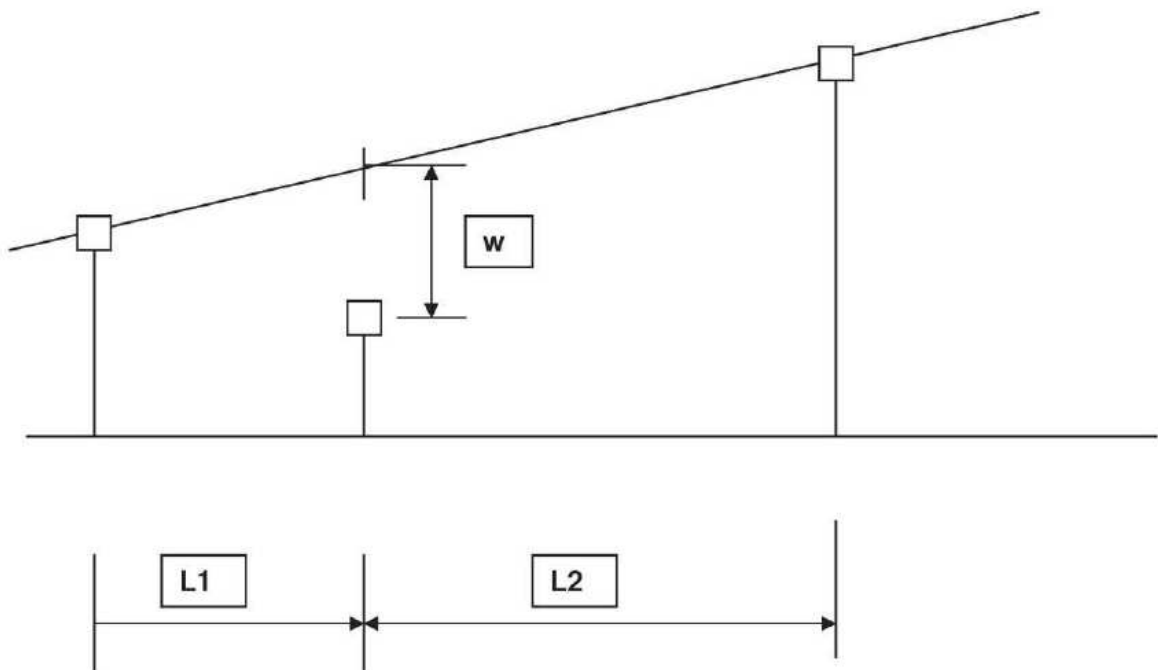
$$\frac{\Delta w}{L_1} < 1,0 \cdot 10^{-4} \qquad \frac{\Delta w}{L_2} < 1,0 \cdot 10^{-4}$$

- Kritérium pootočení:

$$\Delta\alpha < 1,0 \cdot 10^{-4} \text{ rad}$$

Pozn.: Kritérium pootočení je přísnější oproti požadavkům normy ČSN 73 1020 Navrhování základů točivých strojů, která udává: $\Delta\alpha < 2,0 \cdot 10^{-4} \text{ rad}$

Obr.: Kritéria svislých posuvů

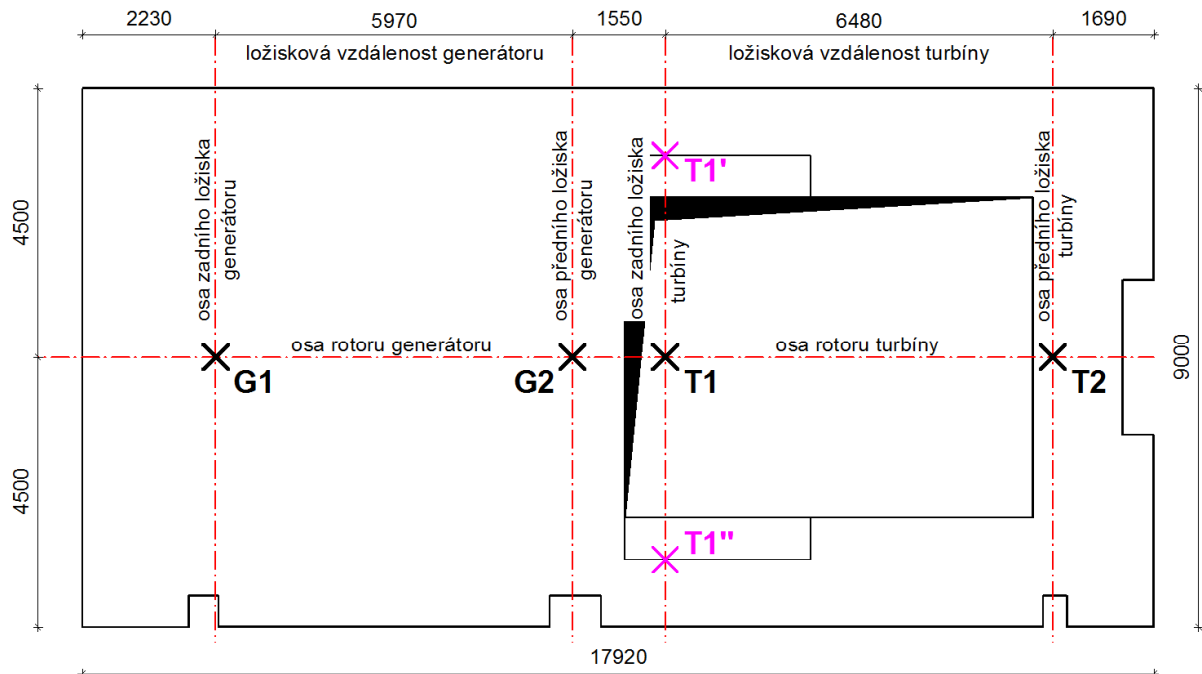


Δw [mm] ... absolutní hodnota rozdílu svislé složky posunu v ložiskové podpoře a spojnice posuvů ve dvou sousedních ložiskových podporách

L_1, L_2 [mm] ... půdorysná vzdálenost mezi posuzovanými ložiskovými podporami

$\Delta\alpha$ [rad] ... úhel pootočení ložiskové podpory po vyrovnání a sespojování rotoru

Obr.: Označení 4 míst posuzovaných ložiskových podpor G1, G2, T1 a T2



- místa ložiskových podpor generátoru: zadní G1, přední G2
- místa ložiskových podpor turbíny: zadní T1, přední T2

Pozn.: Hodnota svislých posuvů v bodě T1 se získá aritmetickým průměrem z hodnot ve 2 uzlech T1' a T1'' ložiskových podpor turbíny vyznačených fialově. Pootočení budou vyhodnocena v obou uzlech T1' a T1'' ložiskových podpor turbíny.

Kladné znaménko u pootočení okolo globálních os x a y je určeno pravidlem pravé ruky. Kladné znaménko u svislých posuvů značí směr nahoru ve směru globální osy z .

$\Delta\alpha_x$ [rad] – pootočení okolo globální osy x

$\Delta\alpha_y$ [rad] – pootočení okolo globální osy y

Tab.: Vypočtené hodnoty pootočení

Ložisková podpora	Číslo uzlu v modelu	$\Delta\alpha_x$ [10^{-4} rad]	$\Delta\alpha_y$ [10^{-4} rad]	Přípustná hodnota [10^{-4} rad]	Posouzení
G1	168	0,02	0,13	1,0	vyhovuje
G2	177	-0,05	0,27	1,0	vyhovuje
T1'	181	-0,52	-0,16	1,0	vyhovuje
T1''	182	0,38	-0,08	1,0	vyhovuje
T2	178	0,07	-0,58	1,0	vyhovuje

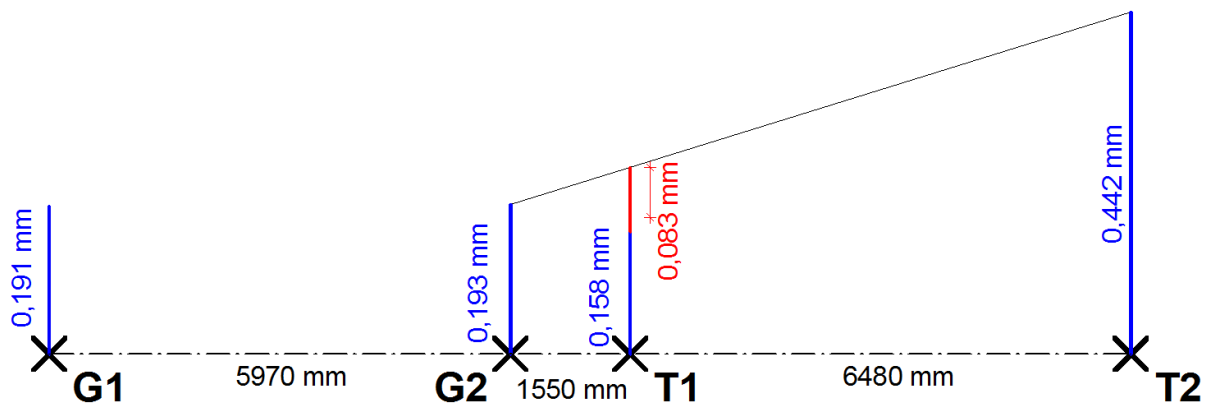
Tab.: Vypočtené hodnoty svislých posunů u_z

Ložisková podpora	Číslo uzlu v modelu	u_z [mm]	Označení posunu
G1	168	0,191	w_1
G2	177	0,193	w_2
T1'	181	0,156	w_3
T1''	182	0,160	
T2	178	0,442	w_4

Výpočet posunu v bodě T1:

$$w_3 = \frac{0,156 + 0,160}{2} = 0,158 \text{ mm}$$

Obr.: Grafické znázornění velikostí posunů (modře) a půdorysných vzdáleností mezi posuzovanými ložiskovými podporami – výpočet Δw nad T1 (červeně)



Výpočet pro ložiskovou podporu T1:

$$\frac{\Delta w}{L_1} < 1,0 \cdot 10^{-4}$$

$$\frac{\Delta w}{L_2} < 1,0 \cdot 10^{-4}$$

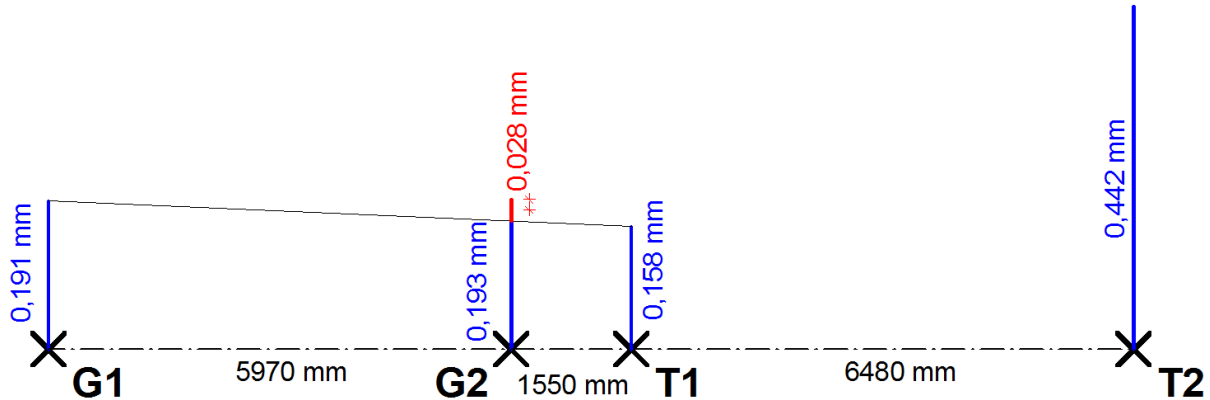
$$\frac{0,083}{1550} < 1,0 \cdot 10^{-4}$$

$$\frac{0,083}{6480} < 1,0 \cdot 10^{-4}$$

$$0,54 \cdot 10^{-4} < 1,0 \cdot 10^{-4}$$

$$0,13 \cdot 10^{-4} < 1,0 \cdot 10^{-4}$$

Obr.: Grafické znázornění velikostí posunů (modře) a půdorysných vzdáleností mezi posuzovanými ložiskovými podporami – výpočet Δw nad G2 (červeně)



Výpočet pro ložiskovou podporu G2:

$$\frac{\Delta w}{L_1} < 1,0 \cdot 10^{-4}$$

$$\frac{0,028}{5970} < 1,0 \cdot 10^{-4}$$

$$0,05 \cdot 10^{-4} < 1,0 \cdot 10^{-4}$$

$$\frac{\Delta w}{L_2} < 1,0 \cdot 10^{-4}$$

$$\frac{0,028}{1550} < 1,0 \cdot 10^{-4}$$

$$0,18 \cdot 10^{-4} < 1,0 \cdot 10^{-4}$$

Závěr: Všechny posuny a natočení pod ložiskovými podporami v důsledku nerovnoměrného zatížení teplotou jsou VYHOVUJÍCÍ.

3.5. Výpočet a posouzení dlouhodobých deformací v důsledku dotvarování betonu

Jsou vypočteny deformace ze zatěžovacího stavu **ZS 1 – Vlastní tíha horní desky základu a turbosoustrojí**.

Počáteční deformace před vyrovnáním stroje vyvolané vlastní tíhou desky základu a stroje jsou vypočteny na modelu se statickým modulem pružnosti $E_c = 33 \text{ GPa}$. Deformace po vyrovnání stroje musí být nulové.

Výpočet a posouzení dlouhodobých deformací bude proveden po 50 letech s použitím konečného součinitele dotvarování $\varphi(\infty, t_0)$, pomocí kterého bude vypočtena hodnota modulu pružnosti uvažovaná po 50 letech.

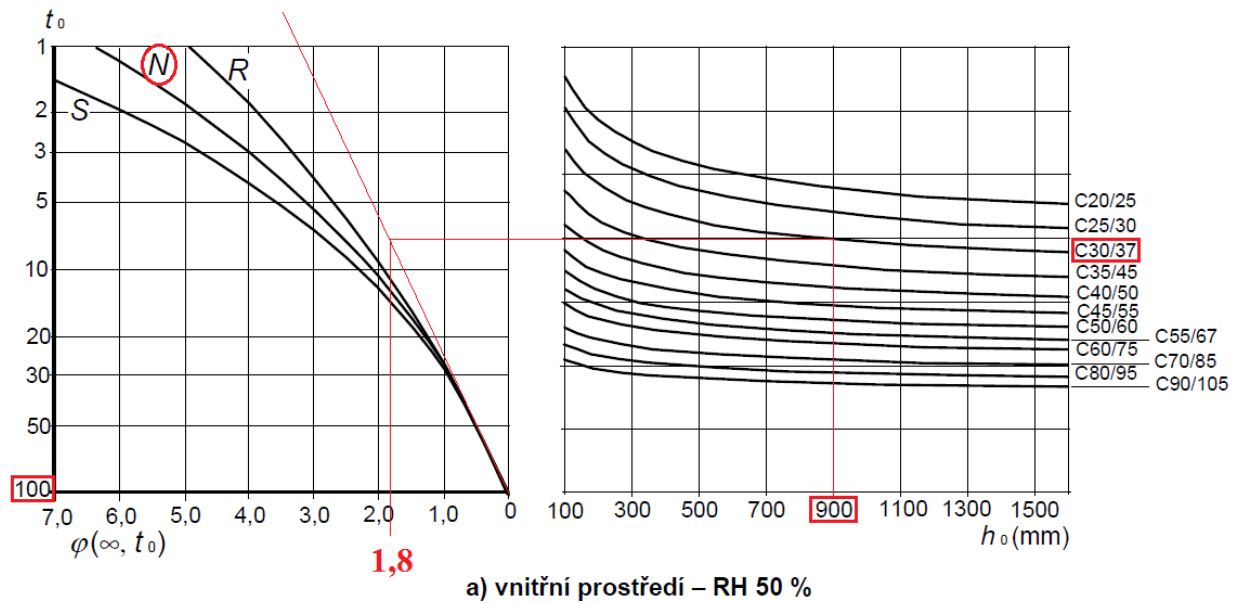
Určení konečného součinitele dotvarování $\varphi(\infty, t_0)$ z grafu:

Uvažováno:

- vnitřní prostředí – relativní vlhkost 50%
- stáří betonu v okamžiku zatížení ve dnech t_0 :
 - pro $t_0 > 100$ je dostatečně přesné předpokládat $t_0 = 100$ a použít tečnu
- třída cementu N
- třída betonu C 30/37
- náhradní rozměr průřezu $h_0 = \frac{2 \cdot A_c}{u}$, kde A_c je průřezová plocha betonu a u je obvod části betonu vystavené vysychání:
 - uvažován obdélníkový průřez pod přední ložiskovou podporou turbíny T2 – šířka průřezu $b = 1,50 \text{ m}$ a výška průřezu $h = 2,22 \text{ m}$

$$h_0 = \frac{2 \cdot A_c}{u} = \frac{2 \cdot b \cdot h}{2 \cdot b + 2 \cdot h} = \frac{2 \cdot 1,5 \cdot 2,22}{2 \cdot 1,5 + 2 \cdot 2,22} = 0,9 \text{ m} = 900 \text{ mm}$$

Obr.: Určení konečného součinitele dotvarování $\varphi(\infty, t_0)$ z grafu



Konečný součinitel dotvarování byl určen:

$$\varphi(\infty, t_0) = 1,80$$

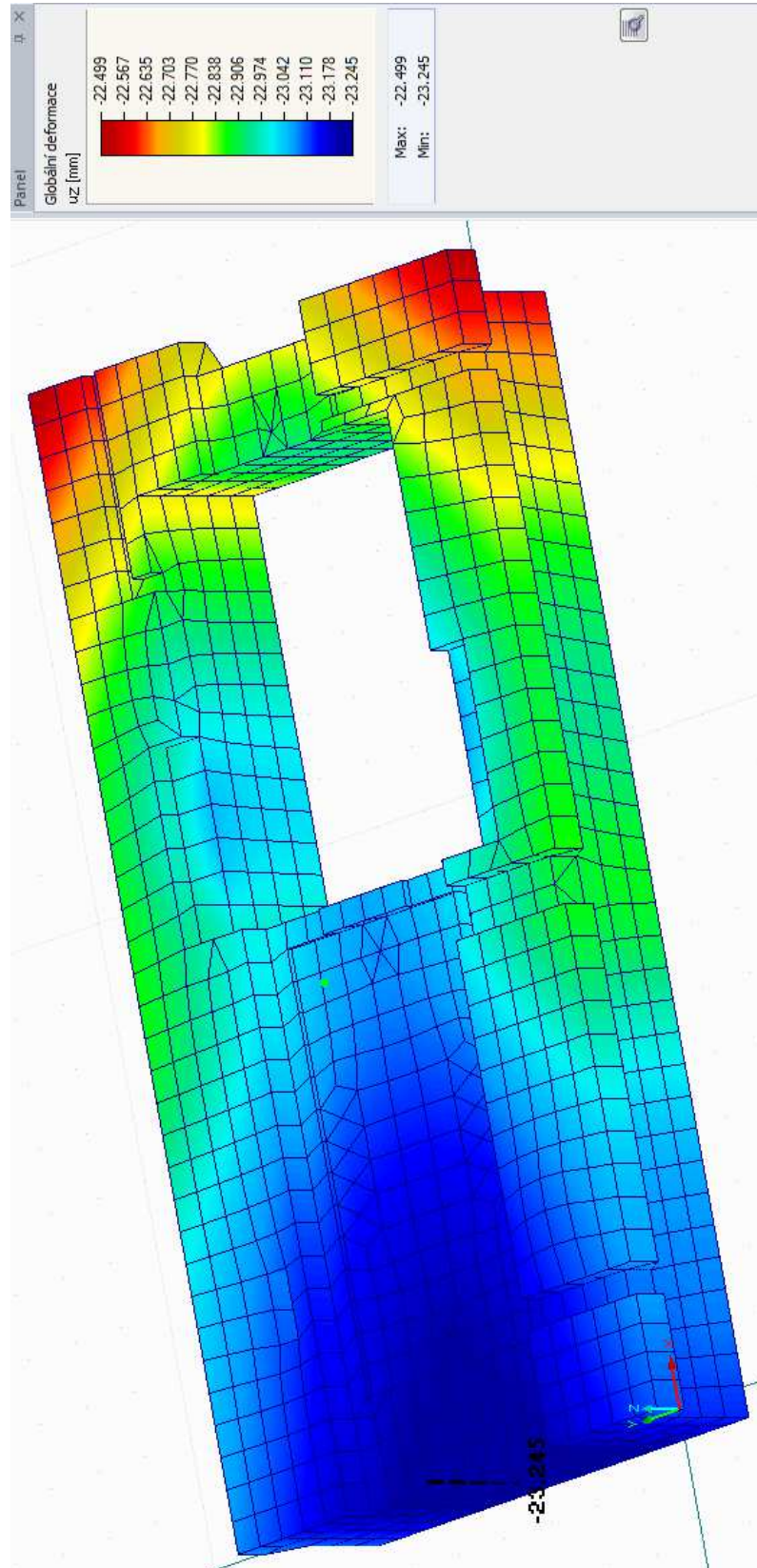
Modul pružnosti po 50 letech pro vyhodnocení dlouhodobých deformací:

$$E_{c,50} = \frac{E_c}{\varphi(\infty, t_0)} = \frac{33}{1,80} = 18,33 \text{ GPa}$$

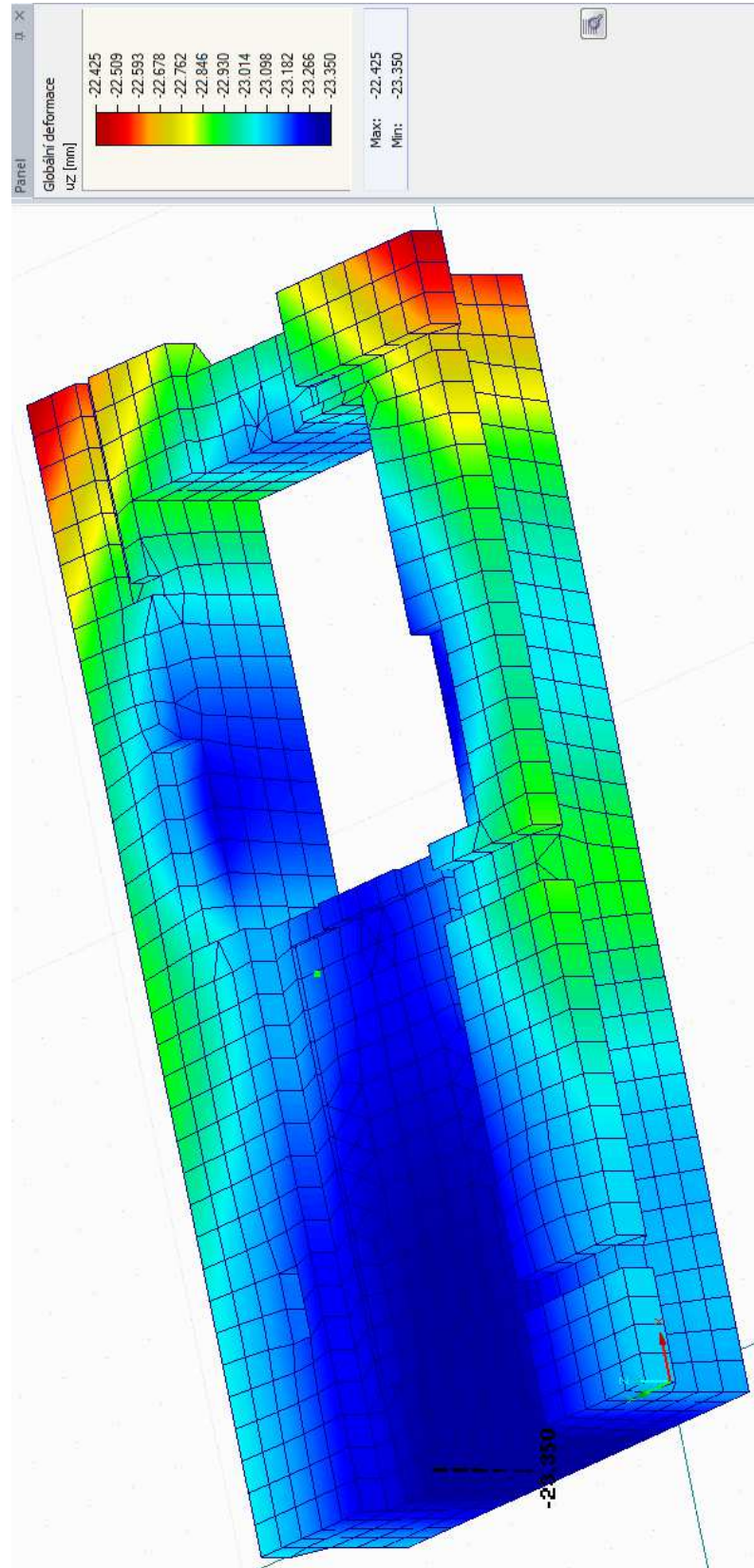
Výpočet dlouhodobých deformací se provede na 2 stejných modelech s rozdílnými moduly pružnosti a určí se jako rozdíl mezi deformacemi na modelu s modulem pružnosti $E_{c,50} = 18,33 \text{ GPa}$ a na modelu s modulem pružnosti $E_c = 33 \text{ GPa}$:

$$\Delta = \Delta_{(E=18,33)} - \Delta_{(E=33)}$$

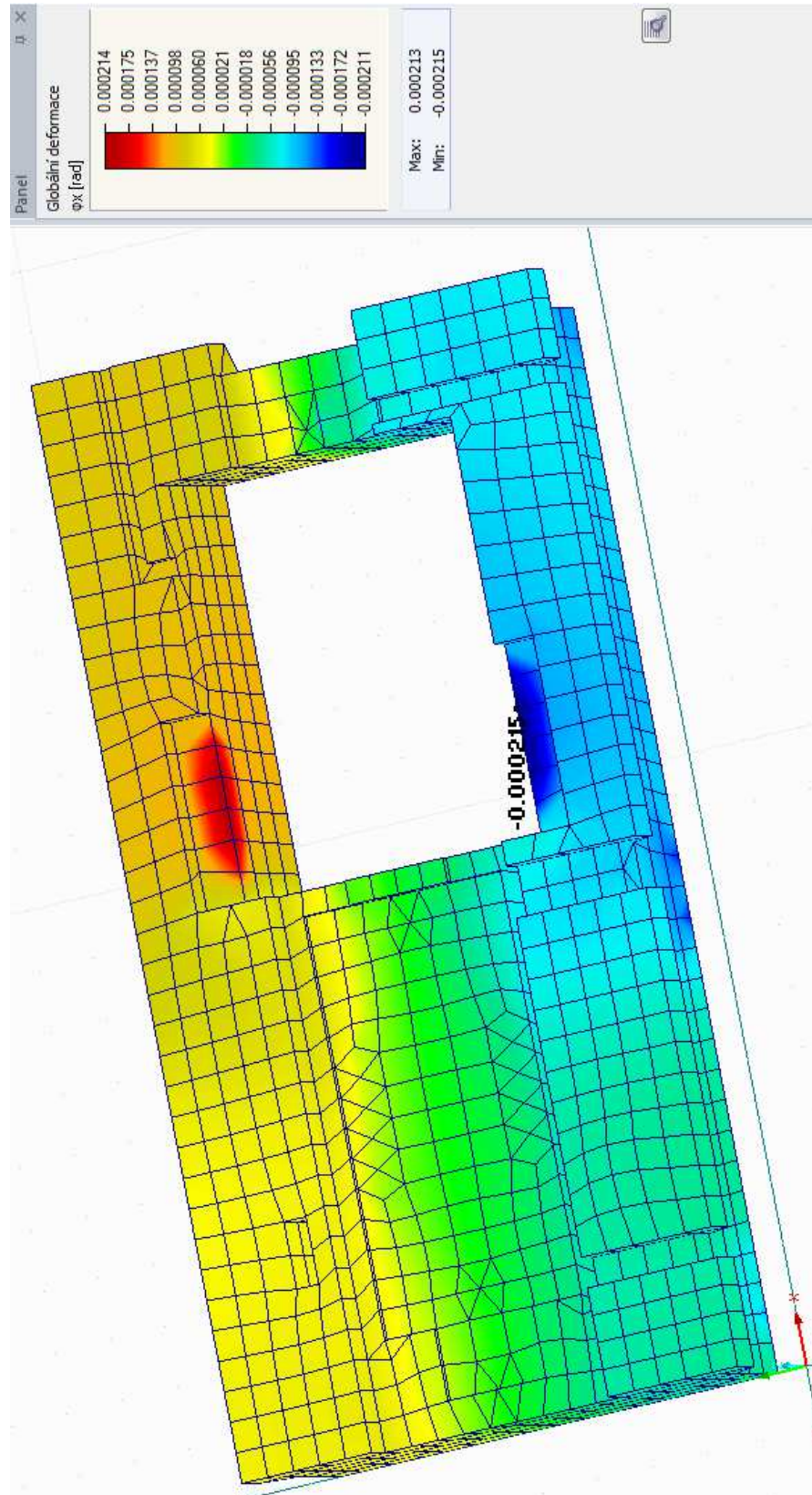
Obr.: Deformace od vlastní tíhy desky základu a stroje – posun ve směru globální osy z – pro $E = 33 \text{ GPa}$



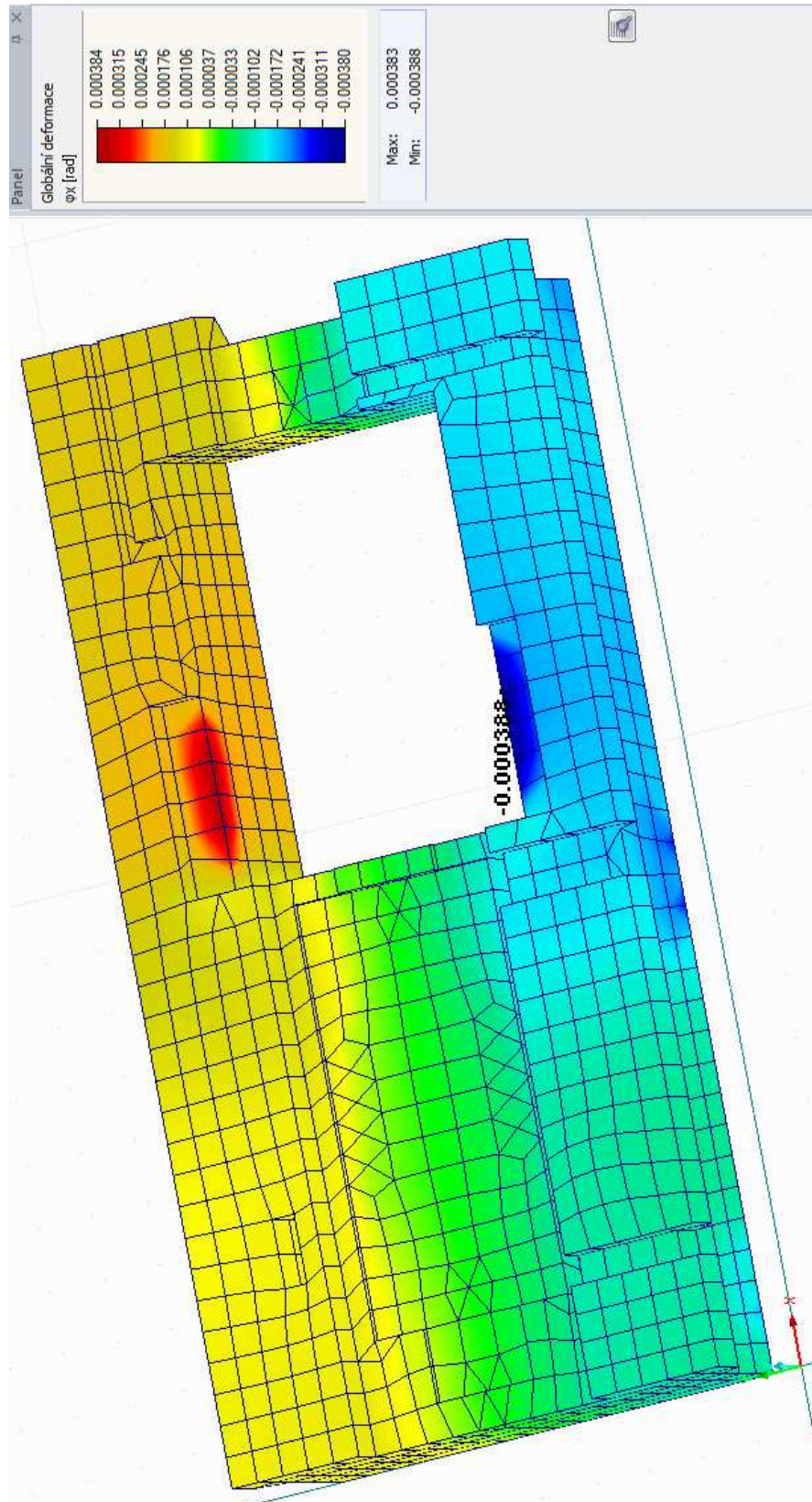
Obr.: Deformace od vlastní tíhy desky základu a stroje – posun ve směru globální osy z – pro $E = 18,33 \text{ GPa}$



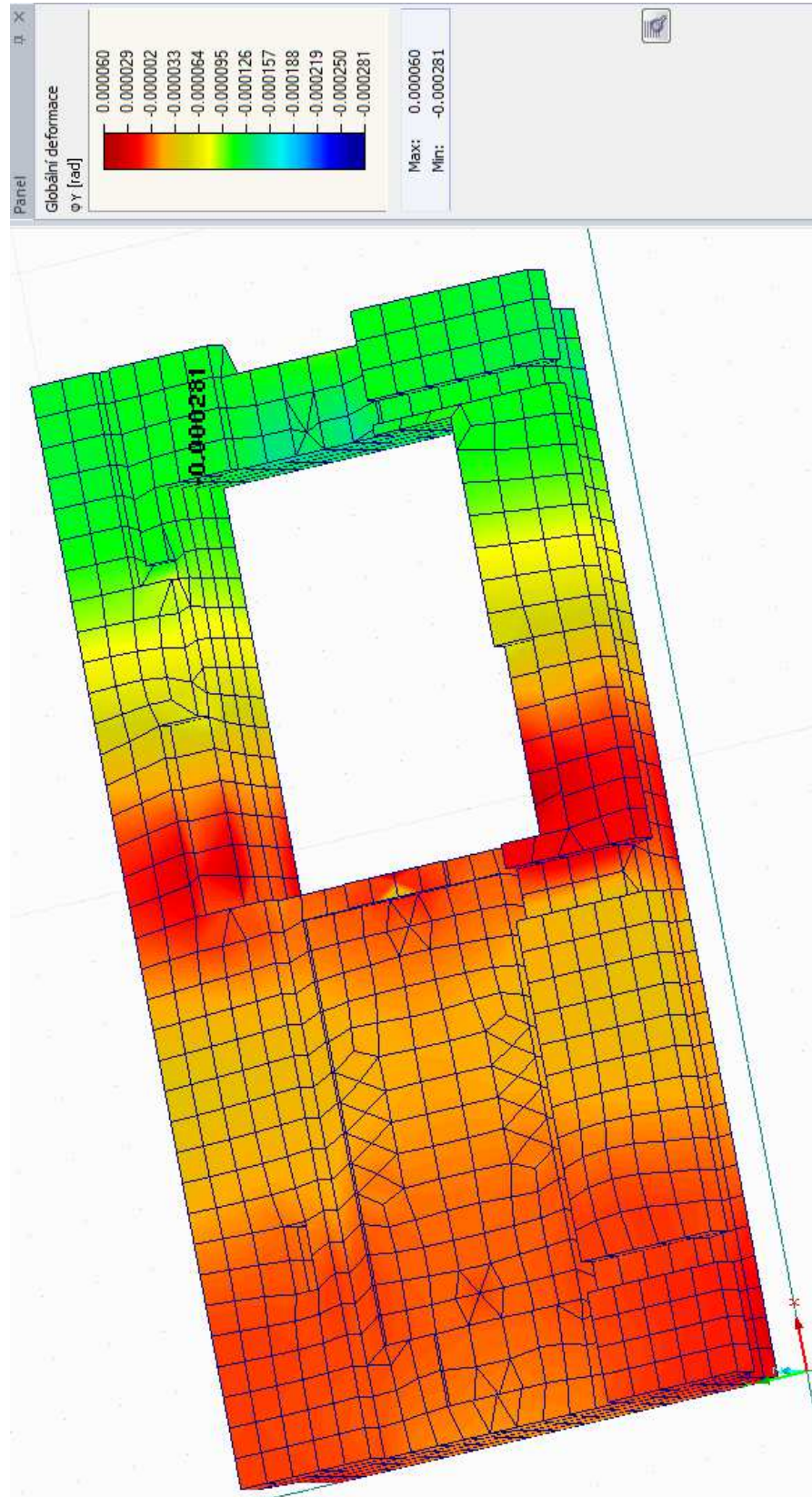
Obr.: Deformace od vlastní tíhy desky základu a stroje – pootočení okolo globální osy x – pro $E = 33 \text{ GPa}$



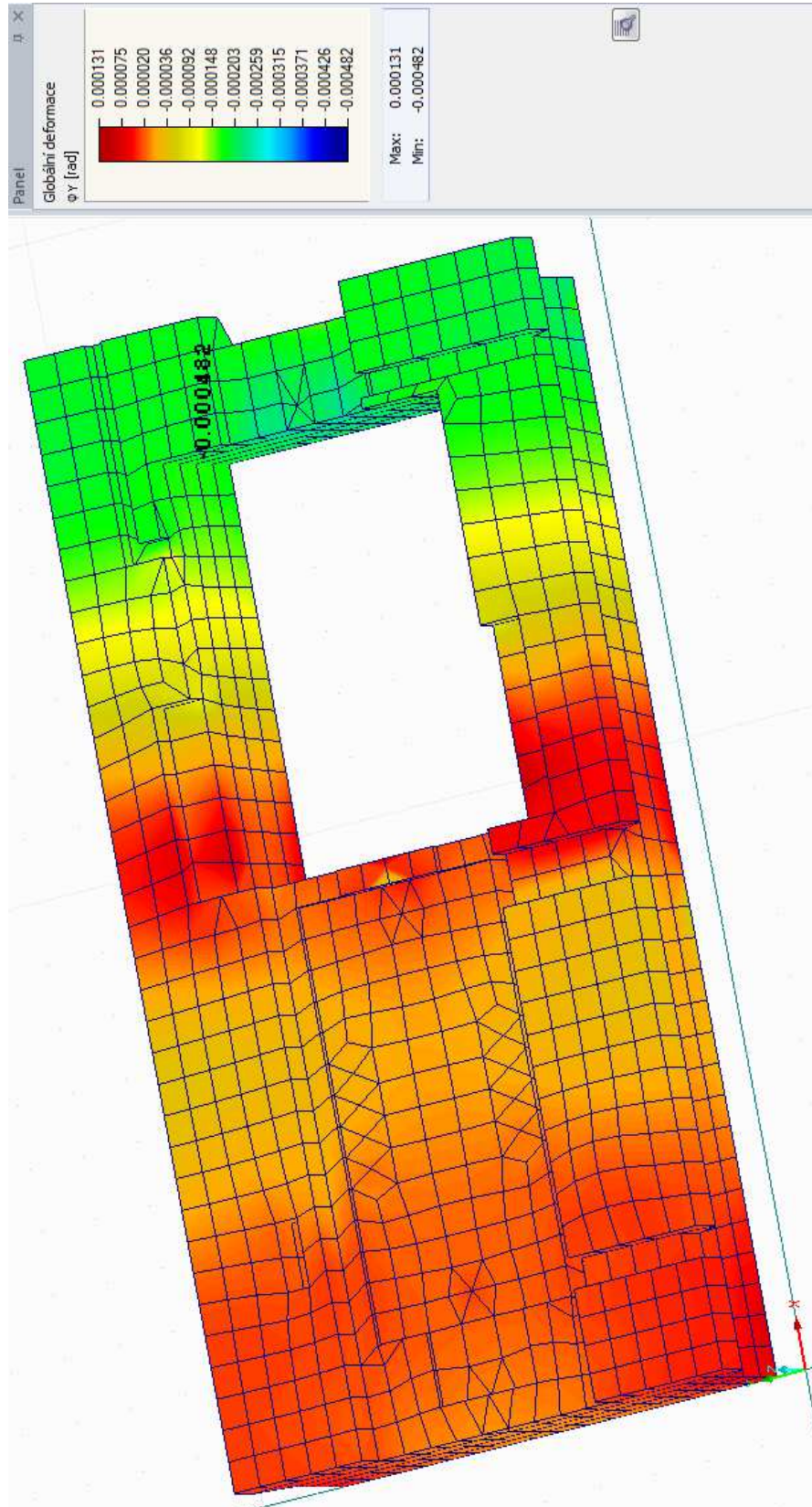
Obr.: Deformace od vlastní tíhy desky základu a stroje – pootočení okolo globální osy x – pro $E = 18,33 \text{ GPa}$



Obr.: Deformace od vlastní tíhy desky základu a stroje – pootočení okolo globální osy y – pro $E = 33 \text{ GPa}$



Obr.: Deformace od vlastní tíhy desky základu a stroje – pootočení okolo globální osy y – pro $E = 18,33 \text{ GPa}$



○ Posouzení dlouhodobých deformací v důsledku dotvarování betonu

Platí stejná kritéria a deformace budou vyhodnoceny ve stejných bodech jako v předchozí teplotní úloze.

○ Vyhodnocení pootočení

$\Delta\alpha_x$ [rad] – pootočení okolo globální osy x

$\Delta\alpha_y$ [rad] – pootočení okolo globální osy y

Tab.: Vypočtené hodnoty pootočení pro $E = 18,33$ GPa

Ložisková podpora	Číslo uzlu v modelu	$\Delta\alpha_x$ [10^{-4} rad]	$\Delta\alpha_y$ [10^{-4} rad]
G1	175	0,03	0,29
G2	176	-0,05	0,16
T1'	187	1,65	0,45
T1''	185	-1,68	0,61
T2	166	0,01	-2,02

Tab.: Vypočtené hodnoty pootočení pro $E = 33$ GPa

Ložisková podpora	Číslo uzlu v modelu	$\Delta\alpha_x$ [10^{-4} rad]	$\Delta\alpha_y$ [10^{-4} rad]
G1	175	0,02	0,04
G2	176	-0,02	-0,04
T1'	187	0,92	0,12
T1''	185	-0,93	0,21
T2	166	0,01	-1,25

Tab.: Posouzení dlouhodobých pootočení pod ložiskovými podporami okolo globální osy x

Ložisková podpora	$\Delta = \Delta\alpha_{x(E=18,33)} - \Delta\alpha_{x(E=33)}$ [10^{-4} rad]	Přípustná hodnota [10^{-4} rad]	Posouzení
G1	$0,03 - 0,02 = \mathbf{0,01}$	1,0	vyhovuje
G2	$(-0,05) - (-0,02) = \mathbf{-0,03}$	1,0	vyhovuje
T1'	$1,65 - 0,92 = \mathbf{0,73}$	1,0	vyhovuje
T1''	$(-1,68) - (-0,93) = \mathbf{-0,75}$	1,0	vyhovuje
T2	$0,01 - 0,01 = \mathbf{0}$	1,0	vyhovuje

Tab.: Posouzení dlouhodobých pootočení pod ložiskovými podporami okolo globální osy y

Ložisková podpora	$\Delta = \Delta\alpha_{y(E=18,33)} - \Delta\alpha_{y(E=33)}$ [10^{-4} rad]	Přípustná hodnota [10^{-4} rad]	Posouzení
G1	$0,29 - 0,04 = \mathbf{0,25}$	1,0	vyhovuje
G2	$0,16 - (-0,04) = \mathbf{0,20}$	1,0	vyhovuje
T1'	$0,45 - 0,12 = \mathbf{0,33}$	1,0	vyhovuje
T1''	$0,61 - 0,21 = \mathbf{0,40}$	1,0	vyhovuje
T2	$-2,02 - (-1,25) = \mathbf{-0,77}$	1,0	vyhovuje

Závěr: Všechna dlouhodobá pootočení pod ložiskovými podporami jsou VYHOVUJÍCÍ.

o Vyhodnocení svislých posunů

Tab.: Vypočtené hodnoty svislých posunů u_z pro $E = 18,33 \text{ GPa}$

Ložisková podpora	Číslo uzlu v modelu	u_z [mm]	Označení posunu
G1	175	-23,343	w_1
G2	176	-23,244	w_2
T1'	187	-23,058	w_3
T1''	185	-23,062	
T2	166	-23,112	w_4

Výpočet posunu v bodě T1:

$$w_3 = \frac{-23,058 + (-23,062)}{2} = -23,060 \text{ mm}$$

Tab.: Vypočtené hodnoty svislých posunů u_z pro $E = 33 \text{ GPa}$

Ložisková podpora	Číslo uzlu v modelu	u_z [mm]	Označení posunu
G1	175	-23,213	w_1
G2	176	-23,081	w_2
T1'	187	-22,956	w_3
T1''	185	-22,962	
T2	166	-22,906	w_4

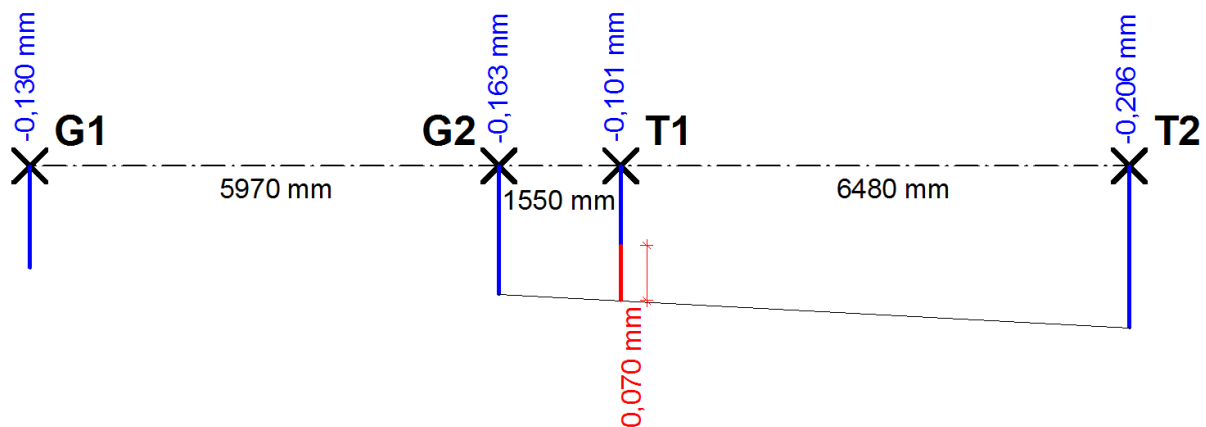
Výpočet posunu v bodě T1:

$$w_3 = \frac{-22,956 + (-22,962)}{2} = -22,959 \text{ mm}$$

Tab.: Výpočet dlouhodobých svislých posunů w pod ložiskovými podporami v důsledku dotvarování betonu po 50 letech

Ložisková podpora	Číslo uzlu v modelu	Označení posunu	$w = w_{(E=18,33)} - w_{(E=33)}$ [mm]
G1	175	w_1	$(-23,343) - (-23,213) = \mathbf{-0,130}$
G2	176	w_2	$(-23,244) - (-23,081) = \mathbf{-0,163}$
T1	-	w_3	$(-23,060) - (-22,959) = \mathbf{-0,101}$
T2	166	w_4	$(-23,112) - (-22,906) = \mathbf{-0,206}$

Obr.: Grafické znázornění velikostí posunů (modře) a půdorysných vzdáleností mezi posuzovanými ložiskovými podporami – výpočet Δw nad T1 (červeně)



Výpočet pro ložiskovou podporu T1:

$$\frac{\Delta w}{L_1} < 1,0 \cdot 10^{-4}$$

$$\frac{\Delta w}{L_2} < 1,0 \cdot 10^{-4}$$

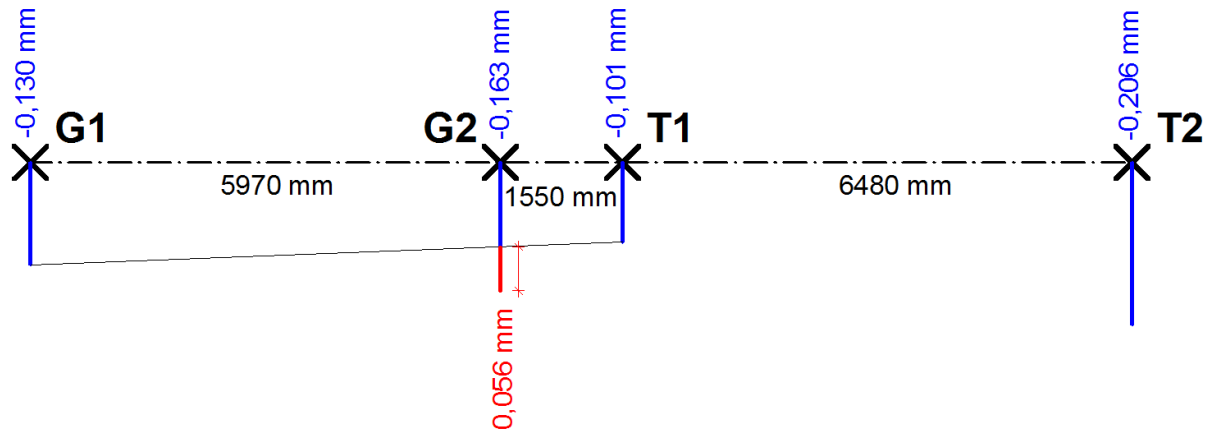
$$\frac{0,070}{1550} < 1,0 \cdot 10^{-4}$$

$$\frac{0,070}{6480} < 1,0 \cdot 10^{-4}$$

$$\mathbf{0,45 \cdot 10^{-4} < 1,0 \cdot 10^{-4}}$$

$$\mathbf{0,11 \cdot 10^{-4} < 1,0 \cdot 10^{-4}}$$

Obr.: Grafické znázornění velikostí posunů (modře) a půdorysných vzdáleností mezi posuzovanými ložiskovými podporami – výpočet Δw nad G2 (červeně)



Výpočet pro ložiskovou podporu G2:

$$\frac{\Delta w}{L_1} < 1,0 \cdot 10^{-4}$$

$$\frac{\Delta w}{L_2} < 1,0 \cdot 10^{-4}$$

$$\frac{0,056}{5970} < 1,0 \cdot 10^{-4}$$

$$\frac{0,056}{1550} < 1,0 \cdot 10^{-4}$$

$$0,09 \cdot 10^{-4} < 1,0 \cdot 10^{-4}$$

$$0,36 \cdot 10^{-4} < 1,0 \cdot 10^{-4}$$

Závěr: Všechny dlouhodobé svislé posuny pod ložiskovými podporami jsou VYHOVUJÍCÍ.

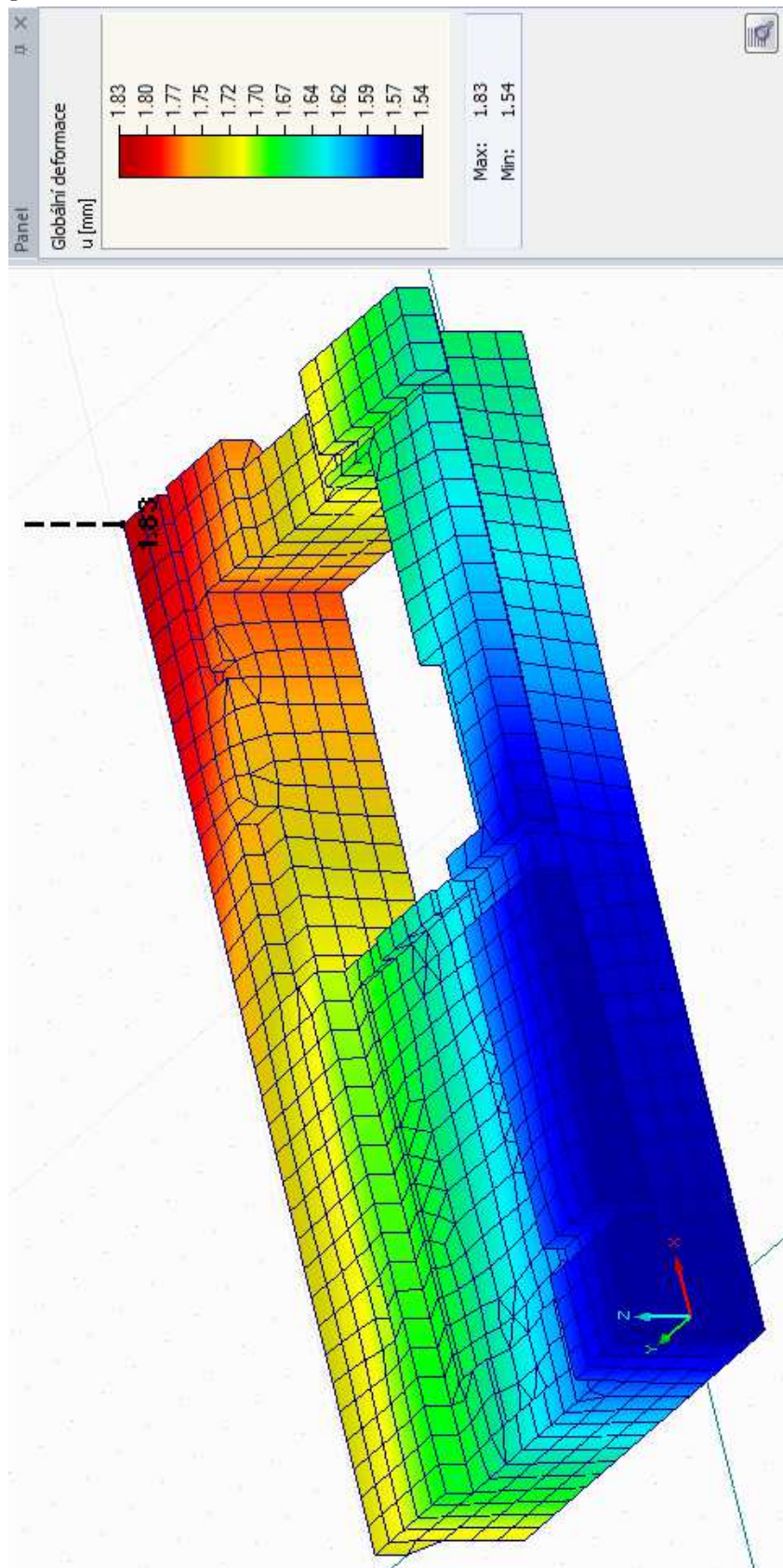
3.6. Deformace v ostatních zatěžovacích stavech

Byly vypočteny celkové posuny ve všech ostatních zatěžovacích stavech.

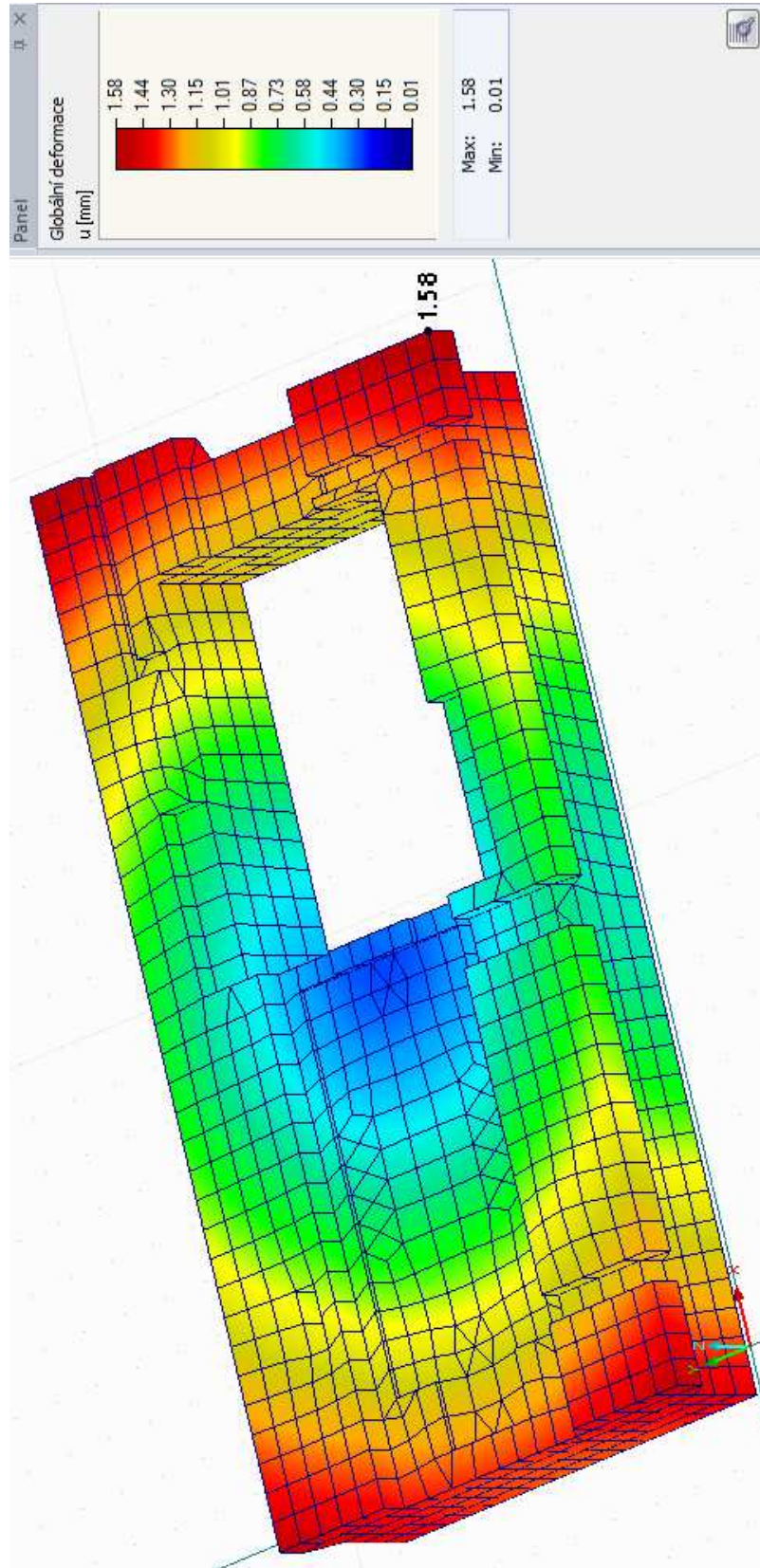
Tab.: Výpis hodnot maximálních celkových posunů v jednotlivých zatěžovacích stavech

Označení ZS	Název zatěžovacího stavu	Součinitel	Poznámka	Max. celkový posun $ u $ [mm]
ZS 2	Užitné zatížení	+1,0	-	1,83
ZS 3	Rovnoměrná změna teploty celé desky o ± 15 °C	+1,0	ohřátí o +15 °C	1,58
ZS 3	Rovnoměrná změna teploty celé desky o ± 15 °C	-1,0	ochlazení o -15 °C	1,58
ZS 5	Třecí síly	+1,0	ohřátí stroje	0,08
ZS 5	Třecí síly	-1,0	ochlazení stroje	0,08
ZS 6	Zkrat generátoru	+1,0	-	1,65

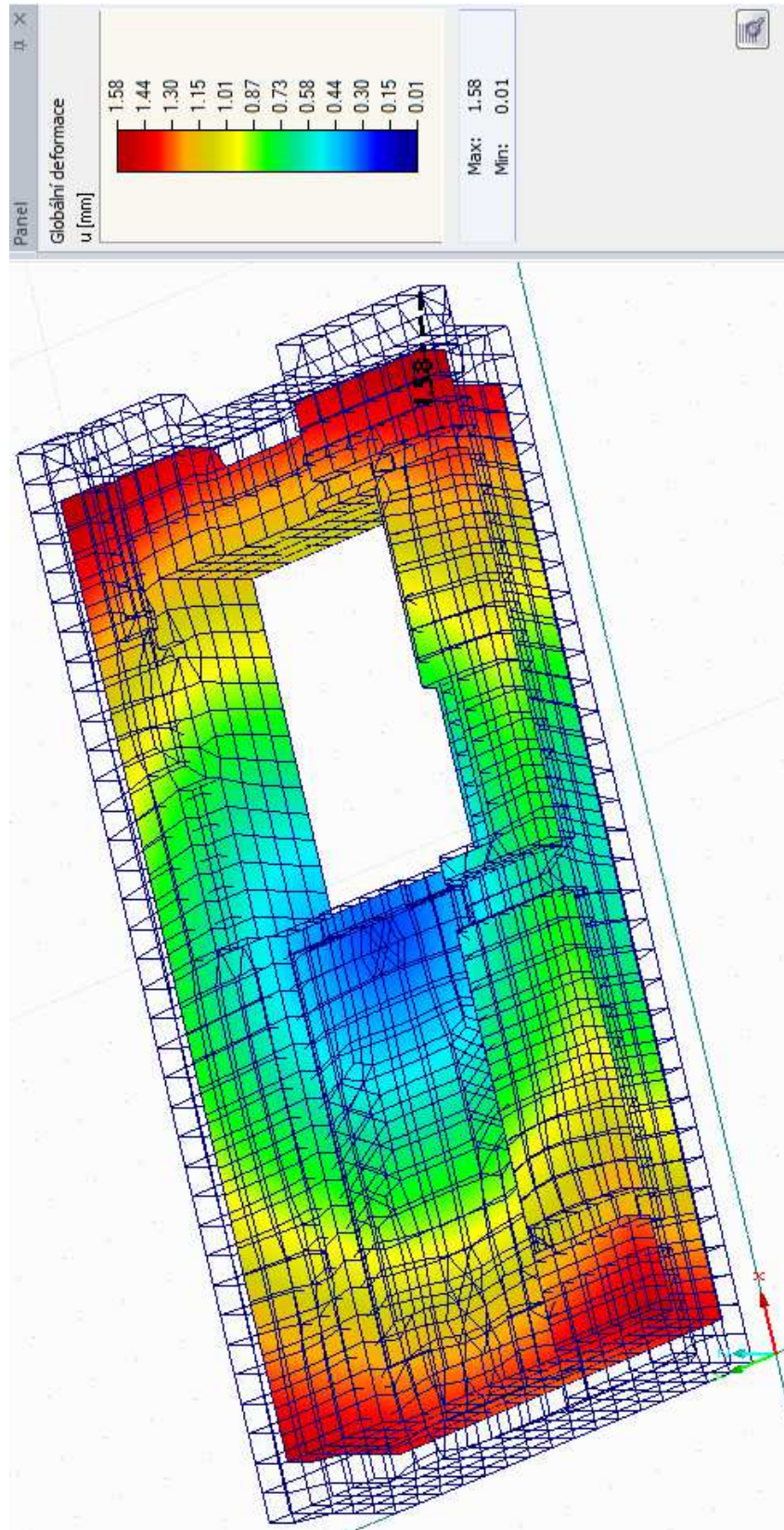
Obr.: Celkový posun od ZS 2 – Užité zatížení



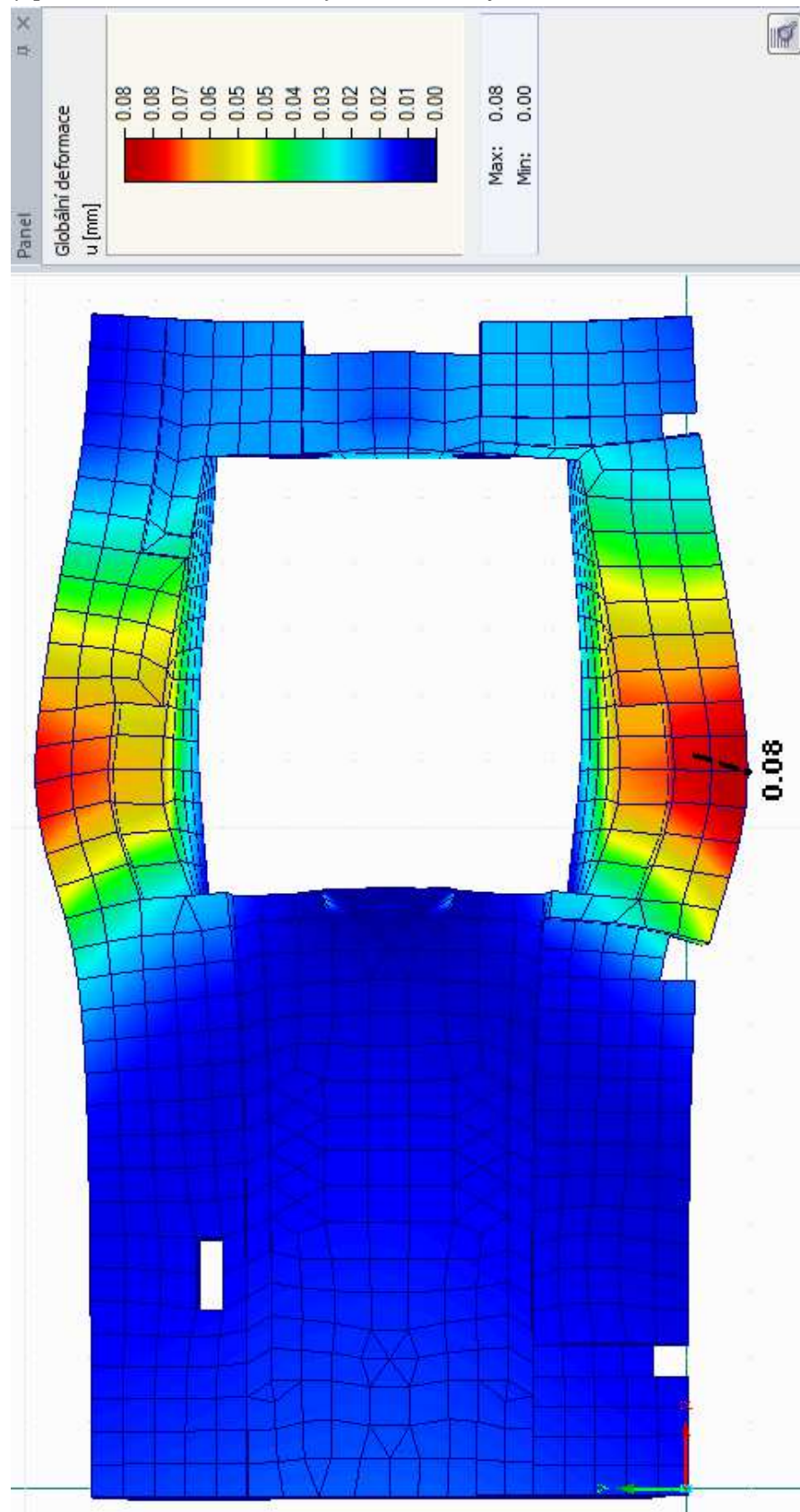
Obr.: Celkový posun od ZS 3 Rovnoměrná změna teploty celé desky o $\pm 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ – ohřátí o $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$



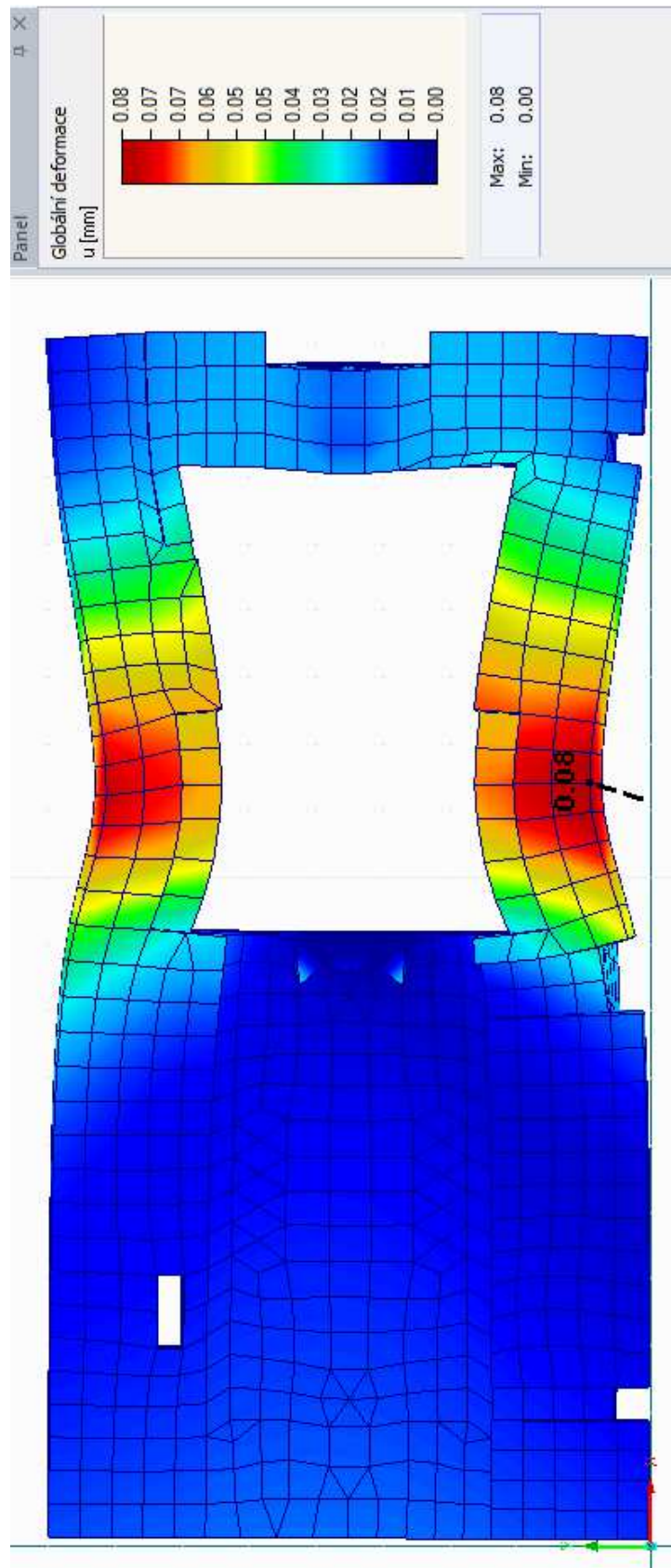
Obr.: Celkový posun od ZS 3 Rovnoměrná změna teploty celé desky o $\pm 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ – ochlazení o $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$



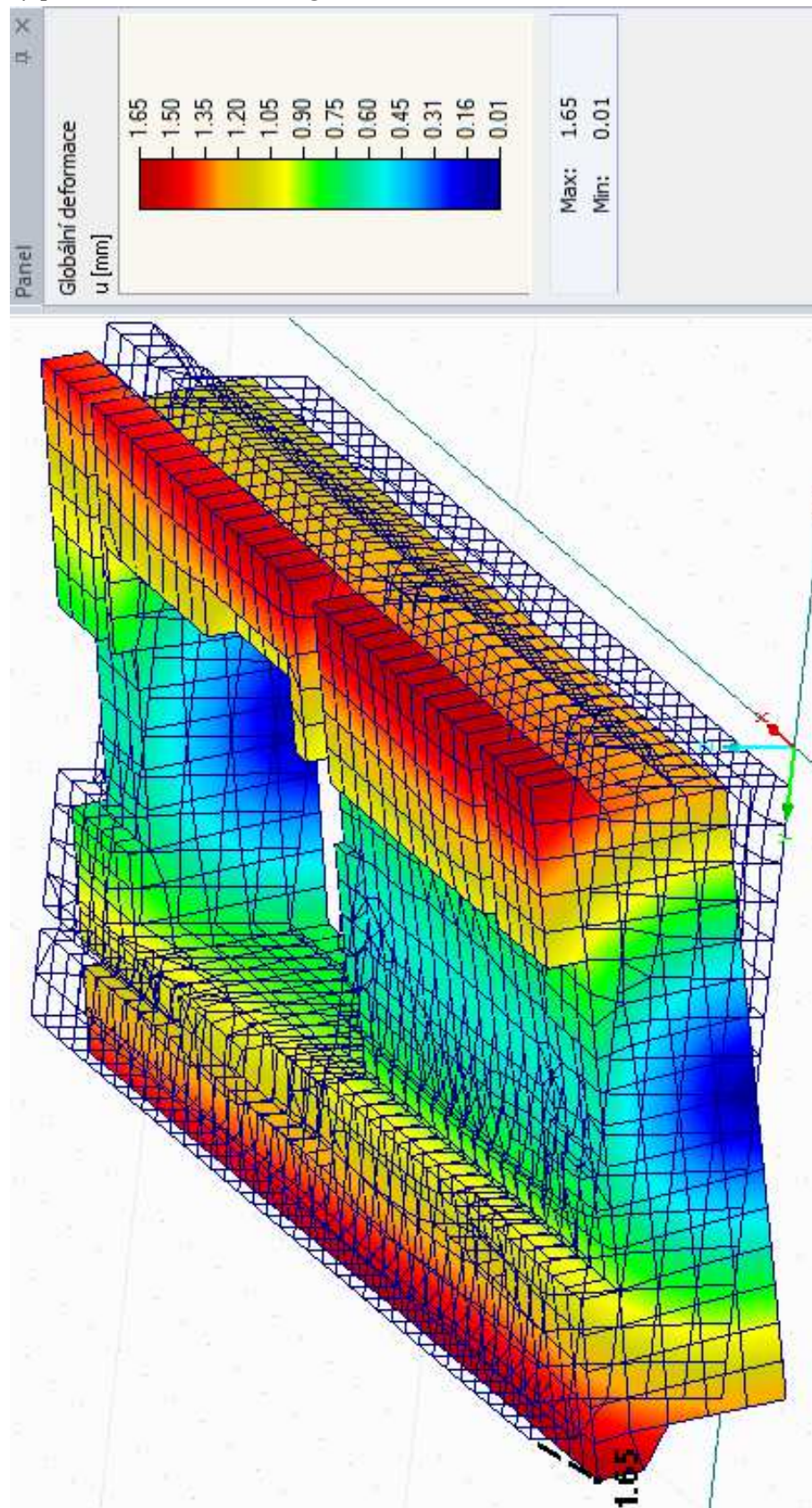
Obr.: Celkový posun od ZS 5 – Třecí síly – ohřátí stroje



Obr.: Celkový posun od ZS 5 – Třecí síly – ochlazení stroje



Obr.: Celkový posun od ZS 6 – Zkrat generátoru



3.7. Návrh výztuže horní desky základu

3.7.1. Model konstrukce

Pro návrh výztuže byl vytvořen model horní desky základu z deskostěnových prvků o stejných tloušťkách jako jsou tloušťky konstrukce v prostorovém modelu ve statické analýze. Tloušťky jednotlivých deskostěnových prvků jsou od 1,9 m do 2,5 m.

Turbosoustrojí bylo vymodelováno náhradními tělesy stejně jako v dynamické analýze konstrukce. Model turbosoustrojí je popsán v kapitole **4.1. Modelování turbosoustrojí náhradními tělesy**.

- **Modelování pružinových prvků Gerb**

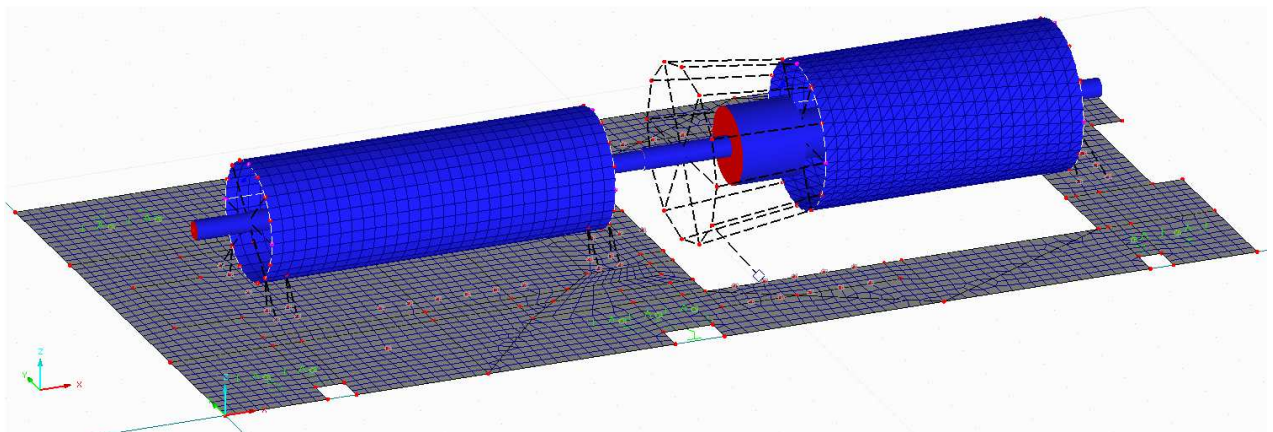
Prvky Gerb byly vymodelovány jako uzlové podpory – pružiny s tuhostí ve 3 směrech. Tuhost v horizontálním směru y je shodná s tuhostí v axiálním směru x . Hodnoty tuhostí viz předchozí kapitola **2.2. Pružinové prvky Gerb**.

- **Volba vygenerování sítě prvků**

Model je rozdělen na plošné 2D elementy tak, aby tam kde to je možné, měly stejnou délku stran do obou směrů a tvořily čtverce. Délka prvků byla zvolena 0,2 m.

Požadovaný tvar konečných prvků jsou čtyřúhelníky a jsou generovány stejné čtverce v místech, kde to je možné. V místech, kde nebylo možné vytvořit čtyřúhelníky, jsou vytvořeny trojúhelníky.

Obr.: Model konstrukce z deskostěnových prvků s turbosoustrojím vymodelovaným náhradními tělesy

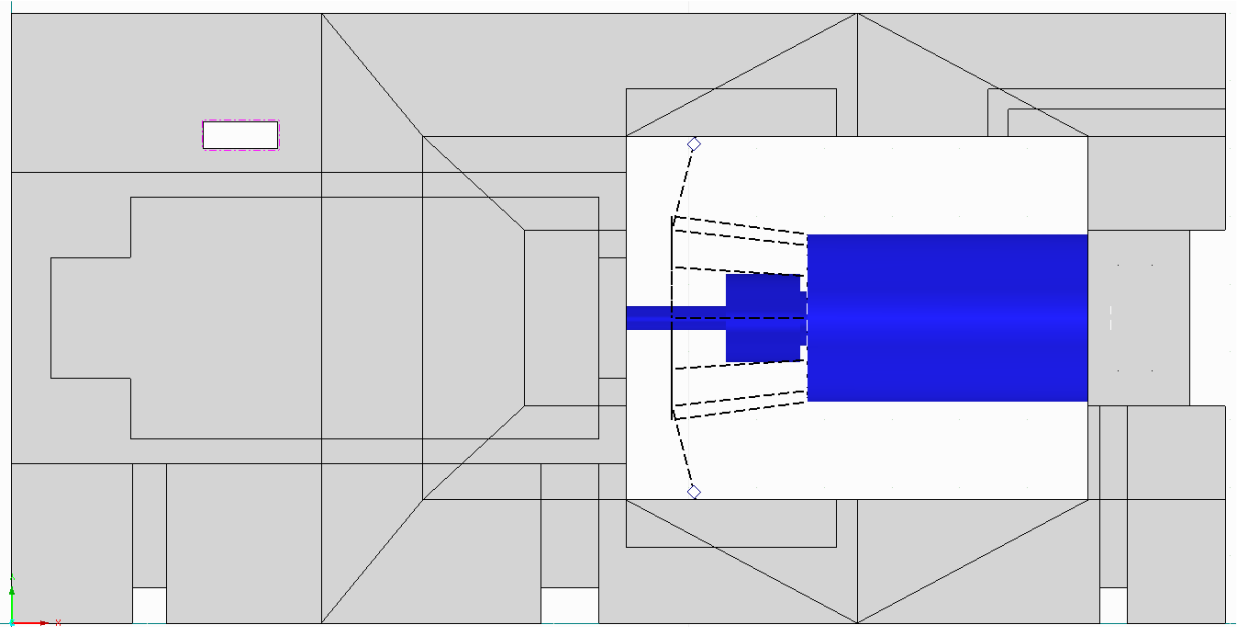


3.7.2. Zatěžovací stavy

Zatěžovací stavy a jejich součinitele jsou popsány v kapitole 3.2. **Zatěžovací stavy pro statickou analýzu.**

Protože jsou současně zadávány zatěžovací stavy **ZS 2 – Užité zatížení** a **ZS 4 – Nerovnoměrné zvýšení teploty uvnitř turbínového otvoru** a zatížení v těchto dvou zatěžovacích stavech působí na rozdílné plochy, bylo nutné rozdělit deskostěnové prvky nejenom podle jejich tloušťky a působení užitého zatížení, ale také podle působení zatížení nerovnoměrnou teplotou.

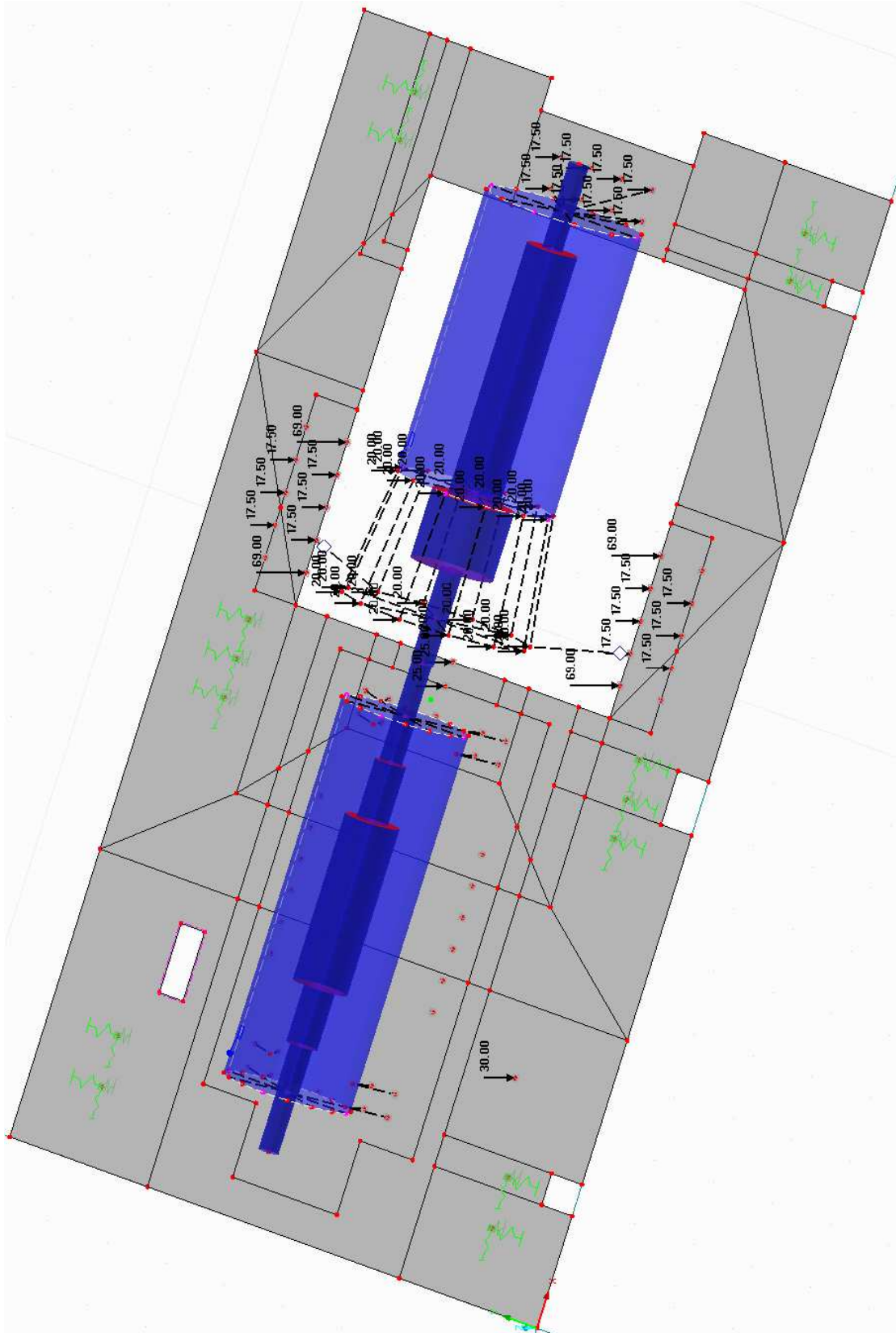
Obr.: Rozdělení modelu horní desky základu na jednotlivé plochy



V zatěžovacím stavu **ZS 1 – Vlastní tíha horní desky základu a turbosoustrojí** jsou zahrnuta všechna zatížení od vlastní tíhy turbosoustrojí a desky základu a také zatížení od prvků, které nespolutpůsobí při kmitání. Jedná se o kondenzátor, potrubí, izolace a další prvky, jejichž vlastní tíha byla vypočtena jako rozdíl mezi hodnotami celkové vlastní tíhy prvků působících i nepůsobících při kmitání udávanými výrobcem stroje a vymodelovaným turbosoustrojím. Vlastní tíha prvků nepůsobících při kmitání byla zadána osamělými břemeny [kN] do uzlů desky.

Vlastní tíha kondenzátoru:	$276 \text{ kN} / 4 = 69 \text{ kN}$ do 4 uzlů
Skříň generátoru:	30 kN do 1 uzlu
Ostatní prvky (potrubí, izolace):	$350 \text{ kN} / 20 = 17,5 \text{ kN}$ do 20 uzlů

Obr.: **ZS 1** – Vlastní tíha prvků nespoleupůsobících při kmitání (vlastní tíha zadní části statoru turbíny je zadána jako zatížení 20 kN do celkem 24 uzlů)



3.7.3. Kombinace zatěžovacích stavů

Bylo vytvořeno celkem 190 kombinací zatěžovacích stavů (KZS), které jsou rozděleny do 4 skupin. Každá skupina KZS zahrnuje odlišné možnosti, které mohou při provozu elektrárny nastat.

1. skupina – KZS 1 až KZS 6

Není uvažován provoz stroje. Působí pouze stálé zatížení, užité zatížení a rovnoměrná změna teploty celé desky o ± 15 °C způsobená možnými změnami teplot v hale elektrárny.

2. skupina – KZS 7 až KZS 36

Tato skupina KZS zahrnuje přechodové stavy při najíždění a odstavování stroje. Stejně jako v předcházející skupině působí stálé a užité zatížení a rovnoměrná změna teploty celé desky o ± 15 °C. Dále působí nerovnoměrné zatížení teplotou a třecí síly při ohřívání / ochlazování stroje.

3. skupina – KZS 37 až KZS 180

Nejpočetnější skupina zahrnuje provoz stroje. Působí stejné zatěžovací stavy jako v předchozích 36 kombinacích a navíc všechny dynamické budící síly od rotorů, jejichž velikost je vypočtena pro provozní frekvenci stroje 50 Hz. V případě působení budících sil ve směru vertikální osy z (odpovídá opačnému směru, než působí vlastní tíha konstrukce) je uvažován součinitel zatěžovacího stavu **ZS 1 – Vlastní tíha horní desky základu a turbosoustrojí:**

$$\gamma = 0,90 \quad (\text{jedná se o KZS 145 – KZS 180}).$$

V případě kombinací zahrnující působení budících sil ve všech ostatních směrech je uvažován součinitel u téhož zatěžovacího stavu:

$$\gamma = 1,35$$

4. skupina – KZS 181 až KZS 190

Je zde zahrnuto mimořádné zatížení způsobené zkratem generátoru. Součinitel vlastní tíhy konstrukce je uvažován 1,00. Budící síly na obou stojanech generátoru nejsou při jeho zkratu uvažovány. Jsou uvažovány pouze budící síly na obou stojanech turbíny T1 a T2 se součinitelem $\pm 16,67$.

Všechny kombinace zatěžovacích stavů jsou uvedeny v tabulkách na následujících stranách. Součinitel +1,50 u zatěžovacích stavů zahrnující zatížení teplotou a třecími silami vyjadřuje ohřívání a součinitel -1,50 ochlazování. Kladné součinitele u zatěžovacích stavů zahrnující budící síly od rotorů vyjadřují jejich působení ve směru dané osy a záporné součinitele vyjadřují působení proti směru osy.

Tab.: Vytvořené kombinace zatěžovacích stavů - 1. skupina bez provozu stroje (KZS 1 – KZS 6) a 2. skupina pro přechodové stavy (KZS 7 – KZS 36)

	ZS 1	ZS 2	ZS 3	ZS 4	ZS 5	ZS 6	ZS 7	ZS 8	ZS 9	ZS 10	ZS 11	ZS 12	ZS 13	ZS 14	ZS 15
Popis	stálé	užité	$\pm 15^{\circ}\text{C}$	nerov. teplota	třecí síly	zkrat gener.	axiálně	$\uparrow G1$	$\rightarrow G1$	$\uparrow G2$	$\rightarrow G2$	$\uparrow T1$	$\rightarrow T1$	$\uparrow T2$	$\rightarrow T2$
KZS 1	1,35														
KZS 2	1,35	1,50													
KZS 3	1,35		1,50												
KZS 4	1,35	1,50	1,50												
KZS 5	1,35		-1,50												
KZS 6	1,35	1,50	-1,50												
KZS 7	1,35			1,50											
KZS 8	1,35	1,50		1,50											
KZS 9	1,35		1,50	1,50											
KZS 10	1,35	1,50	1,50	1,50											
KZS 11	1,35		-1,50	1,50											
KZS 12	1,35	1,50	-1,50	1,50											
KZS 13	1,35				1,50										
KZS 14	1,35	1,50			1,50										
KZS 15	1,35				-1,50										
KZS 16	1,35	1,50			-1,50										
KZS 17	1,35		1,50		1,50										
KZS 18	1,35	1,50	1,50		1,50										

	ZS 1	ZS 2	ZS 3	ZS 4	ZS 5	ZS 6	ZS 7	ZS 8	ZS 9	ZS 10	ZS 11	ZS 12	ZS 13	ZS 14	ZS 15
Popis	stálé	užité	$\pm 15^{\circ}\text{C}$	nerov. teplota	třecí síly	zkrat gener.	axiálně	\uparrow G1	\rightarrow G1	\uparrow G2	\rightarrow G2	\uparrow T1	\rightarrow T1	\uparrow T2	\rightarrow T2
KZS 19	1,35		1,50		-1,50										
KZS 20	1,35	1,50	1,50		-1,50										
KZS 21	1,35		-1,50		1,50										
KZS 22	1,35	1,50	-1,50		1,50										
KZS 23	1,35		-1,50		-1,50										
KZS 24	1,35	1,50	-1,50		-1,50										
KZS 25	1,35			1,50	1,50										
KZS 26	1,35	1,50		1,50	1,50										
KZS 27	1,35			1,50	-1,50										
KZS 28	1,35	1,50		1,50	-1,50										
KZS 29	1,35		1,50	1,50	1,50										
KZS 30	1,35	1,50	1,50	1,50	1,50										
KZS 31	1,35		1,50	1,50	-1,50										
KZS 32	1,35	1,50	1,50	1,50	-1,50										
KZS 33	1,35		-1,50	1,50	1,50										
KZS 34	1,35	1,50	-1,50	1,50	1,50										
KZS 35	1,35		-1,50	1,50	-1,50										
KZS 36	1,35	1,50	-1,50	1,50	-1,50										

Tab.: Vytvořené kombinace zatěžovacích stavů - 3. skupina zahrnující provoz stroje (KZS 37 – KZS 180)

	ZS 1	ZS 2	ZS 3	ZS 4	ZS 5	ZS 6	ZS 7	ZS 8	ZS 9	ZS 10	ZS 11	ZS 12	ZS 13	ZS 14	ZS 15
Popis	stálé	užité	$\pm 15^{\circ}\text{C}$	nerov. teplota	třecí síly	zkrat gener.	axiálně	$\uparrow \text{G1}$	$\rightarrow \text{G1}$	$\uparrow \text{G2}$	$\rightarrow \text{G2}$	$\uparrow \text{T1}$	$\rightarrow \text{T1}$	$\uparrow \text{T2}$	$\rightarrow \text{T2}$
KZS 37	1,35						25	-25		-25		-25		-25	
KZS 38	1,35	1,50					25	-25		-25		-25		-25	
KZS 39	1,35		1,50				25	-25		-25		-25		-25	
KZS 40	1,35	1,50	1,50				25	-25		-25		-25		-25	
KZS 41	1,35		-1,50				25	-25		-25		-25		-25	
KZS 42	1,35	1,50	-1,50				25	-25		-25		-25		-25	
KZS 43	1,35			1,50			25	-25		-25		-25		-25	
KZS 44	1,35	1,50		1,50			25	-25		-25		-25		-25	
KZS 45	1,35		1,50	1,50			25	-25		-25		-25		-25	
KZS 46	1,35	1,50	1,50	1,50			25	-25		-25		-25		-25	
KZS 47	1,35		-1,50	1,50			25	-25		-25		-25		-25	
KZS 48	1,35	1,50	-1,50	1,50			25	-25		-25		-25		-25	
KZS 49	1,35				1,50		25	-25		-25		-25		-25	
KZS 50	1,35	1,50			1,50		25	-25		-25		-25		-25	
KZS 51	1,35				-1,50		25	-25		-25		-25		-25	
KZS 52	1,35	1,50			-1,50		25	-25		-25		-25		-25	
KZS 53	1,35		1,50		1,50		25	-25		-25		-25		-25	
KZS 54	1,35	1,50	1,50		1,50		25	-25		-25		-25		-25	

	ZS 1	ZS 2	ZS 3	ZS 4	ZS 5	ZS 6	ZS 7	ZS 8	ZS 9	ZS 10	ZS 11	ZS 12	ZS 13	ZS 14	ZS 15
Popis	stálé	užité	± 15°C	nerov. teplota	třecí síly	zkrat gener.	axiálně	↑ G1	→ G1	↑ G2	→ G2	↑ T1	→ T1	↑ T2	→ T2
KZS 55	1,35		1,50		-1,50		25	-25		-25		-25		-25	
KZS 56	1,35	1,50	1,50		-1,50		25	-25		-25		-25		-25	
KZS 57	1,35		-1,50		1,50		25	-25		-25		-25		-25	
KZS 58	1,35	1,50	-1,50		1,50		25	-25		-25		-25		-25	
KZS 59	1,35		-1,50		-1,50		25	-25		-25		-25		-25	
KZS 60	1,35	1,50	-1,50		-1,50		25	-25		-25		-25		-25	
KZS 61	1,35			1,50	1,50		25	-25		-25		-25		-25	
KZS 62	1,35	1,50		1,50	1,50		25	-25		-25		-25		-25	
KZS 63	1,35			1,50	-1,50		25	-25		-25		-25		-25	
KZS 64	1,35	1,50		1,50	-1,50		25	-25		-25		-25		-25	
KZS 65	1,35		1,50	1,50	1,50		25	-25		-25		-25		-25	
KZS 66	1,35	1,50	1,50	1,50	1,50		25	-25		-25		-25		-25	
KZS 67	1,35		1,50	1,50	-1,50		25	-25		-25		-25		-25	
KZS 68	1,35	1,50	1,50	1,50	-1,50		25	-25		-25		-25		-25	
KZS 69	1,35		-1,50	1,50	1,50		25	-25		-25		-25		-25	
KZS 70	1,35	1,50	-1,50	1,50	1,50		25	-25		-25		-25		-25	
KZS 71	1,35		-1,50	1,50	-1,50		25	-25		-25		-25		-25	
KZS 72	1,35	1,50	-1,50	1,50	-1,50		25	-25		-25		-25		-25	

	ZS 1	ZS 2	ZS 3	ZS 4	ZS 5	ZS 6	ZS 7	ZS 8	ZS 9	ZS 10	ZS 11	ZS 12	ZS 13	ZS 14	ZS 15
Popis	stálé	užité	$\pm 15^{\circ}\text{C}$	nerov. teplota	třecí síly	zkrat gener.	axiálně	$\uparrow \text{G1}$	$\rightarrow \text{G1}$	$\uparrow \text{G2}$	$\rightarrow \text{G2}$	$\uparrow \text{T1}$	$\rightarrow \text{T1}$	$\uparrow \text{T2}$	$\rightarrow \text{T2}$
KZS 73	1,35								25		25		25		25
KZS 74	1,35	1,50							25		25		25		25
KZS 75	1,35		1,50						25		25		25		25
KZS 76	1,35	1,50	1,50						25		25		25		25
KZS 77	1,35		-1,50						25		25		25		25
KZS 78	1,35	1,50	-1,50						25		25		25		25
KZS 79	1,35			1,50					25		25		25		25
KZS 80	1,35	1,50		1,50					25		25		25		25
KZS 81	1,35		1,50	1,50					25		25		25		25
KZS 82	1,35	1,50	1,50	1,50					25		25		25		25
KZS 83	1,35		-1,50	1,50					25		25		25		25
KZS 84	1,35	1,50	-1,50	1,50					25		25		25		25
KZS 85	1,35				1,50				25		25		25		25
KZS 86	1,35	1,50			1,50				25		25		25		25
KZS 87	1,35				-1,50				25		25		25		25
KZS 88	1,35	1,50			-1,50				25		25		25		25
KZS 89	1,35		1,50		1,50				25		25		25		25
KZS 90	1,35	1,50	1,50		1,50				25		25		25		25

	ZS 1	ZS 2	ZS 3	ZS 4	ZS 5	ZS 6	ZS 7	ZS 8	ZS 9	ZS 10	ZS 11	ZS 12	ZS 13	ZS 14	ZS 15
Popis	stálé	užité	± 15°C	nerov. teplota	třecí síly	zkrat gener.	axiálně	↑ G1	→ G1	↑ G2	→ G2	↑ T1	→ T1	↑ T2	→ T2
KZS 91	1,35		1,50		-1,50				25		25		25		25
KZS 92	1,35	1,50	1,50		-1,50				25		25		25		25
KZS 93	1,35		-1,50		1,50				25		25		25		25
KZS 94	1,35	1,50	-1,50		1,50				25		25		25		25
KZS 95	1,35		-1,50		-1,50				25		25		25		25
KZS 96	1,35	1,50	-1,50		-1,50				25		25		25		25
KZS 97	1,35			1,50	1,50				25		25		25		25
KZS 98	1,35	1,50		1,50	1,50				25		25		25		25
KZS 99	1,35			1,50	-1,50				25		25		25		25
KZS 100	1,35	1,50		1,50	-1,50				25		25		25		25
KZS 101	1,35		1,50	1,50	1,50				25		25		25		25
KZS 102	1,35	1,50	1,50	1,50	1,50				25		25		25		25
KZS 103	1,35		1,50	1,50	-1,50				25		25		25		25
KZS 104	1,35	1,50	1,50	1,50	-1,50				25		25		25		25
KZS 105	1,35		-1,50	1,50	1,50				25		25		25		25
KZS 106	1,35	1,50	-1,50	1,50	1,50				25		25		25		25
KZS 107	1,35		-1,50	1,50	-1,50				25		25		25		25
KZS 108	1,35	1,50	-1,50	1,50	-1,50				25		25		25		25

	ZS 1	ZS 2	ZS 3	ZS 4	ZS 5	ZS 6	ZS 7	ZS 8	ZS 9	ZS 10	ZS 11	ZS 12	ZS 13	ZS 14	ZS 15
Popis	stálé	užité	$\pm 15^\circ\text{C}$	nerov. teplota	třecí síly	zkrat gener.	axiálně	$\uparrow G1$	$\rightarrow G1$	$\uparrow G2$	$\rightarrow G2$	$\uparrow T1$	$\rightarrow T1$	$\uparrow T2$	$\rightarrow T2$
KZS 109	1,35								-25		-25		-25		-25
KZS 110	1,35	1,50							-25		-25		-25		-25
KZS 111	1,35		1,50						-25		-25		-25		-25
KZS 112	1,35	1,50	1,50						-25		-25		-25		-25
KZS 113	1,35		-1,50						-25		-25		-25		-25
KZS 114	1,35	1,50	-1,50						-25		-25		-25		-25
KZS 115	1,35			1,50					-25		-25		-25		-25
KZS 116	1,35	1,50		1,50					-25		-25		-25		-25
KZS 117	1,35		1,50	1,50					-25		-25		-25		-25
KZS 118	1,35	1,50	1,50	1,50					-25		-25		-25		-25
KZS 119	1,35		-1,50	1,50					-25		-25		-25		-25
KZS 120	1,35	1,50	-1,50	1,50					-25		-25		-25		-25
KZS 121	1,35				1,50				-25		-25		-25		-25
KZS 122	1,35	1,50			1,50				-25		-25		-25		-25
KZS 123	1,35				-1,50				-25		-25		-25		-25
KZS 124	1,35	1,50			-1,50				-25		-25		-25		-25
KZS 125	1,35		1,50		1,50				-25		-25		-25		-25
KZS 126	1,35	1,50	1,50		1,50				-25		-25		-25		-25

	ZS 1	ZS 2	ZS 3	ZS 4	ZS 5	ZS 6	ZS 7	ZS 8	ZS 9	ZS 10	ZS 11	ZS 12	ZS 13	ZS 14	ZS 15
Popis	stálé	užité	± 15°C	nerov. teplota	třecí síly	zkrat gener.	axiálně	↑ G1	→ G1	↑ G2	→ G2	↑ T1	→ T1	↑ T2	→ T2
KZS 127	1,35		1,50		-1,50				-25		-25		-25		-25
KZS 128	1,35	1,50	1,50		-1,50				-25		-25		-25		-25
KZS 129	1,35		-1,50		1,50				-25		-25		-25		-25
KZS 130	1,35	1,50	-1,50		1,50				-25		-25		-25		-25
KZS 131	1,35		-1,50		-1,50				-25		-25		-25		-25
KZS 132	1,35	1,50	-1,50		-1,50				-25		-25		-25		-25
KZS 133	1,35			1,50	1,50				-25		-25		-25		-25
KZS 134	1,35	1,50		1,50	1,50				-25		-25		-25		-25
KZS 135	1,35			1,50	-1,50				-25		-25		-25		-25
KZS 136	1,35	1,50		1,50	-1,50				-25		-25		-25		-25
KZS 137	1,35		1,50	1,50	1,50				-25		-25		-25		-25
KZS 138	1,35	1,50	1,50	1,50	1,50				-25		-25		-25		-25
KZS 139	1,35		1,50	1,50	-1,50				-25		-25		-25		-25
KZS 140	1,35	1,50	1,50	1,50	-1,50				-25		-25		-25		-25
KZS 141	1,35		-1,50	1,50	1,50				-25		-25		-25		-25
KZS 142	1,35	1,50	-1,50	1,50	1,50				-25		-25		-25		-25
KZS 143	1,35		-1,50	1,50	-1,50				-25		-25		-25		-25
KZS 144	1,35	1,50	-1,50	1,50	-1,50				-25		-25		-25		-25

	ZS 1	ZS 2	ZS 3	ZS 4	ZS 5	ZS 6	ZS 7	ZS 8	ZS 9	ZS 10	ZS 11	ZS 12	ZS 13	ZS 14	ZS 15
Popis	stálé	užité	$\pm 15^\circ\text{C}$	nerov. teplota	třecí síly	zkrat gener.	axiálně	\uparrow G1	\rightarrow G1	\uparrow G2	\rightarrow G2	\uparrow T1	\rightarrow T1	\uparrow T2	\rightarrow T2
KZS 145	0,90						25	25		25		25		25	
KZS 146	0,90	1,50					25	25		25		25		25	
KZS 147	0,90		1,50				25	25		25		25		25	
KZS 148	0,90	1,50	1,50				25	25		25		25		25	
KZS 149	0,90		-1,50				25	25		25		25		25	
KZS 150	0,90	1,50	-1,50				25	25		25		25		25	
KZS 151	0,90			1,50			25	25		25		25		25	
KZS 152	0,90	1,50		1,50			25	25		25		25		25	
KZS 153	0,90		1,50	1,50			25	25		25		25		25	
KZS 154	0,90	1,50	1,50	1,50			25	25		25		25		25	
KZS 155	0,90		-1,50	1,50			25	25		25		25		25	
KZS 156	0,90	1,50	-1,50	1,50			25	25		25		25		25	
KZS 157	0,90				1,50		25	25		25		25		25	
KZS 158	0,90	1,50			1,50		25	25		25		25		25	
KZS 159	0,90				-1,50		25	25		25		25		25	
KZS 160	0,90	1,50			-1,50		25	25		25		25		25	
KZS 161	0,90		1,50		1,50		25	25		25		25		25	
KZS 162	0,90	1,50	1,50		1,50		25	25		25		25		25	

	ZS 1	ZS 2	ZS 3	ZS 4	ZS 5	ZS 6	ZS 7	ZS 8	ZS 9	ZS 10	ZS 11	ZS 12	ZS 13	ZS 14	ZS 15
Popis	stálé	užité	± 15°C	nerov. teplota	třecí síly	zkrat gener.	axiálně	↑ G1	→ G1	↑ G2	→ G2	↑ T1	→ T1	↑ T2	→ T2
KZS 163	0,90		1,50		-1,50		25	25		25		25		25	
KZS 164	0,90	1,50	1,50		-1,50		25	25		25		25		25	
KZS 165	0,90		-1,50		1,50		25	25		25		25		25	
KZS 166	0,90	1,50	-1,50		1,50		25	25		25		25		25	
KZS 167	0,90		-1,50		-1,50		25	25		25		25		25	
KZS 168	0,90	1,50	-1,50		-1,50		25	25		25		25		25	
KZS 169	0,90			1,50	1,50		25	25		25		25		25	
KZS 170	0,90	1,50		1,50	1,50		25	25		25		25		25	
KZS 171	0,90			1,50	-1,50		25	25		25		25		25	
KZS 172	0,90	1,50		1,50	-1,50		25	25		25		25		25	
KZS 173	0,90		1,50	1,50	1,50		25	25		25		25		25	
KZS 174	0,90	1,50	1,50	1,50	1,50		25	25		25		25		25	
KZS 175	0,90		1,50	1,50	-1,50		25	25		25		25		25	
KZS 176	0,90	1,50	1,50	1,50	-1,50		25	25		25		25		25	
KZS 177	0,90		-1,50	1,50	1,50		25	25		25		25		25	
KZS 178	0,90	1,50	-1,50	1,50	1,50		25	25		25		25		25	
KZS 179	0,90		-1,50	1,50	-1,50		25	25		25		25		25	
KZS 180	0,90	1,50	-1,50	1,50	-1,50		25	25		25		25		25	

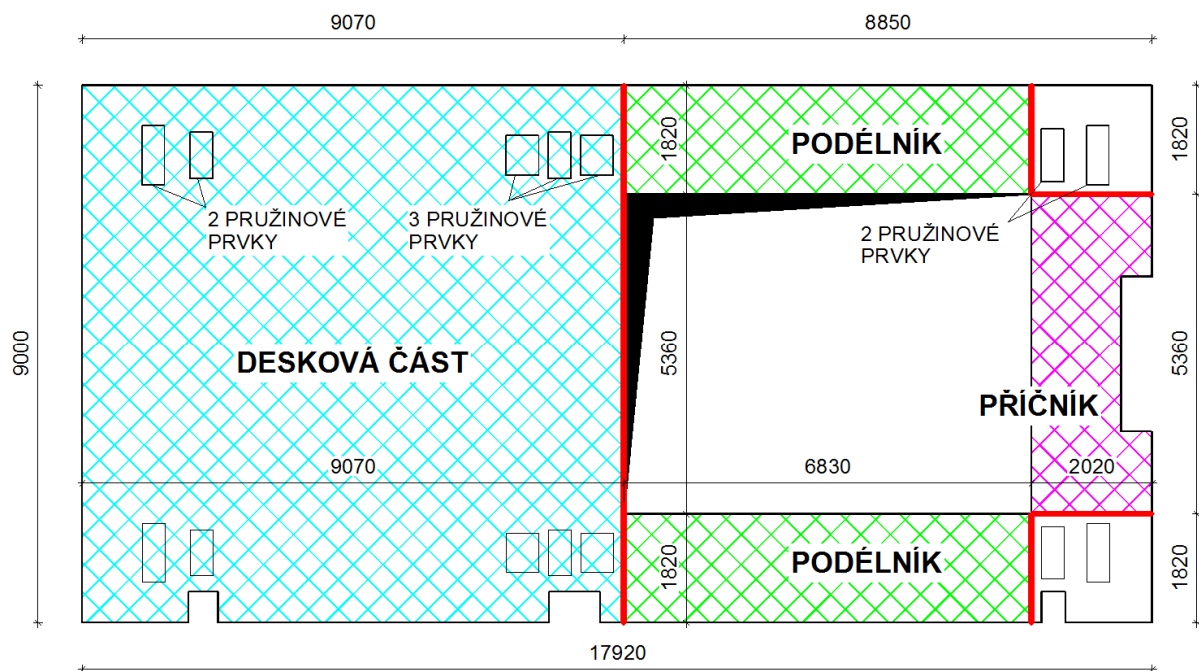
Tab.: Vytvořené kombinace zatěžovacích stavů - 4. skupina zahrnující mimořádné zatížení zkratem generátoru (KZS 181 – KZS 190)

	ZS 1	ZS 2	ZS 3	ZS 4	ZS 5	ZS 6	ZS 7	ZS 8	ZS 9	ZS 10	ZS 11	ZS 12	ZS 13	ZS 14	ZS 15
Popis	stálé	užitné	± 15°C	nerov. teplota	třecí síly	zkrat gener.	axiálně	↑ G1	→ G1	↑ G2	→ G2	↑ T1	→ T1	↑ T2	→ T2
KZS 181	1,00					1,70									
KZS 182	1,00					-1,70									
KZS 183	1,00					1,70						16,67		16,67	
KZS 184	1,00					-1,70						16,67		16,67	
KZS 185	1,00					1,70						-16,67		-16,67	
KZS 186	1,00					-1,70						-16,67		-16,67	
KZS 187	1,00					1,70							16,67		16,67
KZS 188	1,00					-1,70							16,67		16,67
KZS 189	1,00					1,70							-16,67		-16,67
KZS 190	1,00					-1,70							-16,67		-16,67

3.7.4. Návrhové vnitřní síly

Konstrukce horní desky základu byla rozdělena na 3 části, ve kterých bude navržena výztuž na maximální ohybový moment a posouvající sílu. Jedná se o deskovou část, 2 podélníky a příčník.

Obr.: Rozdělení horní desky základu na deskovou část, 2 podélníky a příčník



V následujících tabulkách jsou uvedeny dimenzační ohybové momenty a posouvající síly z nejneprůzračnějších kombinací zatěžovacích stavů. Uvedené návrhové vnitřní síly jsou již zredukované k líci podpor.

1) Desková část – ohybové momenty:

číslo KZS	$m_{x,D+}$ [kNm/m]	$m_{y,D+}$ [kNm/m]	$m_{x,D-}$ [kNm/m]	$m_{y,D-}$ [kNm/m]
65	2522	2309	-1926	-2461
68	2507	2299	-1921	-2448
137	2552*	2181	-1934	-2368

* Dimenzační ohybový moment 2552 kNm/m je v části desky pod generátorem s tloušťkou $h = 1,9 \text{ m}$.

V části desky s tloušťkou $h = 2,5 \text{ m}$ je hodnota dimenzačního ohybového momentu vyšší:

$$m_{x,D}^+ = 3400 \text{ kNm/m} \quad (\text{KZS } 137)$$

2) Podélníky – ohybové momenty:

číslo KZS	$m_{x,D+}$ [kNm/m]	$m_{y,D+}$ [kNm/m]	$m_{x,D-}$ [kNm/m]	$m_{y,D-}$ [kNm/m]
59	1227	991	745	603
60	1386	919	845	600
174	446	-326	1914	1256

3) Příčnick – ohybové momenty:

číslo KZS	$m_{x,D+}$ [kNm/m]	$m_{y,D+}$ [kNm/m]	$m_{x,D-}$ [kNm/m]	$m_{y,D-}$ [kNm/m]
67	1378	2804	1203	1691

4) Desková část – posouvající síly - - mimo pružinové podpory:

číslo KZS	V_x [kN/m]	V_y [kN/m]
68	909	1273

5) Desková část – posouvající síly - - dvojice pružinových podpor:

číslo KZS	V_x [kN/m]	V_y [kN/m]
60	1708	806

6) Desková část – posouvající síly - - trojice pružinových podpor:

číslo KZS	V_x [kN/m]	V_y [kN/m]
68	-2660	1616

7) Podélník – posouvající síly:

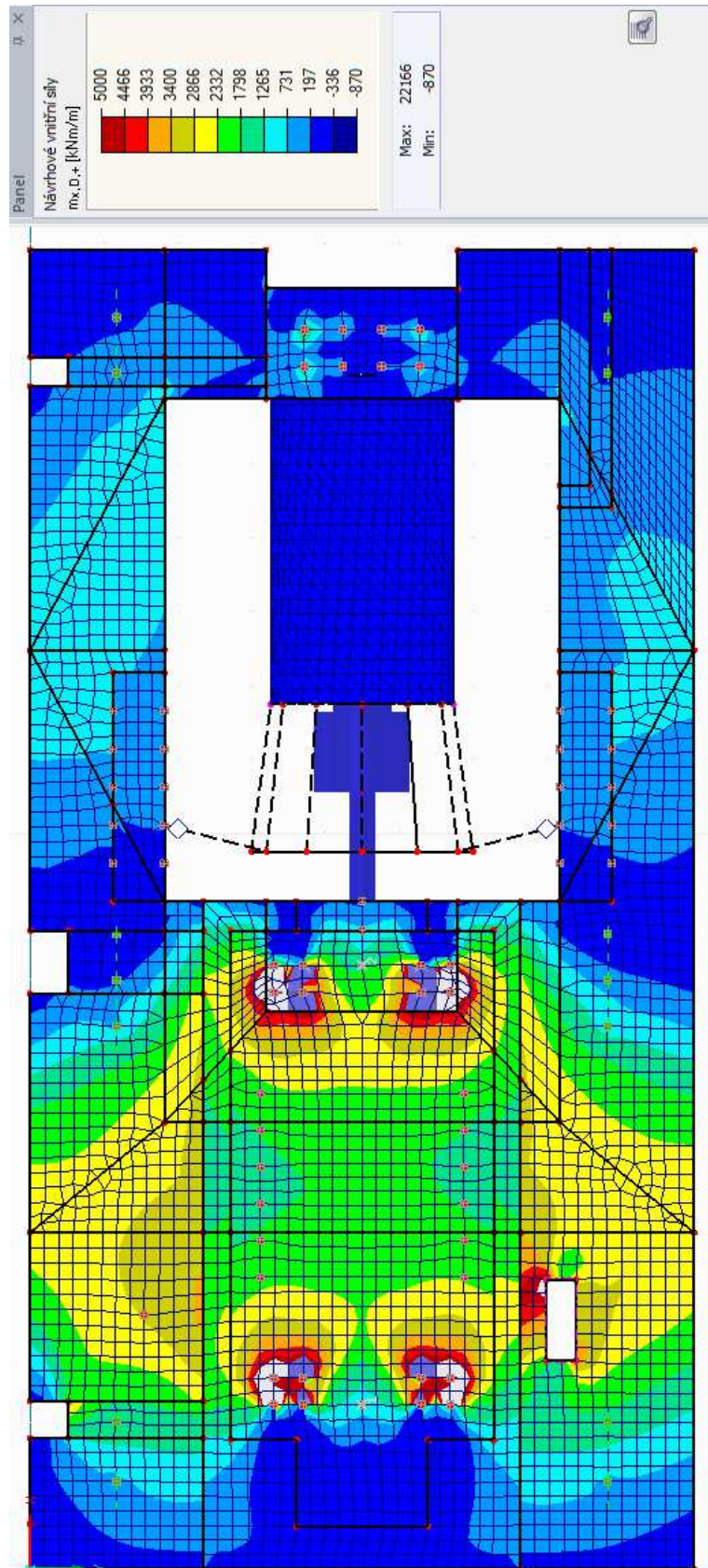
číslo KZS	V_x [kN/m]	V_y [kN/m]
57	1739	2008
66	2069	1801

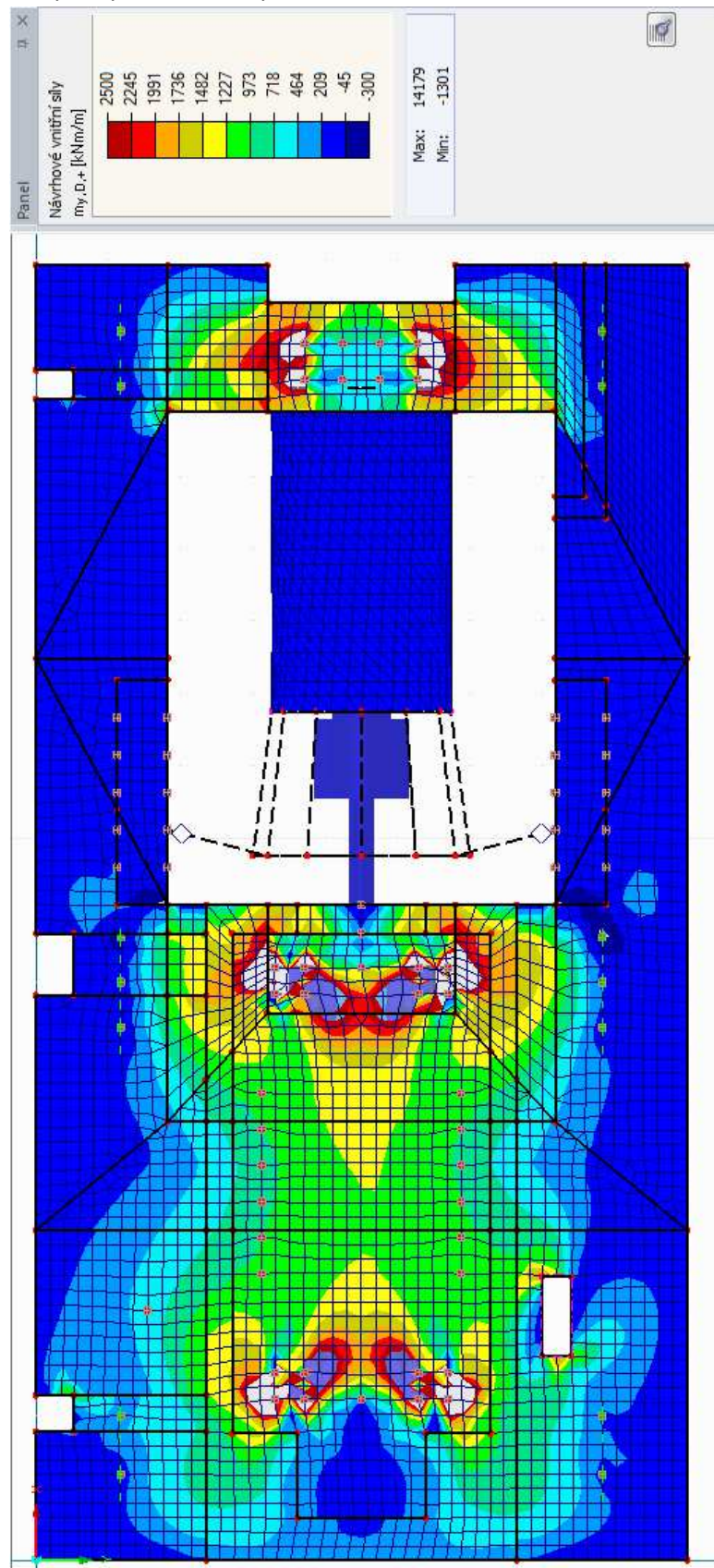
8) Příčnick – posouvající síly:

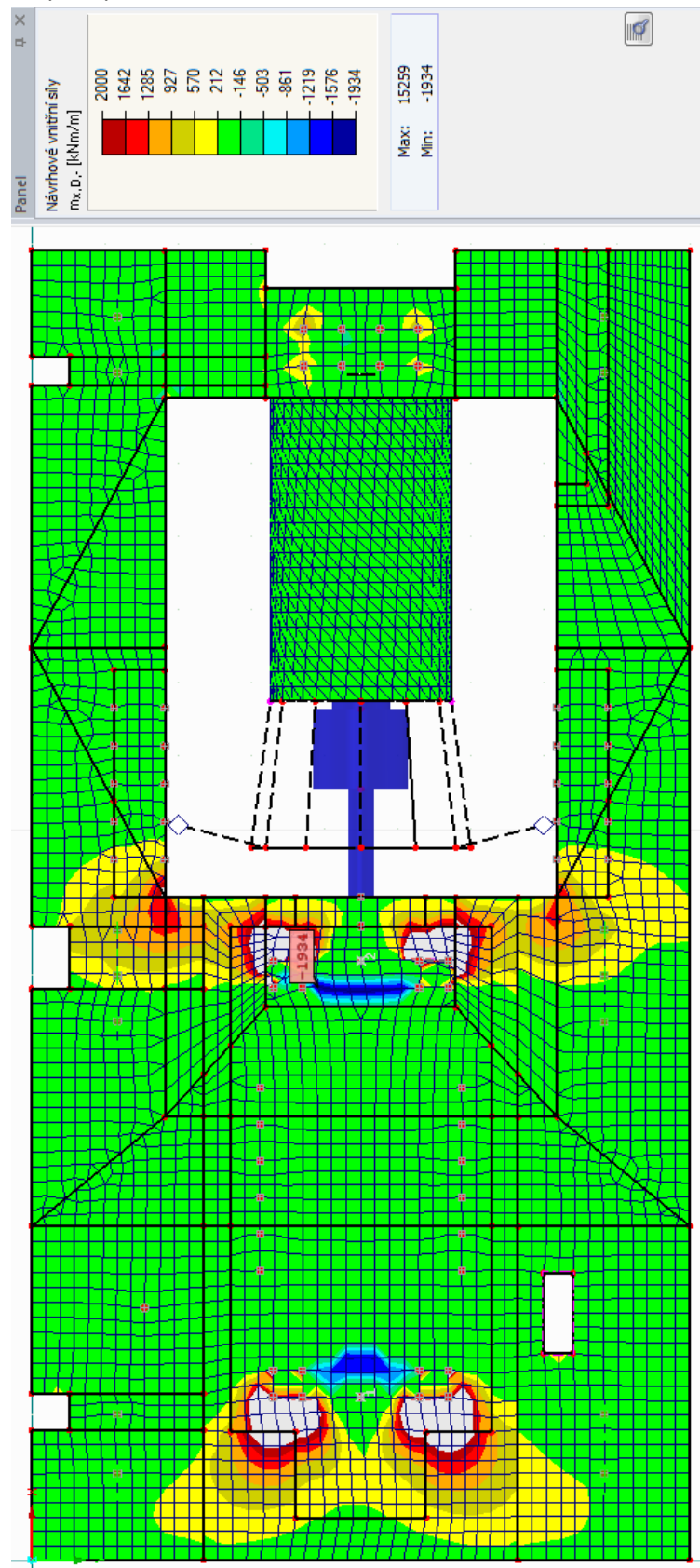
číslo KZS	V _x [kN/m]	V _y [kN/m]
67	857	1657

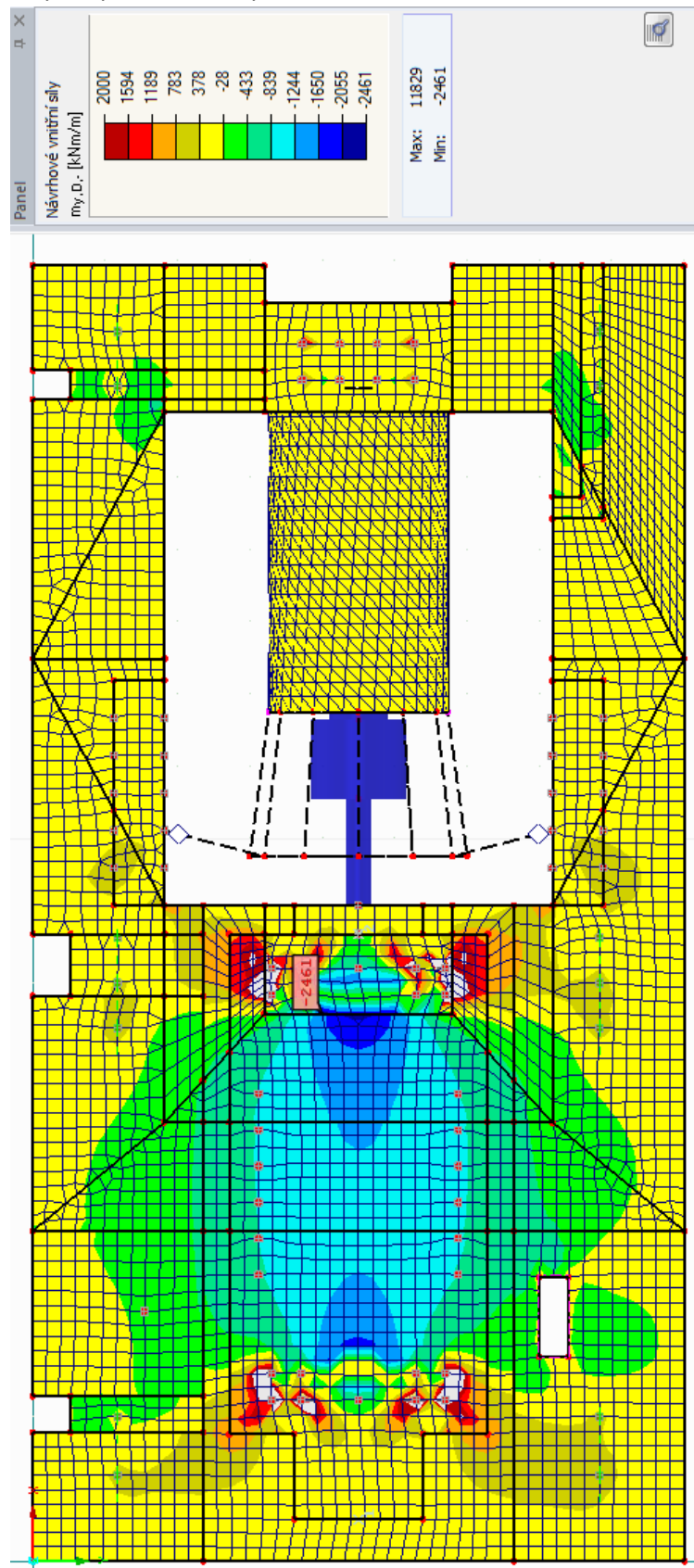
9) Dvojice pružinových podpor mezi podélníkem a příčnickem – posouvající síly:

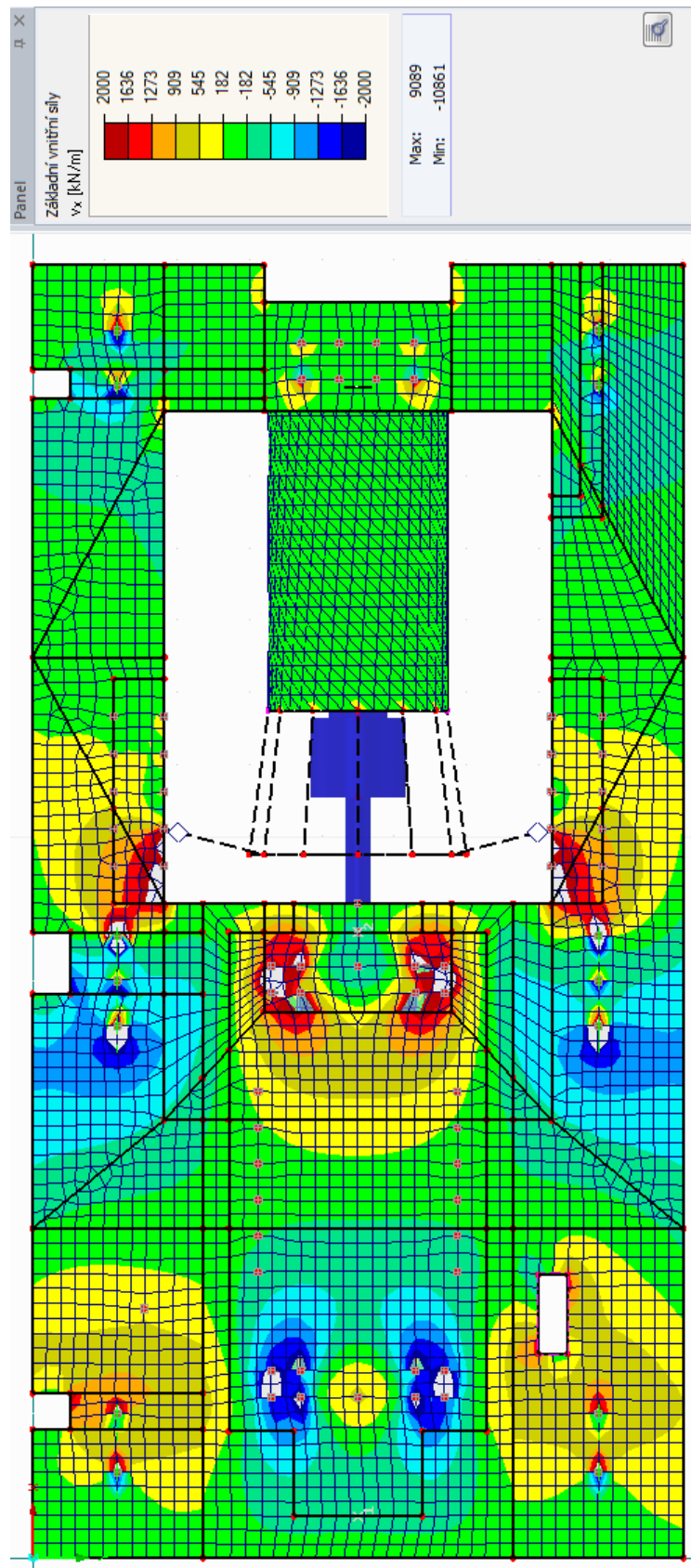
číslo KZS	V _x [kN/m]	V _y [kN/m]
60	1576	-849

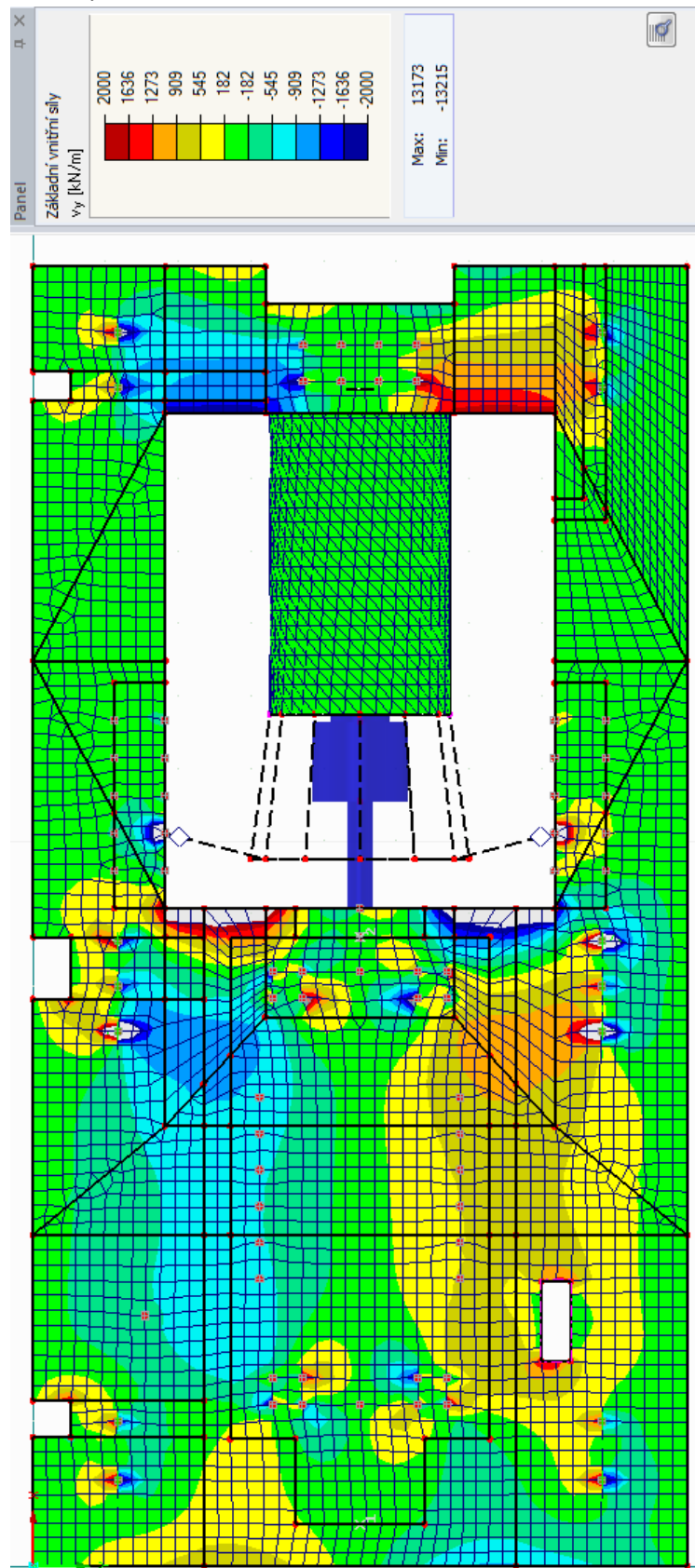
Obr.: Dimenzační ohybový moment $m_{x,D} +$ (KZS 137)

Obr.: Dimenzační ohybový moment $m_{y,D} +$ (KZS 65)

Obr.: Dimenzační ohybový moment $m_{x,D}$ – (KZS 137)

Obr.: Dimenzační ohybový moment $m_{y,D}$ – (KZS 65)

Obr.: Posouvající síla V_x (KZS 68)

Obr.: Posouvající síla V_y (KZS 68)

3.7.5. Dimenzování výztuže

Materiálové charakteristiky

- Navržená třída betonu: **C 30/37, XC1**
 - charakteristická pevnost betonu v tlaku: $f_{ck} = 30 \text{ MPa}$
 - návrhová pevnost betonu v tlaku:

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_M} = \frac{30}{1,5} = 20 \text{ MPa}$$

- Navržená betonářská výztuž: **B 500 B**
 - charakteristická mez kluzu: $f_{yk} = 500 \text{ MPa}$
 - návrhová pevnost výztuže v tahu:

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_S} = \frac{500}{1,15} = 434,78 \text{ MPa}$$

Návrh krytí

- jmenovitá (nominální) hodnota tloušťky betonové krycí vrstvy: $c \geq c_{nom}$
- $$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev}$$

- minimální hodnota krytí:

$$c_{min} = \max\{c_{min,b}; c_{min,dur} + \Delta c_{dur,\gamma} - \Delta c_{dur,st} - \Delta c_{dur,add}; 10 \text{ mm}\}$$

$\Delta c_{dur,\gamma} = 0$... přídatná hodnota z hlediska spolehlivosti

$\Delta c_{dur,st} = 0$... redukce min. krycí vrstvy při použití nerezové oceli

$\Delta c_{dur,add} = 0$... redukce min. krycí vrstvy při použití dodatečné ochrany

- minimální krycí vrstva z hlediska prostředí:

- o stupeň prostředí XC1
- o třída konstrukce S4

↓

$$c_{min,dur} = 15 \text{ mm}$$

- minimální krycí vrstva s přihlédnutím k požadavku soudržnosti:

- o předpokládaný průměr výztužného prutu: $\emptyset 25 \text{ mm} \rightarrow c_{min,b} = 25 \text{ mm}$

$$c_{min} = \max\{25; 15 + 0 - 0 - 0; 10 \text{ mm}\} = \max\{25; 15; 10 \text{ mm}\} = 25 \text{ mm}$$

- požadavek na návrhovou odchylku - doporučená hodnota pro monolitickou konstrukci: $\Delta c_{dev} = 10 \text{ mm}$

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev} = 25 + 10 = 35 \text{ mm}$$

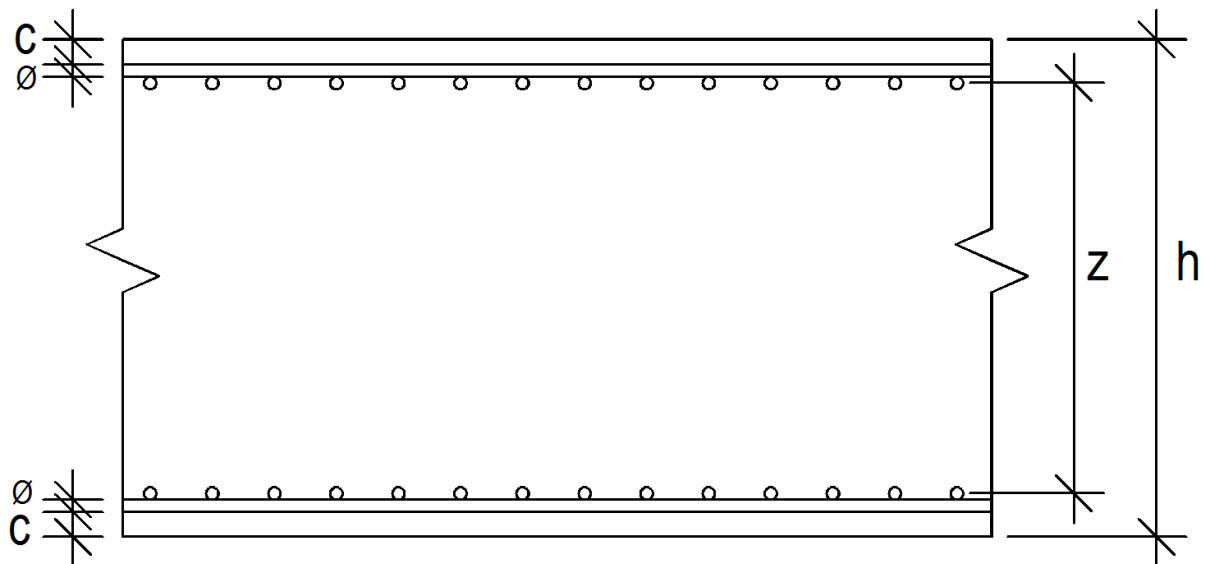
NAVRŽENÁ TLOUŠŤKA KRYCÍ VRSTVY: $c = 50 \text{ mm}$

Uvažované rameno vnitřních sil pro výpočet

Rameno vnitřních sil je pro výpočet uvažované na straně bezpečné a odpovídá vzdálenosti těžišť vnitřních profilů horní a dolní výztuže. Rameno vnitřních sil je uvažované do obou směrů x a y stejné.

$$z = h - 2 \cdot \left(c + \phi + \frac{\phi}{2} \right) = h - 2 \cdot c - 3 \cdot \phi$$

Obr.: Rameno vnitřních sil pro výpočet



○ **Návrh a posouzení výztuže na ohyb**

Požadavek na minimální stupeň vyztužení: $\rho_{min} = 0,2 \%$

Minimální plocha výztuže:

$$A_{s,min} = \rho_{min} \cdot h \cdot b = 0,002 \cdot 1,9 \cdot 1 = 3,8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 = 3800 \text{ mm}^2$$

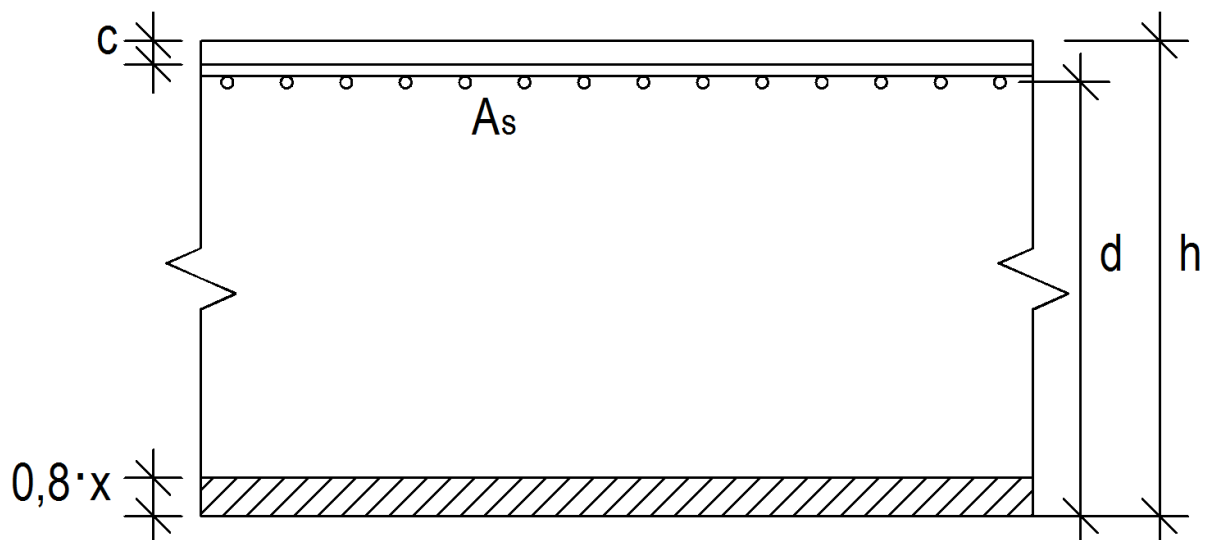
Navržená výztuž do obou směrů x a y při horním i dolním povrchu desky ve všech částech desky: **$\varnothing 25 \text{ mm}$ á 125 mm**

Plocha navržené výztuže: $\varnothing = 25 \text{ mm}$ $s = 125 \text{ mm}$

$$A_s = \pi \cdot \frac{\varnothing^2}{4} \cdot \frac{1000}{s} = \pi \cdot \frac{25^2}{4} \cdot \frac{1000}{125} = 3927 \text{ mm}^2$$

1) **Desková část:**

a) horní povrch desky – osa x - $m_{x,D}^+$



I.) Výpočet pro maximální ohybový moment v části desky o tloušťce 1,9 m:

$$M_{Ed} = 2552 \text{ kNm}$$

$$h = 1900 \text{ mm}$$

$$b = 1000 \text{ mm}$$

Účinná výška průřezu:

$$d = h - c - \phi_y - \frac{\phi_x}{2} = 1900 - 50 - 25 - \frac{25}{2} = 1812,5 \text{ mm}$$

Požadovaná plocha výztuže:

$$\lambda = 0,8 \quad \eta = 1,0$$

$$\begin{aligned} A_{s,req} &= \frac{b \cdot d \cdot \eta \cdot f_{cd}}{f_{yd}} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot M_{Ed}}{b \cdot d^2 \cdot \eta \cdot f_{cd}}} \right) = \\ &= \frac{1000 \cdot 1812,5 \cdot 1,0 \cdot 20}{434,78} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot 2552 \cdot 10^6}{1000 \cdot 1812,5^2 \cdot 1,0 \cdot 20}} \right) = 3304 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Výška tlačené oblasti:

$$x = \frac{A_s \cdot f_{yd}}{b \cdot \lambda \cdot \eta \cdot f_{cd}} = \frac{3927 \cdot 434,78}{1000 \cdot 0,8 \cdot 1 \cdot 20} = 106,7 \text{ mm}$$

Rameno vnitřních sil:

$$z = h - 2 \cdot c - 3 \cdot \phi = 1900 - 2 \cdot 50 - 3 \cdot 25 = 1725 \text{ mm}$$

Návrhový moment únosnosti:

$$M_{Rd} = A_s \cdot f_{yd} \cdot z = 3927 \cdot 434,78 \cdot 1725 \cdot 10^{-6} = 2945 \text{ kNm}$$

Posouzení:

$$\begin{aligned} M_{Rd} &> M_{Ed} \\ 2945 \text{ kNm} &> 2552 \text{ kNm} \end{aligned}$$

Navržená výztuž $\phi 25 \text{ mm}$ á 125 mm VYHOVUJE.

II.) Výpočet pro maximální ohybový moment v části desky o tloušťce 2,5 m:

$$M_{Ed} = 3400 \text{ kNm}$$

$$h = 2500 \text{ mm} \quad b = 1000 \text{ mm}$$

Účinná výška průřezu:

$$d = h - c - \phi_y - \frac{\phi_x}{2} = 2500 - 50 - 25 - \frac{25}{2} = 2412,5 \text{ mm}$$

Požadovaná plocha výztuže:

$$\lambda = 0,8 \quad \eta = 1,0$$

$$A_{s,req} = \frac{b \cdot d \cdot \eta \cdot f_{cd}}{f_{yd}} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot M_{Ed}}{b \cdot d^2 \cdot \eta \cdot f_{cd}}} \right) =$$

$$= \frac{1000 \cdot 2412,5 \cdot 1,0 \cdot 20}{434,78} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot 3400 \cdot 10^6}{1000 \cdot 2412,5^2 \cdot 1,0 \cdot 20}} \right) = 3290 \text{ mm}^2$$

Výška tlačené oblasti:

$$x = \frac{A_s \cdot f_{yd}}{b \cdot \lambda \cdot \eta \cdot f_{cd}} = \frac{3927 \cdot 434,78}{1000 \cdot 0,8 \cdot 1 \cdot 20} = 106,7 \text{ mm}$$

Rameno vnitřních sil:

$$z = h - 2 \cdot c - 3 \cdot \phi = 2500 - 2 \cdot 50 - 3 \cdot 25 = 2325 \text{ mm}$$

Návrhový moment únosnosti:

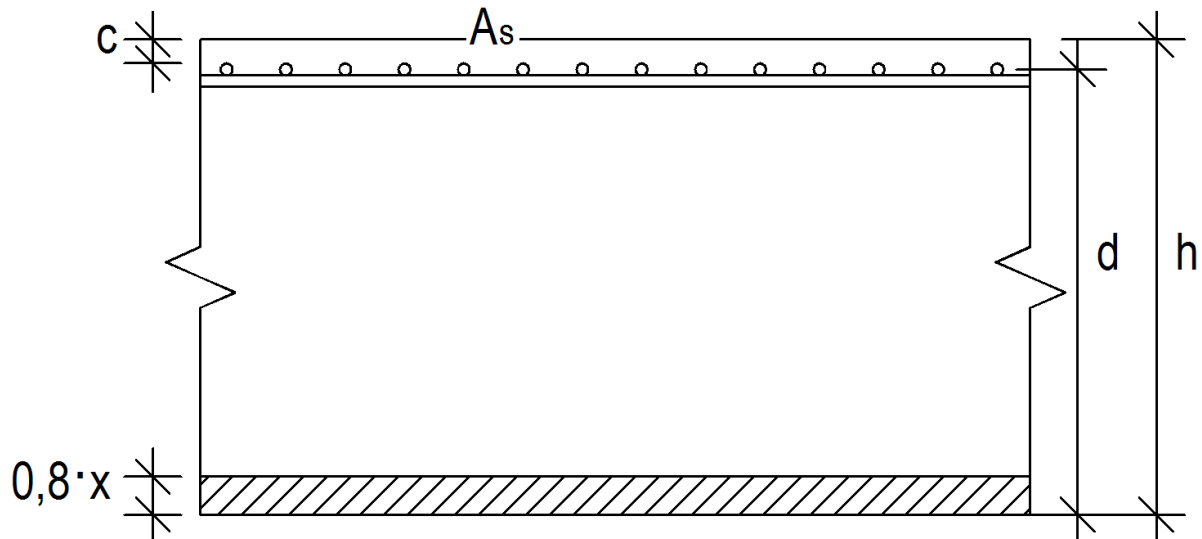
$$M_{Rd} = A_s \cdot f_{yd} \cdot z = 3927 \cdot 434,78 \cdot 2325 \cdot 10^{-6} = 3970 \text{ kNm}$$

Posouzení:

$$M_{Rd} > M_{Ed}$$

$$3970 \text{ kNm} > 3400 \text{ kNm}$$

Navržená výztuž $\phi 25 \text{ mm}$ á 125 mm VYHOVUJE.

b) horní povrch desky – osa y - $m_{y,D}^+$ 

$$M_{Ed} = 2309 \text{ kNm}$$

$$h = 1900 \text{ mm} \quad b = 1000 \text{ mm}$$

Účinná výška průřezu:

$$d = h - c - \frac{\phi_y}{2} = 1900 - 50 - \frac{25}{2} = 1837,5 \text{ mm}$$

Požadovaná plocha výztuže:

$$\lambda = 0,8 \quad \eta = 1,0$$

$$\begin{aligned} A_{s,req} &= \frac{b \cdot d \cdot \eta \cdot f_{cd}}{f_{yd}} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot M_{Ed}}{b \cdot d^2 \cdot \eta \cdot f_{cd}}} \right) = \\ &= \frac{1000 \cdot 1837,5 \cdot 1,0 \cdot 20}{434,78} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot 2309 \cdot 10^6}{1000 \cdot 1837,5^2 \cdot 1,0 \cdot 20}} \right) = 2941 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\text{Výška tlačené oblasti:} \quad x = 106,7 \text{ mm}$$

$$\text{Rameno vnitřních sil:} \quad z = 1725 \text{ mm}$$

Návrhový moment únosnosti:

$$M_{Rd} = A_s \cdot f_{yd} \cdot z = 3927 \cdot 434,78 \cdot 1725 \cdot 10^{-6} = 2945 \text{ kNm}$$

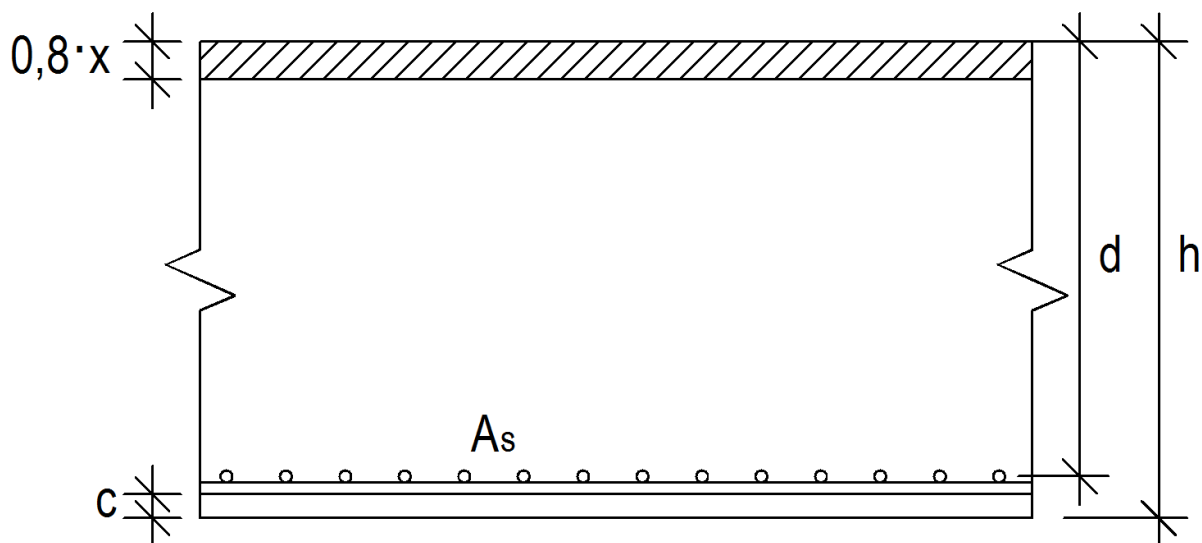
Posouzení:

$$M_{Rd} > M_{Ed}$$

$$2945 \text{ kNm} > 2309 \text{ kNm}$$

Navržená výztuž $\phi 25 \text{ mm}$ á 125 mm VYHOVUJE.

c) dolní povrch desky – osa x - $m_{x,D}^-$



$$M_{Ed} = 1934 \text{ kNm}$$

$$h = 1900 \text{ mm} \quad b = 1000 \text{ mm}$$

Účinná výška průřezu:

$$d = h - c - \phi_y - \frac{\phi_x}{2} = 1900 - 50 - 25 - \frac{25}{2} = 1812,5 \text{ mm}$$

Požadovaná plocha výztuže:

$$\lambda = 0,8 \quad \eta = 1,0$$

$$A_{s,req} = \frac{b \cdot d \cdot \eta \cdot f_{cd}}{f_{yd}} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot M_{Ed}}{b \cdot d^2 \cdot \eta \cdot f_{cd}}} \right) =$$

$$= \frac{1000 \cdot 1812,5 \cdot 1,0 \cdot 20}{434,78} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot 1934 \cdot 10^6}{1000 \cdot 1812,5^2 \cdot 1,0 \cdot 20}} \right) = 2491 \text{ mm}^2$$

Výška tlačené oblasti: $x = 106,7 \text{ mm}$

Rameno vnitřních sil: $z = 1725 \text{ mm}$

Návrhový moment únosnosti:

$$M_{Rd} = A_s \cdot f_{yd} \cdot z = 3927 \cdot 434,78 \cdot 1725 \cdot 10^{-6} = 2945 \text{ kNm}$$

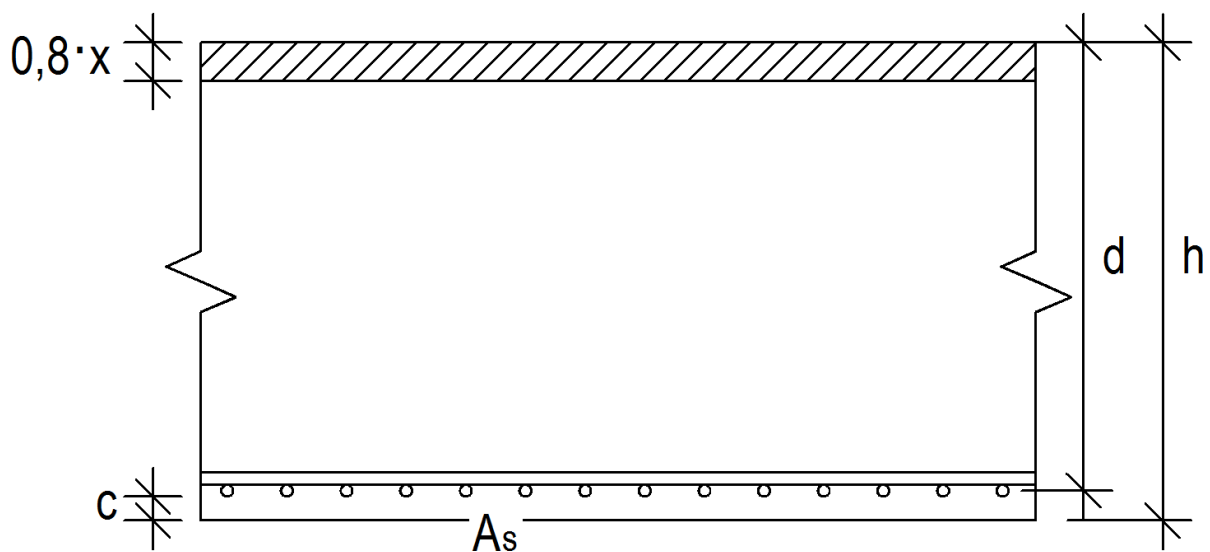
Posouzení:

$$M_{Rd} > M_{Ed}$$

$$2945 \text{ kNm} > 1934 \text{ kNm}$$

Navržená výztuž $\phi 25 \text{ mm}$ á 125 mm VYHOVUJE.

d) dolní povrch desky – osa y - $m_{y,D}^-$



$$M_{Ed} = 2461 \text{ kNm}$$

$$h = 1900 \text{ mm} \quad b = 1000 \text{ mm}$$

Účinná výška průřezu:

$$d = h - c - \frac{\phi_y}{2} = 1900 - 50 - \frac{25}{2} = 1837,5 \text{ mm}$$

Požadovaná plocha výztuže:

$$\lambda = 0,8 \quad \eta = 1,0$$

$$A_{s,req} = \frac{b \cdot d \cdot \eta \cdot f_{cd}}{f_{yd}} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot M_{Ed}}{b \cdot d^2 \cdot \eta \cdot f_{cd}}} \right) =$$

$$= \frac{1000 \cdot 1837,5 \cdot 1,0 \cdot 20}{434,78} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot 2461 \cdot 10^6}{1000 \cdot 1837,5^2 \cdot 1,0 \cdot 20}} \right) = 3139 \text{ mm}^2$$

Výška tlačené oblasti: $x = 106,7 \text{ mm}$

Rameno vnitřních sil: $z = 1725 \text{ mm}$

Návrhový moment únosnosti:

$$M_{Rd} = A_s \cdot f_{yd} \cdot z = 3927 \cdot 434,78 \cdot 1725 \cdot 10^{-6} = 2945 \text{ kNm}$$

Posouzení:

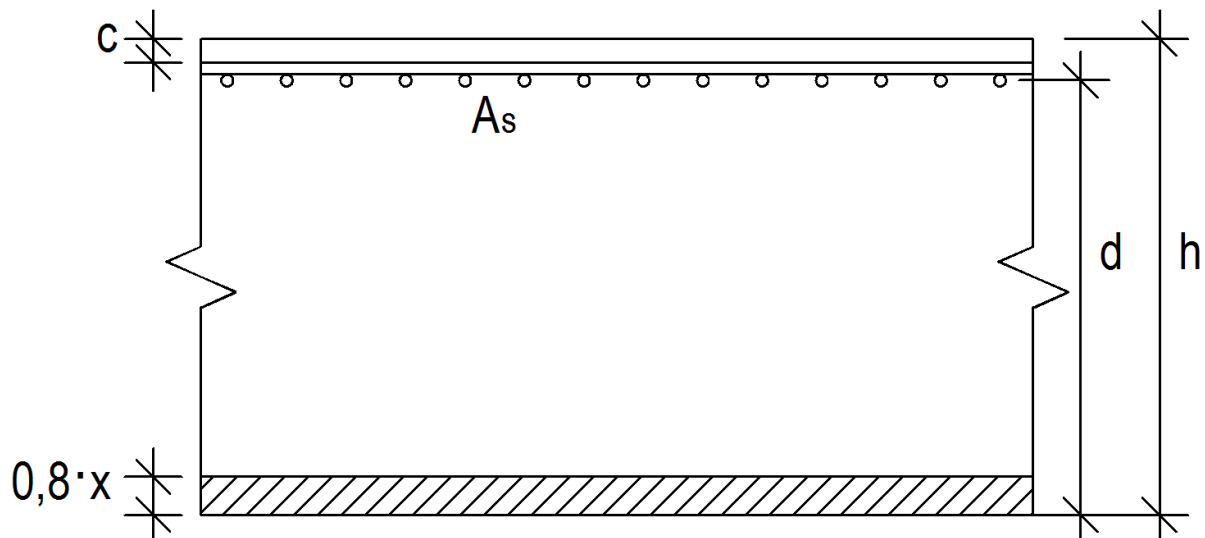
$$M_{Rd} > M_{Ed}$$

$$2945 \text{ kNm} > 2461 \text{ kNm}$$

Navržená výztuž $\phi 25 \text{ mm}$ á 125 mm VYHOVUJE.

2) Podélníky:

a) horní povrch desky – osa x - $m_{x,D}^+$



$$M_{Ed} = 1386 \text{ kNm}$$

$$h = 2120 \text{ mm} \quad b = 1000 \text{ mm}$$

Účinná výška průřezu:

$$d = h - c - \phi_y - \frac{\phi_x}{2} = 2120 - 50 - 25 - \frac{25}{2} = 2032,5 \text{ mm}$$

Požadovaná plocha výztuže:

$$\lambda = 0,8 \quad \eta = 1,0$$

$$\begin{aligned} A_{s,req} &= \frac{b \cdot d \cdot \eta \cdot f_{cd}}{f_{yd}} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot M_{Ed}}{b \cdot d^2 \cdot \eta \cdot f_{cd}}} \right) = \\ &= \frac{1000 \cdot 2032,5 \cdot 1,0 \cdot 20}{434,78} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot 1386 \cdot 10^6}{1000 \cdot 2032,5^2 \cdot 1,0 \cdot 20}} \right) = 1582 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\text{Výška tlačené oblasti:} \quad x = 106,7 \text{ mm}$$

Rameno vnitřních sil:

$$z = h - 2 \cdot c - 3 \cdot \phi = 2120 - 2 \cdot 50 - 3 \cdot 25 = 1945 \text{ mm}$$

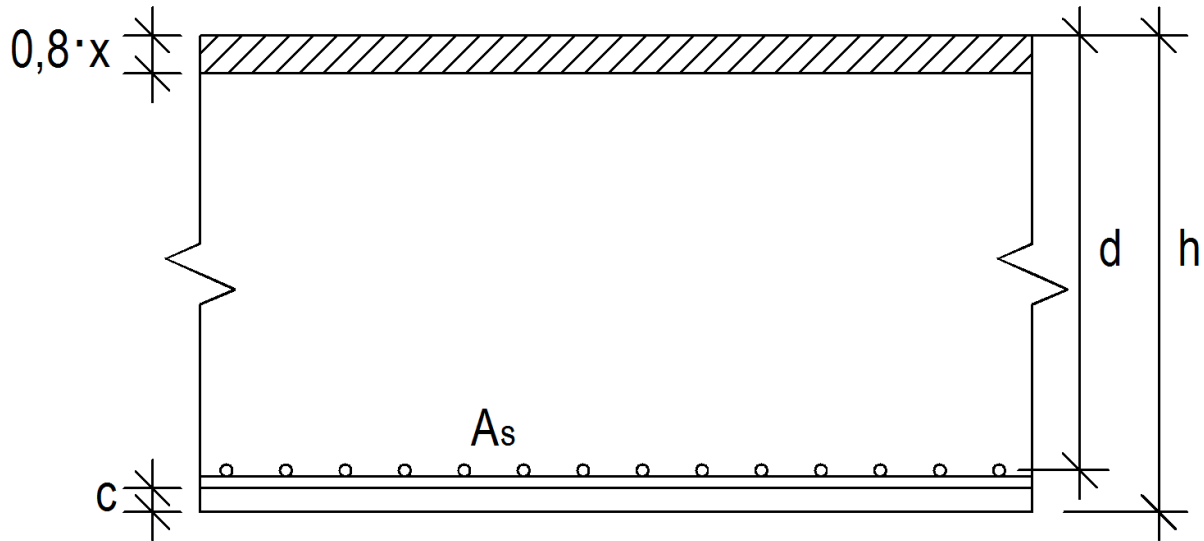
Návrhový moment únosnosti:

$$M_{Rd} = A_s \cdot f_{yd} \cdot z = 3927 \cdot 434,78 \cdot 1945 \cdot 10^{-6} = 3321 \text{ kNm}$$

Posouzení:

$$\begin{aligned} M_{Rd} &> M_{Ed} \\ 3321 \text{ kNm} &> 1386 \text{ kNm} \end{aligned}$$

Navržená výztuž $\phi 25 \text{ mm}$ á 125 mm VYHOVUJE.

b) dolní povrch desky – osa x - $m_{x,D}^-$ 

$$M_{Ed} = 1914 \text{ kNm}$$

$$h = 2120 \text{ mm} \quad b = 1000 \text{ mm}$$

Účinná výška průřezu:

$$d = h - c - \frac{\phi_y}{2} = 2120 - 50 - 25 - \frac{25}{2} = 2032,5 \text{ mm}$$

Požadovaná plocha výztuže:

$$\lambda = 0,8 \quad \eta = 1,0$$

$$A_{s,req} = \frac{b \cdot d \cdot \eta \cdot f_{cd}}{f_{yd}} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot M_{Ed}}{b \cdot d^2 \cdot \eta \cdot f_{cd}}} \right) =$$

$$= \frac{1000 \cdot 2032,5 \cdot 1,0 \cdot 20}{434,78} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot 1914 \cdot 10^6}{1000 \cdot 2032,5^2 \cdot 1,0 \cdot 20}} \right) = 2192 \text{ mm}^2$$

Výška tlačené oblasti: $x = 106,7 \text{ mm}$

Rameno vnitřních sil: $z = 1945 \text{ mm}$

Návrhový moment únosnosti:

$$M_{Rd} = A_s \cdot f_{yd} \cdot z = 3927 \cdot 434,78 \cdot 1945 \cdot 10^{-6} = 3321 \text{ kNm}$$

Posouzení:

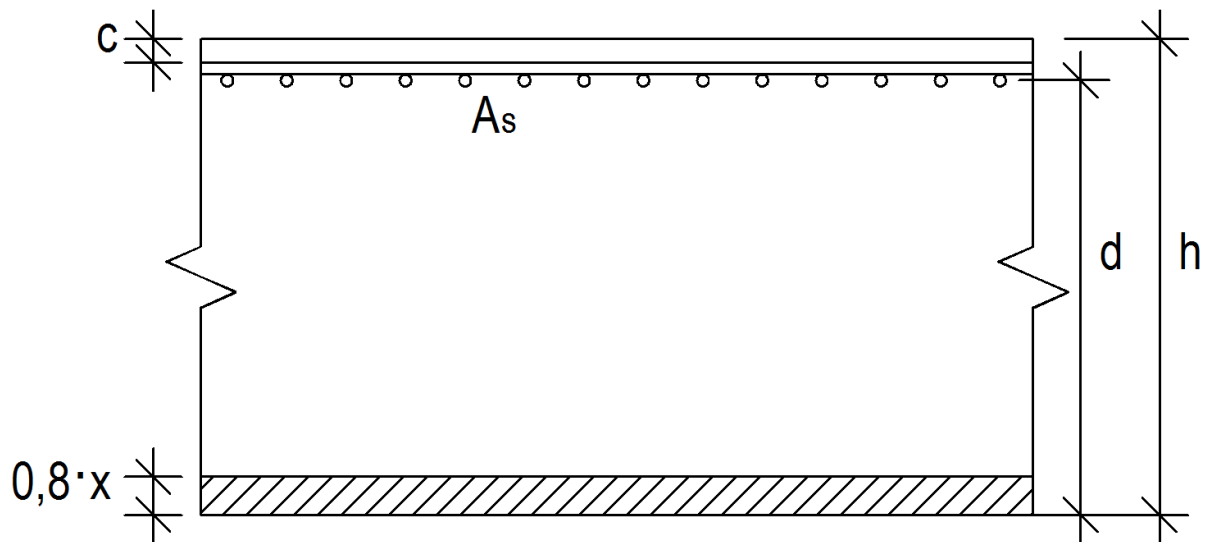
$$M_{Rd} > M_{Ed}$$

$$3321 \text{ kNm} > 1914 \text{ kNm}$$

Navržená výztuž $\phi 25 \text{ mm}$ á 125 mm VYHOVUJE.

3) Příčník:

a) horní povrch desky – osa y - $m_{y,D}^+$



$$M_{Ed} = 2804 \text{ kNm}$$

$$h = 2220 \text{ mm} \quad b = 1000 \text{ mm}$$

Účinná výška průřezu:

$$d = h - c - \phi_y - \frac{\phi_x}{2} = 2220 - 50 - 25 - \frac{25}{2} = 2132,5 \text{ mm}$$

Požadovaná plocha výztuže:

$$\lambda = 0,8 \quad \eta = 1,0$$

$$A_{s,req} = \frac{b \cdot d \cdot \eta \cdot f_{cd}}{f_{yd}} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot M_{Ed}}{b \cdot d^2 \cdot \eta \cdot f_{cd}}} \right) =$$

$$= \frac{1000 \cdot 2132,5 \cdot 1,0 \cdot 20}{434,78} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot 2804 \cdot 10^6}{1000 \cdot 2132,5^2 \cdot 1,0 \cdot 20}} \right) = 3072 \text{ mm}^2$$

Výška tlačené oblasti: $x = 106,7 \text{ mm}$

Rameno vnitřních sil:

$$z = h - 2 \cdot c - 3 \cdot \phi = 2220 - 2 \cdot 50 - 3 \cdot 25 = 2045 \text{ mm}$$

Návrhový moment únosnosti:

$$M_{Rd} = A_s \cdot f_{yd} \cdot z = 3927 \cdot 434,78 \cdot 2045 \cdot 10^{-6} = 3492 \text{ kNm}$$

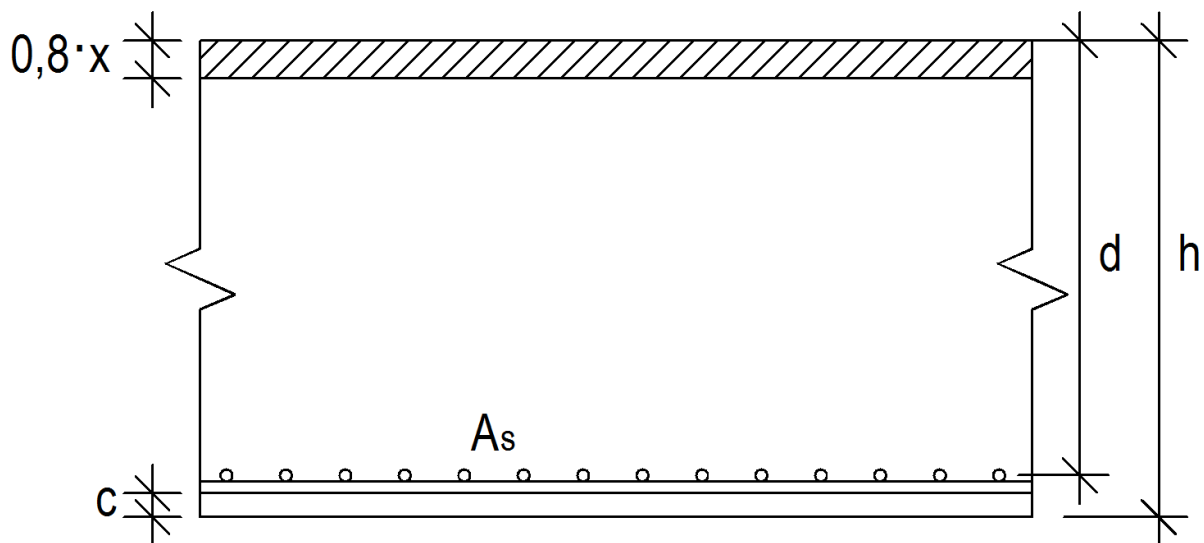
Posouzení:

$$M_{Rd} > M_{Ed}$$

$$3492 \text{ kNm} > 2804 \text{ kNm}$$

Navržená výztuž $\phi 25 \text{ mm}$ á 125 mm VYHOVUJE.

b) dolní povrch desky – osa y - $m_{y,D}^-$



$$M_{Ed} = 1691 \text{ kNm}$$

$$h = 2220 \text{ mm} \quad b = 1000 \text{ mm}$$

Účinná výška průřezu:

$$d = h - c - \phi_y - \frac{\phi_x}{2} = 2220 - 50 - 25 - \frac{25}{2} = 2132,5 \text{ mm}$$

Požadovaná plocha výztuže:

$$\lambda = 0,8$$

$$\eta = 1,0$$

$$A_{s,req} = \frac{b \cdot d \cdot \eta \cdot f_{cd}}{f_{yd}} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot M_{Ed}}{b \cdot d^2 \cdot \eta \cdot f_{cd}}} \right) =$$

$$= \frac{1000 \cdot 2132,5 \cdot 1,0 \cdot 20}{434,78} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot 1691 \cdot 10^6}{1000 \cdot 2132,5^2 \cdot 1,0 \cdot 20}} \right) = 1841 \text{ mm}^2$$

Výška tlačené oblasti: $x = 106,7 \text{ mm}$

Rameno vnitřních sil: $z = 2045 \text{ mm}$

Návrhový moment únosnosti:

$$M_{Rd} = A_s \cdot f_{yd} \cdot z = 3927 \cdot 434,78 \cdot 2045 \cdot 10^{-6} = 3492 \text{ kNm}$$

Posouzení:

$$M_{Rd} > M_{Ed}$$

$$3492 \text{ kNm} > 1691 \text{ kNm}$$

Navržená výztuž $\phi 25 \text{ mm}$ á 125 mm VYHOVUJE.

Návrh konstrukční výztuže

Je navržena konstrukční výztuž ve všech částech desky ve 2 výškových úrovních +8,150 a +8,750 uprostřed tloušťky desky do obou směrů x a y stejně:

$\phi 25 \text{ mm}$ á $250 \times 250 \text{ mm}$

Konstrukční uspořádání podélné výztuže

○ Vnitřní průměr zakřivení prutů

- požadavek na vnitřní průměr zakřivení prutu – pro dynamická namáhání:

$$\phi_{m,min} = 15 \cdot \phi = 15 \cdot 25 = 375 \text{ mm} \rightarrow \text{NAVRŽENO: } \phi_m = 380 \text{ mm}$$

○ **Kotvení podélné výztuže a přesahová délka - při dolním povrchu desky**

- návrhová hodnota mezního napětí v soudržnosti: $f_{bd} = 2,25 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot f_{ctd}$

- součinitel závislý na kvalitě podmínek v soudržnosti a poloze prutu během betonáže:

$$\eta_1 = 1,0 \dots \text{pro dobré podmínky soudržnosti}$$

- součinitel závislý na průměru prutu:

$$\eta_2 = 1,0 \dots \text{pro } \varnothing \leq 32 \text{ mm}$$

- návrhová hodnota pevnosti betonu v tahu:

$$f_{ctd} = \alpha_{ct} \cdot \frac{f_{ctk0,05}}{\gamma_C}$$

- součinitel zohledňující dlouhodobé účinky na pevnost v tahu a nepříznivé účinky vyplývající ze způsobu zatěžování:

$$\alpha_{ct} = 1,0$$

- dílčí součinitel betonu: $\gamma_C = 1,50$

- 5% kvantil charakteristické pevnosti betonu v dostředném tahu:

$$f_{ctk0,05} = 2,0 \text{ MPa} \dots \text{pro beton C 30/37}$$

$$f_{ctd} = \alpha_{ct} \cdot \frac{f_{ctk0,05}}{\gamma_C} = 1,0 \cdot \frac{2,0}{1,50} = 1,33 \text{ MPa}$$

$$f_{bd} = 2,25 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot f_{ctd} = 2,25 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,33 = 3,0 \text{ MPa}$$

- základní požadovaná kotevní délka:

$$l_{b,req} = \frac{\varnothing}{4} \cdot \frac{\sigma_{sd}}{f_{bd}}$$

- návrhové napětí v prutu: $\sigma_{sd} = f_{yd} = 434,78 \text{ MPa}$

$$l_{b,req} = \frac{\varnothing}{4} \cdot \frac{\sigma_{sd}}{f_{bd}} = \frac{25}{4} \cdot \frac{434,78}{3,0} = 906 \text{ mm}$$

- návrhová kotevní délka:

$$l_{bd} = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_5 \cdot l_{b,req}$$

- vliv tvaru prutu: $\alpha_1 = 1,0$... pro přímý prut

- vliv minimální betonové krycí vrstvy - pro přímý prut - tažený: $0,7 \leq \alpha_2 \leq 1,0$

$$\alpha_2 = 1 - 0,15 \cdot \frac{c_d - \varnothing}{\varnothing} = 1 - 0,15 \cdot \frac{50 - 25}{25} = 0,85$$

- vliv ovinutí příčnou výztuží: $\alpha_3 = 1,0$

- vliv tlaku kolmého na rovinu odštěpování betonu v návrhové kotevní délce l_{bd} :

$$\alpha_5 = 1,0$$

- součin:

$$(\alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_5) \geq 0,7$$

$$(0,85 \cdot 1,0 \cdot 1,0) \geq 0,7$$

$$0,85 > 0,7 \dots \text{VYHOVUJE}$$

$$l_{bd} = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_5 \cdot l_{b,req} = 1,0 \cdot 0,85 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 906 = \mathbf{770 \text{ mm}}$$

- minimální kotevní délka – pro kotvení v tahu:

$$l_{b,min} = \max\{0,3 \cdot l_{b,req}; 10 \cdot \varnothing; 100 \text{ mm}\}$$

$$l_{b,min} = \max\{0,3 \cdot 906; 10 \cdot 25; 100 \text{ mm}\}$$

$$l_{b,min} = \max\{0,3 \cdot 272; 250; 100 \text{ mm}\}$$

$$l_{b,min} = \mathbf{272 \text{ mm}}$$

$$l_{bd} > l_{b,min}$$

$$770 \text{ mm} > 272 \text{ mm} \dots \text{VYHOVUJE}$$

NAVRŽENÁ KOTEVNÍ DÉLKA: $l_{bd} = 1500 \text{ mm}$

- návrhová délka přesahu: $l_0 = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_5 \cdot \alpha_6 \cdot l_{b,req}$

- vliv stykování výztuže: $\alpha_6 = 1,4$... pro 50% prutů stykovaných přesahem na délce $0,65 \cdot l_0$ od středu uvažovaného přesahu

$$l_0 = 1,0 \cdot 0,85 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,4 \cdot 906 = \mathbf{1078 \text{ mm}}$$

- minimální délka přesahu:

$$l_{0,min} = \max\{0,3 \cdot \alpha_6 \cdot l_{b,req}; 15 \cdot \varnothing; 200 \text{ mm}\}$$

$$l_{0,min} = \max\{0,3 \cdot 1,4 \cdot 906; 15 \cdot 25; 200 \text{ mm}\}$$

$$l_{0,min} = \max\{381; 375; 200 \text{ mm}\}$$

$$l_{0,min} = \mathbf{381 \text{ mm}}$$

$$l_0 > l_{0,min}$$

$$1078 \text{ mm} > 381 \text{ mm} \dots \text{VYHOVUJE}$$

NAVRŽENÁ DÉLKA PŘESAHU: $l_0 = 1500 \text{ mm}$

○ **Kotvení podélné výztuže a přesahová délka - při horním povrchu desky**

- návrhová hodnota mezního napětí v soudržnosti: $f_{bd} = 2,25 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot f_{ctd}$

- součinitel závislý na kvalitě podmínek v soudržnosti a poloze prutu během betonáže:

$$\eta_1 = 0,7 \dots \text{pro špatné podmínky soudržnosti}$$

- návrhová hodnota pevnosti betonu v tahu:

$$f_{ctd} = \alpha_{ct} \cdot \frac{f_{ctk0,05}}{\gamma_c} = 1,0 \cdot \frac{2,0}{1,50} = \mathbf{1,33 \text{ MPa}}$$

$$f_{bd} = 2,25 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot f_{ctd} = 2,25 \cdot 0,7 \cdot 1,0 \cdot 1,33 = \mathbf{2,1 \text{ MPa}}$$

- základní požadovaná kotevní délka:

$$l_{b,req} = \frac{\emptyset}{4} \cdot \frac{\sigma_{sd}}{f_{bd}} = \frac{25}{4} \cdot \frac{434,78}{2,1} = \mathbf{1294 \text{ mm}}$$

- návrhová kotevní délka:

$$l_{bd} = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_5 \cdot l_{b,req}$$

- vliv minimální betonové krycí vrstvy - pro přímý prut - tlačení: $\alpha_2 = 1,0$

- součin: $(\alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_5) \geq 0,7$

$$(1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,0) \geq 0,7$$

$$1,0 > 0,7 \dots \text{VYHOVUJE}$$

$$l_{bd} = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_5 \cdot l_{b,req} = 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1294 = \mathbf{1294 \text{ mm}}$$

- minimální kotevní délka – pro kotvení v tlaku:

$$l_{b,min} = \max\{0,6 \cdot l_{b,req}; 10 \cdot \varnothing; 100 \text{ mm}\}$$

$$l_{b,min} = \max\{0,6 \cdot 1294; 10 \cdot 25; 100 \text{ mm}\}$$

$$l_{b,min} = \max\{776; 250; 100 \text{ mm}\}$$

$$l_{b,min} = \mathbf{776 \text{ mm}}$$

$$l_{bd} > l_{b,min}$$

$$1294 \text{ mm} > 776 \text{ mm} \dots \text{VYHOVUJE}$$

NAVRŽENÁ KOTEVNÍ DÉLKA: $l_{bd} = 1500 \text{ mm}$

- návrhová délka přesahu: $l_0 = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_5 \cdot \alpha_6 \cdot l_{b,req}$

- vliv stykování výztuže: $\alpha_6 = 1,4$... pro 50% prutů stykovaných přesahem na délce $0,65 \cdot l_0$ od středu uvažovaného přesahu

$$l_0 = 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,4 \cdot 1294 = \mathbf{1812 \text{ mm}}$$

- minimální délka přesahu:

$$l_{0,min} = \max\{0,3 \cdot \alpha_6 \cdot l_{b,req}; 15 \cdot \varnothing; 200 \text{ mm}\}$$

$$l_{0,min} = \max\{0,3 \cdot 1,4 \cdot 1294; 15 \cdot 25; 200 \text{ mm}\}$$

$$l_{0,min} = \max\{544; 375; 200 \text{ mm}\}$$

$$l_{0,min} = \mathbf{544 \text{ mm}}$$

$$l_0 > l_{0,min}$$

$$1812 \text{ mm} > 544 \text{ mm} \dots \text{VYHOVUJE}$$

NAVRŽENÁ DÉLKA PŘESAHU: $l_0 = 2100 \text{ mm}$

○ **Návrh a posouzení výztuže na smyk**

Jedná se o dynamicky namáhanou konstrukci. Smyk berou jen navržené třmínky. Únosnost betonu ve smyku se nezapočítává.

Únosnost navržených třmínků ve smyku:

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \cot g(\theta)$$

A_{sw} [mm^2] ... průřezová plocha smykové výztuže – plocha všech větví jednoho třmínku

s [mm] ... osová vzdálenost třmínků

f_{ywd} [MPa] ... návrhová mez kluzu smykové výztuže: $f_{ywd} = f_{yd} = 434,78 MPa$

z [mm] ... rameno vnitřních sil

$\cot g(\theta)$... úhel sklonu tlačných diagonál

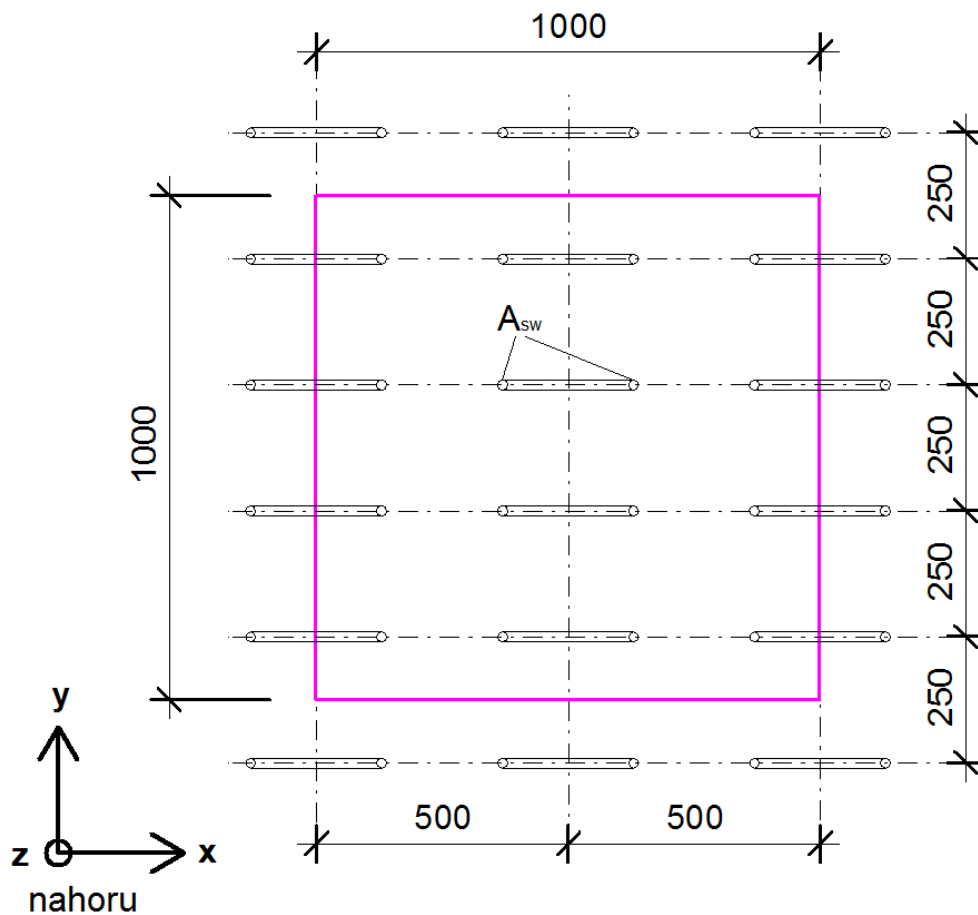
Pro smykovou únosnost uvažováno: $\cot g(\theta) = 1$

4) Desková část – mimo pružinové podpory:

Navržená smyková výztuž do obou směrů x a y – uzavřené dvojstřížné třmínky:

$\varnothing 12 \text{ mm}$ á $500 \times 250 \text{ mm}$

Obr.: Půdorys navržených třmínků na 1 m^2 plochy desky



Plocha navržené výztuže: $\varnothing = 12 \text{ mm}$ $n = 2$

$$A_{sw} = n \cdot \pi \cdot \frac{\varnothing^2}{4} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{12^2}{4} = 226 \text{ mm}^2$$

$$V_{Ed} = 1273 \text{ kN}$$

$$h = 1900 \text{ mm}$$

Rameno vnitřních sil: $z = 1725 \text{ mm}$

Únosnost navržených třmínků ve smyku:

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \cot g(\theta) = \frac{226}{500 \cdot 250} \cdot 1725 \cdot 434,78 \cdot 1 = 1357 \text{ kN}$$

Posouzení:

$$V_{Rd,s} > V_{Ed}$$

$$1357 \text{ kN} > 1273 \text{ kN}$$

Navržená smyková výztuž $\phi 12 \text{ mm}$ á $500 \times 250 \text{ mm}$ VYHOVUJE.

5) Desková část – dvojice pružinových podpor:

Navržená smyková výztuž do obou směrů x a y – otevřené dvojstřížné třmínky:

$\phi 16 \text{ mm}$ á $500 \times 250 \text{ mm}$

Plocha navržené výztuže: $\phi = 16 \text{ mm}$ $n = 2$

$$A_{sw} = n \cdot \pi \cdot \frac{\phi^2}{4} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{16^2}{4} = 402 \text{ mm}^2$$

$V_{Ed} = 1708 \text{ kN}$

$h = 2100 \text{ mm}$

Rameno vnitřních sil: $z = 1925 \text{ mm}$

Únosnost navržených třmínků ve smyku:

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \cot g(\theta) = \frac{402}{500 \cdot 250} \cdot 1925 \cdot 434,78 \cdot 1 = 2692 \text{ kN}$$

Posouzení:

$$V_{Rd,s} > V_{Ed}$$

$$2692 \text{ kN} > 1708 \text{ kN}$$

Navržená smyková výztuž $\phi 16 \text{ mm}$ á $500 \times 250 \text{ mm}$ VYHOVUJE.

6) Desková část – trojice pružinových podpor:Navržená smyková výztuž do obou směrů x a y – otevřené dvojstřížné třmínky: **$\phi 16 \text{ mm}$ á $500 \times 250 \text{ mm}$** Plocha navržené výztuže: $\phi = 16 \text{ mm}$ $n = 2$

$$A_{sw} = n \cdot \pi \cdot \frac{\phi^2}{4} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{16^2}{4} = 402 \text{ mm}^2$$

$$V_{Ed} = 2660 \text{ kN}$$

$$h = 2100 \text{ mm}$$

Rameno vnitřních sil: $z = 1925 \text{ mm}$

Únosnost navržených třmínků ve smyku:

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \cot \theta = \frac{402}{500 \cdot 250} \cdot 1925 \cdot 434,78 \cdot 1 = 2692 \text{ kN}$$

Posouzení:

$$V_{Rd,s} > V_{Ed}$$
$$2692 \text{ kN} > 2660 \text{ kN}$$

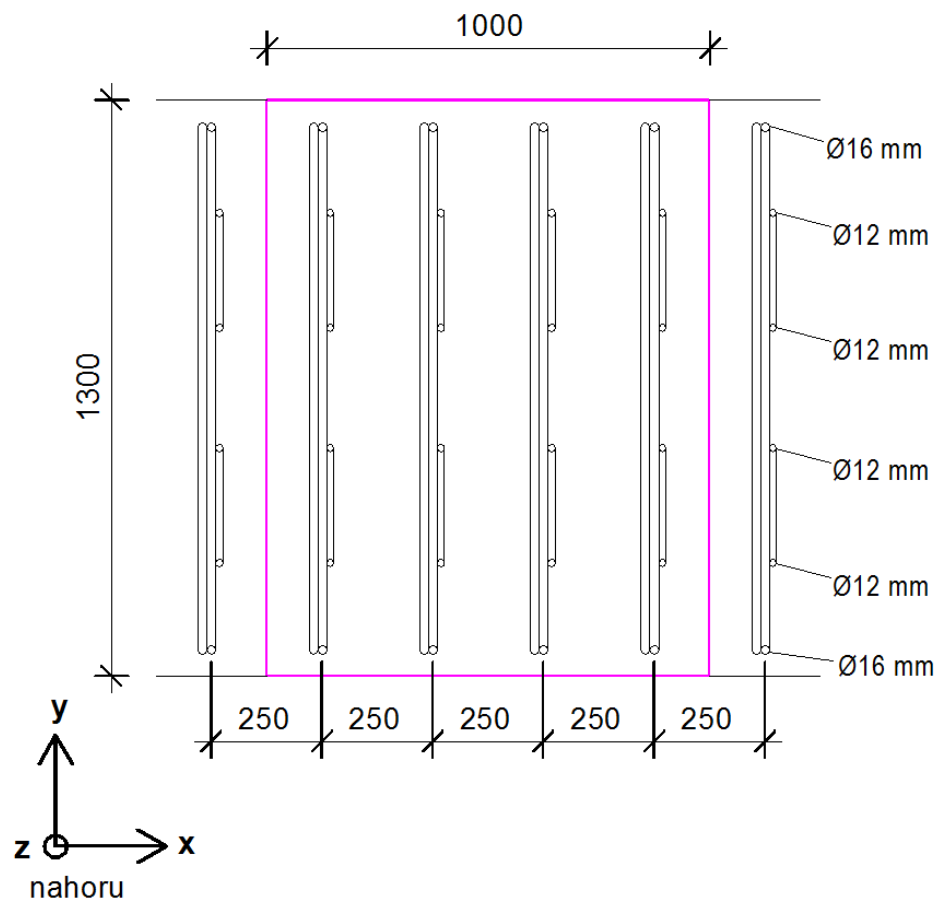
Navržená smyková výztuž $\phi 16 \text{ mm}$ á $500 \times 250 \text{ mm}$ VYHOVUJE.

7) Podélníky:

Navržená smyková výztuž:

- otevřené dvojstřížné třmínky: **Ø16 mm á 250 mm**
- uzavřené dvojstřížné třmínky: **2Ø12 mm á 250 mm**

Obr.: Půdorys navržených třmínků na 1 mb' délky podélníku



Plocha navržené výztuže: $\varnothing = 12 \text{ mm}$ $n = 2$

$$A_{sw} = n \cdot \pi \cdot \frac{\varnothing^2}{4} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{12^2}{4} = 226 \text{ mm}^2$$

$\varnothing = 16 \text{ mm}$ $n = 2$

$$A_{sw} = n \cdot \pi \cdot \frac{\varnothing^2}{4} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{16^2}{4} = 402 \text{ mm}^2$$

$V_{Ed} = 2069 \text{ kN}$

$h = 2120 \text{ mm}$

Rameno vnitřních sil: $z = 1945 \text{ mm}$

Únosnost navržených třmínek ve smyku:

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \cot g(\theta) = \frac{2 \cdot 226 + 402}{250} \cdot 1945 \cdot 434,78 \cdot 10^{-3} \cdot 1 = 2889 \text{ kN}$$

Posouzení:

$$V_{Rd,s} > V_{Ed}$$

$$2889 \text{ kN} > 2069 \text{ kN}$$

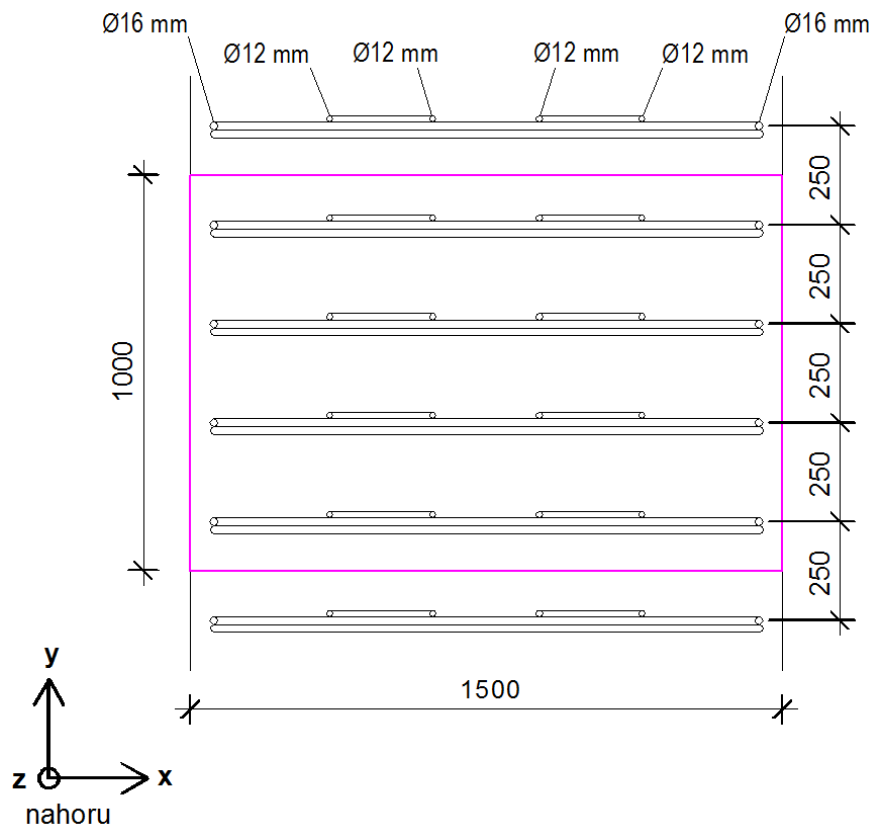
Navržená smyková výztuž ($\phi 16 \text{ mm} + 2\phi 12 \text{ mm}$) á 250 mm VYHOVUJE.

8) Příčnik:

Navržená smyková výztuž:

- otevřené dvojstřížné třmínky: **$\phi 16 \text{ mm}$ á 250 mm**
- uzavřené dvojstřížné třmínky: **$2\phi 12 \text{ mm}$ á 250 mm**

Obr.: Půdorys navržených třmínek na 1 mb' délky příčniku



Plocha navržené výztuže: $\varnothing = 12 \text{ mm}$ $n = 2$

$$A_{sw} = n \cdot \pi \cdot \frac{\varnothing^2}{4} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{12^2}{4} = 226 \text{ mm}^2$$

$\varnothing = 16 \text{ mm}$ $n = 2$

$$A_{sw} = n \cdot \pi \cdot \frac{\varnothing^2}{4} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{16^2}{4} = 402 \text{ mm}^2$$

$$V_{Ed} = 1657 \text{ kN}$$

$$h = 2220 \text{ mm}$$

Rameno vnitřních sil: $z = 2045 \text{ mm}$

Únosnost navržených třmínek ve smyku:

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \cot g(\theta) = \frac{2 \cdot 226 + 402}{250} \cdot 2045 \cdot 434,78 \cdot 10^{-3} \cdot 1 = 3037 \text{ kN}$$

Posouzení:

$$V_{Rd,s} > V_{Ed} \\ 3037 \text{ kN} > 1657 \text{ kN}$$

Navržená smyková výztuž ($\varnothing 16 \text{ mm} + 2\varnothing 12 \text{ mm}$) á 250 mm VYHOVUJE.

9) Dvojice pružinových podpor mezi podélníkem a příčným:

Navržená smyková výztuž do obou směrů x a y – otevřené dvojstřížné třmínky:

$\varnothing 16 \text{ mm}$ á $500 \times 250 \text{ mm}$

Plocha navržené výztuže: $\varnothing = 16 \text{ mm}$ $n = 2$

$$A_{sw} = n \cdot \pi \cdot \frac{\varnothing^2}{4} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{16^2}{4} = 402 \text{ mm}^2$$

$$V_{Ed} = 1576 \text{ kN}$$

$$h = 2100 \text{ mm}$$

Rameno vnitřních sil: $z = 1925 \text{ mm}$

Únosnost navržených třmínek ve smyku:

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \cot g(\theta) = \frac{402}{500 \cdot 250} \cdot 1925 \cdot 434,78 \cdot 1 = 2692 \text{ kN}$$

Posouzení:

$$V_{Rd,s} > V_{Ed} \\ 2692 \text{ kN} > 1576 \text{ kN}$$

Navržená smyková výztuž $\phi 16$ mm á 500x250 mm VYHOVUJE.

Konstrukční uspořádání smykové výztuže

○ **Vnitřní průměr zakřivení třmínek**

- požadavek na vnitřní průměr zakřivení prutu $\phi 12$ mm – pro dynamická namáhání:

$$\phi_{m,min} = 15 \cdot \phi = 15 \cdot 12 = 180 \text{ mm} \rightarrow \text{NAVRŽENO: } \phi_m = \mathbf{180 \text{ mm}}$$

- požadavek na vnitřní průměr zakřivení prutu $\phi 16$ mm – pro dynamická namáhání:

$$\phi_{m,min} = 15 \cdot \phi = 15 \cdot 16 = 240 \text{ mm} \rightarrow \text{NAVRŽENO: } \phi_m = \mathbf{240 \text{ mm}}$$

4. Dynamická analýza konstrukce

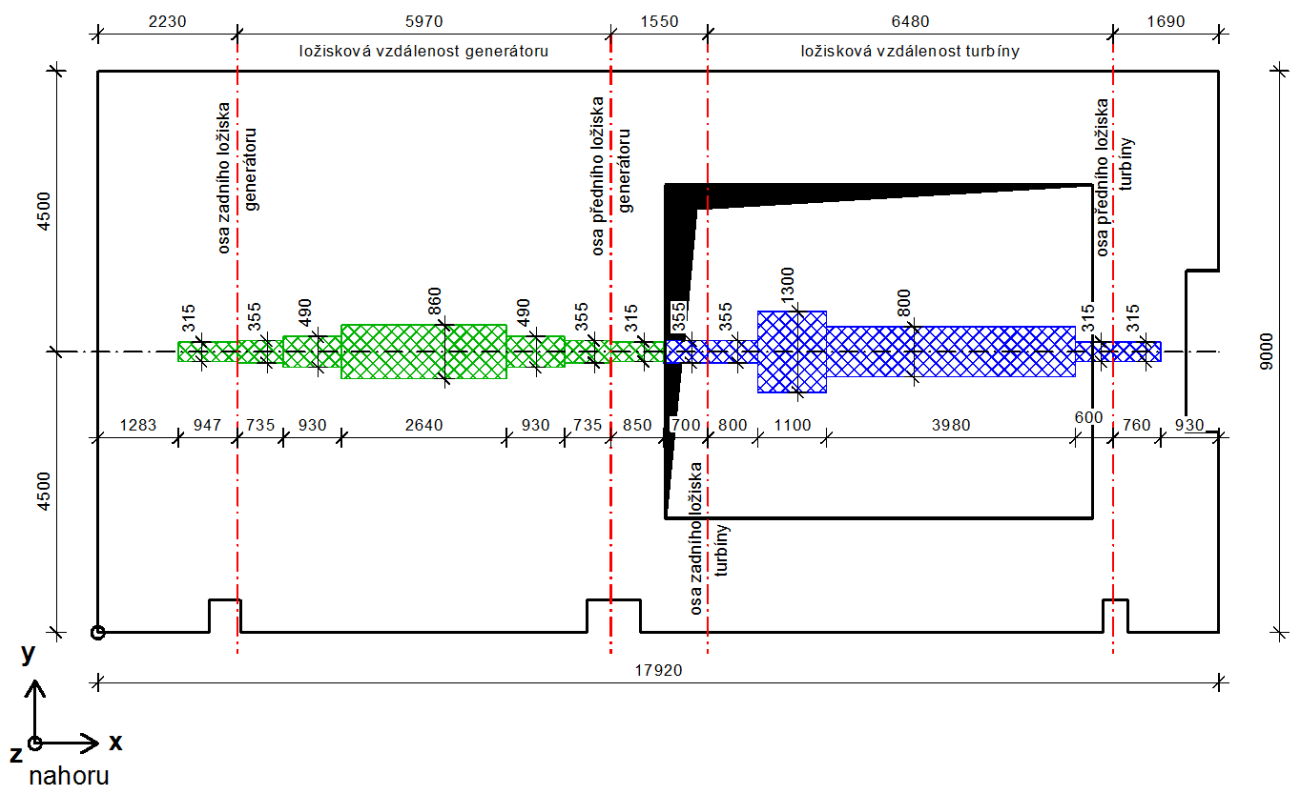
4.1. Modelování turbosoustrojí náhradními tělesy

Prostorový model desky základu s pružinovými prvky Gerb je shodný s modelem ve statické analýze. Tento model byl použit pro dokončení komplexního modelu desky základu s turbosoustrojím vymodelovaným náhradními tělesy.

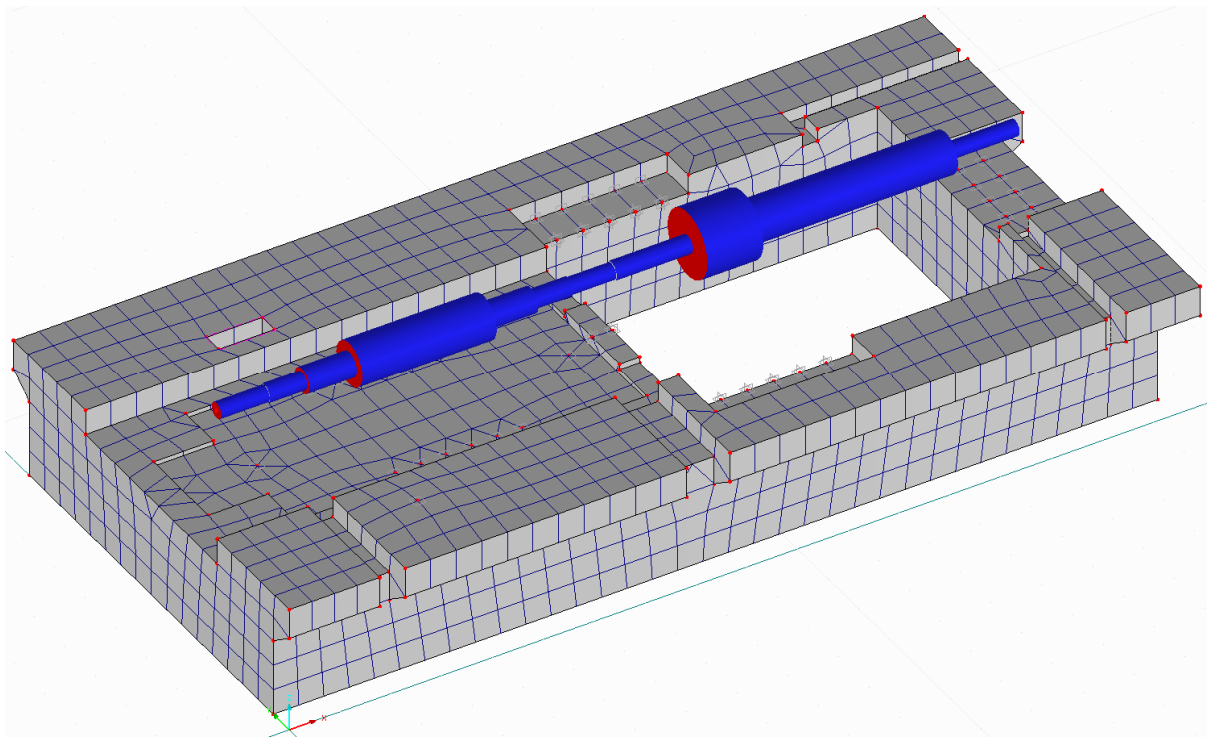
4.1.1. Model rotorů turbíny a generátoru

Rotory turbíny a generátoru byly vymodelovány jako nosníkové pruty kruhového průřezu. Jejich umístění v prostoru, délky a průměry odpovídají podkladům dodavatele a jsou znázorněny na obrázku níže. Materiálové charakteristiky jsou vypsány v kapitole 2.1.2. **Turbosoustrojí.**

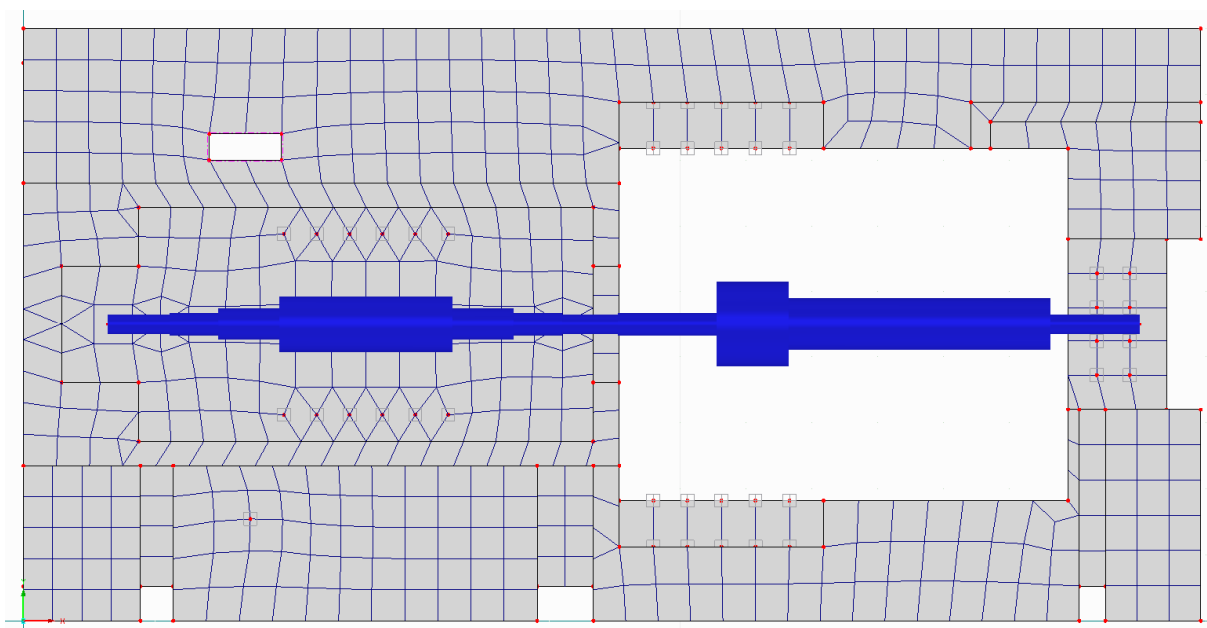
Obr.: Rozměry a půdorysné umístění rotorů, zelená šrafa – rotor generátoru, modrá šrafa – rotor turbíny



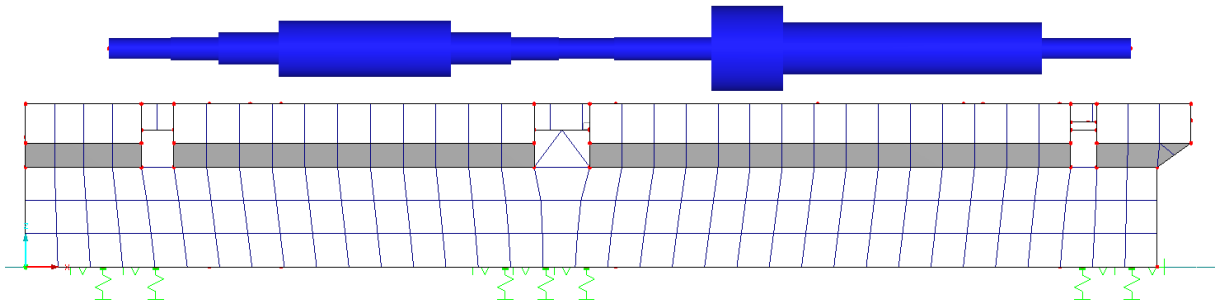
Obr.: Vymodelované rotory v izometrickém pohledu



Obr.: Vymodelované rotory v půdorysu



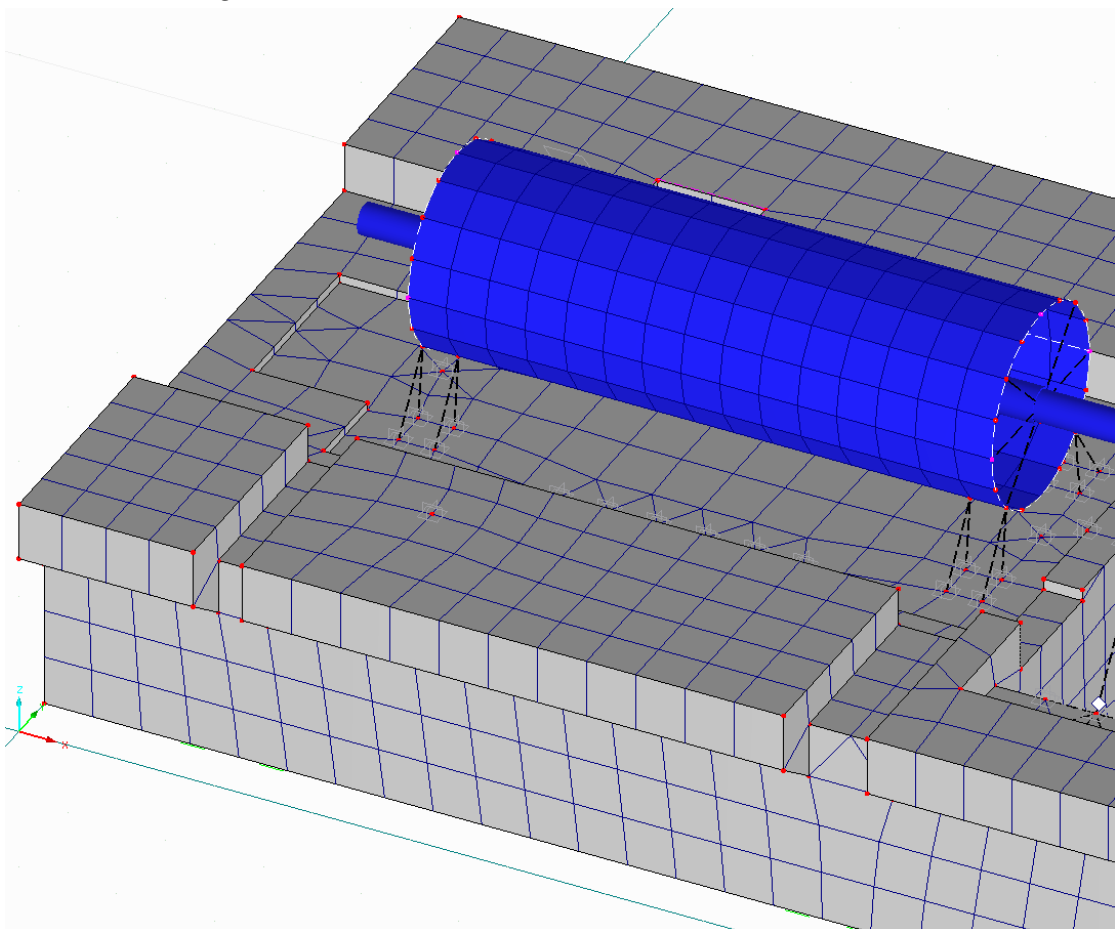
Obr.: Vymodelované rotory v bočním pohledu



4.1.2. Model statoru generátoru

Stator generátoru je vymodelován náhradním tělesem – trubicou vytvořenou z plochy, která je určena polohou střednice, tloušťkou, průměrem trubky na střednici a délkou trubky.

Obr.: Model statoru generátoru



Začátek a konec trubky je určen polohou ložisek. Délka trubky tedy odpovídá ložiskové vzdálenosti generátoru. Osa trubky leží 0,85 m nad nejvyšším povrchem betonové desky a v modelu odpovídá souřadnici $z = 3,35$ m. Trubka je chycena ve 4 krajních částech vždy čtveřicí tuhých prutů k desce základu.

Zadání statoru generátoru:

- průměr trubky na střednici: $D = 2,0$ m
- tloušťka trubky: $d = 0,31$ m
- délka trubky: $L = 5,97$ m (odpovídá ložiskové vzdálenosti)
- vymodelovaná hmotnost: $m = 90,1$ t

Materiálové charakteristiky jsou vypsány v kapitole **2.1.2. Turbosoustrojí**.

Dále bylo nutné trubce přiřadit vlastní síť konečných prvků nezávisle na síti základové desky. Požadovaná délka prvku sítě byla nastavena na 0,4 m, aby se vytvořilo 16 plošných elementů v příčném průřezu trubky. Důvodem volby většího počtu těchto elementů je co nejmenší rozdíl mezi vymodelovanou hmotností a hmotností udávanou dodavatelem.

Do nově vzniklých 16 uzlů na obou koncích trubky bylo ukončení statoru generátoru vymodelováno pomocí 6 tuhých prutů, které se stýkají v jednom uzlu v ose trubky.

4.1.3. Model statoru turbíny a ložiskových stojanů

Stator turbíny je vymodelován náhradním tělesem, které se skládá ze 2 odlišných částí. Přední nižší část je tvořena trubkou, na kterou navazuje zadní vyšší část tvořená tuhými pruty.

Půdorysná poloha a celková délka náhradního tělesa (trubka + tuhé pruty) odpovídá ložiskové vzdálenosti turbíny. Výšková souřadnice osy vymodelovaného statoru turbíny je stejná jako u statoru generátoru, $z = 3,35$ m. Trubka je chycena na začátku přední části 4 tuhými pruty k desce základu.

Zadání statoru turbíny – přední část (pouze trubka):

- průměr trubky na střednici: $D = 2,476$ m
- tloušťka trubky: $d = 0,348$ m
- délka trubky: $L = 4,48$ m
- vymodelovaná hmotnost: $m = 93,5$ t

Materiálové charakteristiky jsou vypsány v kapitole **2.1.2. Turbosoustrojí**.

Trubce byla přiřazena síť konečných prvků. Délka prvku sítě byla nastavena na 0,7 m. V příčném průřezu trubky bylo vytvořeno 12 plošných elementů. Do nově vzniklých 12 uzlů na obou koncích trubky bylo ukončení této části statoru turbíny vymodelováno pomocí 6 tuhých prutů stýkající se v jednom uzlu v ose trubky.

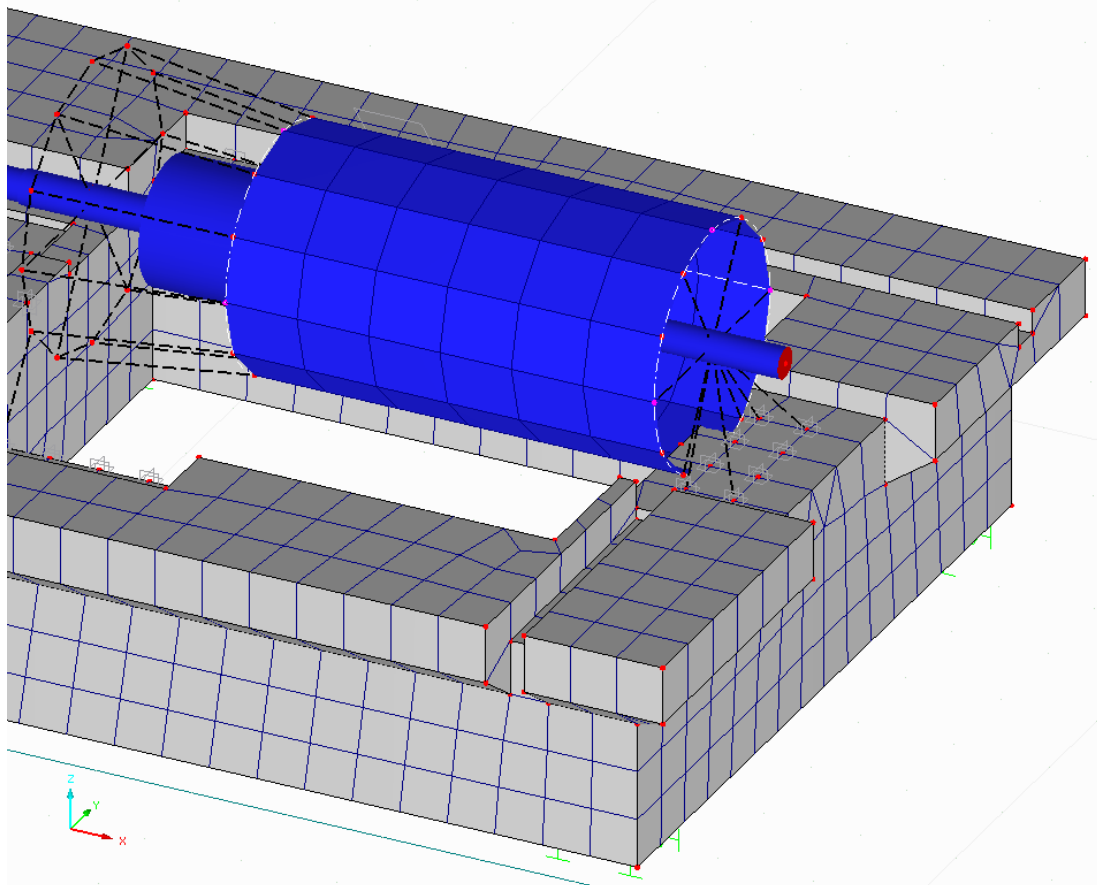
Zadní část statoru turbíny – tuhé pruty:

Na přední část statoru turbíny navazuje zadní část statoru, která je vymodelována tuhými pruty. Tuhé pruty navazují na trubku tak, že z každého ze 12 uzlů trubky vede 12 tuhých prutů, jejichž délka v podélném směru x je 2,0 m a dohromady s trubkou o délce 4,48 m vymezují ložiskovou vzdálenost turbíny 6,48 m. Koncové uzly těchto 12 prutů v podélném směru jsou spojeny 12 tuhými pruty kolem dokola tvořící dvanáctiúhelník a s dalšími 6 tuhými pruty, které se stýkají v jediném uzlu, tvoří ukončení zadní prutové části statoru turbíny.

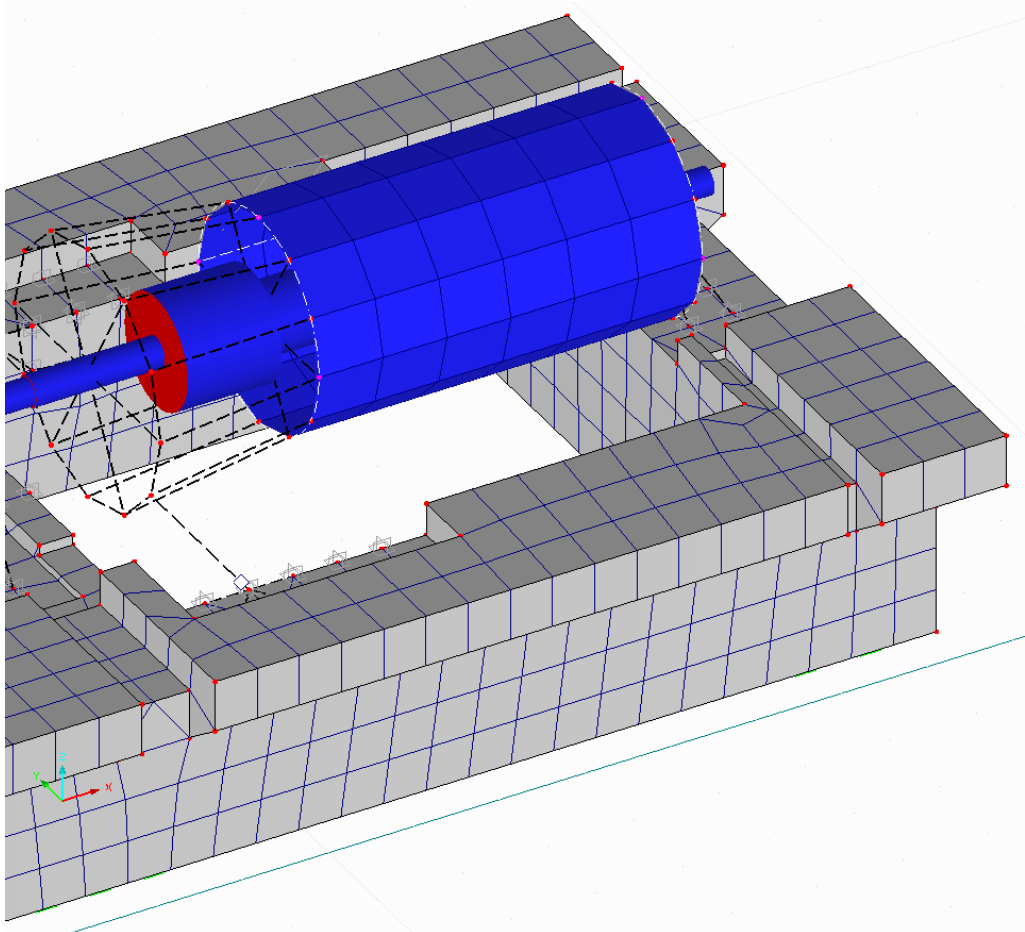
Vzdálenost mezi protějšími uzly dvanáctiúhelníka byla stanovena na 3,0 m (prutová část je na konci vyšší než trubka).

Dle dodavatele stroje vlastní tíha zadní části statoru turbíny činí 480 kN. Hmoty je rozdělena na dvě poloviny po 240 kN a zadána do 12 uzlů v přední prutové části a do 12 uzlů v zadní prutové části. Do 1 uzlu tedy připadá síla 20 kN.

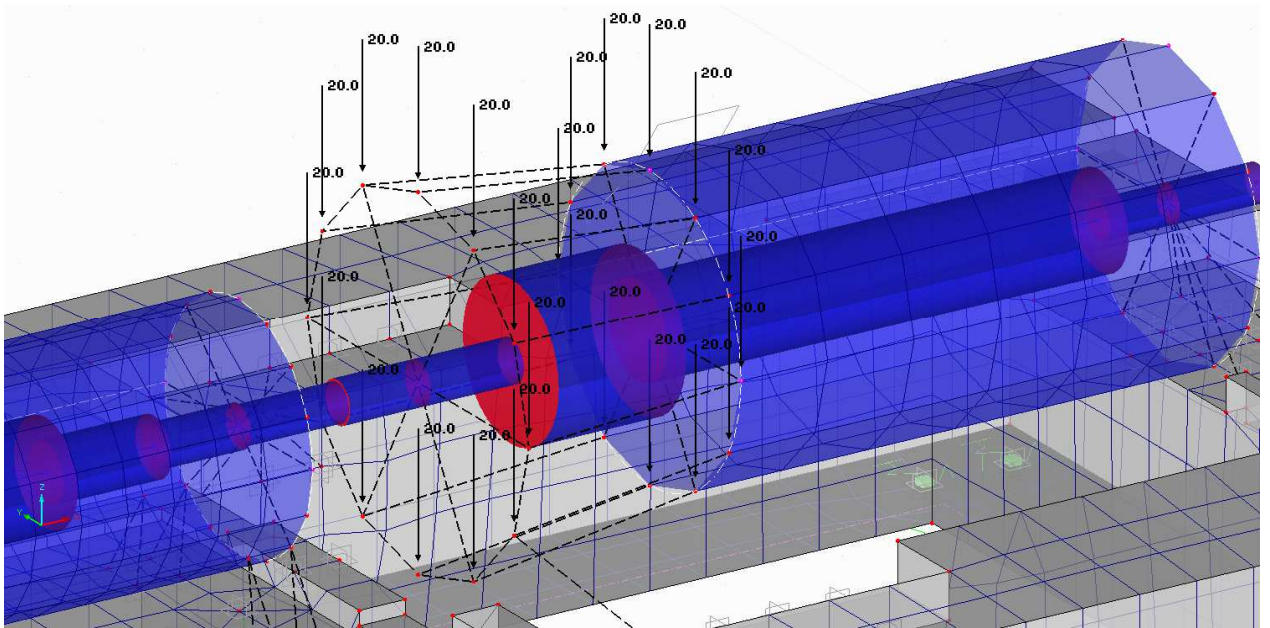
Obr.: Izometrický pohled na model statoru turbíny zepředu



Obr.: Izometrický pohled na model statoru turbíny zezadu



Obr.: Zatížení vlastní tíhou zadní prutové části statoru turbíny – 20 kN do celkem 24 uzlů

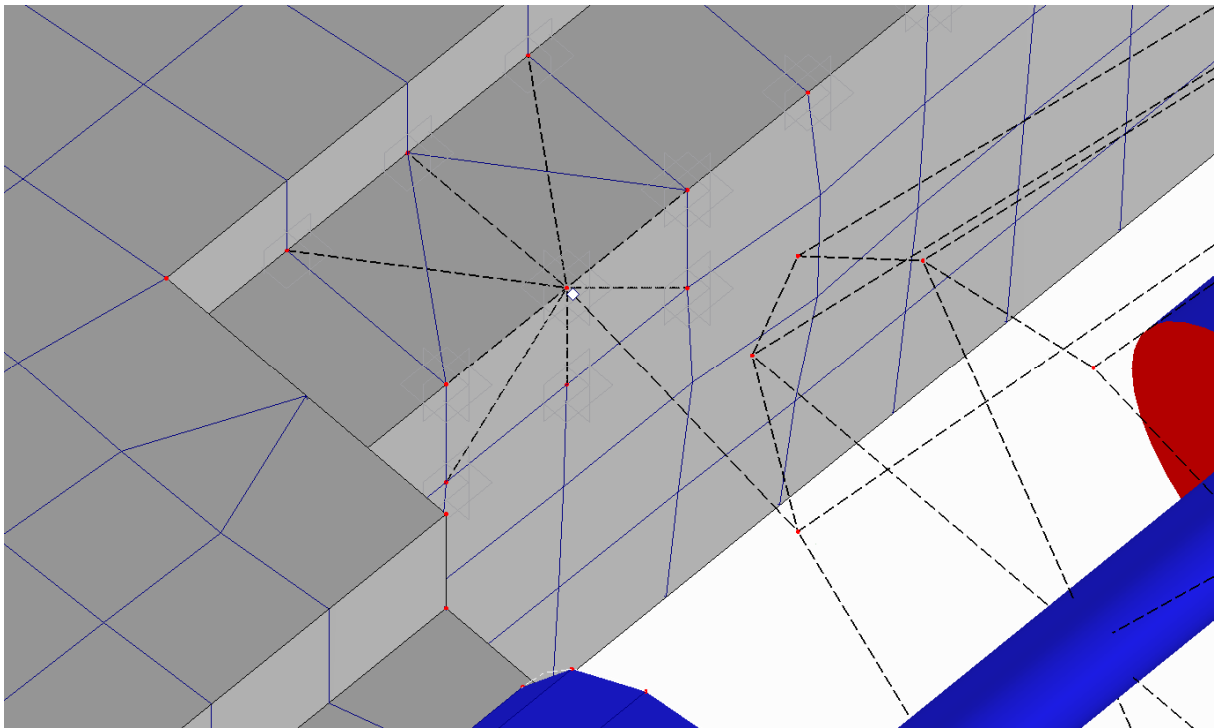


Stojany turbíny

Zadní (prutová) část statoru turbíny je chycena k vymodelovanému tělesu tuhým prutem na každé straně. Mezi prutem a tělesem se uvažuje pružná vazba, aby bylo možné simulovat tuhost stojanu. Na konci prutu je modelována pružina s tuhostmi ve všech 3 směrech $1,5 \cdot 10^6 \text{ kN/m}$.

Z uzlu, který spojuje prut a těleso, bylo třeba na tělese rozložit zatížení od kmitajícího prutu, aby nedocházelo v tomto místě k deformacím betonu. Z tohoto důvodu bylo do uzlu přidáno 8 tuhých prutů v horizontální i vertikální rovině na povrch tělesa, které vycházejí z uzlu pružiny. Délka prutů odpovídá délce strany nebo úhlopříčky 1 plošného elementu.

Obr. Pohled na uchycení statoru k tělesu tuhým prutem s pružinou na konci (označena bílým čtvercem)

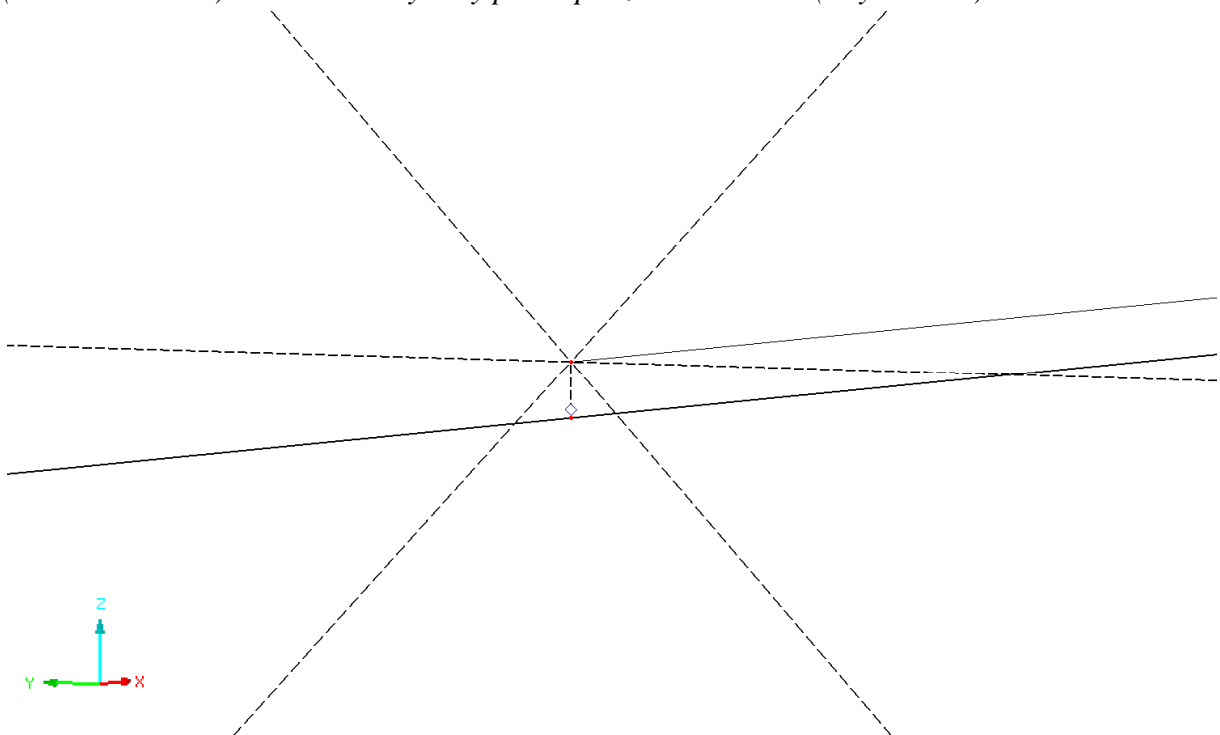


4.1.4. Model ložisek turbíny a generátoru

Ložiska rotorů turbíny a generátoru jsou vymodelována jako pružiny s tuhostmi ve vertikálním směru z a horizontálním směru y odpovídající tuhostem olejového filmu. Přes celkově 4 pružiny (2 pružiny pro turbínu a 2 pro generátor) jsou rotory chyceny ke statorům. Osa rotorů je v modelu vyosená o 2 mm dolů ve vertikálním směru z . Tato vzdálenost je daná tolerancí s jakou pracuje generátor sítě konečných prvků programu Dlubal. Při menší vzdálenosti uzlů než 2 mm totiž dochází k jejich spojení v jeden.

Ve vertikálním směru byl vymodelován 2 mm dlouhý tuhý prut mezi uzly statoru a rotoru. Na jeho konci blíže k rotoru je pružina s tuhostmi ve vertikálním a horizontálním směru.

Obr.: Drátěný model - osa statoru (tenká čára), osa rotoru (tlustá čára), tuhé pruty (čárkovaná čára) a 2 mm dlouhý tuhý prut s pružinou na konci (bílý čtverec)



Při zadání 4 pružin s tuhostmi ve vertikálním směru z a horizontálním směru y bylo nutné vymodelovaným rotorům z nosíkových prutů odebrat stupeň volnosti také v axiálním směru x , jinak by tato část modelu byla ve směru osy x nestabilní a matice tuhosti soustavy by byla singulární (její determinant je roven nule). Vymodelované rotory by v tomto případě byly neomezené v posunu a otáčení.

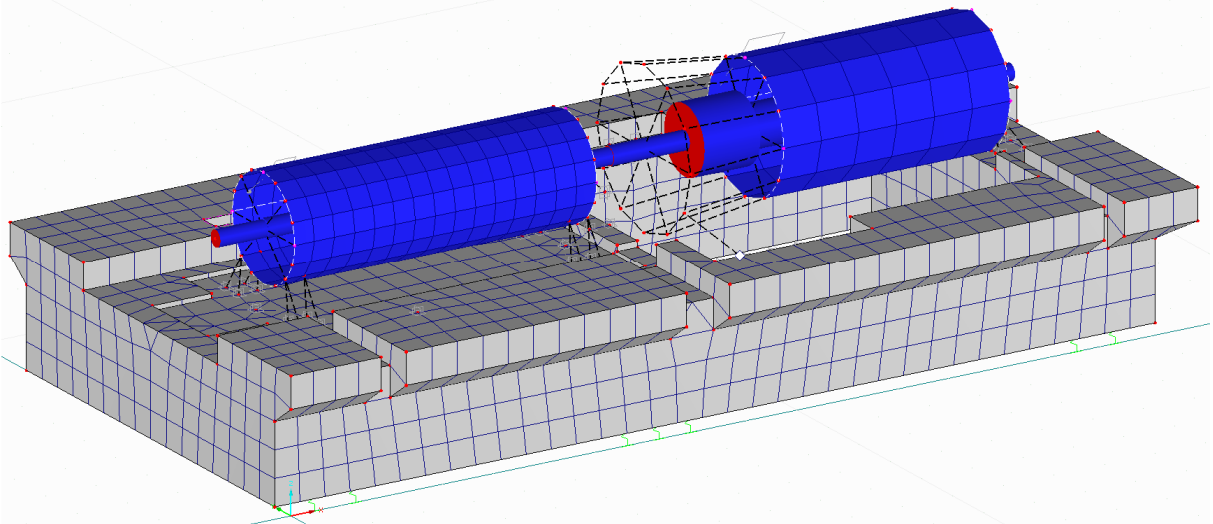
Bylo vybráno zadní ložisko turbíny a hodnoty tuhostí ve směru x byly zadány 1000 kN/m, resp. 1000 kNm/rad.

Obr.: Zadání tuhostí – zadní ložisko turbíny

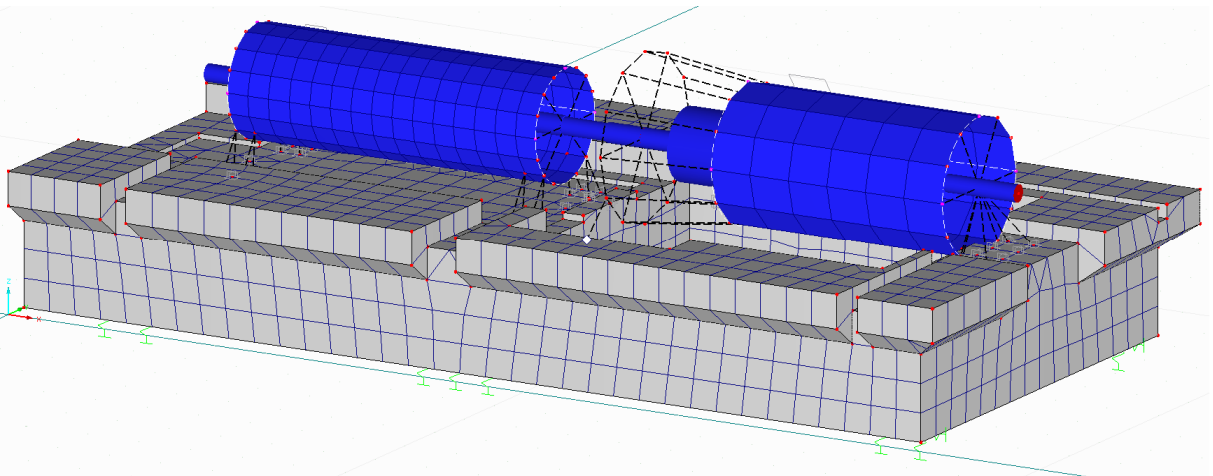
Podmínky uvolnění	
Kloub	Tuhost
<input checked="" type="checkbox"/> u_x	C_{u_x} : 1000.000 [kN/m]
<input checked="" type="checkbox"/> u_y	C_{u_y} : 380900.000 [kN/m]
<input checked="" type="checkbox"/> u_z	C_{u_z} : 1983000.00 [kN/m]
Kloub	Tuhost
<input checked="" type="checkbox"/> φ_x	C_{φ_x} : 1000.000 [kNm/rad]
<input checked="" type="checkbox"/> φ_y	C_{φ_y} : 0.000 [kNm/rad]
<input checked="" type="checkbox"/> φ_z	C_{φ_z} : 0.000 [kNm/rad]

4.1.5. Model desky s turbosoustrujím

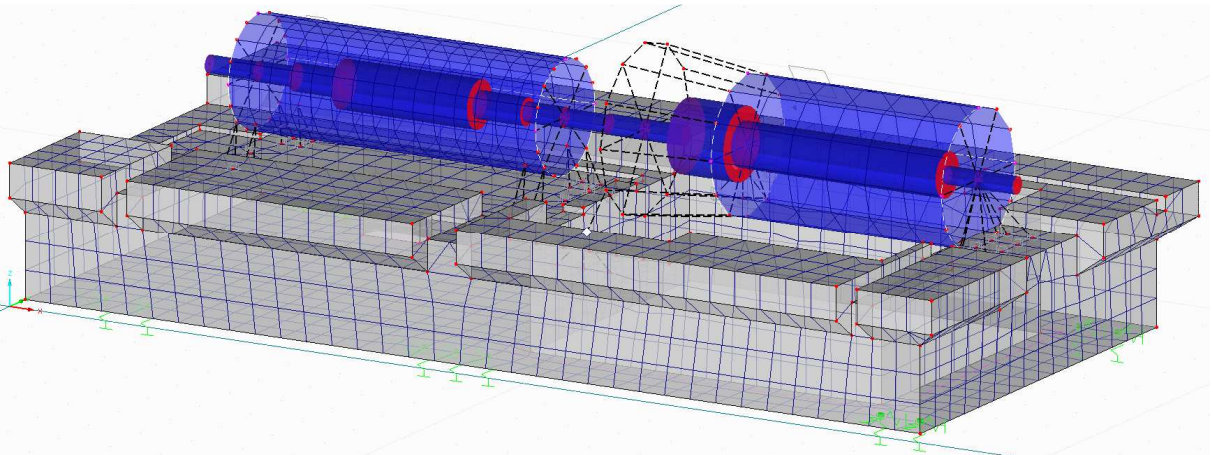
Obr.: Izometrický pohled na model desky s turbosoustrujím



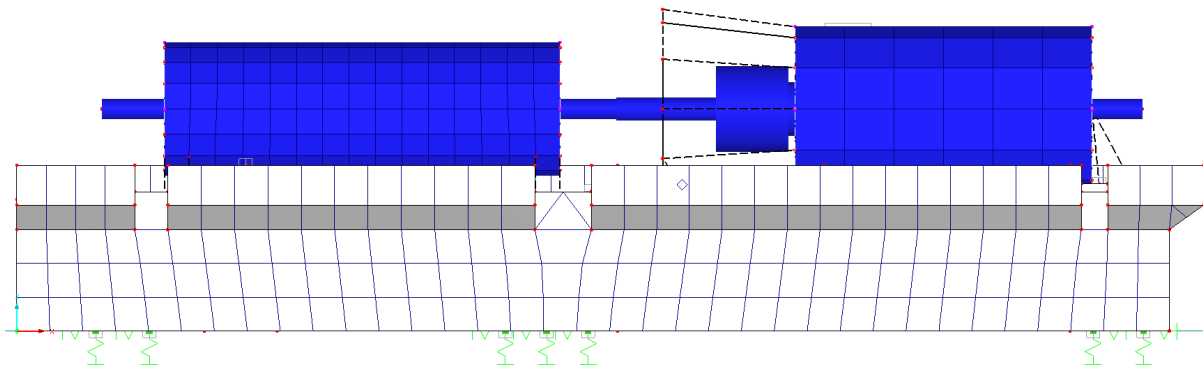
Obr.: Izometrický pohled na model desky s turbosoustrujím



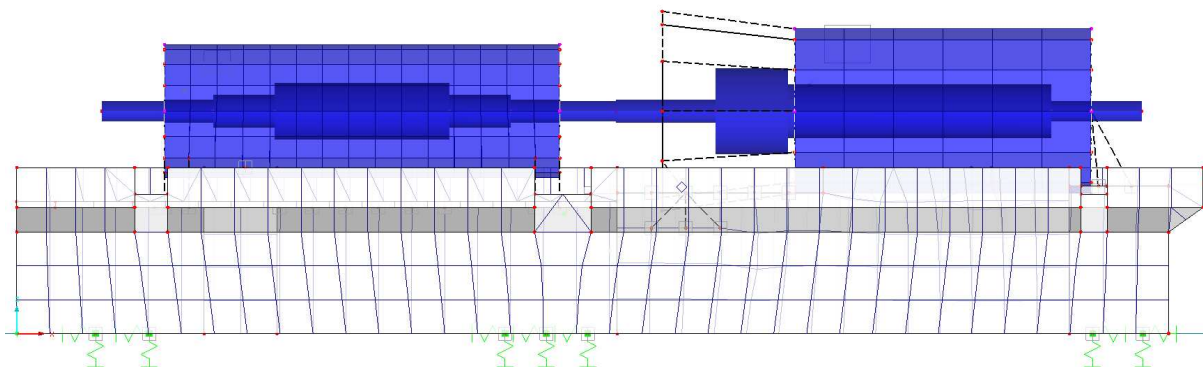
Obr.: Izometrický pohled na průhledný model desky s turbosoustrujím



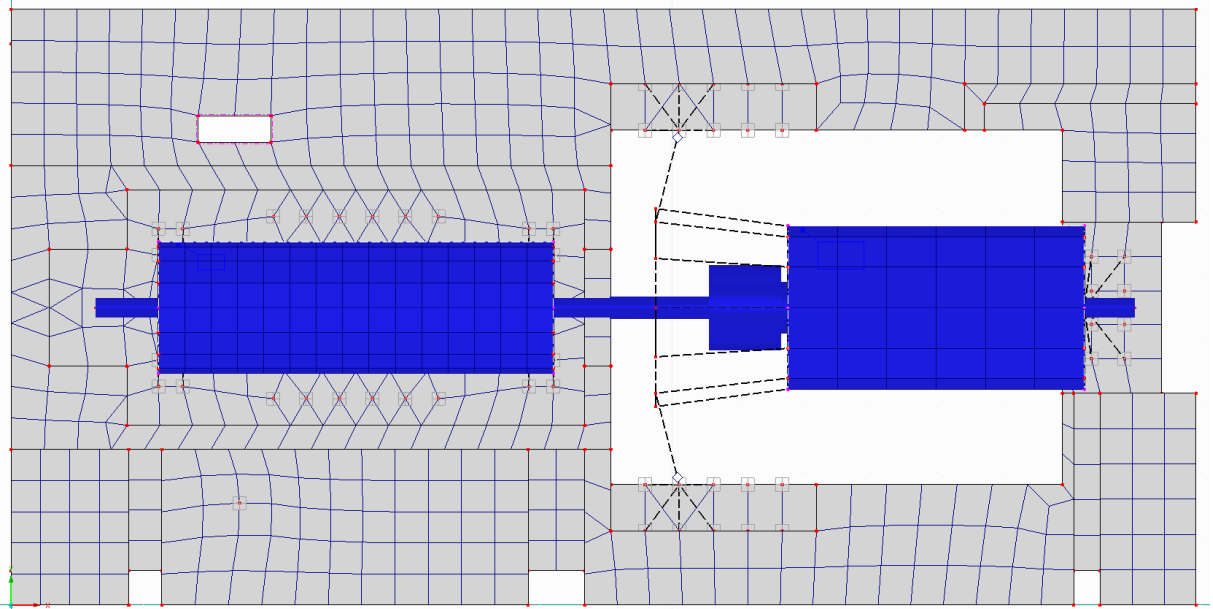
Obr.: Boční pohled na model desky s turbosoustrojím



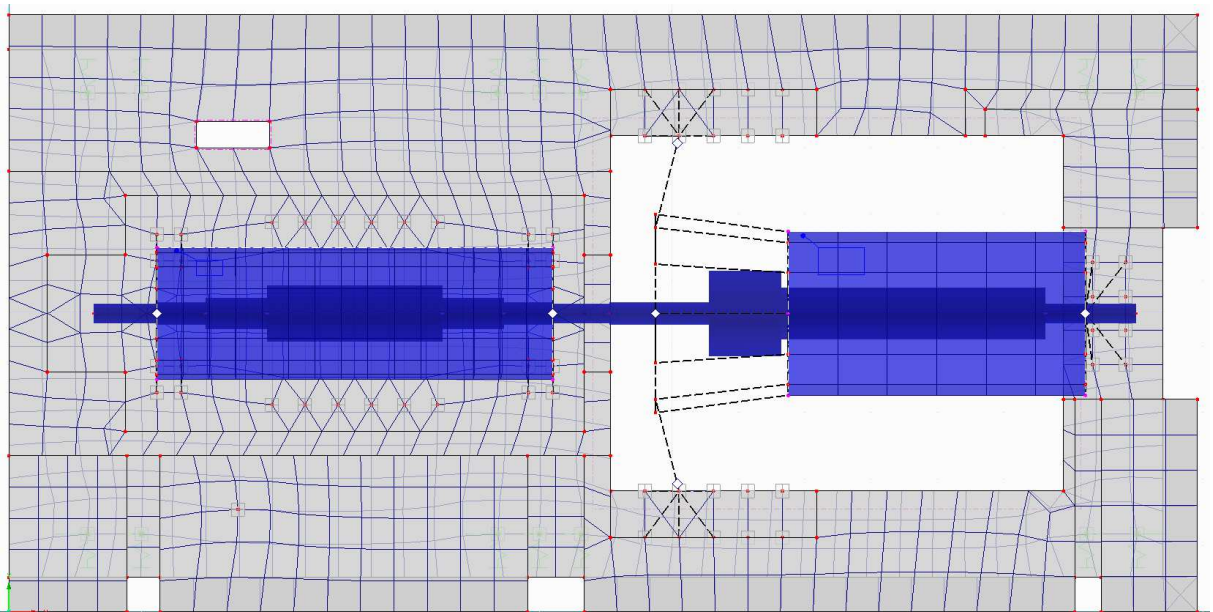
Obr.: Boční pohled na průhledný model desky s turbosoustrojím



Obr.: Půdorys modelu desky s turbosoustrojím



Obr.: Půdorys průhledného modelu desky s turbosoustrojím, 4 bílé čtverce v ose rotorů značí ložiska turbíny a generátoru



4.2. Dynamické zatěžovací stavy

Do dynamické analýzy vstupuje celkem 10 dynamických zatěžovacích stavů (DZS), které jsou uvedeny v následující tabulce.

Označení DZS	Název zatěžovacího stavu
DZS 1	Vlastní tíha horní desky základu a turbosoustrojí
DZS 2	Dynamické budící síly od rotorů – axiálně
DZS 3	Dynamické budící síly od rotorů – vertikálně – stojan generátoru č. 1
DZS 4	Dynamické budící síly od rotorů – horizontálně – stojan generátoru č. 1
DZS 5	Dynamické budící síly od rotorů – vertikálně – stojan generátoru č. 2
DZS 6	Dynamické budící síly od rotorů – horizontálně – stojan generátoru č. 2
DZS 7	Dynamické budící síly od rotorů – vertikálně – stojan turbíny č. 1
DZS 8	Dynamické budící síly od rotorů – horizontálně – stojan turbíny č. 1
DZS 9	Dynamické budící síly od rotorů – vertikálně – stojan turbíny č. 2
DZS 10	Dynamické budící síly od rotorů – horizontálně – stojan turbíny č. 2

o Popis dynamických zatěžovacích stavů

DZS 1 – Vlastní tíha horní desky základu a turbosoustrojí

Vlastní tíha horní desky základu a turbosoustrojí je vypočtena automaticky programem. Do zadní prutové části statoru turbíny je vlastní tíha 480 kN zadána osamělými břemeny 20 kN do 24 uzlů.

Hmoty jednotlivých částí modelu:

– deska základu:	607 572 kg
– stator generátoru:	90 119 kg
– stator turbíny - válec:	93 514 kg
– stator turbíny – prutová část:	48 000 kg
– rotor generátoru:	20 261 kg
– rotor turbíny:	30 961 kg
– HMOTA CELKEM:	890 427 kg

DZS 2 – Dynamické budící síly od rotorů – axiálně

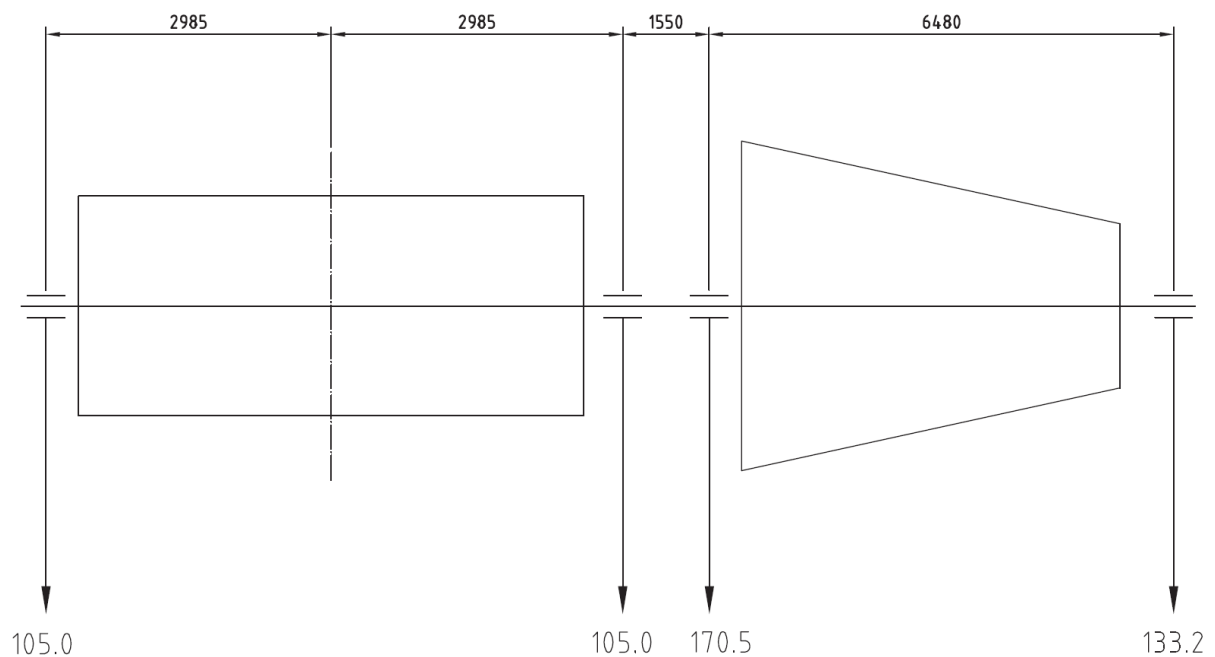
Budící síly v axiálním směru byly uvažovány jako 2% reakce rotorů, protože tření v ložiscích v axiálním směru nemůže přesáhnout 2%. Všechny tyto budící síly jsou vypočteny pro provozní frekvenci stroje 50 Hz.

Tab.: Velikosti budících sil v axiálním směru

	Reakce rotoru [kN]	Budící síla [kN]
Stojan generátoru č. 1	105,0	$0,02 \cdot 105 = \mathbf{2,10}$
Stojan generátoru č. 2	105,0	$0,02 \cdot 105 = \mathbf{2,10}$
Stojan turbíny č. 1	170,5	$0,02 \cdot 170,5 = \mathbf{3,41}$
Stojan turbíny č. 2	133,2	$0,02 \cdot 133,2 = \mathbf{2,66}$

Pozn.: Všechny budící síly v axiálním směru jsou zadány jako náhradní statické síly do statorů.

Obr.: Reakce rotorů [kN] dle dodavatele stroje



DZS 3 až DZS 10 – Dynamické budící síly od rotorů – horizontálně a vertikálně

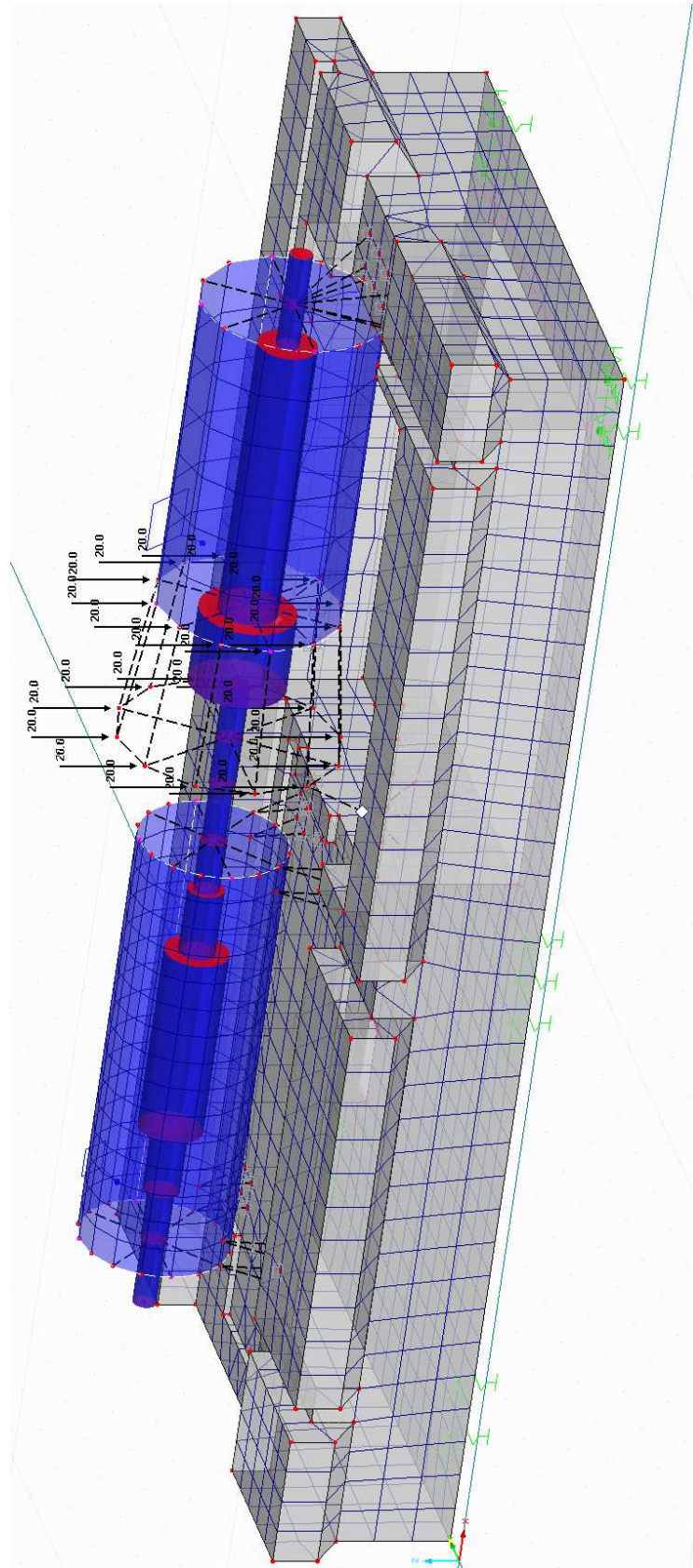
V horizontálním a vertikálním směru byly budící síly uvažovány jako 20% reakcí rotorů. Všechny tyto budící síly jsou vypočteny pro provozní frekvenci stroje 50 Hz.

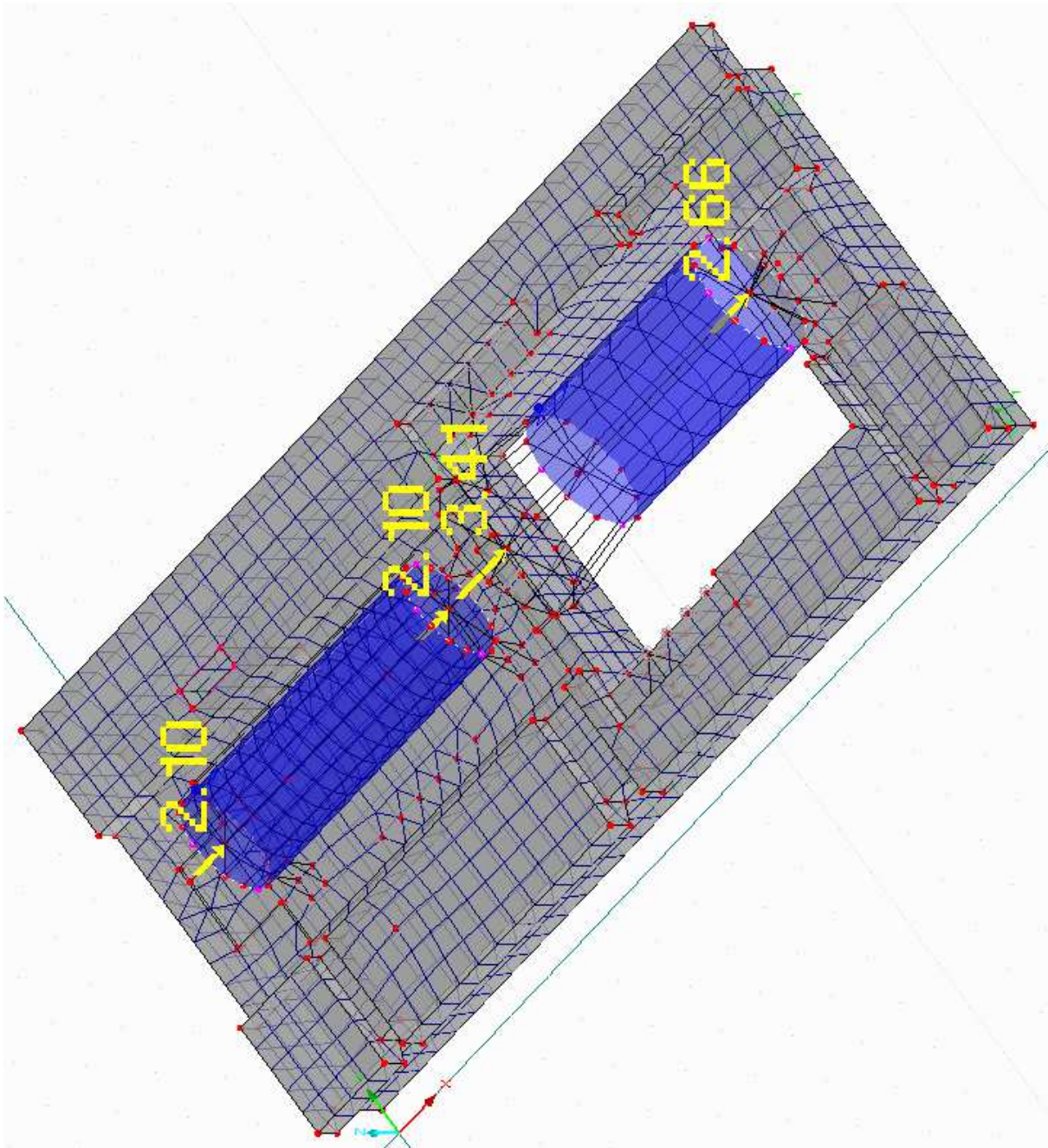
Tab.: Velikosti budících sil v horizontálním a vertikálním směru

	Reakce rotoru [kN]	Budící síla [kN]
Stojan generátoru č. 1	105,0	$0,2 \cdot 105 = \mathbf{21,00}$
Stojan generátoru č. 2	105,0	$0,2 \cdot 105 = \mathbf{21,00}$
Stojan turbíny č. 1	170,5	$0,2 \cdot 170,5 = \mathbf{34,10}$
Stojan turbíny č. 2	133,2	$0,2 \cdot 133,2 = \mathbf{26,64}$

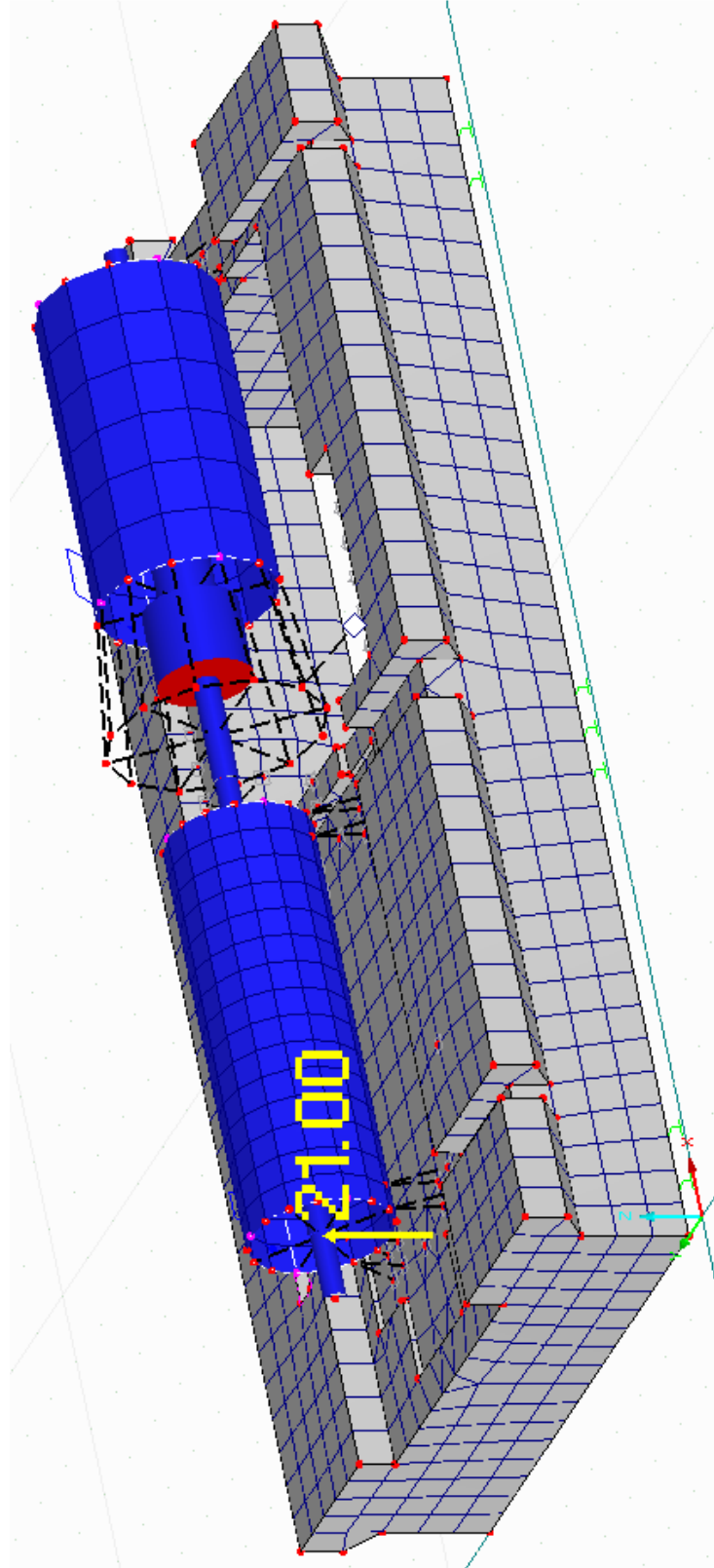
Pozn.: Všechny budící síly v horizontálním a vertikálním směru jsou zadány jako náhradní statické síly do statorů.

DZS 1 – Vlastní tíha horní desky základu a turbosoustrojí

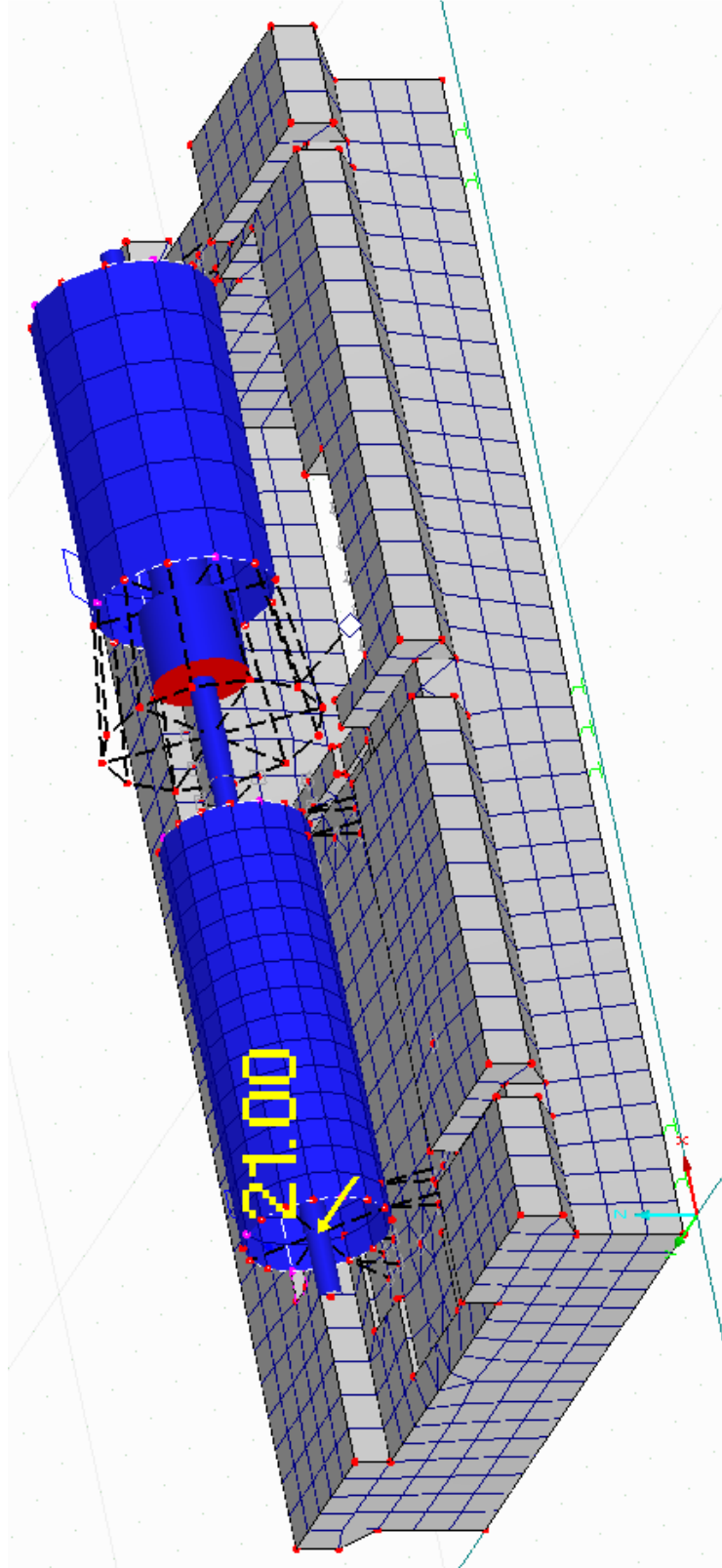


DZS 2 – Dynamické budící síly od rotorů – axiálně

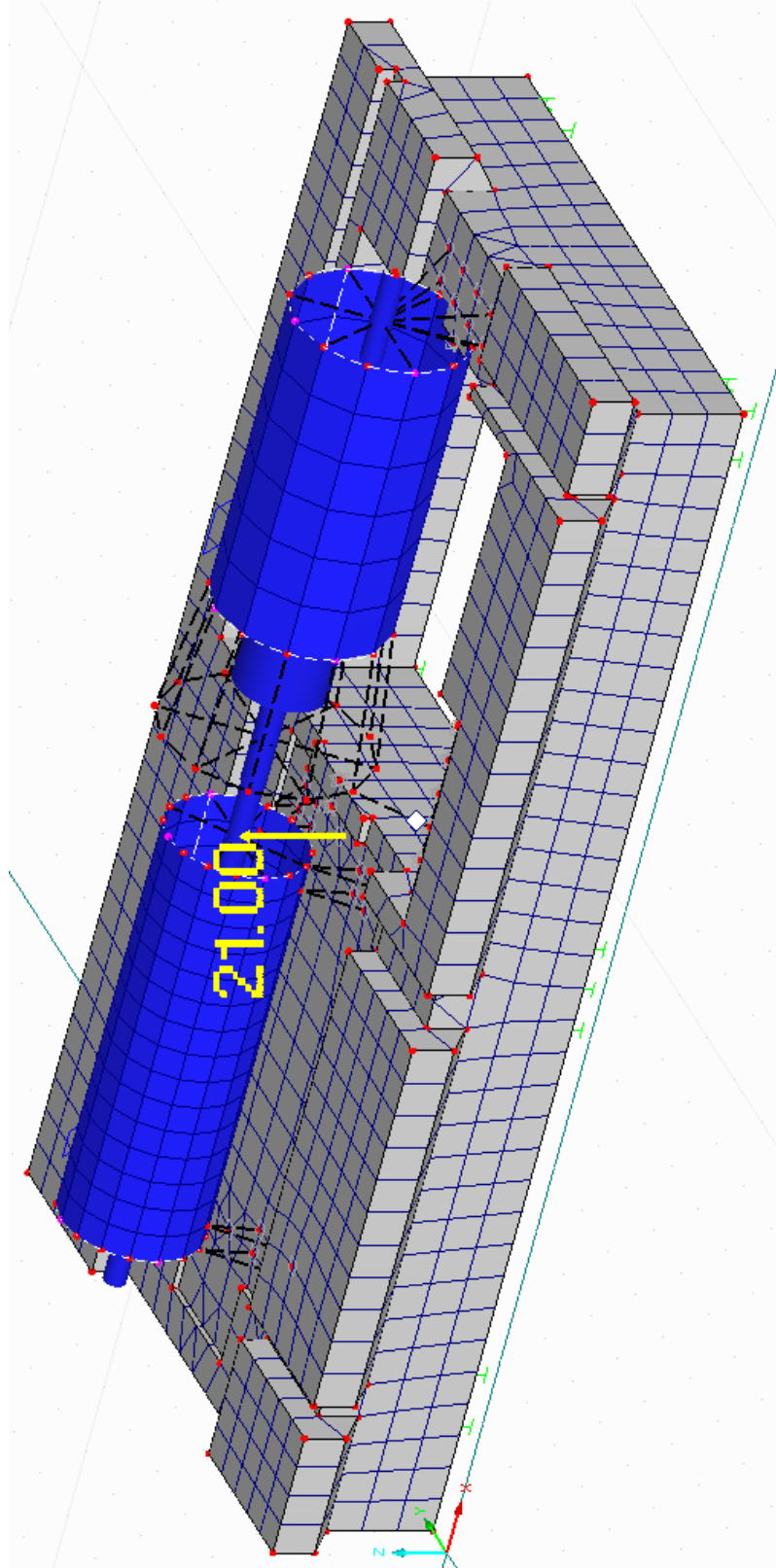
DZS 3 – Dynamické budící síly od rotorů – vertikálně – stojan generátoru č. 1



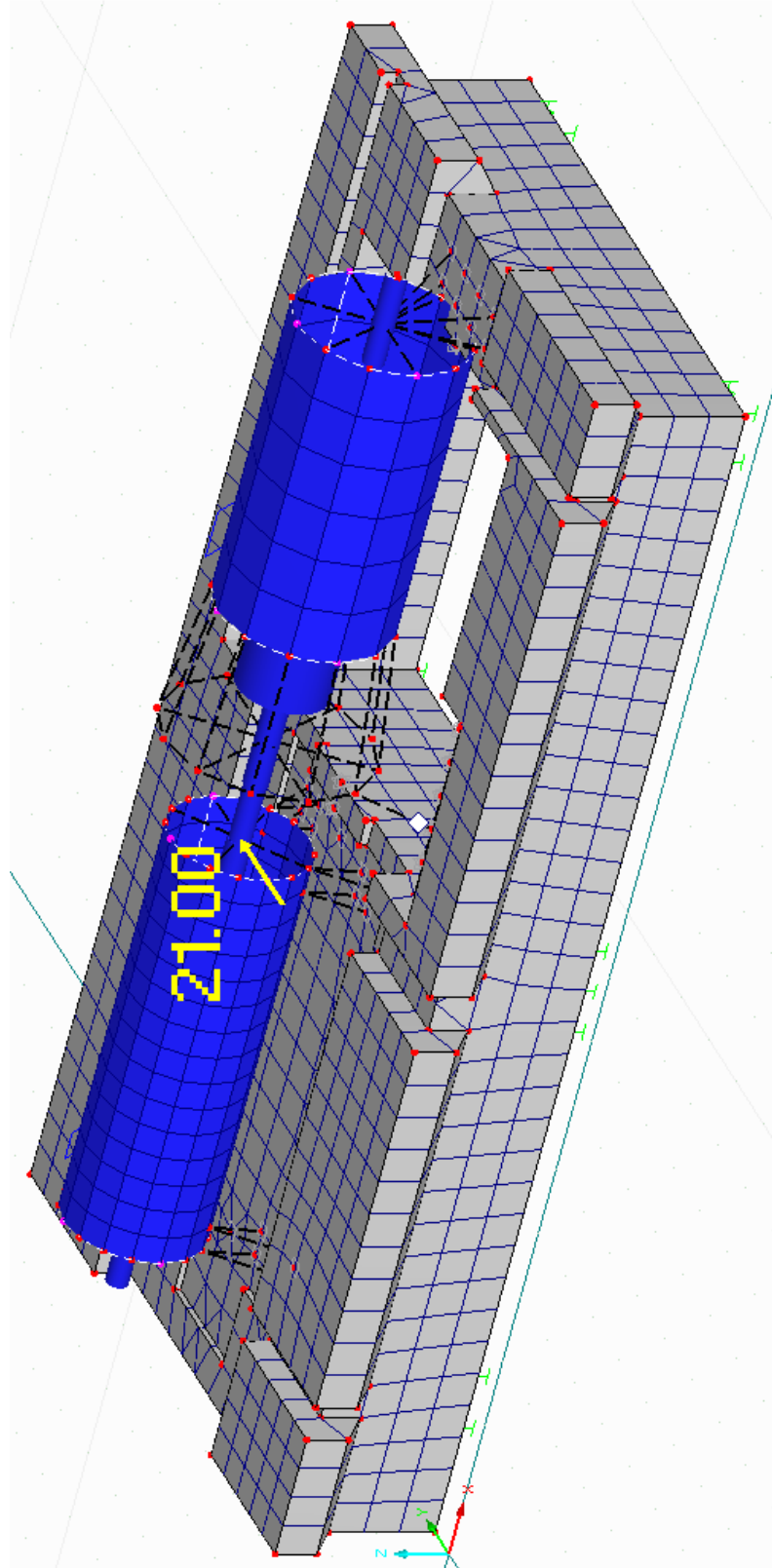
DZS 4 – Dynamické budící síly od rotorů – horizontálně – stojan generátoru č. 1



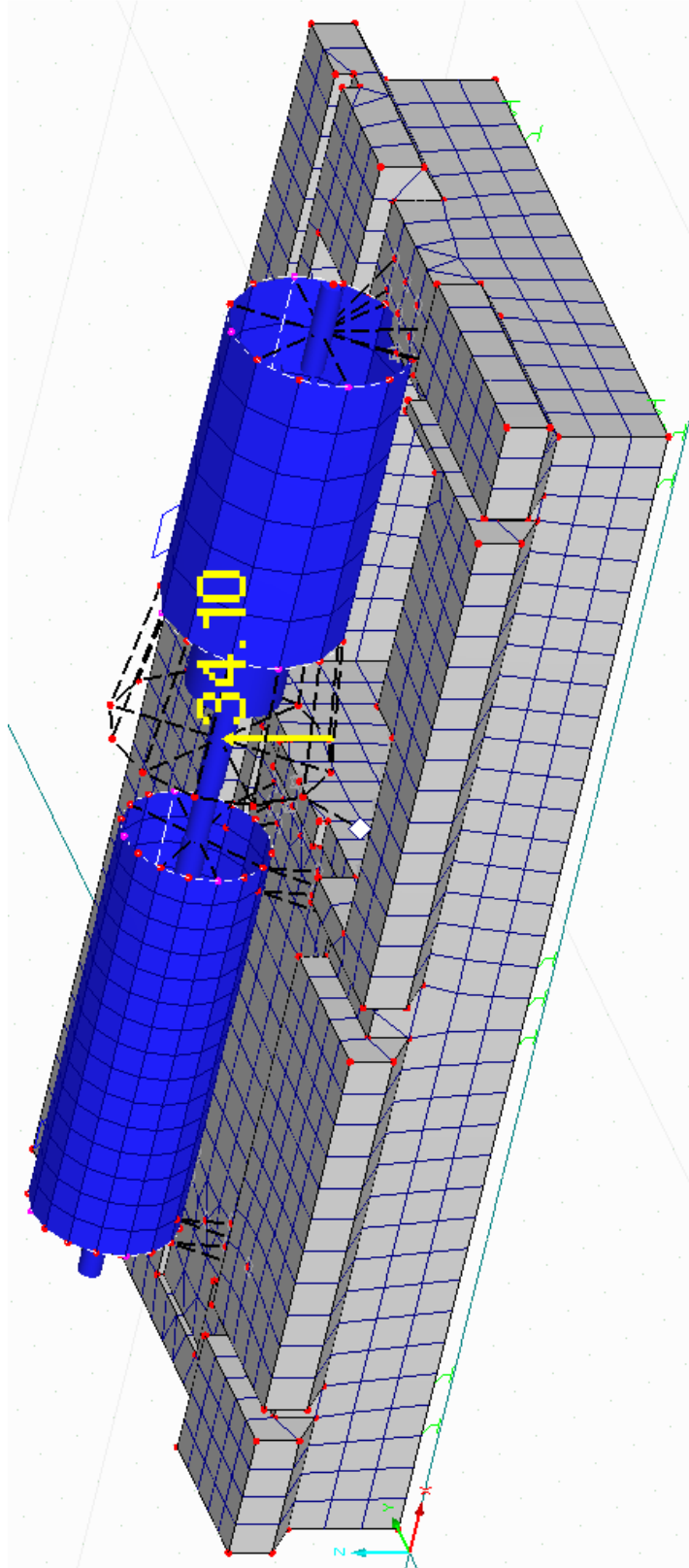
DZS 5 – Dynamické budící síly od rotorů – vertikálně – stojan generátoru č. 2



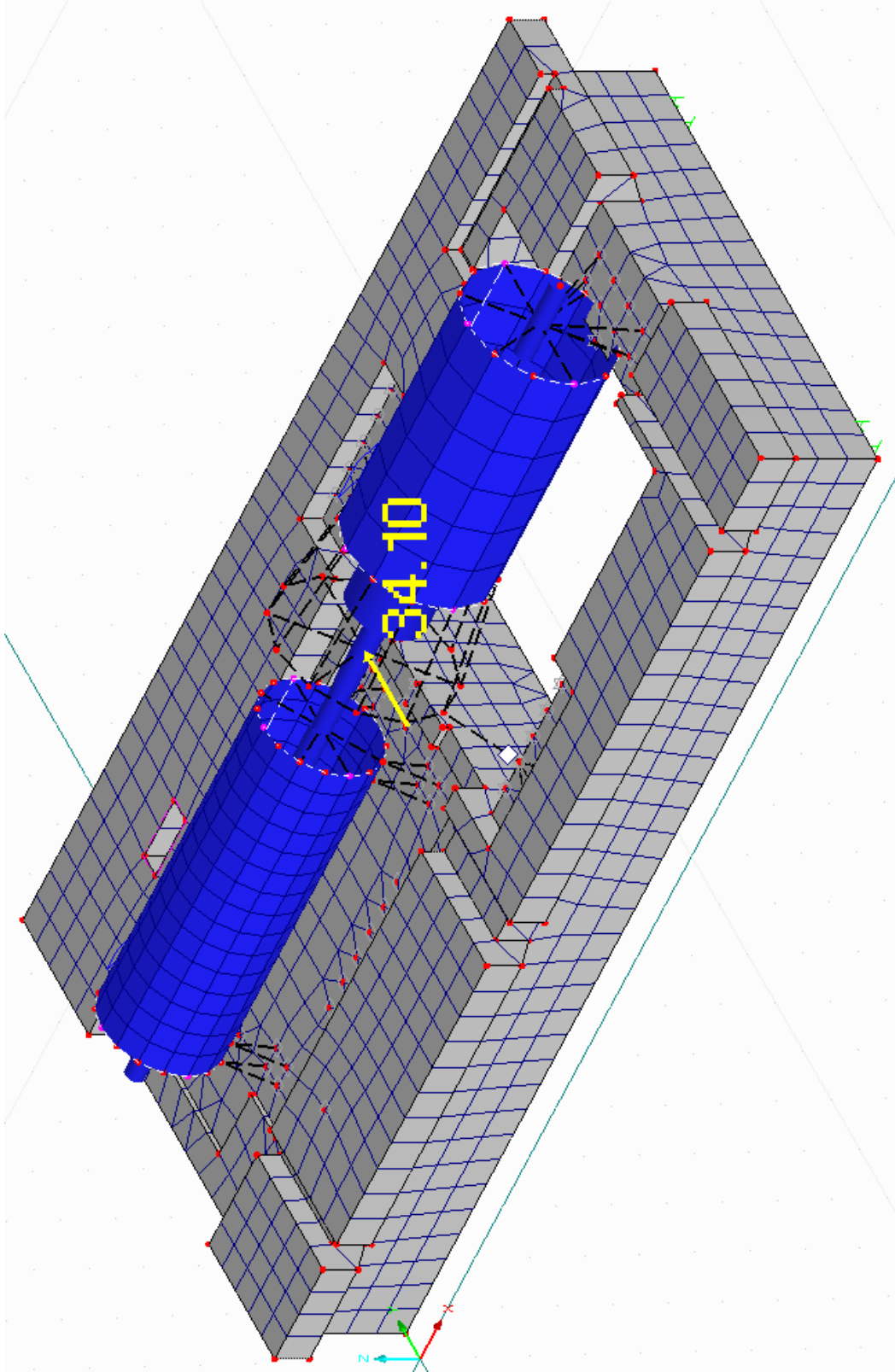
DZS 6 – Dynamické budící síly od rotorů – horizontálně – stojan generátoru č. 2



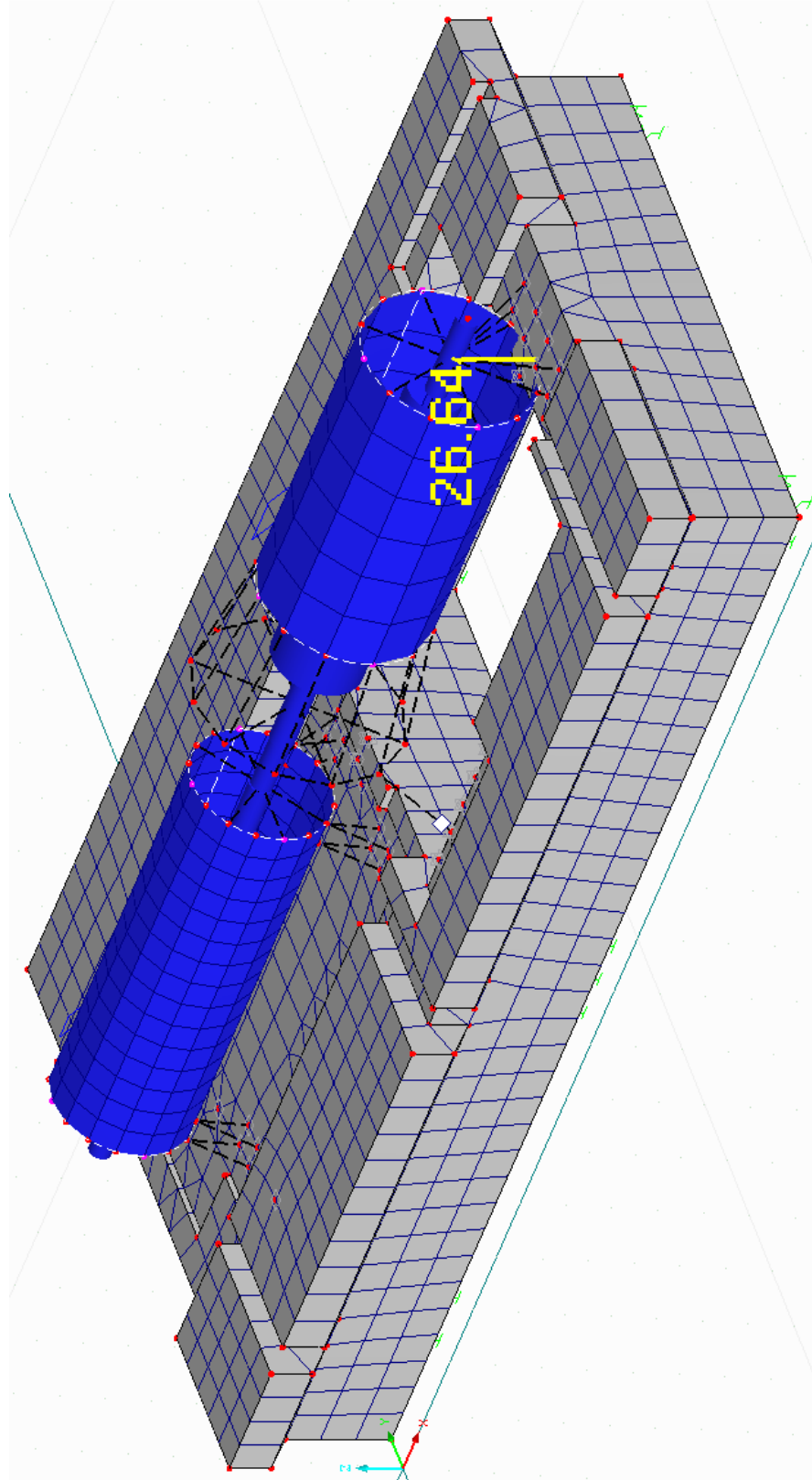
DZS 7 – Dynamické budící síly od rotorů – vertikálně – stojan turbíny č. 1



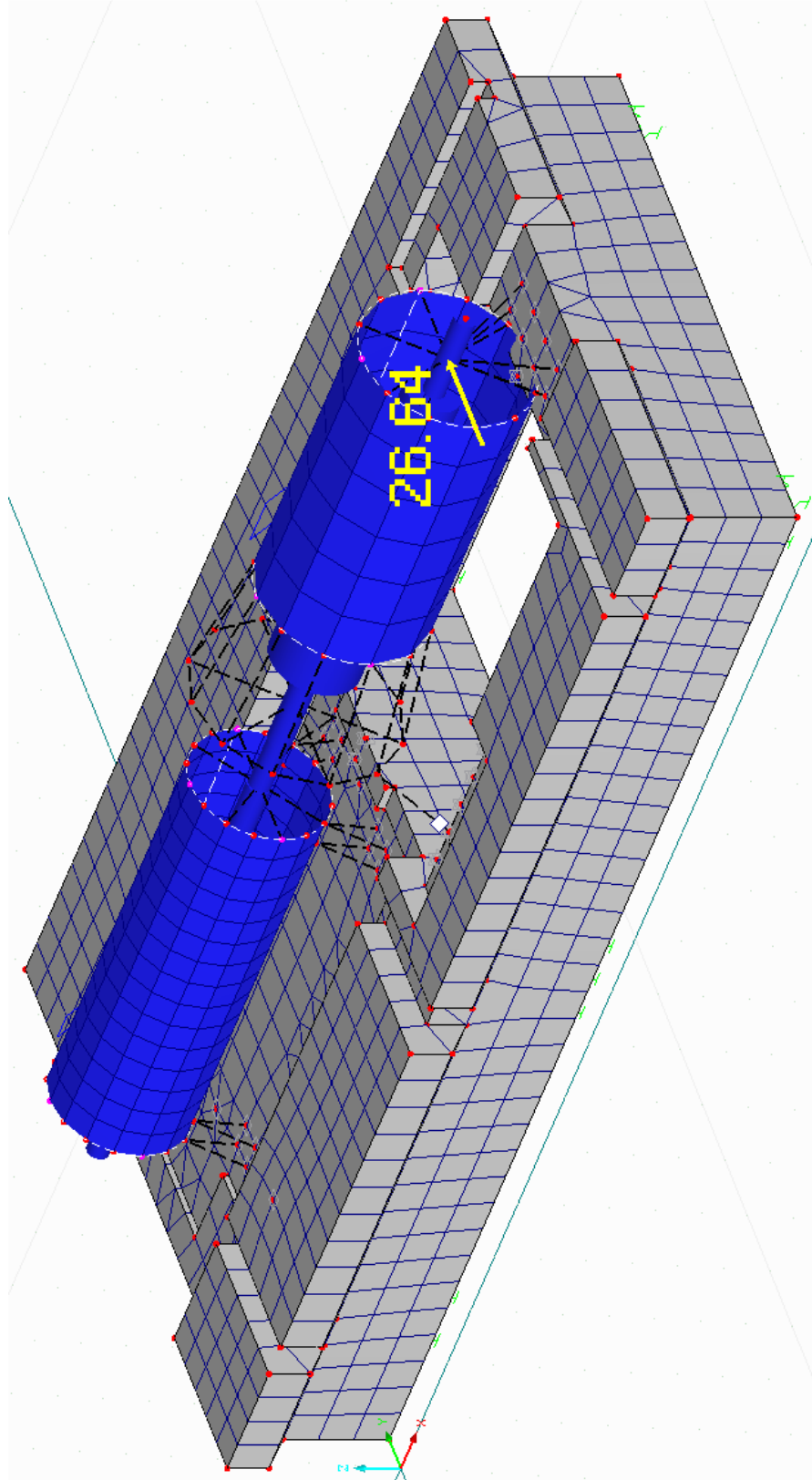
DZS 8 – Dynamické budící síly od rotorů – horizontálně – stojan turbíny č. 1



DZS 9 – Dynamické budící síly od rotorů – vertikálně – stojan turbíny č. 2



DZS 10 – Dynamické budící síly od rotorů – horizontálně – stojan turbíny č. 2



4.3. Modální analýza soustavy

Výpočet vlastního kmitání konstrukce byl proveden pro výpočtový model celé soustavy základové desky s turbosoustrojím. Výpočtem bylo získáno prvních 25 vlastních tvarů a jim odpovídajících vlastních frekvencí, které pokrývají frekvenční interval do 67 Hz.

Hmotovému stavu je přiřazen první dynamický zatěžovací stav: **DZS 1 – Vlastní tíha horní desky základu a turbosoustrojí**. Součet hmot v celém modelu je 890 427 kg.

Tab.: Vypočtené vlastní frekvence pro prvních 25 vlastních tvarů

Vlastní tvar č.	Vlastní číslo λ [$1/s^2$]	Vl. kruh. frekvence ω [rad/s]	Vlastní frekvence f [Hz]	Vlastní perioda T [s]
1	19,089	4,369	0,695	1,438
2	67,189	8,197	1,305	0,767
3	75,698	8,700	1,385	0,722
4	91,831	9,583	1,525	0,656
5	453,684	21,300	3,390	0,295
6	514,238	22,677	3,609	0,277
7	815,032	28,549	4,544	0,220
8	12618,575	112,332	17,878	0,056
9	14350,617	119,794	19,066	0,052
10	17315,711	131,589	20,943	0,048
11	21491,674	146,600	23,332	0,043
12	27031,416	164,412	26,167	0,038
13	32098,045	179,159	28,514	0,035
14	34945,949	186,938	29,752	0,034
15	53170,898	230,588	36,699	0,027
16	54397,746	233,233	37,120	0,027
17	67931,570	260,637	41,482	0,024
18	74737,016	273,381	43,510	0,023
19	75318,852	274,443	43,679	0,023
20	121789,953	348,984	55,543	0,018
21	132868,219	364,511	58,014	0,017
22	138237,297	371,803	59,174	0,017
23	150577,125	388,043	61,759	0,016
24	172746,219	415,628	66,149	0,015
25	176964,313	420,671	66,952	0,015

V předchozí tabulce platí:

- Mezi vlastní kruhovou frekvencí ω [rad/s] a vlastním číslem λ [$1/s^2$] platí následující vztah:

$$\lambda = \omega^2$$

- Vlastní frekvence f [Hz] je četnost vlastního kmitání za vteřinu. Mezi vlastní frekvencí f [Hz] a vlastní kruhovou frekvencí ω [rad/s] platí následující vztah:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$$

- Vlastní perioda T [s] vyjadřuje čas potřebný k průběhu jednoho kmitu konstrukce. Mezi vlastní periodou T [s] a vlastní frekvencí f [Hz] platí následující vztah:

$$f = \frac{1}{T}$$

- **Rozkmitání hmoty soustavy v jednotlivých vlastních tvarech a ve 3 směrech**

Tab.: Účinné modální hmoty a faktory účinných modálních hmot

Vlastní tvar č.	Účinná modální hmota			Faktor účinných modálních hmot		
	m_{eX} [kg]	m_{eY} [kg]	m_{eZ} [kg]	f_{meX} [-]	f_{meY} [-]	f_{meZ} [-]
1	92 928	-	-	0,104	-	-
2	-	872 547	-	-	0,980	-
3	794 422	-	-	0,892	-	-
4	-	13 521	-	-	0,015	-
5	923	-	673 730	0,001	-	0,757
6	2 100	-	216 617	0,002	-	0,243
7	-	4 350	-	-	0,005	-
Σ	890 373	890 418	890 347	0,999	1,000	1,000

Z tabulky je zřejmé, že v prvních 7 vlastních tvarech bylo rozkmitáno více než 99,9 % hmoty celé soustavy základové desky s turbosoustrojím ve všech 3 směrech. Ve vynechaných políčkách tabulky a vyšších vlastních tvarech je rozkmitaná hmota nižší než 0,1%. Rozhodující faktory účinných modálních hmot jsou vybarveny žlutě.

Tab.: Popis nejnižších vlastních tvarů

Vlastní tvar č.	Vlastní frekvence [Hz]	Popis vlastního tvaru	Účinná modální hmota
1	0,695	posun rotoru ve směru axiální osy x	10,4 %
2	1,305	posun základové desky ve směru horizontální osy y	98,0 %
3	1,385	posun základové desky ve směru axiální osy x	89,2 %
4	1,525	otáčení základové desky okolo vertikální osy z	-
5	3,390	posun části základové desky v místě uložení generátoru ve směru vertikální osy z	75,7 %
6	3,609	posun části základové desky v místě uložení turbíny ve směru vertikální osy z	24,3 %
7	4,544	otáčení základové desky v ose rotoru okolo axiální osy x	-
8	17,878	ohyb základové desky okolo horizontální osy y	-
9	19,066	posun rotoru generátoru ve směru horizontální osy y	-
10	20,943	posun rotoru generátoru ve směru horizontální osy y	-

o Vyhodnocení vlastního kmitání

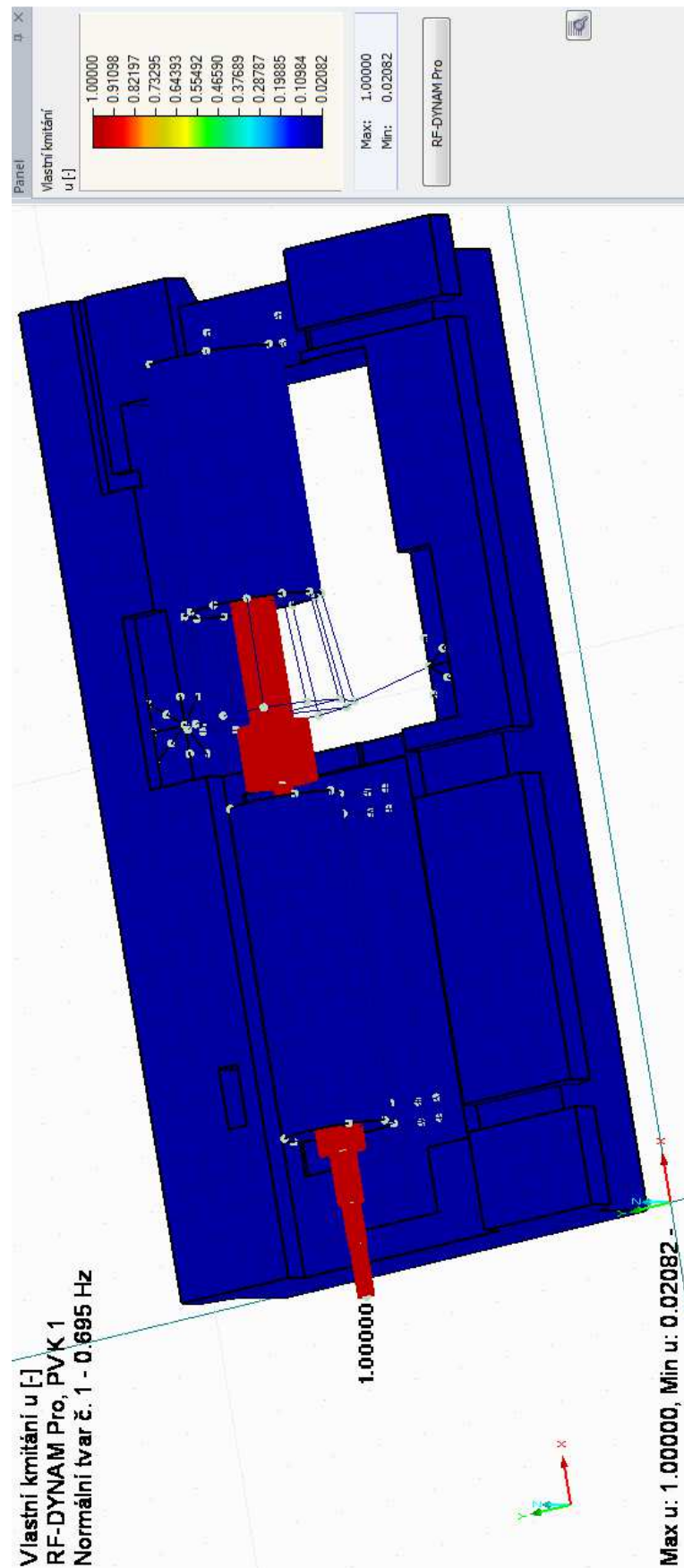
První vlastní tvar vyjadřuje stabilitní problém celé soustavy základové desky s turbosoustrojím. Dochází zde k posunu rotoru ve směru axiální osy x .

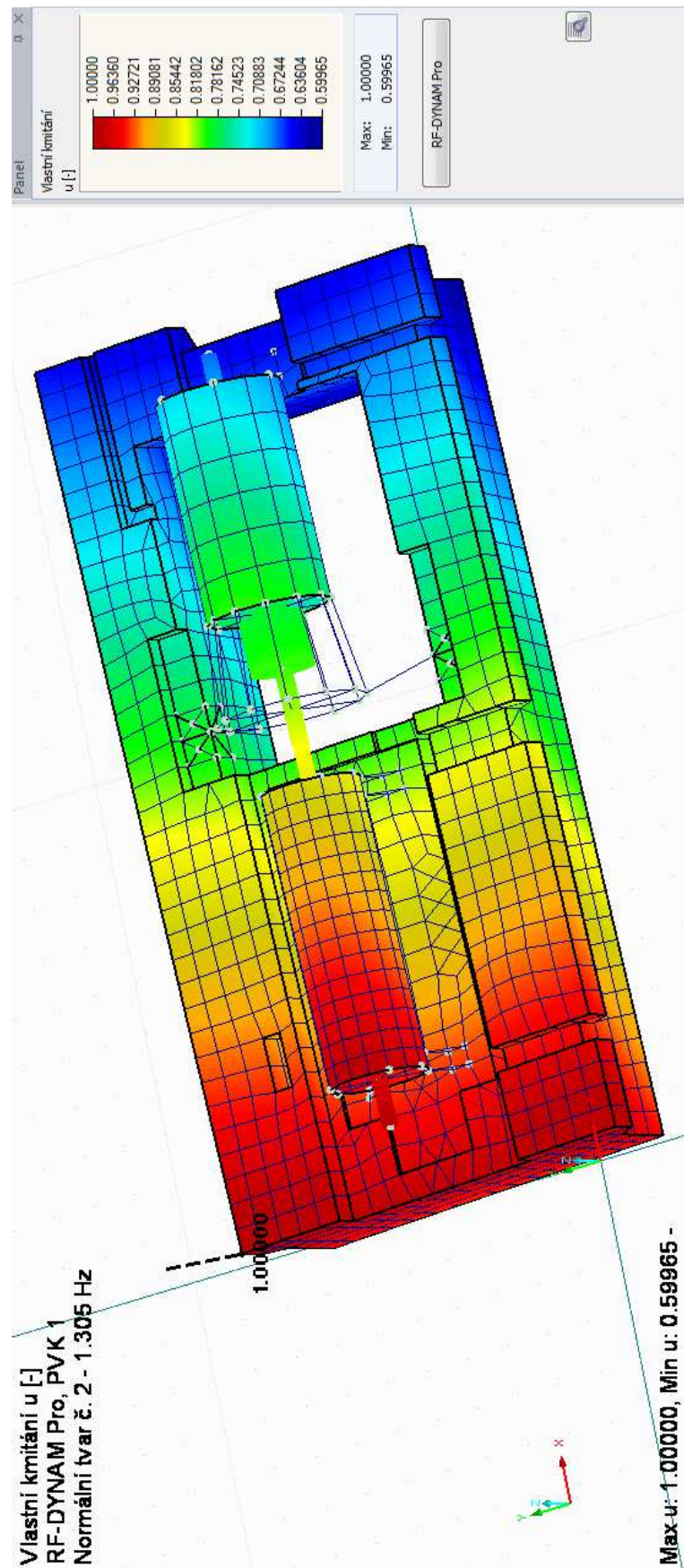
Základní vlastní frekvence kmitání základové desky jako tuhého tělesa se pohybují od 1,305 Hz do 4,544 Hz. Dochází zde pouze k translačním a rotačním pohybům desky jako celku.

Při frekvenci 17,878 Hz dochází již k ohybu celé desky. Od frekvence 23,332 Hz dochází k ohybům podélníků, příčnicku a ke zvedání jednotlivých rohů desky.

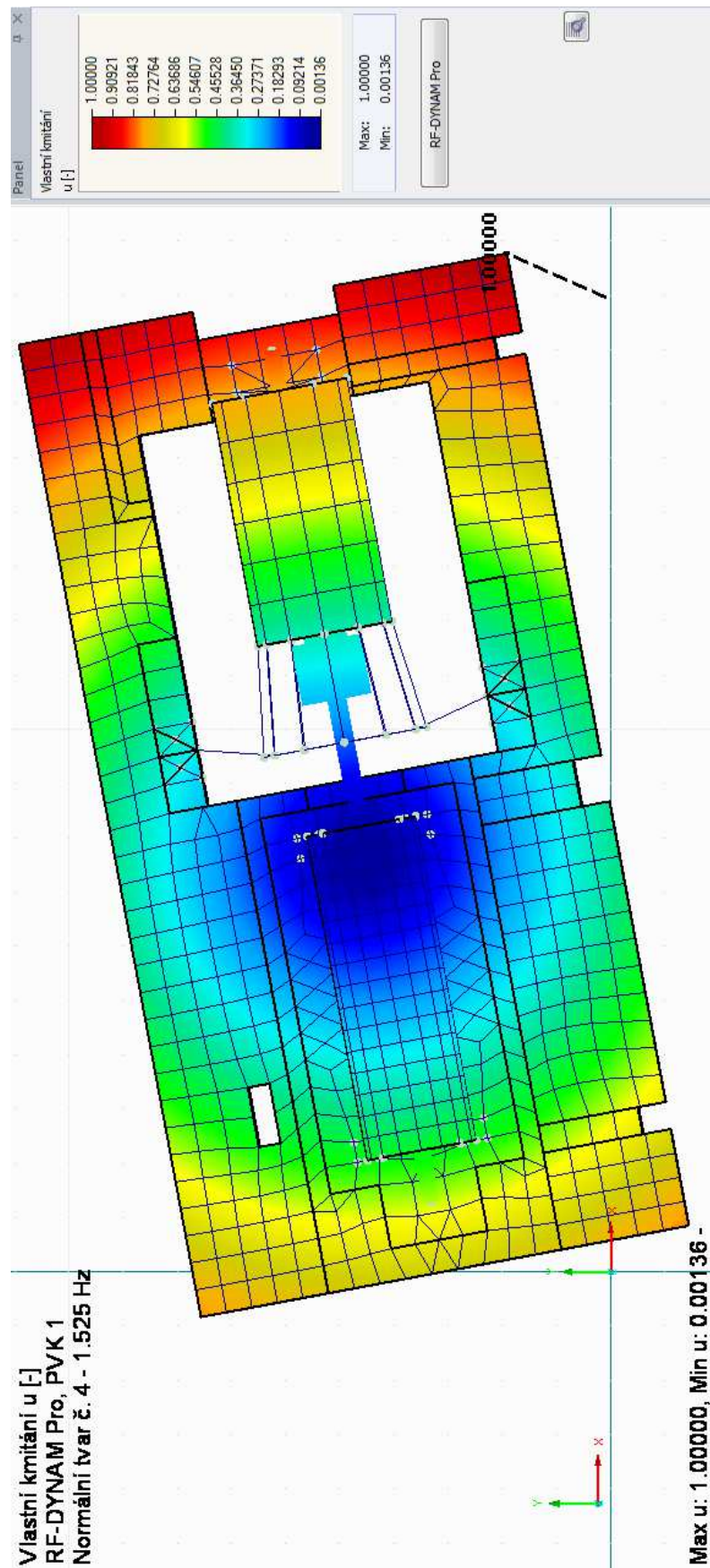
Vlastní tvary, při kterých dochází pouze ke kmitání rotorů nebo k vertikálnímu posunu statoru turbíny na pružinách nemají na řešení základové desky vliv.

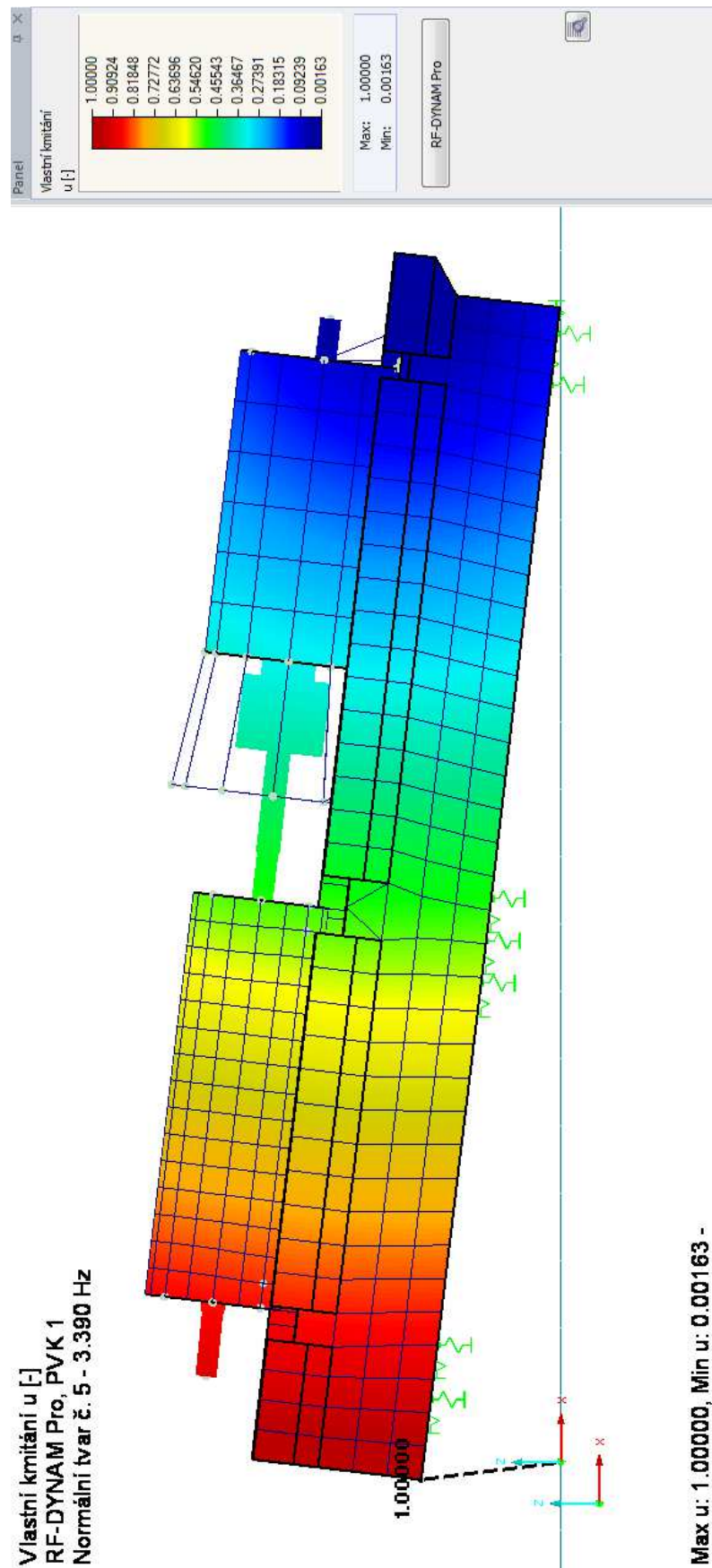
V rozmezí provozních otáček od 45 Hz do 55 Hz se nevyskytuje žádný vlastní tvar. Nejbližší vlastní tvar č. 20 se vyskytuje při vlastní frekvenci 55,543 Hz.

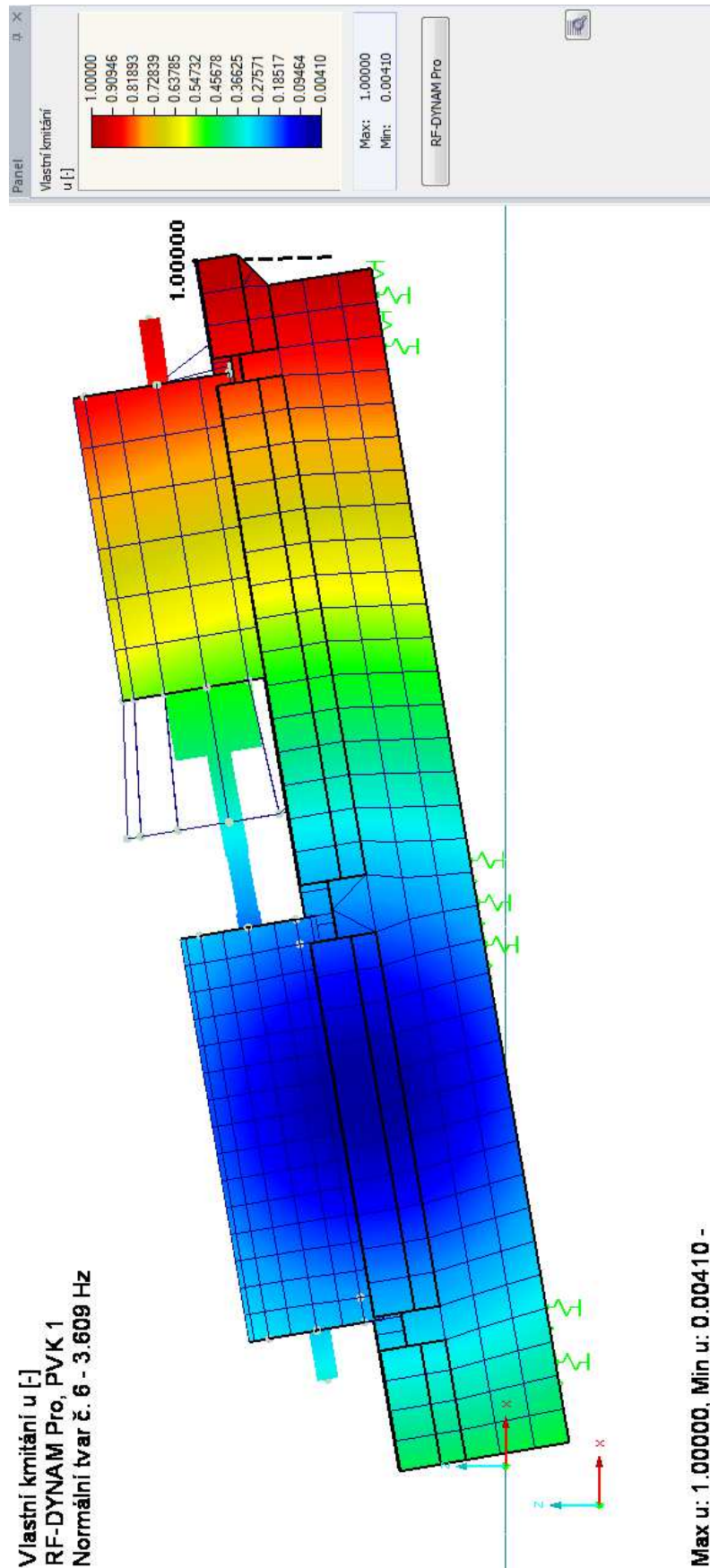


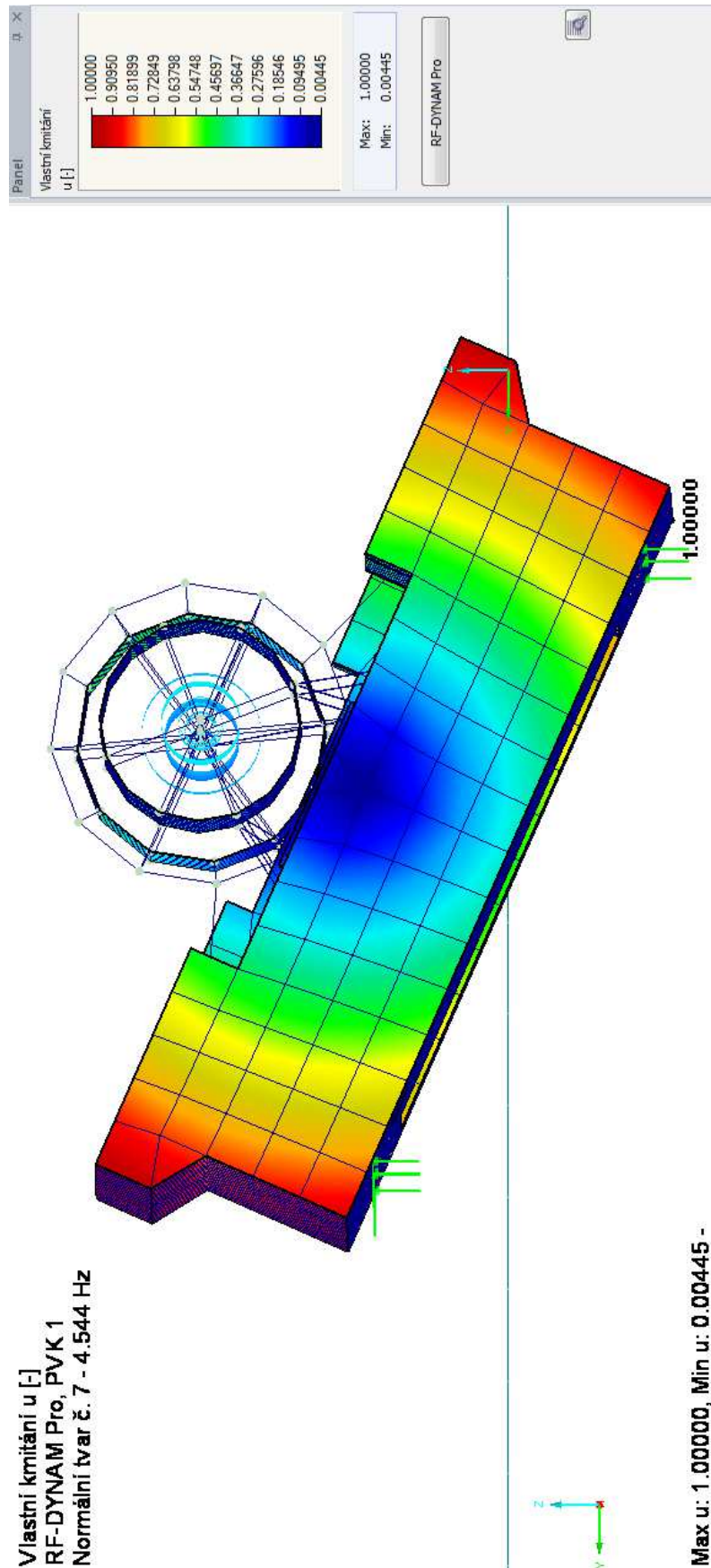


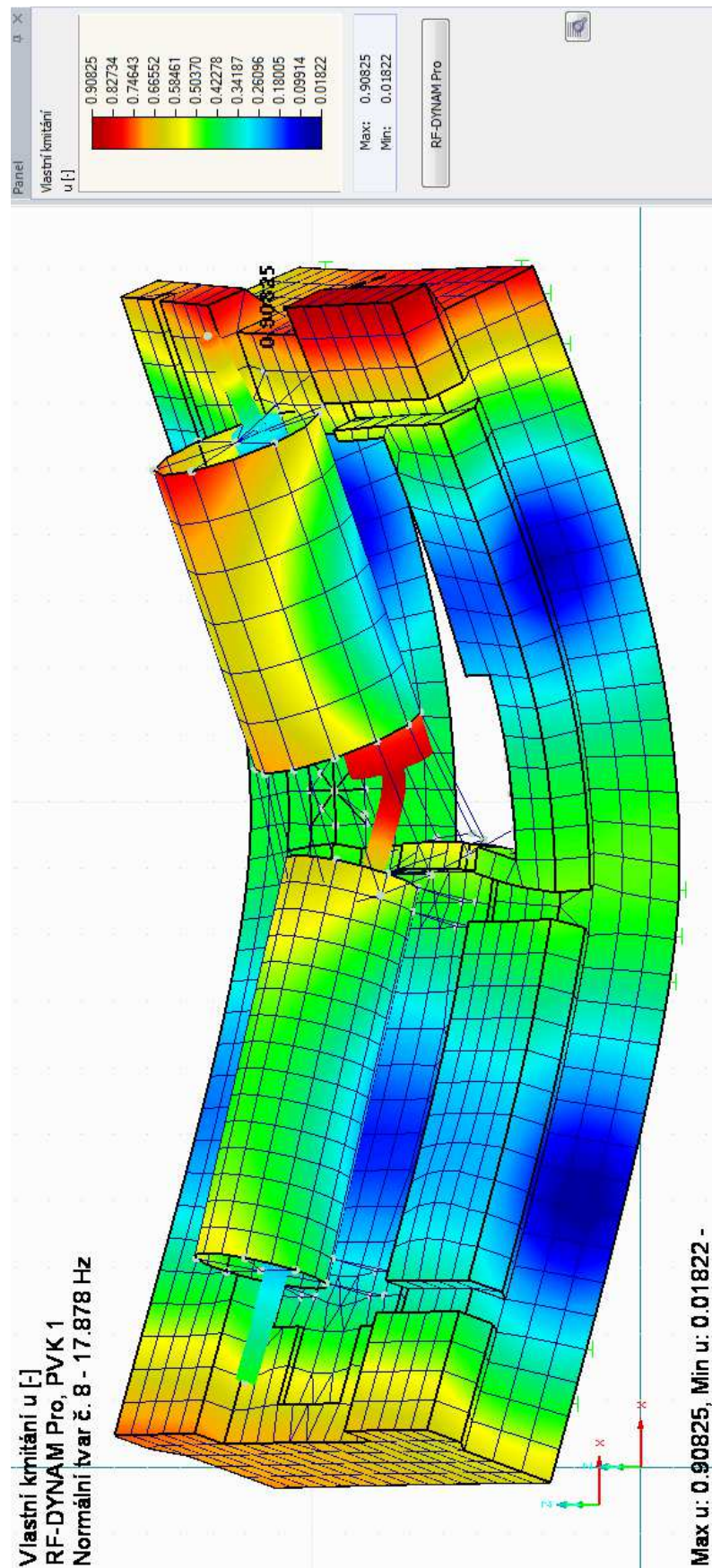


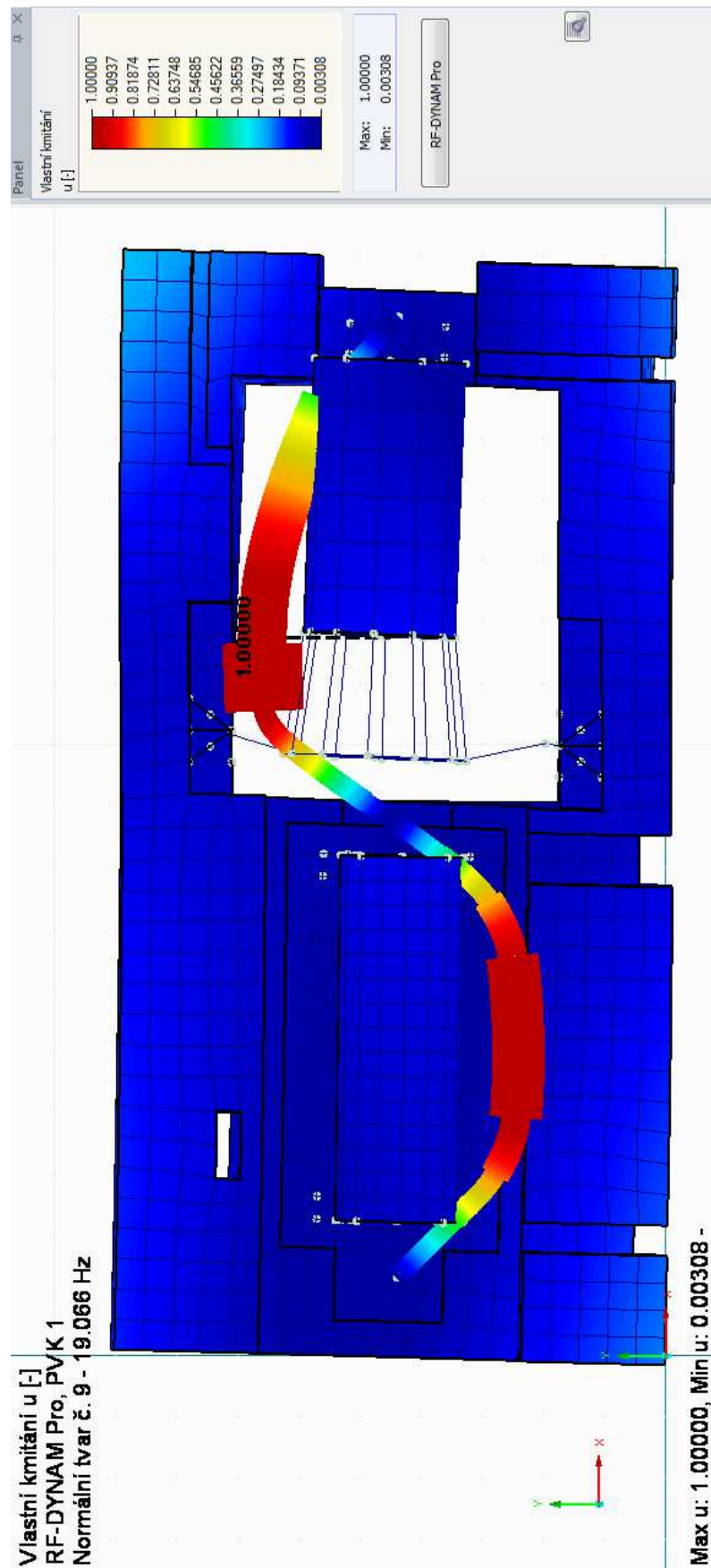




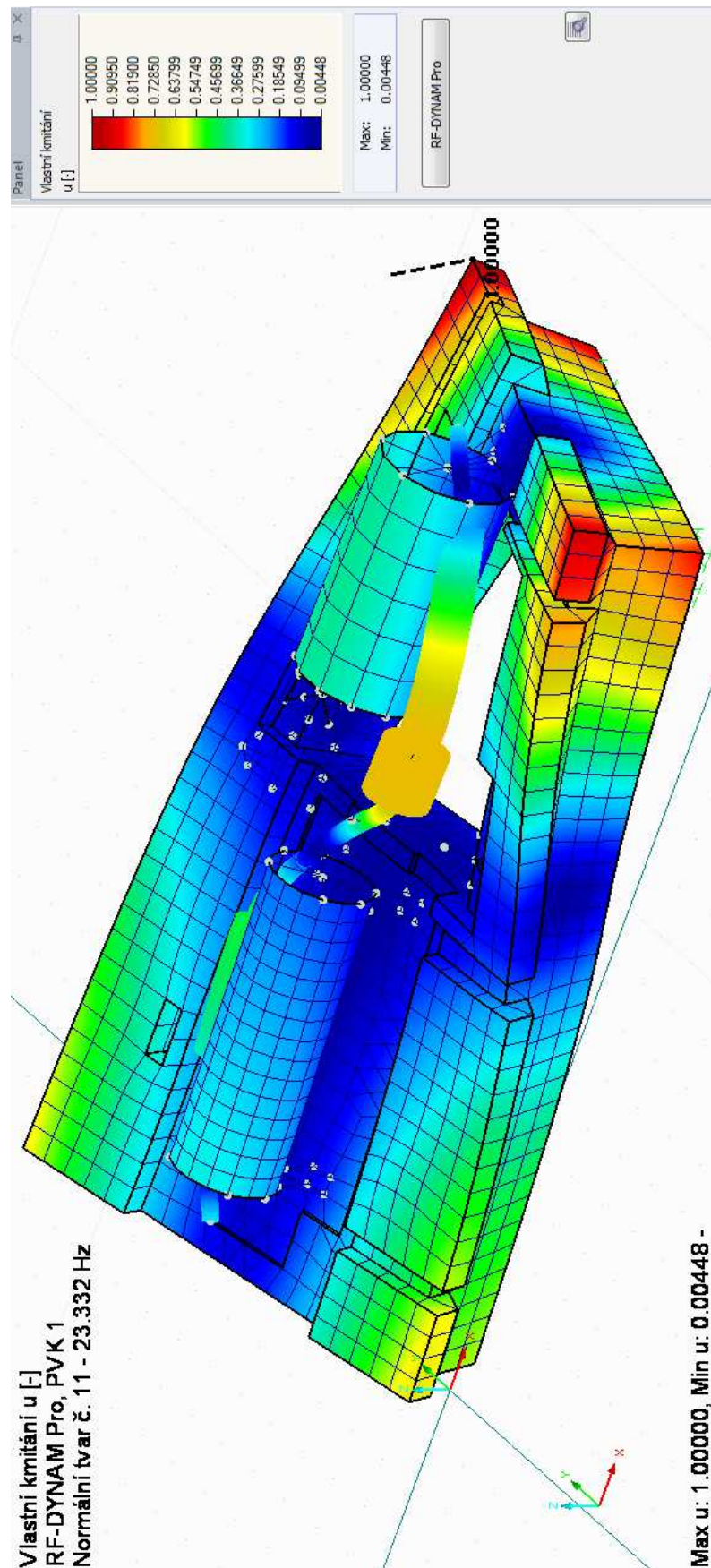


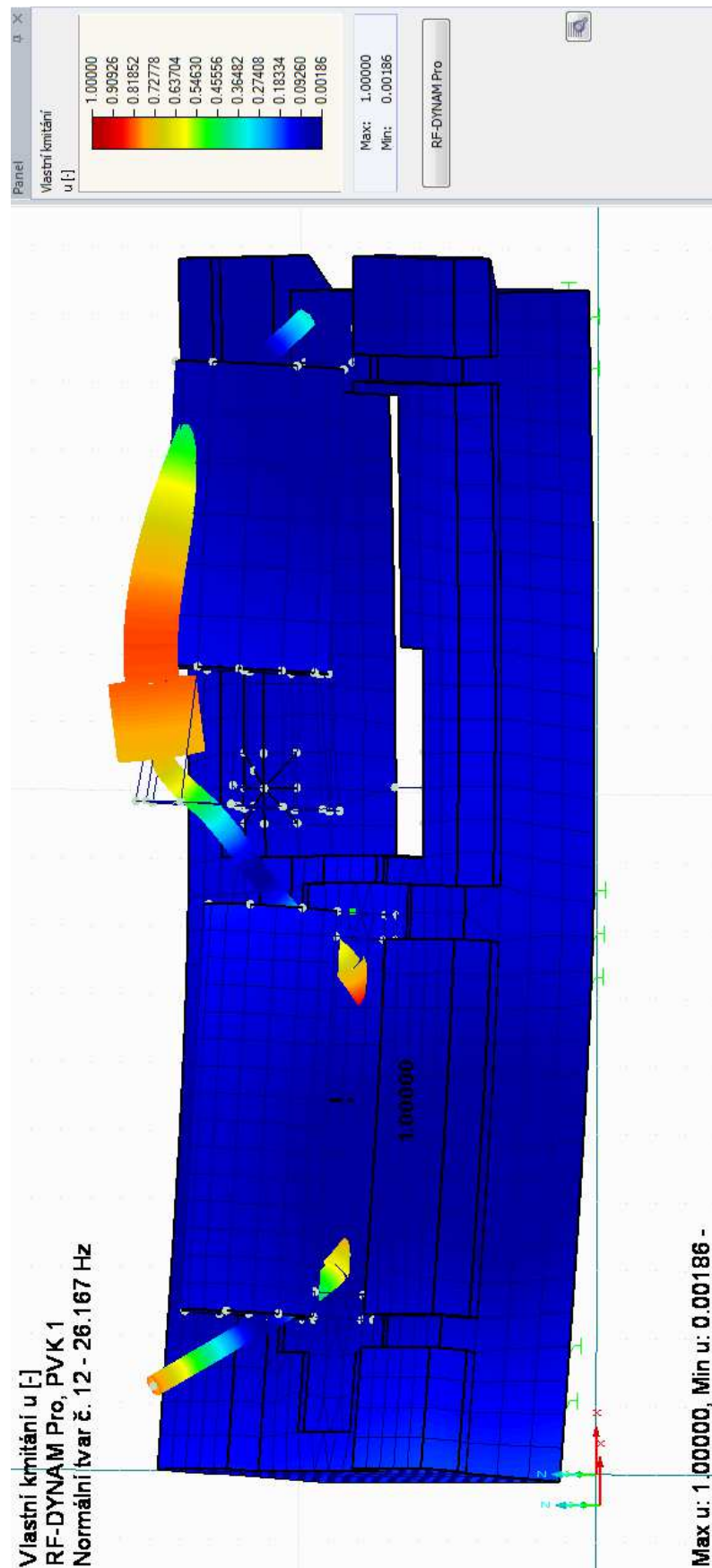


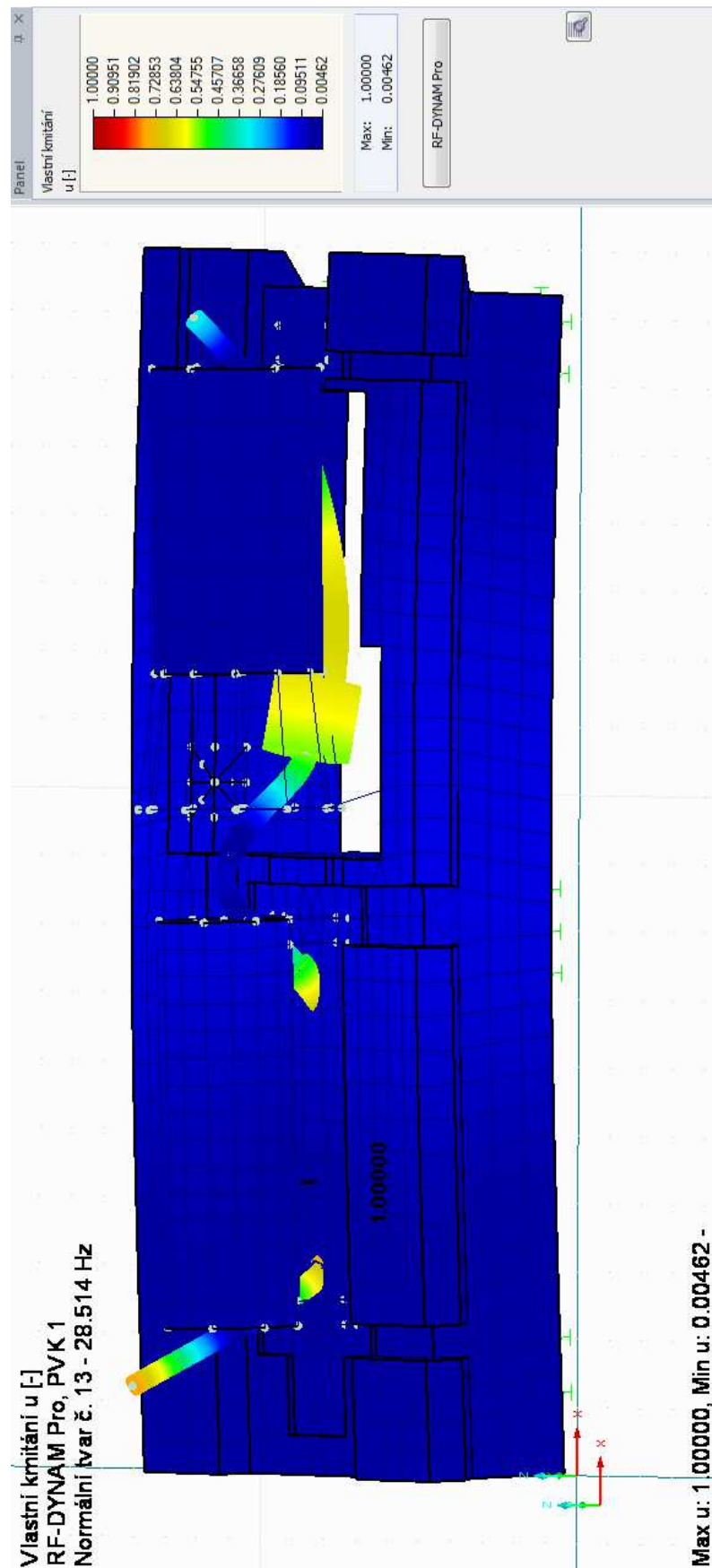


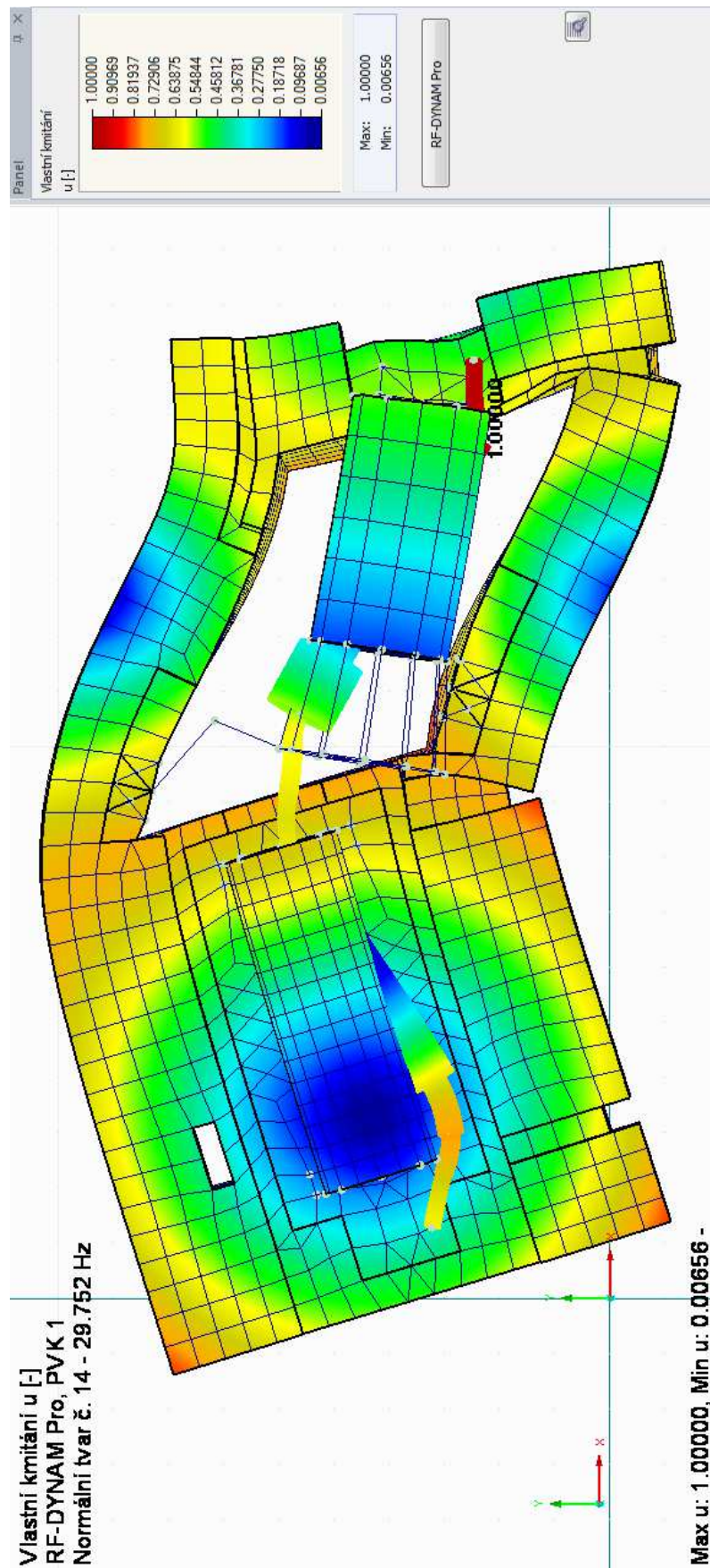


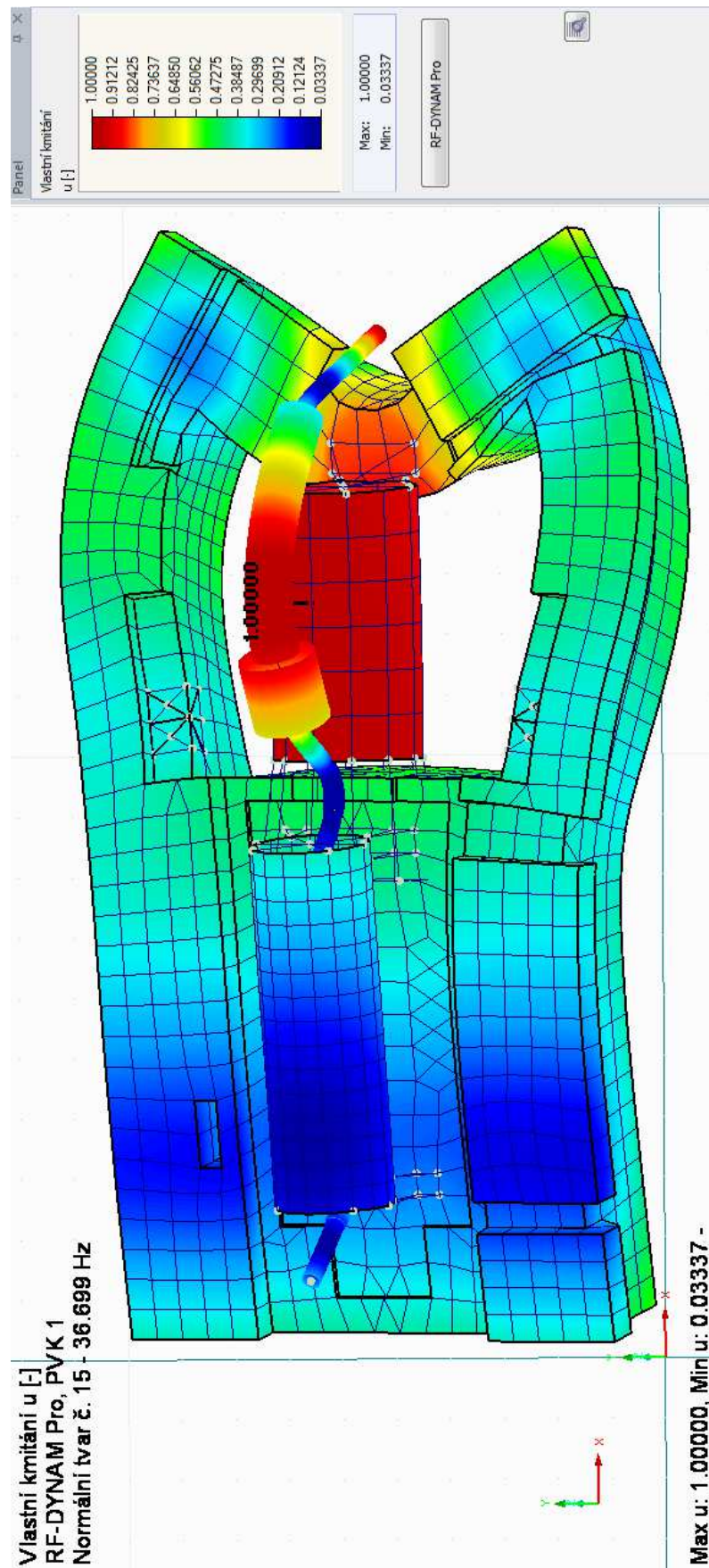


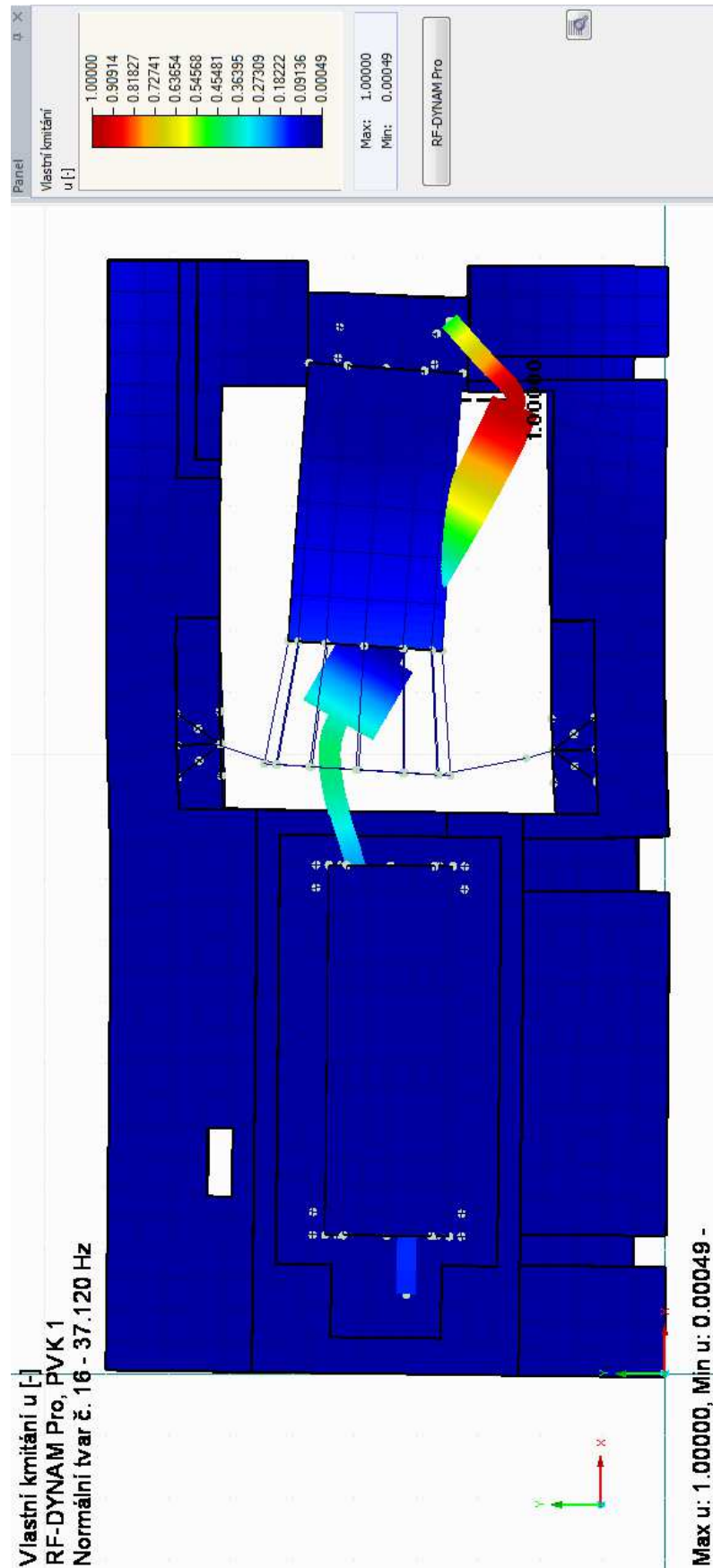




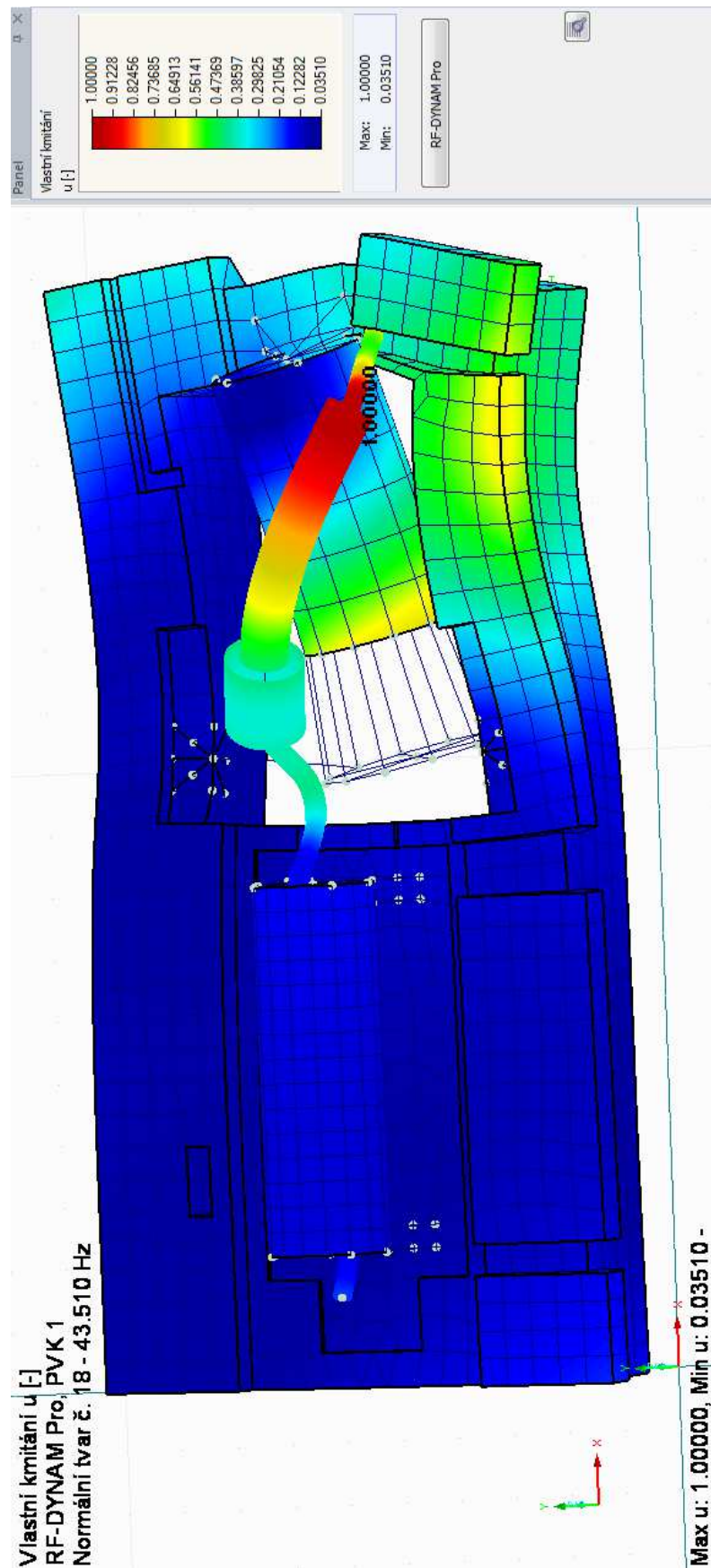


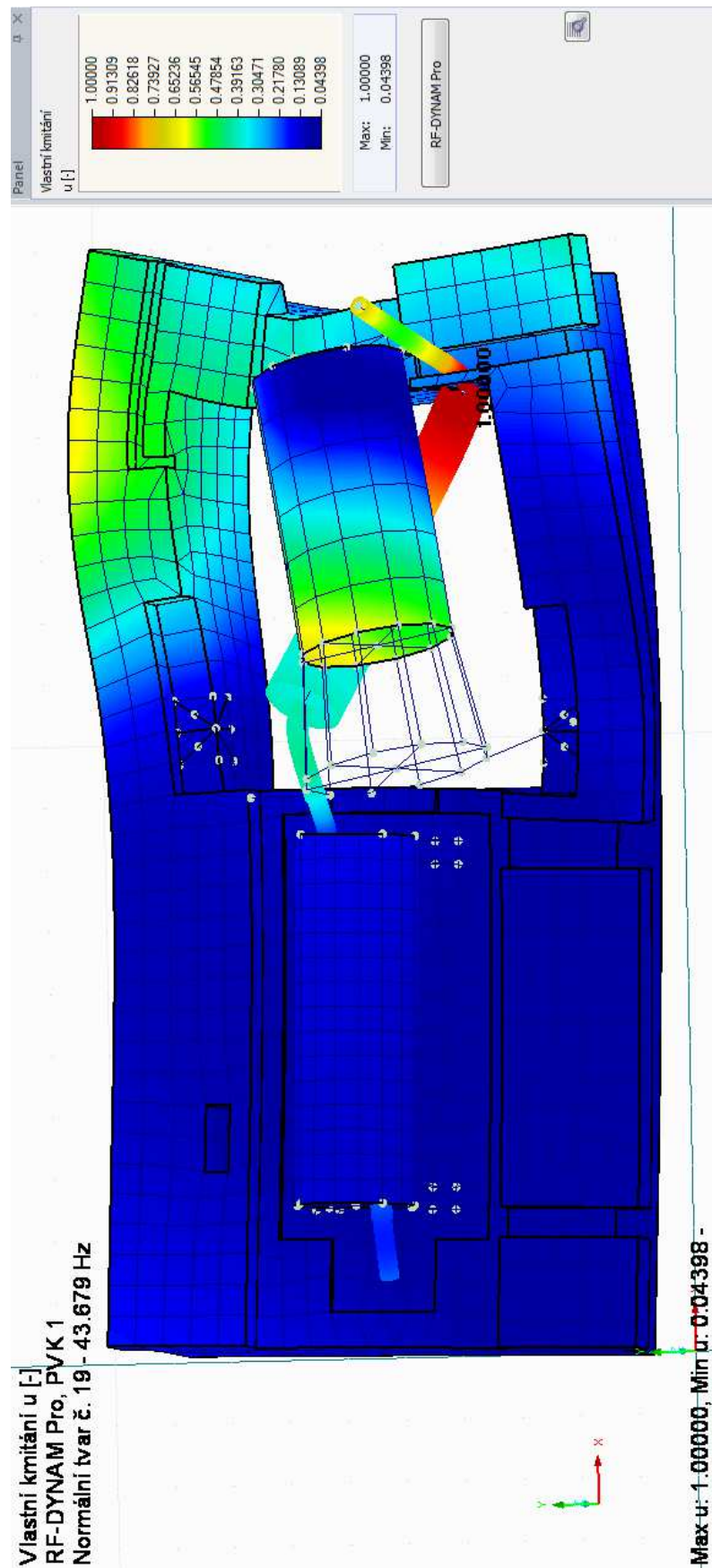


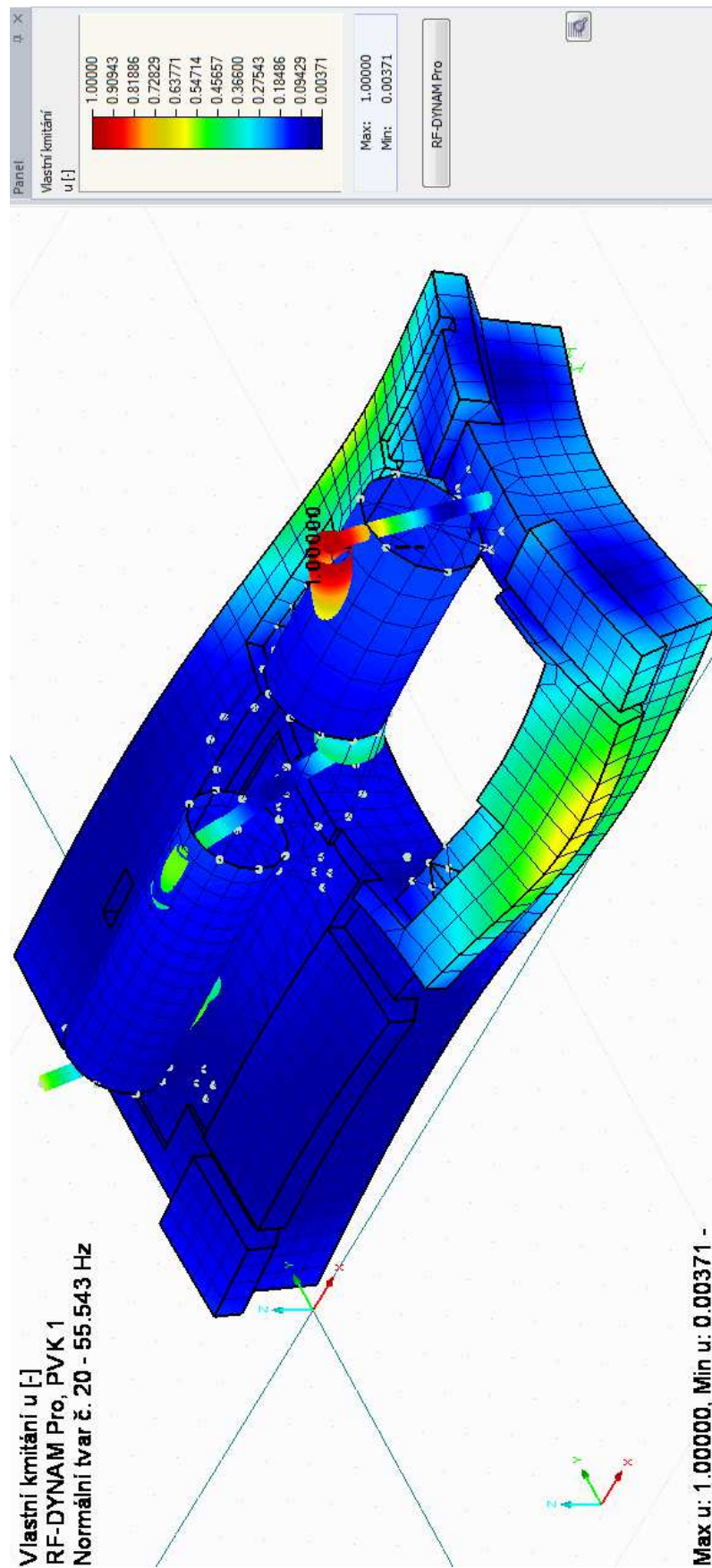


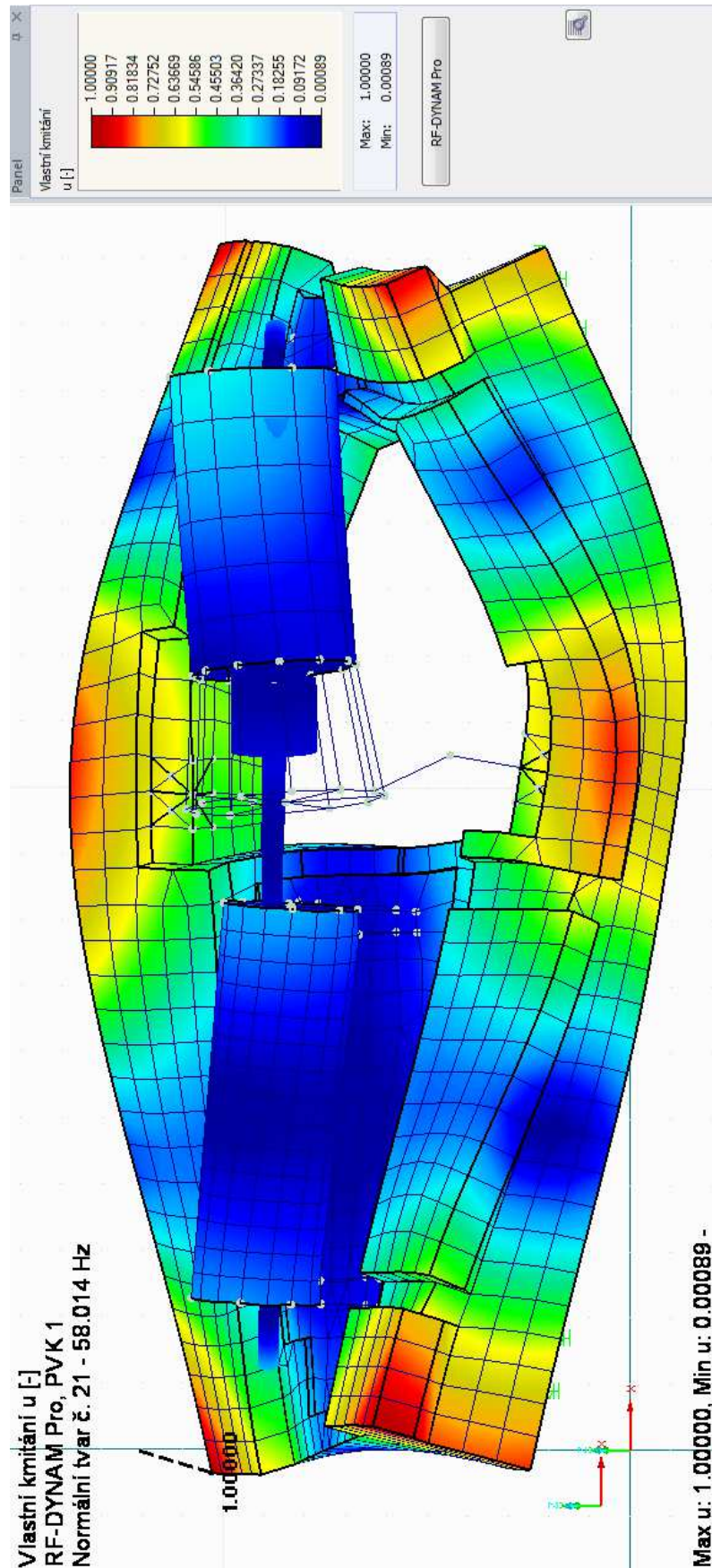


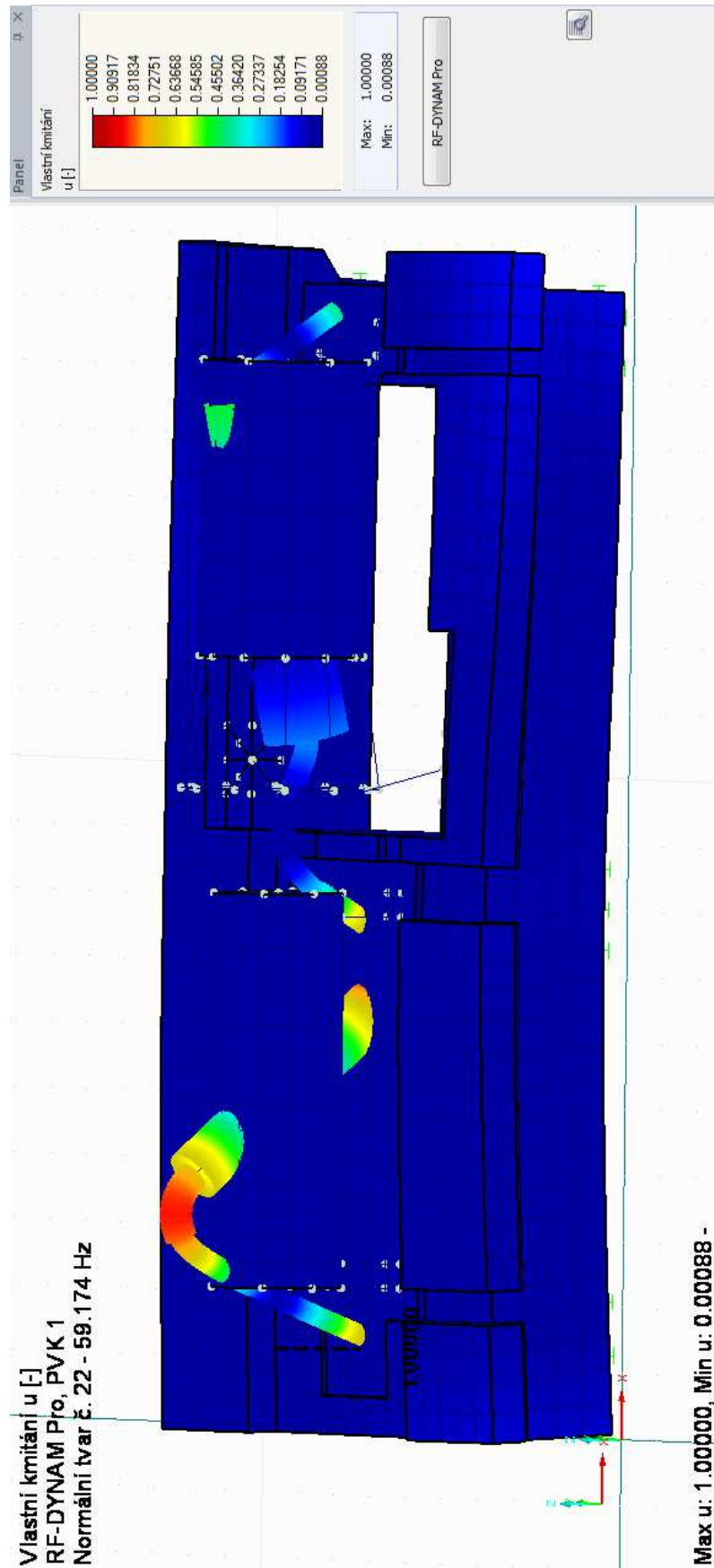


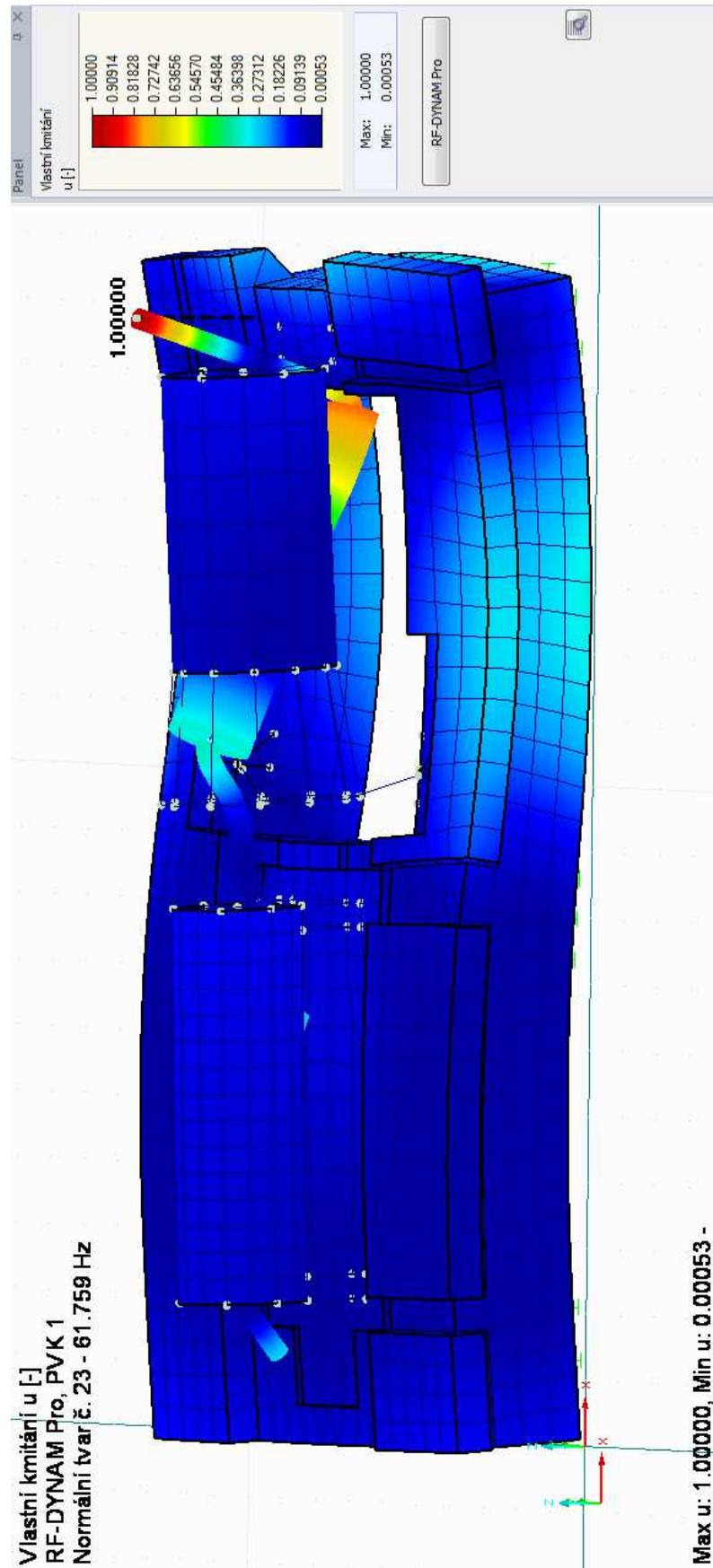


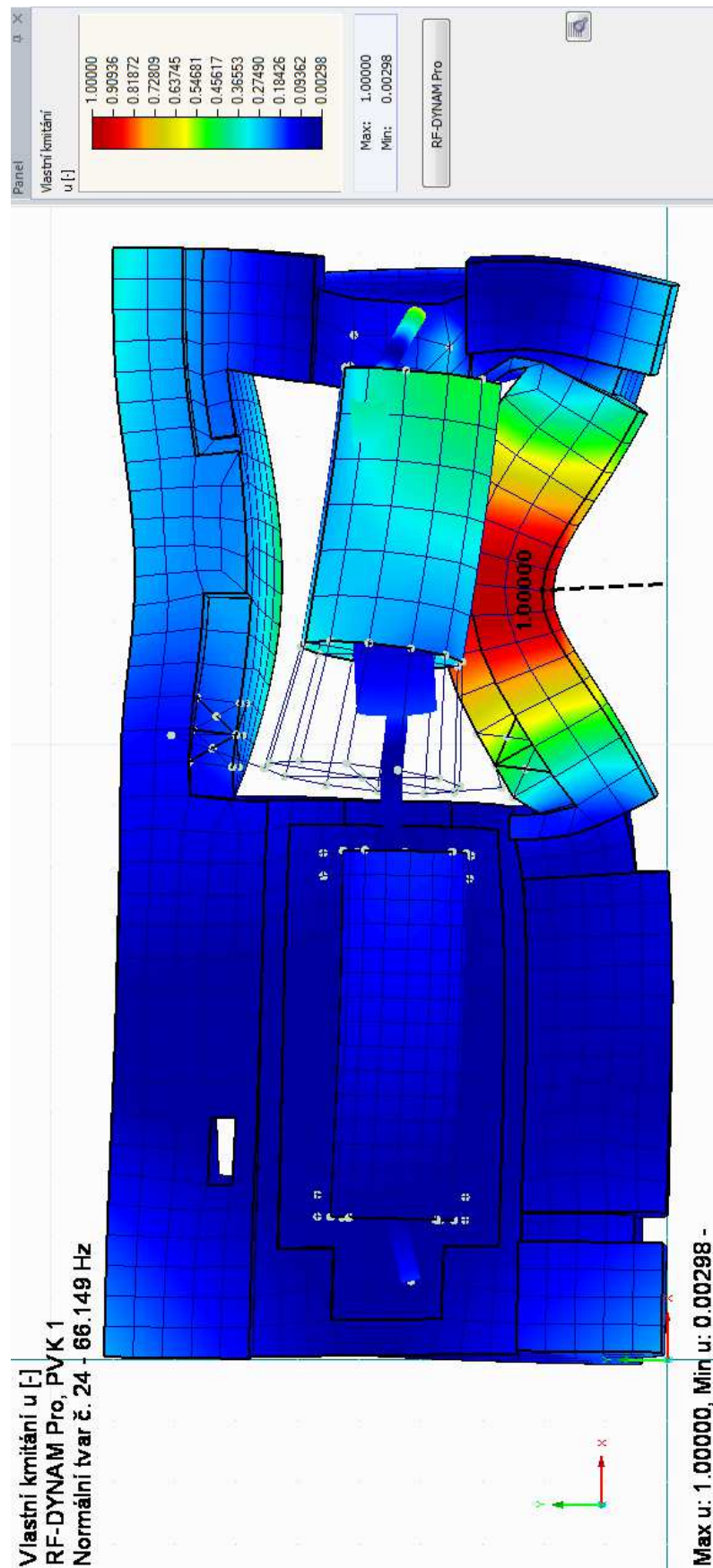


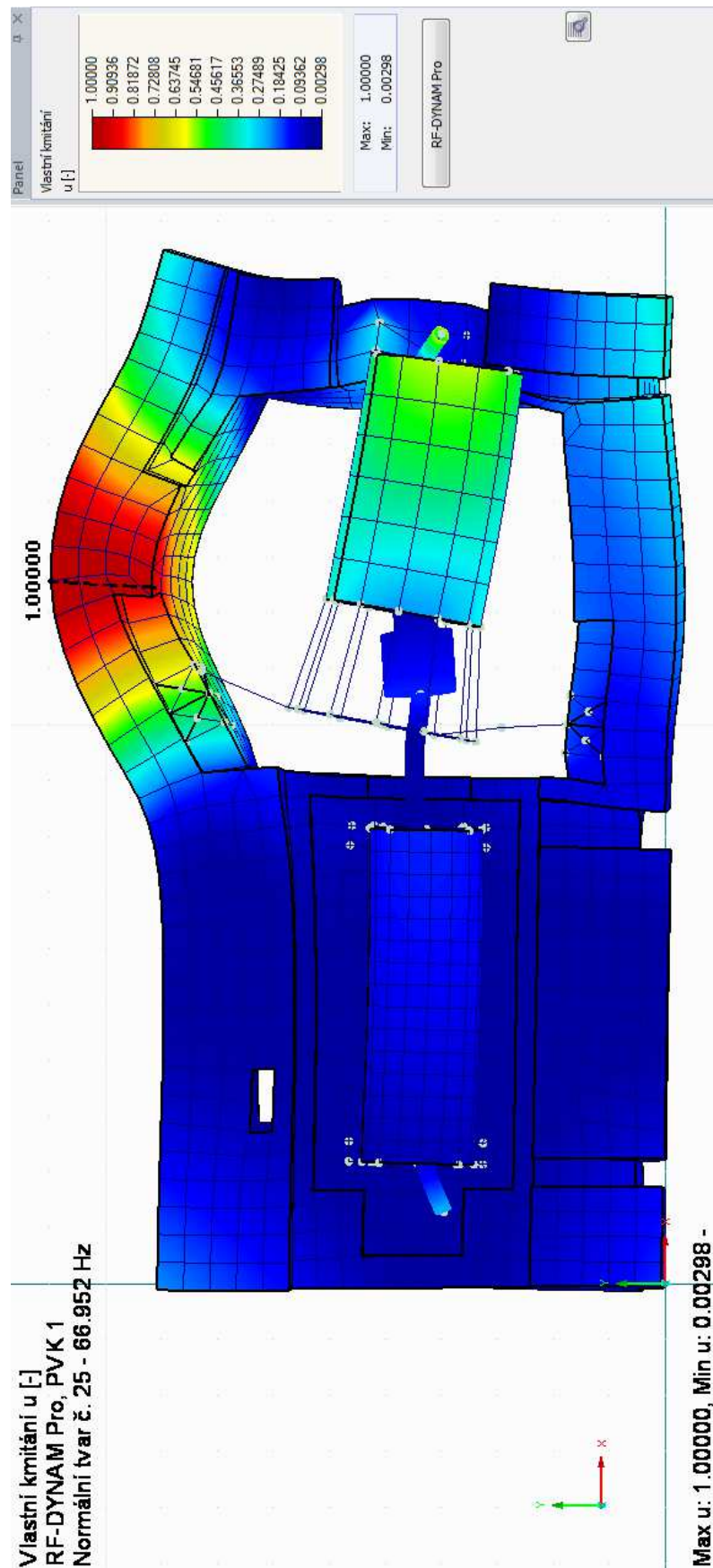












4.4. Vynucené kmitání soustavy

4.4.1. Stanovení mezních výpočetních hodnot harmonické rychlosti kmitání

Výstupem dynamické analýzy je zhodnocení harmonických (špičkových) rychlostí vibrací na povrchu betonu v místech i mimo místa ložiskových podpor, a to v provozních otáčkách strojního zařízení i v jeho přechodových stavech při najíždění a odstavování.

Dodavatel strojního zařízení stanovil mezní výpočetní hodnoty efektivních rychlostí kmitání na povrchu betonu, které jsou vypsány v tabulce níže.

Tab.: Mezní výpočetní hodnoty efektivních rychlostí kmitání na povrchu betonu stanovené dodavatelem strojního zařízení

Provozní stav	Mezní efektivní rychlost kmitání v_{ef} [mm/s]	
	v místě ložiskových podpor	mimo místa ložiskových podpor
V provozních otáčkách	2,8	5,0
V přechodových stavech při najíždění a odstavování	7,0	7,0

Mezi harmonickou (špičkovou) rychlostí kmitání a efektivní rychlostí kmitání platí následující vztah:

$$v_{peak} = \sqrt{2} \cdot v_{ef}$$

Pozn.: Stejný vztah platí také pro zrychlení kmitání: $a_{peak} = \sqrt{2} \cdot a_{ef}$

Pomocí tohoto vztahu jsou dopočteny mezní výpočetní hodnoty harmonické (špičkové) rychlosti kmitání na povrchu betonu, které jsou uvedeny v tabulce níže.

Tab.: Mezní výpočetní hodnoty harmonické (špičkové) rychlosti kmitání na povrchu betonu

Provozní stav	Mezní harmonická (špičková) rychlost kmitání v_{peak} [mm/s]	
	v místě ložiskových podpor	mimo místa ložiskových podpor
V provozních otáčkách	4,0	7,0
V přechodových stavech při najíždění a odstavování	10,0	10,0

Rozmezí provozních otáček

Provozní frekvence stroje je 50 Hz. Mezní výpočetní hodnoty harmonické rychlosti kmitání v provozních otáčkách jsou uvažovány pro rozmezí provozních otáček $\pm 10\%$ od provozní frekvence stroje 50 Hz. Rozmezí provozních otáček tedy je od 45 Hz do 55 Hz.

4.4.2. Stanovení amplitud budících sil turbosoustrojí

Pro stanovení amplitud budících sil platí následující vztah:

$$F_0 = 0,2 \cdot R \cdot \left(\frac{f}{f_{sr}}\right)^2$$

, kde je značena:

F_0 [kN] ... velikost amplitudy budících sil

R [kN] ... reakce rotoru v uvažovaném místě budící síly

f_{sr} [Hz] ... provozní frekvence stroje: $f_{sr} = 50$ Hz

f [Hz] ... frekvence stroje, pro kterou je počítána budící síla

Tento vztah bude užít pro výpočet amplitud budících sil v provozních otáčkách stroje i pro přechodové stavy při najíždění a odstavování stroje. Rozmezí provozních otáček stroje je od 45 Hz do 55 Hz.

o Uvažovaný interval budících frekvencí stroje pro výpočet rychlostí kmitání

Hodnoty frekvencí stroje, pro které budou počítány budící síly, budou měněny po 2 Hz. Závislost mezi velikostí amplitudy budící síly a frekvencí stroje, pro kterou je budící síla počítána, je kvadratická. Protože při nízkých frekvencích stroje je z důvodu kvadratické závislosti velmi nízká amplituda budící síly, budou rychlosti kmitání spočteny pro frekvence stroje od 20 Hz do 56 Hz. Tento interval pokrývá jak přechodové stavy, tak rozmezí provozních otáček, a je pro analýzu dostatečný široký.

o Užití vytvořených dynamických zatěžovacích stavů

V kapitole 4.2. **Dynamické zatěžovací stavy** jsou velikosti budících sil vypočteny pro provozní frekvenci stroje 50 Hz a odpovídají 20% velikostí reakcí rotorů v horizontálním a vertikálním směru a 2% velikostí reakcí rotorů v axiálním směru. Takto vytvořené dynamické zatěžovací stavy budou užity v přídatném modulu „RF-DYNAM Pro“ pro výpočet rychlostí vibrací. Velikosti amplitud budících sil budou měněny pomocí tzv. multiplikátoru k [-], který je provázaný s každým zatěžovacím stavem obsahujícím jednu budící sílu, a jehož velikost odpovídá vztahu:

$$k = \left(\frac{f}{f_{sr}}\right)^2 = \left(\frac{f}{50}\right)^2$$

V následujících tabulkách jsou vypsány vypočtené hodnoty multiplikátorů a příslušných amplitud budících sil pro frekvence stroje od 20 Hz do 56 Hz.

Tab.: Závislost velikosti multiplikátoru k [-] na budící frekvenci stroje

frekvence stroje [Hz]	multiplikátor k [-]	frekvence stroje [Hz]	multiplikátor k [-]	frekvence stroje [Hz]	multiplikátor k [-]
20	0,1600	34	0,4624	48	0,9216
22	0,1936	36	0,5184	50	1,0000
24	0,2304	38	0,5776	52	1,0816
26	0,2704	40	0,6400	54	1,1664
28	0,3136	42	0,7056	56	1,2544
30	0,3600	44	0,7744		
32	0,4096	46	0,8464		

Tab.: Velikosti amplitud budících sil v závislosti na frekvencích stroje pro **oba stojany generátoru** – velikost reakce rotoru: $R = 105,0$ kN

frekvence stroje [Hz]	amplituda F_0 [kN]	frekvence stroje [Hz]	amplituda F_0 [kN]	frekvence stroje [Hz]	amplituda F_0 [kN]
20	3,36	34	9,71	48	19,35
22	4,07	36	10,89	50	21,00
24	4,84	38	12,13	52	22,71
26	5,68	40	13,44	54	24,49
28	6,59	42	14,82	56	26,34
30	7,56	44	16,26		
32	8,60	46	17,77		

Tab.: Velikosti amplitud budících sil v závislosti na frekvencích stroje pro **stojan turbíny č. 1** – velikost reakce rotoru: $R = 170,5$ kN

frekvence stroje [Hz]	amplituda F_0 [kN]	frekvence stroje [Hz]	amplituda F_0 [kN]	frekvence stroje [Hz]	amplituda F_0 [kN]
20	5,46	34	15,77	48	31,43
22	6,60	36	17,68	50	34,10
24	7,86	38	19,70	52	36,88
26	9,22	40	21,82	54	39,77
28	10,69	42	24,06	56	42,78
30	12,28	44	26,41		
32	13,97	46	28,86		

Tab.: Velikosti amplitud budících sil v závislosti na frekvencích stroje pro stojan turbíny č. 2 – velikost reakce rotoru: $R = 133,2 \text{ kN}$

frekvence stroje [Hz]	amplituda F_0 [kN]	frekvence stroje [Hz]	amplituda F_0 [kN]	frekvence stroje [Hz]	amplituda F_0 [kN]
20	4,26	34	12,32	48	24,55
22	5,16	36	13,81	50	26,64
24	6,14	38	15,39	52	28,81
26	7,20	40	17,05	54	31,07
28	8,35	42	18,80	56	33,42
30	9,59	44	20,63		
32	10,91	46	22,55		

o **Vytvoření a přiřazení časových diagramů**

Závislost velikosti budící síly na čase je dána vztahem:

$$F(t) = F_0 \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

, kde je značena:

F_0 [kN] ... velikost amplitudy budících sil

ω [rad/s] ... budící kruhová frekvence

t [s] ... čas

Budící kruhová frekvence ω [rad/s] se vypočte z budící frekvence stroje f [Hz]:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$$

Každé budící frekvenci stroje od 20 Hz do 56 Hz náleží jiná velikost budící kruhové frekvence ω [rad/s] a jiná velikost amplitudy budící síly F_0 [kN]. Bylo vytvořeno celkem 19 časových diagramů pro frekvence stroje od 20 Hz do 56 Hz. Časový diagram popisuje závislost budící síly na čase a stačí ho zadat jako „Periodický“ pomocí budící kruhové frekvence ω [rad/s], ze které se automaticky spočte budící frekvence f [Hz], doba 1 periody T [s] a vytvoří se pro kontrolu graf. Tyto časové diagramy se přiřazují dynamickým zatěžovacím stavům podle budící frekvence stroje, pro kterou počítáme harmonickou rychlost kmitání.

Tab.: Budící kruhové frekvence ω pro frekvence stroje od 20 Hz do 56 Hz

<i>budící frekvence stroje f [Hz]</i>	<i>budící kruhová frekvence ω [rad/s]</i>	<i>budící frekvence stroje f [Hz]</i>	<i>budící kruhová frekvence ω [rad/s]</i>	<i>budící frekvence stroje f [Hz]</i>	<i>budící kruhová frekvence ω [rad/s]</i>
20	125,6637	34	213,6283	48	301,5929
22	138,2301	36	226,1947	50	314,1593
24	150,7964	38	238,7610	52	326,7256
26	163,3628	40	251,3274	54	339,2920
28	175,9292	42	263,8938	56	351,8584
30	188,4956	44	276,4602		
32	201,0619	46	289,0265		

4.4.3. Útlum soustavy

Útlum soustavy odpovídá 2% kritického útlumu. Tato hodnota vychází z dlouhodobých měření experimentální dynamiky na základech turbosoustrojí uložených na pružinových prvcích Gerb. Hodnota poměrného Lehrova útlumu D [-] je tedy:

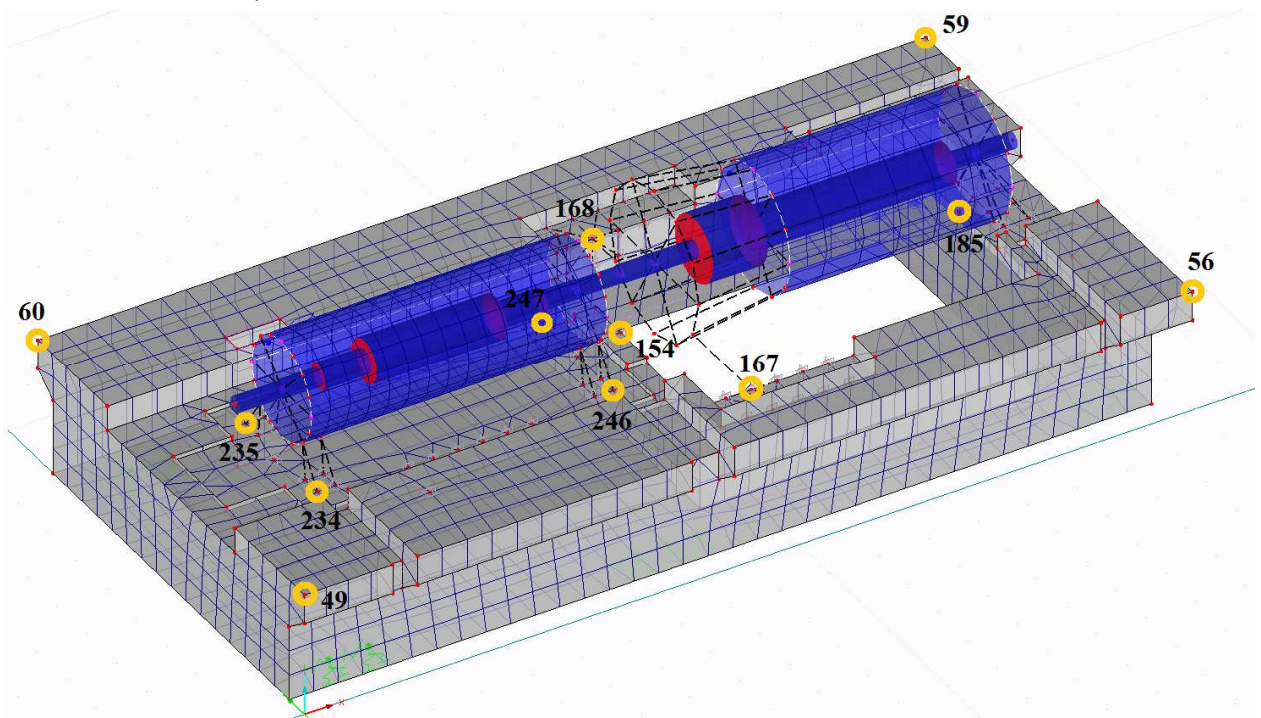
$$D = 0,02$$

4.4.4. Body odezvy

Je stanoveno celkem 12 bodů odezvy, na kterých budou vypočteny a vyhodnoceny hodnoty harmonické rychlosti kmitání. Jedná se o:

- 4 body v rozích desky
- 4 body v místech ložiskových podpor generátoru
- 4 body v místech ložiskových podpor turbíny

Obr.: 12 bodů odezvy – čísla uzlů



Protože je úloha symetrická, budou vyšetřeny rychlosti kmitání pouze v 7 následujících uzlech:

- 2 uzly v rozích desky č. 49 a 56
- 3 uzly v místech ložiskových podpor turbíny č. 154, 167 a 185
- 2 uzly v místech ložiskových podpor generátoru č. 234 a 246

4.4.5. Kombinace dynamických zatěžovacích stavů

Z dynamických zatěžovacích stavů **DZS 2 až DZS 10** Dynamické budící síly od rotorů jsou vytvořeny kombinace. Těchto 9 dynamických zatěžovacích stavů je popsáno v kapitole **4.2. Dynamické zatěžovací stavy**.

Byly vypočteny amplitudy rychlostí vibrací v 7 stanovených uzlech:

- ve vertikálním směru z budících sil ve vertikálním směru
- v horizontálním směru z budících sil v horizontálním směru
- v axiálním směru složené z výsledků budících sil v axiálním a vertikálním směru pomocí Pythagorovy věty:

$$v_x = \sqrt{(v_{axiál.})^2 + (v_{vertikál.})^2}$$

Budící síly v axiálním směru nemají vytvořenou žádnou kombinaci, protože jsou všechny 4 obsaženy současně v jediném dynamickém zatěžovacím stavu **DZS 2 - Dynamické budící síly od rotorů – axiálně**.

Pro buzení ve vertikálním a horizontálním směru bylo nutné uvažovat všechny možné fázové posuny budících sil, které mohou nastat. Takto bylo pro každý z obou směrů vytvořeno celkem 8 kombinací dynamických zatěžovacích stavů, které jsou uvedeny v následujících tabulkách. Znaménko “+“ znamená působení budící síly **ve směru** vertikální nebo horizontální osy a znaménko “-“ znamená působení budící síly **proti směru** vertikální nebo horizontální osy.

Kombinace pro vertikální směr obsahují 4 dynamické zatěžovací stavy **DZS 3, DZS 5, DZS 7 a DZS 9 – Dynamické budící síly od rotorů - vertikálně**.

Kombinace pro horizontální směr obsahují 4 dynamické zatěžovací stavy **DZS 4, DZS 6, DZS 8 a DZS 10 – Dynamické budící síly od rotorů - horizontálně**.

Tab.: Vytvořené kombinace dynamických zatěžovacích stavů pro vertikální směr

Označení kombinace	Dynamický zatěžovací stav a jeho znaménko		Dynamický zatěžovací stav a jeho znaménko		Dynamický zatěžovací stav a jeho znaménko		Dynamický zatěžovací stav a jeho znaménko	
	DZS	+	DZS	+	DZS	+	DZS	+
KDZS 1	DZS 3	+	DZS 5	+	DZS 7	+	DZS 9	+
KDZS 2	DZS 3	+	DZS 5	+	DZS 7	+	DZS 9	-
KDZS 3	DZS 3	+	DZS 5	+	DZS 7	-	DZS 9	+
KDZS 4	DZS 3	+	DZS 5	-	DZS 7	+	DZS 9	+
KDZS 5	DZS 3	-	DZS 5	+	DZS 7	+	DZS 9	+
KDZS 6	DZS 3	+	DZS 5	+	DZS 7	-	DZS 9	-
KDZS 7	DZS 3	+	DZS 5	-	DZS 7	-	DZS 9	+
KDZS 8	DZS 3	+	DZS 5	-	DZS 7	+	DZS 9	-

Tab.: Vytvořené kombinace dynamických zatěžovacích stavů pro horizontální směr

Označení kombinace	Dynamický zatěžovací stav a jeho znaménko		Dynamický zatěžovací stav a jeho znaménko		Dynamický zatěžovací stav a jeho znaménko		Dynamický zatěžovací stav a jeho znaménko	
	DZS 4	+	DZS 6	+	DZS 8	+	DZS 10	+
KDZS 9	DZS 4	+	DZS 6	+	DZS 8	+	DZS 10	+
KDZS 10	DZS 4	+	DZS 6	+	DZS 8	+	DZS 10	-
KDZS 11	DZS 4	+	DZS 6	+	DZS 8	-	DZS 10	+
KDZS 12	DZS 4	+	DZS 6	-	DZS 8	+	DZS 10	+
KDZS 13	DZS 4	-	DZS 6	+	DZS 8	+	DZS 10	+
KDZS 14	DZS 4	+	DZS 6	+	DZS 8	-	DZS 10	-
KDZS 15	DZS 4	+	DZS 6	-	DZS 8	-	DZS 10	+
KDZS 16	DZS 4	+	DZS 6	-	DZS 8	+	DZS 10	-

4.4.6. Nastavení přesnosti výpočtu

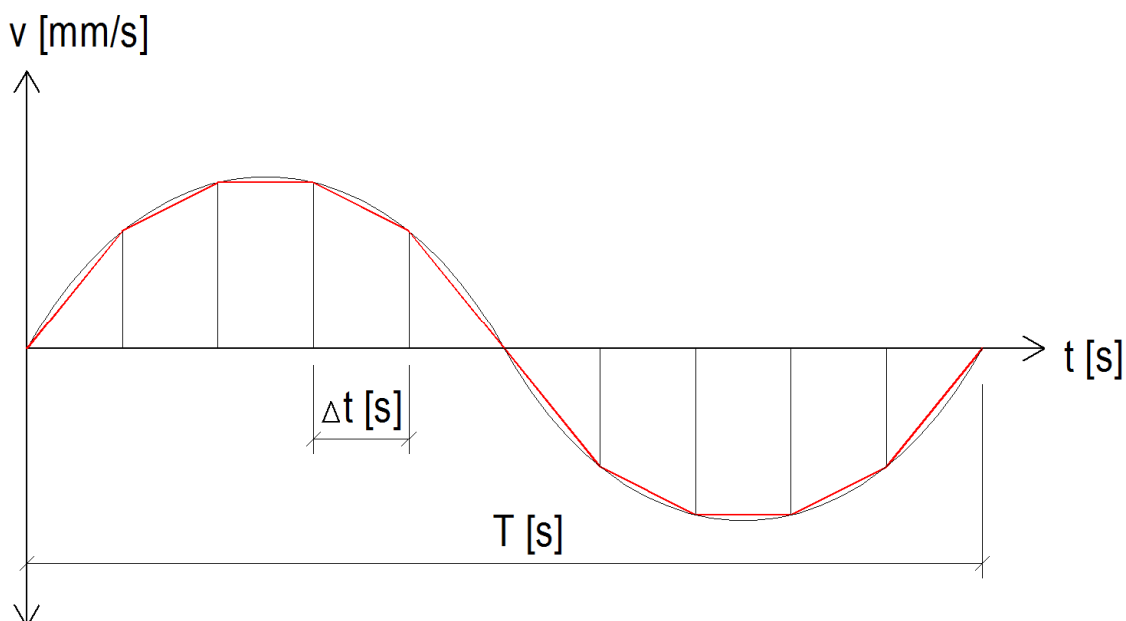
V časové analýze jsou ručně nastaveny parametry integrace. Každý výpočet byl proveden pro maximální čas odpovídající prvním 50 periodám:

$$t_{max} = 50 \cdot T = \frac{50}{f}$$

Přesnost výpočtu byla nastavena tak, že každá perioda byla rozdělena do 10 časových kroků:

$$\Delta t = \frac{T}{10} = \frac{1}{10 \cdot f}$$

Obr.: Ilustrativní znázornění rozdělení periody do 10 časových kroků - vypočtený průběh závislosti rychlosti kmitání na čase je znázorněn červeně



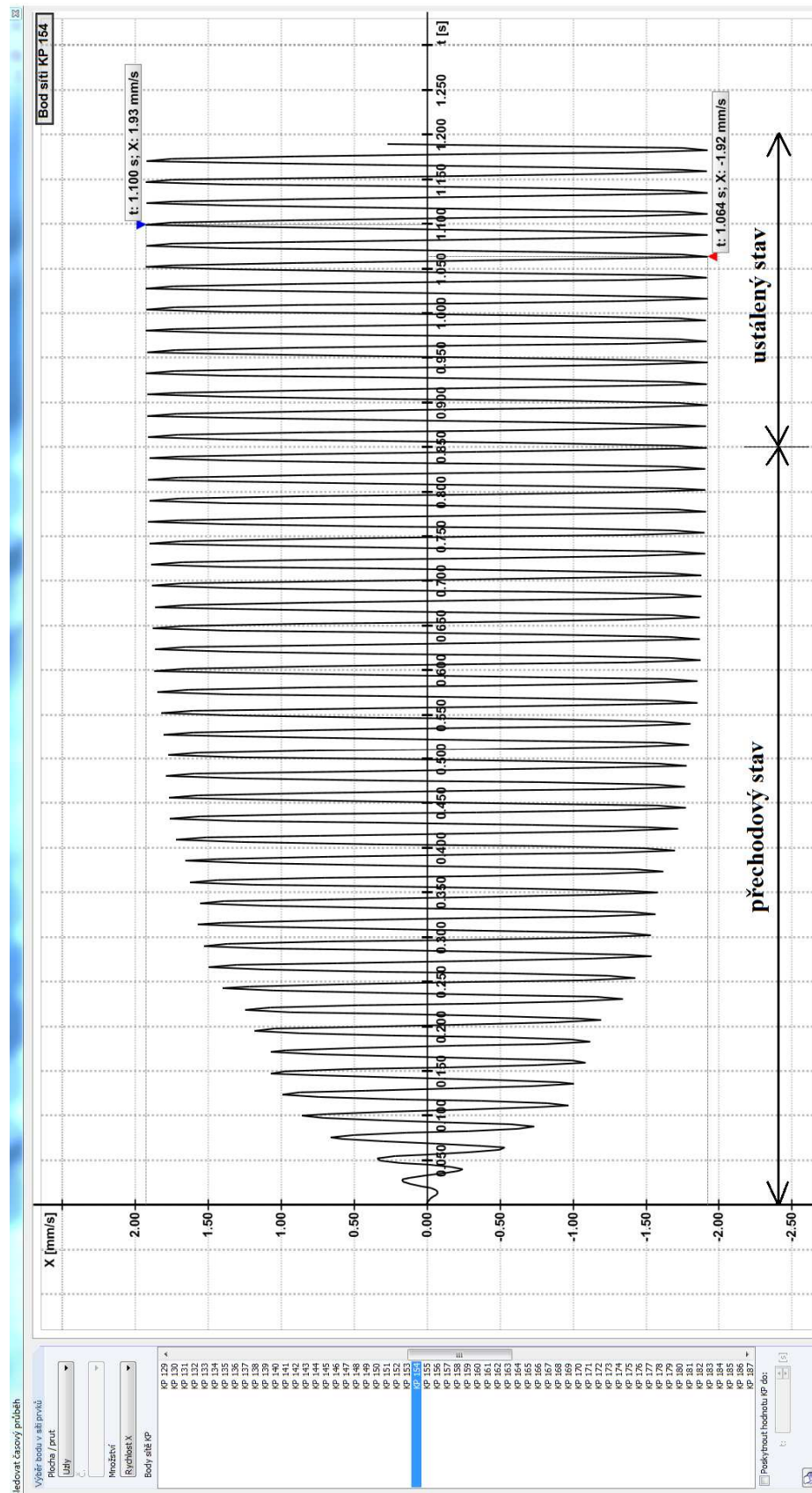
Tab.: Zadání časových kroků a maximálního času

<i>budící frekvence stroje</i> f [Hz]	<i>časový krok</i> Δt [s]	<i>maximální čas</i> t_{max} [s]
20	0,00500	2,50000
22	0,00455	2,27273
24	0,00417	2,08333
26	0,00385	1,92308
28	0,00357	1,78571
30	0,00333	1,66667
32	0,00313	1,56250
34	0,00294	1,47059
36	0,00278	1,38889
38	0,00263	1,31579
40	0,00250	1,25000
42	0,00238	1,19048
44	0,00227	1,13636
46	0,00217	1,08696
48	0,00208	1,04167
50	0,00200	1,00000
52	0,00192	0,96154
54	0,00185	0,92593
56	0,00179	0,89286

4.4.7. Vypočtené hodnoty amplitud rychlostí vibrací

Byly vypočteny závislosti rychlosti kmitání na čase a ze získaných grafů odečteny amplitudy rychlosti kmitání v ustáleném stavu. Pro názornost odečítání amplitudy v ustáleném stavu je vybrán uzel č. 154, axiální směr x , budící frekvence 42 Hz a kombinace dynamických zatěžovacích stavů č. 1 (+ + + +).

Obr.: Závislost rychlosti kmitání na čase – uzel č. 154, směr X, frekvence 42 Hz, KDZS 1



Na následujících stranách se nachází celkem 21 grafů závislostí rychlostí vibrací na budících frekvencích. Rychlosti vibrací jsou vypočteny v 7 stanovených bodech odezvy a každý bod je posuzován ve 3 směrech. V těchto grafech jsou vyneseny vždy nejvyšší hodnoty amplitud rychlostí vibrací pro 1 kombinaci s nejnepříznivějším fázovým posunem budících sil z 8 počítaných kombinací. Jedná se tedy o obálku výsledků z 8 kombinací. Dále jsou v grafech pro přehlednost znázorněny červenou čarou maximální přípustné rychlosti vibrací na hladinách 4 mm/s, 7 mm/s a 10 mm/s.

Všechny hodnoty amplitud rychlostí vibrací jsou v tabulkách uvedeny v [mm/s]. Nejvyšší hodnoty (z nejnepříznivějších kombinací) jsou vybarveny červeně.

Vypočtené hodnoty amplitud rychlostí vibrací – – směr axiální X

Hodnoty v tabulkách jsou uvedeny v [mm/s].

Frekvence 20 Hz

čísla uzlů	KDZS 1	KDZS 2	KDZS 3	KDZS 4	KDZS 5	KDZS 6	KDZS 7	KDZS 8	nejvyšší hodnota	buzení ve směru X	výsledná rychlost
	++++	+++-	++-+	+-++	-+++	++--	+-+ +	+--+ -			
49	0,20	0,54	0,50	0,07	0,38	0,17	0,73	0,32	0,73	0,03	0,73
56	0,13	0,36	0,33	0,05	0,24	0,11	0,46	0,22	0,46	0,04	0,46
154	0,10	0,29	0,26	0,05	0,20	0,07	0,39	0,16	0,39	0,03	0,39
167	0,02	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,03	0,05
185	0,15	0,40	0,35	0,11	0,25	0,12	0,52	0,24	0,52	0,03	0,52
234	0,11	0,33	0,30	0,04	0,22	0,08	0,44	0,20	0,44	0,03	0,44
246	0,09	0,28	0,25	0,04	0,19	0,06	0,38	0,16	0,38	0,03	0,38

Frekvence 22 Hz

čísla uzlů	KDZS 1	KDZS 2	KDZS 3	KDZS 4	KDZS 5	KDZS 6	KDZS 7	KDZS 8	nejvyšší hodnota	buzení ve směru X	výsledná rychlost
	++++	+++-	++-+	+-+-	-+++	++--	+-+ +	+ - - -			
49	0,18	0,46	0,46	0,10	0,31	0,19	0,60	0,32	0,60	0,04	0,60
56	0,13	0,29	0,28	0,08	0,20	0,13	0,35	0,21	0,35	0,05	0,35
154	0,09	0,24	0,22	0,05	0,16	0,08	0,31	0,15	0,31	0,04	0,31
167	0,03	0,04	0,05	0,06	0,04	0,04	0,05	0,06	0,06	0,04	0,07
185	0,16	0,36	0,35	0,14	0,24	0,15	0,44	0,26	0,44	0,03	0,44
234	0,10	0,28	0,27	0,06	0,18	0,09	0,35	0,19	0,35	0,04	0,35
246	0,09	0,23	0,22	0,06	0,15	0,07	0,30	0,16	0,30	0,04	0,30

Frekvence 24 Hz

čísla uzlů	KDZS 1	KDZS 2	KDZS 3	KDZS 4	KDZS 5	KDZS 6	KDZS 7	KDZS 8	nejvyšší hodnota	buzení ve směru X	výsledná rychlost
	++++	+++-	++-+	+-+-	-+++	++--	+-+ +	+ - - -			
49	0,19	0,44	0,46	0,21	0,31	0,26	0,58	0,40	0,58	0,04	0,58
56	0,12	0,22	0,22	0,15	0,16	0,14	0,27	0,21	0,27	0,05	0,27
154	0,09	0,23	0,21	0,08	0,15	0,09	0,30	0,15	0,30	0,04	0,30
167	0,03	0,04	0,05	0,08	0,06	0,06	0,07	0,06	0,08	0,04	0,09
185	0,18	0,35	0,35	0,20	0,24	0,19	0,44	0,28	0,44	0,04	0,44
234	0,10	0,27	0,25	0,09	0,17	0,10	0,34	0,20	0,34	0,04	0,34
246	0,09	0,23	0,21	0,08	0,14	0,08	0,29	0,16	0,29	0,04	0,29

Frekvence 26 Hz

čísla uzlů	KDZS 1	KDZS 2	KDZS 3	KDZS 4	KDZS 5	KDZS 6	KDZS 7	KDZS 8	nejvyšší hodnota	buzení ve směru X	výsledná rychlost
	++++	+++-	++-+	+-+-	-+++	++--	+-+ +	+ - - -			
49	0,15	0,40	0,44	0,31	0,27	0,24	0,56	0,34	0,56	0,05	0,56
56	0,14	0,21	0,21	0,19	0,18	0,16	0,25	0,19	0,25	0,07	0,26
154	0,08	0,20	0,18	0,12	0,13	0,09	0,29	0,13	0,29	0,05	0,29
167	0,04	0,08	0,05	0,10	0,07	0,08	0,12	0,06	0,12	0,05	0,13
185	0,18	0,38	0,33	0,29	0,25	0,24	0,48	0,28	0,48	0,05	0,48
234	0,09	0,24	0,22	0,12	0,15	0,11	0,33	0,17	0,33	0,05	0,33
246	0,07	0,21	0,18	0,12	0,12	0,09	0,29	0,14	0,29	0,05	0,29

Frekvence 28 Hz

čísla uzlů	KDZS 1	KDZS 2	KDZS 3	KDZS 4	KDZS 5	KDZS 6	KDZS 7	KDZS 8	nejvyšší hodnota	buzení ve směru X	výsledná rychlost
	++++	+++-	++-+	+-++	-+++	++--	+-+ +	+ - - -			
49	0,16	0,42	0,37	0,26	0,30	0,17	0,59	0,27	0,59	0,06	0,59
56	0,17	0,18	0,21	0,21	0,18	0,21	0,24	0,20	0,24	0,07	0,25
154	0,09	0,23	0,20	0,17	0,16	0,12	0,32	0,14	0,32	0,06	0,33
167	0,06	0,15	0,09	0,14	0,10	0,11	0,20	0,09	0,20	0,06	0,21
185	0,22	0,48	0,42	0,44	0,30	0,38	0,59	0,33	0,59	0,07	0,59
234	0,10	0,27	0,23	0,16	0,17	0,13	0,36	0,17	0,36	0,06	0,36
246	0,08	0,23	0,19	0,17	0,14	0,13	0,31	0,14	0,31	0,06	0,32

Frekvence 30 Hz

čísla uzlů	KDZS 1	KDZS 2	KDZS 3	KDZS 4	KDZS 5	KDZS 6	KDZS 7	KDZS 8	nejvyšší hodnota	buzení ve směru X	výsledná rychlost
	++++	+++-	++-+	+-++	-+++	++--	+-+ +	+ - - -			
49	0,19	0,42	0,40	0,23	0,33	0,16	0,55	0,29	0,55	0,06	0,55
56	0,20	0,27	0,21	0,32	0,25	0,29	0,33	0,22	0,33	0,09	0,34
154	0,12	0,26	0,24	0,26	0,17	0,20	0,34	0,17	0,34	0,08	0,35
167	0,08	0,13	0,14	0,20	0,09	0,17	0,16	0,14	0,20	0,07	0,21
185	0,34	0,64	0,51	0,69	0,37	0,61	0,73	0,45	0,73	0,10	0,74
234	0,12	0,30	0,27	0,24	0,20	0,18	0,38	0,20	0,38	0,07	0,39
246	0,12	0,25	0,23	0,26	0,16	0,20	0,33	0,17	0,33	0,07	0,34

Frekvence 32 Hz

čísla uzlů	KDZS 1	KDZS 2	KDZS 3	KDZS 4	KDZS 5	KDZS 6	KDZS 7	KDZS 8	nejvyšší hodnota	buzení ve směru X	výsledná rychlost
	++++	+++-	++-+	+-++	-+++	++--	+-+ +	+ - - -			
49	0,22	0,45	0,44	0,27	0,35	0,20	0,58	0,34	0,58	0,07	0,58
56	0,34	0,23	0,30	0,51	0,35	0,47	0,28	0,30	0,51	0,12	0,52
154	0,21	0,28	0,26	0,42	0,21	0,33	0,38	0,23	0,42	0,09	0,43
167	0,15	0,10	0,21	0,32	0,12	0,29	0,10	0,24	0,32	0,08	0,33
185	0,61	0,75	0,69	1,16	0,52	0,99	0,86	0,63	1,16	0,18	1,17
234	0,19	0,32	0,31	0,37	0,23	0,29	0,41	0,23	0,41	0,08	0,42
246	0,20	0,28	0,25	0,41	0,19	0,33	0,35	0,22	0,41	0,09	0,42

Frekvence 34 Hz

čísla uzlů	KDZS 1	KDZS 2	KDZS 3	KDZS 4	KDZS 5	KDZS 6	KDZS 7	KDZS 8	nejvyšší hodnota	buzení ve směru X	výsledná rychlost
	++++	+++-	++-+	+-++	-+++	++--	+-+ +	+ - - -			
49	0,30	0,50	0,50	0,36	0,39	0,34	0,61	0,39	0,61	0,10	0,62
56	0,65	0,21	0,49	1,17	0,55	1,04	0,31	0,59	1,17	0,23	1,19
154	0,38	0,35	0,40	0,83	0,32	0,70	0,43	0,37	0,83	0,17	0,85
167	0,35	0,08	0,33	0,73	0,27	0,64	0,11	0,42	0,73	0,15	0,75
185	1,12	0,93	1,10	2,41	0,89	2,07	1,06	1,11	2,41	0,40	2,44
234	0,32	0,38	0,43	0,69	0,32	0,59	0,46	0,39	0,69	0,15	0,71
246	0,38	0,32	0,38	0,81	0,30	0,70	0,41	0,36	0,81	0,17	0,83

Frekvence 36 Hz

čísla uzlů	KDZS 1	KDZS 2	KDZS 3	KDZS 4	KDZS 5	KDZS 6	KDZS 7	KDZS 8	nejvyšší hodnota	buzení ve směru X	výsledná rychlost
	++++	+++-	++-+	+-++	-+++	++--	+-+ +	+ - - -			
49	0,46	0,90	0,73	0,83	0,56	0,68	0,75	0,63	0,90	0,11	0,91
56	0,98	0,92	0,78	2,38	0,76	1,69	0,37	0,99	2,38	0,33	2,40
154	0,73	1,29	0,66	1,65	0,63	1,19	0,55	0,76	1,65	0,23	1,67
167	0,56	0,69	0,39	1,32	0,44	0,95	0,17	0,52	1,32	0,19	1,33
185	2,29	0,49	2,08	5,10	1,91	3,61	1,43	2,46	5,10	0,68	5,15
234	0,67	0,49	0,65	1,45	0,58	1,05	0,61	0,73	1,45	0,20	1,46
246	0,72	1,20	0,65	1,63	0,62	1,18	0,52	0,75	1,63	0,22	1,64

Frekvence 38 Hz

čísla uzlů	KDZS 1	KDZS 2	KDZS 3	KDZS 4	KDZS 5	KDZS 6	KDZS 7	KDZS 8	nejvyšší hodnota	buzení ve směru X	výsledná rychlost
	++++	+++-	++-+	+-++	-+++	++--	+-+ +	+ - - -			
49	0,76	0,88	1,07	0,97	0,85	0,98	0,97	0,98	1,07	0,06	1,07
56	0,88	0,40	0,91	1,66	0,73	1,48	0,48	1,05	1,66	0,15	1,67
154	0,83	0,64	0,94	1,25	0,80	1,20	0,68	0,97	1,25	0,10	1,25
167	0,50	0,13	0,27	0,82	0,42	0,74	0,16	0,36	0,82	0,09	0,82
185	2,73	2,04	3,00	4,10	2,50	3,81	1,93	3,20	4,10	0,37	4,12
234	0,82	0,73	1,02	1,19	0,80	1,16	0,75	1,04	1,19	0,09	1,19
246	0,82	0,64	0,94	1,25	0,78	1,19	0,65	0,98	1,25	0,10	1,25

Frekvence 40 Hz

čísla uzlů	KDZS 1	KDZS 2	KDZS 3	KDZS 4	KDZS 5	KDZS 6	KDZS 7	KDZS 8	nejvyšší hodnota	buzení ve směru X	výsledná rychlost
	++++	+++-	++-+	+-++	-+++	++--	+-+ +	+ - - -			
49	1,19	1,38	1,66	1,44	1,25	1,48	1,45	1,58	1,66	0,06	1,66
56	1,00	0,78	1,21	1,62	0,91	1,49	0,69	1,31	1,62	0,13	1,63
154	1,09	1,02	1,32	1,42	1,08	1,40	1,03	1,33	1,42	0,09	1,42
167	0,45	0,16	0,25	0,65	0,38	0,59	0,19	0,30	0,65	0,07	0,65
185	3,77	3,50	4,47	4,99	3,61	4,83	3,39	4,63	4,99	0,31	5,00
234	1,17	1,19	1,48	1,50	1,17	1,50	1,20	1,48	1,50	0,08	1,50
246	1,09	1,03	1,32	1,43	1,08	1,42	1,03	1,34	1,43	0,09	1,43

Frekvence 42 Hz

čísla uzlů	KDZS 1	KDZS 2	KDZS 3	KDZS 4	KDZS 5	KDZS 6	KDZS 7	KDZS 8	nejvyšší hodnota	buzení ve směru X	výsledná rychlost
	++++	+++-	++-+	+-++	-+++	++--	+-+ +	+ - - -			
49	2,43	2,60	3,10	2,95	2,42	2,94	2,58	3,12	3,12	0,06	3,12
56	1,75	1,78	2,19	2,21	1,70	2,16	1,73	2,24	2,24	0,11	2,24
154	1,93	2,03	2,43	2,37	1,92	2,35	2,01	2,46	2,46	0,08	2,46
167	0,44	0,43	0,49	0,52	0,43	0,51	0,43	0,48	0,52	0,07	0,52
185	7,18	7,46	8,91	8,78	7,04	8,64	7,31	9,06	9,06	0,29	9,06
234	2,22	2,34	2,80	2,71	2,19	2,68	2,31	2,83	2,83	0,07	2,83
246	1,98	2,07	2,48	2,42	1,94	2,38	2,04	2,50	2,50	0,08	2,50

Frekvence 44 Hz

čísla uzlů	KDZS 1	KDZS 2	KDZS 3	KDZS 4	KDZS 5	KDZS 6	KDZS 7	KDZS 8	nejvyšší hodnota	buzení ve směru X	výsledná rychlost
	++++	+++-	++-+	+-++	-+++	++--	+-+ +	+ - - -			
49	1,47	1,51	1,73	1,73	1,42	1,68	1,46	1,78	1,78	0,06	1,78
56	1,02	1,30	1,27	1,04	1,07	1,04	1,37	1,22	1,37	0,11	1,37
154	1,09	1,20	1,36	1,28	1,06	1,25	1,17	1,38	1,38	0,08	1,38
167	0,41	0,32	0,43	0,41	0,39	0,39	0,35	0,42	0,43	0,07	0,44
185	4,08	4,41	5,12	4,82	4,06	4,79	4,38	5,14	5,14	0,28	5,15
234	1,29	1,36	1,55	1,51	1,26	1,48	1,34	1,58	1,58	0,07	1,58
246	1,11	1,22	1,38	1,30	1,09	1,28	1,20	1,40	1,40	0,07	1,40

Frekvence 46 Hz

čísla uzlů	KDZS 1	KDZS 2	KDZS 3	KDZS 4	KDZS 5	KDZS 6	KDZS 7	KDZS 8	nejvyšší hodnota	buzení ve směru X	výsledná rychlost
	++++	+++ -	++ - +	+ - ++	- +++	++ - -	+ - - +	+ - - -			
49	1,06	0,97	1,04	1,20	1,01	1,13	0,93	1,09	1,20	0,06	1,20
56	0,80	0,98	0,94	0,78	0,88	0,79	1,07	0,86	1,07	0,11	1,08
154	0,74	0,79	0,87	0,89	0,73	0,84	0,77	0,89	0,89	0,08	0,89
167	0,47	0,33	0,50	0,39	0,47	0,38	0,35	0,51	0,51	0,07	0,51
185	2,72	2,90	3,32	3,27	2,69	3,22	2,89	3,33	3,33	0,27	3,34
234	0,91	0,87	0,95	1,03	0,91	1,00	0,86	0,96	1,03	0,07	1,03
246	0,77	0,79	0,88	0,90	0,77	0,86	0,80	0,90	0,90	0,08	0,90

Frekvence 48 Hz

čísla uzlů	KDZS 1	KDZS 2	KDZS 3	KDZS 4	KDZS 5	KDZS 6	KDZS 7	KDZS 8	nejvyšší hodnota	buzení ve směru X	výsledná rychlost
	++++	+++ -	++ - +	+ - ++	- +++	++ - -	+ - - +	+ - - -			
49	0,97	0,74	0,84	1,05	0,90	0,92	0,75	0,82	1,05	0,06	1,05
56	0,78	0,89	0,73	0,55	0,86	0,62	0,97	0,64	0,97	0,11	0,98
154	0,60	0,59	0,64	0,74	0,56	0,67	0,59	0,69	0,74	0,07	0,74
167	0,53	0,33	0,59	0,35	0,52	0,35	0,38	0,60	0,60	0,07	0,60
185	2,23	2,22	2,64	2,70	2,18	2,65	2,19	2,68	2,70	0,25	2,71
234	0,79	0,64	0,71	0,88	0,74	0,81	0,64	0,73	0,88	0,07	0,88
246	0,62	0,60	0,64	0,75	0,59	0,69	0,59	0,69	0,75	0,07	0,75

Frekvence 50 Hz

čísla uzlů	KDZS 1	KDZS 2	KDZS 3	KDZS 4	KDZS 5	KDZS 6	KDZS 7	KDZS 8	nejvyšší hodnota	buzení ve směru X	výsledná rychlost
	++++	+++ -	++ - +	+ - ++	- +++	++ - -	+ - - +	+ - - -			
49	0,90	0,69	0,83	0,90	0,85	0,79	0,74	0,80	0,90	0,07	0,90
56	0,71	0,72	0,67	0,47	0,77	0,50	0,77	0,64	0,77	0,11	0,78
154	0,53	0,52	0,58	0,63	0,51	0,58	0,51	0,59	0,63	0,07	0,63
167	0,71	0,41	0,73	0,35	0,69	0,34	0,44	0,73	0,73	0,08	0,73
185	1,95	1,89	2,17	2,31	1,90	2,26	1,89	2,22	2,31	0,24	2,32
234	0,72	0,54	0,63	0,74	0,68	0,68	0,58	0,59	0,74	0,07	0,74
246	0,56	0,52	0,57	0,63	0,54	0,59	0,52	0,57	0,63	0,07	0,63

Frekvence 52 Hz

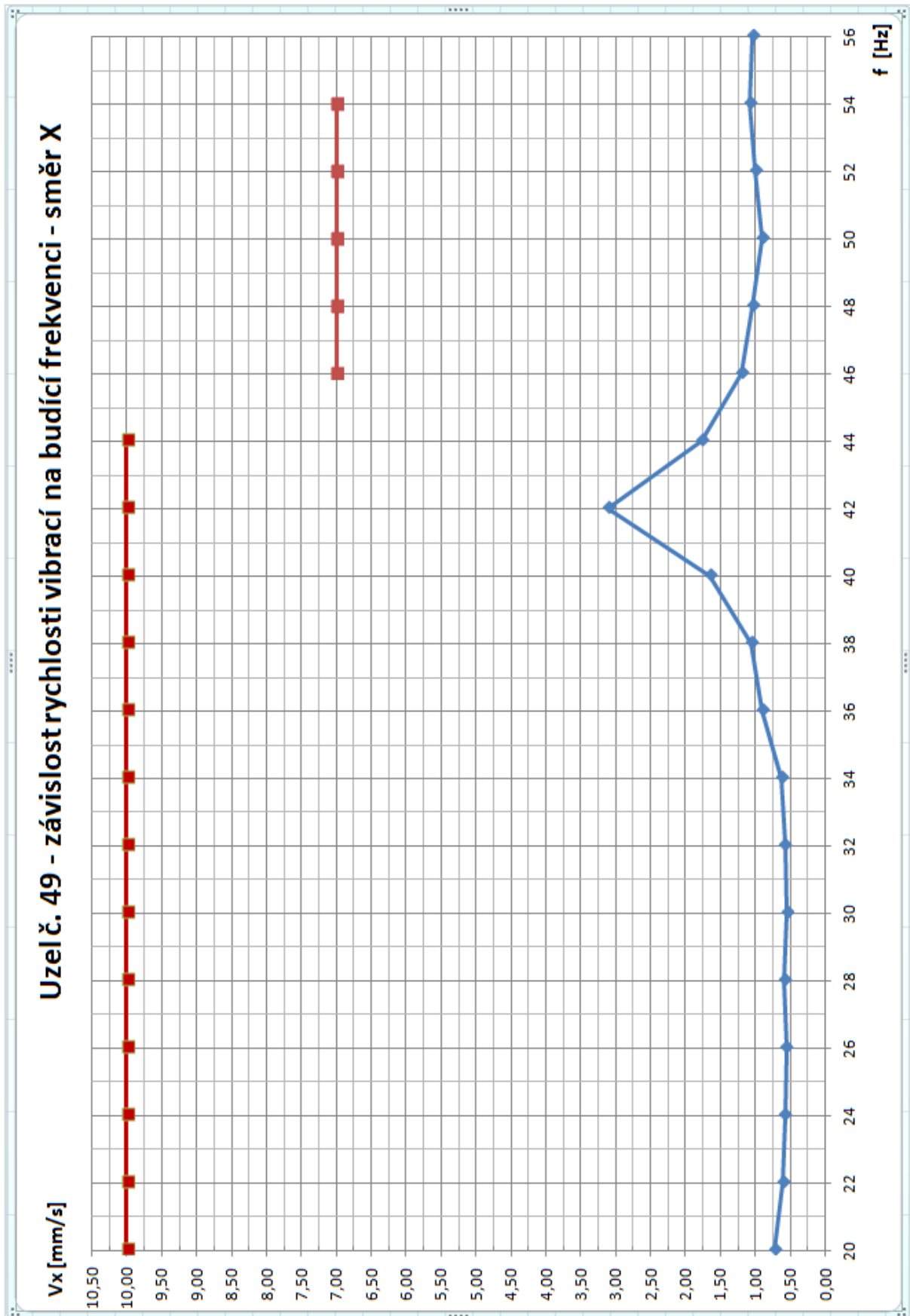
čísla uzlů	KDZS 1	KDZS 2	KDZS 3	KDZS 4	KDZS 5	KDZS 6	KDZS 7	KDZS 8	nejvyšší hodnota	buzení ve směru X	výsledná rychlost
	++++	+++-	++-+	+-++	-+++	++--	+-+ +	+-- -			
49	1,01	0,71	0,88	0,73	0,95	0,68	0,73	0,86	1,01	0,07	1,01
56	0,71	0,71	0,76	0,55	0,78	0,49	0,80	0,69	0,80	0,12	0,81
154	0,50	0,46	0,48	0,52	0,48	0,51	0,49	0,49	0,52	0,07	0,52
167	1,13	0,50	1,13	0,44	1,23	0,41	0,52	1,13	1,23	0,09	1,23
185	1,68	1,61	1,82	1,91	1,66	1,89	1,59	1,84	1,91	0,25	1,93
234	0,66	0,56	0,66	0,59	0,66	0,58	0,60	0,62	0,66	0,07	0,66
246	0,52	0,47	0,49	0,52	0,52	0,52	0,51	0,47	0,52	0,07	0,52

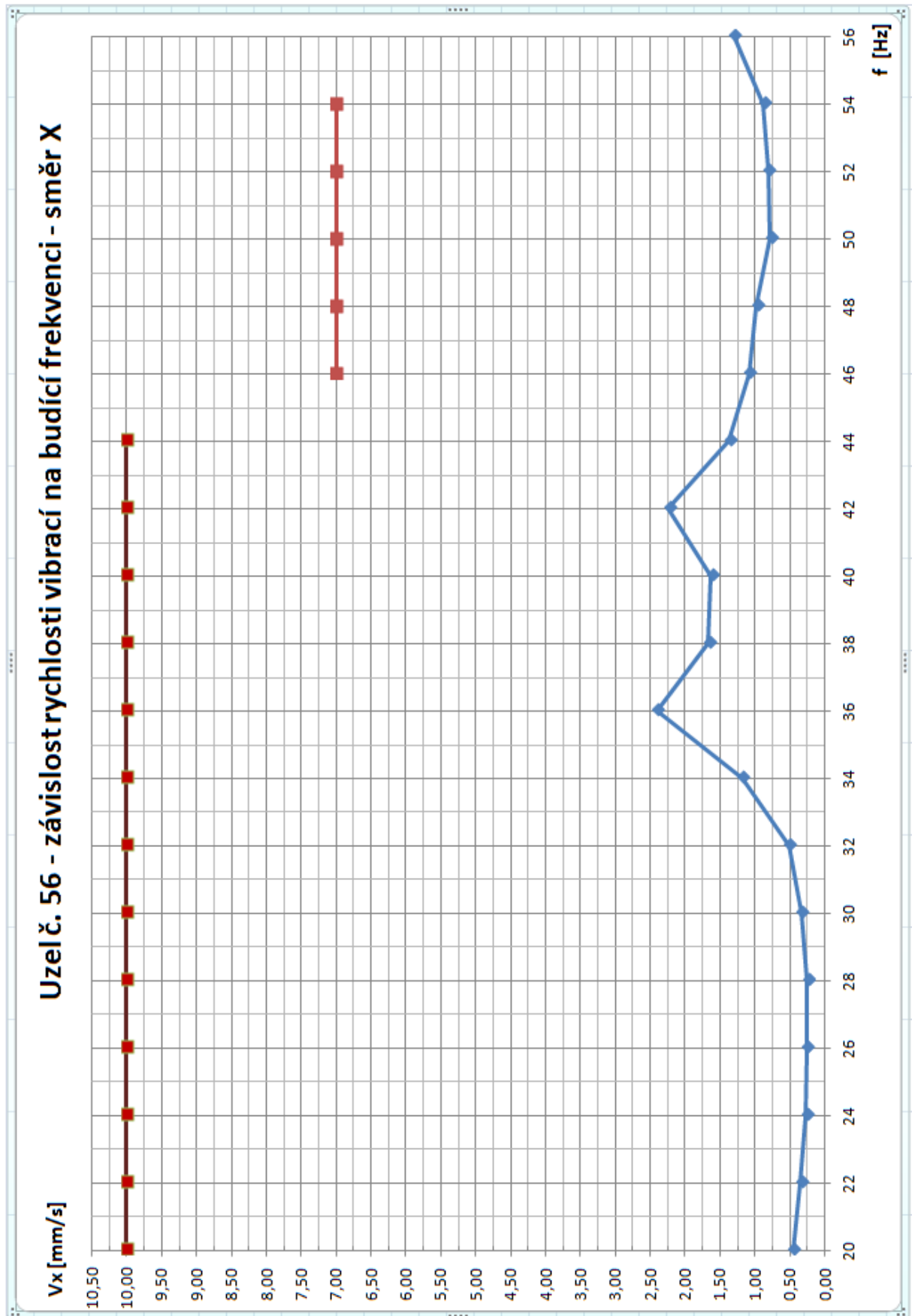
Frekvence 54 Hz

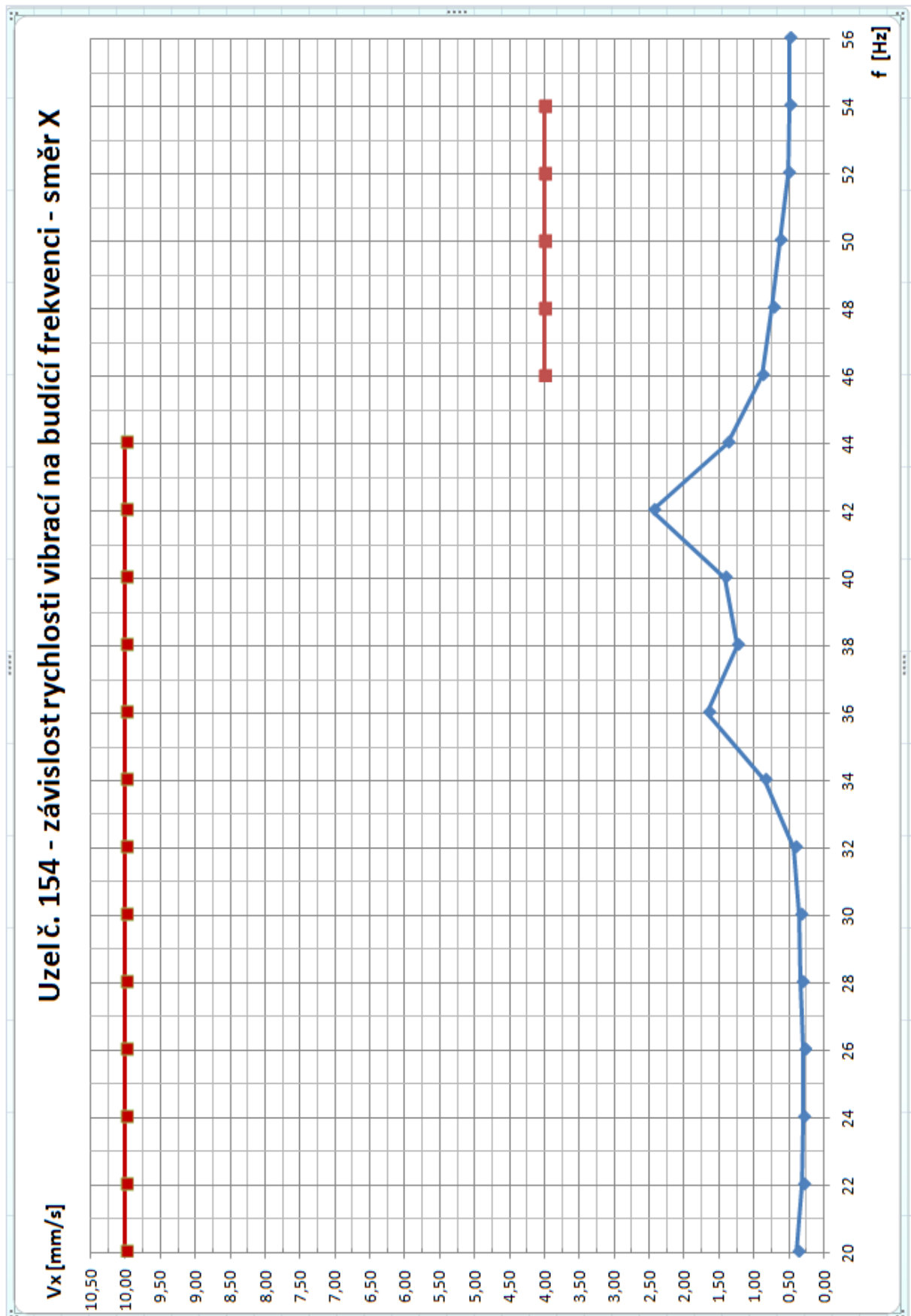
čísla uzlů	KDZS 1	KDZS 2	KDZS 3	KDZS 4	KDZS 5	KDZS 6	KDZS 7	KDZS 8	nejvyšší hodnota	buzení ve směru X	výsledná rychlost
	++++	+++-	++-+	+-++	-+++	++--	+-+ +	+-- -			
49	1,06	0,72	0,93	0,61	1,09	0,55	0,74	0,91	1,09	0,08	1,09
56	0,71	0,73	0,87	0,57	0,73	0,56	0,83	0,86	0,87	0,12	0,88
154	0,45	0,46	0,47	0,44	0,44	0,42	0,48	0,45	0,48	0,07	0,49
167	1,97	0,60	1,06	0,49	2,01	0,51	0,61	1,07	2,01	0,10	2,01
185	1,38	1,47	1,56	1,60	1,36	1,55	1,59	1,54	1,60	0,25	1,62
234	0,63	0,57	0,70	0,49	0,65	0,46	0,61	0,66	0,70	0,07	0,70
246	0,48	0,46	0,51	0,45	0,48	0,43	0,50	0,47	0,51	0,07	0,51

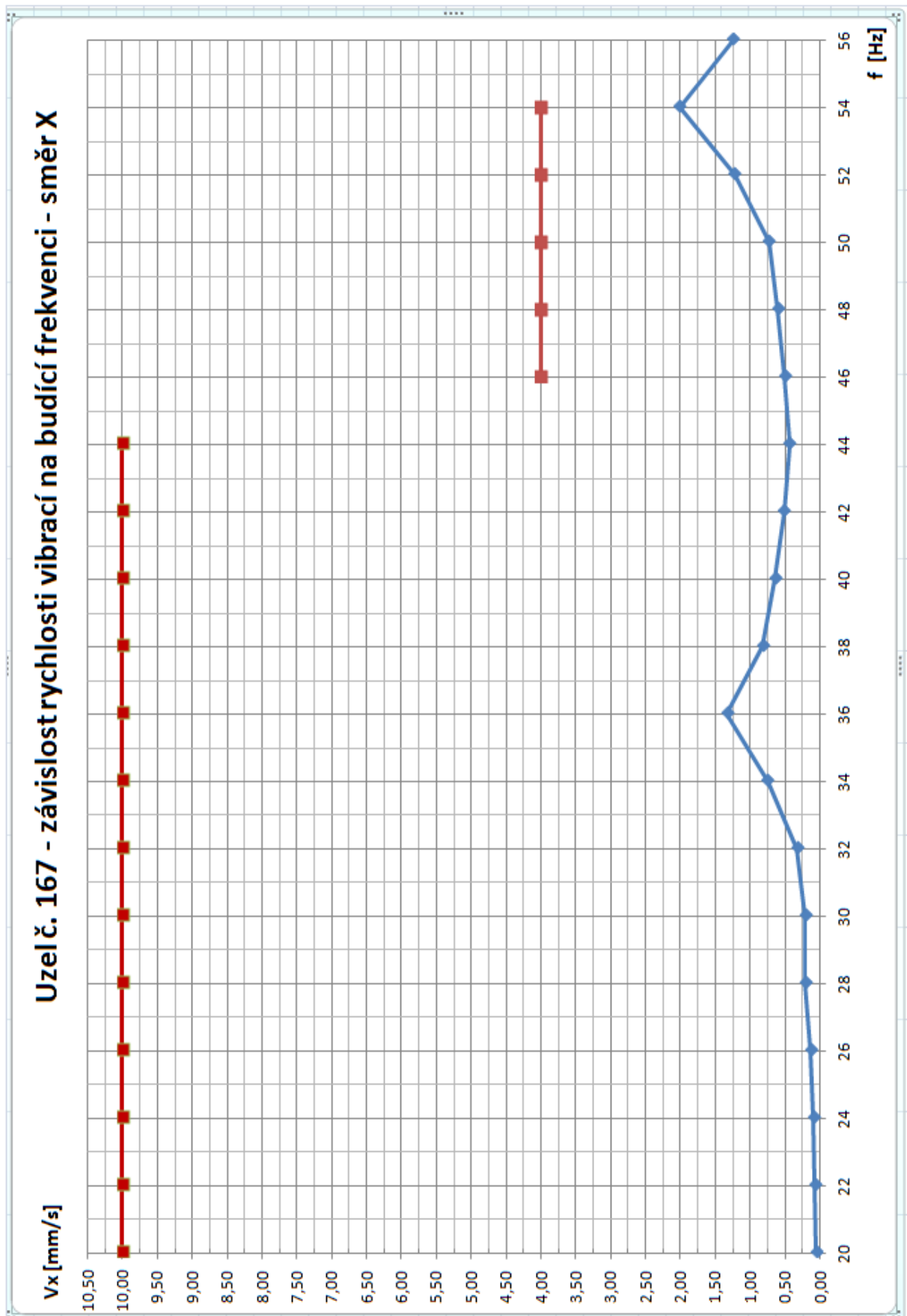
Frekvence 56 Hz

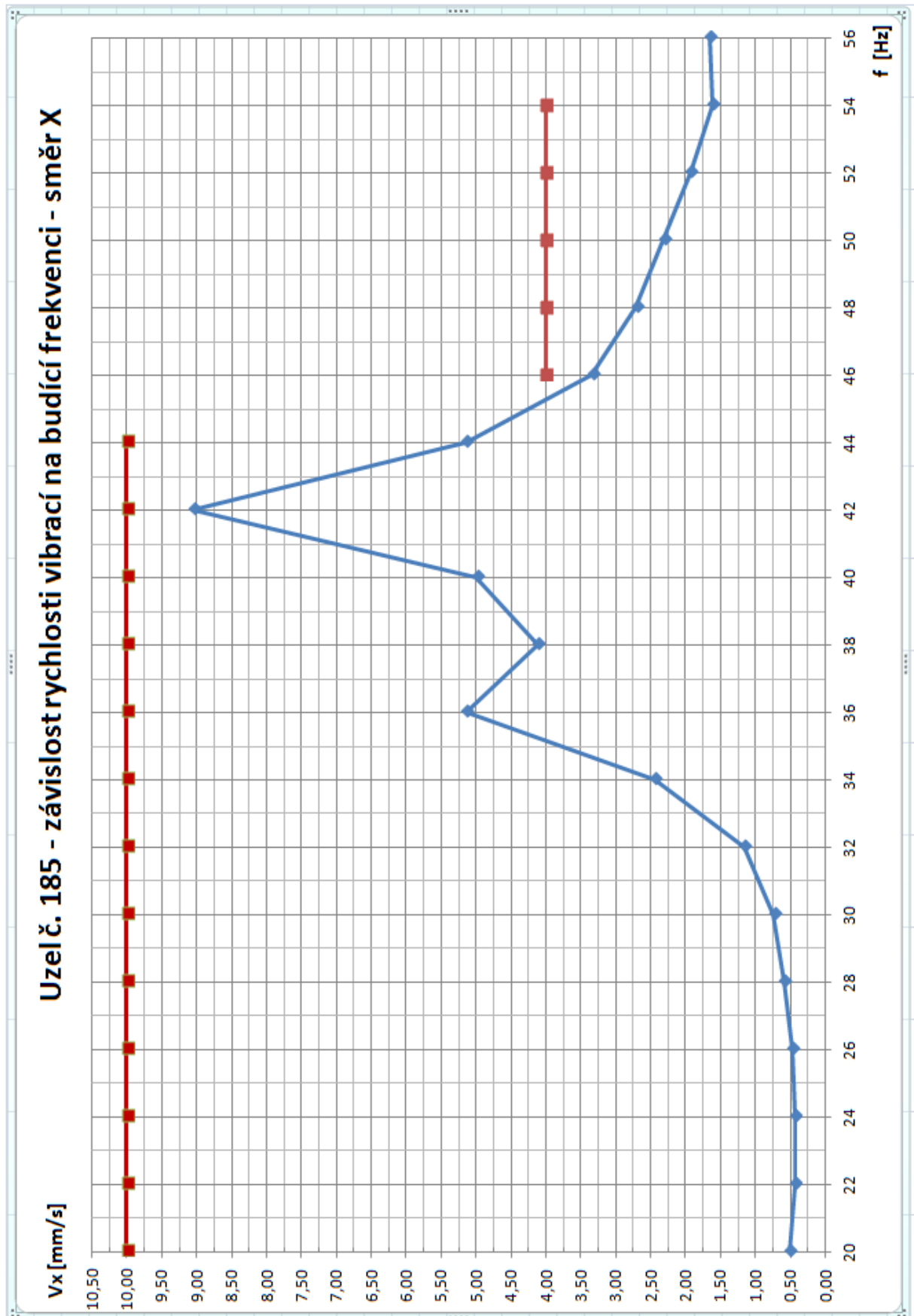
čísla uzlů	KDZS 1	KDZS 2	KDZS 3	KDZS 4	KDZS 5	KDZS 6	KDZS 7	KDZS 8	nejvyšší hodnota	buzení ve směru X	výsledná rychlost
	++++	+++-	++-+	+-++	-+++	++--	+-+ +	+-- -			
49	0,80	0,73	1,04	0,56	0,88	0,43	0,74	0,99	1,04	0,09	1,04
56	0,69	0,74	1,29	0,60	0,70	0,61	0,85	1,24	1,29	0,13	1,30
154	0,40	0,46	0,48	0,41	0,41	0,35	0,48	0,46	0,48	0,07	0,49
167	1,14	0,75	1,25	0,55	1,18	0,55	0,76	1,25	1,25	0,09	1,25
185	1,20	1,53	1,58	1,48	1,17	1,43	1,64	1,54	1,64	0,25	1,66
234	0,59	0,58	0,80	0,45	0,60	0,38	0,61	0,78	0,80	0,08	0,80
246	0,44	0,46	0,55	0,41	0,44	0,35	0,49	0,54	0,55	0,07	0,55

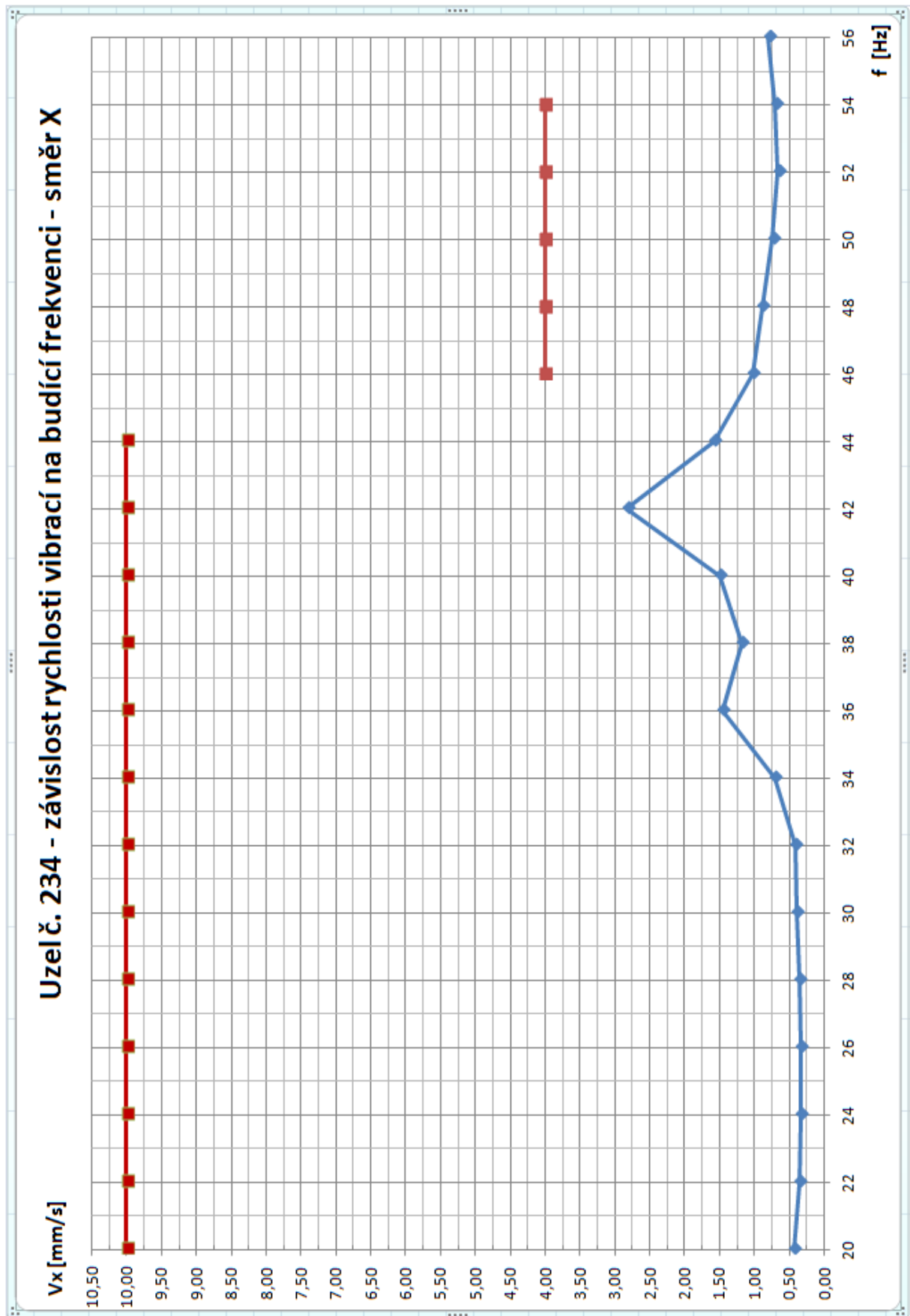


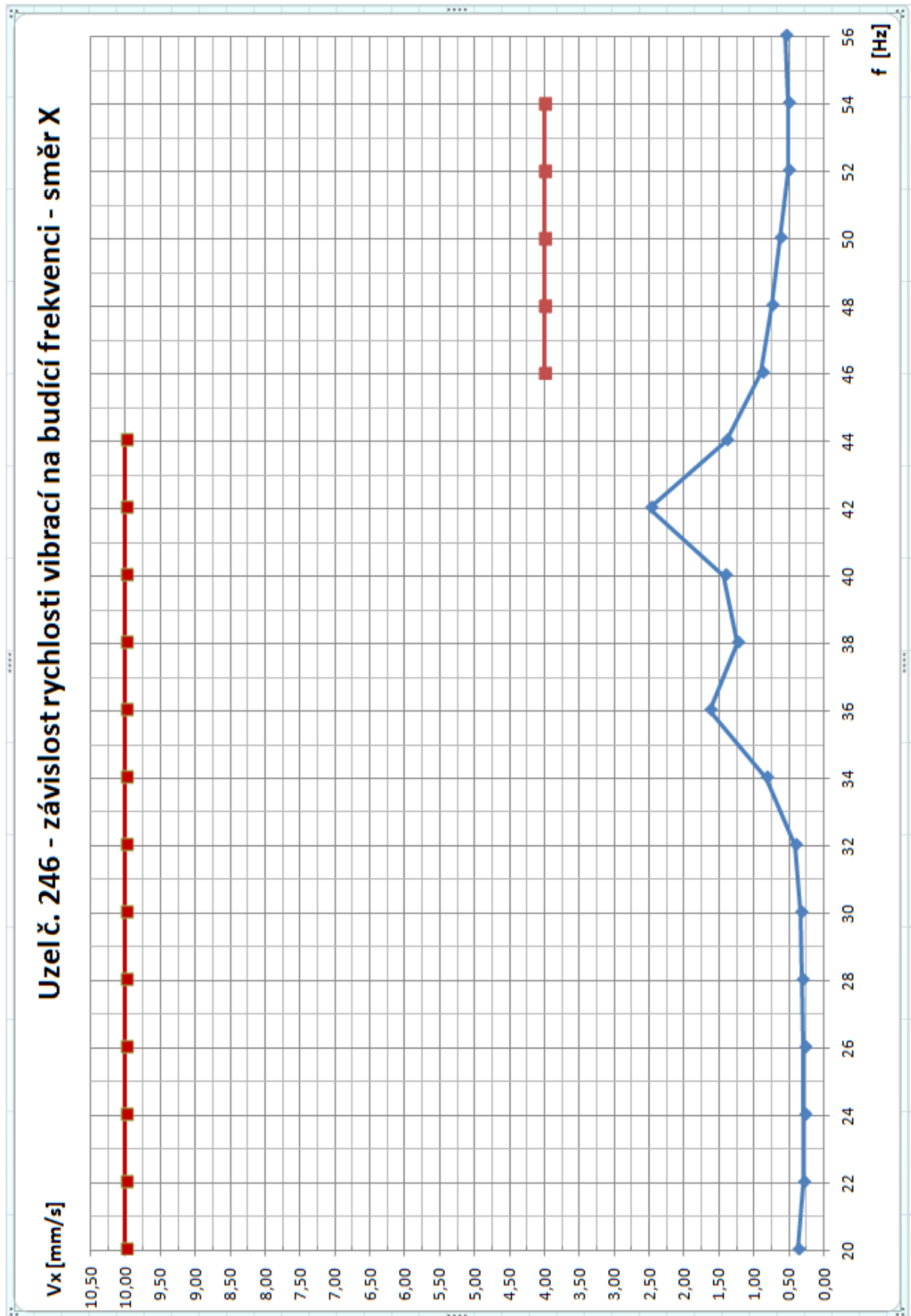












Vypočtené hodnoty amplitud rychlostí vibrací – – směr horizontální Y

Hodnoty v tabulkách jsou uvedeny v [mm/s].

Frekvence 20 Hz

čísla uzlů	KDZS 9	KDZS 10	KDZS 11	KDZS 12	KDZS 13	KDZS 14	KDZS 15	KDZS 16	nejvyšší hodnota
	++++	+++ -	++ - +	+ - ++	- +++	++ - -	+ - - +	+ - + -	
49	0,32	0,45	0,26	0,16	0,24	0,31	0,26	0,26	0,45
56	0,48	0,15	0,27	0,33	0,60	0,44	0,20	0,24	0,60
154	0,32	0,17	0,20	0,38	0,20	0,24	0,20	0,08	0,38
167	0,32	0,13	0,22	0,29	0,22	0,18	0,17	0,10	0,32
185	0,41	0,15	0,23	0,27	0,49	0,32	0,22	0,20	0,49
234	0,27	0,34	0,19	0,14	0,12	0,17	0,14	0,20	0,34
246	0,30	0,15	0,18	0,34	0,16	0,18	0,17	0,07	0,34

Frekvence 22 Hz

čísla uzlů	KDZS 9	KDZS 10	KDZS 11	KDZS 12	KDZS 13	KDZS 14	KDZS 15	KDZS 16	nejvyšší hodnota
	++++	+++ -	++ - +	+ - ++	- +++	++ - -	+ - - +	+ - + -	
49	0,52	0,57	0,36	0,45	0,61	0,76	0,34	0,28	0,76
56	0,55	0,29	0,32	0,38	0,68	0,54	0,33	0,24	0,68
154	0,43	0,26	0,20	0,54	0,23	0,35	0,39	0,08	0,54
167	0,40	0,20	0,27	0,41	0,24	0,26	0,29	0,09	0,41
185	0,49	0,29	0,22	0,31	0,55	0,26	0,35	0,20	0,55
234	0,40	0,38	0,20	0,28	0,29	0,37	0,16	0,23	0,40
246	0,40	0,23	0,18	0,47	0,20	0,28	0,33	0,08	0,47

Frekvence 24 Hz

čísla uzlů	KDZS 9	KDZS 10	KDZS 11	KDZS 12	KDZS 13	KDZS 14	KDZS 15	KDZS 16	nejvyšší hodnota
	++++	+++ -	++ - +	+ - ++	- +++	++ - -	+ - - +	+ - + -	
49	0,31	0,86	0,40	0,63	0,57	1,13	0,47	0,31	1,13
56	0,68	0,44	0,29	0,47	0,97	0,72	0,50	0,28	0,97
154	0,43	0,46	0,24	0,78	0,24	0,50	0,63	0,12	0,78
167	0,45	0,33	0,25	0,59	0,28	0,40	0,45	0,09	0,59
185	0,54	0,46	0,17	0,46	0,71	0,42	0,57	0,24	0,71
234	0,30	0,54	0,24	0,23	0,26	0,54	0,19	0,25	0,54
246	0,40	0,39	0,22	0,68	0,20	0,40	0,53	0,11	0,68

Frekvence 26 Hz

čísla uzlů	KDZS 9	KDZS 10	KDZS 11	KDZS 12	KDZS 13	KDZS 14	KDZS 15	KDZS 16	nejvyšší hodnota
	++++	+++ -	++ - +	+ - ++	- +++	++ - -	+ - - +	+ - + -	
49	0,34	1,02	0,29	0,93	0,34	1,15	0,77	0,33	1,15
56	0,71	0,67	0,35	0,66	0,92	0,73	0,95	0,32	0,95
154	0,48	0,79	0,26	1,33	0,25	0,97	0,13	0,22	1,33
167	0,45	0,57	0,26	0,91	0,28	0,66	0,79	0,13	0,91
185	0,57	0,79	0,20	0,73	0,73	0,61	1,04	0,26	1,04
234	0,32	0,57	0,17	0,28	0,14	0,49	0,30	0,27	0,57
246	0,44	0,65	0,23	1,15	0,21	0,81	0,96	0,20	1,15

Frekvence 28 Hz

čísla uzlů	KDZS 9	KDZS 10	KDZS 11	KDZS 12	KDZS 13	KDZS 14	KDZS 15	KDZS 16	nejvyšší hodnota
	++++	+++ -	++ - +	+ - ++	- +++	++ - -	+ - - +	+ - + -	
49	0,36	2,08	0,31	2,17	0,39	2,02	2,11	0,37	2,17
56	0,89	1,54	0,47	1,56	1,13	1,25	1,91	0,43	1,91
154	0,67	2,29	0,31	3,28	0,41	2,49	3,02	0,44	3,28
167	0,56	1,55	0,36	2,16	0,34	1,63	2,01	0,23	2,16
185	0,70	1,99	0,34	2,20	0,91	1,74	2,49	0,40	2,49
234	0,37	0,95	0,15	0,73	0,16	0,79	0,78	0,30	0,95
246	0,60	1,92	0,27	2,80	0,35	2,09	2,56	0,40	2,80

Frekvence 30 Hz

čísla uzlů	KDZS 9	KDZS 10	KDZS 11	KDZS 12	KDZS 13	KDZS 14	KDZS 15	KDZS 16	nejvyšší hodnota
	++++	+++ -	++ - +	+ - ++	- +++	++ - -	+ - - +	+ - + -	
49	0,49	1,40	0,34	1,96	0,48	1,39	1,91	0,62	1,96
56	1,14	1,08	0,66	2,24	1,31	2,09	1,26	0,62	2,24
154	0,56	2,45	0,33	2,78	0,68	2,16	2,94	0,37	2,94
167	0,49	1,47	0,35	1,82	0,54	1,43	1,77	0,35	1,82
185	0,89	1,62	0,38	2,69	0,92	2,31	2,02	0,50	2,69
234	0,42	0,58	0,17	0,80	0,19	0,52	0,63	0,42	0,80
246	0,51	2,13	0,28	2,36	0,57	1,83	2,50	0,30	2,50

Frekvence 32 Hz

čísla uzlů	KDZS 9	KDZS 10	KDZS 11	KDZS 12	KDZS 13	KDZS 14	KDZS 15	KDZS 16	nejvyšší hodnota
	++++	+++ -	++ - +	+ - ++	- +++	++ - -	+ - - +	+ - + -	
49	0,45	0,79	0,29	1,19	0,36	0,86	1,10	0,53	1,19
56	1,34	0,94	0,95	1,81	1,51	1,80	0,98	0,90	1,81
154	0,58	1,67	0,37	1,46	0,66	1,14	1,94	0,37	1,94
167	0,53	0,85	0,39	0,97	0,42	0,80	1,00	0,28	1,00
185	1,02	0,96	0,52	1,82	1,05	1,61	1,22	0,58	1,82
234	0,46	0,62	0,19	0,60	0,14	0,32	0,32	0,41	0,62
246	0,53	1,46	0,31	1,25	0,56	0,98	1,65	0,33	1,65

Frekvence 34 Hz

čísla uzlů	KDZS 9	KDZS 10	KDZS 11	KDZS 12	KDZS 13	KDZS 14	KDZS 15	KDZS 16	nejvyšší hodnota
	++++	+++ -	++ - +	+ - ++	- +++	++ - -	+ - - +	+ - + -	
49	0,51	0,79	0,26	1,06	0,32	0,76	0,77	0,65	1,06
56	1,57	1,19	1,34	1,94	1,74	2,07	1,23	1,26	2,07
154	0,78	1,44	0,62	1,37	0,85	1,12	1,55	0,57	1,55
167	0,56	0,68	0,44	0,81	0,47	0,68	0,72	0,33	0,81
185	1,18	0,85	0,76	1,80	1,18	1,74	0,92	0,84	1,80
234	0,50	0,65	0,23	0,58	0,22	0,32	0,30	0,55	0,65
246	0,70	1,29	0,53	1,17	0,72	0,95	1,32	0,51	1,32

Frekvence 36 Hz

čísla uzlů	KDZS 9	KDZS 10	KDZS 11	KDZS 12	KDZS 13	KDZS 14	KDZS 15	KDZS 16	nejvyšší hodnota
	++++	+++ -	++ - +	+ - ++	- +++	++ - -	+ - - +	+ - + -	
49	0,62	0,83	0,28	1,06	0,32	0,68	0,65	0,74	1,06
56	1,91	1,44	1,85	2,21	2,09	2,34	1,57	1,79	2,34
154	0,88	1,29	1,59	1,34	0,95	1,29	1,19	0,97	1,59
167	0,59	0,51	0,52	0,74	0,43	0,60	0,59	0,39	0,74
185	1,43	0,95	1,10	2,04	1,39	1,98	1,03	1,16	2,04
234	0,54	0,67	0,46	0,57	0,32	0,44	0,32	0,56	0,67
246	0,78	1,13	1,37	1,14	0,81	1,11	1,02	0,82	1,37

Frekvence 38 Hz

čísla uzlů	KDZS 9	KDZS 10	KDZS 11	KDZS 12	KDZS 13	KDZS 14	KDZS 15	KDZS 16	nejvyšší hodnota
	++++	+++ -	++ - +	+ - ++	- +++	++ - -	+ - - +	+ - + -	
49	0,71	0,92	0,41	1,02	0,33	0,67	0,67	0,81	1,02
56	2,54	2,55	2,86	2,58	2,78	2,82	2,76	2,64	2,86
154	0,56	0,98	0,89	1,42	0,54	1,36	1,02	0,85	1,42
167	0,63	0,42	0,59	0,69	0,44	0,57	0,51	0,50	0,69
185	1,79	1,56	1,83	2,12	1,89	2,12	1,70	1,73	2,12
234	0,59	0,74	0,41	0,59	0,29	0,47	0,37	0,63	0,74
246	0,53	0,90	0,77	1,21	0,46	1,18	0,88	0,70	1,21

Frekvence 40 Hz

čísla uzlů	KDZS 9	KDZS 10	KDZS 11	KDZS 12	KDZS 13	KDZS 14	KDZS 15	KDZS 16	nejvyšší hodnota
	++++	+++ -	++ - +	+ - ++	- +++	++ - -	+ - - +	+ - + -	
49	0,89	1,17	0,82	1,09	0,66	0,87	0,86	1,20	1,20
56	3,86	4,67	4,94	3,93	4,24	4,31	4,94	4,68	4,94
154	0,59	0,85	0,69	1,18	0,44	1,19	0,86	0,64	1,19
167	0,66	0,40	0,74	0,60	0,47	0,54	0,59	0,60	0,74
185	2,70	3,06	3,27	2,99	2,88	3,13	3,20	3,15	3,27
234	0,67	0,96	0,53	0,58	0,45	0,57	0,60	0,86	0,96
246	0,55	0,81	0,60	1,01	0,38	1,03	0,73	0,52	1,03

Frekvence 42 Hz

čísla uzlů	KDZS 9	KDZS 10	KDZS 11	KDZS 12	KDZS 13	KDZS 14	KDZS 15	KDZS 16	nejvyšší hodnota
	++++	+++ -	++ - +	+ - ++	- +++	++ - -	+ - - +	+ - + -	
49	1,01	1,33	1,32	1,12	1,13	1,21	1,40	1,41	1,41
56	5,63	7,72	8,12	5,72	6,07	6,16	8,04	7,80	8,12
154	0,61	0,88	0,66	1,07	0,39	1,00	0,78	0,48	1,07
167	0,69	0,50	0,77	0,60	0,50	0,53	0,68	0,65	0,77
185	3,64	4,82	5,13	3,83	3,88	4,06	4,99	4,96	5,13
234	0,80	1,10	1,06	0,80	0,85	0,95	0,98	1,10	1,10
246	0,57	0,83	0,58	0,93	0,32	0,87	0,69	0,38	0,93

Frekvence 44 Hz

čísla uzlů	KDZS 9	KDZS 10	KDZS 11	KDZS 12	KDZS 13	KDZS 14	KDZS 15	KDZS 16	nejvyšší hodnota
	++++	+++ -	++ - +	+ - ++	- +++	++ - -	+ - - +	+ - + -	
49	0,66	1,12	1,31	0,75	1,10	1,22	1,38	0,97	1,38
56	4,65	7,28	7,41	4,61	4,96	4,91	7,46	7,23	7,46
154	0,63	0,89	0,69	1,02	0,41	0,88	0,80	0,41	1,02
167	0,72	0,48	0,98	0,62	0,53	0,50	0,75	0,77	0,98
185	2,80	4,69	4,64	2,62	3,04	2,86	4,87	4,46	4,87
234	0,55	0,77	1,02	0,59	0,82	0,96	0,96	0,77	1,02
246	0,59	0,84	0,60	0,88	0,34	0,75	0,69	0,31	0,88

Frekvence 46 Hz

čísla uzlů	KDZS 9	KDZS 10	KDZS 11	KDZS 12	KDZS 13	KDZS 14	KDZS 15	KDZS 16	nejvyšší hodnota
	++++	+++ -	++ - +	+ - ++	- +++	++ - -	+ - - +	+ - + -	
49	0,57	0,98	1,03	0,63	0,78	1,02	1,01	0,72	1,03
56	3,12	4,90	5,07	3,09	3,24	3,21	5,00	4,98	5,07
154	0,65	0,91	0,71	1,08	0,43	0,92	0,81	0,35	1,08
167	0,83	0,59	1,18	0,63	0,58	0,54	0,83	0,95	1,18
185	1,94	3,16	3,13	1,82	2,03	1,90	3,27	3,04	3,27
234	0,53	0,78	0,76	0,47	0,60	0,75	0,66	0,54	0,78
246	0,61	0,85	0,62	0,93	0,35	0,79	0,69	0,30	0,93

Frekvence 48 Hz

čísla uzlů	KDZS 9	KDZS 10	KDZS 11	KDZS 12	KDZS 13	KDZS 14	KDZS 15	KDZS 16	nejvyšší hodnota
	++++	+++ -	++ - +	+ - ++	- +++	++ - -	+ - - +	+ - + -	
49	0,59	1,08	0,86	0,65	0,62	1,12	0,95	0,68	1,12
56	2,49	3,93	4,00	2,47	2,54	2,50	3,88	4,11	4,11
154	0,67	0,91	0,69	1,14	0,44	0,96	0,78	0,37	1,14
167	0,89	0,72	1,38	0,66	0,61	0,57	0,92	1,09	1,38
185	1,54	2,67	2,51	1,43	1,65	1,57	2,73	2,47	2,73
234	0,55	0,80	0,59	0,44	0,43	0,78	0,54	0,53	0,80
246	0,63	0,86	0,60	0,97	0,36	0,82	0,68	0,33	0,97

Frekvence 50 Hz

čísla uzlů	KDZS 9	KDZS 10	KDZS 11	KDZS 12	KDZS 13	KDZS 14	KDZS 15	KDZS 16	nejvyšší hodnota
	++++	+++ -	++ - +	+ - ++	- +++	++ - -	+ - - +	+ - + -	
49	0,61	1,22	0,97	0,77	0,68	1,19	1,09	0,67	1,22
56	2,18	3,46	3,45	2,25	2,32	2,22	3,24	3,63	3,63
154	0,69	0,91	0,64	1,18	0,46	0,99	0,82	0,40	1,18
167	0,99	0,92	1,67	0,76	0,65	0,59	1,29	1,32	1,67
185	1,37	2,37	2,14	1,32	1,48	1,48	2,33	2,18	2,37
234	0,56	0,82	0,60	0,45	0,44	0,81	0,57	0,52	0,82
246	0,65	0,86	0,54	1,01	0,38	0,85	0,68	0,36	1,01

Frekvence 52 Hz

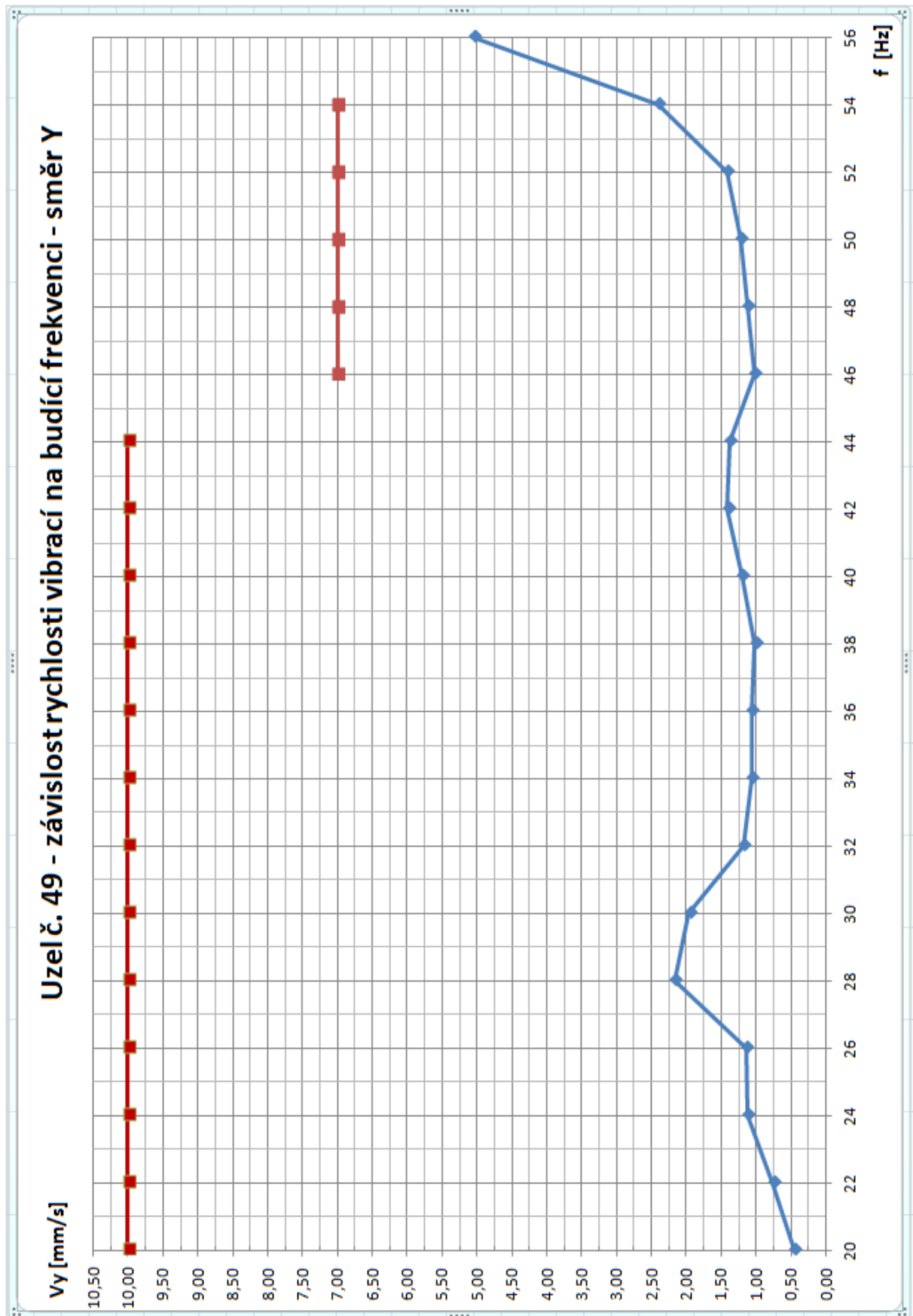
čísla uzlů	KDZS 9	KDZS 10	KDZS 11	KDZS 12	KDZS 13	KDZS 14	KDZS 15	KDZS 16	nejvyšší hodnota
	++++	+++ -	++ - +	+ - ++	- +++	++ - -	+ - - +	+ - + -	
49	0,64	1,35	1,13	0,92	0,76	1,25	1,42	0,64	1,42
56	2,04	3,09	3,20	1,96	2,28	2,20	3,05	3,40	3,40
154	0,71	1,06	0,65	1,23	0,48	1,02	1,06	0,43	1,23
167	1,08	1,45	2,18	1,02	0,72	0,61	2,13	1,54	2,18
185	1,26	1,87	1,83	1,23	1,40	1,42	1,87	1,82	1,87
234	0,58	0,84	0,61	0,48	0,45	0,82	0,61	0,52	0,84
246	0,67	0,97	0,56	1,04	0,39	0,87	0,84	0,38	1,04

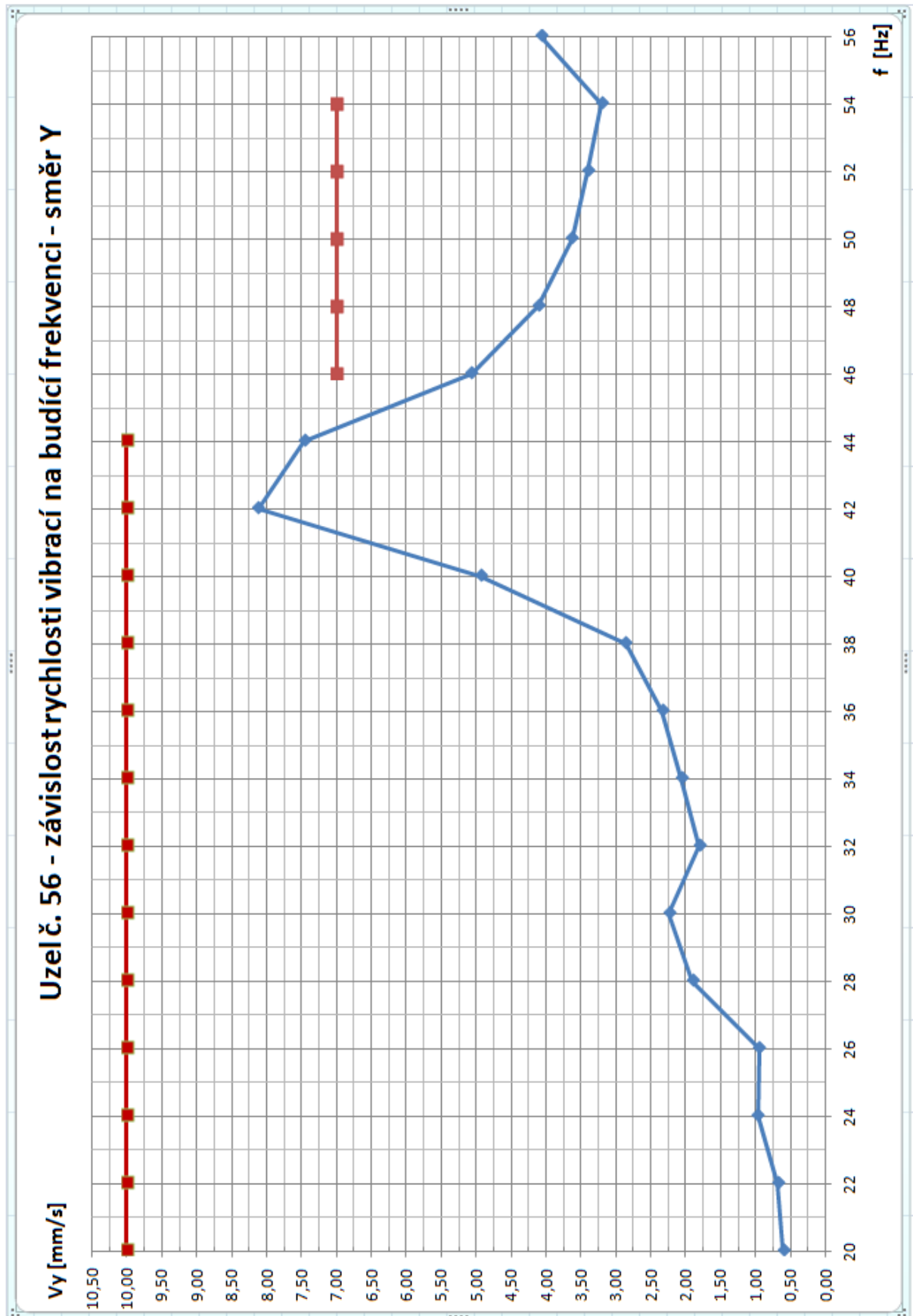
Frekvence 54 Hz

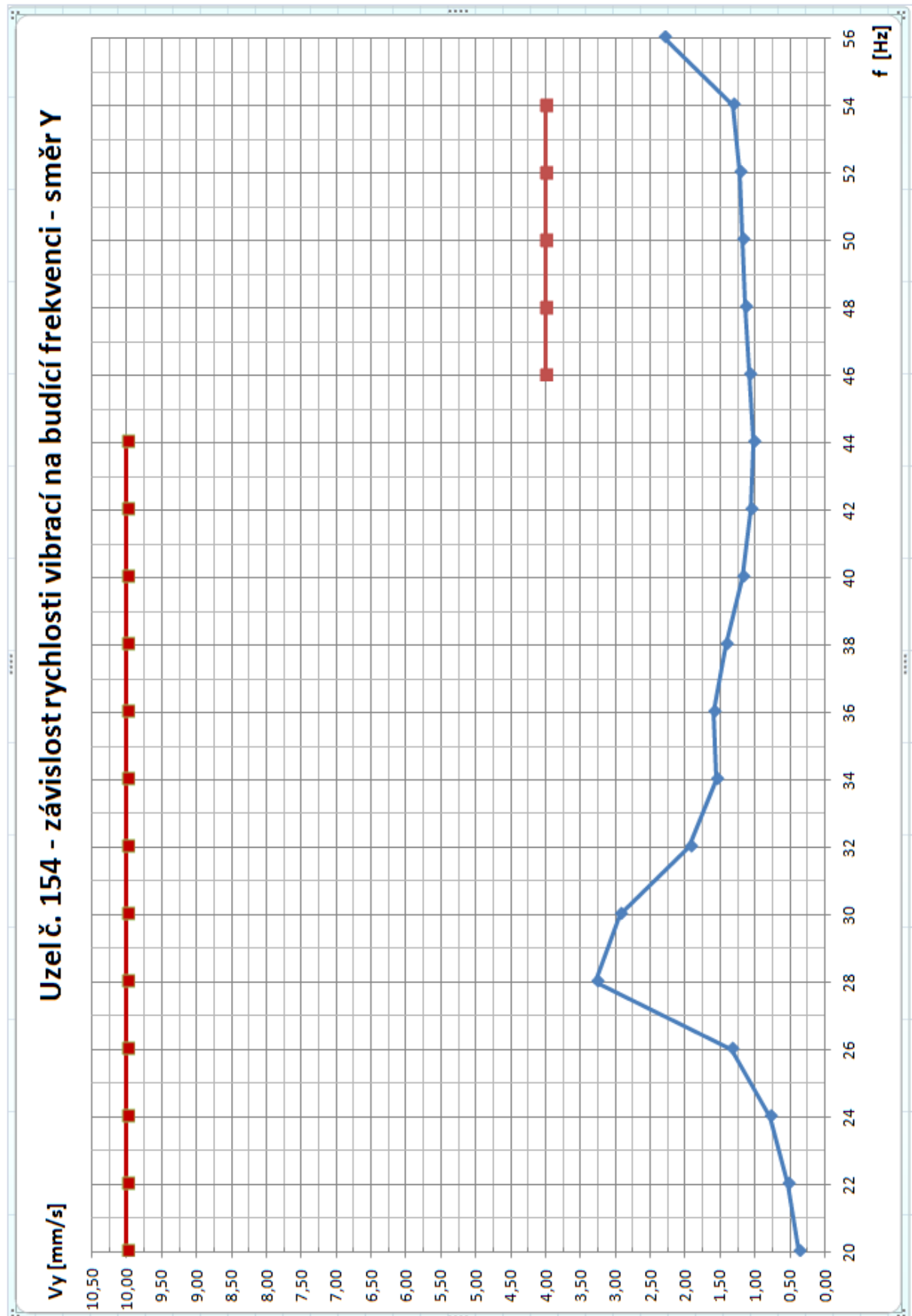
čísla uzlů	KDZS 9	KDZS 10	KDZS 11	KDZS 12	KDZS 13	KDZS 14	KDZS 15	KDZS 16	nejvyšší hodnota
	++++	+++ -	++ - +	+ - ++	- +++	++ - -	+ - - +	+ - + -	
49	0,66	1,87	1,25	1,42	0,85	1,23	2,41	0,65	2,41
56	1,93	2,98	3,02	1,90	2,21	2,09	3,03	3,21	3,21
154	0,73	1,19	0,77	1,26	0,54	1,05	1,31	0,46	1,31
167	1,12	2,10	2,88	1,33	0,83	0,67	3,22	1,93	3,22
185	1,20	1,89	1,82	1,10	1,35	1,31	1,95	1,75	1,95
234	0,60	1,09	0,64	0,56	0,45	0,79	0,96	0,54	1,09
246	0,69	1,07	0,61	1,07	0,43	0,89	1,06	0,40	1,07

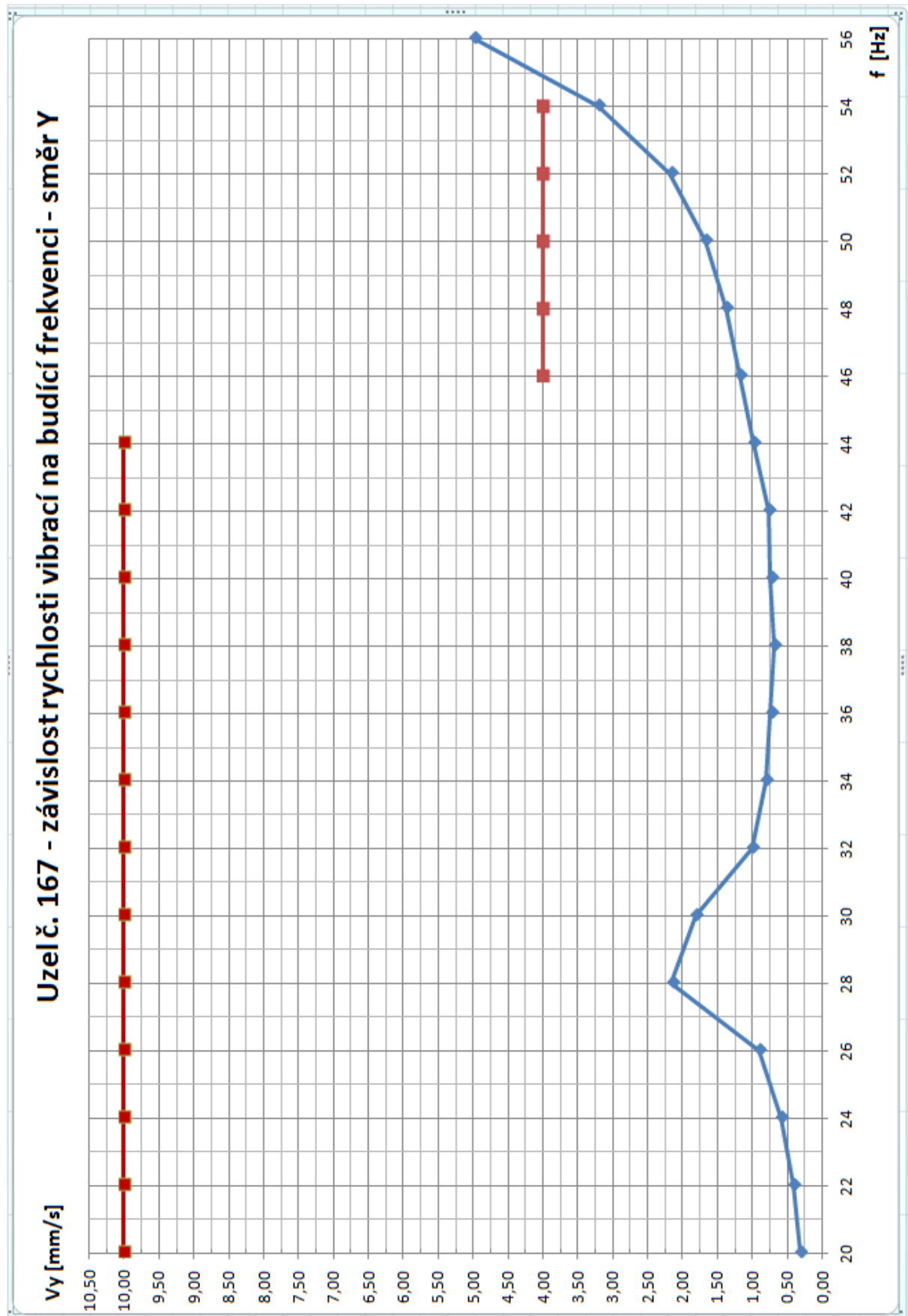
Frekvence 56 Hz

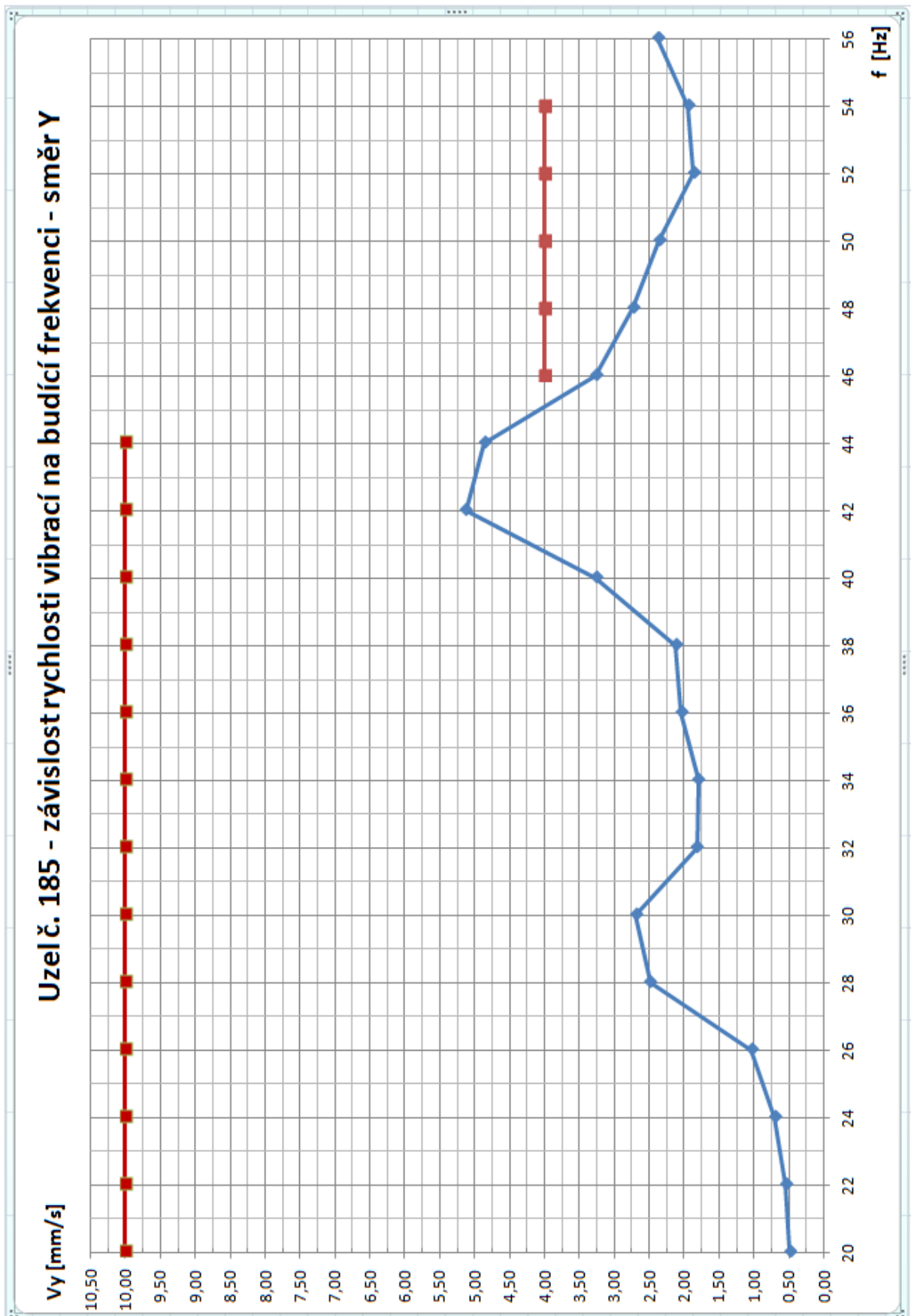
čísla uzlů	KDZS 9	KDZS 10	KDZS 11	KDZS 12	KDZS 13	KDZS 14	KDZS 15	KDZS 16	nejvyšší hodnota
	++++	+++ -	++ - +	+ - ++	- +++	++ - -	+ - - +	+ - + -	
49	0,68	3,35	3,01	1,93	1,35	1,23	5,06	1,00	5,06
56	1,86	3,04	3,06	1,91	2,09	1,98	4,08	2,99	4,08
154	0,76	1,61	1,25	1,30	0,67	1,07	2,30	0,57	2,30
167	1,17	3,11	3,43	1,69	1,11	0,91	4,98	2,49	4,98
185	1,13	1,95	1,95	1,20	1,28	1,19	2,38	1,87	2,38
234	0,62	1,56	1,25	0,73	0,62	0,74	1,97	0,60	1,97
246	0,72	1,31	0,91	1,10	0,53	0,91	1,68	0,47	1,68

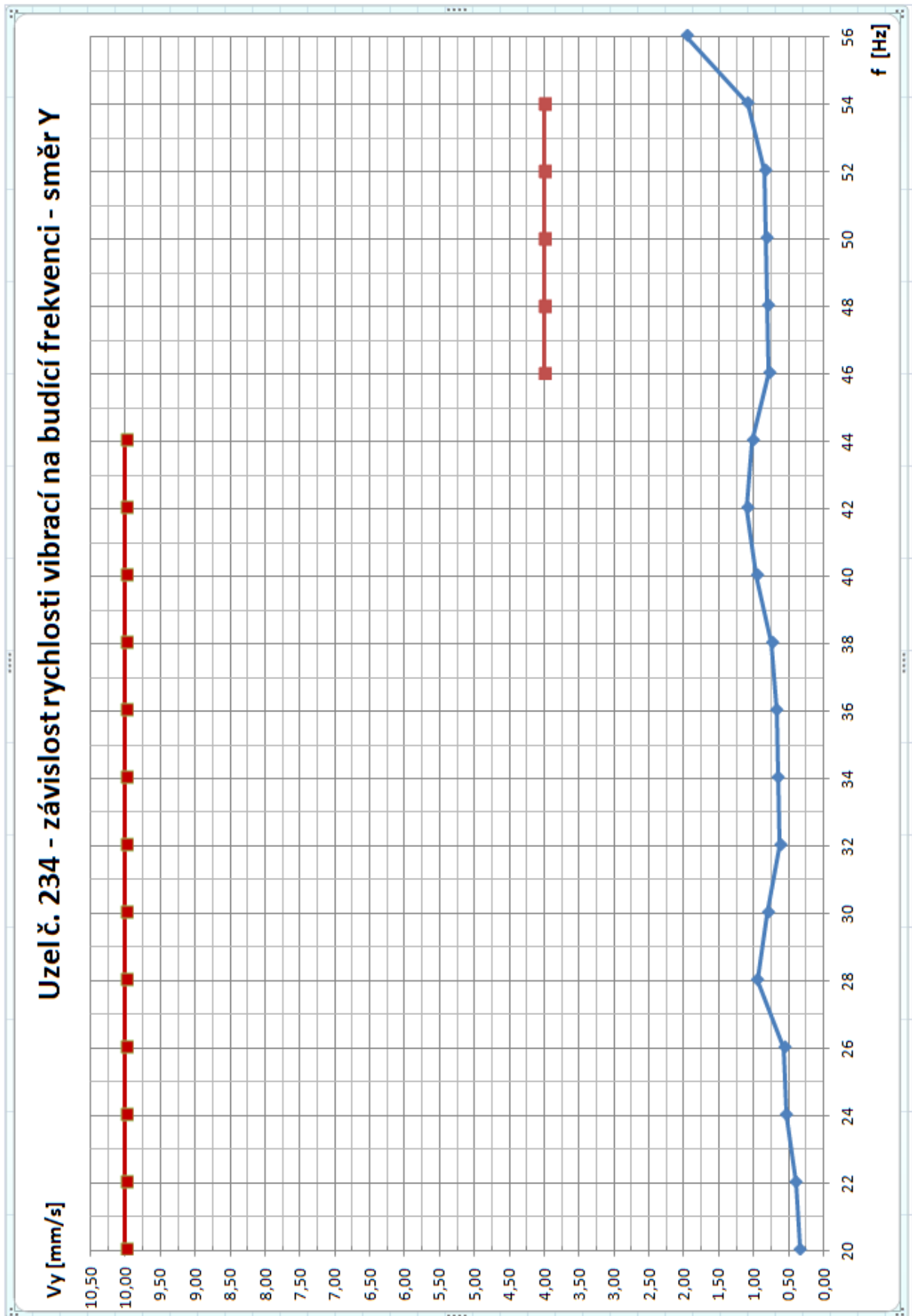


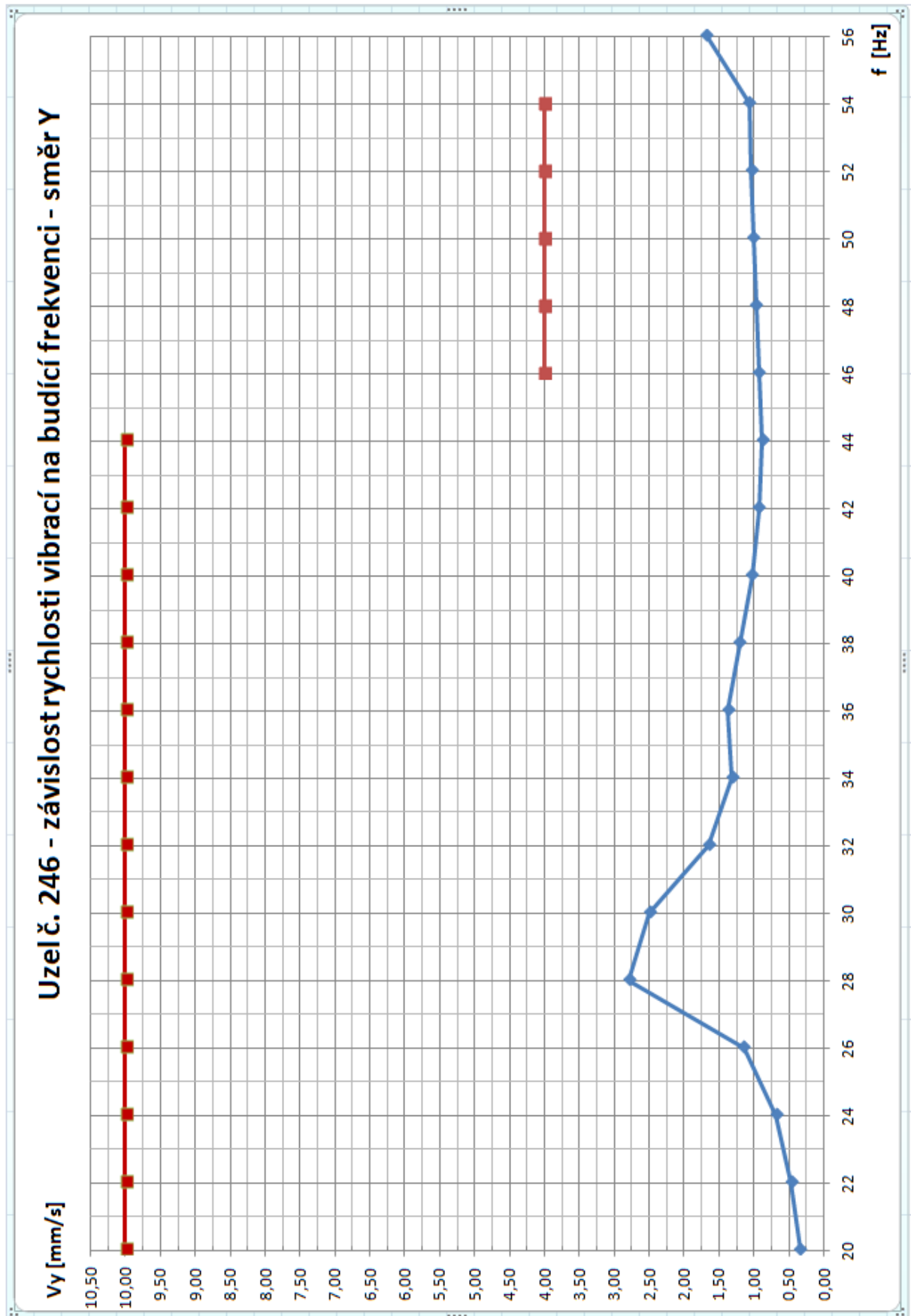












Vypočtené hodnoty amplitud rychlostí vibrací – – směr vertikální Z

Hodnoty v tabulkách jsou uvedeny v [mm/s].

Frekvence 20 Hz

čísla uzlů	KDZS 1	KDZS 2	KDZS 3	KDZS 4	KDZS 5	KDZS 6	KDZS 7	KDZS 8	nejvyšší hodnota
	++++	+++ -	++ - +	+ - ++	- +++	++ - -	+ - - +	+ - + -	
49	0,40	1,11	1,14	0,15	0,90	0,60	1,45	0,72	1,45
56	0,48	1,74	1,54	0,52	0,98	0,45	2,21	1,07	2,21
154	0,64	1,12	0,93	0,31	0,85	0,39	1,36	0,67	1,36
167	0,57	0,89	0,72	0,25	0,76	0,34	1,09	0,48	1,09
185	0,34	0,84	0,76	0,37	0,53	0,32	1,07	0,57	1,07
234	0,21	0,58	0,61	0,13	0,46	0,33	0,76	0,34	0,76
246	0,58	1,01	0,82	0,29	0,72	0,32	1,18	0,60	1,18

Frekvence 22 Hz

čísla uzlů	KDZS 1	KDZS 2	KDZS 3	KDZS 4	KDZS 5	KDZS 6	KDZS 7	KDZS 8	nejvyšší hodnota
	++++	+++ -	++ - +	+ - ++	- +++	++ - -	+ - - +	+ - + -	
49	0,39	0,96	1,07	0,30	0,79	0,76	1,24	0,76	1,24
56	0,46	1,24	1,14	0,57	0,77	0,50	1,66	0,87	1,66
154	0,69	0,96	0,92	0,47	0,76	0,53	1,08	0,74	1,08
167	0,61	0,73	0,69	0,35	0,69	0,43	0,87	0,52	0,87
185	0,37	0,64	0,60	0,36	0,46	0,35	0,84	0,49	0,84
234	0,19	0,46	0,54	0,10	0,39	0,39	0,64	0,32	0,64
246	0,63	0,87	0,80	0,43	0,64	0,44	0,93	0,67	0,93

Frekvence 24 Hz

čísla uzlů	KDZS 1	KDZS 2	KDZS 3	KDZS 4	KDZS 5	KDZS 6	KDZS 7	KDZS 8	nejvyšší hodnota
	++++	+++ -	++ - +	+ - ++	- +++	++ - -	+ - - +	+ - + -	
49	0,52	1,02	1,37	0,87	0,83	1,13	1,19	1,22	1,37
56	0,56	1,08	0,95	0,80	0,71	0,71	1,34	0,71	1,34
154	0,75	0,90	0,99	0,86	0,68	0,75	0,99	1,00	1,00
167	0,63	0,66	0,68	0,60	0,61	0,56	0,77	0,65	0,77
185	0,39	0,60	0,55	0,38	0,48	0,39	0,72	0,43	0,72
234	0,20	0,40	0,56	0,30	0,38	0,50	0,55	0,43	0,56
246	0,67	0,79	0,82	0,75	0,57	0,62	0,85	0,85	0,85

Frekvence 26 Hz

čísla uzlů	KDZS 1	KDZS 2	KDZS 3	KDZS 4	KDZS 5	KDZS 6	KDZS 7	KDZS 8	nejvyšší hodnota
	++++	+++ -	++ - +	+ - ++	- +++	++ - -	+ - - +	+ - + -	
49	0,56	0,73	1,00	1,08	0,72	0,85	1,07	1,12	1,12
56	0,65	1,04	0,93	0,56	0,82	0,73	1,25	0,91	1,25
154	0,54	0,80	0,86	0,92	0,67	0,70	0,93	0,88	0,93
167	0,50	0,61	0,59	0,65	0,62	0,51	0,72	0,60	0,72
185	0,44	0,58	0,57	0,36	0,53	0,44	0,68	0,49	0,68
234	0,33	0,39	0,44	0,47	0,35	0,36	0,51	0,51	0,51
246	0,49	0,72	0,75	0,81	0,57	0,60	0,79	0,77	0,81

Frekvence 28 Hz

čísla uzlů	KDZS 1	KDZS 2	KDZS 3	KDZS 4	KDZS 5	KDZS 6	KDZS 7	KDZS 8	nejvyšší hodnota
	++++	+++ -	++ - +	+ - ++	- +++	++ - -	+ - - +	+ - + -	
49	0,42	0,70	0,93	0,69	0,79	0,66	1,08	0,79	1,08
56	0,68	1,00	0,89	0,56	0,87	0,73	1,09	0,83	1,09
154	0,63	0,83	0,71	0,65	0,75	0,53	0,95	0,64	0,95
167	0,53	0,59	0,53	0,50	0,65	0,39	0,70	0,49	0,70
185	0,45	0,58	0,57	0,40	0,53	0,46	0,61	0,54	0,61
234	0,32	0,40	0,43	0,35	0,36	0,30	0,49	0,41	0,49
246	0,58	0,75	0,61	0,57	0,64	0,46	0,81	0,58	0,81

Frekvence 30 Hz

čísla uzlů	KDZS 1	KDZS 2	KDZS 3	KDZS 4	KDZS 5	KDZS 6	KDZS 7	KDZS 8	nejvyšší hodnota
	++++	+++ -	++ - +	+ - ++	- +++	++ - -	+ - - +	+ - + -	
49	0,38	0,73	0,96	0,49	0,82	0,76	1,07	0,56	1,07
56	0,71	0,88	0,90	0,61	0,86	0,74	1,04	0,88	1,04
154	0,73	0,83	0,73	0,63	0,82	0,62	0,94	0,66	0,94
167	0,67	0,58	0,43	0,42	0,74	0,40	0,68	0,38	0,74
185	0,48	0,50	0,60	0,44	0,55	0,50	0,61	0,61	0,61
234	0,30	0,42	0,41	0,24	0,34	0,34	0,49	0,33	0,49
246	0,69	0,76	0,64	0,58	0,71	0,53	0,81	0,61	0,81

Frekvence 32 Hz

čísla uzlů	KDZS 1	KDZS 2	KDZS 3	KDZS 4	KDZS 5	KDZS 6	KDZS 7	KDZS 8	nejvyšší hodnota
	++++	+++ -	++ - +	+ - ++	- +++	++ - -	+ - - +	+ - + -	
49	0,57	0,79	0,99	0,60	0,84	1,11	1,15	0,73	1,15
56	0,77	0,86	0,93	0,75	0,91	0,81	1,08	0,83	1,08
154	1,04	0,83	0,82	0,90	0,93	0,79	1,02	0,71	1,04
167	0,80	0,53	0,45	0,48	0,75	0,43	0,72	0,38	0,80
185	0,51	0,47	0,61	0,56	0,57	0,63	0,62	0,63	0,63
234	0,27	0,38	0,39	0,25	0,33	0,47	0,53	0,25	0,53
246	0,97	0,76	0,73	0,84	0,81	0,68	0,88	0,65	0,97

Frekvence 34 Hz

čísla uzlů	KDZS 1	KDZS 2	KDZS 3	KDZS 4	KDZS 5	KDZS 6	KDZS 7	KDZS 8	nejvyšší hodnota
	++++	+++ -	++ - +	+ - ++	- +++	++ - -	+ - - +	+ - + -	
49	0,83	0,83	1,14	1,15	1,10	1,58	1,22	0,97	1,58
56	1,00	0,89	0,99	1,11	1,17	1,23	1,12	1,05	1,23
154	1,34	0,98	1,02	1,56	1,23	1,41	1,11	0,96	1,56
167	0,97	0,61	0,54	0,89	0,97	0,80	0,73	0,48	0,97
185	0,79	0,49	0,84	1,23	0,84	1,16	0,63	0,99	1,23
234	0,34	0,43	0,45	0,33	0,44	0,59	0,55	0,37	0,59
246	1,24	0,92	0,92	1,45	1,08	1,26	0,99	0,92	1,45

Frekvence 36 Hz

čísla uzlů	KDZS 1	KDZS 2	KDZS 3	KDZS 4	KDZS 5	KDZS 6	KDZS 7	KDZS 8	nejvyšší hodnota
	++++	+++ -	++ - +	+ - ++	- +++	++ - -	+ - - +	+ - + -	
49	1,01	0,90	1,16	2,27	0,94	1,58	1,33	1,04	2,27
56	1,67	0,92	1,02	2,64	1,80	2,19	1,17	1,14	2,64
154	1,18	1,29	1,06	2,41	1,09	1,65	1,43	1,09	2,41
167	0,81	0,69	0,55	1,38	0,84	1,01	0,82	0,61	1,38
185	1,41	0,49	0,84	2,73	1,32	2,00	0,64	1,11	2,73
234	0,44	0,49	0,45	0,73	0,39	0,51	0,56	0,42	0,73
246	1,10	1,20	0,97	2,21	0,96	1,50	1,28	1,00	2,21

Frekvence 38 Hz

čísla uzlů	KDZS 1	KDZS 2	KDZS 3	KDZS 4	KDZS 5	KDZS 6	KDZS 7	KDZS 8	nejvyšší hodnota
	++++	+++ -	++ - +	+ - ++	- +++	++ - -	+ - - +	+ - + -	
49	0,75	1,16	1,39	1,19	1,00	1,14	1,62	0,98	1,62
56	2,38	1,31	1,75	2,92	2,39	2,94	1,50	1,88	2,94
154	1,11	1,45	1,34	1,36	1,21	1,26	1,63	1,24	1,63
167	0,70	0,67	0,57	0,81	0,77	0,60	0,86	0,52	0,86
185	1,52	0,57	0,92	2,12	1,46	2,03	0,72	1,09	2,12
234	0,41	0,46	0,45	0,48	0,38	0,40	0,57	0,41	0,57
246	1,03	1,38	1,22	1,26	1,08	1,15	1,46	1,17	1,46

Frekvence 40 Hz

čísla uzlů	KDZS 1	KDZS 2	KDZS 3	KDZS 4	KDZS 5	KDZS 6	KDZS 7	KDZS 8	nejvyšší hodnota
	++++	+++ -	++ - +	+ - ++	- +++	++ - -	+ - - +	+ - + -	
49	0,88	1,59	1,76	1,32	1,21	1,24	1,89	1,26	1,89
56	3,16	2,44	2,93	3,82	3,21	3,79	2,40	2,97	3,82
154	1,51	2,04	1,87	1,52	1,54	1,46	2,14	1,77	2,14
167	0,73	0,78	0,60	0,73	0,83	0,57	0,88	0,58	0,88
185	1,67	0,93	1,31	2,16	1,62	2,11	0,94	1,42	2,16
234	0,42	0,52	0,49	0,45	0,36	0,41	0,59	0,46	0,59
246	1,42	1,92	1,73	1,41	1,40	1,36	1,96	1,69	1,96

Frekvence 42 Hz

čísla uzlů	KDZS 1	KDZS 2	KDZS 3	KDZS 4	KDZS 5	KDZS 6	KDZS 7	KDZS 8	nejvyšší hodnota
	++++	+++ -	++ - +	+ - ++	- +++	++ - -	+ - - +	+ - + -	
49	2,37	2,51	2,89	2,80	2,24	2,67	2,44	2,79	2,89
56	5,59	5,72	6,65	6,64	5,59	6,64	5,58	6,79	6,79
154	3,21	3,46	3,89	3,68	3,15	3,63	3,36	3,93	3,93
167	0,92	0,81	0,92	0,96	0,95	0,91	0,80	0,95	0,96
185	2,24	2,00	2,44	2,65	2,28	2,68	1,94	2,54	2,68
234	0,54	0,63	0,52	0,53	0,43	0,51	0,57	0,56	0,63
246	3,02	3,28	3,66	3,47	2,93	3,39	3,15	3,70	3,70

Frekvence 44 Hz

čísla uzlů	KDZS 1	KDZS 2	KDZS 3	KDZS 4	KDZS 5	KDZS 6	KDZS 7	KDZS 8	nejvyšší hodnota
	++++	+++ -	++ - +	+ - ++	- +++	++ - -	+ - - +	+ - + -	
49	2,02	1,59	1,59	2,29	1,45	1,85	1,37	1,88	2,29
56	2,81	3,98	4,48	3,24	3,00	3,15	4,06	4,41	4,48
154	2,18	1,80	2,33	2,82	2,02	2,66	1,71	2,38	2,82
167	0,80	0,64	0,84	0,78	0,83	0,66	0,77	0,88	0,88
185	1,21	1,58	1,65	1,28	1,33	1,32	1,74	1,68	1,74
234	0,56	0,65	0,43	0,55	0,36	0,45	0,57	0,64	0,65
246	2,06	1,71	2,20	2,64	1,93	2,5	1,61	2,21	2,64

Frekvence 46 Hz

čísla uzlů	KDZS 1	KDZS 2	KDZS 3	KDZS 4	KDZS 5	KDZS 6	KDZS 7	KDZS 8	nejvyšší hodnota
	++++	+++ -	++ - +	+ - ++	- +++	++ - -	+ - - +	+ - + -	
49	1,68	1,35	1,32	1,84	1,14	1,44	1,39	1,40	1,84
56	1,88	3,18	3,81	2,01	2,15	2,24	3,29	3,70	3,81
154	1,65	1,14	1,50	2,20	1,51	2,06	1,23	1,64	2,20
167	0,83	0,61	0,85	0,71	0,84	0,63	0,73	0,80	0,85
185	0,98	1,31	1,18	0,91	1,17	1,01	1,38	1,18	1,38
234	0,59	0,69	0,43	0,55	0,38	0,47	0,57	0,61	0,69
246	1,57	1,05	1,40	2,05	1,44	1,93	1,10	1,52	2,05

Frekvence 48 Hz

čísla uzlů	KDZS 1	KDZS 2	KDZS 3	KDZS 4	KDZS 5	KDZS 6	KDZS 7	KDZS 8	nejvyšší hodnota
	++++	+++ -	++ - +	+ - ++	- +++	++ - -	+ - - +	+ - + -	
49	1,79	1,28	1,39	1,68	1,14	1,15	1,39	1,54	1,79
56	1,93	2,98	3,78	1,66	2,22	1,72	3,10	3,66	3,78
154	1,50	0,99	1,49	2,02	1,38	1,67	1,16	1,34	2,02
167	0,97	0,64	0,92	0,64	1,04	0,43	0,75	0,89	1,04
185	0,88	1,24	1,05	0,95	1,10	1,06	1,32	0,97	1,32
234	0,56	0,73	0,45	0,48	0,40	0,48	0,56	0,60	0,73
246	1,45	0,90	1,40	1,87	1,38	1,57	1,02	1,22	1,87

Frekvence 50 Hz

čísla uzlů	KDZS 1	KDZS 2	KDZS 3	KDZS 4	KDZS 5	KDZS 6	KDZS 7	KDZS 8	nejvyšší hodnota
	++++	+++ -	++ - +	+ - ++	- +++	++ - -	+ - - +	+ - + -	
49	2,04	1,35	1,67	1,51	1,41	0,97	1,37	1,68	2,04
56	2,13	2,47	3,32	1,44	2,39	1,74	2,57	3,22	3,32
154	1,57	0,90	1,59	1,57	1,46	1,39	1,15	1,41	1,59
167	1,38	0,68	1,06	0,66	1,47	0,43	0,74	1,07	1,47
185	0,98	1,12	0,90	0,97	1,19	1,09	1,21	0,91	1,21
234	0,59	0,78	0,49	0,49	0,42	0,50	0,55	0,63	0,78
246	1,53	0,85	1,49	1,45	1,46	1,33	1,02	1,29	1,53

Frekvence 52 Hz

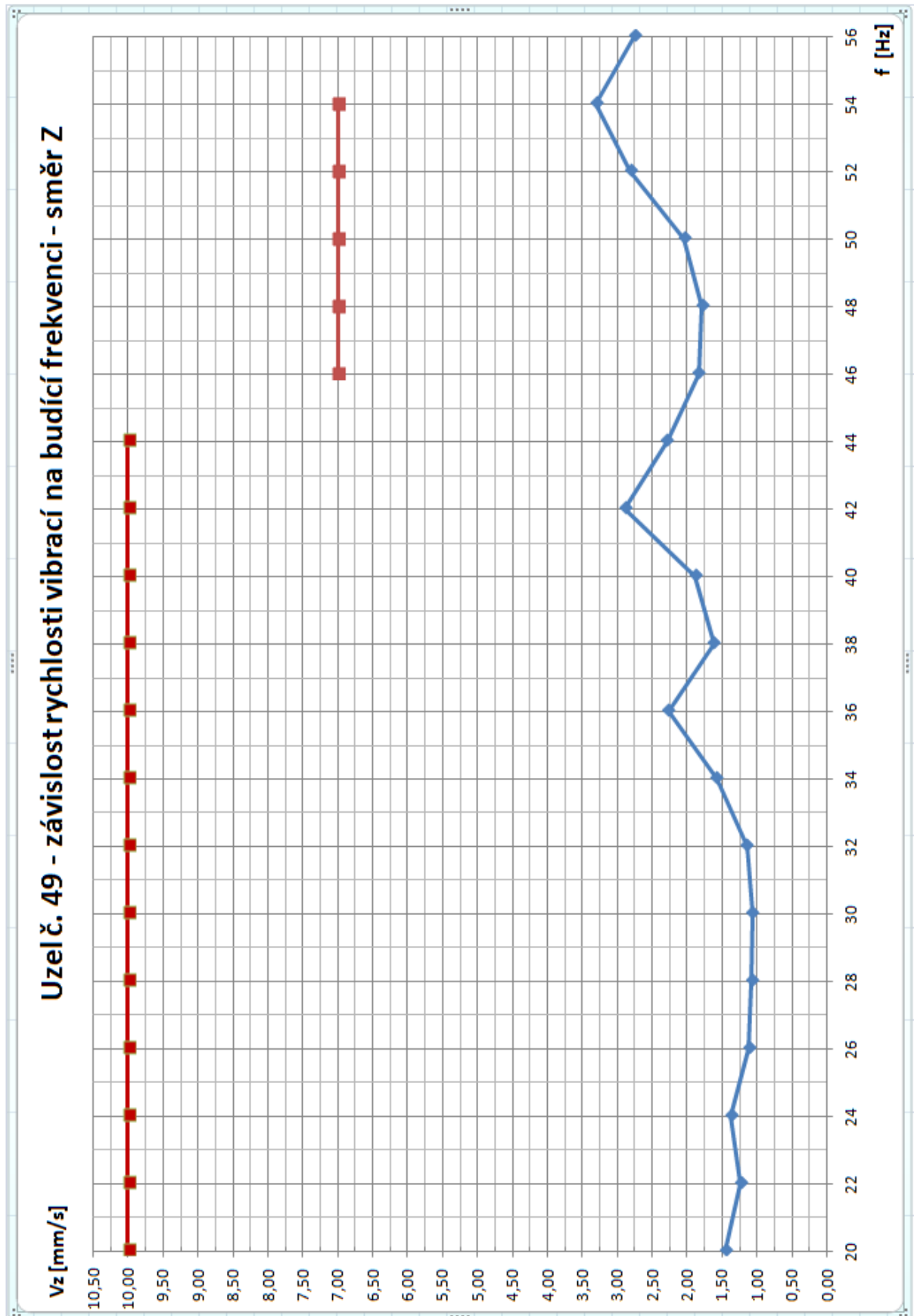
čísla uzlů	KDZS 1	KDZS 2	KDZS 3	KDZS 4	KDZS 5	KDZS 6	KDZS 7	KDZS 8	nejvyšší hodnota
	++++	+++ -	++ - +	+ - ++	- +++	++ - -	+ - - +	+ - + -	
49	2,81	1,42	1,90	1,56	2,20	1,05	1,35	1,80	2,81
56	3,36	2,18	3,14	1,60	3,68	1,91	2,39	3,04	3,68
154	2,08	0,88	1,66	1,67	1,92	1,34	1,14	1,47	2,08
167	1,52	0,72	1,42	0,68	1,72	0,62	0,78	1,36	1,72
185	1,59	0,91	1,16	0,98	1,83	1,13	0,96	1,25	1,83
234	0,63	0,82	0,49	0,49	0,44	0,52	0,54	0,66	0,82
246	2,08	0,87	1,57	1,56	2,10	1,28	1,01	1,36	2,10

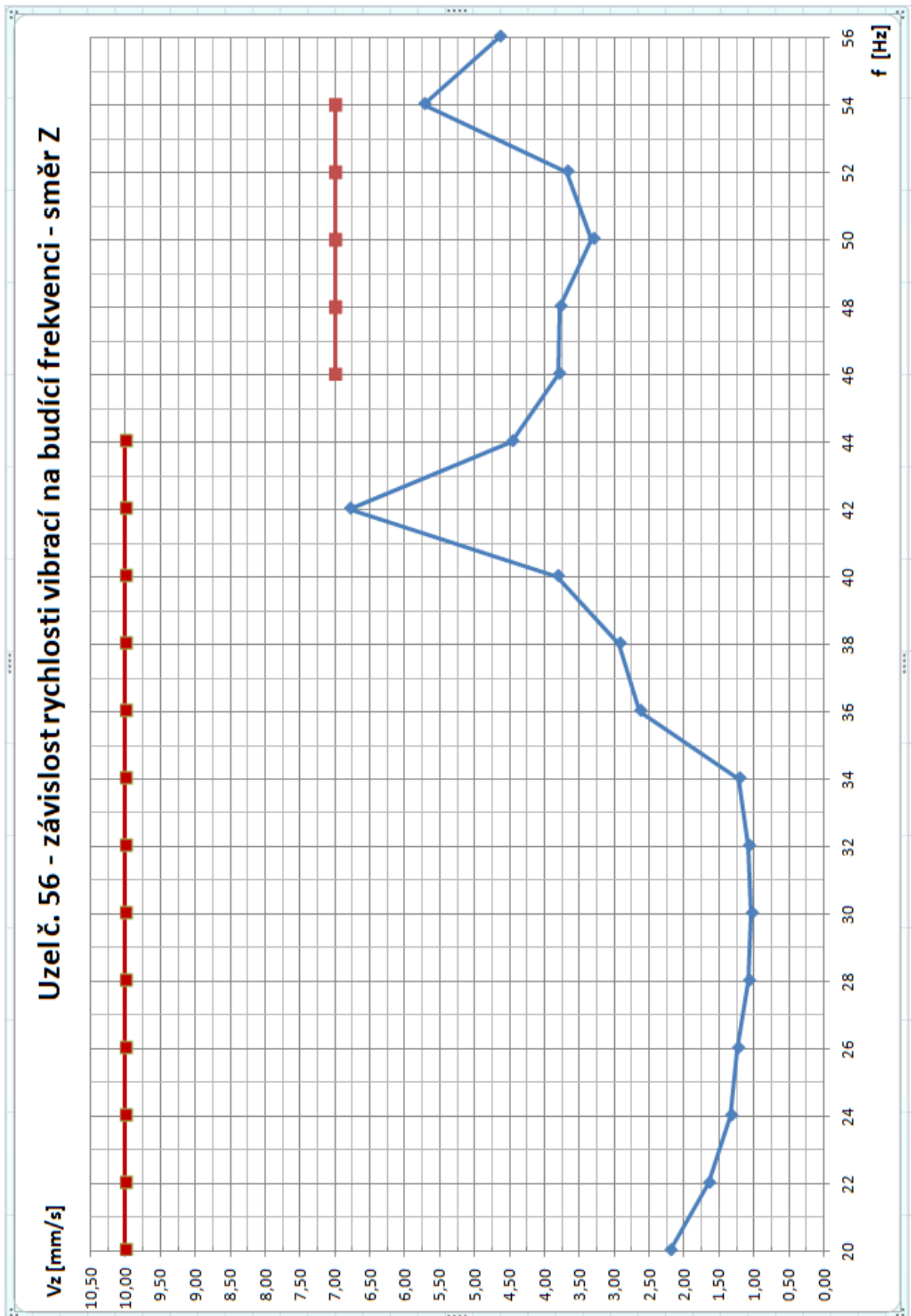
Frekvence 54 Hz

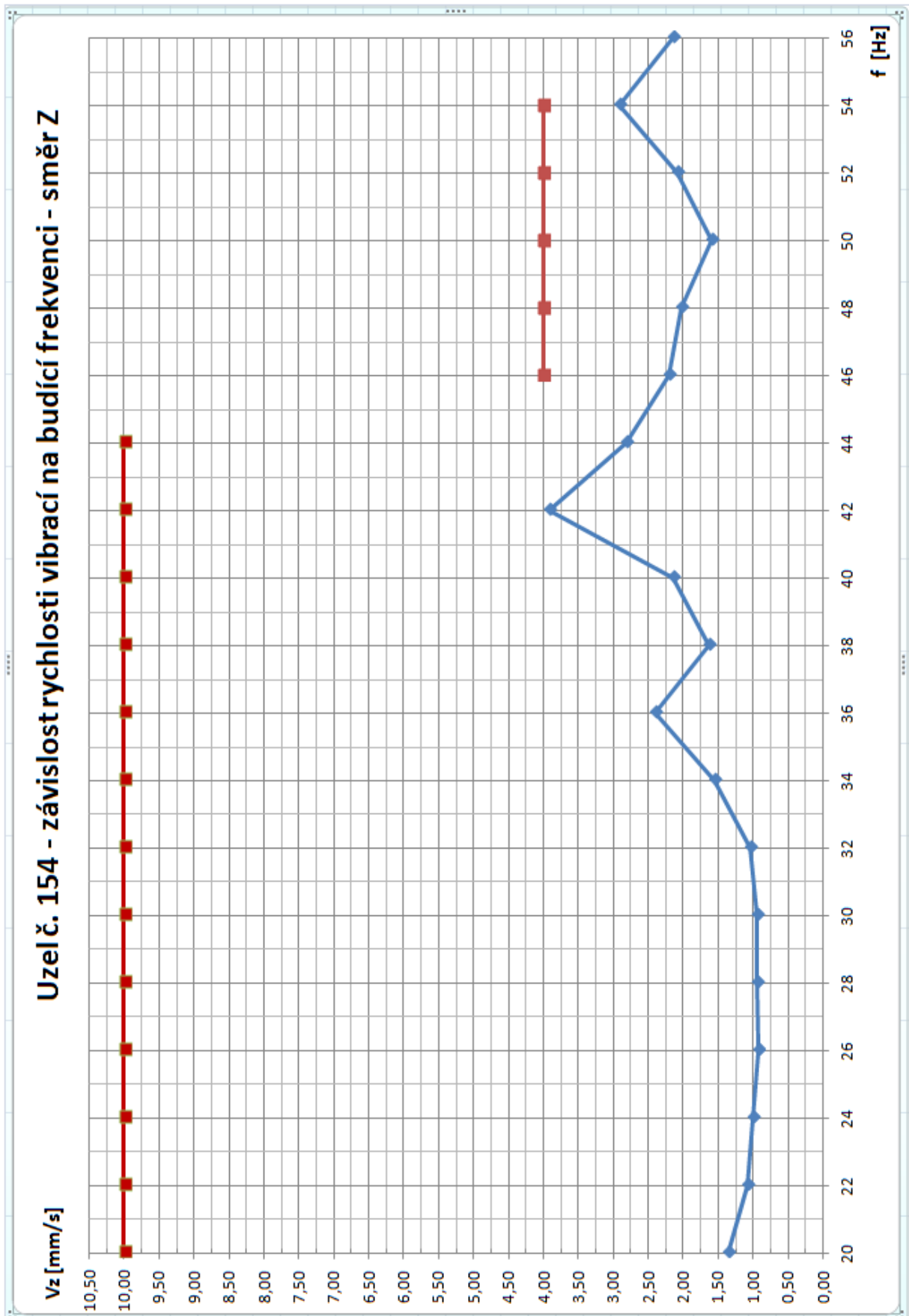
čísla uzlů	KDZS 1	KDZS 2	KDZS 3	KDZS 4	KDZS 5	KDZS 6	KDZS 7	KDZS 8	nejvyšší hodnota
	++++	+++ -	++ - +	+ - ++	- +++	++ - -	+ - - +	+ - + -	
49	3,21	1,47	2,35	1,18	3,31	1,35	1,36	2,53	3,31
56	5,47	2,22	3,14	2,09	5,74	2,27	2,56	3,33	5,74
154	2,89	1,03	2,12	1,39	2,92	1,23	1,23	2,16	2,92
167	1,91	0,75	1,54	0,95	1,86	0,86	0,82	1,46	1,91
185	2,81	0,96	1,96	1,39	2,94	1,44	1,11	2,04	2,94
234	0,64	0,86	0,51	0,52	0,46	0,53	0,53	0,68	0,86
246	2,91	1,00	2,13	1,28	2,90	1,15	1,10	2,17	2,91

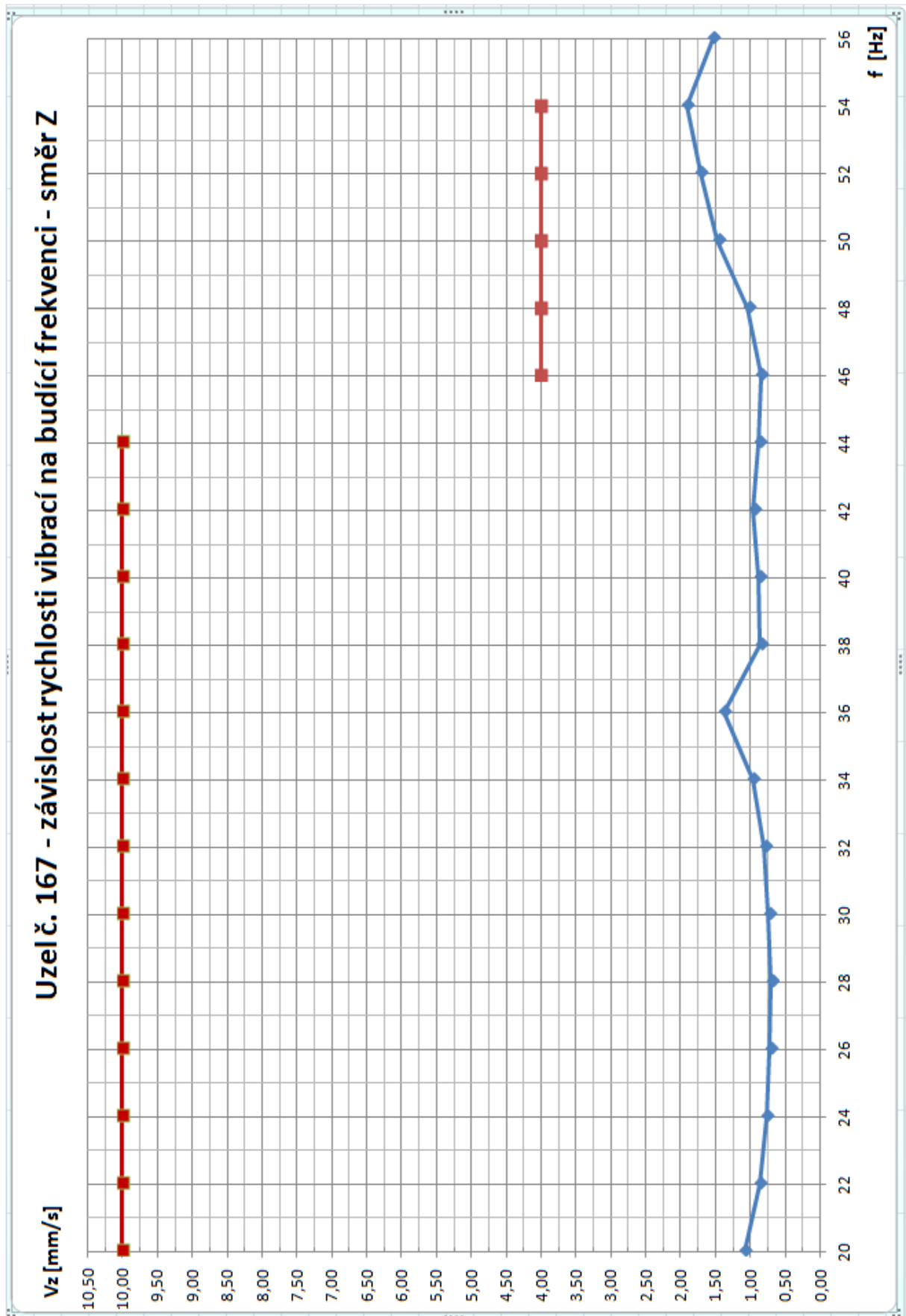
Frekvence 56 Hz

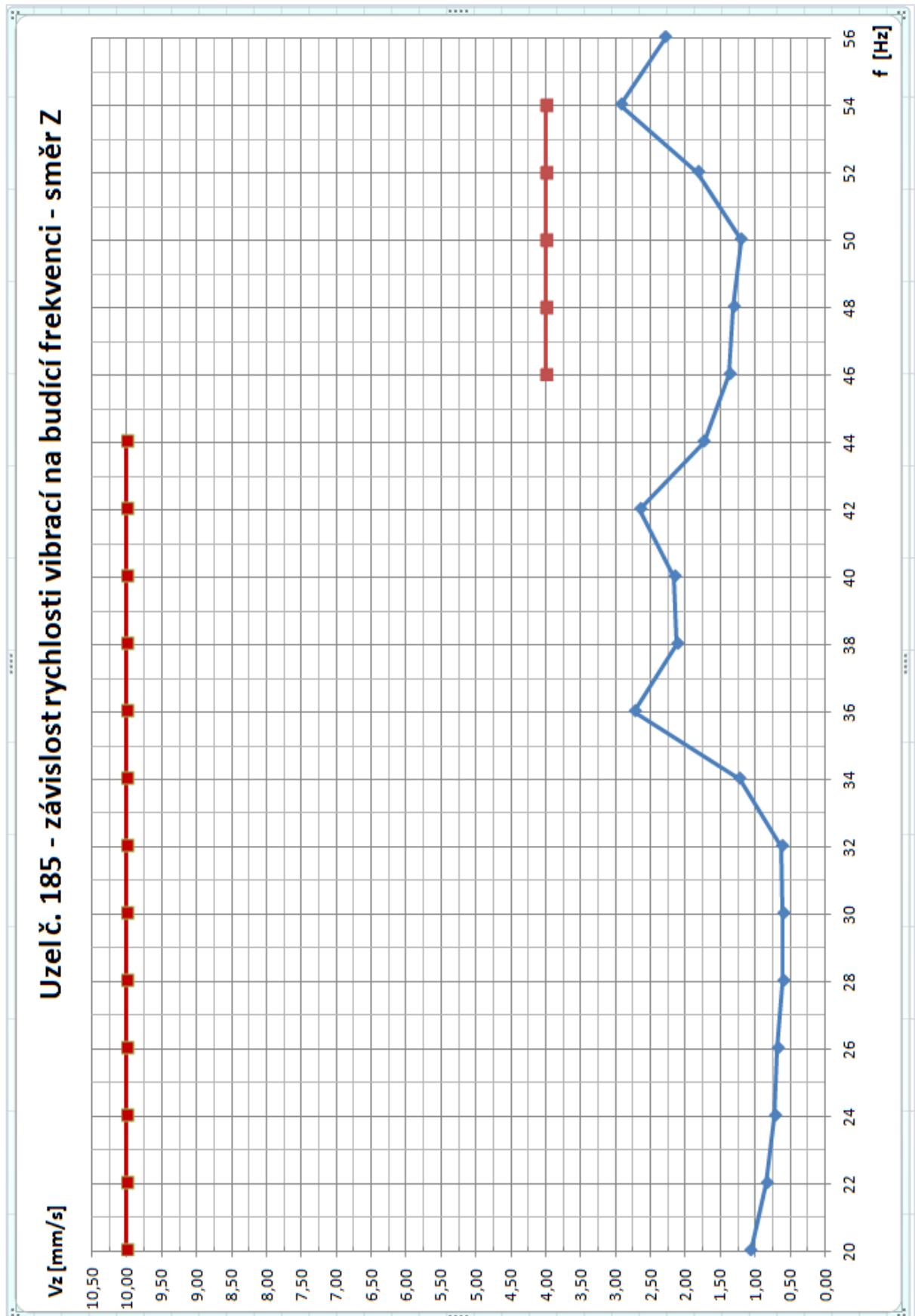
čísla uzlů	KDZS 1	KDZS 2	KDZS 3	KDZS 4	KDZS 5	KDZS 6	KDZS 7	KDZS 8	nejvyšší hodnota
	++++	+++ -	++ - +	+ - ++	- +++	++ - -	+ - - +	+ - + -	
49	2,14	1,52	2,47	1,17	2,75	1,49	1,76	2,31	2,75
56	4,26	2,32	2,37	1,83	4,65	1,94	2,71	2,52	4,65
154	2,09	1,34	2,04	1,44	2,14	1,13	1,47	1,91	2,14
167	0,99	0,85	1,54	1,04	0,99	0,88	0,95	1,45	1,54
185	2,16	1,08	1,52	1,47	2,29	1,59	1,27	1,45	2,29
234	0,65	0,89	0,54	0,49	0,53	0,55	0,58	0,69	0,89
246	2,09	1,29	1,94	1,33	2,08	1,04	1,32	1,82	2,09

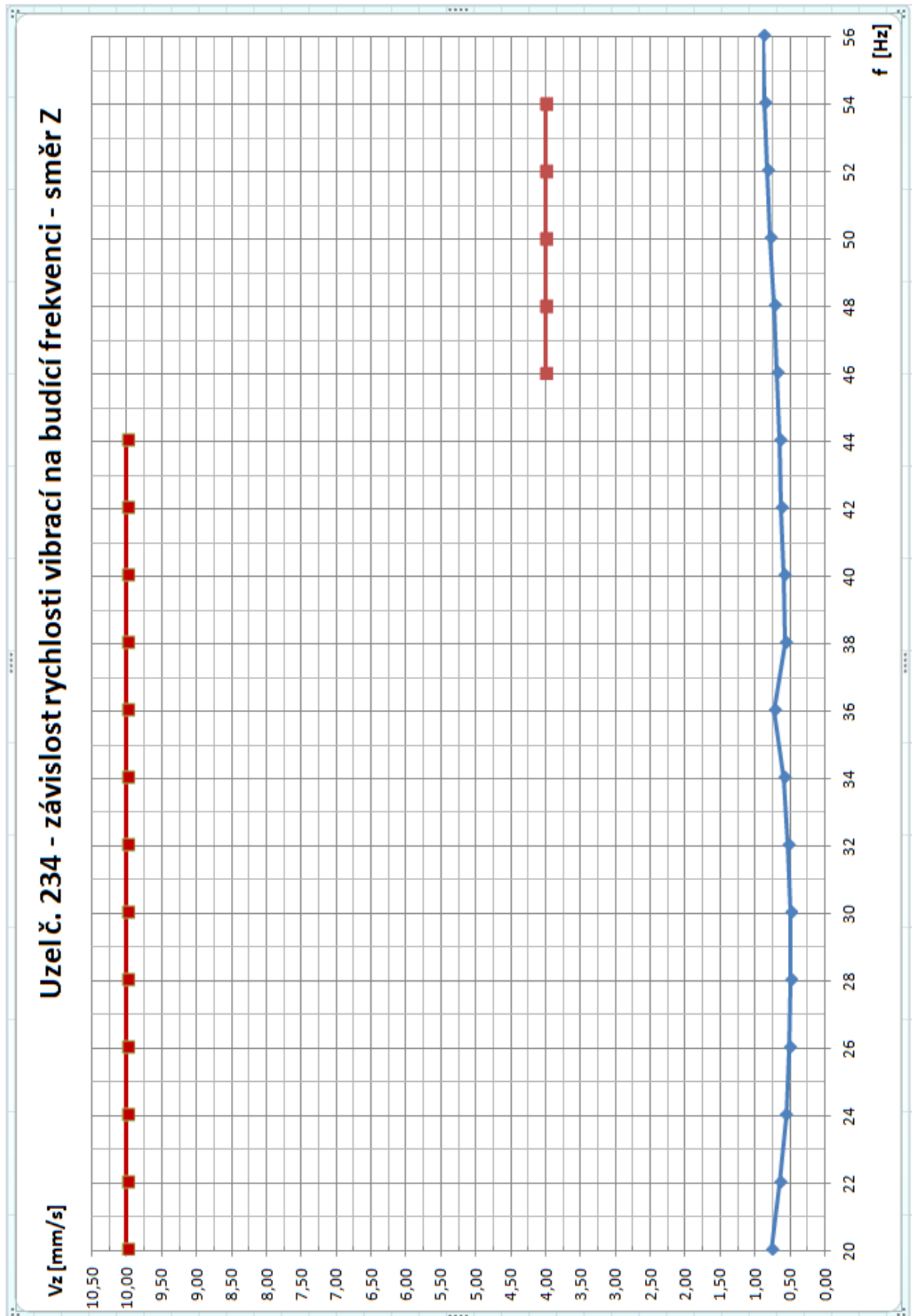


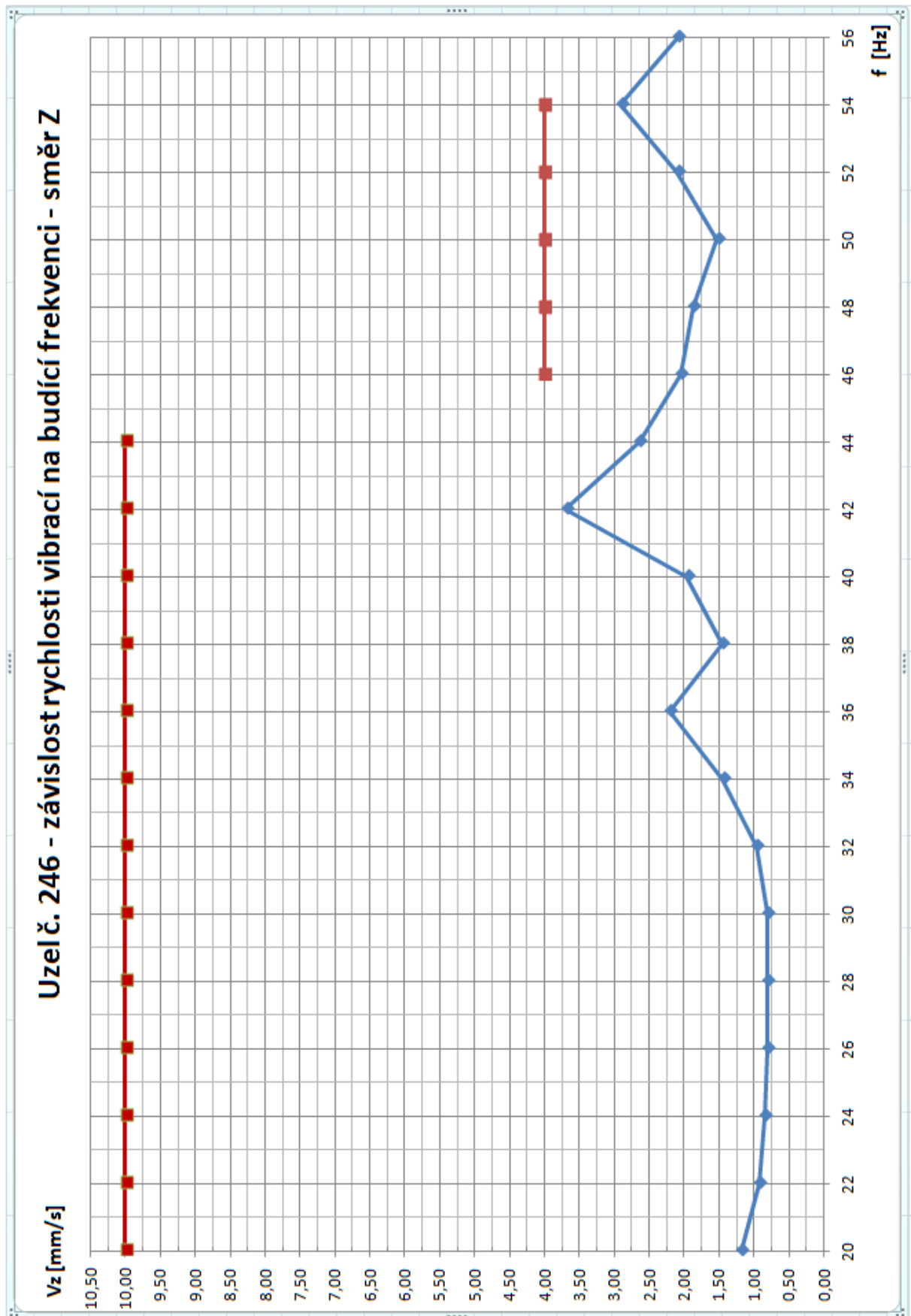












4.4.8. Vyhodnocení vynuceného kmitání

Následující 4 vlastní tvary jsou důležité v přechodových stavech stroje pro rychlost vibrací v 7 bodech odezvy:

- vlastní tvar č. 14: $f = 29,752 \text{ Hz}$
- vlastní tvar č. 15: $f = 36,699 \text{ Hz}$
- dvojice vlastních tvarů č. 18 a č. 19: $f = 43,510 \text{ Hz}; f = 43,679 \text{ Hz}$

Rezonanční špičky v přechodových stavech se nachází na 28-30 Hz (v rezonanci s vlastním tvarem č. 14), dále na 36 Hz (rezonance s vlastním tvarem č. 15) a na 42 Hz (rezonance s dvojicí vlastních tvarů č. 18 a 19).

Vlastní tvar č. 20 se s vlastní frekvencí 55,543 Hz nachází mimo rozmezí provozních otáček stroje (45-55 Hz), ale ovlivňuje rychlost vibrací v provozním pásmu na 54 Hz. Rezonanční špička se v rozmezí provozních otáček nenachází.

Závěr dynamické analýzy:

Rychlosti vibrací ve všech 7 bodech odezvy ve 3 směrech nepřekračují mezní hodnoty stanovené výrobcem stroje. Konstrukce horní desky základu je VYHOVUJÍCÍ.

Závěr

Diplomová práce byla vypracována v plném rozsahu podle zadání výrobce turbíny, firmy Doosan Škoda Power s.r.o.

Pro statickou analýzu jsem nejprve vytvořil prostorový model desky bez vymodelovaného turbosoustrojí. Pro podepření horní desky základu bylo navrženo pět typů pružinových prvků Gerb, které byly posouzeny na maximální přípustné zatížení vlastní tíhou konstrukce desky základu a turbosoustrojí. Posouzení na maximální přípustné stlačení bylo provedeno od zatížení vlastní tíhou a od mimořádného zatížení zkratem generátoru. Pružinové prvky Gerb jsou v obou případech na maximální přípustné zatížení i stlačení navrženy s dostatečnou rezervou.

Deformace pod ložiskovými podporami byly vyhodnoceny na stejném prostorovém modelu desky. Byla provedena analýza a posouzeny deformace od nerovnoměrného zvýšení teploty uvnitř turbínového otvoru a od dlouhodobých deformací pod ložiskovými podporami v důsledku dotvarování betonu. V obou případech platí stejná kritéria pro maximální přípustná pootočení a svislé posuny, která jsou stanovena výrobcem turbíny. Vyhodnocuje se relativní posun ložiskové podpory vztažený k velikosti posunů sousedních ložiskových podpor a k jejich vzdálenosti. Výpočtem bylo ověřeno, že požadavky na deformace v ložiskových podporách jsou splněny.

V další statické analýze se zabývám návrhem výztuže. Pro návrh výztuže horní desky základu byl vytvořen deskostěnový model s vymodelovaným turbosoustrojím. Bylo sestaveno 190 různých kombinací zatěžovacích stavů pro provoz stroje, jeho přechodové stavy při najíždění a odstavování, pro mimořádné zatížení zkratem generátoru a pro případ, kdy provoz stroje není uvažován. Výztuž na smykové a ohybové namáhání byla dimenzována odděleně pro jednotlivé části desky, která byla rozdělena na deskovou část, 2 podélníky, příčník a místa pružinových prvků Gerb. Maximální návrhové vnitřní síly byly odečteny z analýz nejnepříznivějších kombinací zatěžovacích stavů, a to pro každou část desky základu zvlášť. Statickou analýzu jsem zakončil výkresem půdorysů a řezů navržené výztuže základu.

Pro dynamickou analýzu jsem připravil komplexní prostorový model desky základu s turbosoustrojím vymodelovaným náhradními tělesy. Vlastní tvary a jim odpovídající vlastní

frekvence byly napočteny pro frekvenční interval do 67 Hz. V rozmezí provozních otáček +/- 10 % od provozní frekvence 50 Hz se nevyskytuje žádný vlastní tvar.

Pro vynucené kmitání soustavy výrobce stroje stanovil mezní výpočetní hodnoty amplitud rychlostí kmitání v sedmi určených bodech odezvy v provozních otáčkách strojního zařízení i v jeho přechodových stavech. Amplitudy dynamických budících sil od rotorů byly vypočteny jako zlomek hmotnosti rotorů v závislosti na velikosti budící frekvence. Vytvořené kombinace dynamických zatěžovacích stavů zahrnují všechny možné fázové posuny budících sil, které mohou nastat. Pomocí přídatného modulu „RF-DYNAM Pro“ softwaru Dlubal jsem získal grafy závislostí rychlostí kmitání na čase a v sedmi bodech odezvy jsem odečetl hodnoty amplitud rychlosti kmitání v ustáleném stavu. Výsledky z nejnepříznivějších kombinací byly zaneseny do grafů amplitudo-frekvenčních charakteristik pro každý bod odezvy v každém ze tří směrů. Z grafů je zřejmé, že mezní výpočetní hodnoty amplitud rychlosti kmitání nebyly překročeny.

Všechny požadavky na horní desku základu byly ve statické i dynamické analýze splněny a navržená konstrukce je vyhovující.

Vypracování diplomové práce bylo pro mě přínosné. Rozšířil jsem si znalosti ve vytváření plošných i prostorových modelů stavebních konstrukcí a ve výpočtech vynuceného kmitání soustavy základové desky s turbosoustrójím.

Seznam použité literatury

1. Šmejkal J.: Železobetonové konstrukce, Vydavatelství Západočeské univerzity v Plzni, 2010
2. Šmejkal J.: Železobetonové konstrukce I – Příklady, Vydavatelství Západočeské univerzity v Plzni, 2015
3. Hlaváč Z.: Dynamika pro distanční studium, Katedra mechaniky Fakulty aplikovaných věd Západočeské univerzity v Plzni, 2001
4. Makovička D., Bohdanecký V., Novák P., Tůma J.: Výpočet stavebních konstrukcí zatížených dynamickými účinky strojů – Komentář k ČSN 73 0032, Vydavatelství Úřadu pro normalizaci a měření Praha, 1980

Seznam použitých norem a vyhlášek

- Zákon č. 183/2006 Sb. o územním plánování a stavebním řádu
- Vyhláška č. 62/2013 Sb. o dokumentaci staveb
- Nařízení vlády č. 272/2011 Sb. ze dne 24. října 2011 o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací
- Nařízení vlády č. 176/2008 Sb. ze dne 21. dubna 2008 o technických požadavcích na strojní zařízení
- ČSN EN 1990 – Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí
- ČSN EN 1991 – Eurokód 1: Zatížení konstrukcí
- ČSN EN 1992 – Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí
- ČSN 73 0032 – Výpočet stavebních konstrukcí zatížených dynamickými účinky strojů
- ČSN 73 1020 – Navrhování základů točivých strojů

- ČSN ISO 10816-1 – Vibrace – Hodnocení vibračních strojů na základě měření na nerotujících částech – Část 1: Všeobecné směrnice
- ČSN ISO 10816-2 – Vibrace – Hodnocení vibračních strojů na základě měření na nerotujících částech – Část 2: Parní turbíny a generátory nad 50 MW na pozemních základech se jmenovitými provozními otáčkami 1 500 1/min, 1 800 1/min, 3 000 1/min a 3 600 1/min
- DIN 4024-1 – Maschinenfundamente; Elastische Stützkonstruktionen für Maschinen mit rotierenden Massen

Internetové zdroje

Pružinové prvky Gerb: <http://www.gerb.com>

Časopis Stavebnictví: <http://www.casopisstavebnictvi.cz>

Časopis Stavební obzor: <http://www.civilengineeringjournal.cz>

Použitý software

Microsoft Office Word 2007

Microsoft Office Excel 2007

Nemetschek Allplan 2013

Dlubal RFEM 5.06 s přídatným modulem RF-DYNAM Pro

Kompletní seznam příloh

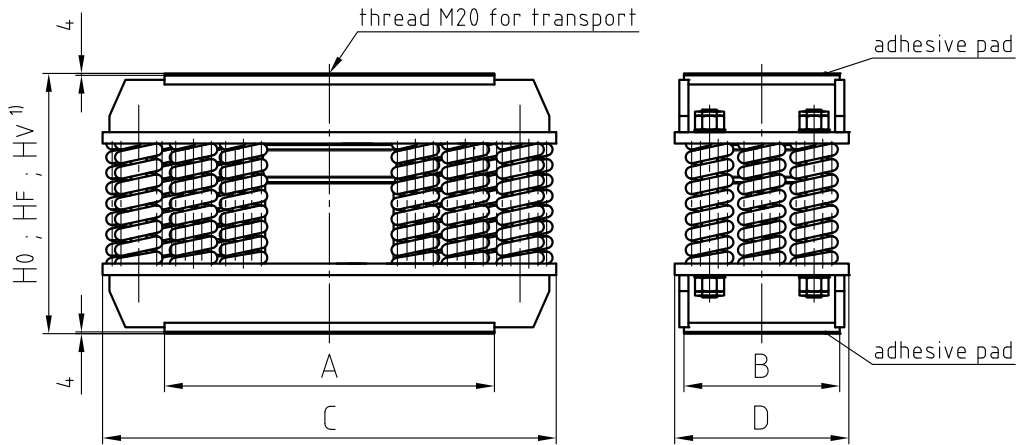
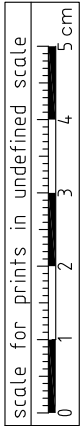
Příloha 1 – Technické listy

Technický list pružinových prvků GERB pro základy turbín

Příloha 2 – Výkresová dokumentace

Část D.1.2 Stavebně konstrukční řešení

- D.1.2.1 Půdorysy základové konstrukce turbosoustrojí
- D.1.2.2 Řezy základovou konstrukcí turbosoustrojí
- D.1.2.3 Půdorys navržených pružinových prvků Gerb
- D.1.2.4 Půdorysy a řezy výztuže horní desky základu turbosoustrojí



H_0 : unloaded height ; H_F : height at nominal load ; H_V : max. prestressed height

Type	nominal load cap. $F_{max.}$ [kN]	spring rate ²⁾		dimension				height ³⁾		
		k_v [kN/mm]	k_h	A	B	C	D	H_0	H_F	H_V
TVN-595	595	18,61	2,90	500	340	770	380	568	536	520
TVN-754	754	23,56	3,62	610	340	880	380			
TVN-912	912	28,51	4,34	720	340	990	380			


Comments:

- ¹⁾ additional parts supplied for height adjustment :
shims 2x2 mm and 2x3 mm = 10 mm
- ²⁾ calculated acc. to DIN EN 13906-1
- ³⁾ specified heights are without shims

All data and dimensions may become subject to change

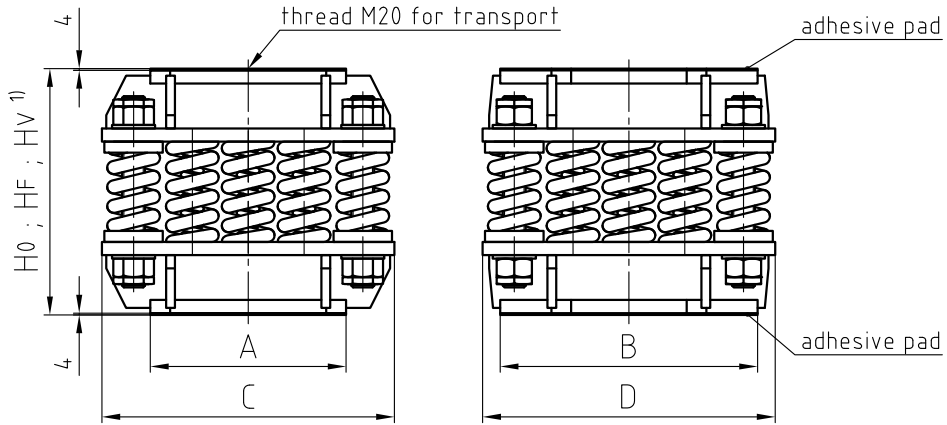
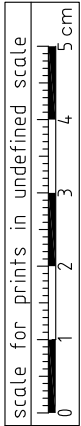
--	--	--	--

Index	Date	Name	Details of revision
-------	------	------	---------------------


GERB GERB SCHWINGUNGSISOLIERUNGEN GmbH & Co KG
 13407 Berlin, Roedernallee 174-176 Tel.: +49 (030) 41 91-0 Fax.: +49 (030) 41 91-199 www.gerb.de
 45136 Essen, Ruhrallee 311 Tel.: +49 (0201) 26 604-0 Fax.: +49 (0201) 26 604-40 iso@gerb.de

Customer: Skoda	2012	Date	Name
	Drawn	28.08.	H. Eksen
	Exam.	28.08.	Gil
Title: Spring Elements Type TVN-...	Release	28.08.	Tag
	No : 4-MS-6007.1		

This drawing is our property. It may not be used, especially reproduced in whole or in part or be accessible to third parties without permission. Infringements are subject to penalty.



H_0 : unloaded height ; H_F : height at nominal load ; H_V : max. prestressed height

Type	nominal load cap. $F_{max.}$ [kN]	spring rate ²⁾		dimension				height ³⁾		
		k_v	k_h	A	B	C	D	H_0	H_F	H_V
		[kN/mm]		[mm]				[mm]		
TN-595	595	18,61	2,92	215	320	440	360	568	536	520
TN-754	754	23,56	3,65	325	320	550	360			
TN-912	912	28,51	4,38	435	340	660	380			
TN-1018	1018	31,82	4,87	325	365	550	440			
TN-1282	1282	40,07	6,09	315	500	575	575			
TN-1373	1370	42,92	6,33	360	480	660	550			
TN-1479	1475	46,22	6,82	360	480	660	550			
TN-1585	1585	49,52	7,31	360	480	660	550			

Comments:

- ¹⁾ additional parts supplied for height adjustment:
shims 2x2 mm and 2x3 mm = 10 mm
- ²⁾ calculated acc. to DIN EN 13906-1
- ³⁾ specified heights are without shims

All data and dimensions may become subject to change

--	--	--	--

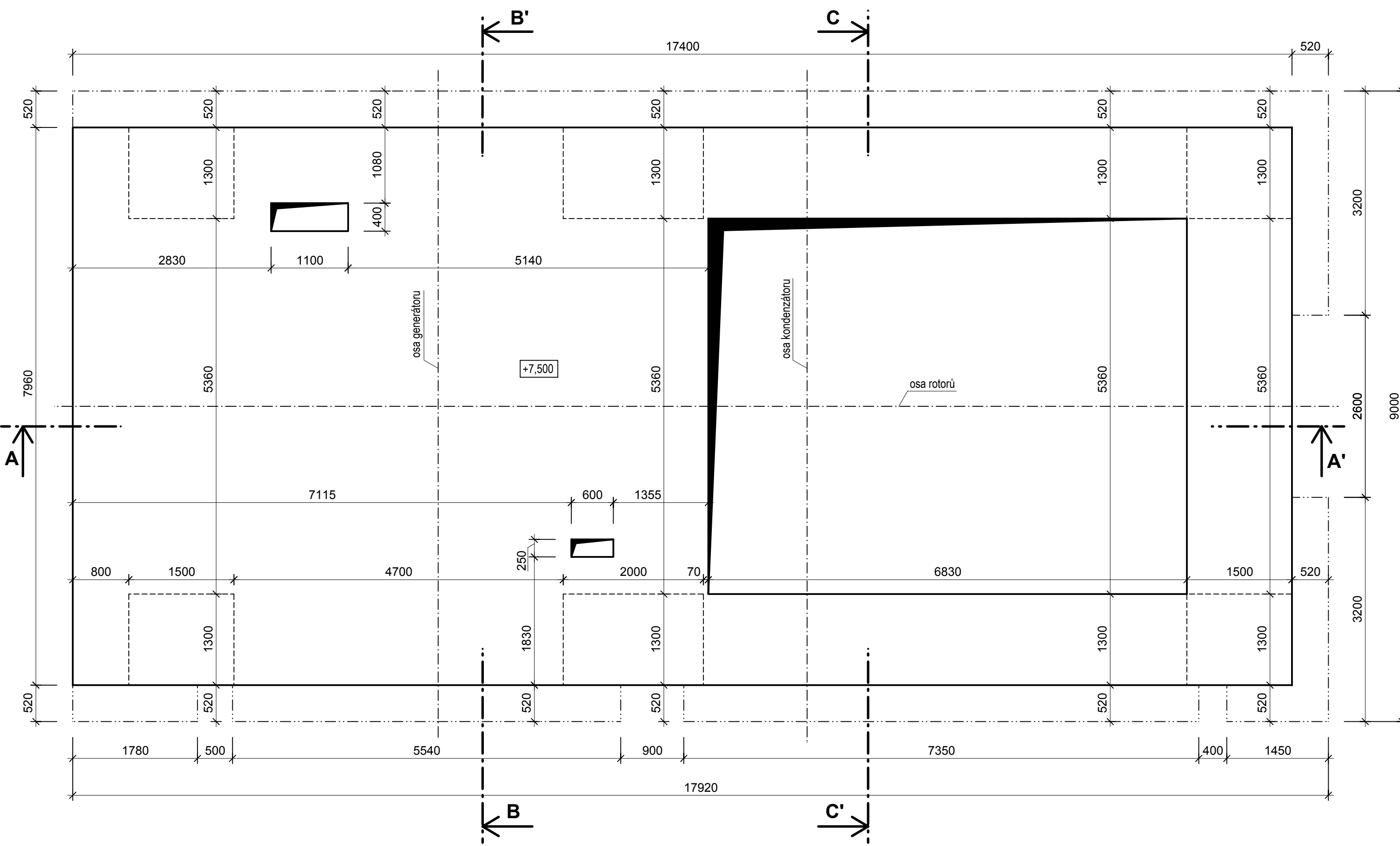
Index	Date	Name	Details of revision
-------	------	------	---------------------


GERB GERB SCHWINGUNGSISOLIERUNGEN GmbH & Co KG
 13407 Berlin, Roedernallee 174-176 Tel.: +49 (030) 41 91-0 Fax.: +49 (030) 41 91-199 www.gerb.de
 45136 Essen, Ruhrallee 311 Tel.: +49 (0201) 26 604-0 Fax.: +49 (0201) 26 604-40 iso@gerb.de

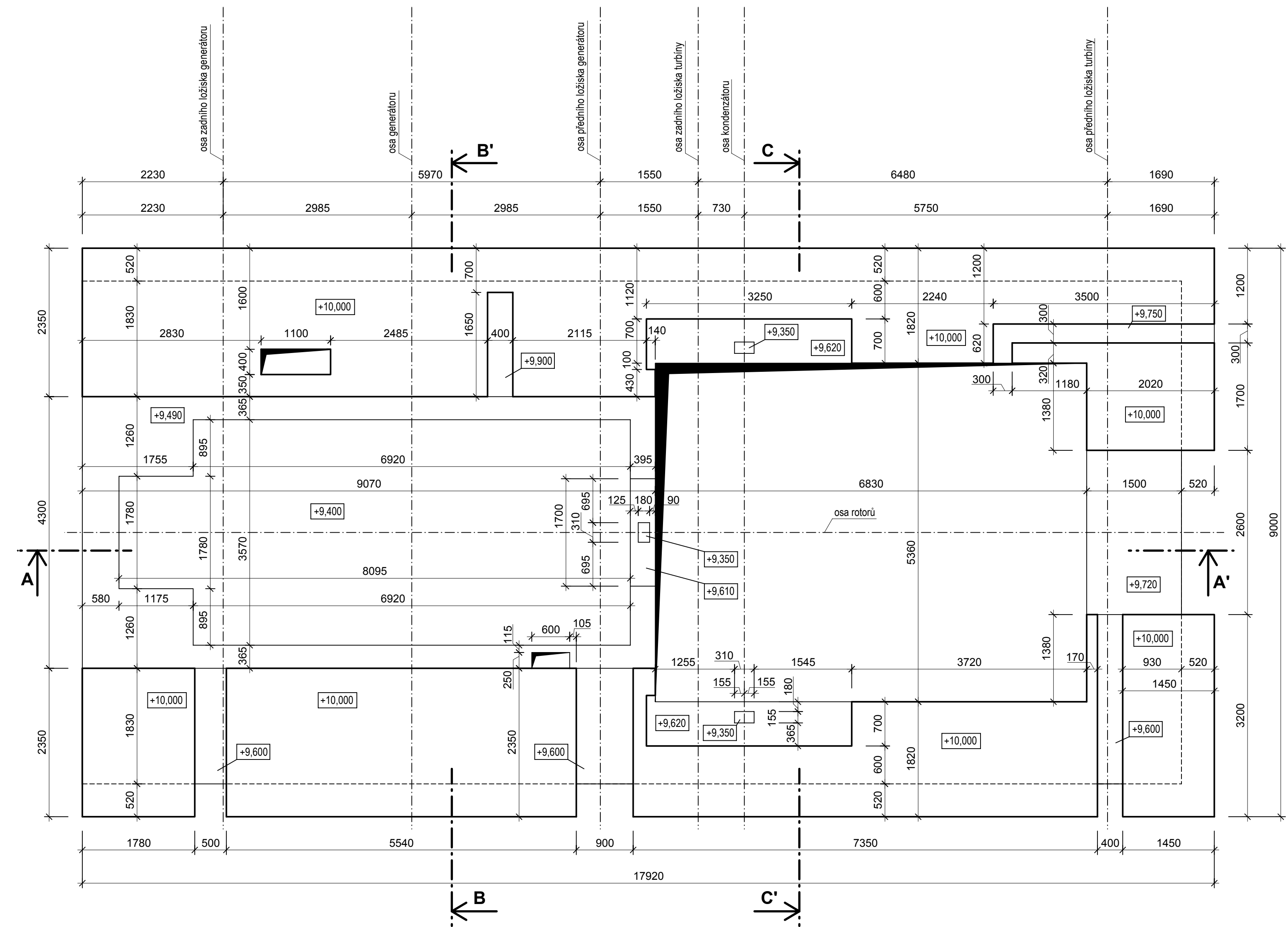
Customer: Skoda	2012	Date	Name
	Drawn	28.08.	H. Eksen
	Exam.	28.08.	Gil
Title: Spring Elements Type TN-....	Release	28.08.	Tag
	No: 4-MS-6006.1		

This drawing is our property. It may not be used, especially reproduced in whole or in part or be accessible to third parties without permission. Infringements are subject to penalty.

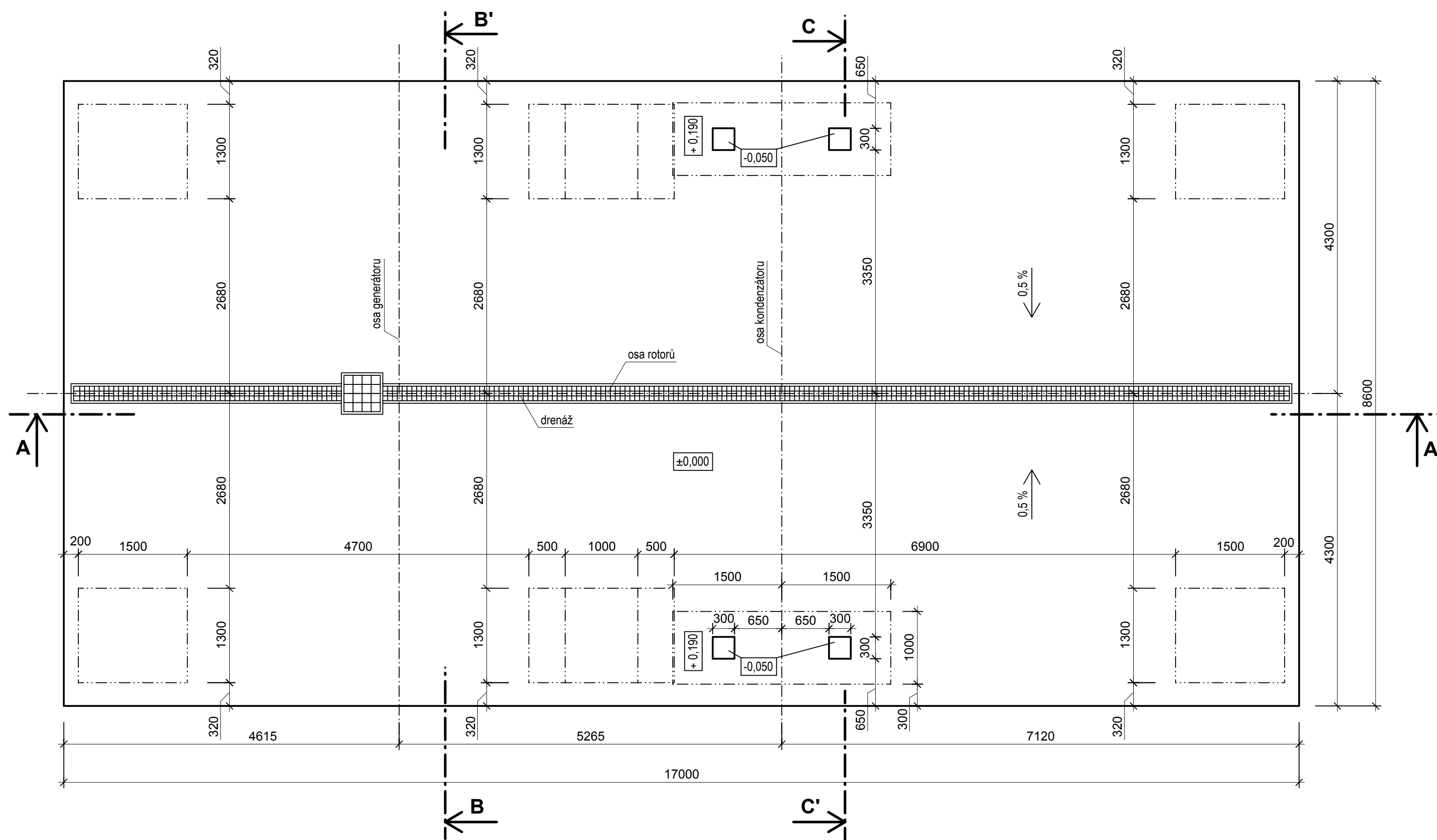
PŮDORYS HORNÍ DESKY KONSTRUKCE ZÁKLADU TURBOSOUSTROJÍ - úroveň +7,500



PŮDORYS HORNÍ DESKY KONSTRUKCE ZÁKLADU TURBOSOUSTROJÍ - úroveň +10,000



PŮDORYS SPODNÍ DESKY KONSTRUKCE ZÁKLADU TURBOSOUSTROJÍ - úroveň ±0,000



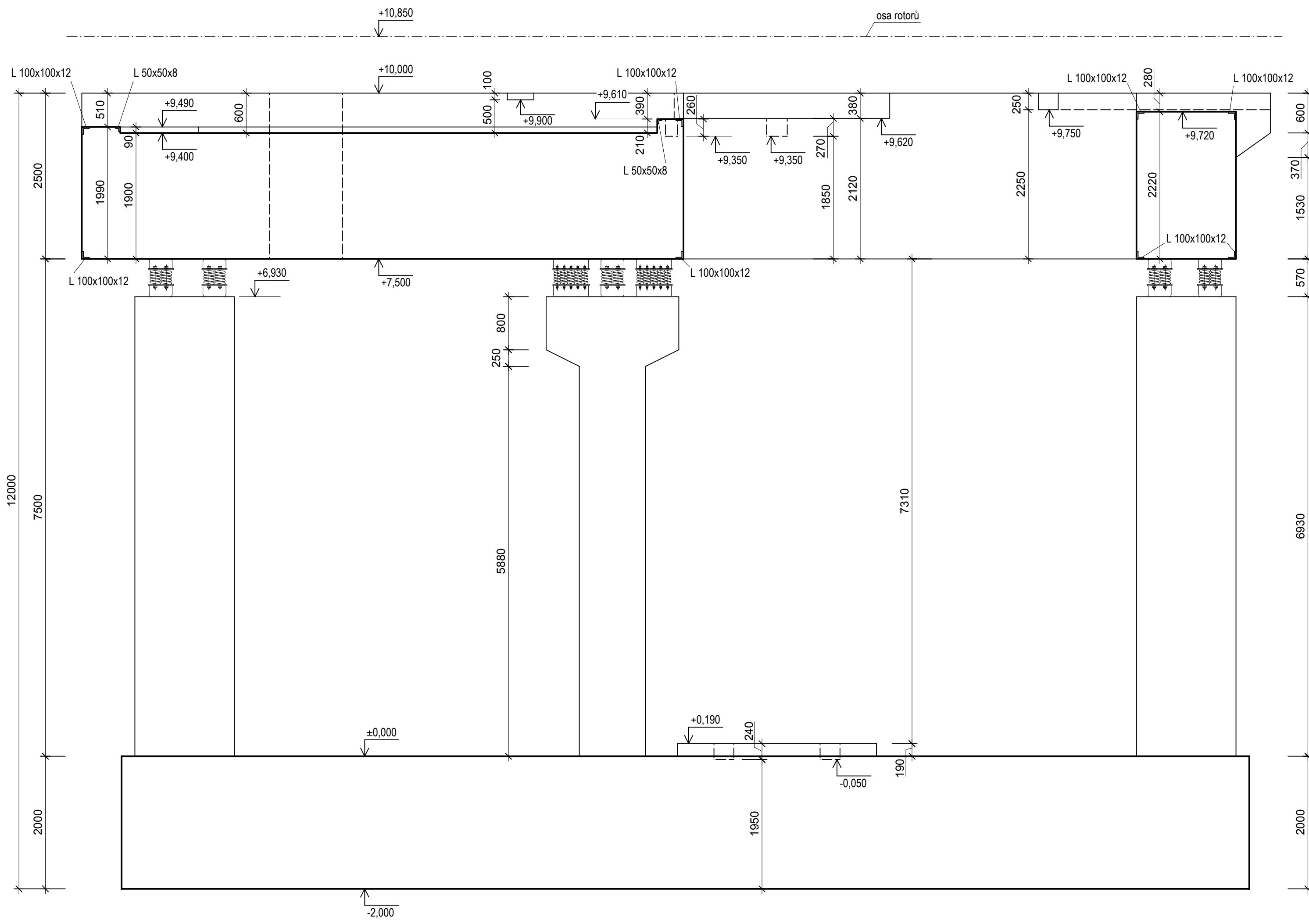
POZNÁMKA:

HORNÍ DESKA KONSTRUKCE ZÁKLADU:
 BETON: C 30/37, XC1, S4, D_{max} 16 mm
 VÝZTUŽ: B500B, krycí vrstva c = 50 mm

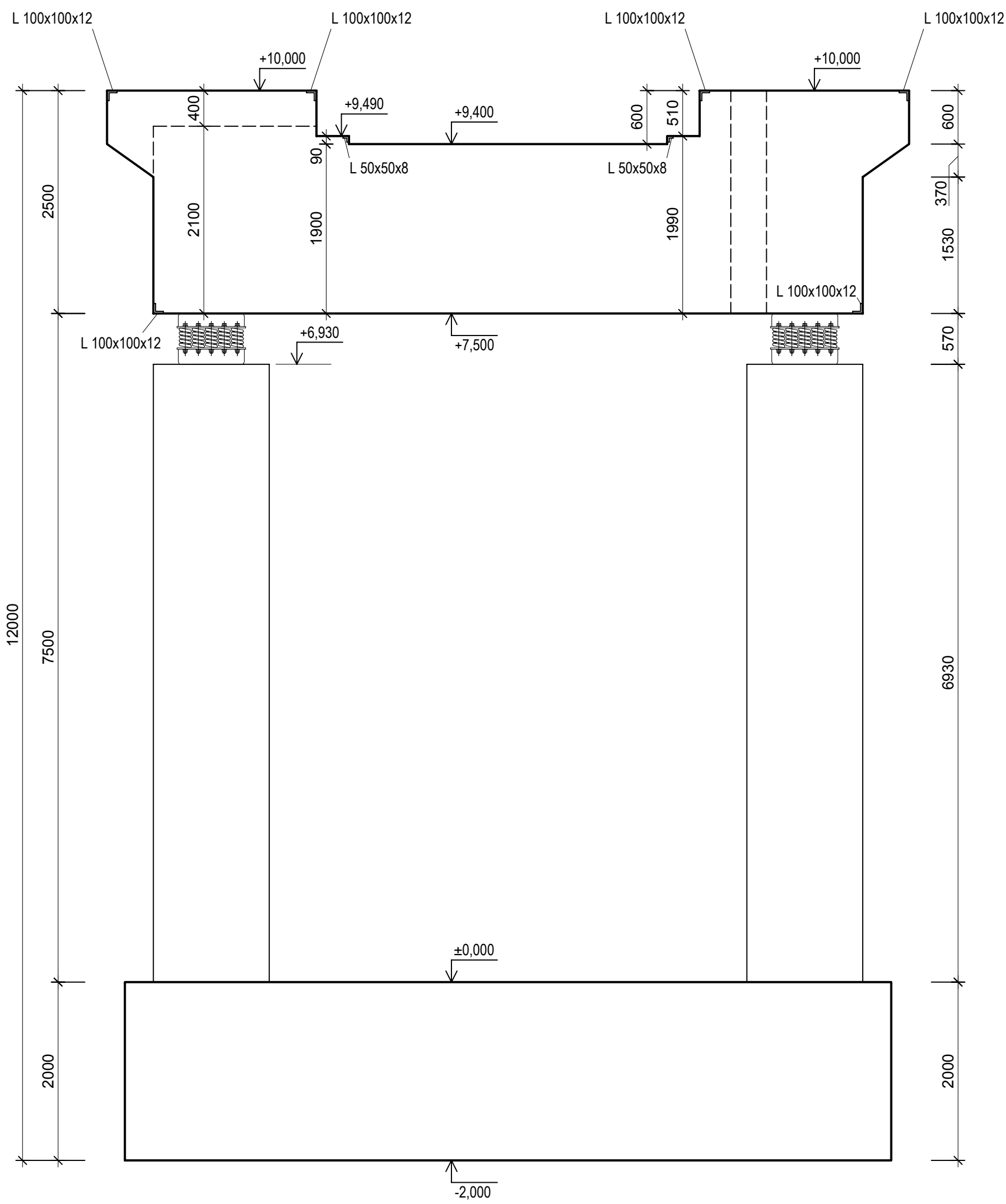
Souřadný systém: S-JTSK
 Výškový systém: B.p.V.
 ± 0,000 = 13.600 m.n.m.

VYPRACOVAL: Bc. Vojtěch Herejk	DIPLOMOVÁ PRÁCE	MÍSTO STAVBY: Värö, Švédsko
VEDOUcí PROJEKTU: Ing. Petr Kesi	PROJEKT: Statická a dynamická analýza železobetonové horní desky základu turbosoustrojí na projekt Värö, Švédsko	INVESTOR: Doosan Škoda Power s.r.o.
FAKULTA STROJINŽENÝCH VĚD ZÁPADOČESKÉ UNIVERSITY V PLZNI	FORMÁT: A1	MĚŘÍTKO: 1:50
katedra MECHANIKY Univerzity 22, Plzeň 306 14	DATUM: 5/2016	Č. VÝKRESU: D.1.2.1
VÝKRES: Půdorys základové konstrukce turbosoustrojí		

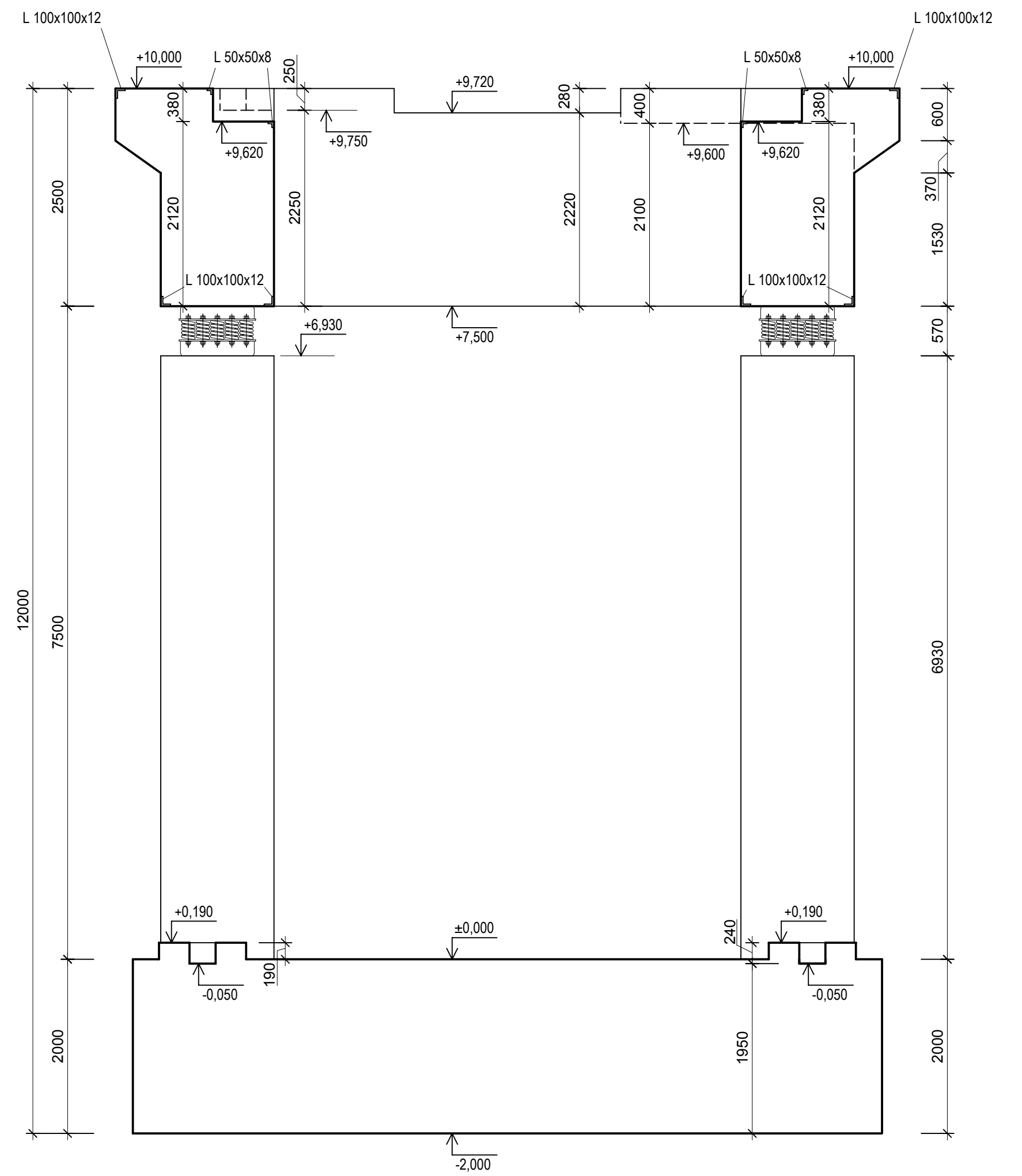
PODÉLNÝ ŘEZ A-A' KONSTRUKCÍ ZÁKLADU TURBOSOUSTROJÍ



PŘÍČNÝ ŘEZ B-B' KONSTRUKCÍ ZÁKLADU TURBOSOUSTROJÍ




PŘÍČNÝ ŘEZ C-C' KONSTRUKCÍ ZÁKLADU TURBOSOUSTROJÍ



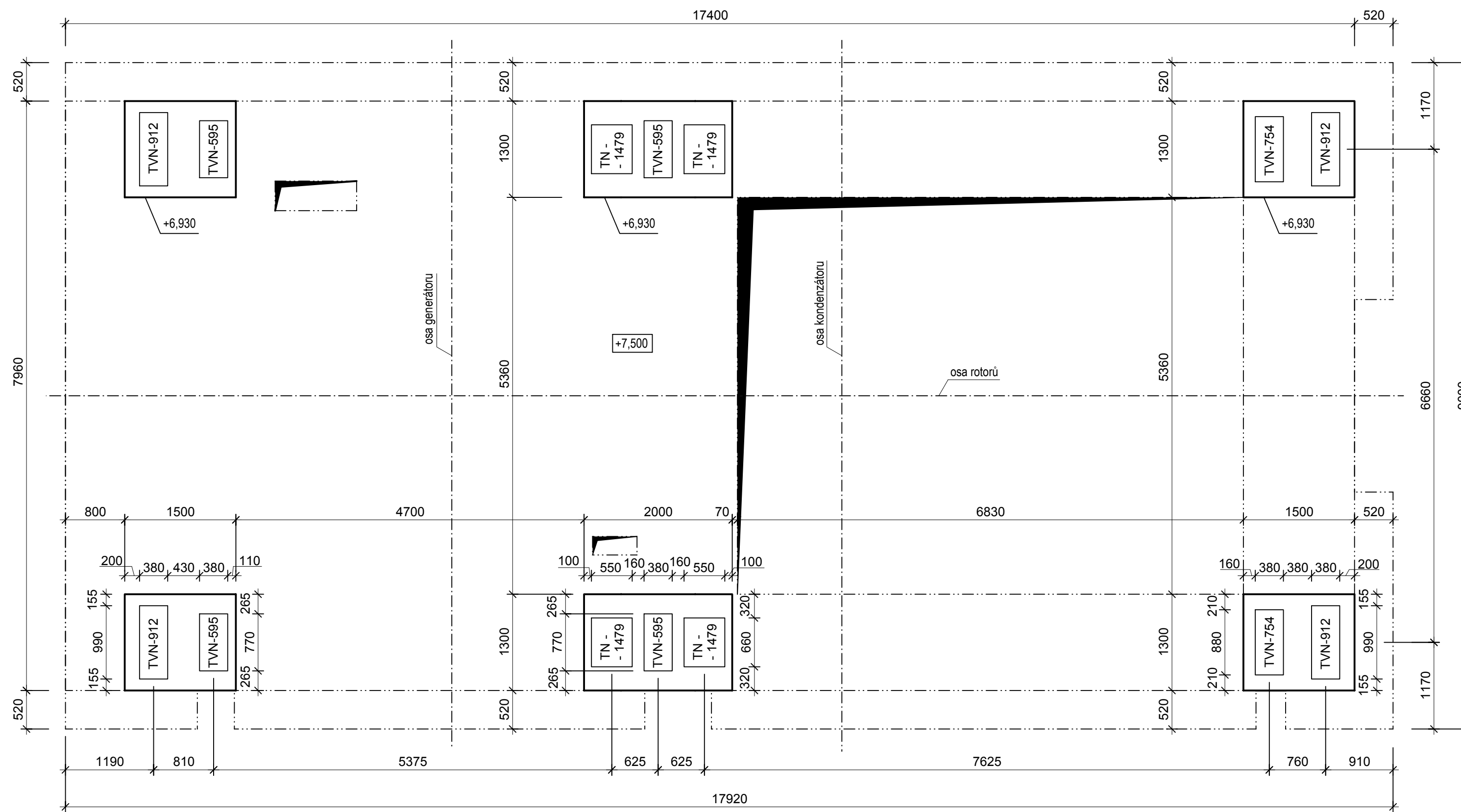
POZNÁMKA:

HORNÍ DESKA KONSTRUKCE ZÁKLADU:
 BETON: C 30/37, XC1, S4, Dmax 16 mm
 VÝZTUŽ: B500B, krycí vrstva c = 50 mm

Souřadný systém: S-JTSK
 Výškový systém: B.p.V.
 ± 0,000 = 13,600 m.n.m.

VYPRACOVAL: Bc. Vojtěch Herejk	DIPLOMOVÁ PRÁCE	MÍSTO STAVBY: Värö, Švédsko
VEDOUcí PROJEKTU: Ing. Petr Kestl	PROJEKT: Statická a dynamická analýza železobetonové horní desky základu turbosoustrojí na projekt Värö, Švédsko	INVESTOR: Doosan Škoda Power s.r.o.
 katedra MECHANIKY Univerzita 22, Pilsen 306 14	FORMÁT: A1 MĚŘÍTKO: 1:50 DATUM: 5/2016 Č. VÝKRESU: D.1.2.2	VÝKRES: Řezy základovou konstrukcí turbosoustrojí

PŮDORYS NAVRŽENÝCH PRUŽINOVÝCH PRVKŮ GERB

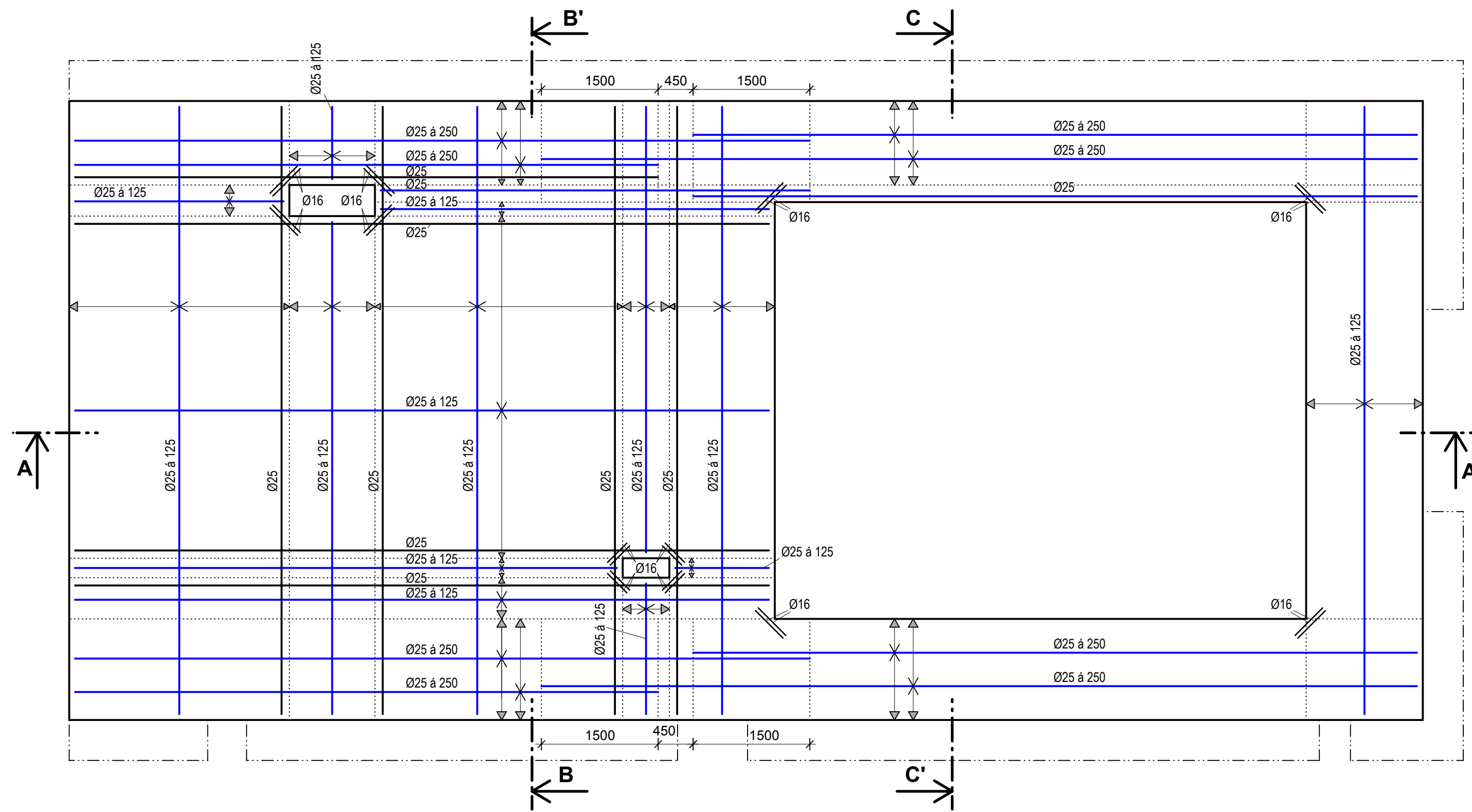


SPECIFIKACE PRUŽINOVÝCH PRVKŮ GERB						
OZNAČENÍ	MAX. ZATÍŽENÍ	TUHOSTI		DÉLKA	ŠÍŘKA	VÝŠKA
	F_{max} [kN]	k_v [kN/m]	k_h [kN/m]	L [mm]	B [mm]	H [mm]
TVN-595	595	18 610	2 900	770	380	570
TVN-754	754	23 560	3 620	880	380	570
TVN-912	912	28 510	4 340	990	380	570
TN-1479	1475	46 220	6 820	660	550	570

Souřadný systém: S-JTSK
 Výškový systém: B.p.V.
 ± 0,000 = 13,600 m.n.m.

VYPRACOVAL: Bc. Vojtěch Herejk	DIPLOMOVÁ PRÁCE	MÍSTO STAVBY: Värö, Švédsko
VEDOUCÍ PROJEKTU: Ing. Petr Kesl	PROJEKT: Statická a dynamická analýza železobetonové horní desky základu turbosoustrůj na projekt Värö, Švédsko	INVESTOR: Doosan Škoda Power s.r.o.
 FAKULTA APLIKOVANÝCH VĚD ZÁPADOČESKÉ UNIVERZITY V PLZNI katedra MECHANIKY Univerzitní 22, Plzeň 306 14	FORMÁT: A2	MĚŘÍTKO: 1:50
	DATUM: 5/2016	Č. VÝKRESU: D.1.2.3
	VÝKRES: Půdorys navržených pružinových prvků Gerb	

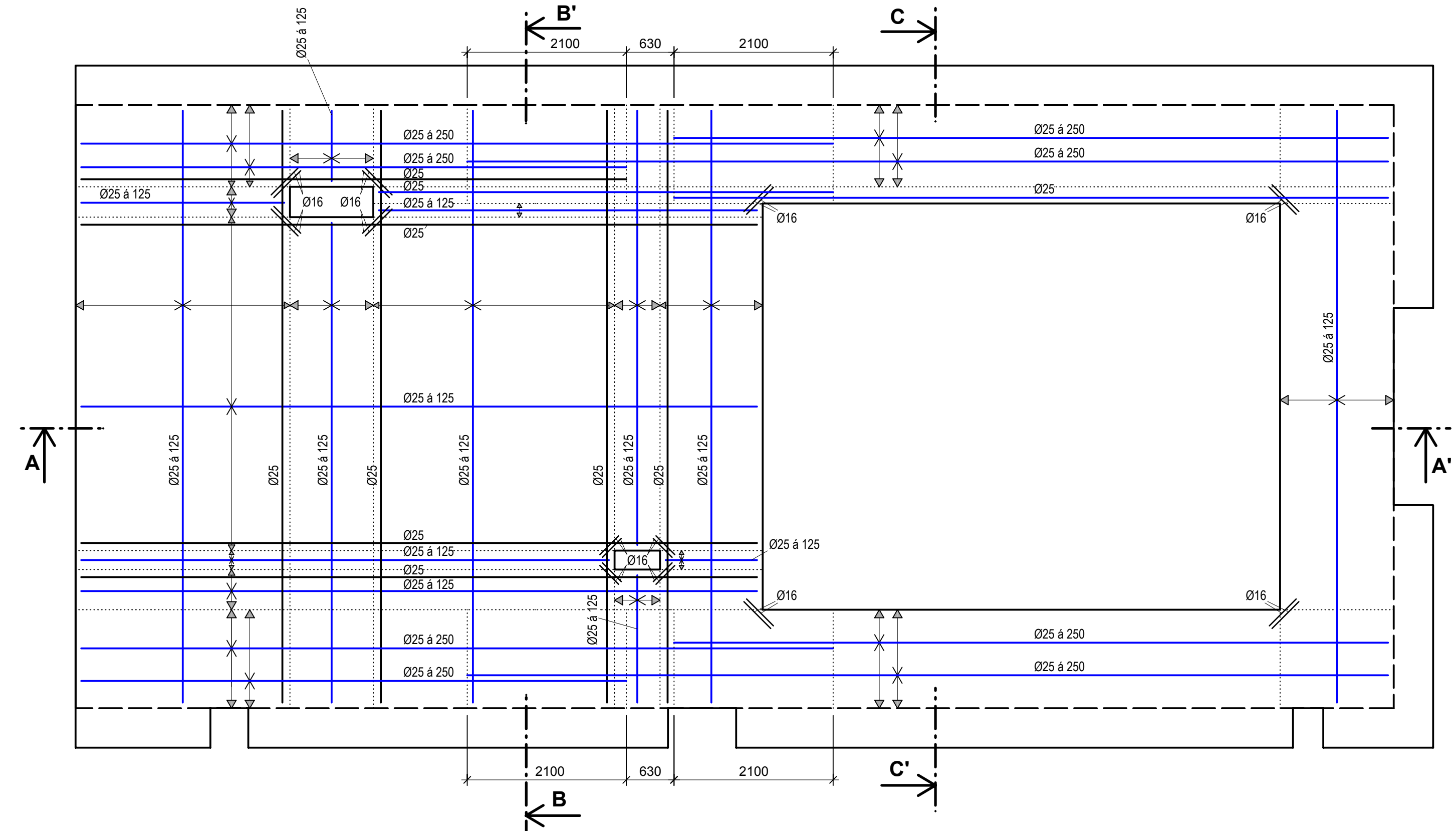
PŮDORYS NAVRŽENÉ VÝZTUŽE PŘI DOLNÍM POVRCHU DESKY (úroveň +7,500)



Poznámka:

Ze všech vnějších stran desky včetně levé příčné strany otvoru pro turbínu bude každý druhý prut zakotven 1500 mm směrem nahoru.
Ze všech čtyřech stran obou otvorů v deskové části bude každý prut zakotven 1500 mm směrem nahoru.

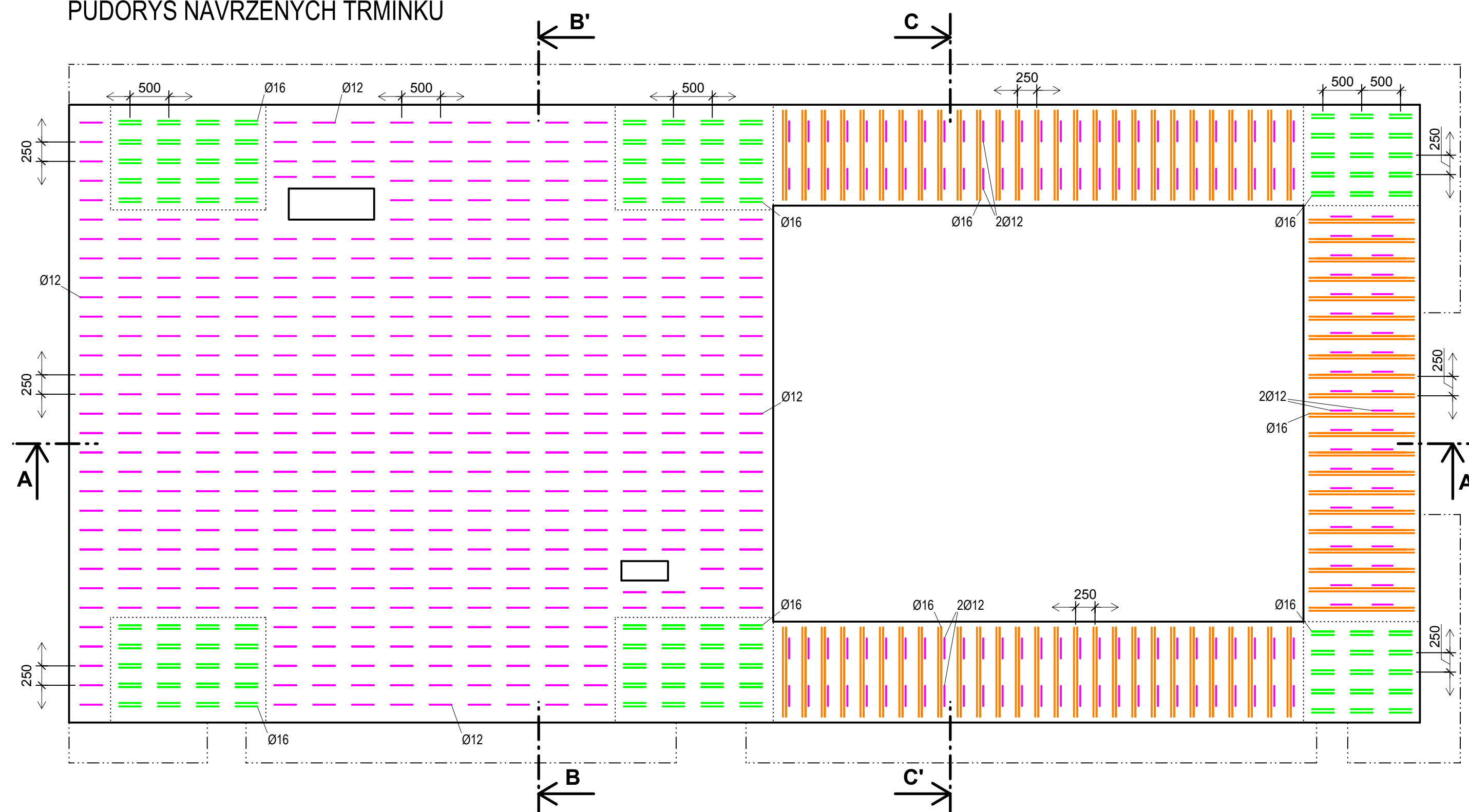
PŮDORYS NAVRŽENÉ VÝZTUŽE PŘI HORNÍM POVRCHU DESKY (úroveň +9,400)



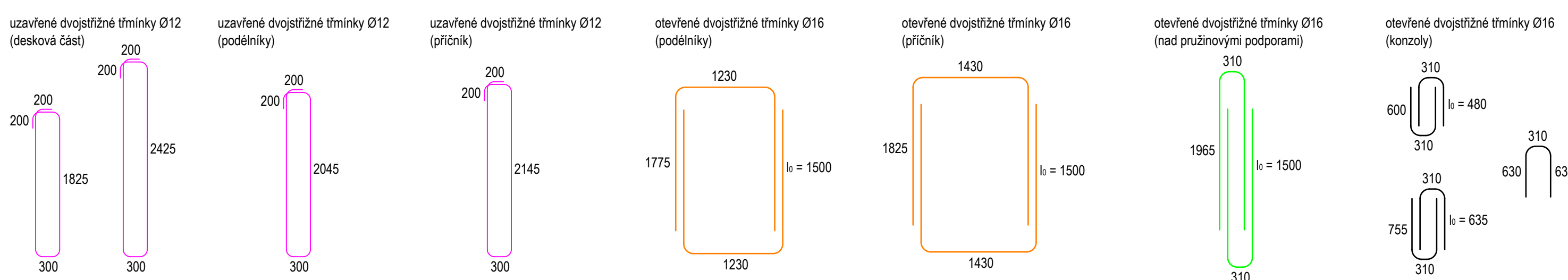
Poznámka:

Ze všech vnějších stran desky včetně levé příčné strany otvoru pro turbínu bude každý druhý prut zakotven 1500 mm směrem dolů.
Ze všech čtyřech stran obou otvorů v deskové části bude každý prut zakotven 1500 mm směrem dolů.

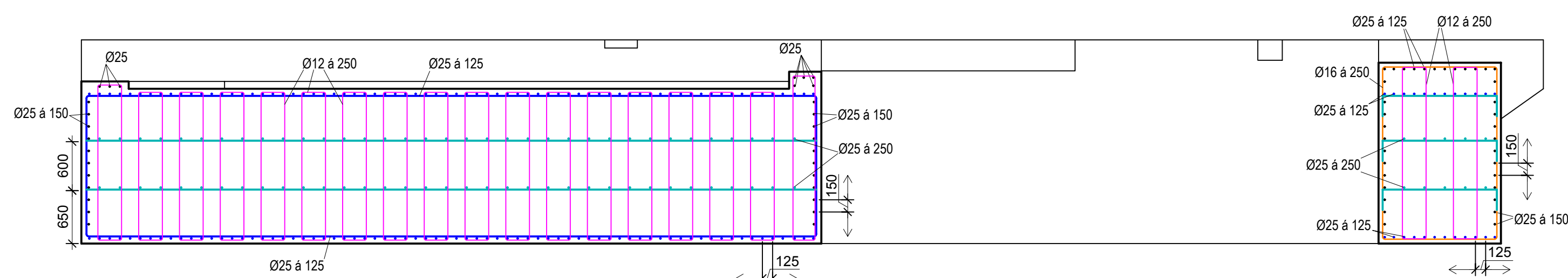
PŮDORYS NAVRŽENÝCH TRŽMÍNKŮ



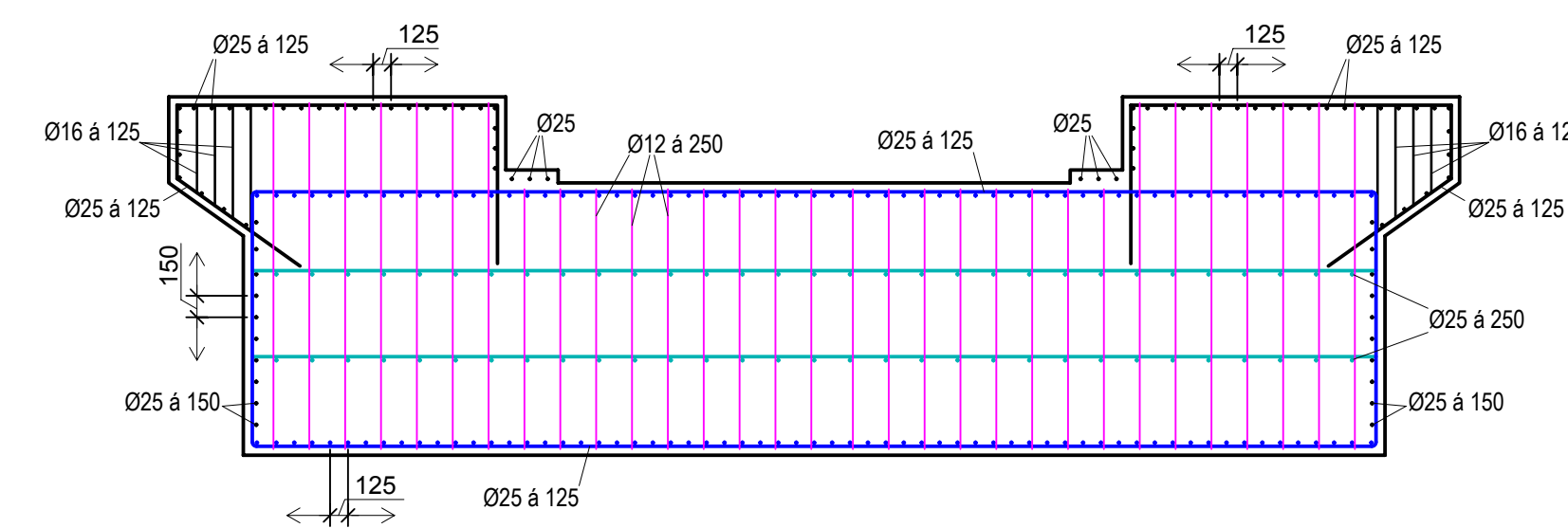
NAVŘENÉ TRŽMÍNKY



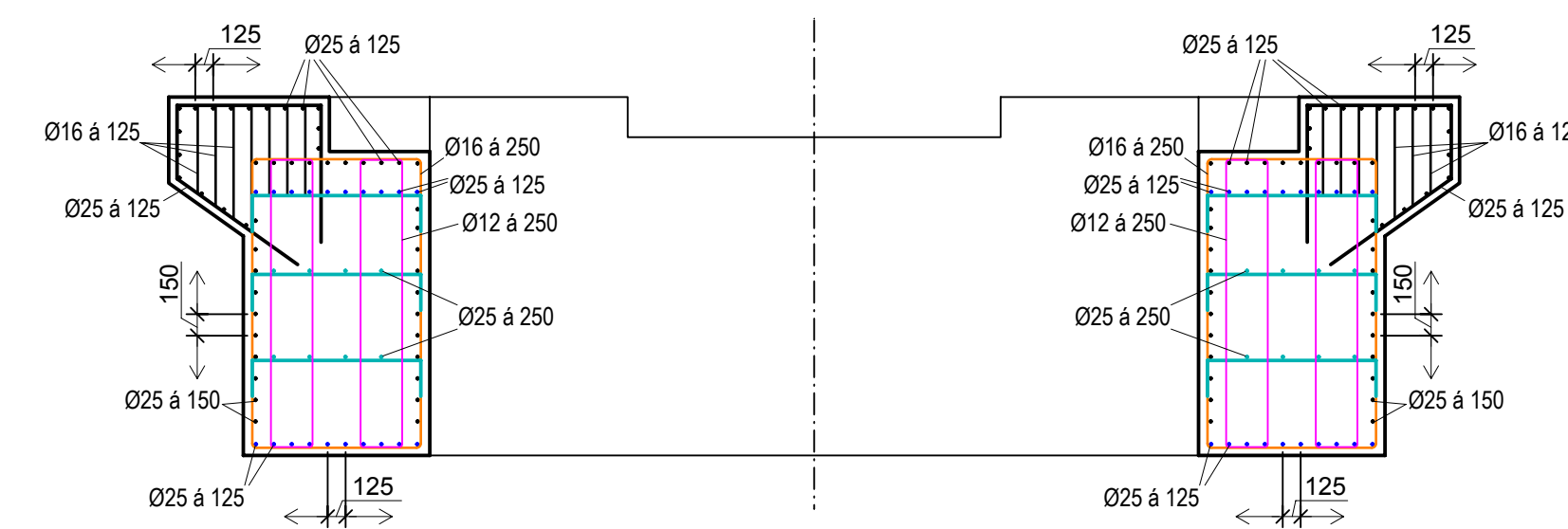
PODÉLNÝ ŘEZ A-A KONSTRUKCÍ ZÁKLADU TURBOSOUSTROJÍ



PŘÍČNÝ ŘEZ B-B KONSTRUKCÍ ZÁKLADU TURBOSOUSTROJÍ



PŘÍČNÝ ŘEZ C-C KONSTRUKCÍ ZÁKLADU TURBOSOUSTROJÍ



HORNÍ DESKA KONSTRUKCE ZÁKLADU:

BETON: C 30/37, XC1, S4, Dmax 16 mm
VÝZTUŽ: B500B, krycí vrstva c = 50 mm

vnitřní průměr zakřivení prutů Ø12: $\phi_m = 180$ mm
vnitřní průměr zakřivení prutů Ø16: $\phi_m = 240$ mm
vnitřní průměr zakřivení prutů Ø25: $\phi_m = 380$ mm

PODÉLNÁ VÝZTUŽ:
min. přesahová délka: $l_d = 1500$ mm
min. kotevní délka: $l_{d1} = 1500$ mm

kótováno v [mm] ke krajním povrchům profilů

VYPRACOVAL: VEDOUcí PROJEKTU: Ing. Petr Kestl	DIPLLOMOVÁ PRÁCE PROJEKT: Statická a dynamická analýza železobetonové horní desky základu turbosoustrojí na projekt Värö, Švédsko	MÍSTO STAVBY: Värö, Švédsko INVESTOR: Doosan Škoda Power s.r.o. FORMÁT: A1 MĚŘÍTKO: 1:50 DATUM: 6/2016 Č. VÝKRESU: D.1.2.4
Katedra MECHANIKY Univerzity 22, Píseň 306 14		VÝKRES: Půdorys a řezy výztuže horní desky základu turbosoustrojí