ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA DOPRAVNÍ

Bc. Kateřina Vlčková

POKROČILÉ STRUKTURÁLNÍ SIMULACE ŽELEZNIČNÍHO NÁVĚSTIDLA

Diplomová práce

2021

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta dopravní
děkan
Konviktská 20, 110 00 Praha 1

K618 ..... Ústav mechaniky a materiálů

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Bc. Kateřina Vlčková

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

N 3710 – IS – Inteligentní dopravní systémy

Název tématu (česky): **Pokročilé strukturální simulace železničního návěstidla**

Název tématu (anglicky): Advanced Structural Simulations of a Railway Signal Post

Zásady pro vypracování

Při zpracování diplomové práce se řiďte následujícími pokyny:

- Diplomová práce bude zaměřena na strukturální simulace železničního návěstidla s využitím metody konečných prvků a bude zahrnovat pokročilé numerické simulace železničního návěstidla s perspektivou pro rozšíření závěrů z analytických výpočtů dle platných norem.
- V práci budou provedeny dynamické simulace chování návěstidla zatíženého časovým průběhem pole tlaků odvozených jednoduchým předpisem.
- V závislosti na výsledcích simulací dle předchozího bodu může být práce rozšířena o dynamické simulace chování návěstidla zatíženého na základě platných norem, na základě výsledků simulace proudění, popř. o komplexní simulace kombinující několik dílčích simulací včetně využití centra pro intenzivní výpočty. Rozsah a struktura těchto simulací se bude odvíjet od závěrů vycházejících z výchozí dynamické simulace.
- Cílem práce je vytvořit komplexní numerický model železničního návěstidla, který bude možné použít pro simulaci rámcového chování konstrukce v řadě různých scénářů zahrnujících např. průjezd vlaku nebo vliv povětrnostních podmínek.

Rozsah grafických prací:	není stanoven
Rozsah průvodní zprávy:	minimálně 55 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)
Seznam odborné literatury:	Strømmen E.N. (2014) The Finite Element Method in Dynamics. In: Structural Dynamics. Springer Series in Solid and Structural Mechanics, vol 2. Springer, Cham Huei-Huang L., Finite Element Simulations with Ansys Workbench 18, SDC Publications - Computers, 2018 Rainieri, C., (2014), Operational Modal Analysis of Civil Engineering Structures, Springer

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Tomáš Fíla, Ph.D.**
Ing. Petr Koudelka
Ing. Petr Zlámal, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: **17. července 2020**
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání diplomové práce: **17. května 2021**
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia

L. S.

prof. Ing. Ondřej Jiroušek, Ph.D.
vedoucí
Ústavu mechaniky a materiálů

doc. Ing. Pavel Hrubeš, Ph.D.
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání diplomové práce.

Bc. Kateřina Vlčková
jméno a podpis studenta

V Praze dne..... 17. července 2020

Poděkování

Na tomto místě bych ráda poděkovala Ing. Tomáši Fílovi, Ph.D., Ing. Petru Zlámalovi, Ph.D. a Ing. Petru Koudelkovi za odborné vedení, cenné rady, trpělivost a ochotu, se kterou se mi věnovali nejen během tvorby diplomové práce.

Dále bych ráda poděkovala své rodině a přátelům za jejich podporu a trpělivost v průběhu celého mého studia.

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na ČVUT v Praze Fakultě dopravní.

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracovala samostatně a že jsem uvedla veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Nemám žádný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 9 srpna 2021 .....

podpis

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

POKROČILÉ STRUKTURÁLNÍ SIMULACE ŽELEZNIČNÍHO NÁVĚSTIDLA

diplomová práce
srpen 2021
Bc. Kateřina Vlčková

ABSTRAKT

Předmětem diplomové práce „Pokročilé strukturální simulace železničního návěstidla“ je vytvoření komplexního numerického modelu reálného železničního návěstidla, které bude možné použít pro simulaci rámcového chování konstrukce v řadě různých scénářů.

Pro vytvoření modelu byl použit program ANSYS Workbench 2021 R1, který pracuje s metodou konečných prvků. Byl vytvořen detailní model železničního návěstidla SNA-100. Na tento model bylo dále aplikováno zatížení v několika statických a dynamických simulacích. Vrcholem práce je dynamická simulace zahrnující kritické zatížení od průjezdu dvou vlaků definované platnými stavebními a dalšími normami. Cílem této simulace bylo určit spolupůsobení dynamických vlivů a vlastních frekvencí na jeho celkovou odezvu při zatížení. Nakonec došlo k porovnání časové náročnosti a maximálních výchylek konstrukce pro všechny provedené simulace.

KLÍČOVÁ SLOVA

Železniční návěstidlo, numerický model, kmitání, metoda konečných prvků, numerická simulace, ANSYS.

CZECH TECHNICAL UNIVERSITY IN PRAGUE

Faculty of transportation sciences

ADVANCED STRUCTURAL SIMULATIONS OF A RAILWAY SIGNAL POST

diploma thesis
august 2021
Bc. Kateřina Vlčková

ABSTRACT

The subject of the diploma thesis „Advanced structural simulations of a railway signal post“ is to develop a complex numerical model of a real railway signal post, which will be used as a prediction tool of a deformation of the construction during many different scenarios.

In this thesis, Finite Element Analysis software ANSYS Workbench 2021 R1 was used. A detailed model of a railway signal post SNA-100 was created. It was then used in a number of static and dynamic simulations. The highlight of the work is a dynamic simulation involving critical load from the passage of two trains defined by valid construction and other standards. The main purpose of this simulation was to determine whether there is an interaction between dynamic effects and eigenfrequencies in regards to response of the construction to the applied load. The final step was a comparison of time usage and total deformation messured on the construction of all the performed simulations.

KEY WORDS

Railway signal post, numerical model, oscillation, finite element method, numerical simulation, ANSYS.

Obsah

Seznam použitých zkratek **8**

1 Úvod **9**

I Teoretická část **11**

2 Železniční návěstidlo SNA-100 **12**

3 Související normy **14**

3.1 Zatížení větrem 14

3.1.1 Stanovení větrné oblasti 14

3.1.2 Výpočet návrhového tlaku od větru 16

3.2 Zatížení od průjezdu vlaku 18

3.3 Diskuze 20

4 Metoda konečných prvků **21**

4.1 Princip MKP 21

4.1.1 Lagrangeův variační princip 22

4.1.2 Diskretizace 22

4.2 Software ANSYS 23

II Praktická část **24**

5 Numerický model **25**

5.1 Parametry modelu 25

5.2 Materiálové vlastnosti modelu 28

6 Zatížení **30**

6.1 Stanovení větrné oblasti 30

6.2 Výpočet návrhového tlaku od větru 31

6.2.1 Tlak od větru působící na hlavní stožár 31

6.2.2 Tlak od větru působící na svítilny rovnoběžně s osou koleje 32

6.2.3 Tlak od větru působící na svítilny kolmo s osou koleje 33

6.3 Výpočet návrhového tlaku od průjezdu vlaku 33

6.3.1 Vnější tlak od průjezdu vlaku působící na hlavní stožár 34

6.3.2 Vnější tlak od průjezdu vlaku působící na svítilny 34

6.4 Simulace zatížení tlakem 35

7 Společné parametry všech simulací **37**

7.1 Zatížení 37

7.1.1 Zatížení od větru 37

7.1.2 Průjezd jednoho vlaku 39

7.1.3 Průjezd dvou vlaků 39

7.2 Diskretizace modelu 41

7.3 Parametry tlumení 41

7.4 Použitý hardware 42

8 Statické simulace **43**

8.1 Simulace průjezdu jednoho vlaku 43

8.2 Simulace průjezdu dvou vlaků 44

8.2.1 Umístění návěstidla mezi koleje 44

8.2.2 Dvojnásobek zatížení 45

9 Dynamické simulace **46**

9.1 Simulace průjezdu jednoho vlaku 47

9.1.1 Zatížení neměnné v čase 47
9.1.2 Zatížení proměnné v čase 48
9.2 Simulace průjezdu dvou vlaků 50
9.3 Doplňující simulace průjezdu jednoho vlaku 52

10 Porovnání **54**

11 Diskuze **57**

12 Závěr **60**

Seznam použité literatury **60**

Seznam obrázků **63**

Seznam tabulek **65**

Seznam příloh **66**

Seznam použitých zkratek

MKP	metoda konečných prvků
PUR	proměnný ukazatel rychlosti

Kapitola 1

Úvod

V současné době dochází k neustálému zpřísňování nároků na všechna odvětví dopravy včetně dopravy železniční. Ta hraje významnou roli ve strategii rozvoje státu například díky stavbě vysokorychlostních tratí. Narůstající požadavky na objem přepraveného nákladu a osob, přepravní rychlost a další parametry dopravy zvyšují i traťovou rychlost. Ta ovlivňuje mimo jiné i konstrukce prvků železniční zabezpečovací techniky, jako jsou železniční návěstidla, která tak čelí fyzikálním jevům způsobených vyšší rychlostí projíždějících vlaků.

Železniční návěstidla hrají v železniční dopravě významnou roli. Zajišťují bezpečnost provozu a jejich konstrukce tedy musí být navržena tak, aby za všech předpokládaných okolností nezasahovala do průjezdného profilu koleje, byla stabilní a deformace stále umožňovala čitelnost signálu za daných podmínek. Návrh navíc musí umožňovat jednoduchou montáž a údržbu, a tedy i snadný přístup ke všem částem konstrukce.

Pro ověření bezpečnosti využití nově navržené konstrukce jsou prováděny analytické výpočty dle platných stavebních a dalších norem. Tato metoda počítá s pravděpodobností výskytu dané kombinace zatížení za celou dobu využití konstrukce. Normové koeficienty se tak nevážou pouze na její nominální únosnost, ale také dlouhodobou životnost. Takto provedené výpočty ovšem nezahrnují přesný dynamický výpočet kmitání a jedná se tak o výrazné zjednodušení daného problému.

Ověření stability konstrukce a bezpečnosti jejího použití za pomoci validního numerického modelu umožňuje oproti analytickým výpočtům simulovat reálné scénáře, jako je např. průjezd dvou vlaků v těsné blízkosti návěstidla ve vysoké rychlosti, vichřice, vliv námrazy a další. Dynamické simulace navíc umožňují pokročilou analýzu kmitání s uvažováním přesné geometrie konstrukce. Takto provedená simulace by měla být postavena na validovaném modelu a v případě zvlášť kritických podmínek ověřena i experimentální zkouškou. U celé řady inženýrských aplikací však tento postup nelze využít vzhledem k časové, technologické či finanční náročnosti experimentu. V takových případech může numerická simulace poskytnou důležité poznatky o chování konstrukce.

Cílem této práce je vytvoření numerického modelu prototypu železničního návěstidla SNA-100, který bude možné využít pro simulaci rámcového chování konstrukce během různých scénářů jsou jsou např. rozličné povětrnostní podmínky či výše zmíněný průjezd vlaků.

Prvním krokem bylo s pomocí softwaru ANSYS Workbench 21.1, který využívá metodu konečných prvků, vytvořit detailní model železničního návěstidla SNA-100 vyvinutého AŽD Praha s.r.o. Ačkoli model neobsahuje některé části konstrukce, jako je například žebřík, jedná se o detailní model s ohledem na strukturální chování konstrukce a provedené výpočty. Na tomto modelu byly následně provedeny všechny simulace.

Dále byl proveden výpočet hodnot zatížení tlakem pro všechny části konstrukce návěstidla dle platných norem. První provedenou simulací byla simulace statická, která odpovídá statickému výpočtu a byla provedena v několika variantách.

Následně byly vytvořeny čtyři simulace dynamické. Úvodní z nich počítá s průjezdem jednoho vlaku v rychlosti $200\mathrm{km} \cdot \mathrm{h}^{-1}$ v těsné blízkosti návěstidla, ale zatížení se nemění v čase. Ve druhé dynamické simulaci již dochází ke změně směru zatížení v čase dle norem a konstrukce je opět zatížena větrem a průjezdem jednoho vlaku. Následně byla vytvořena simulace situace, kdy dojde k míjení dvou vlaků v rychlosti $200\mathrm{km} \cdot \mathrm{h}^{-1}$ v těsné blízkosti železničního návěstidla tj. umístění návěstidla mezi kolejemi.

Protože byl patrný výrazný rozdíl ve velikosti maximální výchylky konstrukce v simulacích statických a dynamických, byla provedena ještě doplňující dynamická simulace průjezdu jednoho vlaku za současného působení větru ve směru rovnoběžném s osou koleje, kde nebyly použity hodnoty návrhových tlaků, ale hodnoty tlaků reprezentativních. Reprezentativní tlak odpovídá tlaku návrhovému před jeho vynásobením součinitelem bezpečnosti $\gamma_\mathrm{f} = 1,5$.

Po provedení všech zmíněných simulací došlo k porovnání a diskuzi výsledků. Výstup této práce tvoří detailní model charakterizující chování reálného návěstidla SNA-100.

Hlavním výsledkem práce je srovnání účinků od návrhových hodnot, které byly stanoveny staticky dle platných norem a hodnot ze simulací zahrnujících reálné dynamické chování konstrukce.

Část I

Teoretická část

Kapitola 2

Železniční návěstidlo SNA-100

Jak již bylo zmíněno výše, nároky na staniční a traťová zabezpečovací zařízení v železniční dopravě se stále zvyšují a je tak nutné vyvíjet nové konstrukce, které budou schopné těmto požadavkům vyhovět. Na zvýšení požadované traťové rychlosti reaguje AŽD Praha s.r.o. vývojem nového typu železničního návěstidla SNA-100, jehož konstrukce byla vytvořena tak, aby odolala traťové rychlosti až $200\mathrm{km} \cdot \mathrm{h}^{-1}$ a vnějším povětrnostním vlivům. [1]

Obrázek 1: Železniční návěstidlo SNA-100

Zvýšení traťové rychlosti ale není jediným aspektem, který návrh ovlivňuje. Dalším kritériem je možnost osazení návěstidla vyšším počtem světel a indikátorů PUR. Proto konstrukce disponuje možností osazení až šesti svítilnami a dvěma indikátory PUR neboli proměnnými rychlostními ukazateli. Každá svítilna či indikátor PUR je tak řešena jako samostatný modul a po jejich

spojení dojde k vytvoření světelné sestavy. Jednotlivé moduly je tak možné měnit i na již sestaveném návěstidle.Prototyp, který byl využit pro tvorbu numerického modelu je osazen celkem pěti svítilnami a jedním indikátorem PUR. [1]

Na fotografii na obrázku 1 je možné vidět jeden z prototypů železničního návěstidla SNA-100 umístěného na trati Obrnice - Čížkovice nedaleko železniční stanice Libčeves. Tato trať je také známá pod názvem Švestková dráha a jedná se o platformu AŽD Praha s.r.o. pro ověření prototypů v provozu. Traťová rychlost zde dosahuje hodnoty až $100\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$. Oba prototypy byly umístěné v blízkosti stanice Libčeves dne 20. března 2018. Experimentálně-numerická analýza tohoto návěstidla byla předmětem mé bakalářské práce. V rámci této práce byla vytvořena úvodní simulace s využitím metody konečných prvků, která byla provedena na geometricky zjednodušeném modelu konstrukce návěstidla (podrobněji viz [2]).

Obrázek 2: Využitý prototyp železničního návěstidla SNA-100 na mapě [3]

Pro posouzení takto vzniklé nové konstrukce je nutné ji dimenzovat. Dimenzování definuje například mohutnost hlavního stožáru, zaoblení rohů jeho průřezu a další vlastnosti konstrukce. Ta musí vyhovovat i té nejhorší kombinaci vnějších podmínek, a to i přes velmi malou pravděpodobnost, že tyto podmínky nastanou. Jedná se například o souběh extrémně nízkých teplot a s tím související vznik námrazy při zatížení konstrukce obsluhou návěstidla ve chvíli, kdy dojde k míjení dvou vlaků v těsné blízkosti návěstidla. Velikost zatížení, které je třeba uvažovat určují platné stavební a další normy. Ty vybírají relevantní zatížení, stanovují jeho velikost a dále definují výpočet návrhových zatížení, která jsou následně využita v simulacích. Související normy jsou shrnuty v následující kapitole.

Kapitola 3

Související normy

K posouzení stability konstrukce, která je zatížena působením větru a dále tlakem od průjezdu vlaků jsou využívány již zmíněné normy ČSN EN 1991-1-4 a ČSN EN 1991-2.

3.1 Zatížení větrem

Zatížení větrem je stanoveno na základě normy ČSN EN 1991-1-4: Zatížení konstrukcí - Část 1-4, obecná zatížení - Zatížení větrem.

Takové zatížení je proměnné v čase a působí jako tlak na vnější povrchy konstrukcí. Norma ho popisuje jako zjednodušený soubor tlaků nebo sil, jejichž účinky jsou ekvivalentní maximálním účinkům turbulentního větru. [4]

3.1.1 Stanovení větrné oblasti

Pro stanovení větrné oblasti je nutné znát několik vstupních parametrů. Jedná se o základní rychlost větru v_b, ze které je dále určena střední rychlost větru v_m a je závislá na větrných podmínkách, změnu větru s výškou, drsnost terénu a orografii. Proměnlivá složka větru je vyjádřena intenzitou turbulence. [4]

Základní rychlost větru se stanoví dle vzorce [4]:

$$v_{\mathrm{b}} = c_{\mathrm{dr}} \cdot c_{\mathrm{season}} \cdot v_{\mathrm{b,0}} \tag{1}$$

kde v_{b} je základní rychlost větru ve výšce 10 m nad zemí, $v_{\mathrm{b,0}}$ je výchozí základní rychlost větru, c_{dr} je součinitel směru větru a c_{season} je součinitel ročního období. Výchozí základní rychlost větru $v_{\mathrm{b,0}}$ je definována jako charakteristická desetiminutová střední rychlost větru, nezávislá na směru větru a ročním období, ve výšce 10 m nad zemí v terénu bez překážek s nízkou vegetací a izolovanými překážkami, které jsou od sebe vzdálené minimálně dvacetinásobek výšky překážek.

Dalším krokem je určení kategorie terénu a jeho parametrů z_0, představující parametr drsnosti terénu a $z_{\min}$, který udává minimální výšku. Kategorie terénu se stanovuje pomocí tabulky 1.

Tabulka 1: Kategorie terénů a jejich parametry [4]

Kategorie terénu	z_0 [m]	$z_{\min}$ [m]
0 Moře nebo pobřežní oblasti vystavené otevřenému moři	0,003	1
I Jezera nebo vodorovné oblasti se zanedbatelnou vegetací a bez překážek	0,01	1
II Oblasti s nízkou vegetací jako je tráva a s izolovanými překážkami (stromy, budovy), jejichž vzdálenosti jsou větší než dvacetinásobek výšky překážek	0,05	2
III Oblasti rovnoměrně pokryté vegetací nebo budovami, nebo s izolovanými překážkami, jejichž vzdálenost je maximálně dvacetinásobek výšky překážek (jako jsou vesnice, předměstský terén, souvislý les)	0,3	5
IV Oblasti, ve kterých je nejméně 15 % povrchu pokryto pozemními stavbami, jejichž průměrná výška je větší než 15 m	1,0	10

Následuje výpočet součinitele terénu dle vzorce [4]:

$$k_{\mathrm{r}} = 0,19 \cdot \left(\frac{z_0}{z_{0,\mathrm{II}}}\right)^{0,07} \tag{2}$$

kde $z_{0,\mathrm{II}}$ je rovno hodnotě 0,05 (viz tabulka 1).

Díky znalosti parametrů terénu a součinitele terénu k_{r} je dále možné stanovit součinitel drsnosti terénu c_{r}, který vyjadřuje změnu střední rychlosti větru způsobenou výškou nad úrovní terénu a drsností povrchu terénu na návětrné straně konstrukce [4]:

$$c_{\mathrm{r}}(z) = k_{\mathrm{r}} \cdot ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \tag{3}$$

Střední rychlost větru v_{m} se potom stanoví dle vzorce:

$$v_{\mathrm{m}} = c_{\mathrm{r}} \cdot c_0 \cdot v_{\mathrm{b}} \tag{4}$$

Další z parametrů, součinitel orografie c_0, se používá v takovém terénu, kde orografie (např. kopce, útesy atp.) zvyšuje rychlost větru o více než 5 %. Pokud je průměrný sklon návětrného terénu menší než 3°, tak lze účinky orografie zanedbat. [4]

Jak již bylo zmíněno výše proměnlivou složku větru vyjadřuje intenzita turbulence. Tu je možné stanovit dle vztahu [4]:

$$l_{\mathrm{v}} = \frac{k_{\mathrm{I}}}{c_0 \cdot ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \tag{5}$$

kde k_I je součinitel turbulence a jeho doporučená hodnota je 1,0.

Pro určení dynamického tlaku větru je ještě nutné stanovit součinitel expozice c_e [4]:

$$c_\mathrm{e} = (1 + 7 \cdot l_\mathrm{v}) \cdot \left(\frac{v_\mathrm{m}}{v_\mathrm{b}}\right)^2 \tag{6}$$

Základní dynamický tlak je potom [4]:

$$q_\mathrm{b} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_\mathrm{b}^2 \tag{7}$$

kde ρ je měrná hmotnost vzduchu, která závisí na nadmořské výšce, teplotě a barometrickém tlaku, který je v oblasti očekáván při silné vichřici. Doporučená hodnota je 1,25 kg/m^3.

Posledním krokem výpočtu je stanovení maximální hodnoty dynamického tlaku [4]:

$$q_\mathrm{p} = c_\mathrm{e} \cdot q_\mathrm{b} \tag{8}$$

3.1.2 Výpočet návrhového tlaku od větru

Z maximální hodnoty dynamického tlaku je již možné stanovit návrhový tlak od větru, který však závisí i na dalších proměnných.

Prvním z parametrů, které je potřeba vzít v úvahu, je tvar konstrukce. Pro obdélníkové průřezy s ostrými rohy je nejprve stanoven poměr d/b, kde d a b jsou rozměry průřezu. Z grafu na obrázku 3 je dále možné odečíst hodnotu součinitele síly $c_{\mathrm{f},0}$. [4]

Pro čtvercové průřezy se zaoblenými rohy je dále nutné určit hodnotu redukčního součinitele ψ_r. Jeho hodnota závisí na poloměru zaoblení r a stanoví se aproximací dle grafu na obrázku 4. [4]

Dalším významným parametrem je štíhlostní poměr λ. Ten je stanoven v závislosti na výšce, resp. délce, konstrukce. V případě železničního návěstidla se jedná o výšku $l < 15$ m, kdy se štíhlostní poměr určí jako menší z následujících dvou hodnot [4]:

$$\lambda = \frac{2l}{b}$$
$$\lambda = 70 \tag{9}$$

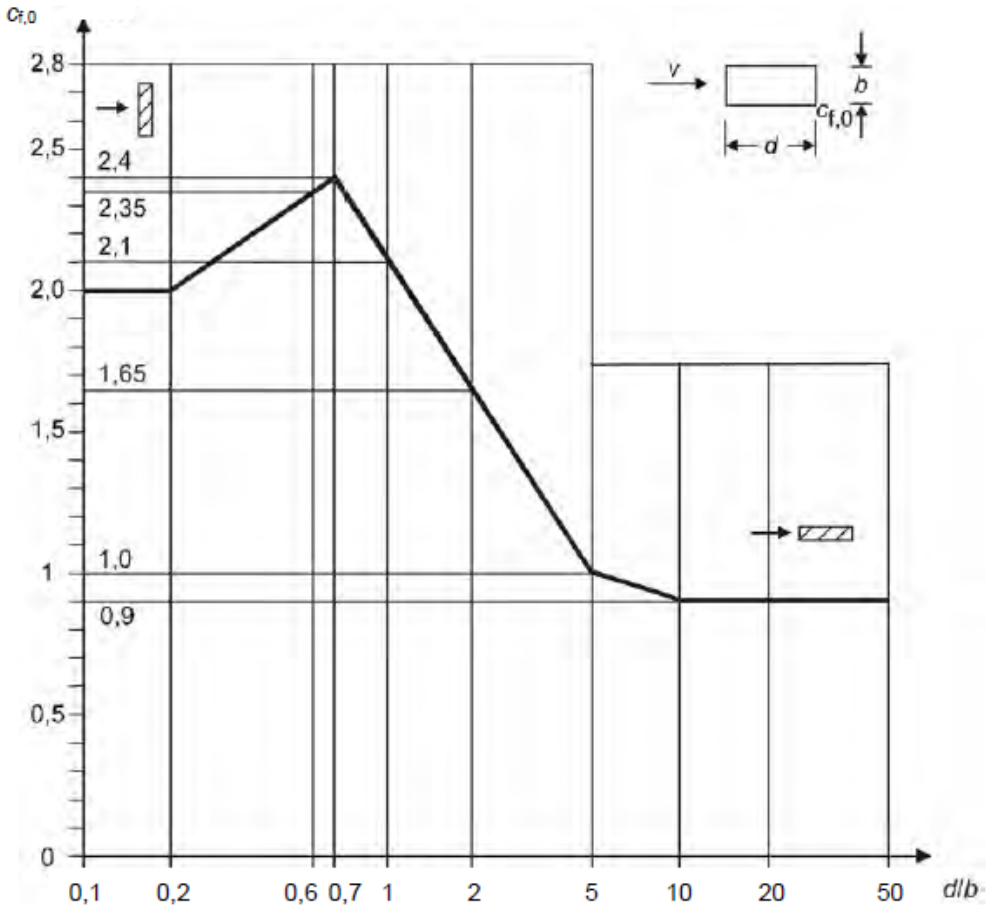
Jako funkce štíhlostního průměru je poté určen součinitel koncového efektu ψ_λ. Hodnota je aproximována z grafu na obrázku 5 a závisí také na součiniteli plnosti φ, jehož hodnota je určena ze vztahu 10. [4]

$$\varphi = \frac{A}{A_\mathrm{c}} \tag{10}$$

kde A je součet průmětů ploch prvků a $\mathrm{A_C}$ je celková plocha obálky.

Následuje výpočet součinitele síly definovaného vztahem [4]:

$$c_\mathrm{f} = c_{\mathrm{f},0} \cdot \psi_\mathrm{r} \cdot \psi_\lambda \tag{11}$$



Obrázek 3: Součinitel síly $c_{f,0}$ pro obdélníkové průřezy s ostrými rohy bez vlivu proudění kolem volných konců [4]

Pro stavby, které mají výšku nižší než z = 15 m je dále stanoven součinitel konstrukce, jehož doporučená hodnota je $c_s c_d = 1$. Tato hodnota bere v úvahu účinek zatížení větrem při výskytu nesoučasného výskytu maximálních tlaků větru na povrchu konstrukce c_s a účinek kmitání vyvolaného turbulencí c_d.

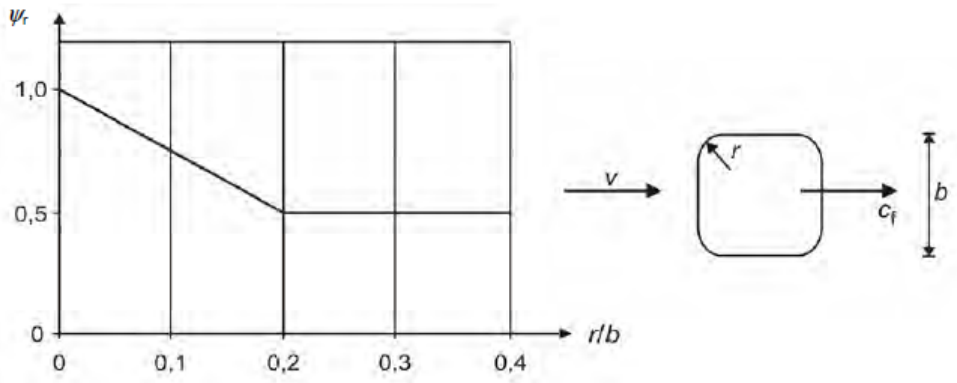
Dalším krokem je výpočet charakteristického tlaku od větru, který závisí na součiniteli konstrukce $c_s c_d = 1$, součiniteli síly c_f a maximální hodnotě dynamického tlaku q_p, jehož hodnota je vypočítána dle vzorce 8, jak bylo uvedeno v části 3.1.2 [4]:

$$Q_{k,w/j} = c_s c_d \cdot c_f \cdot q_p \tag{12}$$

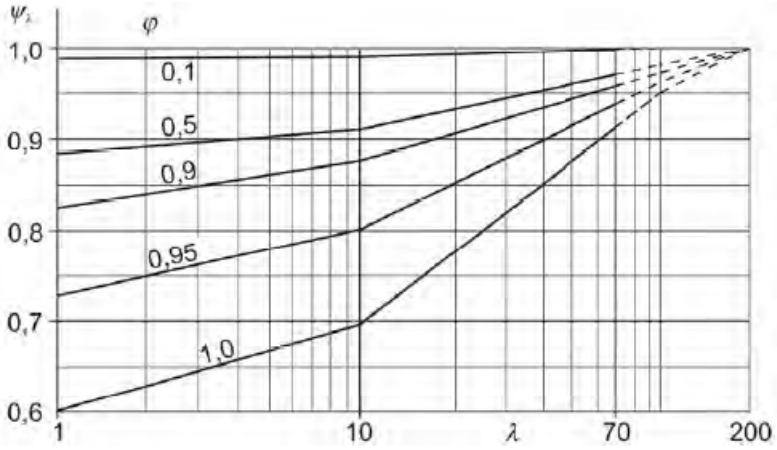
Z normy ČSN EN 1990: Zásady navrhování konstrukcí, příloha A1.2.2 je stanoven kombinační součinitel pro zatížení větrem na pozemních stavbách ψ_0. [5]

Posledním krokem před určením návrhového tlaku od větru je výpočet reprezentativního tlaku od větru [5]:

$$Q_{rep,w/j} = Qk, w/j \cdot \psi_0 \tag{13}$$



Obrázek 4: Redukční součinitel ψ_r pro čtvercový průřez se zaoblenými rohy [4]



Obrázek 5: Součinitel koncového efektu ψ_λ [4]

Návrhový tlak od větru je potom vypočítán ze vztahu [5]:

$$Q_{\mathrm{rep,q/j}} = \gamma_{\mathrm{f}} \cdot Q_{\mathrm{rep,w/j}} \tag{14}$$

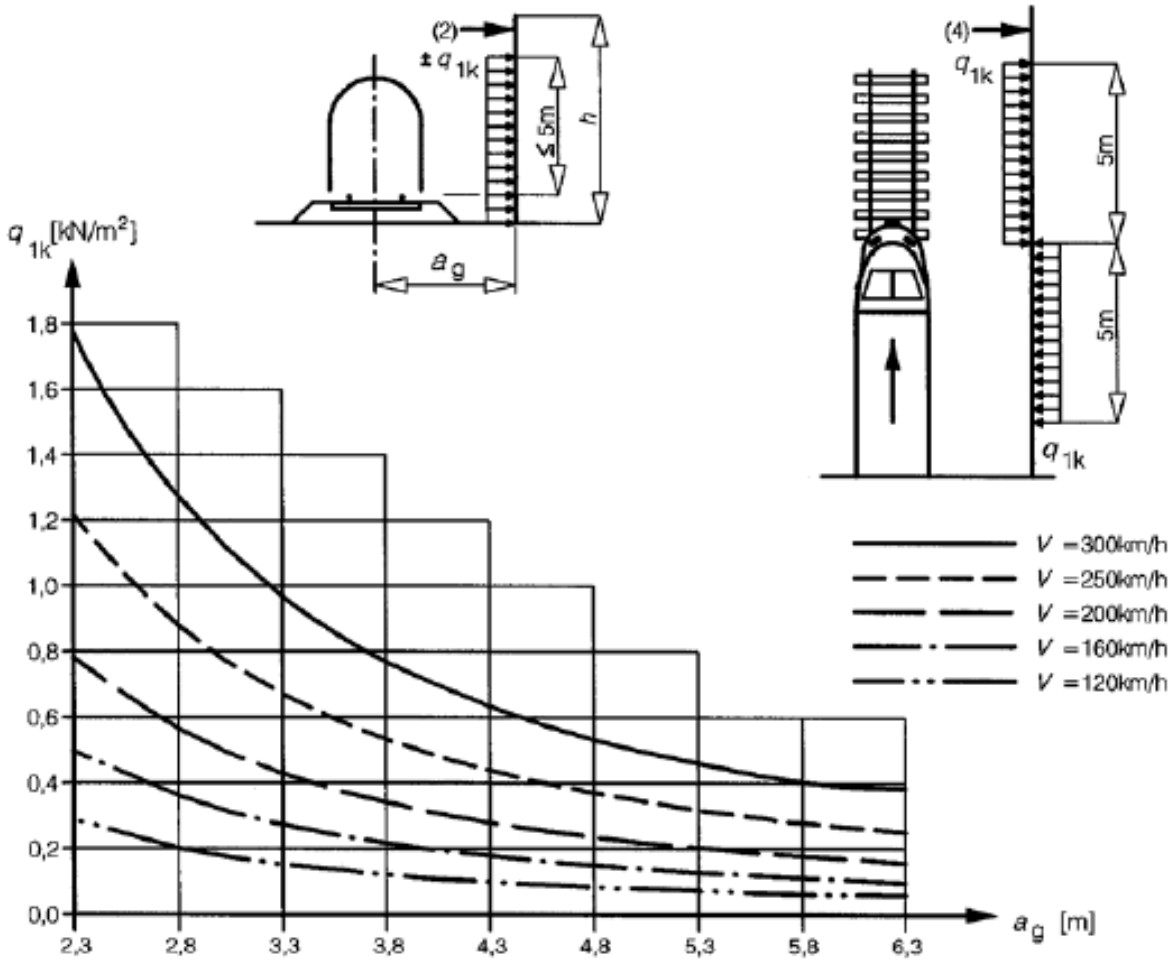
kde γ_{f} je dílčí součinitel zatížení, kterým se zohledňují možné nepříznivé odchylky hodnot zatížení od reprezentativních hodnot. [5]

3.2 Zatížení od průjezdu vlaku

Zatížení od průjezdu vlaku je stanoveno na základě normy ČSN EN 1991-2: Zatížení konstrukcí - Část 2: Zatížení mostů dopravou. [6]

Pro jednoduché svislé plochy rovnoběžné s kolejí, je nutné nejprve určit ekvivalentní zatížení q_{1k}. Jeho hodnota se odhadne aproximací z grafu na obrázku 6.

Ačkoli železniční návěstidlo není jednoduchou svislou plochou jako například protihluková stěna, pro účely simulací je to přijatelné zjednodušení, které umožňuje provedení výpočtů bez experimentálního měření či CFD simulací (simulace proudění). Pro vlaky s aerodynamicky nepříznivým



Obrázek 6: Ekvivalentní hodnota zatížení $q_{1\mathrm{k}}$ [6]

tvarem se dle jejich tvaru určí také součinitel k_1.

U konstrukcí sousedících s kolejemi je hodnota ekvivalentního zatížení $q_{1\mathrm{k}}$ násobena na délce 5 m od začátku a konce konstrukce dynamickým součinitelem $c_\mathrm{d} = 2,0$. [6]

Výsledné dynamické zatížení je tak dané vztahem [6]:

$$q_{1\mathrm{k,d}} = q_{1\mathrm{k}} \cdot c_\mathrm{d} \tag{15}$$

Dynamický tlak od průjezdu vlaku je dán součinem dynamického zatížení a součinitele dynamických účinků železničních vozidel s hladkými povrchy [6]:

$$q_{1\mathrm{k}/\mathrm{k}_1} = q_{1\mathrm{k,d}} \cdot k_1 \tag{16}$$

Následuje výpočet charakteristického tlaku od průjezdu vlaku [6]:

$$Q_{\mathrm{k},1\mathrm{k}} = c_\mathrm{s} c_\mathrm{d} \cdot c_\mathrm{f} \cdot q_{1\mathrm{k}/\mathrm{k}_1} \tag{17}$$

kde $c_\mathrm{s} c_\mathrm{d}$ je součinitel konstrukce stanovený v části 3.1.2 a c_f je součinitel síly, který byl určen ze vtahu 11.

Z normy ČSN EN 1990, příloha A2.2.6 je dále určena hodnota kombinačního součinitele pro aerodynamické účinky od zatížení dopravou na železničních mostech ψ_0. [5]

Zbývá výpočet reprezentativního a návrhového tlaku od průjezdu vlaku podle vztahů [6]:

$$Q_{\mathrm{rep,1k}} = Q_{\mathrm{k,1k}} \cdot \psi_0 \tag{18}$$

$$Q_{\mathrm{d,1k}} = Q_{\mathrm{rep,1k}} \cdot \gamma_{\mathrm{f}} \tag{19}$$

3.3 Diskuze

Jak je patrné z částí 3.1 a 3.2, výpočty zatížení konstrukce vlivem působení větru a tlaku od průjezdu vlaku jsou značným zjednodušením problému.

V případě zatížení konstrukce tlakem od průjezdu vlaku je zatížení aplikováno do výšky konstrukce 5 m a poté následuje lineární pokles tlaku až do hodnoty 0 Pa ve výšce 7,5 m, což je samo o sobě výrazné zjednodušení daného problému, neboť výška konstrukce nemá zásadní vliv na výpočet. [6]

Dynamické účinky jsou ve výpočtech dle normy zahrnuty v jednotlivých koeficientech používaných během stanovení návrhových tlaků. Skutečný průběh zatížení tak může být odlišný v závislosti na velikosti takto použitých koeficientů, mezi které patří například dynamický součinitel u průjezdu vlaku.

Normy vždy počítají s koeficienty vycházejícími z pravděpodobnosti výskytu dané kombinace zatížení v průběhu životnosti konstrukce a o reálném chování konstrukce v provozu tak není z výpočtů k dispozici mnoho informací.

Zásadní pro ověření stability nově navržené konstrukce je také analýza průběhu kmitání, které je způsobeno právě působením časově proměnných tlaků. Tu ale výpočet dle normy nebere v úvahu.

Řešení pomocí dynamických simulací s využitím metody konečných prvků oproti tomu umožňuje provedení analýzy kmitání, zatížení modelu reálným průběhem zatížení od působících tlaků a v neposlední řadě také simulaci extrémních situací, tedy i worst case scenario.

Kapitola 4

Metoda konečných prvků

Metoda konečných prvků (MKP) je moderní numerickou metodou, která umožňuje řešení úloh mechaniky kontinua. Její hlavní myšlenkou je nahrazení spojité konstrukce souborem prvků konečné velikosti a podobného geometrického tvaru. [7, 8]

Oproti analytickým výpočtům umožňují numerické metody řešení problémů geometricky složitých těles a jsou omezeny především výpočetním výkonem a s tím souvisejícím časovým nárokům na výpočet. [8]

Vývoj metody konečných prvků byl zahájen v padesátých letech dvacátého století a v průběhu času se stala jednou z nejrozšířenějších numerických metod využívaných pro řešení inženýrských problémů a úloh matematické fyziky.

Nejčastěji bývá metoda uplatňována při řešení úloh z oblasti deformovatelných těles - tedy statiky a dynamiky konstrukcí. Bylo však prokázáno, že je MKP vhodnou volbou i pro řešení úloh vedení tepla či proudění tekutin. Metoda je tak v současné době využívána v dynamice, geomechanice, mechanice tekutin a mnoha dalších inženýrskách oborech. [7]

4.1 Princip MKP

Jak již bylo zmíněno výše, základním principem MKP je nahrazení spojité konstrukce souborem prvků konečné velikosti. Tomuto procesu říkáme diskretizace (angl. meshing). Těleso je během tohoto děje rozloženo na jednotlivé elementy, které mají konečné rozměry a vyplní celý objem tělesa.

Chování jednotlivých elementů lze, oproti chování celého tělesa, popsat poměrně jednoduše. Z vytvořeného modelu je sestavena soustava rovnic, která popisuje chování celého systému. Následuje aplikace okrajových či počátečních podmínek a vyřešení soustavy rovnic. Díky znalosti všech neznámých je tak možné určit odvozené výsledky. [7, 8]

V literatuře jsou popsány dvě varianty MKP [9]:

- Silová varianta MKP, která je odvozena z Castiglianova variačního principu a pracuje s tenzory napjatosti.
- Deformační varianta MKP, která je odvozena z Lagrangeova variačního principu a pracuje s posuvy.

Tato práce se bude dále zabývat pouze variantou deformační.

4.1.1 Lagrangeův variační princip

Lagrangův variační princip je formulován následovně: „*Ze všech kinematicky přípustných stavů pružného tělesa nastává takový stav, který dává potenciální energii systému minimální hodnotu*“, a tedy platí [8]:

$$\Pi = E_{\mathrm{i}} + E_{\mathrm{e}} = min. \tag{20}$$

kde Π je celková potenciální energie tělesa, E_{i} je potenciální energie deformace definovaná vztahem 21 a E_{e} je potenciální energie vnějších sil stanovená dle rovnice 22 [10]:

$$E_{\mathrm{i}} = \int_V W(\epsilon)\, dV = \frac{1}{2}\int_V \sigma^T \epsilon\, dV \tag{21}$$

$$E_e = -\int_V u^T \overline{X}\, dV - \int_{A_{\mathrm{p}}} u^T \overline{p}\, dA = -\int_V (u\overline{X} + v\overline{Y} + w\overline{Z})\, dV - \int_{A_{\mathrm{p}}} (u\overline{p}_x + v\overline{p}_y + w\overline{p}_z)\, dA \tag{22}$$

kde u je vektor posuvů, $\overline{X}$ představuje vektor objemových sil, ϵ je vektor přetvoření, σ představuje vektor napětí a $\overline{p}$ je vektor povrchových sil na plochu A_{p}.

4.1.2 Diskretizace

Diskretizace je proces rozdělení tělesa na konečný počet elementů, které lze jednoduše popsat pomocí rovnic. Jak bylo zmíněno výše, tyto elementy vyplňují celý objem tělesa. [11]

Elementy mají různé tvary a mohou být jedno, dvou i třírozměrné. Jednorozměrné elementy jsou nazývány pruty, dvourozměrné elementy jsou elementy plošné a obdobně třírozměrné elementy jsou nazývány elementy objemové. Nejjednoduššími prvky jsou [11]:

- jednorozměrný prvek se dvěma uzly
- dvourozměrný trojúhelníkový prvek se třemi uzly
- třírozměrný čtyřboký prvek se čtyřmi uzly

Z tělesa se tak stane síť složená z elementů a diskrétních uzlů. Uzly přestavují body, ve kterých je možné stanovit hodnotu neznámých parametrů řešení. Díky nahrazení posuvů na spojité oblasti za posuvy v určitých bodech je tak získán konečný počet neznámých, ze kterých lze získat další odvozené výsledky. [11]

4.2 Software ANSYS

Výpočetní software ANSYS (Ansys, Inc., USA) je nástroj, který pracuje s metodou konečných prvků a jeho použití umožňuje řešení problémů z různých oblastí fyziky (i jejich kombinací) jako je proudění, vedení tepla, rázové děje, elektromagnetické pole, ale i akustika či lomová mechanika. V softwaru ANSYS je možné provádět nejen kontrolní výpočty, ale i optimalizaci či hodnocení únavy a životnosti konstrukcí. [12]

V rámci této práce bylo využito prostředí ANSYS Workbench 2021 R1. Jedná se o rámec, který sdružuje simulační programy ANSYS. V rámci projektu je tak možné vytvořit geometrii modelu, definovat jeho materiálové vlastnosti, provést diskretizaci modelu, nastavit parametry modelu, provést simulaci a v neposlední řadě vyhodnotit výsledky simulace. Jednotlivé části projektu jsou zobrazeny ve formě vývojového diagramu, díky kterému lze vytvářet vazby mezi jednotlivými simulacemi, a také fázemi analýzy. [13]

Část II

Praktická část

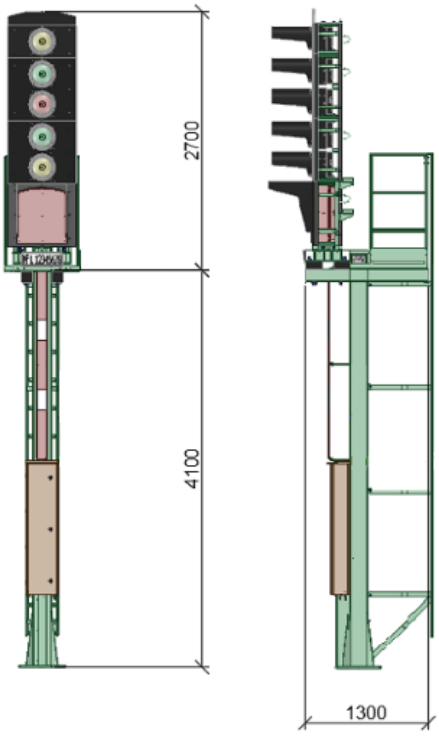
Kapitola 5

Numerický model

Jak již bylo zmíněno v kapitole 2, byl v rámci diplomové práce vytvořen detailní model železničního návěstidla SNA-100, na kterém byly provedeny všechny simulace.

5.1 Parametry modelu

Všechny parametry numerického modelu byly odvozeny z detailního modelu poskytnutého AŽD Praha s.r.o. (viz obrázek 7).



Obrázek 7: Detailní model návěstidla SNA-100 s rozměry v mm

Pro tvorbu modelu byly dále využity známé hmotnosti některých částí návěstidla:

- modul dvou návěstních světel - 20,5 kg
- modul jednoho návěstního světla - 12,1 kg
- modul jednoho osazeného indikátoru - 19,3 kg
- sestava světel s natáčením včetně osazení světel - 241,5 kg
- celá konstrukce umisťovaná na stožár včetně osazení světel - 399 kg

Pro výše uvedený případ platí, že hmotnosti modulu světel a indikátorů obsahují pouze daný modul, nikoli hmotnost světla či indikátoru.

Jednotlivé moduly, návěstní světla a indikátory byly v modelu nahrazeny hmotnými body. Výpočet jejich hmotností se odvíjel od výše uvedených známých informací. Od hmotnosti celé konstrukce umisťované na stožár byly odečteny všechny moduly a následně byla zbylá hmotnost rozpočítána rovnoměrně mezi návěstní světla a indikátory. Indikátor byl nahrazen stejnou hmotností jako dvě návěstní světla.

Takto určené hmotné body byly umístěny do těžišť jednotlivých částí konstrukce, jejichž hmotnost reprezentují.

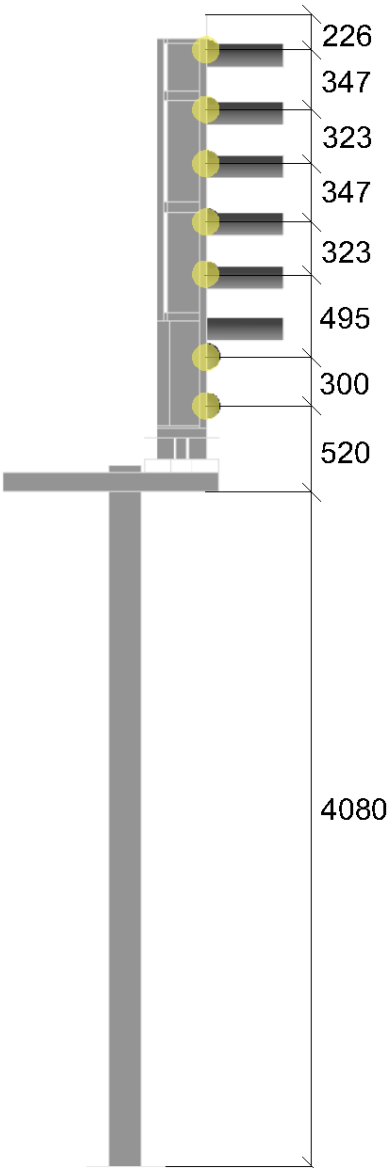
Výsledné hmotnosti hmotných bodů označených na obrázku 8 společně s jejich souřadnicí z jsou uvedeny v tabulce 2.

Obrázek 8: Označení hmotných bodů

Tabulka 2: Vlastnosti hmotných bodů

Hmotný bod	**Hmotnost [kg]**	**Souřadnice z [mm]**
A	36,20	6735
B	34,35	6388
C	34,35	6065
D	34,35	5718
E	34,35	5395
F	33,75	4900
G	33,75	4600

Na obrázku 9 je potom zobrazen celý model včetně umístění hmotných bodů.



Obrázek 9: Numerický model železničního návěstdila SNA-100 (délkové rozměry v mm)

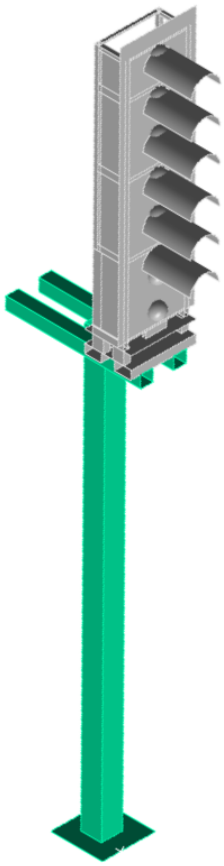
Protože model neobsahuje například kabeláž vedoucí k jednotlivým návěstním světlům či indikátorům, byl tento fakt vykompenzován změnou tloušťky předního desky v horní části konstrukce návěstidla tak, aby chování návěstidla přesněji odpovídalo realitě s ohledem na tuhost konstrukce.

Ukotvení hlavního stožáru do betonového základu je modelováno jako dokonalé vetknutí.

5.2 Materiálové vlastnosti modelu

Materiály byly opět definovány na základě informací o návěstidle SNA-100 dodaných AŽD Praha s.r.o. V modelu se vyskytují celkem tři různé materiály. První dva z nich jsou různé typy oceli - S355J2H a S235JRH a třetí je polykarbonát PA s vysokou hustotou.

Z oceli typu S355J2H jsou hlavní nosné prvky konstrukce - stožár a dva horizontální nosníky (viz obrázek 10). Druhý typ oceli potom tvoří všechny ostatní kovové části konstrukce kromě stínítek, které jsou z výše zmíněného polykarbonátu PA s vysokou hustotou.



Obrázek 10: Části konstrukce z oceli S355J2H (vyznačené zeleně)

Vlastnosti všech použitých materiálů jsou shrnuty v tabulce 3. Hodnoty jednotlivých parametrů byly převzaty z [14, 15].

Tabulka 3: Vlastnosti materiálů

	S255JRH	**S355J2H**	**Polykarbonát PA**
Youngův modul pružnosti [GPa]	210	210	2,32
Poissonovo číslo [-]	0,29	0,29	0,39
Mez kluzu [MPa]	235	335 pro t $<$ 16 mm	6270
Mez pevnosti v tahu [MPa]	360	470	6270

Kapitola 6

Zatížení

Ve všech simulacích byla konstrukce zatížena tlakem od průjezdu vlaků a dále působením větru. Tato zatížení byla modelována jako tlaková pole, která byla definována následujícím postupem.

Jak již bylo uvedeno v kapitole 3, zatížení větrem a od průjezdu vlaku je stanovováno dle norem ČSN EN 1991-1-4 a ČSN EN 1991-2.

6.1 Stanovení větrné oblasti

Nejprve byla odměřena celková výška konstrukce $z = 6961\,\mathrm{mm}$. Dle tabulky 1 bylo stanoveno, že oblast, kde se nachází prototyp železničního návěstidla SNA-100 patří do kategorie terénu III: Oblast rovnoměrně pokrytá vegetací nebo budovami, nebo s izolovanými překážkami, jejichž vzdálenost je maximálně dvacetinásobek výšky překážek (jako jsou vesnice předměstský terén, souvislý les). Tedy parametr $z_0 = 0,3\,\mathrm{m}$ a $z_{\mathrm{min}} = 5\,\mathrm{m}$.

Následně byl dle vzorce 2 a tabulky 1 stanoven součinitel terénu k_{r}:

$$k_{\mathrm{r}} = 0,19 \cdot \left(\frac{z_0}{z_{0,\mathrm{II}}}\right)^{0,07} = 0,19 \cdot \left(\frac{0,3}{0,05}\right)^{0,07} = 0,2155 \tag{23}$$

Dalším krokem byl výpočet součinitele drsnosti terénu c_r dle vzorce 3:

$$c_{\mathrm{r}}(z) = k_{\mathrm{r}} \cdot ln\left(\frac{z}{z_0}\right) = 0,2155 \cdot ln\left(\frac{6,961}{0,3}\right) = 0.6776 \tag{24}$$

Základní rychlost větru v_{b} byla stanovena na hodnotu $36\,\mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-1}$.

Následně byla spočítána střední rychlost větru v_{m} dle vzorce 4:

$$v_{\mathrm{m}} = c_{\mathrm{r}} \cdot c_0 \cdot v_{\mathrm{b}} = 0,6776 \cdot 1 \cdot 36 = 24,39\,\mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-1} \tag{25}$$

Poté byla stanovena intenzita turbulence l_{v} dle vztahu 5:

$$l_{\mathrm{v}} = \frac{k_{\mathrm{I}}}{c_0 \cdot ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} = \frac{1}{1 \cdot ln\left(\frac{6,961}{0,3}\right)} = 0,318 \tag{26}$$

Dále byl vypočítán součinitel expozice c_e dle vzorce 6:

$$c_\mathrm{e} = (1 + 7 \cdot l_\mathrm{v}) \cdot \left(\frac{v_\mathrm{m}}{v_\mathrm{b}}\right)^2 = (1 + 7 \cdot 0,318) \cdot \left(\frac{24,39}{36}\right)^2 = 1,481 \tag{27}$$

Následovalo stanovení základního dynamického tlaku větru q_b dle vzorce 7:

$$q_\mathrm{b} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_\mathrm{b}^2 = \frac{1}{2} \cdot 1,25 \cdot 36^2 = 810\,\mathrm{N} \cdot \mathrm{m}^{-2} \tag{28}$$

Posledním krokem pak byl výpočet dynamického tlaku od větru dle vzorce 8:

$$q_\mathrm{p} = c_\mathrm{e} \cdot q_\mathrm{b} = 1,481 \cdot 810 = 1199\,\mathrm{N} \cdot \mathrm{m}^{-2} \tag{29}$$

6.2 Výpočet návrhového tlaku od větru

Pro všechny simulace bylo definováno zatížení od větru v rovnoběžném směru s osou koleje. Toto zatížení je dále nutné rozdělit na vítr působící na plochu hlavního stožáru a na svítilny.

6.2.1 Tlak od větru působící na hlavní stožár

Hlavní stožár má výšku $l = 4,24\,\mathrm{m}$, rozměry průřezu $b = 0,2\,\mathrm{m}$ a $d = 0,2\,\mathrm{m}$ a zaoblení rohů s poloměrem $r = 2 \cdot T = 0,006\,\mathrm{m}$.

Prvním z vypočtených parametrů byl štíhlostní poměr, který byl stanoven dle 9:

$$\lambda = \frac{2l}{b} = \frac{2 \cdot 4,24}{0,2} = 42,4 \tag{30}$$

Následně byl z grafu na obrázku 5 určen součinitel koncového efektu $\psi_\lambda = 0,86$.

Ze znalosti poměru $\frac{d}{b} = 1$ byla z grafu na obrázku 3 odečtena hodnota součinitele síly $c_{\mathrm{f},0} = 2,1$.

Pro čtvercové průřezy se zaoblenými rohy bylo dále nutné stanovit z grafu na obrázku 4 hodnotu redukčního součinitele ψ_r:

$$\frac{r}{b} = \frac{2 \cdot T}{b} = \frac{2 \cdot 0,006}{0,2} = 0,06 \tag{31}$$

$$\psi_\mathrm{r} = 0,85 \tag{32}$$

Dalším krokem byl výpočet součinitele síly c_f ze vztahu 11:

$$c_\mathrm{f} = c_{\mathrm{f},0} \cdot \psi_\mathrm{r} \cdot \psi_\lambda = 2,1 \cdot 0,85 \cdot 0,86 = 1,5351 \tag{33}$$

Další vypočítanou hodnotou byl charakteristický tlak od větru $Q_\mathrm{k,w/j}$ ze vztahu 12:

$$Q_\mathrm{k,w/j} = c_\mathrm{s} c_\mathrm{d} \cdot c_\mathrm{f} \cdot q_\mathrm{p} = 1 \cdot 1,5351 \cdot 1199 = 1841\,\mathrm{N} \cdot \mathrm{m}^{-2} \tag{34}$$

Následovalo stanovení reprezentativního tlaku od větru dle vzorce 13:

$$Q_\mathrm{rep,w/j} = Qk, w/j \cdot \psi_0 = 1841 \cdot 0,6 = 1104\,\mathrm{N} \cdot \mathrm{m}^{-2} \tag{35}$$

Návrhový tlak od větru byl potom vypočítán ze vztahu 14:

$$Q_{\mathrm{rep,q/j}} = \gamma_{\mathrm{f}} \cdot Q_{\mathrm{rep,w/j}} = 1,5 \cdot 1104 = 1657\,\mathrm{N} \cdot \mathrm{m}^{-2} \tag{36}$$

Tato hodnota byla použita ve všech simulacích jako zatížení od větru na hlavního stožáru konstrukce.

6.2.2 Tlak od větru působící na svítilny rovnoběžně s osou koleje

Prvním krokem bylo stanovení součinitele síly $c_{\mathrm{f},0} = 2,2$ z grafu na obrázku 3. K tomu byl opět využit poměr rozměrů:

$$\frac{d}{b} = \frac{0,276}{0,698} = 0,3954 \tag{37}$$

Kde d a b jsou rozměry části konstrukce se svítilnami. Délka je v tomto případě $l = 2,761\,\mathrm{m}$.

Následoval výpočet štíhlostního poměru λ dle vztahu 9:

$$\lambda = \frac{2l}{b} = \frac{2 \cdot 2,761}{0,698} = 7,911 \tag{38}$$

Z grafu na obrázku 5 byl dále určen součinitel koncového efektu $\psi_\lambda = 0,685$.

Součinitel síly c_{f} byl opět vypočítán ze vztahu 11:

$$c_{\mathrm{f}} = c_{\mathrm{f},0} \cdot \psi_{\mathrm{r}} \cdot \psi_\lambda = 2,2 \cdot 1 \cdot 0,685 = 1,507 \tag{39}$$

Dále byl stanoven charakteristický tlak od větru $Q_{\mathrm{k,w/j}}$ ze vztahu 12:

$$Q_{\mathrm{k,w/j}} = c_{\mathrm{s}} c_{\mathrm{d}} \cdot c_{\mathrm{f}} \cdot q_{\mathrm{p}} = 1 \cdot 1,507 \cdot 1199 = 1807\,\mathrm{N} \cdot \mathrm{m}^{-2} \tag{40}$$

Kombinační součinitel pro zatížení větrem na pozemních stavbách je dle [5]:

$$\psi_0 = 0,6 \tag{41}$$

Reprezentativní tlak od větru byl vypočítán ze vztahu 13:

$$Q_{\mathrm{rep,w/j}} = Qk, w/j \cdot \psi_0 = 1807 \cdot 0,6 = 1084\,\mathrm{N} \cdot \mathrm{m}^{-2} \tag{42}$$

Posledním krokem výpočtu bylo určení návrhového tlaku od větru dle vztahu 13:

$$Q_{\mathrm{rep,q/j}} = \gamma_{\mathrm{f}} \cdot Q_{\mathrm{rep,w/j}} = 1,5 \cdot 1084 = 1626\,\mathrm{N} \cdot \mathrm{m}^{-2} \tag{43}$$

Tato hodnota byla dále použita ve všech simulacích jako zatížení od větru na části konstrukce se svítilnami.

6.2.3 Tlak od větru působící na svítilny kolmo s osou koleje

Aby bylo možné provést níže uvedený výpočet návrhového tlaku od průjezdu vlaku bylo nutné stanovit také tlak od větru působící na svítilny kolmo s osou koleje, ačkoli v simulacích byl definován pouze vítr ve směru rovnoběžném se směrem koleje.

Rozměry části zatížené konstrukce byly odměřeny $d = 0,698\,\mathrm{m}$ a $b = 0,276\,\mathrm{m}$ a délka (resp.výška) $l = 2,742\,\mathrm{m}$.

Pro další výpočty bylo opět nutné spočítat poměr těchto dvou rozměrů:

$$\frac{d}{b} = \frac{0,698}{0,276} = 2,529 \tag{44}$$

Součinitel síly $c_{\mathrm{f},0} = 1,55$ byl následně odečten z grafu na obrázku 3.

Štíhlostní poměr λ byl znovu určen dle vztahu 9:

$$\lambda = \frac{2l}{b} = \frac{2 \cdot 2,742}{0,276} = 19,87 \tag{45}$$

Následovalo odečtení hodnoty součinitele koncového efektu $\psi_\lambda = 0,75$ z grafu na obrázku 5.

Dalším krokem byl výpočet součinitele síly c_f dle vzorce 11:

$$c_\mathrm{f} = c_{\mathrm{f},0} \cdot \psi_\mathrm{r} \cdot \psi_\lambda = 1,55 \cdot 1 \cdot 0,75 = 1,163 \tag{46}$$

Kombinační součinitel pro zatížení větrem na pozemních stavbách je stejný jako v části 6.2.2, tedy:

$$\psi_0 = 0,6 \tag{47}$$

Dále byl stanoven charakteristický tlak od větru $Q_{\mathrm{k,w/j}}$ ze vztahu 12:

$$Q_{\mathrm{k,w/j}} = c_\mathrm{s} c_\mathrm{d} \cdot c_\mathrm{f} \cdot q_\mathrm{p} = 1 \cdot 1,163 \cdot 1199 = 1394\,\mathrm{N} \cdot \mathrm{m}^{-2} \tag{48}$$

Následně byla vypočítána hodnota reprezentativního tlaku od větru dle vzorce 13:

$$Q_{\mathrm{rep,w/j}} = Qk, w/j \cdot \psi_0 = 1394 \cdot 0,6 = 836\,\mathrm{N} \cdot \mathrm{m}^{-2} \tag{49}$$

Poslední vypočítanou hodnotou pak byl návrhový tlak od větru dle vztahu 14:

$$Q_{\mathrm{rep,q/j}} = \gamma_f \cdot Q_{\mathrm{rep,w/j}} = 1,5 \cdot 836 = 1254\,\mathrm{N} \cdot \mathrm{m}^{-2} \tag{50}$$

6.3 Výpočet návrhového tlaku od průjezdu vlaku

Ve všech simulacích bylo definováno zatížení od průjezdu vlaku při rychlosti 200 km/h. Toto zatížení je stejně jako v případě zatížení větrem nutné rozdělit mezi příslušné části konstrukce návěstidla.

6.3.1 Vnější tlak od průjezdu vlaku působící na hlavní stožár

Jak již bylo zmíněno výše, rychlost průjezdu vlaku byla pro všechny simulace $v_\mathrm{f} = 200\mathrm{km} \cdot \mathrm{h}^{-1}$.

Ekvivalentní zatížení je dle [6]:

$$q_{1\mathrm{k}} = 790\,\mathrm{N} \cdot \mathrm{m}^{-2} \tag{51}$$

Dynamický součinitel $c_\mathrm{d} = 2,0$ jak již bylo uvedeno v části 3.2.

Dynamické zatížení potom bylo určeno ze vztahu 15:

$$q_{1\mathrm{k,d}} = q_{1\mathrm{k}} \cdot c_\mathrm{d} = 790 \cdot 2 = 1580\,\mathrm{N} \cdot \mathrm{m}^{-2} \tag{52}$$

Součinitel dynamických účinků železničních vozidel s hladkými povrchy je dle [6]:

$$k_1 = 0,85 \tag{53}$$

Ten sloužil k výpočtu dynamického tlaku od průjezdu vlaku ze vztahu 16:

$$q_{1\mathrm{k}/\mathrm{k}_1} = q_{1\mathrm{k,d}} \cdot k_1 = 1580 \cdot 0,85 = 1343\,\mathrm{N} \cdot \mathrm{m}^{-2} \tag{54}$$

Součinitel síly je roven součiniteli síly vypočtenému pro působení vnějšího tlaku od větru na hlavní stožár (viz 33):

$$c_\mathrm{f} = 1,5351 \tag{55}$$

Charakteristický tlak od průjezdu vlaku byl potom stanoven dle vzorce 17:

$$Q_{\mathrm{k},1\mathrm{k}} = c_\mathrm{s} c_\mathrm{d} \cdot c_\mathrm{f} \cdot q_{1\mathrm{k}/\mathrm{k}_1} = 1 \cdot 1,5351 \cdot 1343 = 2062\,\mathrm{N} \cdot \mathrm{m}^{-2} \tag{56}$$

Kombinační součinitel pro aerodynamické účinky od zatížení dopravou na železničních mostech je dle [5]:

$$\Psi_0 = 0,8 \tag{57}$$

Následně byl ze vztahu 18 spočítán reprezentativní tlak od průjezdu vlaku:

$$Q_{\mathrm{rep},1\mathrm{k}} = Q_{\mathrm{k},1\mathrm{k}} \cdot \psi_0 = 2062 \cdot 0,8 = 1650\,\mathrm{N} \cdot \mathrm{m}^{-2} \tag{58}$$

Posledním krokem byl výpočet návrhového tlaku od průjezdu vlaku ze vzorce 19:

$$Q_{\mathrm{d},1\mathrm{k}} = Q_{\mathrm{rep},1\mathrm{k}} \cdot \gamma_f = 1650 \cdot 1,5 = 2475\,\mathrm{N} \cdot \mathrm{m}^{-2} \tag{59}$$

6.3.2 Vnější tlak od průjezdu vlaku působící na svítilny

Součinitel síly je roven součiniteli síly vypočtenému pro vnější tlaku od větru působící na svítilny kolmo s osou koleje (viz 46):

$$c_\mathrm{f} = 1,163 \tag{60}$$

Charakteristický tlak od průjezdu vlaku byl opět vypočten dle vztahu 17:

$$Q_{\mathrm{k},1\mathrm{k}} = c_\mathrm{s} c_\mathrm{d} \cdot c_\mathrm{f} \cdot q_{1\mathrm{k}/\mathrm{k}_1} = 1 \cdot 1,163 \cdot 1343 = 1562\,\mathrm{N} \cdot \mathrm{m}^{-2} \tag{61}$$

Hodnota kombinačního součinitele pro aerodynamické účinky od zatížení dopravou na železničních mostech je stejná jako v části 6.3.1:

$$\Psi_0 = 0,8 \tag{62}$$

Reprezentativní tlak od průjezdu vlaku byl stanoven dle 18:

$$Q_{\mathrm{rep,1k}} = Q_{\mathrm{k,1k}} \cdot \psi_0 = 1562 \cdot 0,8 = 1250\,\mathrm{N} \cdot \mathrm{m}^{-2} \tag{63}$$

Následně byl vypočítán návrhový tlak od průjezdu vlaku dle vztahu 19:

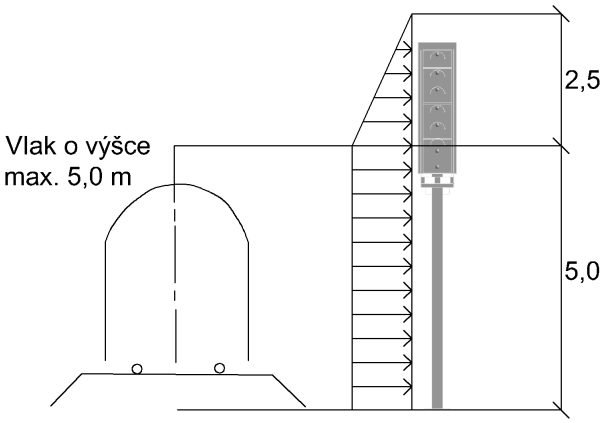
$$Q_{\mathrm{d,1k}} = Q_{\mathrm{rep,1k}} \cdot \gamma_{\mathrm{f}} = 1250 \cdot 1,5 = 1875\,\mathrm{N} \cdot \mathrm{m}^{-2} \tag{64}$$

Toto zatížení bylo v simulacích dále rozlišeno dle částí konstrukce, na kterou působilo. Pro stínidla svítilen byl stanoven speciální návrhový tlak pomocí součinitele $q = 0,64$ tak, aby zatížení odpovídalo jejich zaoblení:

$$Q_{\mathrm{d,1k,2}} = Q_{\mathrm{rep,1k}} \cdot \gamma_{\mathrm{f}} \cdot q = 1250 \cdot 1,5 \cdot 0,64 = 1200\,\mathrm{N} \cdot \mathrm{m}^{-2} \tag{65}$$

6.4 Simulace zatížení tlakem

Ačkoli v normě není explicitně uvedeno, jak uvažovat výšku konstrukce s ohledem na zatížení, poskytuje norma možnost definovat zatížení tak, že je konstantní do výšky 5,0 m a dále lineárně klesá k hodnotě 0 Pa ve výšce 7,5 m, jak je zobrazeno na obrázku 11.



Obrázek 11: Průběh zatížení konstrukce od průjezdu vlaku dle výšky (délkové rozměry v m)

Protože v softwaru ANSYS není možnost definovat proměnná zatížení objemově, ale umožňuje složitá tlaková pole mapovat na konečně prvkovou síť triangulací, byl v prostředí MATLAB vytvořen skript pro syntetizaci dat takto definovaného tlakového pole od průjezdu vlaku. Zdrojový kód skriptu je součástí příloh.

Nejprve byla vytvořena matice o čtyřech sloupcích, kde první tři reprezentují souřadnice x, y a z a poslední sloupec je roven koeficientu, který je po přenásobení konkrétní hodnotou návrhového tlaku roven tlaku v Pa.

Tato matice byla dále exportována do textového souboru, který byl následně použit v prostředí ASNYS Workbench 2021 R1 jako zdroj zatížení.

Kapitola 7

Společné parametry všech simulací

V rámci této práce bylo provedeno několik statických a dynamických simulací, které se významně liší. Základní parametry těchto simulací ovšem zůstávají neměnné a jsou shrnuty v této kapitole.

7.1 Zatížení

Ať už šlo o simulace statické nebo dynamické, zatížení bylo definováno pomocí několika shodných variant. Hodnoty maximálních návrhových tlaků od jednotlivých složek zatížení, které vycházejí z výpočtů dle norem, jsou shrnuty v tabulce 4. Protože zatížení není konstantní v celé výšce, ale začíná lineárně klesat ve výšce 5,0 m, byly tyto hodnoty používány k přenásobení koeficientu v textovém souboru vytvořeném pomocí MATLAB (viz část 6.4). Bylo tak definováno tlakové pole proměnné s výškou a maximální hodnotou tlaku odpovídající hodnotám uvedeným v tabulce.

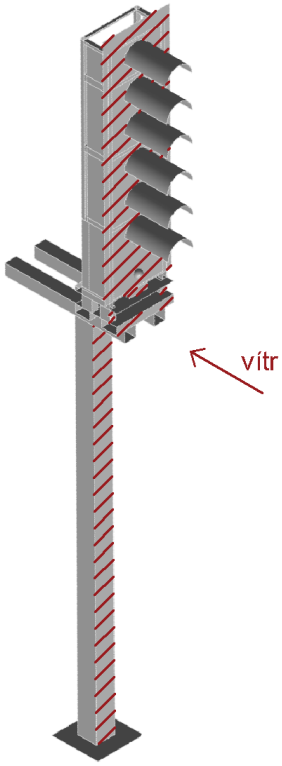
Tabulka 4: Velikost použitých maximálních návrhových tlaků

Zatížení od vlaku	hlavní stožár	2475 Pa
	horní část konstrukce	1875 Pa
	stínítka	1200 Pa
Zatížení od větru	hlavní stožár	1657 Pa
	horní část konstrukce	1626 Pa

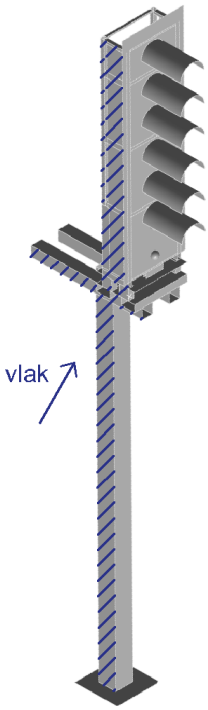
Porovnávanou hodnotou je vždy maximální výchylka konstrukce v mm. Jedná se o prostorový vektor, který je složený z posunutí ve všech třech souřadnicových osách.

7.1.1 Zatížení od větru

Ve všech variantách bylo definováno zatížení tlakem od větru působícího rovnoběžně s osou koleje. Zatížení je graficky znázorněné na obrázku 12.



Obrázek 12: Zatížení od větru

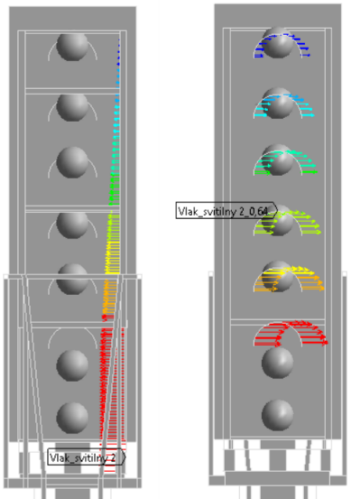


Obrázek 13: Zatížení od průjezdu jednoho vlaku

7.1.2 Průjezd jednoho vlaku

V případě zatížení konstrukce jedním vlakem bylo zatížení konstantní do výšky 5 m a dále lineárně klesalo až na hodnotu 0 Pa ve výšce 7,5 m, jak již bylo uvedeno v části 6.4.

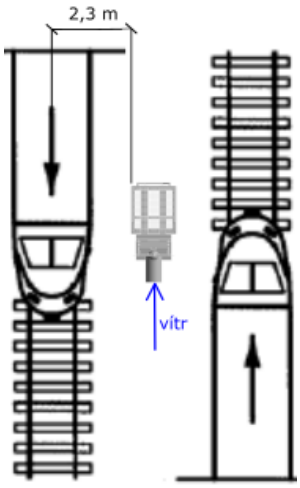
Projíždějící vlak v této situaci působí na návěstidlo zleva, jak je možné vidět na obrázku 13. Detail zatížení horní části návěstidla je možné vidět na obrázku 14 Ačkoli se v dynamických simulacích mění směr tohoto zatížení v průběhu času, tak zůstávají shodné zasažené části konstrukce návěstidla.



Obrázek 14: Zatížení od průjezdu jednoho vlaku - detail horní části konstrukce

7.1.3 Průjezd dvou vlaků

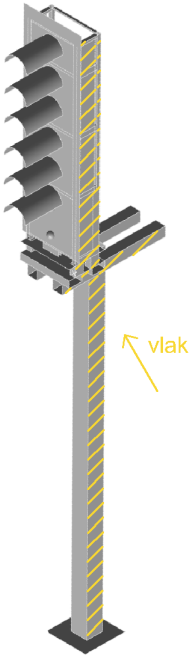
V posledním případě je návěstidlo umístěné mezi kolejemi a působí na něj průjezd dvou vlaků v jeho těsné blízkosti. Situace je schématicky vyznačená na obrázku 15.



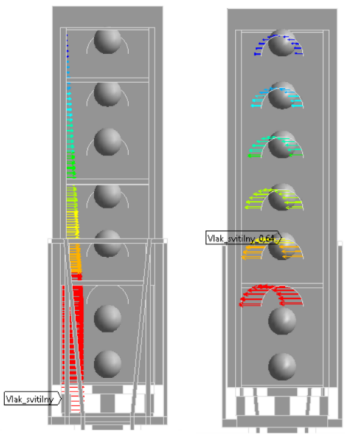
Obrázek 15: Umístění železničního návěstidla SNA-100, převzato z [6] a upraveno

Jak je patrné, vlak č. 1 působí na návěstidlo zprava a vlak č. 2 zleva. Působení vlaku č. 1 na konstrukci je znázorněné na obrázcích 16 a 17. Vlak č. 2 působí ve stejném směru jako při průjezdu pouze jednoho vlaku, jak je možné vidět na obrázcích 13 a 14.

Ve statické simulaci je tato varianta řešena dvěma způsoby. V prvním z nich je zatížení vlaků definováno tak, jak je to zakreslené na obrázku 15 - návěstidlo je umístěné mezi kolejemi. Protože ale statická simulace nebere v potaz průběh času, výsledek je nesprávný z důvodu působení tlaků proti sobě (vlak č.1 působí na konstrukci zprava a vlak č. 2 zleva) a byla tak vytvořena ještě druhá varianta simulace, kde je zatížení od dvou vlaků definováno jako prostý dvojnásobek, a tedy oba vlaky působí na návěstidlo zleva tak, jak je to znázorněné na obrázku 13. V dynamické simulaci se opět mění směr zatížení s časem a jedná se o kritickou variantu zatížení.



Obrázek 16: Zatížení od průjezdu vlaku č.1

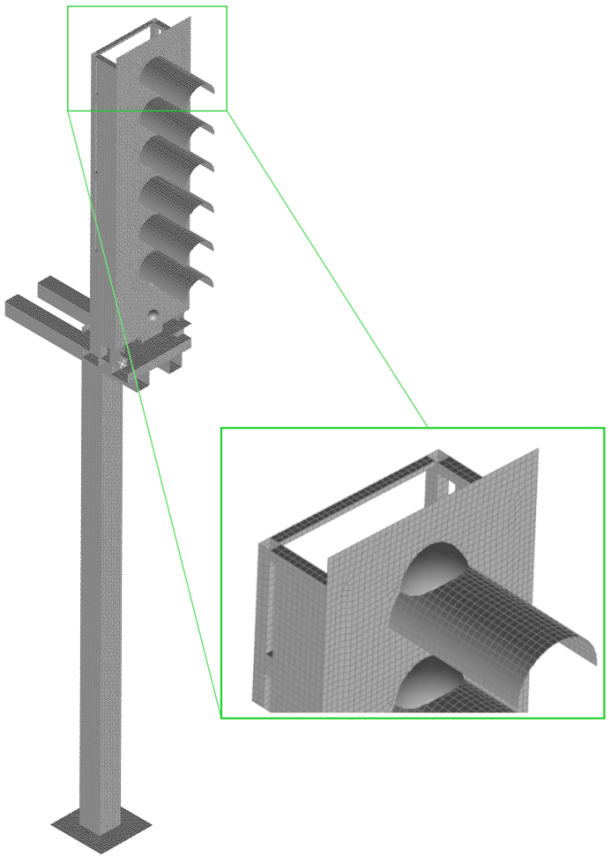


Obrázek 17: Zatížení od průjezdu vlaku č.1 - detail horní části konstrukce

7.2 Diskretizace modelu

Velikost elementu byla definována jako 0,02 m. V konečně prvkové síti byl použit čtyřuzlový element SHELL 181.

Výsledná síť je zobrazena na obrázku 18 a obsahuje 31720 uzlů a 32225 elementů.



Obrázek 18: Konečně prvková síť

7.3 Parametry tlumení

Jak již bylo zmíněno v kapitole 2, předmětem mé bakalářské práce byla experimentálně-numerická analýza používaného prototypu návěstidla typu SNA-100. V rámci této bakalářské práce byly pomocí regresní analýzy dat naměřených při pilotním experimentu stanoveny parametry tlumení konstrukce (více viz [2]. Takto určené parametry byly aplikovány ve všech provedených dynamických simulacích v rámci této diplomové práce.

Chování konstrukce může být popsáno jako kmitání slabě tlumené soustavy pomocí matice tlumení B ve tvaru:

$$\boldsymbol{B} = \alpha\,\boldsymbol{M} + \beta\,\boldsymbol{K} \tag{66}$$

kde $\boldsymbol{M}$ je matice hmotností, $\boldsymbol{K}$ je matice tuhosti a α a β jsou Rayleighovy konstanty tlumení.

Pomocí těchto koeficientů je možné vypočítat tlumící koeficient ζ [16]:

$$\zeta = \frac{\alpha}{2\,\omega} + \frac{\beta}{2}\,\omega \tag{67}$$

α tlumení představuje třecí tlumení a pro mnoho případů může být ignorováno (tedy $\alpha = 0$). V tomto případě pak může být hodnota β určena ze známých parametrů ζ a ω. [16]

Výchozí známou hodnotou byl logaritmický dekrement určený z experimentu -$\delta = 0,1877$. Pomocí následujícího vztahu z něj byl vypočítán tlumící koeficient ζ [17]:

$$\zeta = \frac{\delta}{\sqrt{(2\,\pi)^2 + \delta^2}} \tag{68}$$

V prostředí pro dynamickou analýzu (Transient Structural) je v ANSYS Workbench pro definování tlumení vyžadována frekvence, tlumící koeficient ζ a koeficienty α a β. Frekvence $f = 2,38\,\mathrm{Hz}$ byla dopočtena z periody naměřených dat z jednoho z provedených měření, tlumící koeficient ζ byl vypočten pomocí výše popsaného postupu a koeficient α byl ponechán roven nule. Následně je softwarem ANSYS dopočítána hodnota β na základě předchozích dvou parametrů.

7.4 Použitý hardware

Všechny simulace byly provedeny na notebooku Dell G5 s velikostí RAM 16 GB, frekvencí pamětí 2,67 GHz a procesorem Intel Core i7 8750H Coffee Lake s frekvencí CPU 2,2 GHz (maximální frekvence 4,1 GHz). Výpočty byly prováděny na čtyřech jádrech z celkových šesti kvůli dostupné licenci.

I přes značnou časovou náročnost výpočtů dynamických simulací bylo možné všechny výpočty provést na výše zmíněném notebooku bez využití vypočetního serveru.

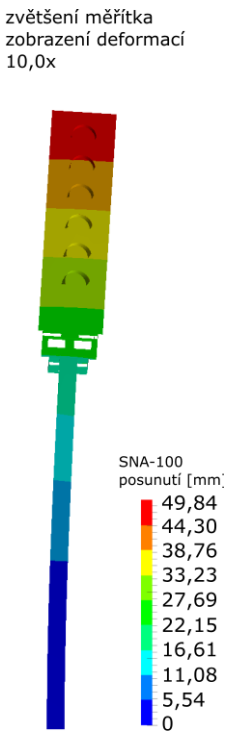
Kapitola 8

Statické simulace

Prvními provedenými simulacemi byly simulace statické, kdy se zatížení nemění v průběhu času. Zatížení takto provedených simulací odpovídá výpočtům dle norem a bylo jich provedeno několik s odlišnými kombinacemi zatížení.

8.1 Simulace průjezdu jednoho vlaku

Prvním krokem bylo provedení simulace, kdy byla konstrukce návěstidla zatížena větrem působícím ve směru rovnoběžném s osou koleje a průjezdem jednoho vlaku o rychlosti $200\,\mathrm{km} \cdot \mathrm{h}^{-1}$, jak je popsáno v částech 7.1.1 a 7.1.2.



Obrázek 19: Výsledné posunutí v mm, statická simulace, jeden vlak

Na obrázku 19 je výsledné celkové posunutí konstrukce návěstidla uvedené v milimetrech. Maximální výchylka dosahuje hodnoty 49,84 mm a výpočet simulace trval 10 s. Jak bylo uvedeno v části 7.1, jedná se o prostorový vektor posunutí složený z posunutí ve všech třech souřadnicových osách.

Tato simulace sloužila nejen k určení maximální výchylky konstrukce, ale také ke správnému nastavení modelu a byla zde definována výše zmíněná velikost elementu 0,02 m a hmotné body reprezentující hmotnost svítilen a indikátorů. Toto nastavení bylo dále aplikováno pro všechny další provedené simulace.

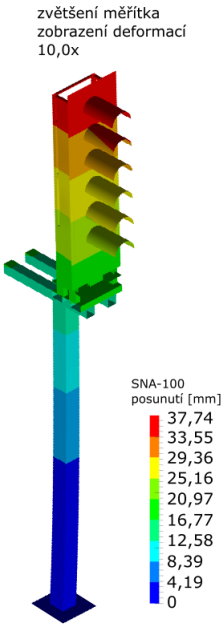
8.2 Simulace průjezdu dvou vlaků

V dalším kroku bylo simulováno zatížení konstrukce návěstidla způsobené větrem působícím rovnoběžně s osou koleje a průjezdem dvou vlaků, jak bylo popsáno v části 7.1.1, resp. v části 7.1.3.

8.2.1 Umístění návěstidla mezi koleje

První provedenou variantou bylo zatížení konstrukce návěstidla dle schématu na obrázku 15 v části 7.1.3.

Simulace sloužila především k tomu, aby bylo názorně ukázáno, že ve statické simulaci vyjde deformace, která neodpovídá skutečným deformacím konstrukce při průjezdu dvou vlaků o rychlosti 200km $\cdot$ h^{-1} při umístění návěstidla mezi koleje. Dochází k tomu kvůli působení tlakových polí proti sobě, protože simulace nebere v potaz časový průběh průjezdu dvou vlaků.

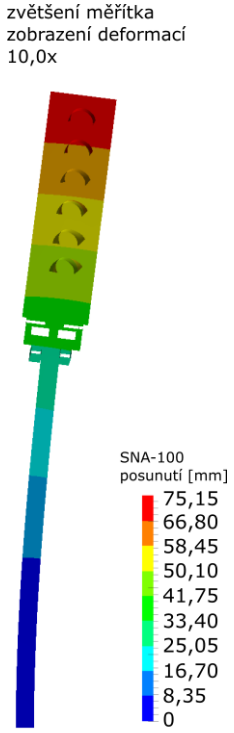


Obrázek 20: Výsledné posunutí v mm, statická simulace, dva vlaky, návěstidlo mezi kolejemi

Výsledné posunutí v mm je zobrazeno na obrázku 20. Maximální výchylka se opět nachází v nejvyšším bodě konstrukce železničního návěstidla a dosahuje hodnoty 37,74 mm. Takový výsledek je nesprávný, protože se jedná o výchylku menší než při průjezdu jednoho vlaku. Výpočet simulace trval 9 s.

8.2.2 Dvojnásobek zatížení

Jak bylo ukázáno v předchozím scénáři, definovat zatížení tak, aby odpovídalo umístění konstrukce mezi koleje není ve statické simulaci možné. Proto byla provedena druhá varianta, která odpovídá běžnému postupu, kdy bylo zatížení od jednoho vlaku jednoduše zdvojnásobeno a oba vlaky tak působí na návěstidlo z jedné strany.



Obrázek 21: Výsledné posunutí v mm, statická simulace, dva vlaky, dvojnásobek zatížení

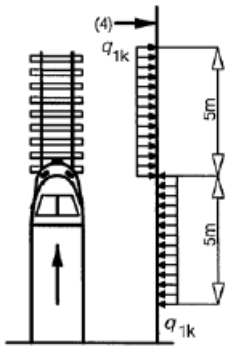
Výsledné posunutí v mm je zobrazeno na obrázku 21. Maximální výchylka se opět nachází v nejvyšším bodě konstrukce železničního návěstidla a dosahuje hodnoty 75,15 mm. Tento výsledek již odpovídá zvětšení zatížení oproti variantě s průjezdem pouze jednoho vlaku. Výpočet simulace trval 9 s.

Kapitola 9

Dynamické simulace

Druhým typem provedených simulací byly simulace dynamické. Oproti statickým simulacím u nich dochází ke změnám zatížení v průběhu času definovaných pomocí zatěžovacích kroků (load step) a jsou tak výrazně náročnější na výpočet i nastavení. Doba výpočtu se v porovnání se statickými simulacemi pohybuje v řádu minut či hodin.

Jak již bylo uvedeno v kapitole 3, dle [6] je zatížení při průjezdu vlakem definováno tlakem ve vzdálenosti 5 m před železničním návěstidlem a 5 m za ním. V prvních pěti metrech dochází k sání konstrukce a ve chvíli, kdy vlak mine návěstidlo se zatížení změní na tlak (viz obrázek 22).



Obrázek 22: Průběh zatížení od vlaku [6]

Jelikož ANSYS umožňuje změnu zatížení definovat v čase pouze lineárně, bylo nutné skokovou změnu zatížení aproximovat do malého časového úseku. Bylo stanoveno, že předepsaná změna zatížení proběhne v časovém úseku 0,001 s, který je dostatečně krátký, aby zohlednil její skokový charakter.

Ze známé rychlosti vlaku a dráhy, kterou ujede během působení na konstrukci železničního návěstidla byl stanoven čas, po který k tomuto působení dochází:

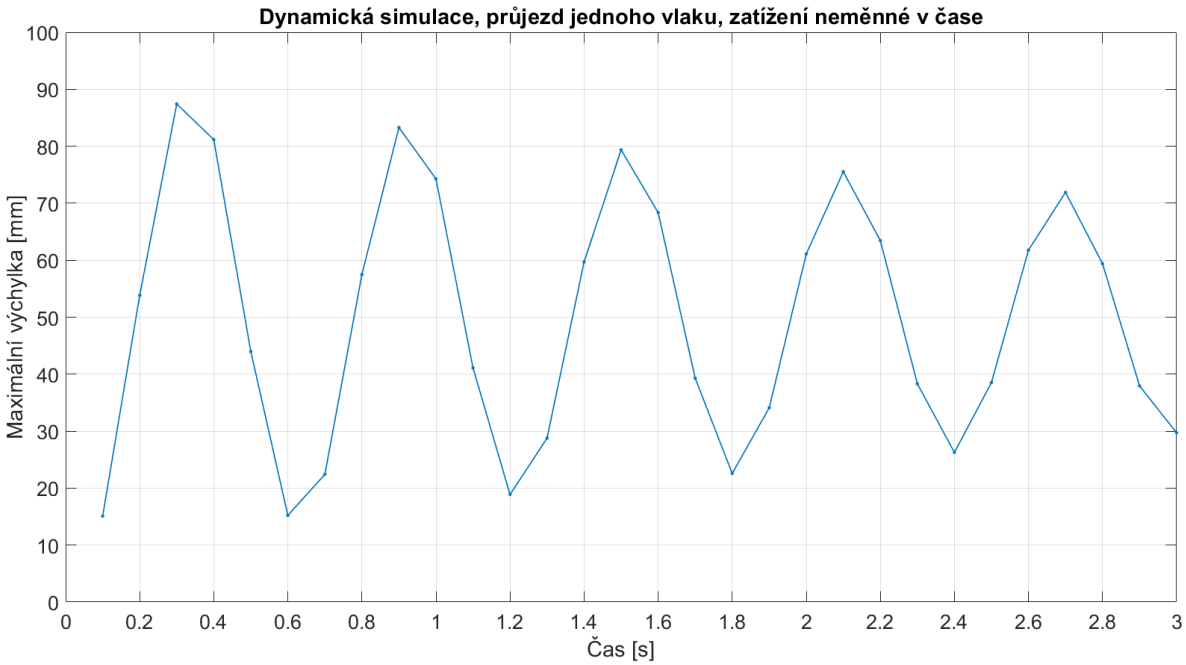
$$t = \frac{s}{v} = \frac{5}{\frac{200}{3,6}} = 0,09\,\mathrm{s} \tag{69}$$

9.1 Simulace průjezdu jednoho vlaku

Nejprve byly vytvořeny dvě simulace, ve kterých byla konstrukce železničního návěstidla zatížena průjezdem jednoho vlaku o rychlosti 200km $\cdot$ h^{-1} a větrem působícím rovnoběžně s osou koleje.

9.1.1 Zatížení neměnné v čase

Prvním krokem bylo vytvoření co nejjednodušší dynamické simulace, ve které bylo definováno zatížení od větru působícím ve směru rovnoběžném s osou koleje a od průjezdu jednoho vlaku, jak je blíže popsané v částech 7.1.1 a 7.1.2, ale nebyl brán v potaz průběh zatížení tak, jak je zobrazen na obrázku 22. Zatížení bylo definováno jako neměnné po dobu 3 s. Simulace díky tomu obsahovala pouze jeden zatěžovací krok a byla tak jednodušší na sestavení analýzy. Časový krok byl zvolen jako 0,1 s a celkový čas simulace byl nastaven na výše zmíněné 3 s. Doba výpočtu této simulace byla 15 min 50 s.



Obrázek 23: Průběh kmitání konstrukce, zatížení neproměnné v čase

Přestože simulace nemá vypovídající výsledky posunutí konstrukce ve vztahu k normám, sloužila k ověření správného chování modelu - tedy k ověření, že při působení tlaku od větru a vlaku dojde k rozkmitání konstrukce a v průběhu času dochází k tlumení tohoto kmitání. Výsledný průběh kmitání celé konstrukce je zobrazen v grafu na obrázku 23. V grafu je dobře patrné, že celkový počet kroků je poměrně nízký a proto průběh grafu není hladký.

9.1.2 Zatížení proměnné v čase

Druhou simulací již byla simulace zatížení konstrukce návěstidla působením větru ve směru rovnoběžném s osou koleje a průjezdem jednoho vlaku s ohledem na průběh zatížení, jak je zobrazený na obrázku 22. V první fázi tak vlak po dobu 0,09 s působí na konstrukci jako sání a dalších 0,09 s působí na návěstidlo tlakem.

Celkem tak bylo potřeba využít 7 zatěžovacích kroků. V prvním kroku na návěstidlo nepůsobí žádná síla ani tlak. Tento krok je zde především pro snadnou interpretaci výsledku, kdy bude ve výsledném grafu dobře patrný začátek zatěžování.

V čase 1 s je na konstrukci aplikováno zatížení od větru a sání od vlaku. Následně v čase 1,091 s dojde ke změně směru tlaku od působení vlaku a v čase 1,181 s jsou odebrána všechna zatížení kromě zatížení větrem, které zůstává po celou dobu simulace. Časy odpovídají rychlosti vlaku $200\mathrm{km} \cdot \mathrm{h}^{-1}$ a ujeté vzdálenosti 5 m.

Přehled všech zatěžovacích kroků je shrnut v tabulce 5. Čísla vyjadřují velikost koeficientu, kterým je přenásoben sloupec reprezentující tlak v textovém souboru vytvořeném v prostředí MATLAB (viz část 6.4) a odpovídají maximálním hodnotám zatížení tlakem v dané části konstrukce.

Tabulka 5: Zatěžovací kroky, průjezd jednoho vlaku

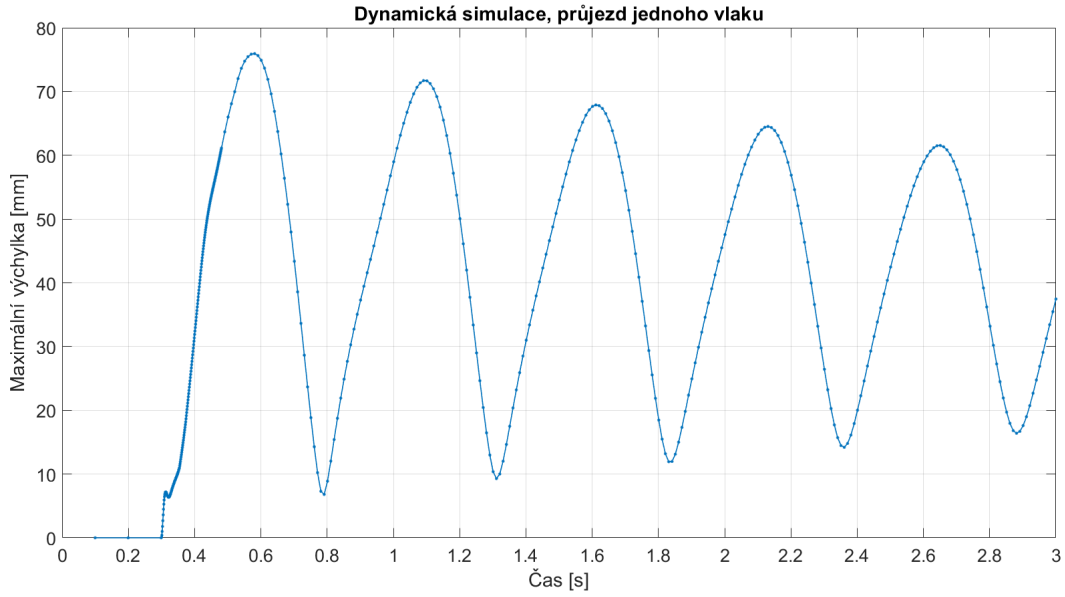
	čas [s]	0,299	0,300	0,390	0,391	0,48	0,481	3,000
Vítr	stožár	0	-1657	-1657	-1657	-1657	-1657	-1657
	horní část	0	-1626	-1626	-1626	-1626	-1626	-1626
Vlak	stožár	0	2475	2475	-2475	-2475	0	0
	horní část	0	1875	1875	-1875	-1875	0	0
	stínidla	0	1200	1200	-1200	-1200	0	0

Časové kroky v jednotlivých zatěžovacích krocích byly definovány pomocí času, a jsou shrnuty v tabulce 6.

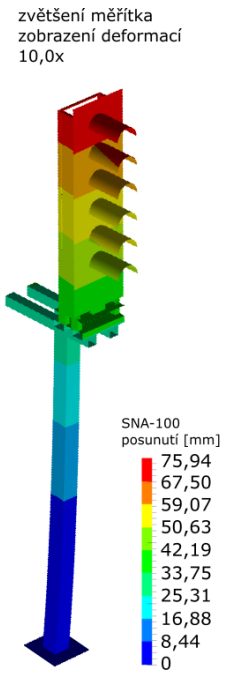
Tabulka 6: Časové kroky, průjezd jednoho vlaků

Zatěžovací krok	Počáteční čas čas [s]	Koncový čas [s]	Velikost časového kroku [s]
1	0,000	0,299	0,001
2	0,299	0,300	0,001
3	0,300	0,390	0,001
4	0,390	0,391	0,001
5	0,391	0,480	0,001
6	0,480	0,481	0,001
7	0,481	0,570	0,010

Výsledné kmitání konstrukce je zobrazené v grafu na obrázku 24. V grafu je možné pozorovat vybuzení konstrukce a první kmit s výrazně menší amplitudou a následné kmitání konstrukce až do konečného času 3,0 s. Výsledný graf je také mnohem přesnější než graf kmitání v první dynamické simulaci a to díky výrazně vyššímu počtu kroků výpočtu. Výsledné celkové posunutí je možné vidět na obrázku 25. Maximální výchylka dosahuje hodnoty 75,94 mm. Výpočet simulace trval celkem 1 hod 16 min.



Obrázek 24: Průběh kmitání konstrukce, dynamická simulace



Obrázek 25: Výsledné posunutí v mm, dynamická simulace, průjezd jednoho vlaku

9.2 Simulace průjezdu dvou vlaků

Další provedou simulací byla simulace průjezdu dvou vlaků v těsné blízkosti železničního návěstidla SNA-100, tak jak je popsána v části 7.1.3. Na konstrukci tak působí zatížení od větru ve směru rovnoběžném se směrem koleje, vlak č.1 zprava a vlak č.2 zleva. Jedná se o nekritičtější situaci, kdy se vlaky setkají ve chvíli, kdy jeden z nich působí na návěstidlo sáním a druhý tlakem.

Přehled všech zatěžovacích kroků je shrnut v tabulce 7.

Tabulka 7: Zatěžovací kroky, průjezd dvou vlaků

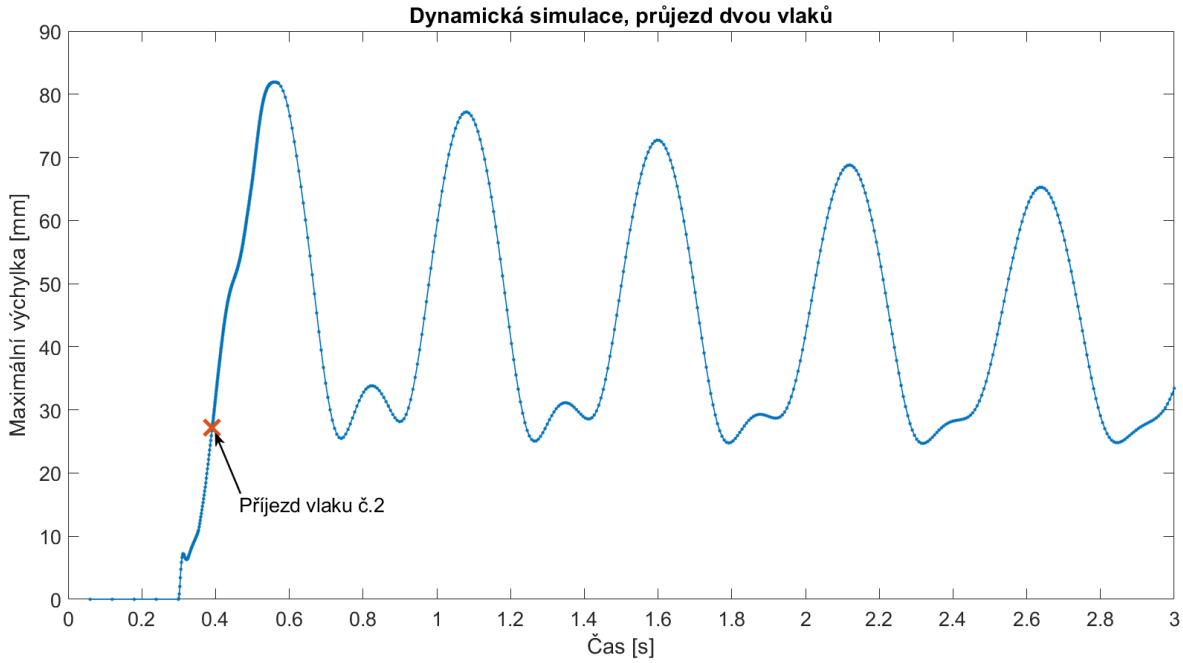
	čas [s]	0,299	0,300	0,390	0,391	0,48	0,481	0,570	0,571	3,000
Vítr	stožár	0	-1657	-1657	-1657	-1657	-1657	-1657	-1657	-1657
	horní část	0	-1626	-1626	-1626	-1626	-1626	-1626	-1626	-1626
Vlak č. 1	stožár	0	-2475	-2475	2475	2475	0	0	0	0
	horní část	0	-1875	-1875	1875	1875	0	0	0	0
	svítilny	0	-1200	-1200	-1200	-1200	0	0	0	0
Vlak č.2	stožár	0	0	0	2475	2475	-2475	-2475	0	0
	horní část	0	0	0	1875	1875	-1875	-1875	0	0
	stínidla	0	0	0	1200	1200	-1200	-1200	0	0

Situaci lze popsat tak, že nejprve se k návěstidlu blíží vlak č. 1, který jede na koleji vpravo od návěstidla a na konstrukci působí sáním. Ve chvíli, kdy se směr zatížení od vlaku č. 1 změní na tlak se objeví vlak č. 2, který jede na koleji vlevo od konstrukce návěstidla a začne na ni působit sáním. V posledním časovém úseku je odebráno zatížení od vlaku č. 1 a dochází ke změně směru působení zatížení od vlaku č. 2 ze sání na tlak.

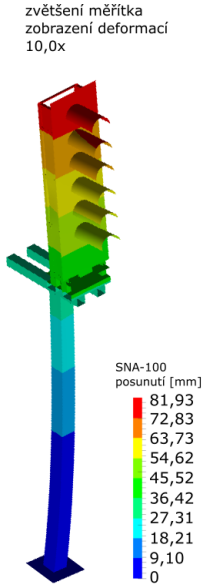
Tabulka 8: Časové kroky, průjezd dvou vlaků

Zatěžovací krok	Počáteční čas čas [s]	Koncový čas [s]	Počet časových kroků
1	0,000	0,299	5
2	0,299	0,300	5
3	0,300	0,390	60
4	0,390	0,391	5
5	0,391	0,480	200
6	0,480	0,481	5
7	0,481	0,570	200
8	0,570	0,571	5
9	0,571	3,000	400

Kvůli náročnosti simulace s takovýmto průběhem zatížení bylo nutné navýšit výrazně i počet časových kroků, které jsou během jednoho zatěžovacího kroku provedeny. V této simulaci nebyly časové kroky definovány pomocí času, ale pomocí jejich počtu a jsou shrnuty v tabulce 8. Definice pomocí počtu kroků zjednodušila zvýšení počtu kroků, které bylo nutné kvůli problémům s konvergencí výsledků v některých bodech simulace.



Obrázek 26: Průběh kmitání konstrukce, průjezd dvou vlaků



Obrázek 27: Výsledné posunutí v mm, dynamická simulace, průjezd dvou vlaků

Výsledné kmitání konstrukce je zobrazené v grafu na obrázku 26. V grafu je znázorněný okamžik, kdy se objeví vlak č. 2 a je v něm možné pozorovat, že po zahájení působení tlaku od vlaku č. 2 se výrazně zvýší amplituda kmitání a konstrukce dosáhne maximální výchylky 81,93 mm. Celkové posunutí je možné vidět na obrázku 27. Výpočet simulace trval celkem 2 hod 42 min.

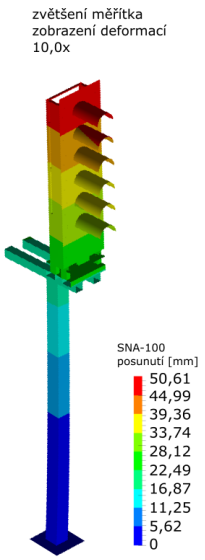
9.3 Doplňující simulace průjezdu jednoho vlaku

Protože byl z výsledků statických a dynamických simulací patrný výrazný rozdíl v maximální výchylce konstrukce, byla provedena ještě jedna doplňková simulace průjezdu jednoho vlaku spolu se zatížením větrem působícím rovnoběžně s osou koleje. Tato kombinace zatížení byla zvolena s ohledem na jednoznačnost definování zatížení v obou druzích simulace.

V této simulaci nebyly použity návrhové hodnoty tlaků od větru a vlaku, jak jsou uvedeny v tabulce 4, ale hodnoty reprezentativních tlaků. Ty odpovídají odpovídá tlakům návrhovým před vynásobením součinitelem bezpečnosti $\gamma_f = 1,5$. Hodnoty maximálních reprezentativních tlaků od působení větru a vlaku na jednotlivé části konstrukce jsou shrnuty v tabulce 9 a byly opět použity k přenásobení koeficientu v textovém souboru mapujícím tlakové pole, jak je popsáno v části 6.4. Časový průběh zatížení byl shodný jako v simulaci v části 9.1.

Tabulka 9: Velikost použitých maximálních reprezentativních tlaků

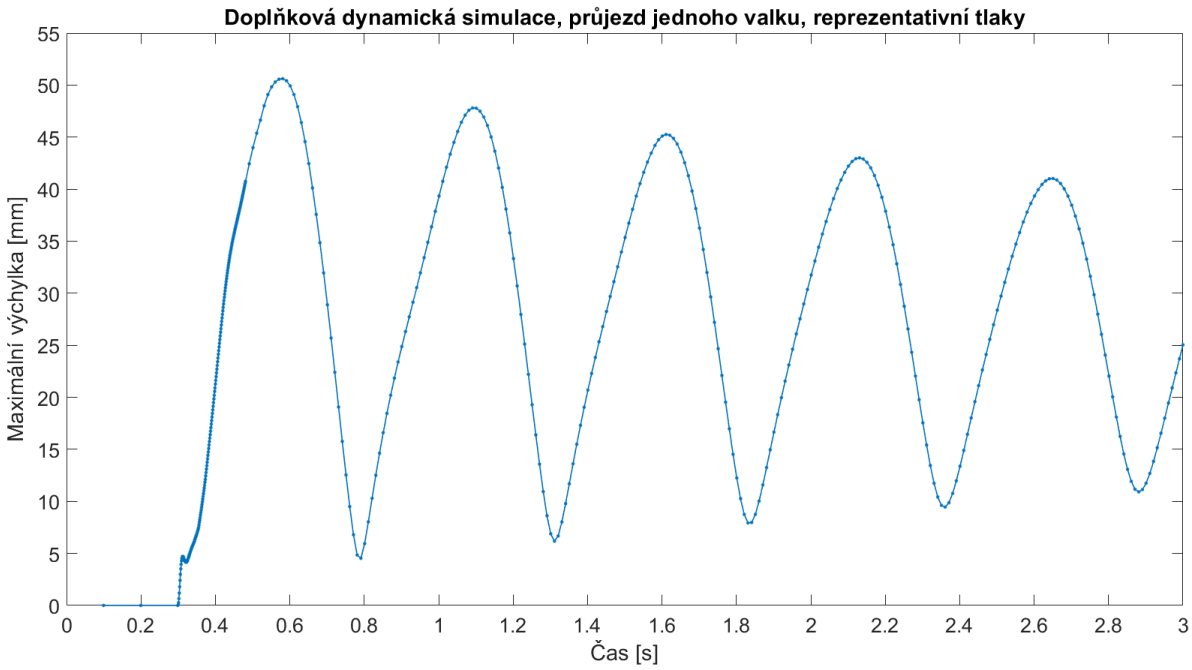
Zatížení od vlaku	hlavní stožár	1650 Pa
	horní část konstrukce	1250 Pa
	stínítka	800 Pa
Zatížení od větru	hlavní stožár	1104 Pa
	horní část konstrukce	1084 Pa



Obrázek 28: Výsledné posunutí v mm, průjezd jednoho vlaku, reprezentativní tlaky

Výsledné kmitání konstrukce je zobrazené v grafu na obrázku 29. Maximální výchylka dosahuje hodnoty 50,61 mm. Celkové posunutí je možné vidět na obrázku 28. Výpočet simulace trval celkem 1 hod 51 min.

Maximální výchylka takto definované simulace se velmi blíží maximální výchylce statické simulace se stejnou kombinací zatížení konstrukce, ale za použití návrhových tlaků. Lze tak tvrdit, že součinitel bezpečnosti $\gamma_f = 1,5$ počítá s dynamickými účinky zatížení. Detailnější porovnání obou simulací je uvedeno v následující kapitole.



Obrázek 29: Průběh kmitání konstrukce, průjezd jednoho vlaku, reprezentativní tlaky

Kapitola 10

Porovnání

Jak již bylo popsáno v kapitolách 8 a 9, v programu ANSYS Workbench 2021 R1 bylo provedeno několik statických a dynamických simulací na detailním numerickém modelu železničního návěstidla SNA-100.

Zásadním rozdílem mezi statickými a dynamickými simulacemi je změna zatížení v průběhu času a s tím spojená výpočetní náročnost. Časové náročnosti výpočtů všech simulací jsou shrnuty v tabulce 10.

Tabulka 10: Časová náročnost výpočtu všech provedených simulací

Typ simulace	Zatížení	Celková doba výpočtu
Statická	Průjezd jednoho vlaku	10 s
Statická	Průjezd dvou vlaků, návěstidlo mezi kolejemi	9 s
Statická	Průjezd dvou vlaků, dvojnásobek zatížení	9 s
Dynamická	Průjezd jednoho vlaku, zatížení neměnné v čase	15 min 50 s
Dynamická	Průjezd jednoho vlaku	1 hod 16 min
Dynamická	Průjezd dvou vlaků	2 hod 42 min
Dynamická	Průjezd jednoho vlaku, reprezentativní tlaky	1 hod 51 min

Z tabulky je patrný nárůst potřebného času pro výpočet s tím, jak narůstá složitost definování zatížení v jednotlivých variantách simulací. Výpočet statických simulací, které se běžně využívají k simulaci zatížení definovaných výpočty dle norem, se pohybují v řádu sekund. První varianta dynamické simulace, kde nedocházelo ke změně zatížení v průběhu času se pohybovala v řádu minut. Oproti tomu čas výpočtu simulací, kde je průjezd vlaku stanoven pomocí sání a tlaku narůstá do řádu hodin. Nejdelší výpočet odpovídá simulaci, kde je zatížení definováno pomocí nejvyššího počtu zatěžovacích kroků.

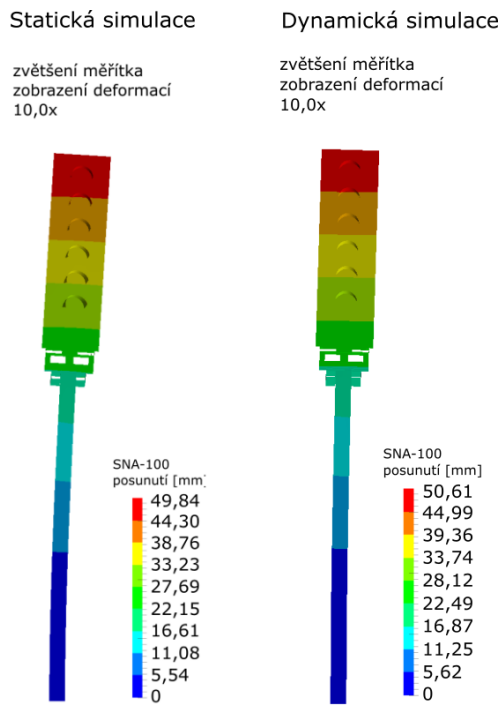
V tabulce 11 jsou uvedeny hodnoty maximálního posunutí v mm pro všechny provedené simulace. Výsledné hodnoty reprezentují vektor posunutí složený z posunutí ve směrech všech tří souřadných os a jedná se o maximální hodnoty na celé konstrukci železničního návěstidla.

Tabulka 11: Maximální hodnoty posunutí v mm pro provedené simulace

Typ simulace	Zatížení	Maximální výchylka [mm]
Statická	Průjezd jednoho vlaku	**49,84** mm
Statická	Průjezd dvou vlaků, návěstidlo mezi kolejemi	37,74 mm
Statická	Průjezd dvou vlaků, dvojnásobek zatížení	75,15 mm
Dynamická	Průjezd jednoho vlaku	75,94 mm
Dynamická	Průjezd dvou vlaků	81,93 mm
Dynamická	Průjezd jednoho vlaku, reprezentativní tlaky	**50,61** mm

Jak je patrné z tabulky 11, maximální posunutí v mm vychází ve všech simulacích ve stejném řádu. Je ovšem možné pozorovat vyšší hodnoty u simulací dynamických, které berou v potaz průběh zatížení od větru a od průjezdu vlaku v čase oproti statickým simulacím, které pouze aplikují zatížení vypočítané dle norem v jeden okamžik.

U statické simulace průjezdu dvou vlaků bylo ukázáno, že není možné definovat zatížení od průjezdu dvou vlaků při umístění návěstidla mezi koleje, protože výsledek simulace neodpovídá zvětšení zatížení.



Obrázek 30: Porovnání statické a doplňující dynamické simulace, průjezd jednoho vlaku

Pro porovnání byla vytvořena doplňující dynamická simulace, kdy byla konstrukce železničního návěstidla zatížena větrem působícím ve směru rovnoběžném s osou koleje a průjezdem jednoho vlaku. Tato zatížení ovšem nebyla definována pomocí tlaků návrhových, ale reprezentativních (tedy tlaků návrhových před vynásobením součinitelem bezpečnosti $\gamma_f = 1,5$). V porovnání se

statickou simulací se stejnou kombinací zatížení, ale definovaných pomocí tlaků návrhových vyšla téměř stejná maximální odchylka. Obě hodnoty jsou v tabulce 11 vyznačeny tučně. Je tak možné tvrdit, že součinitel bezpečnosti $\gamma_{\mathrm{f}} = 1,5$, kterým je přenásobena hodnota reprezentativního tlaku počítá s dynamickými účinky zatížení. Porovnání posunutí na celé konstrukci pro tyto dvě provedené simulace je zobrazeno na obrázku 30. Je patrné, že ačkoli maximální výchylka, a tedy velikost vektoru posunutí, je pro obě simulace téměř stejná, je možné pozorovat odlišnosti v deformaci jednotlivých částí konstrukce. Řešení pomocí dynamické simulace navíc oproti statické simulaci umožňuje analýzu kmitání konstrukce.

Bylo prokázáno, že nejkritičtější variantou je situace míjení dvou vlaků v rychlosti $200\,\mathrm{km} \cdot \mathrm{h}^{-1}$ v těsné blízkosti železničního návěstidla SNA-100 umístěného mezi kolejemi s maximální výchylkou 81,93 mm .

Kapitola 11

Diskuze

Cílem této diplomové práce bylo vytvoření komplexního detailního numerického modelu železničního návěstidla typu SNA-100, který bude možné použít pro simulaci rámcového chování konstrukce v řadě různých scénářů zahrnujících např. průjezd vlaku nebo vliv povětrnostních podmínek.

V teoretické části práce byla provedena rešeršní studie platných norem pro definici zatížení tlakem od působícího větru a průjezdu vlaku v těsné blízkosti návěstidla a dále metody konečných prvků.

První kapitola praktické části diplomové práce se zabývá tvorbou numerického modelu železničního návěstidla typu SNA-100. Jsou zde definovány geometrické a materiálové vlastnosti vytvořeného modelu.

Druhá kapitola se věnuje výpočtům zatížení dle platných stavebních a dalších norem, jejichž rešerše byla provedena v teoretické části. Bylo tak stanoveno zatížení konstrukce tlakem od větru působícího rovnoběžně s osou koleje a zatížení tlakem od průjezdu vlaku. Výsledkem byly návrhové tlaky od větru, resp. od průjezdu vlaku v rychlosti $200\,\mathrm{km} \cdot \mathrm{h}^{-1}$, působící na jednotlivé části konstrukce, která byla pro tyto účely rozdělena na stožár a horní část konstrukce.

Dále již následují kapitoly týkající se provedených numerických simulací. Nejprve byly definovány společné parametry pro všechny tyto simulace - jakým způsobem bylo aplikováno zatížení na výše zmíněné části konstrukce, jak proběhla diskretizace modelu na síť konečných prvků, jak bylo definováno tlumení konstrukce a jaký hardware byl využit k provedení všech výpočtů.

Celkem byly provedeny tři různé statické simulace. První z nich byla simulace, kde docházelo k působení větru ve směru rovnoběžném s osou koleje a průjezdu jednoho vlaku. Tato simulace navíc sloužila k ověření funkčnosti modelu návěstidla a byly zde definovány hmotné body a také konečně prvková síť. Toto nastavení bylo dále použito pro všechny provedené simulace.

Zbylé dvě statické simulace počítají se zatížením konstrukce větrem působícím ve směru rovnoběžném s osou koleje a průjezdem dvou vlaků. První z nich sloužila spíše k ukázání, že ve statické simulaci nelze správně definovat průjezd dvou vlaků při umístění návěstidla mezi koleje, protože

není zohledněn časový průběh zatížení, ale pouze jeho směr. Ve druhé variantě tak byl proveden standardní postup, kdy se zatížení od jednoho vlaku pouze zdvojnásobilo a bylo aplikováno na konstrukci z jednoho směru.

Dalším krokem již bylo provedení výpočetně náročnějších dynamických simulací. Opět proběhla nejprve úvodní simulace, která neměla zatížení definované dle norem a působení tlaku bylo neměnné po celou dobu simulace. Tato simulace sloužila k ověření funkčnosti modelu během dynamických simulací s ohledem na její kratší výpočetní dobu, která se pohybovala v řádu minut.

Všechny další provedené dynamické simulace počítaly se změnou zatížení v průběhu času. Při průjezdu vlaku nejprve dochází k sání po dobu odpovídající vzdálenosti 5 m před konstrukcí návěstidla a ve chvíli, kdy vlak konstrukci mine se změní směr zatížení na tlak a je aplikováno po dobu průjezdu odpovídající vzdálenosti 5 m od konstrukce návěstidla. Byla provedena simulace průjezdu jednoho a následně dvou vlaků v kombinaci se zatížením konstrukce větrem působícím rovnoběžně se směrem osy koleje.

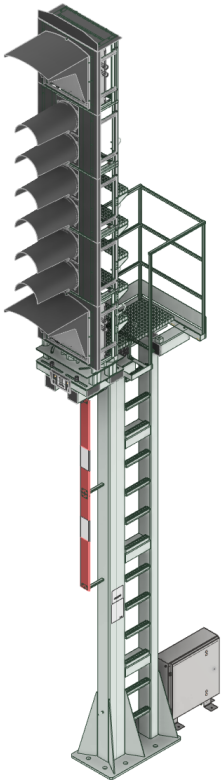
Výsledkem dynamických simulací nebyl jen výsledný vektor posunutí na celé konstrukci železničního návěstidla, ale také průběh kmitání, ke kterému dojde po vybuzení konstrukce vlivem působícího tlaku od působení větru a průjezdu vlaku.

Protože byly patrné výrazné rozdíly mezi statickými a dynamickými simulacemi byla provedena ještě doplňující dynamická simulace průjezdu jednoho vlaku, kde byla všechna zatížení definována pomocí reprezentativních tlaků (tedy návrhových tlaků před vynásobením součinitelem bezpečnosti $\gamma_{\mathrm{f}} = 1,5$). Tato simulace byla následně porovnána se statickou simulací průjezdu jednoho vlaku, kde bylo zatížení dáno návrhovými tlaky.

Poslední část diplomové práce je věnována detailnímu porovnání provedených statických a dynamických simulací. Ačkoli se výsledky pro oba typy simulací pohybují ve stejném řádu, tak se výrazně liší. To je pravděpodobně způsobené přesnou definicí zatížení, které se v dynamických simulacích mění s průběhem času během průjezdu vlaku v blízkosti návěstidla. Je tak možné tvrdit, že ačkoli statické simulace poskytují nesporné výhody především s ohledem na časovou náročnost výpočtu a složitost nastavení simulace, poskytují výsledky, které se od reálné výchylky pravděpodobně výrazně liší a je tak vhodnější použít simulace dynamické, které poskytují přesnější analýzu chování konstrukce včetně analýzy kmitání.

Přestože byly simulace definovány tak, že se návěstidlo typu SNA-100 při průjezdu dvou vlaků nacházelo mezi kolejemi, není tento prototyp díky svým rozměrům pro tento účel vhodné. Při uvažování osové vzdálenosti kolejí 4700 mm totiž zasahuje ve výšce 4200 mm, svým nejširším místem o šírce 790 mm do průjezdného profile koleje.

V současné době tak probíhá vývoj nového typu železničního návěstidla s označením SNA-130. Tento typ návěstidla disponuje dvěma stožáry mezi kterými se nachází žebřík sloužící k údržbě konstrukce, jak je zobrazené na obrázku 31. Díky tomu se konstrukce stává tužší a lze předpokládat, že její deformace budou v porovnání s železničním návěstidlem typu SNA-100 menší.



Obrázek 31: Vizualizace železničního návěstidla typu SNA-130 [15]

Kapitola 12

Závěr

V rámci této diplomové práce byl vyvinut detailní model prototypu železničního návěstidla typu SNA-100. Ten byl následně použitý v několika statických a dynamických simulacích, a byl zatěžován tlaky od větru a průjezdu vlaku vypočítanými z platných stavebních a dalších norem.

Funkčnost vytvořeného modelu byla validována na statických simulacích, které byly provedeny v několika variantách s ohledem na kombinaci zatížení. Takto provedené simulace odpovídají provedeným statickým výpočtům dle norem.

Následně byly provedeny dynamické simulace průjezdu jednoho, resp. dvou vlaků v těsné blízkosti konstrukce návěstidla. Ukázalo se, že hodnoty maximální výchylky konstrukce jsou u dynamických simulací výrazně vyšší než u simulací statických.

Byla tak provedena ještě jedna doplňující dynamická simulace, kde bylo zatížení poníženo o součinitel bezpečnosti $\gamma_{\mathrm{f}} = 1,5$. Její výsledky ukazují, že hodnota maximální výchylky konstrukce při takto definovaném zatížení přibližně odpovídá hodnotě maximální výchylky simulace statické se zatížením návrhovými tlaky. Z toho je možné tvrdit, že součinitel bezpečnosti $\gamma_{\mathrm{f}} = 1,5$ v sobě obsahuje vliv dynamického chování konstrukce a výsledky statické simulace se zatížením definovaným dle platných norem reprezentují reálné dynamické chování konstrukce s dostatečnou přesností.

Potvrdilo se, že kritický je případ průjezdu dvou vlaků v těsné blízkosti návěstidla, kdy je konstrukce umístěna mezi kolejemi. Spolupůsobení vlastního kmitání konstrukce návěstidla a rychlosti vlaku v tomto případě způsobuje zvýšení maximální výchylky konstrukce. Tento scénář by pravděpodobně bylo možné variovat tak, aby byla nalezena nejkritičtější situace.

Seznam použité literatury

1. ACRI. *AŽD Praha testuje nové světelné návěstidlo SNA-100* [online]. 2018 [cit. 2021-03-10]. Dostupné z: https://acri.cz/2018/07/20/azd-praha-testuje-nove-svetelne-navestidlo-sna-100/.
2. VLČKOVÁ, Kateřina. *Numerická analýza železničního návěstidla* [online] [cit. 2021-08-07]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/85246/F6-BP-2019-Vlckova-Katerina-bakalarska_prace.pdf?sequence=-1&isAllowed=y.
3. *Mapy.cz* [online]. 2021 [cit. 2021-07-30]. Dostupné z: https://en.mapy.cz/turisticka?x=13.8341884&y=50.4474468&z=17&q=lib%C4%8Deves&source=muni&id=1981.
4. ČSN EN 1991-1-4. *Zatížení konstrukcí - Část 1-4: Obecná zatížení - Zatížení větrem.* Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
5. ČSN EN 1990. *Zásady navrhování konstrukcí.* Praha: Český normalizační institut, 2004.
6. ČSN EN 1991-2. *Zatížení konstrukcí - Část 2: Zatížení mostů dopravou.* Praha: Český normalizační institut, 2005.
7. KAZDA, Ivo. *Numerické modelování metodou konečných prvků.* Praha: České vysoké učení technické, 1995. ISBN 80-01-01321-9.
8. FUSEK, Martin; HALAMA, Radim. *MKP a MHP* [online]. 2011 [cit. 2021-04-03]. Dostupné z: http://mi21.vsb.cz/sites/mi21.vsb.cz/files/unit/metoda_konecnych_prvku_a_hranicnich_prvku.pdf.
9. PETRUŠKA, Jindřich. *Počítačové metody mechaniky II* [online]. Brno: Vysoké učení technické, 2003 [cit. 2021-04-03]. Dostupné z: http://www.kvm.tul.cz/getFile/id:2499.
10. BITTNAROVÁ, Jitka; FAJMAN, Petr; KALOUSKOVÁ, Marie; ŠEJNOHA, Jiří. *Pružnost a pevnost 20.* Praha: Vydavatelství ČVUT, 1998. ISBN 80-01-01835-0.
11. YANG, Xin-She. *Applied engineering mathematics.* Cambridge: Cambridge International Science Publishing, 2007. ISBN 978-1-904602-56-9.
12. VRBKA, Martin; VEVERKA, Michal. *Metoda konečných prvků* [online] [cit. 2021-04-03]. Dostupné z: http://www.shigley.cz/images/texts/file/prednaska1_mkp.pdf.
13. OZEN ENGINEERING INC. *Ansys workbench platform* [online]. 2021 [cit. 2021-04-03]. Dostupné z: https://www.ozeninc.com/ansys-workbench/#:~:text=In%20Geometry%20Interfaces%2C%20Ansys%20Workbench,and%20helps%20ensure%20accurate%20solutions..

14. PENINSULAR, Steel Tubes. *Material data sheet* [online] [cit. 2019-07-05]. Dostupné z: https://www.peninsulardevastagos.es/wp-content/uploads/EN-10219.-S235JRH-S275J0H-S355J2H.pdf.

15. AŽD, Praha s.r.o.

16. CAI, C.; ZHENG, H.; KHAN, M. S.; HUNG, K. C. *Modeling of Material Damping Properties in ANSYS* [online] [cit. 2019-08-13]. Dostupné z: https://support.ansys.com/staticassets/ANSYS/staticassets/resourcelibrary/confpaper/2002-Int-ANSYS-Conf-197.PDF.

17. CASIANO, M.J. *Extracting Damping Ratio From Dynamic Data and Numerical Solutions* [online] [cit. 2021-08-07]. Dostupné z: https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20170005173.pdf.

Seznam obrázků

1 Železniční návěstidlo SNA-100 12

2 Prototyp železničního návěstidla SNA-100 na mapě 13

3 Součinitel síly $c_{\mathrm{f},0}$ pro obdélníkové průřezy s ostrými rohy bez vlivu proudění kolem volných konců 17

4 Redukční součinitel ψ_r pro čtvercový průřez se zaoblenými rohy 18

5 Součinitel koncového efektu ψ_λ 18

6 Ekvivalentní hodnota zatížení $q_{1\mathrm{k}}$ 19

7 Detailní model návěstidla SNA-100 s rozměry v mm 25

8 Označení hmotných bodů 26

9 Numerický model železničního návěstdila SNA-100 (délkové rozměry v mm) . . . 27

10 Části konstrukce z oceli S355J2H (vyznačené zeleně) 28

11 Průběh zatížení konstrukce návěstidla od průjezdu vlaku dle výšky 35

12 Zatížení od větru 38

13 Zatížení od průjezdu jednoho vlaku 38

14 Zatížení od průjezdu jednoho vlaku - detail horní části konstrukce 39

15 Umístění železničního návěstidla SNA-100 39

16 Zatížení od průjezdu vlaku č.1 40

17 Zatížení od průjezdu vlaku č.1 - detail horní části konstrukce 40

18 Konečně prvková síť 41

19 Výsledné posunutí v mm, statická simulace, jeden vlak 43

20 Výsledné posunutí v mm, statická simulace, dva vlaky, návěstidlo mezi kolejemi . 44

21 Výsledné posunutí v mm, statická simulace, dva vlaky, dvojnásobek zatížení . . . 45

22 Průběh zatížení od vlaku 46

23 Průběh kmitání konstrukce, zatížení neproměnné v čase 47

24 Průběh kmitání konstrukce, dynamická simulace 49

25 Výsledné posunutí v mm, dynamická simulace, průjezd jednoho vlaku 49

26 Průběh kmitání konstrukce, průjezd dvou vlaků 51

27 Výsledné posunutí v mm, dynamická simulace, průjezd dvou vlaků 51

28 Výsledné posunutí v mm, průjezd jednoho vlaku, reprezentativní tlaky 52

29 Průběh kmitání konstrukce, průjezd jednoho vlaku, reprezentativní tlaky 53

30 Porovnání statické a doplňující dynamické simulace, průjezd jednoho vlaku 55

31 Vizualizace železničního návěstidla typu SNA-130 59

Seznam tabulek

1 Kategorie terénů a jejich parametry 15

2 Vlastnosti hmotných bodů 27

3 Vlastnosti materiálů 29

4 Velikost použitých maximálních návrhových tlaků 37

5 Zatěžovací kroky, průjezd jednoho vlaku 48

6 Časové kroky, průjezd jednoho vlaků 48

7 Zatěžovací kroky, průjezd dvou vlaků 50

8 Časové kroky, průjezd dvou vlaků 50

9 Velikost použitých maximálních reprezentativních tlaků 52

10 Časová náročnost výpočtu všech provedených simulací 54

11 Maximální hodnoty posunutí v mm pro provedené simulace 55

Seznam příloh

Příloha 1 Skript pro vytvoření tlakového pole
Příloha 2 Model návěstidla a provedené simulace