



**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

Ústav konstruování a částí strojů

**Analýza namáhání podélných
lamel konvektorů**

**Longitudinal Lamellas of convectors
Stress Analysis**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2017

Vojtěch ŠAFAŘÍK

Studijní program: B2342 TEORETICKÝ ZÁKLAD STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Studijní obor: 2301R000 Studijní program je bezoborový

Vedoucí práce: Ing. Jan Kanaval, Ph.D.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že bakalářskou práci „Analýza namáhání podélných lamel konvektorů“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího práce a s použitím podkladů a informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu citované literatury na konci práce.

V Praze dne 8. 9. 2017

.....
Vojtěch Šafařík

Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Janu Kanavalovi, Ph.D. za vedení práce. Dále děkuji za poskytnutí informací, pomoc a strávený čas Ing. Alešovi Vojáčkovi. V neposlední řadě patří poděkování mým nejbližším za podporu při tvorbě práce.

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Šafařík** Jméno: **Vojtěch** Osobní číslo: **408806**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav konstruování a částí strojů**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Analýza namáhání podélných lamel konvektorů

Název bakalářské práce anglicky:

Longitudinal Lamellas of Convector Stress Analysis

Pokyny pro vypracování:

V rámci závěrečné práce zpracujte formou rešerše přehled lamel používaných pro konvektory včetně jejich zatížení a únosnosti. Na základě rozboru technických parametrů používaných lamel podle jejich výrobců proveďte analýzu namáhání podélných lamel použitelných pro konvektory. Vypracujte potřebné návrhové a kontrolní výpočty a vytvořte 3D model a 2D výrobní výkresovou dokumentaci podélné lamely a lamelové mříže.

Seznam doporučené literatury:

ŠVEC, V. Části a mechanismy strojů. Spoje a části spojovací. 2. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2008. 169 s. ISBN 80-01-01701-X.
MICHALEC, J. Pružnost a pevnost I. 3. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2008. 308 s. ISBN 978-80-01-04224-3.
URL: www.minib.cz, 2017-03-21.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

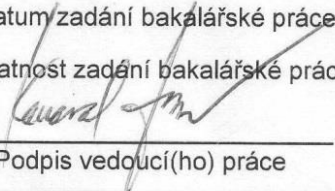
Ing. Jan Kanaval Ph.D., ústav konstruování a částí strojů FS

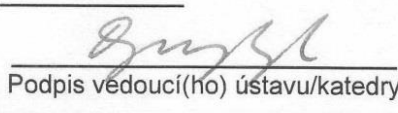
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **27.03.2017**

Termín odevzdání bakalářské práce: **09.06.2017**

Platnost zadání bakalářské práce: _____


Podpis vedoucí(ho) práce

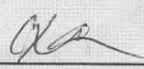

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

25.4.2017
Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Jméno autora: Vojtěch ŠAFAŘÍK
Název BP: Analýza namáhání podélných lamel konvektorů
Anglický název: Longitudinal Lamellas of Convector's Stress Analysis
Rok: 2017
Studijní program: B2342 Teoretický základ strojního inženýrství
Obor studia: 2301R000 Studijní program je bezoborový
Ústav: Ústav konstruování a částí strojů

Vedoucí BP: Ing. Jan Kanaval, Ph.D.
Konzultant: Ing. Aleš Vojáček

Bibliografické údaje: počet stran 47
počet obrázků 22
počet tabulek 16
počet příloh 5

Klíčová slova:

podlahové konvektory, krycí mříže, podélné lamely, ochranná mříž

Keywords:

floor convectors, covering grids, longitudinal lamellas, protection grille

Anotace:

Tato bakalářská práce se zabývá krycími mřížemi konvektorů a jejich namáháním. Zprv je zpracována rešerše problematiky pochozích konvektorů a jsou zmapovány jednotlivé typy mříží dostupných na trhu v ČR a v zahraničí. Zadruhé je shrnuta metodika konstrukčního návrhu a provedena analýza namáhání podélných lamel krycích mříží. Zatřetí je vypracován návrh konstrukčního řešení podélných lamel a jejich spojení do mříže. Analýza namáhání je provedena analyticky a za použití metody konečných prvků. Výsledky obou metod jsou porovnány a jsou diskutovány příčiny odchylek mezi nimi.

Abstract:

This bachelor thesis deals with covering grids of floor convectors and their stress. In the first part problematics of floor convectors is examined and types of covering grids available on both Czech and foreign market are listed. Second part deals with methodology of design and stress analysis of longitudinal lamellas of covering grids. In the last part a design solution of longitudinal lamellas and their connection is devised. Stress analysis is carried out with two methods – firstly analytically and secondly with finite element method. Results of both methods are compared and reasons of differences are discussed.

Obsah

1	Úvod	7
2	Krycí mříže	8
2.1	Společnost BOKI	8
2.2	Společnost MINIB	9
2.3	Společnost Fan-Coil	10
2.4	Společnosti KORADO a LICON	11
2.4.1	Společnost Jaga	12
2.5	Společnost Isan	14
2.6	Společnost Emco-Klima	15
2.7	Společnost Konveka	17
2.8	Společnost Hidria	17
2.9	Společnost Lindab	18
3	Analýza namáhání	19
3.1	Analytický výpočet	19
3.1.1	Volba zatížení	19
3.1.2	Silové účinky v mříži	21
3.1.3	Ohybový moment	32
3.1.4	Napětí při ohybu	32
3.2	MKP model	35
3.2.1	Zatížení umístěné mezi dvěma tyčemi	35
3.2.2	Zatížení umístěné v uzlu mříže	38
4	Výpočty	41
4.1	Návrhový výpočet	41
4.2	Kontrolní výpočty	42
4.2.1	Kontrola namáhání na ohyb	42
4.2.2	Kontrola na otláčení v místě spojení tyče a lamely	42
4.2.3	Kontrola na otláčení v místě působení síly	42
5	Závěr	43
6	Seznam použité literatury	44
7	Seznam obrázků	46
8	Seznam tabulek	47
9	Seznam příloh	47

1 Úvod

Snaha člověka minimalizovat velikost otopných těles, skrýt je nebo zakomponovat do interiéru, případně z nich vytvořit designový doplněk, má za následek vývoj nových typů otopných těles. Otopná tělesa využívající ke sdílení tepla do okolí volnou nebo nucenou konvekci jsou nazývána konvektory. Podlahové konvektory jsou opatřeny pochozí mříží, která má za účel chránit konvektor před jeho poškozením a zabránit možnému poranění člověka.

Vzhledem k zatížení způsobeného chůzí po mříži jsou kladeny požadavky na její mechanické vlastnosti, zejména schopnost snášet příčná zatížení. Dalším požadavkem je dostatečná prodyšnost pochozí mříže z důvodu, aby nebránila proudění vzduchu od výměníku.

Pochozí mříž se skládá z nosných a spojovacích prvků. Nosné části mříže se nazývají lamely. V dnešní době jsou hojně používány pochozí mříže s příčnými lamelami, vyráběné z různých materiálů, například z oceli, hliníku a dřeva. Dále jsou vyráběny i mříže s podélnými lamelami, nejčastěji z oceli a hliníku, které vyžadují použití příčných podpěr.

Prvním cílem této práce je prozkoumat stávající konstrukční řešení pochozích mříží podlahových konvektorů a uvést přehled provedení jednotlivými firmami v ČR i zahraničí. Druhým cílem je analýza namáhání podélných lamel pochozích mříží, která bude provedena dvěma způsoby. Nejprve bude určeno rozložení napětí v celé mříži pomocí analytického výpočtu. Poté bude vytvořen model mříže a rozložení napětí bude vyhodnoceno pomocí metody konečných prvků. Třetím cílem je stanovit návrhové a kontrolní výpočty podélných lamel a spojovacích prvků a vytvořit výrobní výkresovou dokumentaci doplněnou o 3D model celé mříže. Na základě provedené analýzy bude navrženo možné konstrukční řešení pochozích mříží bez použití příčných podpěr.

2 Krycí mříže

Krycí mříže pro podlahové konvektory jsou vyráběny buď s příčně (viz Obrázek 1), nebo podélně (viz Obrázek 2) uspořádanými lamelami. Jednotlivé lamely jsou vzájemně pospojovány za účelem udržení konstantní vzdálenosti mezi lamelami a usnadnění manipulace např. při údržbě, kdy je nutno odkrýt konvektor. V následujících kapitolách budou uvedeny typy a vlastnosti pochozích mříží konvektorů jednotlivých výrobců.



Obrázek 1: Krycí mříže s příčnými lamelami [5]



Obrázek 2: Krycí mříže s podélnými lamelami [5]

2.1 Společnost BOKI

Společnost BOKI industries, a.s. (značka BOKI HEAT) se zabývá výrobou a vývojem podlahových, nadpodlažních a stěnových konvektorů a designových radiátorů. Jedná se o českou firmu sídlící v Brně.

Nosnost mříží BOKI je při plošném zatížení standartní (hmotnost člověka). Provedení lamel včetně materiálu je uvedeno v Tabulka 1. [1] [2] [3]

Tabulka 1: Provedení lamel mříží společnosti BOKI [2]

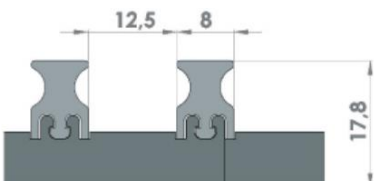
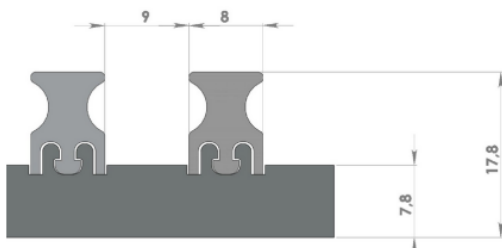
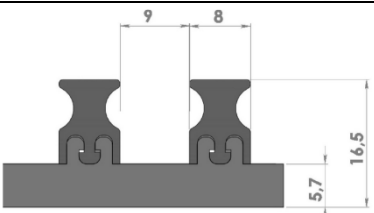
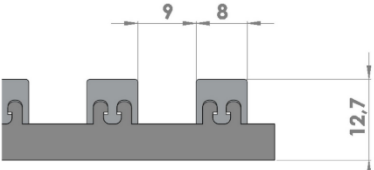
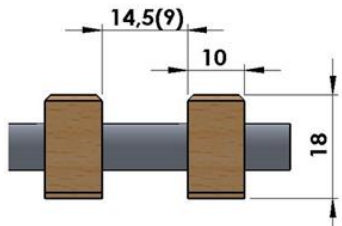
provedení	materiál	průřez
rolovací	dural	I profil
rolovací	dřevo (dub, buk)	obdélníkový profil
rolovací	korozivzdorná ocel 1.4404	obdélníkový dutý profil
podélná	dural	I profil
podélná	korozivzdorná ocel 1.4404	obdélníkový dutý profil

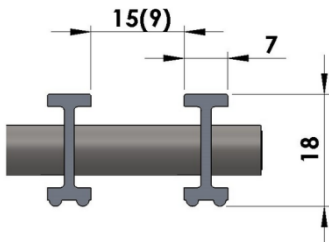
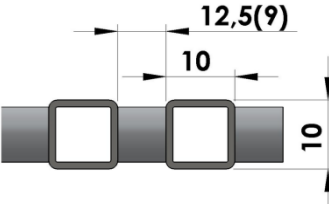
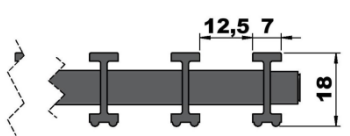
2.2 Společnost MINIB

Společnost MINIB, a.s. se sídlem v Praze a výrobní halou v Býkvi u Mělníka patří mezi české výrobce konvektorů. Na českém trhu působí od roku 1999. Zabývá se výrobou podlahových a nadpodlažních konvektorů.

Nosnost pochozích mříží je udávána 100 kg (při plošném zatížení). Pro bodové zatížení lamel je doporučeno volit mříže z korozi-vzdorné oceli. Provedení lamel včetně průřezu a materiálu je uvedeno v Tabulka 2. [4] [5]

Tabulka 2: Provedení lamel mříží společnosti MINIB [5]

provedení	materiál	průřez, rozměry [mm]
segmentová řídká	hliník	
segmentová hustá	hliník	
segmentová T60	hliník	
segmentová T50	hliník	
rolovací řídká/hustá	dřevo (dub, javor, buk)	

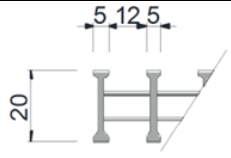
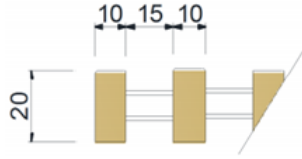

rolovací řídká/hustá	hliník	
rolovací	korozivzdorná ocel	
podélná	hliník	

2.3 Společnost Fan-Coil

Společnost Fan-Coil, s.r.o. je česká firma se sídlem v Žihli zabývající se výrobou a prodejem podlahových, nástěnných a nadzemních konvektorů.

Nosnost ochranných mříží firmy Fan-Coil je při plošném zatížení 120 kg. Profily a příslušné materiály lamel jsou uvedeny v Tabulka 3. [6] [7]

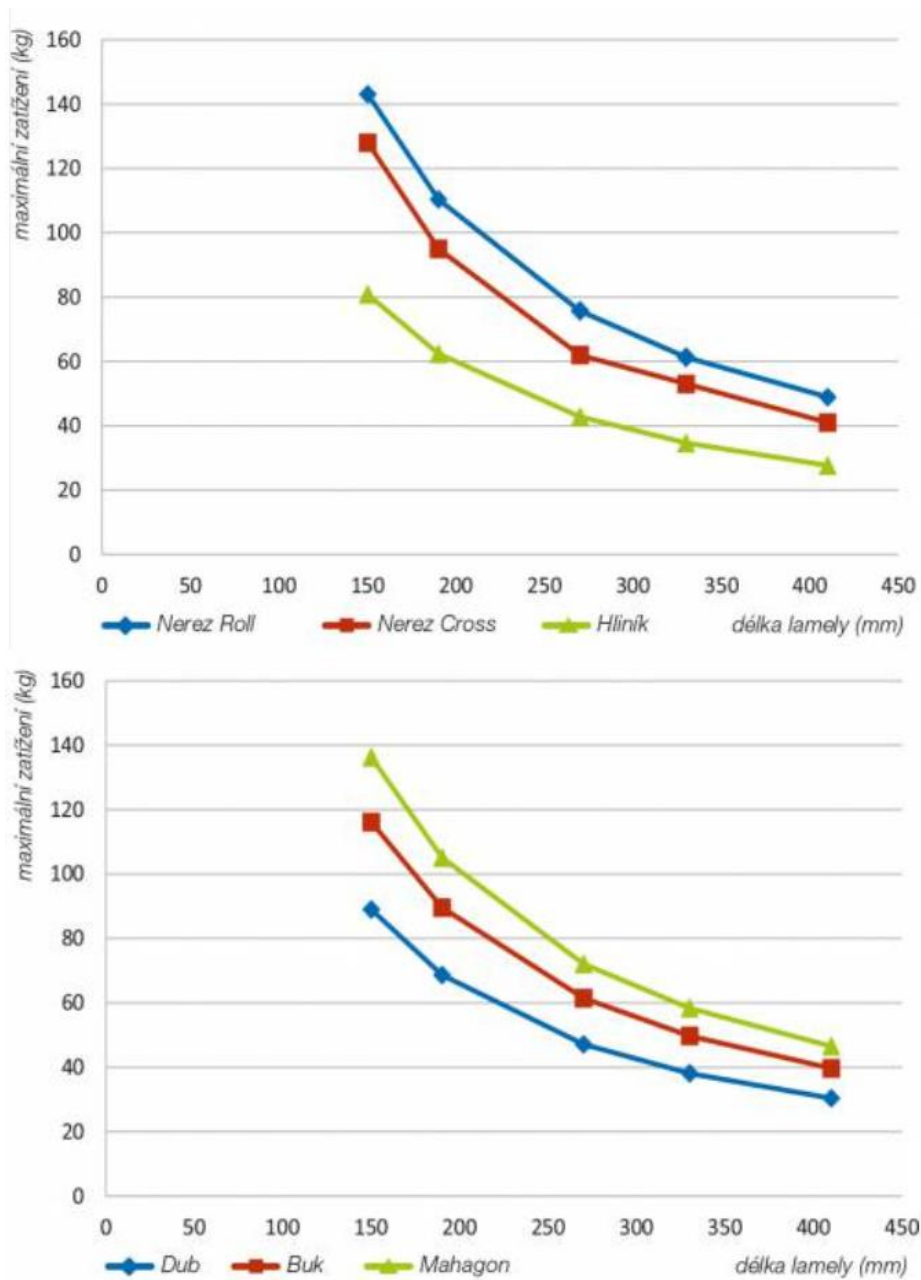
Tabulka 3: Provedení lamel mříží společnosti Fan-Coil [7]

provedení	materiál	průřez, rozměry [mm]
rolovací	dural	
rolovací	dřevo (dub, buk)	
rolovací	korozivzdorná ocel	

2.4 Společnosti KORADO a LICON

Společnost KORADO, a.s., se sídlem v České Třebové, spolupracující se společností LICON HEAT, s.r.o., se sídlem a výrobní halou v Liberci, jsou dalšími českými představiteli výrobců otopných těles.

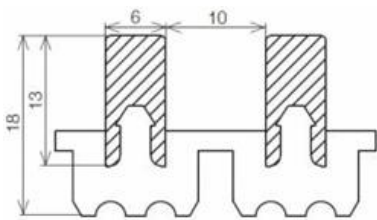
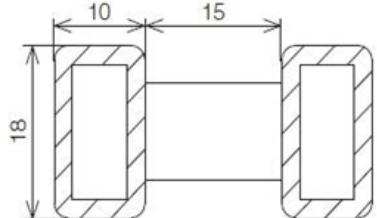
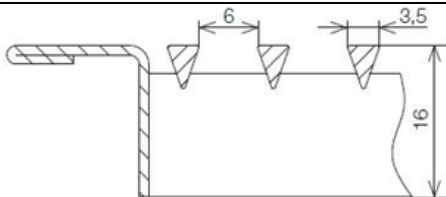
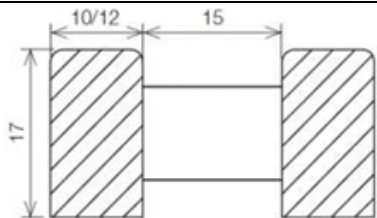
Závislost nosnosti lamely na její délce je graficky znázorněna na Obrázek 3. Zatížení je uvažováno bodové a jeho působíště je umístěno uprostřed lamely. Výsledná nosnost mříže je rovna nosnosti jedné lamely násobené počtem zatížených lamel. [8] [9]



Obrázek 3: Závislost nosnosti lamel mříží KORADO/LICON na jejich délce [9]

V Tabulka 4 jsou uvedeny druhy lamel, jejich průřezy a používaný materiál.

Tabulka 4: Provedení lamel mříží společností KORADO a LICON [9]

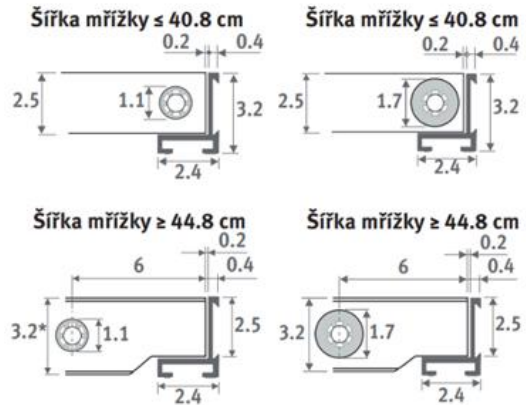
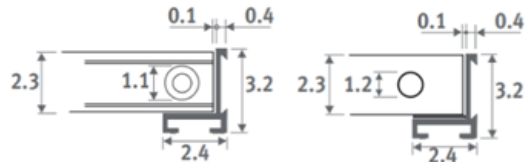
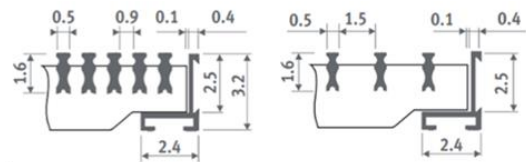
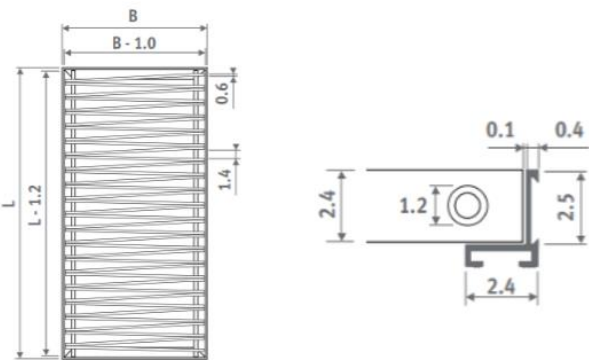
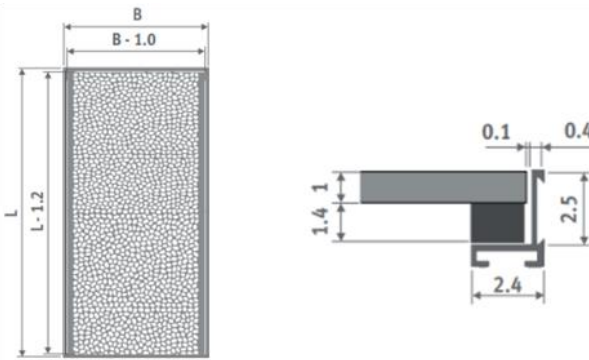
provedení	materiál	průřez, rozměry [mm]
rolovací	eloxovaný hliník	
rolovací	korozivzdorná ocel	
podélná	korozivzdorná ocel	
pevná, rolovací	dřevo (dub, buk, mahagon)	

2.4.1 Společnost Jaga

Společnost Jaga N.V. je dalším českým výrobcem otopných těles, se sídlem ve středočeských Hostivicích. Kromě výroby konvektorů se zabývá i výrobou stojanových, stěnových a designových radiátorů.

Nosnost mříží společnosti Jaga je při plošném zatížení standardní (hmotnost člověka). Pro bodové zatížení je určena pevná mřížka (typ Pebbles). Provedení lamel mříží včetně jejich materiálů je uvedeno v Tabulka 5. [10] [11]

Tabulka 5: Provedení lamel mříží společnosti Jaga [11]

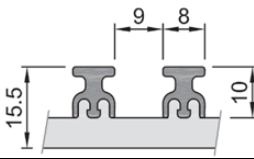
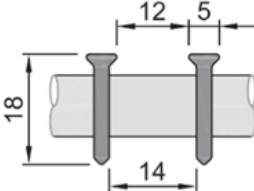
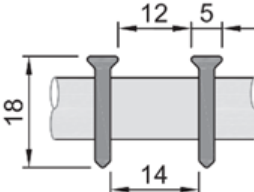
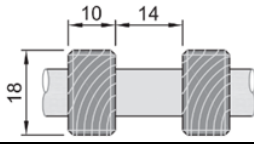
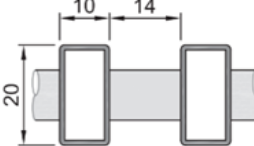
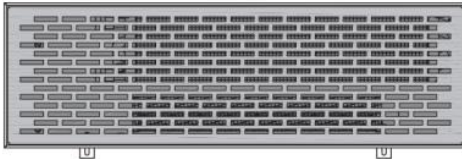
provedení	materiál	průřez, rozměry [cm]
svinovací	dřevo (dub, merbau, buk)	
svinovací	eloxovaný hliník	
pevná mřížka podélná	eloxovaný hliník	
Accordion	hliník	
Pebbles	hliník	

2.5 Společnost Isan

Společnost Isan Radiátory, s.r.o., sídlící v Blansku, se zabývá výrobou koupelňových a designových radiátorů, sálavých konvektorů, lamelových radiátorů, konvektorů s lamelovým výměníkem, podlahových konvektorů, článkových radiátorů a radiátorů ze žebrových trubek.

Nosnost mříží společnosti Isan je při plošném zatížení standardní (hmotnost člověka). Pro bodové zatížení je vhodné volit pevnou nerezovou mříž. Profily a příslušné materiály lamel jsou uvedeny v Tabulka 6. [12] [13] [14]

Tabulka 6: Provedení lamel mříží společnosti Isan [13] [14]

provedení	materiál	průřez, rozměry [mm]
příčná nízká	hliník	
rolovací příčná	hliník	
podélná	hliník	
rolovací	dřevo (buk, dub)	
rolovací	korozivzdorná ocel	
pevná nerezová	korozivzdorná ocel	

2.6 Společnost Emco-Klima

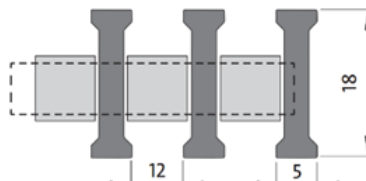
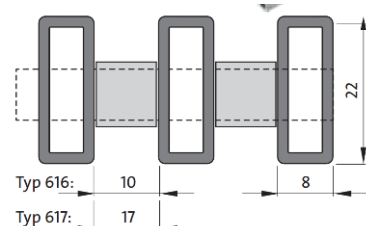
Emco Bau- und Klimatechnik GmbH & Co. KG, se sídlem v německém Lingenu, je výrobce konvektorů a klimatizační techniky.

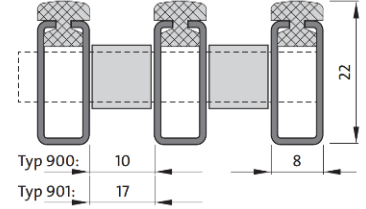
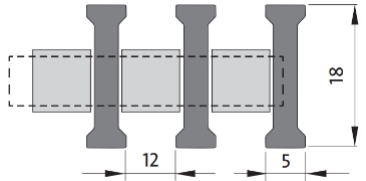
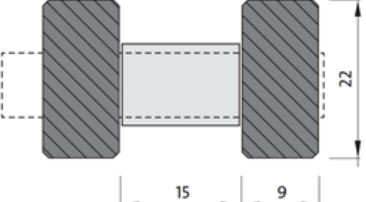
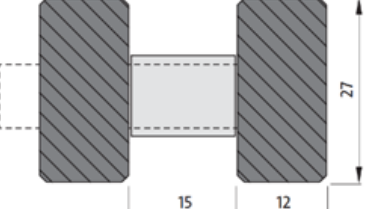
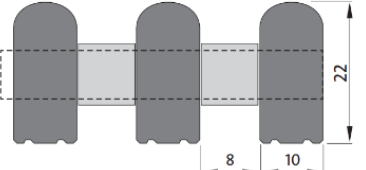
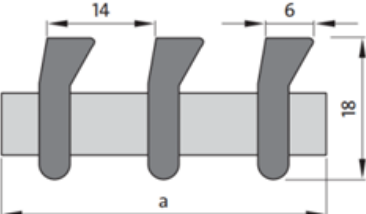
Nosnost mříží firmy Emco-Klima je uvedena v Tabulka 7. Zatížení je uvažováno bodové, jeho působiště je uvažováno uprostřed lamely. Výsledná nosnost mříže je dána nosností jedné lamely násobené počtem zatížených lamel. Průřezy a materiály používané pro lamely jsou uvedeny v Tabulka 8. [15] [16]

Tabulka 7: Nosnost mříží společnosti Emco-Klima [16]

Nosnost [kg]												
šířka mříže [mm]	150	200	250	282	300	362	400	442	500	522	600	692
typ mříže												
rolovací 624/625	92	70	55	49	45	38	35	31	26	25	23	20
rolovací 860/861	181	137	108	96	88	74	68	59	52	49	46	38
rolovací 616/617	169	127	102	90	85	70	63	57	51	49	42	37
rolovací 900/901	206	154	123	109	103	85	77	70	62	59	51	45
rolovací 951/956	137	103	82	73	69	57	51	46	41	39	34	30
rolovací 730	44	33	26	23	21	-	-	-	-	-	-	-
podélná 632	57	43	34	31	29	24	22	-	-	-	-	-

Tabulka 8: Provedení lamel mříží společnosti Emco-Klima [16]

provedení	materiál	průřez, rozměry [mm]
rolovací 624/625	AlMgSi0,5	
rolovací 616/617	AlMgSi0,5	

<p>rolovací 900/901</p>	<p>pozinkovaná nebo smaltovaná ocel</p>	
<p>rolovací 860/861</p>	<p>chrom-niklová ocel 1.4301</p>	
<p>rolovací 920/955</p>	<p>dřevo (dub, buk, javor, merbau, mahagon)</p>	
<p>rolovací 951/956</p>	<p>dřevo (dub, buk, javor, merbau, mahagon)</p>	
<p>rolovací 730</p>	<p>vysoce kvalitní nárazuvzdorný plast</p>	
<p>podélná 632</p>	<p>AlMgSi0,5</p>	

2.7 Společnost Konveka

Konveka je společnost se sídlem v Kaunasu v Litvě, která klade důraz na neustálé zdokonalování konvektorů a hledání nových optimálních řešení. Pobočky této firmy se nachází např. v Estonsku, Norsku, Švédsku, Kazachstánu a Rusku.

Nosnost lamel mříží konvektorů Konveka je stanovena na 100 kg. Zatížení je uvažováno plošné. Bodové zatížení není výrobcem doporučeno. Provedení a materiály lamel jsou uvedeny v Tabulka 9. [17] [18]

Tabulka 9: Provedení lamel mříží společnosti Konveka [18]

provedení	materiál	průřez
rolovací	hliník	T profil
rolovací	dřevo (dub, buk)	obdélníkový profil

2.8 Společnost Hidria

Hidria, d.o.o. je jedna z největších evropských korporací působících na poli automobilových a průmyslových technologií se základnou ve Slovinsku. Produkuje do 55 zemí světa a její hlavní pobočky se nachází v Německu, Maďarsku a Číně.

Firma Hidria udává nosnost pochozích mříží odpovídající plošnému zatížení hmotností člověka. Pro možnost bodového zatížení je nutno opatřit konvektor podporami. Profily a příslušné materiály lamel jsou uvedeny v Tabulka 10. [19] [20]

Tabulka 10: Provedení lamel mříží společnosti Hidria [20]

provedení	materiál	průřez
rolovací	korozivzdorná ocel	I profil
podélná	korozivzdorná ocel	I profil
rolovací	dřevo (dub, ořešák vlašský, jasan, mahagon)	obdélníkový profil

2.9 Společnost Lindab

Společnost Lindab IMP Klima d.o.o. se sídlem ve Slovinsku je součástí mezinárodní skupiny Lindab, která se zabývá výrobou, vývojem a distribucí produktů a systémových řešení, která zjednodušují výstavbu a zlepšují vnitřní klima budov.

Nosnost pochozích mříží firmy Lindab odpovídá zatížení hmotností člověka. Pro větší zatížení je třeba vyztužit mříž přídatnými podpěrami. Profily a příslušné materiály lamel jsou uvedeny v Tabulka 11. [21] [22] [23]

Tabulka 11: Provedení lamel mříží společnosti Lindab [22] [23]

provedení	materiál	průřez
rolovací	hliník, korozivzdorná ocel	I profil
rolovací	dřevo (jasan, ořešák vlašský, dub, wenge, třešeň, mahagon)	obdélníkový profil
podélná	hliník	I profil

3 Analýza namáhání

3.1 Analytický výpočet

Analytický výpočet podélných lamel a podpůrných tyčí vychází z namáhání v ohybu. Nejprve bude zvolen druh zatížení a jeho působíště, poté budou určeny silové účinky v celé mříži. Na základě toho bude určen průběh ohybového momentu a následně průběh ohybového napětí.

3.1.1 Volba zatížení

Krycí mříže mohou být zatíženy osamělou silou, silovou dvojicí nebo spojitým zatížením. Působení vlastní tíhy na lamely a spojovací tyče nebude uvažováno, protože jeho velikost v porovnání s působící silou je zanedbatelná. V následující kapitole budou srovnány dva silové účinky. Prvním je osamělá síla působící v jedné polovině nosníku a druhým je spojitě zatížení, jehož těžiště je rovněž v jedné polovině nosníku.

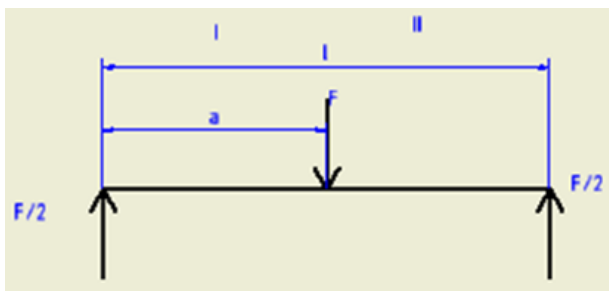
3.1.1.1 Osamělá síla, spojitě zatížení

Hypotézy:

$$H_{0a}: Mo_F^I(a) > Mo_q^II(a) \quad (3.1)$$

$$H_{1a}: Mo_F^I(a) \leq Mo_q^II(a) \quad (3.2)$$

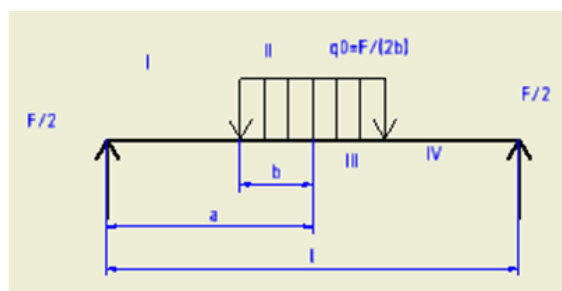
Na Obrázek 4 je znázorněn nosník uprostřed zatížený osamělou silou F . Rozměr a je tedy roven $l/2$. Podle silové rovnováhy musí být velikosti reakcí stejné a rovny $F/2$. Ohybový moment od osamělé síly je potom v prvním úseku vyjádřen rovnicí (3.3). Maximum ohybového momentu od osamělé síly (3.4) je tudíž v místě a .



Obrázek 4: Nosník zatížený osamělou silou

$$Mo_F^I(x) = \frac{F}{2} \cdot x \quad (3.3)$$

$$Mo_{Fmax}^I = \frac{F}{2} \cdot a \quad (3.4)$$



Obrázek 5: Nosník zatížený spojitým zatížením

Je-li nosník týchž rozměrů zatížen uprostřed spojitým zatížením (viz Obrázek 5) o konstantní velikosti q_0 dané rovnicí (3.5) a působícím na úseku $2b$, jsou velikosti obou reakcí rovny $F/2$.

$$q_0 = \frac{F}{2 \cdot b} \quad (3.5)$$

Velikost spojitého zatížení byla záměrně volena tak, aby způsobovala stejně velké reakce v podporách jako osamělá síla. Průběh ohybového momentu od spojitého zatížení v úseku I je dán rovnicí (3.6), jeho maximum pak vyjadřuje vztah (3.7).

$$Mo_{q_0}^I(x) = \frac{F}{2} \cdot (x - b) \quad (3.6)$$

$$Mo_{q_0max}^I = \frac{F}{2} \cdot (a - b) \quad (3.7)$$

Průběh ohybového momentu od spojitého zatížení v úseku II je vyjádřen rovnicí (3.8). Dosazením a za x lze získat vztah pro maximum ohybového momentu od spojitého zatížení úseku II (3.9).

$$Mo^{II}(x) = \frac{F}{2} \cdot x - \frac{q_0}{2} \cdot [x - (a - b)] \cdot [x - (a - b)] \quad (3.8)$$

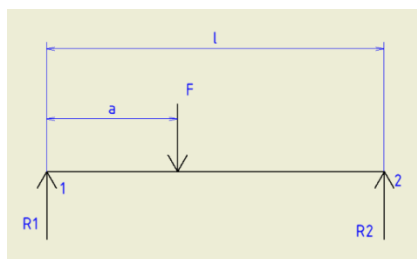
$$Mo_{qmax}^{II} = \frac{F}{2} \cdot a - \frac{F}{4} \cdot b \quad (3.9)$$

$$\frac{F}{2} \cdot a > \frac{F}{2} \cdot a - \frac{F}{4} \cdot b \quad (3.10)$$

Dosazením rovnic (3.7) a (3.9) do hypotézy H_{1a} (3.1), získáme výraz (3.10), který je pravdivý pro každé b větší než 0, a tudíž je hypotéza H_{1a} zamítnuta. Platí tedy hypotéza H_{0a} (3.2), ze které vyplývá, že osamělá síla způsobí ohybový moment větší než spojitá zatížení (za předpokladu, že způsobují stejně velké reakční účinky v podporách). Z toho důvodu bude dále uvažováno zatížení osamělou silou.

3.1.1.2 Působíště zatěžující síly

Pro analýzu namáhání je nutno vhodně zvolit působíště síly tak, aby napětí vzniklá v lamelách a tyčích byla co největší. Uvažujeme-li osamělou sílu F působící v libovolné vzdálenosti a od jednoho konce nosníku (viz Obrázek 6), jsou reakce v místech 1 a 2 dány na základě momentové rovnováhy sil rovnicemi (3.11) a (3.12).



Obrázek 6: Uvolnění nosníku zatíženého silou v obecné místě

$$R_1 = F \cdot \frac{l - a}{l} \quad (3.11)$$

$$R_2 = F \cdot \frac{a}{l} \quad (3.12)$$

$$Mo^I = R_1 \cdot a \quad (3.13)$$

Dosazením reakce R_1 (3.11) do rovnice (3.13), vyjadřující velikost ohybového momentu k místu a , získáme rovnici (3.14).

$$Mo_a^I = F \cdot \frac{l - a}{l} \cdot a = \frac{F}{l} \cdot (l \cdot a - a^2) \quad (3.14)$$

Pro nalezení místa maximálního ohybového momentu je třeba určit extrém jeho funkce závislé na proměnné a . Je tedy určen pomocí rovnice (3.15). Jedná-li se o minimum, nebo maximum lze určit pomocí vztahu (3.16).

$$\frac{dMo_a^I}{da} = \frac{d}{da} \left[\frac{F}{l} \cdot (l \cdot a - a^2) \right] = \frac{F}{l} \cdot \frac{d(l \cdot a - a^2)}{da} = \frac{F}{l} \cdot (l - 2 \cdot a) = 0 \quad (3.15)$$

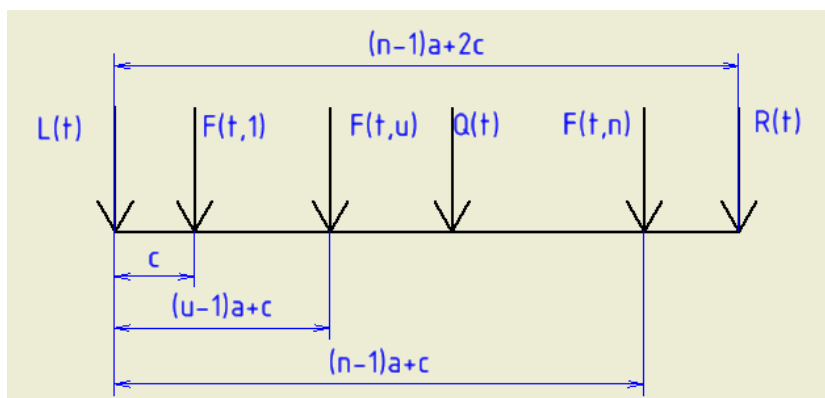
$$\frac{d^2 Mo_a^I}{da^2} = \frac{d}{da} \left(\frac{dMo_a^I}{da} \right) = \frac{d}{da} \left[\frac{F}{l} \cdot (l - 2 \cdot a) \right] = \frac{F}{l} \cdot (-2) < 0 \quad (3.16)$$

Jediným kořenem rovnice (3.15) je $a=l/2$. Dále bylo na základě rovnice (3.16) zjištěno, že ohybový moment nabývá v místě $a/2$ maxima.

Z této kapitoly vyplývá, že maximálního ohybového momentu lze dosáhnout umístěním působiště osamělé síly doprostřed nosníku. V případě pochozích mříží budou tedy zatěžovány lamely a spojovací tyče výhradně uprostřed.

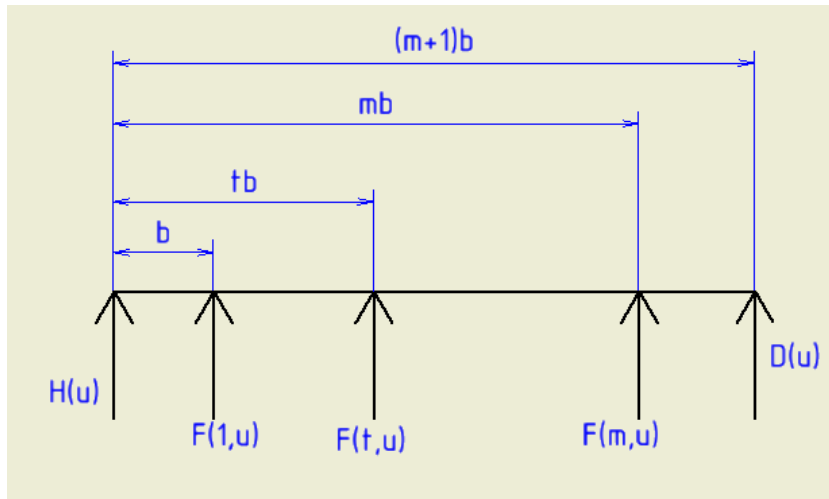
3.1.2 Silové účinky v mříži

Pro stanovení návrhového výpočtu je nutné nejprve určit silové účinky uvnitř mříže. Mříž se skládá z lamel a tyčí sloužících ke spojení lamel. Na Obrázek 7 je zobrazeno uvolnění jedné lamely.



Obrázek 7: Uvolnění lamely

Reakční účinky na lamelu jsou záměrně voleny všechny stejným směrem, aby se výpočet co nejvíce zjednodušil a zamezilo se chybě ve znaménku. Síly působící na tyče musí v uzlových bodech působit oproti lamelám opačným směrem (viz Obrázek 8), neboť tyč a lamela jsou dvě tělesa, která musí být v rovnováze. Reakční účinky tyčí budou tedy směřovat nahoru.



Obrázek 8: Uvolnění tyče

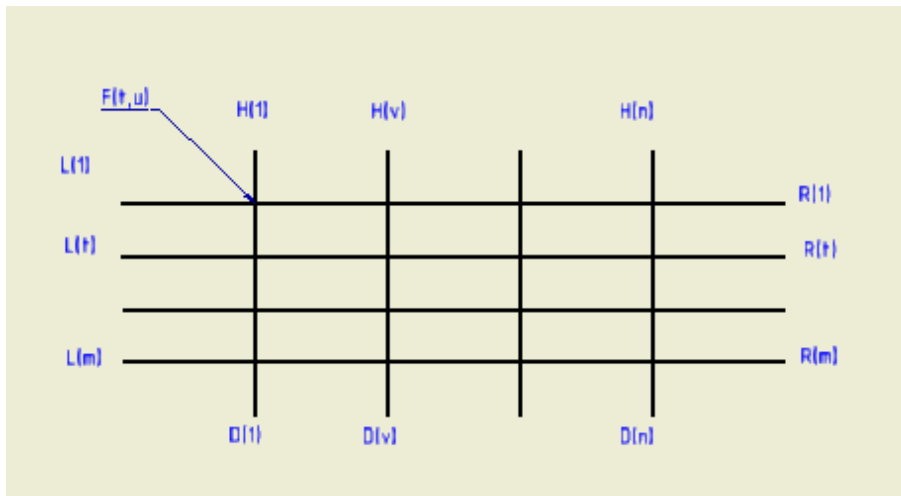
Ve skutečnosti je mříž položena ve skříni konvektoru, tudíž průhyb krajních lamel je možný pouze směrem nahoru, ve směru dolů brání jejich průhybu rám skříně konvektoru. Vazby, které by umožňovaly průhyb pouze v jednom směru, jsou bez znalosti směru působení silových reakčních účinků těžko realizovatelné. Z toho důvodu jsou na koncích všech lamel a tyčí pro zjednodušení uvažovány kloubové podpory. Poslední lamely byly tedy odstraněny a nahrazeny rotačními vazbami.

V Tabulka 12 jsou vypsány jednotlivé silové účinky včetně jejich označení. Proměnná, na které jsou tyto síly závislé, je uvedena vždy v závorce u příslušné síly. Parametry t , u udávají polohu síly v pochozí mříži. Parametr t nabývá hodnot od 1 do m , parametr u nabývá hodnot od 1 do n .

Tabulka 12: Označení silových účinků

označení síly	popis síly
$L(t)$	levá reakce lamely
$R(t)$	pravá reakce lamely
$H(u)$	levá reakce tyče
$D(u)$	pravá reakce tyče
$F(t,u)$	síla působící mezi lamelou a tyčí
$Q(t)$	vnější zatěžující síla

Umístění tyčí a lamel v mříži obecných rozměrů ukazuje Obrázek 9.



Obrázek 9: Zobrazení mříže včetně reakčních účinků

3.1.2.1 Vektor pravé strany

Vektor pravé strany \mathbf{b} je dán pouze vnějším zatížením. Zahrnuje tedy silové a momentové působení na lamelu a dále část deformačních podmínek, v nichž vystupuje vnější zatěžující síla $Q(t)$.

3.1.2.2 Vektor levé strany

Vektor levé strany \mathbf{x} je tvořen všemi neznámými reakčními účinky, tj. $L(t)$, $R(t)$, $H(u)$, $D(u)$ a $F(t, u)$.

3.1.2.3 Matice A

Matice A je složena zaprvé ze statických rovnic rovnováhy a zadruhé z deformačních podmínek vztažených k jednotlivým uzlovým bodům. Dimenze matice A je dána vztahem (3.17), kde m je počet lamel a n je počet podpěrných tyčí.

$$vel = 2 \cdot m + 2 \cdot n + m \cdot n \quad (3.17)$$

V Tabulka 13 je uveden přehled parametrů používaných k výpočtům v této kapitole.

Tabulka 13: Přehled používaných parametrů

označení parametru	vysvětlení	rozsah hodnot
e	umístění zatěžující síly	od 1 do n
s	místo výpočtu průhybu (tyč)	od 1 do m
v	místo výpočtu průhybu (lamela)	od 1 do n
t	umístění síly v mříži (řádek)	od 1 do m
u	umístění síly v mříži (sloupec)	od 1 do n

a) Rovnováha sil a momentů

Pro libovolnou lamelu lze napsat jednu statickou rovnici rovnováhy sil (3.18) a jednu statickou rovnici rovnováhy momentů vztáženou k levému konci lamely (3.19).

$$\sum_{t=1}^m \left[-L(t) - \sum_{u=1}^n F(t, u) - R(t) - Q(t) \right] = 0 \quad (3.18)$$

$$\sum_{t=1}^m \left\{ \sum_{u=1}^n F(t, u) \cdot [(u-1) \cdot a + c] + R(t) \cdot [(n-1) \cdot a + c] + Q(t) \cdot [(e-1) \cdot a + c] \right\} = 0 \quad (3.19)$$

Statická rovnice rovnováhy sil pro libovolnou tyč je obecně popsána rovnicí (3.20) a statická rovnice rovnováhy momentů k levému konci tyče je dána rovnicí (3.21).

$$\sum_{u=1}^n \left[-H(u) - \sum_{t=1}^m F(t, u) - D(u) \right] = 0 \quad (3.20)$$

$$\sum_{u=1}^n \left[\sum_{t=1}^m F(t, u) \cdot t \cdot b + D(u) \cdot (m+1) \cdot b \right] = 0 \quad (3.21)$$

b) Deformační podmínky

Pro soustavu velikosti $m \times n$ lze napsat $2m$ a $2n$ statických rovnic rovnováhy, viz vztah (3.22).

$$pocet_rovnic = 2 \cdot m + 2 \cdot n \quad (3.22)$$

Počet neznámých silových účinků v celé mříži je roven dimenzi matice A . Odečtením (3.22) od (3.17) obdržíme výraz pro počet deformačních podmínek, o které je nutné doplnit statické rovnice rovnováhy, aby soustava rovnic mohla být vyřešena.

Průhyb lamely a tyče musí být v libovolném místě mříže co do velikosti stejný, viz (3.23). Znaménko minus v rovnici znamená, že průhyb lamely je uvažován opačným směrem v porovnání s průhybem tyče.

$$v_{lam}(t, v) = -v_{tyc}(s, u) \quad (3.23)$$

Vztahy pro výpočet průhybu lamel a tyčí vychází z Mohrova integrálu popsaného rov. (3.24). [24]

$$v_i = \frac{1}{E} \cdot \int_{(l)} \frac{M o(x)}{J_z(x)} \cdot m o_i(x) dx \quad (3.24)$$

Rovnici (3.24) lze zjednodušit na tvar (3.25), neboť kvadratický moment průřezu byl uvažován v celém průřezu lamely a tyče konstantní.

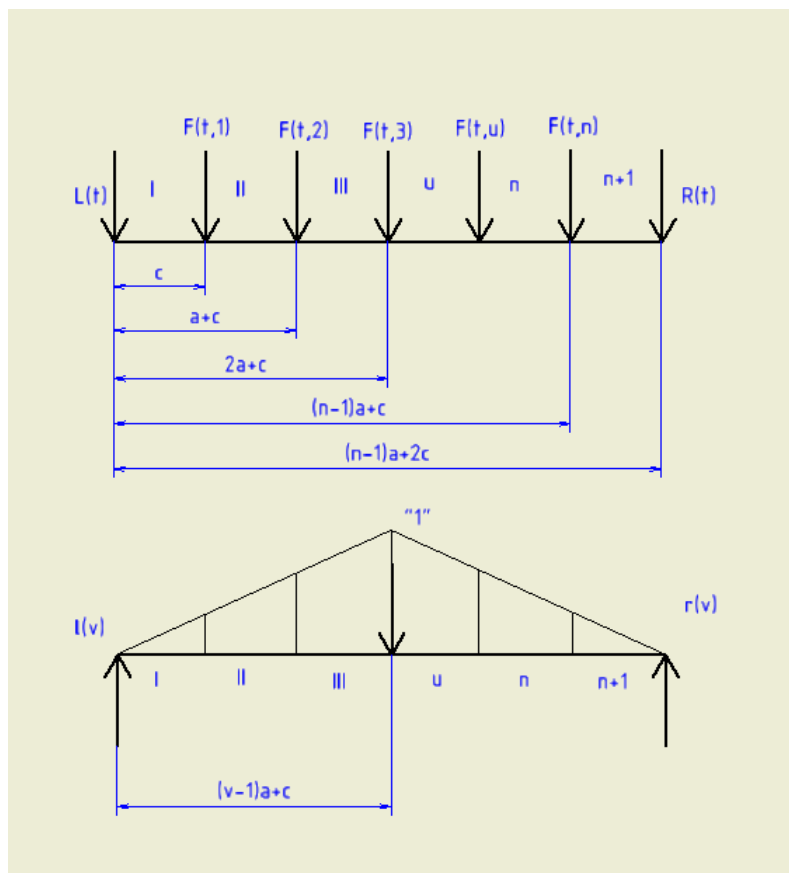
$$v_i = \frac{1}{E \cdot J_z} \cdot \int_{(l)} Mo(x) \cdot mo_i(x) dx \quad (3.25)$$

Průhyb lamely v libovolném místě je dán rovnicí (3.26) a průhyb tyče v libovolném místě je dán rovnicí (3.27).

$$v_{lam}(t, v) = \frac{1}{E_{lam} \cdot J_{zlam}} \cdot \int_{(l)} Mo_{lam}(x) \cdot mo_{vlam}(x) dx \quad (3.26)$$

$$v_{tyc}(s, u) = \frac{1}{E_{tyc} \cdot J_{ztyc}} \cdot \int_{(l)} Mo_{tyc}(x) \cdot mo_{vtyc}(x) dx \quad (3.27)$$

Konstanty E_{lam} a E_{tyc} jsou Youngovy moduly pružnosti v tahu a konstanty J_{zlam} a J_{ztyc} jsou kvadratické momenty průřezů.



Obrázek 10: Uvolnění lamely

Na Obrázek 10 je znázorněno uvolnění libovolné lamely. Mohrův integrál u takto zatíženého nosníku přejde v součet určitých integrálů, který lze vyjádřit rovnicí (3.28).

$$\begin{aligned}
 E_{lam} \cdot J_{zlam} \cdot v_{ilam}(t, u) &= \int_0^c M o_{lam}^I(x) \cdot m o_{ilam}^I(x) dx + & (3.28) \\
 + \int_c^{a+c} M o_{lam}^{II}(x) \cdot m o_{ilam}^{II}(x) dx + \dots + \\
 + \int_{(n-1)a+c}^{(n-1)a+2c} M o_{lam}^{n+I}(x) \cdot m o_{ilam}^{n+I}(x) dx
 \end{aligned}$$

Průběh ohybového momentu v oblastech I–III popisují rovnice (3.29).

$$\begin{aligned}
 M o_{lam}^I(x) &= -L(t) \cdot x & (3.29) \\
 M o_{lam}^{II}(x) &= -L(t) \cdot x - F(t, 1) \cdot (x - c) \\
 M o_{lam}^{III}(x) &= -L(t) \cdot x - F(t, 1) \cdot (x - c) - F(t, 2) \cdot [x - a + c]
 \end{aligned}$$

Průběh ohybového momentu od jednotkové síly popisují rovnice (3.30).

$$\begin{aligned}
 m o_{ilam}^I(x) &= l(v) \cdot x & (3.30) \\
 m o_{ilam}^{II}(x) &= l(v) \cdot x \\
 m o_{ilam}^{III}(x) &= l(v) \cdot x
 \end{aligned}$$

Rovnice (3.31) vyjadřuje první dva členy rovnice průhybu lamely. Získají se dosazením rovnic (3.29) a (3.30) do rovnice (3.28).

$$\begin{aligned}
 E_{lam} \cdot J_{zlam} \cdot v_{ilam}(t, u) &= - \int_0^c L(t) \cdot x \cdot l(v) \cdot x dx + & (3.31) \\
 - \int_c^{a+c} [L(t) \cdot x + F(t, 1) \cdot (x - c)] \cdot l(v) \cdot x dx
 \end{aligned}$$

Integrovaním rovnice (3.31), vyjádřením členů, které obsahují reakční účinek $L(t)$, a následnými úpravami vznikne výraz popsany v rovnici (3.32).

$$\begin{aligned}
 - \left[\frac{L(t) \cdot l(v) \cdot x^3}{3} \right]_0^c - \left[\frac{L(t) \cdot l(v) \cdot x^3}{3} \right]_c^{a+c} &= & (3.32) \\
 = - \frac{L(t) \cdot l(v)}{3} \cdot \{ [c^3 - 0^3] + [(a+c)^3 - c^3] \} = \\
 = - \frac{L(t) \cdot l(v)}{3} \cdot \{(a+c)^3 - 0\} = -L(t) \cdot l(v) \cdot \left[\frac{x^3}{3} \right]_0^{a+c}
 \end{aligned}$$

Nemění-li se v oblastech integrace průběh ohybového momentu od síly a od jednotkové síly, lze zjednodušit součet Mohrových integrálů na jediný integrál, který po integraci nabývá tvaru (3.33).

$$v_{i.lam}(t, u) = - \frac{1}{E_{lam} \cdot J_{zlam}} \cdot L(t) \cdot l(v) \cdot \left[\frac{x^3}{3} \right]_0^{a+c} \quad (3.33)$$

Toto zjištění výrazně zjednodušuje výpočty průhybů, a proto vztahy pro průhyb lamel a tyčí budou nadále vždy uváděny ve tvaru (3.34).

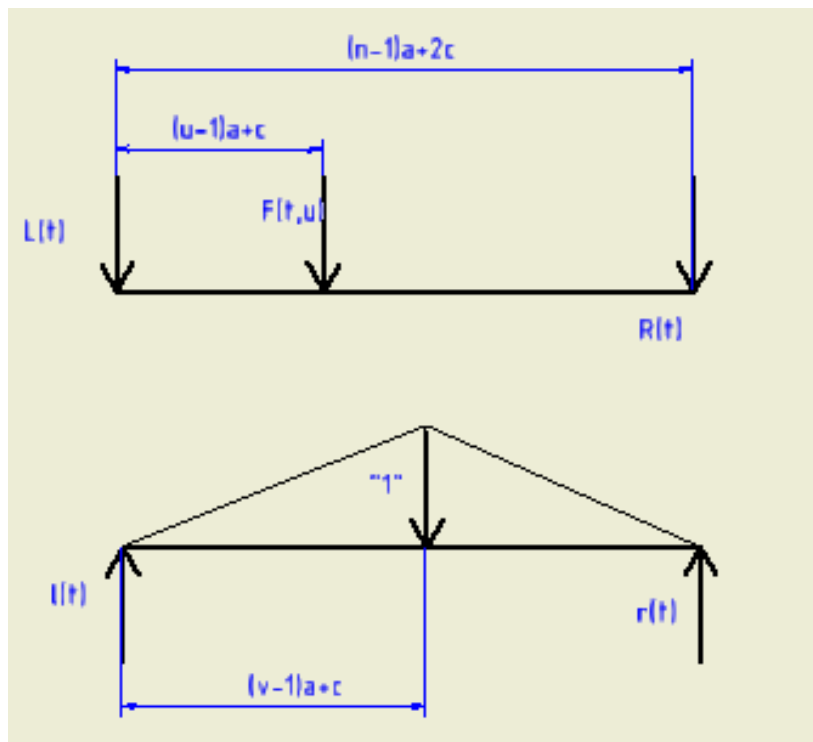
$$v = -\frac{1}{E \cdot J_z} \cdot (\text{silový účinek}) \cdot (\text{jednotková reakce}) \cdot [(funkce x)]_{\text{dolní mez}}^{\text{horní mez}} \quad (3.34)$$

$$m_o = (\text{reakce způsobená jednotkovou silou}) \cdot x \quad (3.35)$$

Bude-li mít průběh ohybového momentu od jednotkové síly tvar (3.35), bude průběh ohybového momentu vždy násoben pouze konstantou a proměnnou x , tudíž nebudou roznásobením momentů přibývat další členy. S výjimkou sil působících na koncích lamely (tyče) je ale nutné vyjádřit ohybové momenty lamely různě zleva, nebo zprava, v závislosti na místě výpočtu průhybu.

c) Průhyb lamely

Na Obrázek 11 je uvolněna lamela zatížená reakčními účinky $L(t)$, $R(t)$ a silou $F(t, u)$.



Obrázek 11: Uvolněná lamela při postupování zleva

Při postupování zleva je průhyb v místě v podle (3.34) roven výrazu (3.36).

$$v_L(v) = -\frac{L(t) \cdot l(v)}{E_{lam} \cdot J_{zlam}} \cdot \left[\frac{x^3}{3} \right]_0^{vc} = L(t) \cdot k_L(v) \quad (3.36)$$

Koeficient $k_L(v)$ je roven výrazu (3.37),

$$k_L(v) = -\frac{l(v)}{E_{lam} \cdot J_{zlam}} \cdot \left[\frac{x^3}{3} \right]_0^{vc} \quad (3.37)$$

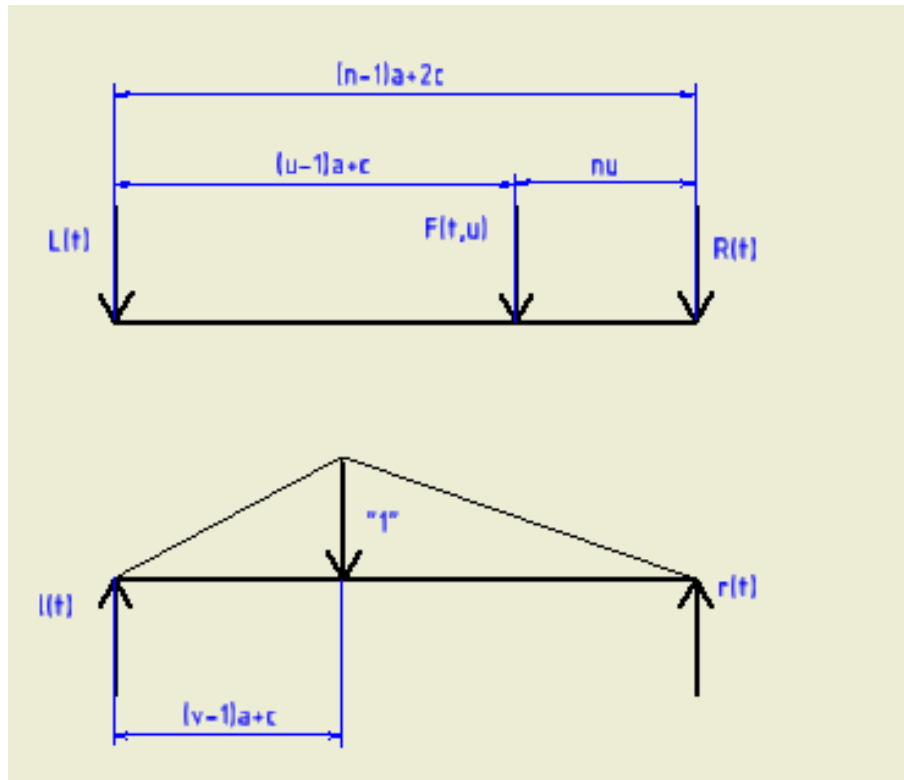
kde horní mez vc je rovna výrazu (3.38).

$$vc = (v - 1) \cdot a + c \quad (3.38)$$

Pro reakční účinky $l(v)$ a $r(v)$ způsobené jednotkovou silou platí rovnice (3.39) a (3.40).

$$l(v) = \frac{(n - v) \cdot a + c}{(n - 1) \cdot a + 2 \cdot c} \quad (3.39)$$

$$r(v) = \frac{(v - 1) \cdot a + c}{(n - 1) \cdot a + 2 \cdot c} \quad (3.40)$$



Obrázek 12: Uvolněná lamela při postupování zprava

Analogicky byla postupem z pravé strany (viz Obrázek 12) získána průhybová rovnice (3.41).

$$v_R(v) = R(t) \cdot k_R(v) \quad (3.41)$$

Pro koeficient $k_R(v)$ platí vztah (3.42),

$$k_R(v) = -\frac{r(v)}{E_{lam} \cdot J_{zlam}} \cdot \left[\frac{x^3}{3} \right]_0^{nv} \quad (3.42)$$

kde horní integrační mez nv je dána rovnicí (3.43).

$$\begin{aligned} nv &= (n-1) \cdot a + 2 \cdot c - [(v-1) \cdot a + c] = \\ &= n \cdot a - a + 2 \cdot c - v \cdot a + a - c = (n-v) \cdot a + c \end{aligned} \quad (3.43)$$

Je-li $u < v$, je nutné postupovat zleva (viz Obrázek 11). Ohybový moment od síly $F(t, u)$ je dán rovnicí (3.44). Ohybový moment od jednotkové síly je dán rovnicí (3.45).

$$Mo(v) = -F(t, u) \cdot (x - uc) \quad (3.44)$$

$$mo(v) = l(t) \cdot x \quad (3.45)$$

Průhyb způsobený silou $F(t, u)$ je potom vyjádřen vztahem (3.46).

$$\begin{aligned} v_{FL}(t, v) &= -\frac{1}{E_{lam} \cdot J_{zlam}} \cdot \int_{uc}^{vc} [F(t, u) \cdot (x - uc)] l(t) \cdot x dx = \\ &= -\frac{F(t, u) \cdot l(v)}{E_{lam} \cdot J_{zlam}} \cdot \left\{ \left[\frac{x^3}{3} \right]_{uc}^{vc} - nu \cdot \left[\frac{x^2}{2} \right]_{uc}^{vc} \right\} = F(t, u) \cdot k_u(u, v) \end{aligned} \quad (3.46)$$

Koeficient $k_u(u, v)$ je dán vztahem (3.47).

$$k_u(u, v) = \frac{-l(v)}{E_{lam} \cdot J_{zlam}} \cdot \left\{ \left[\frac{x^3}{3} \right]_{uc}^{vc} - nu \cdot \left[\frac{x^2}{2} \right]_{uc}^{vc} \right\} \quad (3.47)$$

Je-li $u > v$, je nutné postupovat zprava. Potom je průhyb dán rovnicí (3.48).

$$v_{FR}(t, v) = F(t, u) \cdot k_u(u, v) \quad (3.48)$$

Pro koeficient $k_u(u, v)$ platí vztah (3.49),

$$k_u(u, v) = \frac{-rf(v)}{E_{lam} \cdot J_{zlam}} \cdot \left\{ \left[\frac{x^3}{3} \right]_{nu}^{nv} - nu \cdot \left[\frac{x^2}{2} \right]_{nu}^{nv} \right\} \quad (3.49)$$

kde integrační meze jsou dány vztahy (3.50).

$$vc = (v-1) \cdot a + c \quad (3.50)$$

$$uc = (u-1) \cdot a + c$$

$$nu = (n-u) \cdot a + c$$

Je-li $e < v$, je nutné postupovat zleva. Potom je průhyb způsobený zatížením vnější silou Q dán rovnicí (3.51),

$$v_{QL}(v) = Q(t) \cdot k_{QL}(v) \quad (3.51)$$

kde koeficient $k_{QL}(v)$ je dán vztahem (3.52).

$$k_{QL}(v) = -\frac{l(v)}{E_{lam} \cdot J_{zlam}} \cdot \left[\frac{x^3}{3} - ec \cdot \frac{x^2}{2} \right]_{ec}^{vc} \quad (3.52)$$

Je-li $e > v$, je nutné postupovat zprava. Potom je průhyb v místě vyjádřen rovnicí (3.53),

$$v_{QR}(v) = Q(t) \cdot k_{QR}(v) \quad (3.53)$$

kde koeficient $k_{QR}(v)$ je dán vztahem (3.54).

$$k_{QR}(v) = -\frac{r(v)}{E_{lam} \cdot J_{zlam}} \cdot \left[\frac{x^3}{3} - ne \cdot \frac{x^2}{2} \right]_{ne}^{nv} \quad (3.54)$$

Integrační meze jsou vyjádřeny rovnicemi (3.55).

$$nv = (n - 1) \cdot a + 2 \cdot c - [(v - 1) \cdot a + c] = (n - v) \cdot a + c \quad (3.55)$$

$$ne = (n - 1) \cdot a + 2 \cdot c - [(e - 1) \cdot a + c] = (n - e) \cdot a + c$$

$$vc = (v - 1) \cdot a + c$$

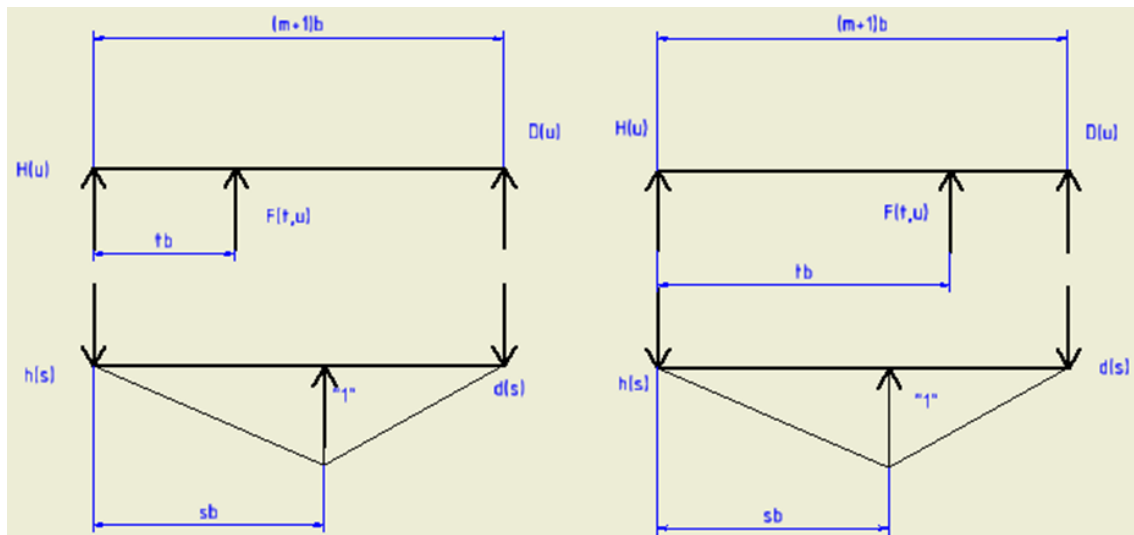
$$ec = (e - 1) \cdot a + c$$

Výsledný průhyb v libovolném místě lamely je dán součtem dílčích průhybů dle vztahu (3.56).

$$v(t, v) = L(v) \cdot k_L(v) + \sum_{u=1}^n F(t, u) \cdot k_u(u, v) + R(v) \cdot k_R(v) + Q(t) \cdot k_Q \quad (3.56)$$

d) Průhyb tyče

Na Obrázek 13 je uvolněná tyč zatížená reakčními účinky $H(u)$, $D(u)$ a silou $F(t, u)$.



Obrázek 13: Uvolněná tyč při postupování zprava i zleva.

Rovnice průhybu včetně podmínek platnosti vztahu a vyjádřených koeficientů k jsou uvedeny v Tabulka 14.

Tabulka 14: Vztahy pro výpočet průhybu.

průhyb	podmínka	koeficient k
$v(t, s) = H(s) \cdot k_H(s)$	-	$k_H(s) = -\frac{h(s)}{E_{tyc} \cdot J_{ztyc}} \cdot \left[\frac{x^3}{3} \right]_0^{sb}$
$v(t, s) = D(s) \cdot k_D(s)$	-	$k_D(s) = -\frac{d(s)}{E_{tyc} \cdot J_{ztyc}} \cdot \left[\frac{x^3}{3} \right]_0^{ms}$
$v(t, s) = F(t, u) \cdot k_t(t, s)$	$s > t$	$k_t(t, s) = -\frac{h(s)}{E_{tyc} \cdot J_{ztyc}} \cdot \left\{ \left[\frac{x^3}{3} \right]_{tb}^{sb} - t \cdot \left[\frac{x^2}{2} \right]_{tb}^{sb} \right\}$
$v(t, s) = F(t, u) \cdot k_t(t, s)$	$s < t$	$k_t(t, s) = -\frac{d(s)}{E_{tyc} \cdot J_{ztyc}} \cdot \left\{ \left[\frac{x^3}{3} \right]_{mt}^{ms} - mt \cdot \left[\frac{x^2}{2} \right]_{mt}^{ms} \right\}$

Integrační meze jsou vyjádřeny vztahy (3.57).

$$ms = (m + 1 - s) \cdot b \quad (3.57)$$

$$mt = (m + 1 - t) \cdot b$$

$$sb = s \cdot b$$

$$tb = t \cdot b$$

Velikost reakcí od jednotkového zatížení je dána rovnicemi (3.58) a (3.59).

$$h(s) = \frac{m + 1 - s}{m + 1} \quad (3.58)$$

$$d(s) = \frac{s}{m + 1} \quad (3.59)$$

Průhyb tyče v libovolném místě je dán rovnicí (3.60).

$$v(s, u) = H(s) \cdot k_H(s) + \sum_{t=1}^m F(t, u) \cdot k_t(t, s) + D(s) \cdot k_D(s) \quad (3.60)$$

3.1.3 Ohybový moment

V programu Matlab byl napsán skript na sestavení vektoru pravé strany \mathbf{b} , vektoru neznámých \mathbf{x} a matice silových účinků a deformačních podmínek A , který je schopen řešit libovolně zadanou mříž. Soustava lineárních rovnic byla vyřešena příkazem $\mathbf{x} = A \setminus \mathbf{b}$. Z vektoru \mathbf{x} byly vygenerovány jednotlivé silové účinky a pomocí další části skriptu z nich byl určen průběh ohybového momentu pro lamelu a tyč. Dále bylo nalezeno maximum ohybového momentu v absolutní hodnotě, z něhož bylo vypočteno maximální ohybové napětí.

3.1.4 Napětí při ohybu

Napětí při prostém ohybu je dáno vztahem (3.61) a maximální ohybové napětí je vyjádřeno rovnicí (3.62). Pomocí těchto vztahů byly určeny maximální hodnoty ohybových momentů lamel a tyčí. [24]

$$\sigma_o = \frac{M_o}{W_o} \quad (3.61)$$

$$\sigma_{o_{max}} = \frac{M_{o_{max}}}{W_o} \quad (3.62)$$

Na základě hodnot proměnných uvedených v Tabulka 15 byly získány závislosti maximálních ohybových napětí na rozměrech mříže. V Tabulka 16 jsou uvedeny hodnoty parametrů řešené mříže.

Tabulka 15: Hodnoty proměnných pro lamely a tyče

proměnná	lamela	tyč
modul pružnosti v tahu E [$\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$]	72 000	210 000
kvadratický moment průřezu J_z [mm^4]	1784	490
průřezový modul v ohybu W_o [mm^3]	205	98

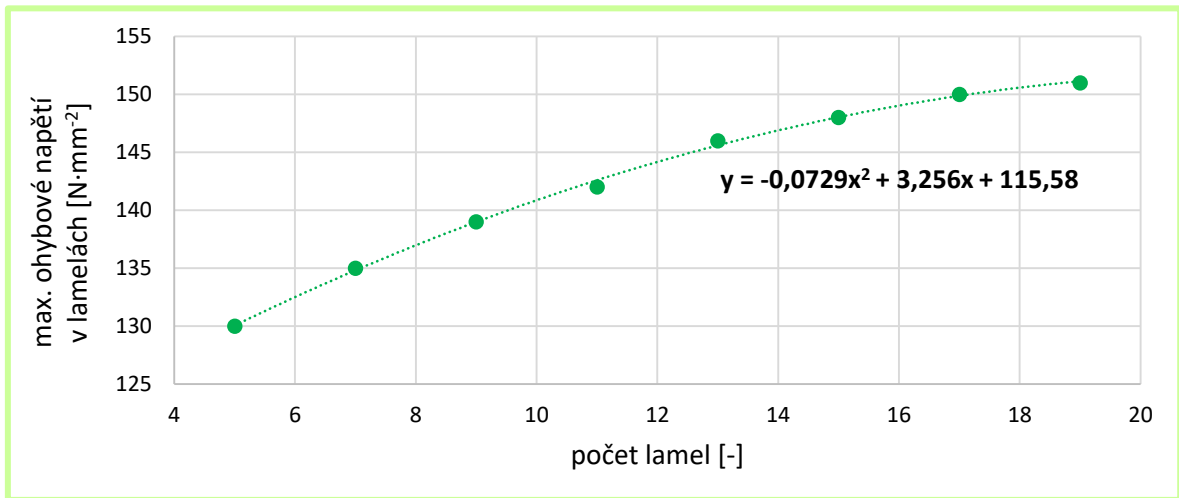
Tabulka 16: Hodnoty parametrů mříže

označení parametru	význam parametru	hodnota parametru [mm]
a	vzdálenost dvou sousedních tyčí	150
b	vzdálenost dvou sousedních lamel	12,5
c	vzdálenost tyče na konci mříže od rámu konvektoru	150
m	počet lamel	17
n	počet tyčí	5

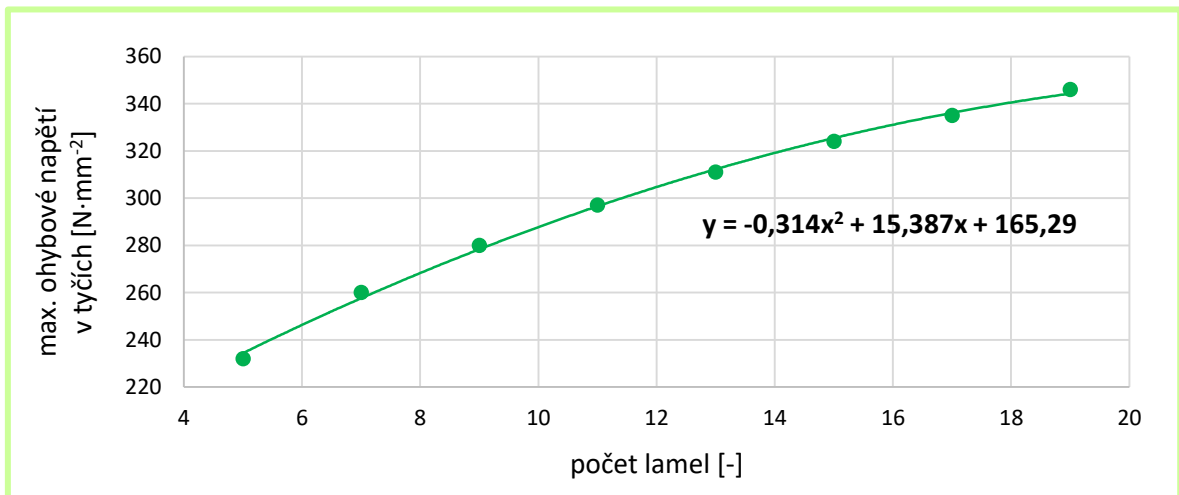
Na Obrázek 14 je znázorněna závislost maximálního ohybového napětí pro nejvíce namáhanou lamelu na počtu lamel. Působíště bodového zatížení o velikosti 1000 N je uvažováno uprostřed lamely. Získané hodnoty maximálních ohybových napětí byly aproximovány polynomem druhého stupně, jehož rovnice je zobrazena v grafu a bude využita v návrhovém výpočtu. Závislost maximálního ohybového napětí na počtu tyčí (v rozmezí 5–19) je nevýrazná.

Na Obrázek 15 je graficky znázorněna závislost maximálního ohybového napětí v tyčích na počtu lamel. Bodové zatížení lamely o velikosti 1000 N je uvažováno v místě spojení tyče s lamelou. Závislost je aproximována polynomem druhého stupně, jeho rovnice je zobrazena v grafu. Tato rovnice bude využita v návrhovém výpočtu. Závislost maximálního ohybového napětí nejvíce namáhané tyče na počtu tyčí je nevýrazná a nebude dále uvažována.

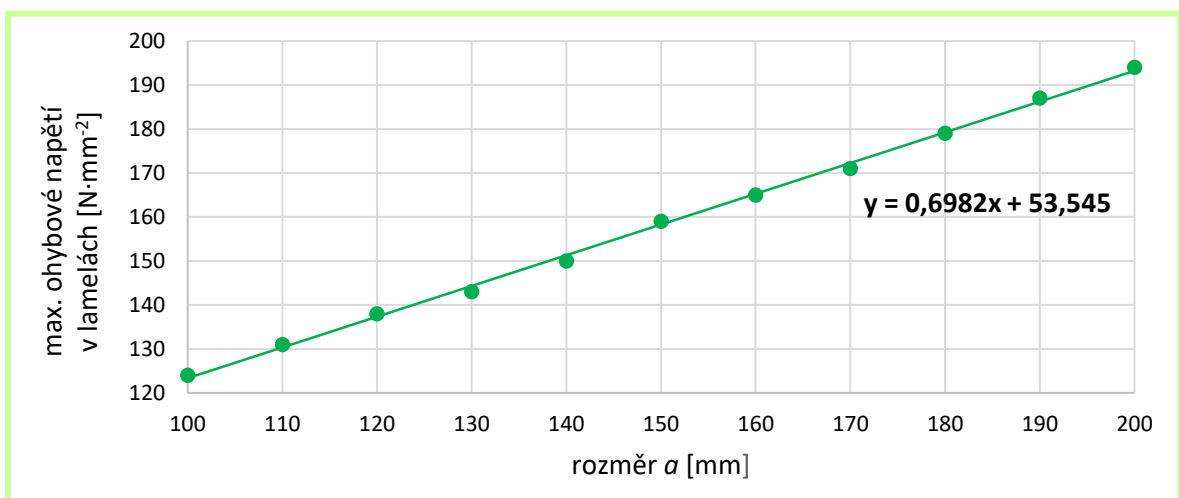
Na Obrázek 16 je graficky znázorněna závislost maximálního ohybového napětí na vzdálenosti dvou sousedních tyčí. Výsledný průběh je proložen přímkou, jejíž rovnice je zobrazena v grafu.



Obrázek 14: Závislost maximálního ohybového napětí v lamelách na počtu lamel



Obrázek 15: Závislost maximálního ohybového napětí v tyčích na počtu lamel



Obrázek 16: Závislost maximálního ohybového napětí v lamelách na vzdálenosti dvou sousedních tyčí

3.2 MKP model

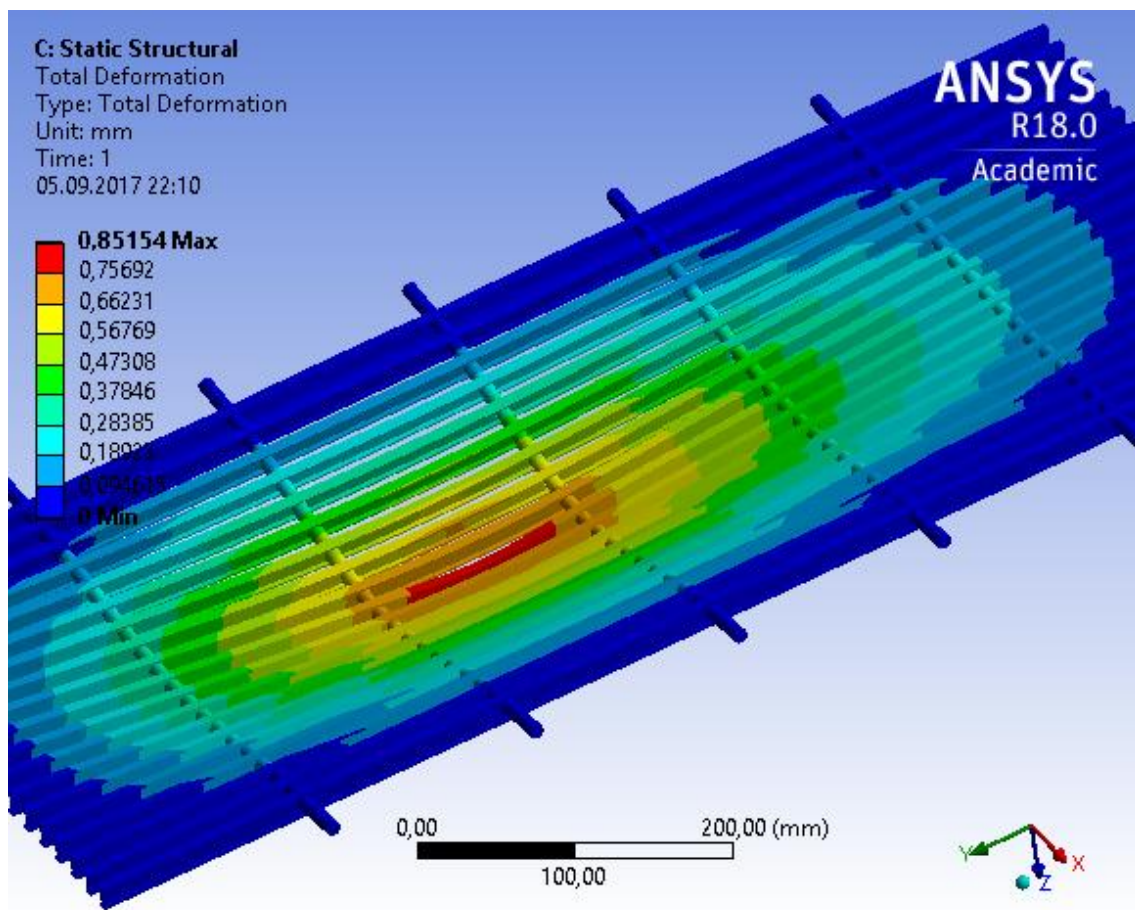
Na základě hodnot parametrů mříže uvedených v Tabulka 16 (na str. 32) byla vymodelována mříž a následně podrobena napěťové a deformační analýze. Konce všech lamel byly opatřeny obecnými vazbami. U krajních lamel byl předpokládán dotyk spodní plochy lamel s rámem skříně konvektoru.

3.2.1 Zatížení umístěné mezi dvěma tyčemi

Mříž byla zatížena osamělou silou o velikosti 1000 N na prostřední lamele mezi druhou a třetí tyčí.

3.2.1.1 Průhyb mříže

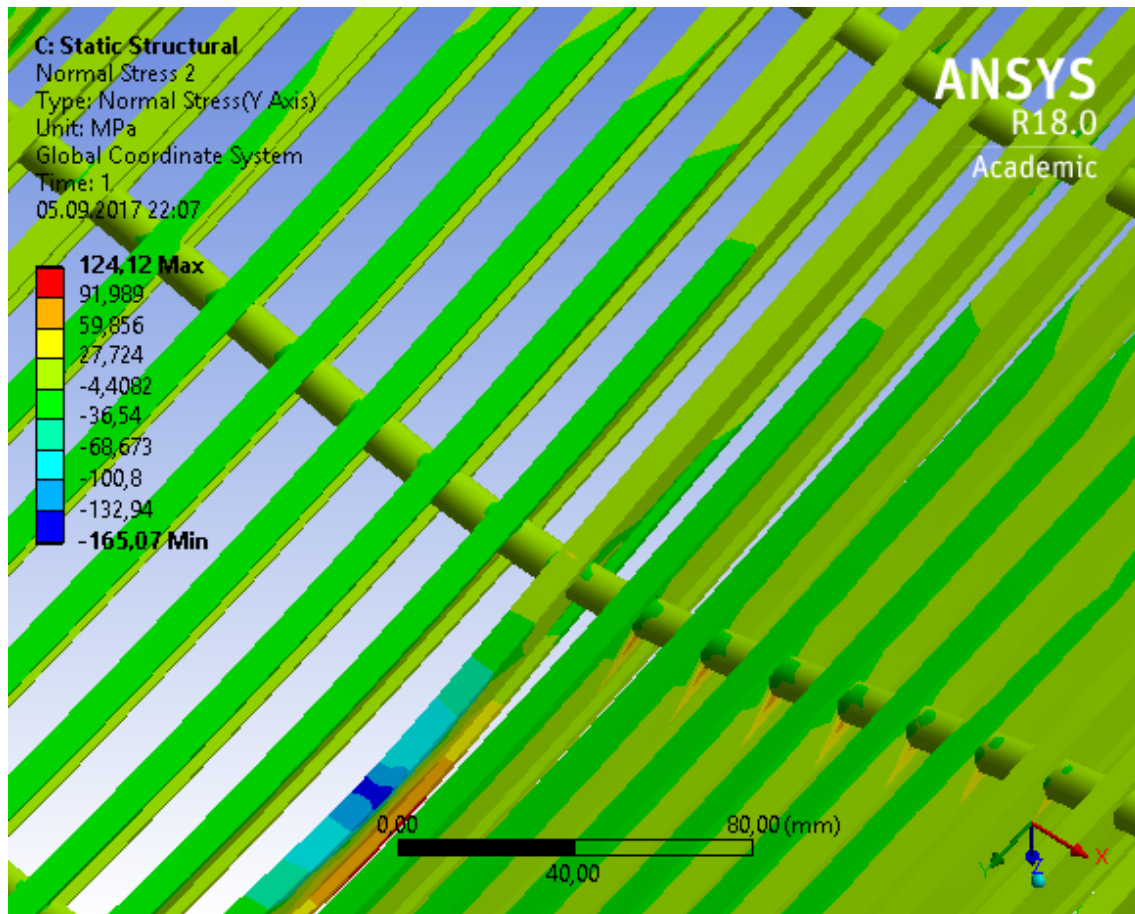
Průhyb mříže zachycuje Obrázek 17. Hodnoty průhybu mříže jsou uvedeny v mm v levé části obrázku. Maximální průhyb mříže dosahuje v místě působení síly hodnoty 0,85 mm.



Obrázek 17: Průhyb mříže

3.2.1.2 Rozložení napětí v lamelách

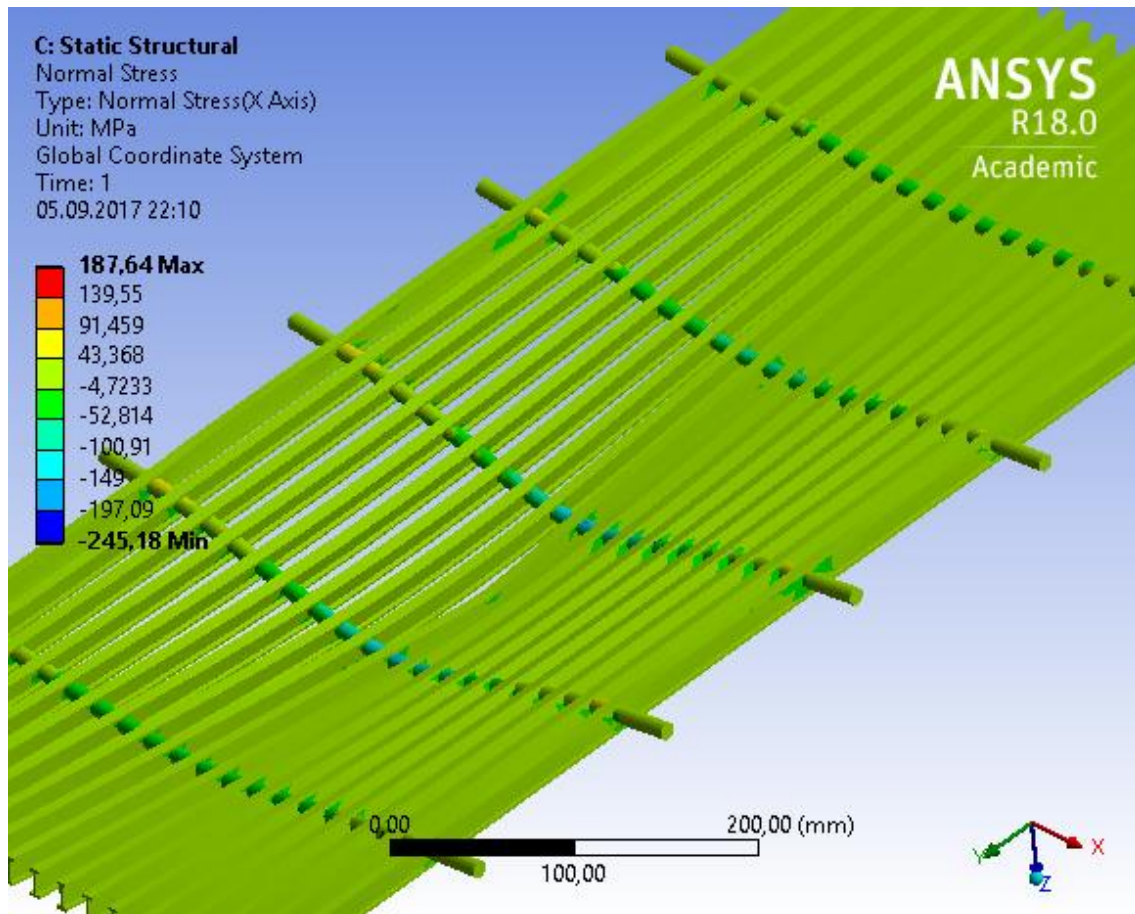
Na Obrázek 18 je znázorněno rozložení napětí ve střední části mříže. Důraz je kladen na lamelu. V její spodní části nabývá napětí své maximální hodnoty $124,12 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ a v její horní části pak minimální hodnoty $-165,07 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$.



Obrázek 18: Rozložení ohybového napětí v lamelách

3.2.1.3 Rozložení napětí v tyčích

Na Obrázek 19 je zobrazeno rozložení napětí tyčích. Extrémů dosahuje napětí ve střední části tyče. Maximum napětí nabývá hodnoty $187,64 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ ve spodní části tyče a minimum nabývá hodnoty $-245,18 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ v horní části tyče.



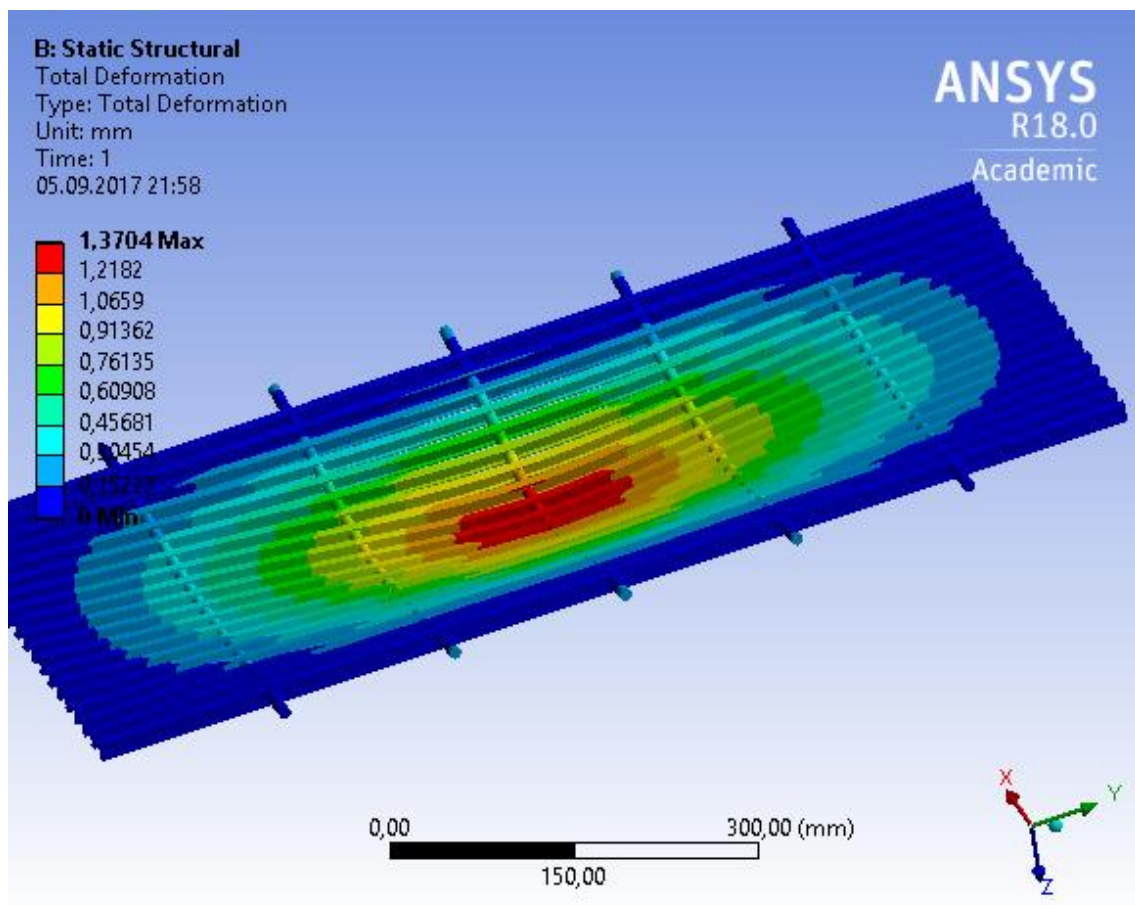
Obrázek 19: Rozložení ohybového napětí v tyčích

3.2.2 Zatížení umístěné v uzlu mříže

Mříž byla zatížena osamělou silou o velikosti 1000 N. Působíště zatěžující síly bylo zvoleno ve střední oblasti mříže v místě, kde je spojena lamela s tyčí.

3.2.2.1 Průhyb mříže

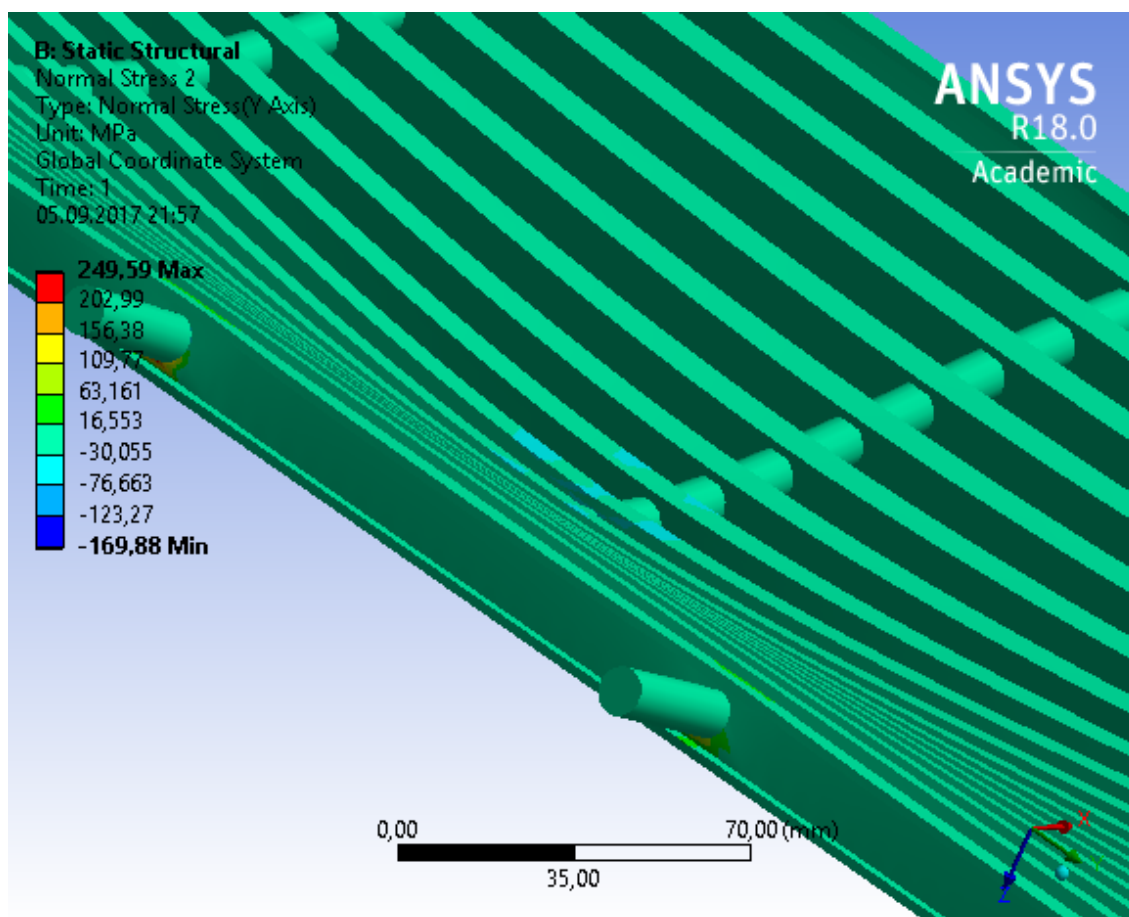
Průhyb celé mříže zachycuje Obrázek 20. Hodnoty průhybu mříže jsou uvedeny v mm v levé části obrázku. Maximální průhyb mříže dosahuje v místě působíště síly hodnoty 1,37 mm.



Obrázek 20: Průhyb mříže

3.2.2.2 Rozložení napětí v lamelách

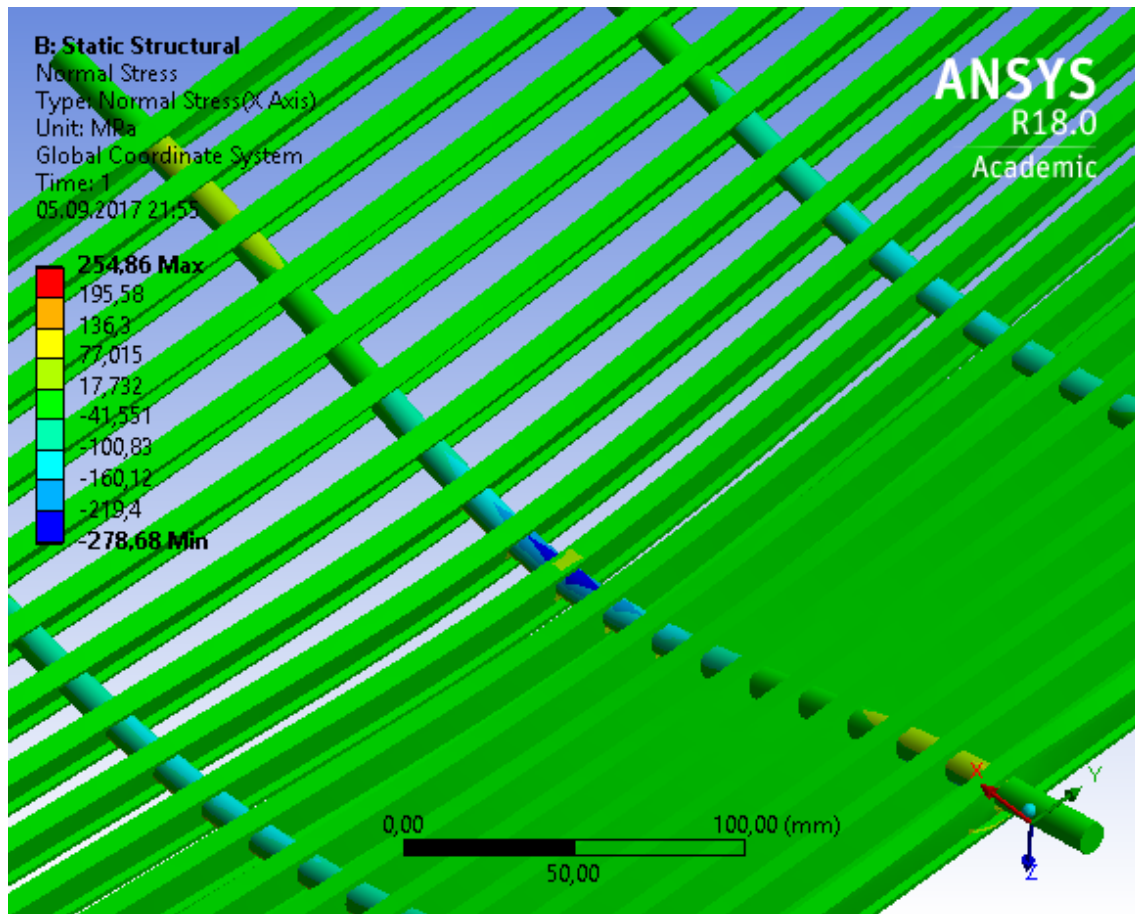
Rozložení napětí v lamelách je znázorněno na Obrázek 21. Ohybové napětí dosahuje extrémů v prostřední lamely. Maximální hodnoty $63,61 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ ve spodní části lamely a minimální hodnoty $-76,7 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ v horní části lamely.



Obrázek 21: Rozložení ohybového napětí v lamelách

3.2.2.3 Rozložení napětí v tyčích

Rozložení napětí v tyčích je znázorněno na Obrázek 22. Ohybové napětí dosahuje extrémů v prostřední tyči. Maximální hodnoty $254,86 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ ve spodní části tyče a minimální hodnoty $-278,68 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ v horní části tyče.



Obrázek 22: Rozložení ohybového napětí v tyčích

4 Výpočty

Na základě provedené analýzy byla ve výpočtech zohledněna napětí od ohybu. Krut lamel ani tyčí nebude z důvodu zanedbatelného vlivu uvažován. Na základě MKP analýzy budou kontrolována místa uložení tyčí v lamelách na otláčení.

4.1 Návrhový výpočet

Návrhový výpočet vychází z namáhání lamel a tyčí v ohybu. Bude uveden ve dvou podobách. První tvar vychází z rovnice (3.62) na str. 32. Úpravou pak lze obdržet vztah daný rovnicí (4.1).

$$a_{max} = \frac{4 \cdot \sigma_{dov} \cdot W_o}{F} \quad [mm] \quad (4.1)$$

Při uvažování bezpečnosti $k = 1,25$ nabývá dovolené napětí σ_{dov} hodnoty dané vztahem (4.2).

$$\sigma_{dov} = \frac{Rp_{0,2}}{k} = \frac{200}{1,25} = 160 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2} \quad (4.2)$$

Dosažením hodnoty dovoleného napětí z rovnice (4.2) do rovnice (4.1) byla získána maximální hodnota parametru a . Je dána rovnicí (4.3). Hodnoty proměnných v rovnici byly dosazeny dle Tabulka 15 na str. 32.

$$a_{max} = \frac{4 \cdot 160 \cdot 205}{1000} = 132,2 \text{ mm} \quad (4.3)$$

Druhý tvar návrhového výpočtu vyplývá ze závislosti maximálního napětí v lamelách na vzdálenosti dvou sousedních tyčí (viz Obrázek 16 na str. 34). Po úpravě lze získat vztah pro výpočet maximální dovolené vzdálenosti dvou tyčí daný rovnicí (4.4).

$$a_{max} = \frac{\sigma_{dov} - 53,545}{0,689} \quad [mm] \quad (4.4)$$

Dosažením hodnoty dovoleného napětí lze získat konkrétní maximální hodnotu parametru a (4.5).

$$a_{max} = \frac{160 - 53,545}{0,689} = 154,5 \text{ mm} \quad (4.5)$$

Výsledky rovnic (4.3) a (4.5) se liší zhruba o 15%. Výhodou vztahu vyjádřeného rovnicí (4.1) je jeho jednoduchost a obecná platnost, není však tak přesný. Vztah vyjádřený rovnicí (4.4) je výrazně přesnější. Jedná se ale o aproximaci platnou pouze pro konkrétní zadání (průřez lamel a tyčí, jejich počet). Při změně zadaných parametrů je nutné vztah upravit dle nové aproximace závislosti maximálního ohybového napětí na vzdálenosti dvou sousedních tyčí (viz Obrázek 16 na str. 34).

4.2 Kontrolní výpočty

Kontrolní výpočty jsou navrženy na základě provedené analýzy namáhání podélných lamel konvektorů. V následujících kapitolách bude kontrolována krycí mříž na ohyb a otláčení v místech styku lamel a tyčí a v místech kontaktu lamel se zatěžujícím tělesem.

4.2.1 Kontrola namáhání na ohyb

Za předpokladu, že návrhový výpočet nebude vycházet z přímého výpočtu programu Matlab, je nutné provést kontrolní výpočet v programu. To platí i pro případ využití vztahů vycházejících z grafického znázornění závislosti ohybového napětí na rozměrech lamel a tyčí.

4.2.2 Kontrola na otláčení v místě spojení tyče a lamely

V místech spojení lamely a tyče jsou lamely vystaveny tlaku, a je proto nutné tento tlak kontrolovat. Maximální hodnota tlaku je dána rovnicí (4.6),

$$p_0 = \frac{4 \cdot N}{\pi \cdot d \cdot l} \quad [MPa] \quad (4.6)$$

kde d je průměr tyče, l je šířka lamely v místě uložení tyče a N je velikost reakční síly ve zkoumaném místě. Musí platit, že maximální tlak musí být menší než dovolený tlak pro konkrétní materiál. Velikosti reakcí je programem v Matlabu generována. [25]

4.2.3 Kontrola na otláčení v místě působení síly

Poškození lamely může být dosaženo i působením síly na malé ploše. Rovnice (4.7) vyjadřuje minimální plochu, na které zatěžná síla může působit, aniž by došlo k poškození lamely.

$$A_{min} = \frac{N}{p_{dov}} \quad [mm^2] \quad (4.7)$$

5 Závěr

V první části práce byla zpracována rešerše dostupných provedení pochozích mříží podlahových konvektorů u různých výrobců v ČR i zahraničí. Přehled obsahuje používané materiály a provedení a výrobcem udávanou nosnost a způsob zatížení.

V druhé části práce byla provedena analýza namáhání podélných lamel a podpěrných tyčí pochozích mříží dvěma způsoby, nejprve analyticky a poté metodou MKP. Zatížení bylo uvažováno ve dvou místech pro dosažení maximálního zatížení lamely i tyče.

Analytické řešení spočívalo v sestavení soustavy rovnic popisující chování mříže při zatížení vnější silou a následně v jejím vyřešení. Na základě získaného řešení byly určeny průběhy ohybových momentů a jejich maximální hodnoty a poté maximální hodnoty ohybových napětí. Byly vytvořeny grafické závislosti maximálního ohybového napětí na parametrech mříže.

Numerické řešení bylo provedeno metodou konečných prvků. V programu ANSYS byl vytvořen model pochozí mříže a byla provedena deformační a napěťová analýza.

Výsledky obou metod se liší zhruba o 20%. Tento rozdíl mohl být způsoben zanedbáním některých vlivů v analytickém výpočtu, např. vlivu krutu lamel.

V třetí části byly stanoveny nejprve návrhové výpočty vycházející ze dvou přístupů. Prvním bylo použití vztahu pro výpočet maximálního ohybového napětí v nosníku a druhým bylo využití grafických závislostí získaných analytickou analýzou. První přístup je výrazně jednodušší a méně časově náročný. Jeho nevýhodou je ale nepřesnost výpočtu, neboť nepředpokládá rozložení zatížení v mříži. Druhý přístup je přesnější, ale neplatí obecně. Při změně zadaných parametrů mříže je nutné zohlednit novou aproximaci závislosti maximálního ohybového napětí na parametrech mříže.

Poté byly stanoveny kontrolní výpočty. Za pomoci skriptu vytvořeného v programu Matlab je možno zkontrolovat mříž z hlediska namáhání v ohybu. Dále je třeba zkontrolovat lamely na otláčení v místě zatížení a v místě spojení s tyčemi.

Byly navrženy parametry pochozí mříže podlahového konvektoru optimální pro její nejširší používanou variantu. Parametry byly navrženy tak, aby nebylo třeba použít příčné podpěry pod lamely. 3D model a výrobní výkresová dokumentace byly vytvořeny v programu Inventor.

6 Seznam použité literatury

- [1] O nás. *BOKI Industries* [online]. Brno, 2017 [cit. 2017-09-05]. Dostupné z: <http://www.bokiheat.eu/cs/m-11-o-nas/>
- [2] Katalog otopných těles. *BOKI Industries* [online]. Brno, 2017 [cit. 2017-09-05]. Dostupné z: http://www.bokiheat.eu/userfiles/files/Boki_katalog_2016_CZ.pdf
- [3] Montážní návod a pokyny k údržbě. *BOKI Industries* [online]. Brno, 2017 [cit. 2017-09-05]. Dostupné z: <http://www.bokiheat.eu/userfiles/files/Mont%C3%A1%C5%BEen%C3%AD-n%C3%A1vod-a-pokyny-k-%C3%BAdr%C5%BEb%C4%9B-FMK,-F1T,-F1P-PLUS,.pdf>
- [4] O nás. *MINIB* [online]. Praha, 2012 [cit. 2017-09-07]. Dostupné z: <http://www.minib.cz/about/>
- [5] Konvektory: Mřížky a lišty ke konvektorům. *MINIB* [online]. Praha, 2012 [cit. 2017-09-07]. Dostupné z: <http://www.minib.cz/convectors/category/7>
- [6] Společnost. *Fan-Coil* [online]. Žihle, 2017 [cit. 2017-09-05]. Dostupné z: <https://www.fan-coils.com/spolecnost/>
- [7] Katalog podlahových mřížek. *Fan-Coil* [online]. Žihle: Frkal, 2017 [cit. 2017-09-05]. Dostupné z: <https://www.fan-coils.com/fotky/katalogfcm2016.pdf>
- [8] O nás. *KORADO* [online]. Česká Třebová, 2017 [cit. 2017-09-07]. Dostupné z: <https://www.korado.cz/o-nas.html>
- [9] Konvektory. *KORADO* [online]. Česká Třebová, 2017 [cit. 2017-09-07]. Dostupné z: <https://www.korado.cz/produkty/konvektory.html#kryci-mrizky-a-ramecky>
- [10] Fakta o firmě Jaga. *JAGA* [online]. Hostivice, 2017 [cit. 2017-09-07]. Dostupné z: <http://www.jagacz.com/About.html>
- [11] Katalog pochozích mřížek. *JAGA* [online]. Hostivice, 2017 [cit. 2017-09-07]. Dostupné z: <http://www.jagacz.com/downloads/katalogy/GRIL.pdf>
- [12] O společnosti. *Isan* [online]. Blansko, 2015 [cit. 2017-09-05]. Dostupné z: <http://www.isan.cz/cs/company>
- [13] Podlahové konvektory. *Isan* [online]. Blansko, 2015 [cit. 2017-09-05]. Dostupné z: <http://www.isan.cz/getattachment/download/Katalogy/TERMO-NEW-PRACTIC-technicky-katalog.pdf.aspx>
- [14] Isan TERMO NEW PRACTIC. *Isan* [online]. Blansko: Isan Radiátory, 2015 [cit. 2017-09-05]. Dostupné z: <http://www.isan.cz/getattachment/download/Letaky/TERMO-NEW-PRACTIC-nerezova-mrizka-se-zvysenou-nosnosti-letak.pdf>
- [15] About us. *Emco-Klima* [online]. Lingen, 2017 [cit. 2017-09-07]. Dostupné z: <http://www.emco-klima.com/en/company/emco-klima.html>

- [16] Operation manual. *Emco-Klima* [online]. Lingen, 2017 [cit. 2017-09-07]. Dostupné z: http://www.emco-klima.com/fileadmin/comdbproducts/emco_klima_215BA_KIQ_133089.PDF
- [17] About company. *Konveka* [online]. [cit. 2017-09-05]. Dostupné z: <http://konveka.com/en/convectors-manufacturer>
- [18] Installation manual. *Konveka* [online]. [cit. 2017-09-05]. Dostupné z: http://konveka.com/sites/default/files/fc_installation_manual_2017_0.pdf
- [19] About us. *Hidria* [online]. Ljubljana, 2017 [cit. 2017-09-07]. Dostupné z: <http://www.hidria.com/en/about-us/>
- [20] Technical catalogue: Floor convectors. *Hidria* [online]. Ljubljana, 2017 [cit. 2017-09-07]. Dostupné z: <http://www.hidria.com/Static/upload/file/Floor%20convectors%202011.pdf>
- [21] About Lindab. *Lindab: IMP Klima* [online]. Godovič, 2017 [cit. 2017-09-05]. Dostupné z: <http://www.lindab.si/en/about-lindab>
- [22] Lindab floor convectors: Installation and start-up manual. *Lindab: IMP Klima* [online]. Godovič, 2017 [cit. 2017-09-05]. Dostupné z: http://www.lindab.si/application/files/9814/9448/2397/TK_manuals_web.pdf
- [23] Floor convectors: Technical catalogue. *Lindab: IMP Klima* [online]. Godovič, 2016 [cit. 2017-09-05]. Dostupné z: http://www.lindab.si/application/files/8614/6045/0013/Floor_convectors_ENG_Apr_2016.pdf
- [24] MICHALEC, Jiří. *Pružnost a pevnost I*. Vyd. 3. Praha: ČVUT, 2009. ISBN 978-80-01-04224-3.
- [25] ŠVEC, Vladimír. *Části a mechanismy strojů: spoje a části spojovací*. Vyd. 3. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2008. ISBN 978-80-01-04138-3.

7 Seznam obrázků

Obrázek 1: Krycí mříže s příčnými lamelami [5]	8
Obrázek 2: Krycí mříže s podélnými lamelami [5]	8
Obrázek 3: Závislost nosnosti lamel mříží KORADO/LICON na jejich délce [9]	11
Obrázek 4: Nosník zatížený osamělou silou	19
Obrázek 5: Nosník zatížený spojitým zatížením	19
Obrázek 6: Uvolnění nosníku zatíženého silou v obecné místě	20
Obrázek 7: Uvolnění lamely	21
Obrázek 8: Uvolnění tyče	22
Obrázek 9: Zobrazení mříže včetně reakčních účinků	23
Obrázek 10: Uvolnění lamely	25
Obrázek 11: Uvolněná lamela při postupování zleva	27
Obrázek 12: Uvolněná lamela při postupování zprava	28
Obrázek 13: Uvolněná tyč při postupování zprava i zleva.	30
Obrázek 14: Závislost maximálního ohybového napětí v lamelách na počtu lamel	34
Obrázek 15: Závislost maximálního ohybového napětí v tyčích na počtu lamel	34
Obrázek 16: Závislost max. ohybového napětí v lamelách na vzdálenosti dvou sousedních tyčí ...	34
Obrázek 17: Průhyb mříže	35
Obrázek 18: Rozložení ohybového napětí v lamelách	36
Obrázek 19: Rozložení ohybového napětí v tyčích.....	37
Obrázek 20: Průhyb mříže	38
Obrázek 21: Rozložení ohybového napětí v lamelách	39
Obrázek 22: Rozložení ohybového napětí v tyčích.....	40

8 Seznam tabulek

Tabulka 1: Provedení lamel mříží společnosti BOKI [2].....	8
Tabulka 2: Provedení lamel mříží společnosti MINIB [5]	9
Tabulka 3: Provedení lamel mříží společnosti Fan-Coil [7]	10
Tabulka 4: Provedení lamel mříží společností KORADO a LICON [9].....	12
Tabulka 5: Provedení lamel mříží společnosti Jaga [11].....	13
Tabulka 6: Provedení lamel mříží společnosti Isan [13] [14].....	14
Tabulka 7: Nosnost mříží společnosti Emco-Klima [16]	15
Tabulka 8: Provedení lamel mříží společnosti Emco-Klima [16]	15
Tabulka 9: Provedení lamel mříží společnosti Konveka [18].....	17
Tabulka 10: Provedení lamel mříží společnosti Hidria [20].....	17
Tabulka 11: Provedení lamel mříží společnosti Lindab [22] [23]	18
Tabulka 12: Označení silových účinků.....	22
Tabulka 13: Přehled používaných parametrů	23
Tabulka 14: Vztahy pro výpočet průhybu.	31
Tabulka 15: Hodnoty proměnných pro lamely a tyče	32
Tabulka 16: Hodnoty parametrů mříže	32

9 Seznam příloh

Příloha 1 – Skript Matlab.....	P1
Příloha 2 – Výkres lamely	P2
Příloha 3 – Výkres tyče	P3
Příloha 4 – Výkres sestavení mříže.....	P4
Příloha 5 – Model mříže	P5