



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

DEPARTMENT OF HANDLING AND BUILDING MACHINES

Vlivy výrobních tolerancí profilů nosníků na nosné konstrukce

Influences of production tolerances of beam profiles on load structures

TEZE DIZERTAČNÍ PRÁCE

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. David Hloušek

ŠKOLITEL

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Malášek, Ph.D.

BRNO 2022

OBSAH

1	Současný stav řešené problematiky	3
2	Cíle práce	6
3	Tvorba modelů, simulací a experimentu	7
3.1	Tvorba modelu	7
3.2	Okrajové podmínky, zatěžovací stavy a vazby	8
3.2.1	Okrajové podmínky	8
3.2.2	Vazby	8
3.2.3	Zatížení a zatěžovací stav	9
3.2.4	Definice požadovaných výsledků simulace	9
3.3	Provedení analýzy nosníku pomocí MKP	10
3.3.1	Výsledek analýzy MKP	10
3.3.2	Interpretace výsledků výchozí MKP analýzy	11
3.4	Laboratorní experiment	12
3.4.1	Metodika měření rovinné napjatosti	12
3.4.2	Volba a instalace tenzometru	12
3.4.3	Kalibrace měřící soustavy	13
3.4.4	Přepočet hodnot	13
3.4.5	Porovnání výsledků	14
3.5	Měření ořevřeného plnostěnném nosníku průřezu „IPE“	14
3.6	Analýza MKP dalších nosníků o průřezu IPE a I	16
3.6.1	Nosníky o průřezu IPE	16
3.6.2	Nosníky o průřezu I	17
4	Hlavní výsledky práce	19
5	Závěr	22
6	Literatura	24
7	Autorovo CV	27

1 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Během posledních 40 let byl zaznamenán významný vývoj v simulaci reálného chování zatěžovaných komponent jednotlivých konstrukcí. Toto se netýkalo pouze užití metody konečných prvků, ale i multibody systémů. Neustálou pozornost si vyžaduje vyvíjení výpočtu únavového poškození. Čím více se zvyšuje výkon počítačových komponent a sestav, tím se objevuje mnoho úrovní, jak získávat podrobnější a reálnější pohled na to, jak se jednotlivé konstituce prutových či rámových konstrukcí chovají. Přesně zde se dá uplatnit multiaxiální řešení, kde se snažíme přiblížit popisu poškození či deformaci vyplývajícího z daného zatížení (tj. při ohýbání či kroucení daného profilu). Ve 30. letech minulého století se H. J. Gough [1] a H. V. Pollard [9] či W. N. Findley [7][8] v 50. letech zabývají zejména tendencí redukovat veškeré zatížení na jednoosé, protože řešení v oblasti jednoosého zatěžování bylo proveditelné. A právě Findley zavádí tuto tendenci do problematiky creepů v materiálech. S postupem času tento přístup přestal stačit a bylo nutno se zaměřit na vznik plastických deformací odlišně. Docházelo k situacím, kdy bylo naznáno, že by bylo vhodné řešit problematiku ve všech rovinách.

V aktuálním vědeckém počínání se drtivá většina zabývá nosníky na vzpěr. Modelováním jednotlivých struktur vysokopevnostních ocelí se zabývá například Sun [27] a jejich následnou analýzou únosnosti při klopení v konstrukcích se zabývá Dubina [4]. Dalšími pracemi zabývajícími se modelováním nosníků a jejich únosnosti za uvážení imperfekcí je v dnešní době mnoho. Je vykazována velká snaha vědeckých prací v jednotlivých sektorech inženýrství (letectví, strojní zařízení, stavební odvětví, aj.) dokázat popsat jednotlivé chování a implementovat v nich co nejvíce z jejich přirozených chování [24][17][15][14]. V návaznosti na tyto elementy se popisuje jejich stabilita a celková únosnost [25][18]. Dodatečnými vlivy mohou být například teplotní změny [29][13], vibrace [16], počáteční výrobní imperfekce [23][11][3][22], aj.

Při ověřování virtuálních výsledků se může použít měření odporovými tenzometry. Tenzometry za posledních skoro 80 let prodělaly výrazný pokrok do dnešní podoby. Od prvopočátku – zapojení prvního Wheatstonova mostu [24], jeho matematickým popisem S. Christiem [21], přes období 30. let minulého století, první patenty na prototypy tenzometrů dle konceptu Rugeho a Simmonse [5], se tenzometrie stále rozvíjí, mimo kovových a polovodičových tenzometrů se snímače rozrůstají do skupin generací [28], kde každá generace má svoje výhody i nevýhody. Dnešní, sériově vyráběné tenzometry můžeme dělit do mnoha kategorií a podskupin, kde každá skupina tenzometrů má své specifické využití. Například pro zkoumání teplotních vlivů, pozorování nosníků z konkrétních materiálů, velikosti pozorovaných deformací, zbytkových napětí a mnoho dalšího.

Vědecké práce, ve kterých odehrávají tenzometry důležitou roli jsou na poli mapování (pozorování) vnějších vlivů [30], zpřesňování jednotlivých měření [19][20] a verifikace výsledků [11].

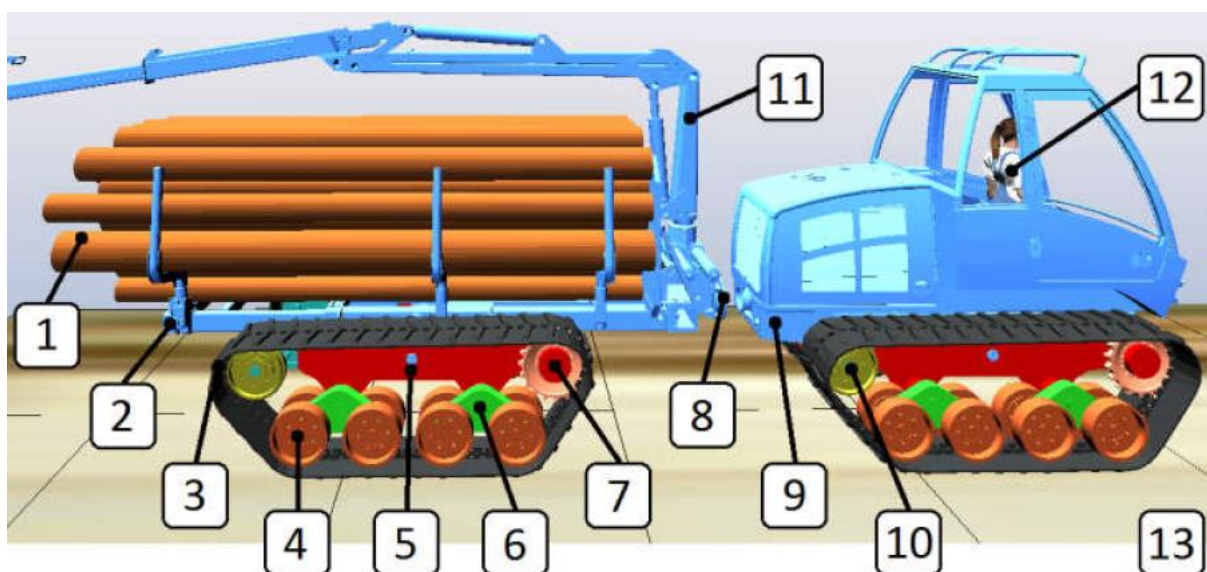
Přínosem pro vědu v této oblasti bude nahlížení na nosník, který je zatěžován posouvající silou nebo momentem s mapováním jeho únosnosti, za předpokladu, že neznáme jeho nulový stav, neboť se každý prvek reálně užitý v dané konstrukci vyskytuje v určité konfiguraci dle výrobních tolerancí a odchylek.

Popis řešené problematiky

V úvodu práce je stručně popsána autorova motivace výběru tohoto tématu a je nutno ji nyní dále rozvést. Pro nejvyšší efektivnost práce jakéhokoli transportního či stavebního stroje a zejména při jeho vývoji je obecně nutné znát jeho energetickou či výkonovou náročnost. V minulosti byla energetická náročnost stroje či zařízení určována na základě velmi zjednodušených výpočtů modelů. Například pro pohybuující se stroje byla hlavní myšlenka, kolik energie se spotřebuje, pokud se má přemístit přes určitou překážku (složitý terén, aj.). Nyní nám dosavadní výpočetní technologie a postupy umožňují zabývat se mnohem více komplexními úlohami s více stupni volnosti. Zde se obecně používá metoda MBS (multi-body simulation) [12].

V minulosti byl proveden výzkum za účelem zjištění energetické náročnosti lesní vyvážedky. Za pomoci metody MBS jsme byli schopni navrhnout celé strojní zařízení včetně rámu, pohonné jednotky a jejich komponent. Průběh zkoumání byl směřován do zmapování chování stroje ve vícero provozních situacích. Lesní vyvážedka je určena pro transport dřevěných klád z mýtin na složiště, odkud se vyváží z lesa většinou za pomoci kamionové dopravy a návěsů s klanicemi.

Výpočetní model spočíval ve scénáři, kdy se lesní vyvážedka pohybuje plně naložená po virtuálně vytvořeném podloží parametricky totožném s lesním podložím. Pohyb je rozložen na pět fází náklonů, stoupání: -10, -5, 0, 5 a 10 stupňů. Lesní vyvážedka se skládá ze dvou rámu podvozku s kloubovým spojením a dvěma páry poháněných pásových sekcí (pár na každý rám).

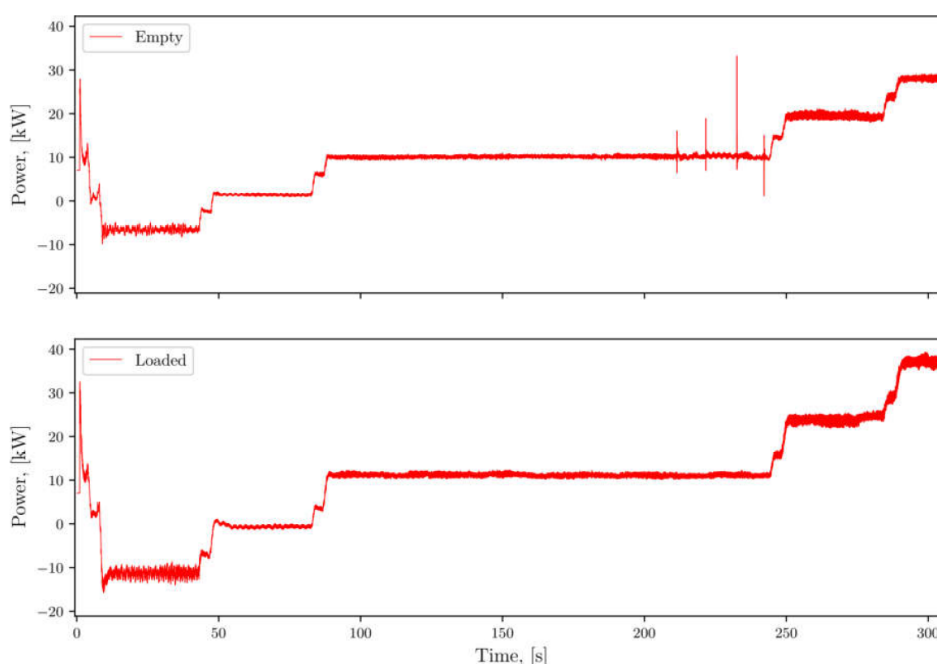


Obrázek 1: Výpočetní model lesní vyvážedky [12]

1. břemeno, 2. zadní rám, 3. pásy, 4. rolny, 5. rám podvozku, 6. rameno,
7. hnací kolo, 8. kloub, 9. přední rám, 10. napínací kolo, 11. jeřábové ramno,
12. operátor, 13. virtuální profil terénu

Komponenty jako hydromotor či pásy a dále chování pásů jsou zastřešeny příslušnými prvky, funkcemi a za pomoci knihovny softwaru Project Chrono. Po nastavení vstupních hodnot jako jsou zrychlení virtuálního modelu za pomoci hnacího kola (viz obr. 1, pozice 7), časového

kroku k odečítání hodnot výkonu a mimo jiné nastavení odečítaných hodnot se získá výkonově-časová charakteristika stroje pro dvě variace stroje, prázdného a s břemenem.



Obrázek 2: Časově-výkonová charakteristika v intervalu 0 až 306 s.

Z charakteristiky (Obrázek 2) je možno vidět všech pět jízdnicích úseků. Počáteční a koncový úsek se chová dle nastavení, kdy stroj zrychluje z 0 na $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a naopak. Mírná oscilace jednotlivých hodnot je způsobena tzv. PID ovladačem použitým v simulaci k ovládání modelu. Následně jsou odečteny střední hodnoty ze všech jízdnicích úseků. Tyto hodnoty korespondují s hodnotami, které byly naměřeny při provozu strojního prototypu.

Tabulka 1: Střední hodnoty požadovaného výkonu stroje.

Náklad/směr	Sjezd z kopce		Rovina	Do kopce	
	-10°	-5°	0°	5°	10°
Prázdný	-6,6 kW	1,6 kW	10,1 kW	19,7 kW	28,1 kW
Naložený	-11,2 kW	-0,7 kW	11,4 kW	23,8 kW	37,3 kW

Celá část projektu zabývající se náročností na výkon lesní vyvážedky, na kterém se autor spolupodílel se zabývá chováním strojního zařízení. Na základě tabulky č. 1, kde je vidět mírná odchylka hmotnosti mezi virtuálním modelem a reálným prototypem. Tato odchylka nabízí nový pohled na celou problematiku. Je třeba, aby stroj mohl pracovat v takovém nasazení, pro jaký byl navržen – a to z hlediska únosnosti. Největší podíl ponese jistě výrobní proces lesní vyvážedky. Zaměřeno na výrobní proces jednotlivých použitých ocelových prvků, ze kterých je celý stroj sestaven – tato práce zjistí, jak moc může být ovlivněna únosnost jednotlivých nosníků, pokud se uváží výrobní tolerance [10].

2 CÍLE PRÁCE

Hlavním cílem této práce je zjistit vliv výrobních tolerancí průřezu nosníků na jejich únosnost virtuální simulací a následně ji experimentálně potvrdit.

Všechny dílčí cíle lze shrnout do následujících několika bodů:

- 1) Vybrat vhodný profil nosníku, který bude vhodným pro laboratorní experiment.
- 2) Tvorba výpočetního modelu za pomoci MKP.
- 3) Provedení simulace za pomoci připraveného modelu a okrajových podmínek, které budou opakovatelné z hlediska laboratorního experimentu.
- 4) Získání hodnot napětí ze simulace pro jejich verifikaci experimentem.
- 5) Příprava a provedení laboratorního měření.
- 6) Porovnání výsledných hodnot virtuální simulace a laboratorního experimentu.
- 7) Rozšíření MKP analýzy na další velikosti stejného průřezu
- 8) MKP analýza druhého typu nosníku o jiném průřezu

Nejdůležitější část v této oblasti provádění analýz je ta, která určí chování napjatosti nosníků napříč nejen velikostmi, ale i odlišnými tvary jejich průřezů. Zde je interpretován rozptyl napjatostí, které jsou při normálním procesu návrhu upozaděny, ale přitom může přinést zásadní vliv chování, který nemusí být vždy dostatečně podchycen nebo eliminován.

3 TVORBA MODELŮ, SIMULACÍ A EXPERIMENTU

Tato část popisuje tvorbu virtuálních modelů zkoumaných nosníků typu IPE a I. Na těchto modelech budou provedeny simulace zatěžovacích stavů. Výsledkem tohoto kroku je vytvoření předpokladu, který bude zprvu sloužit k orientaci mezi naměřenými hodnotami z následného experimentu na jednom vybraném typu nosníku. A ve fázi verifikace výsledků měřením bude stanovena celková odchylka chování reálného nosníku vzhledem k idealizovanému případu, který je definován svými nominálními hodnotami.

Cílem této metodiky je návrh konkrétního případu použití a zatížení otevřeného plnostěnného nosníku, který je možné později replikovat v laboratorních podmínkách a na kterém lze definovat odchylku ohybového napětí tak, aby bylo patrné, jakou mírou jsou tento jev schopny způsobit výrobní rozměrové imperfekce.

3.1 TVORBA MODELU

Hledá se typ modelu, který umožní popsat charakteristiky a chování nosníku.

Objemové modely

Obecně lze ze 3D prvků vytvořit všechny modely. Při vhodné hustotě sítě lze vnášet, sledovat a zkoumat všechny potřebné detaily těchto prvků u všech typů nosníků a konstrukcí. U složitějších konstrukcí je tento veliký počet prvků důsledkem značně navýšené časové náročnosti výpočtu a u komplexních konstrukcí způsobuje jejich neproveditelnost. Tento problém lze eliminovat zjednodušením modelu užitím například prutových nebo skořepinových prvků.

Skořepinové modely

U tenkostěnných konstrukcí můžeme jejich geometrii popsat a nahradit střednicovými plochami a jejich tloušťku zadávat jako parametr. U skořepinových modelů je náročnost výpočtu značně redukována, protože tyto modely mají mnohem menší počet stupňů volnosti v porovnání s 3D prvky. Tato vlastnost znemožňuje vyhodnocování napětí v blízkosti nehladkých napojení skořepinových prvků a také je redukována možnost hodnocení míst, kde se mohou vyskytovat koncentrace napětí.

Prutové modely

Jednotlivé součásti prutového charakteru mohou být s dostatečnou přesností modelovány za pomoci nosníkových nebo prutových prvků. Geometrii prutu reprezentuje střednice a rozměry příčného průřezu zadáváme jako parametry. Podle počtu stupňů volnosti rozlišujeme prvky prutové s tahovou či tlakovou tuhostí nebo prvky nosníkové s tahovou či tlakovou a ohybovou tuhostí. Zmíněné nosníkové prvky se zakládají na Euler-Bernoulliho nebo Timoshenkově teorii. Obecné využití nosníkových prvků je při řešení rámových konstrukcí. Prutové nosníkové prvky, podobně jako u skořepinových, neumí zachytit koncentrátory napětí v blízkosti napojení a z tohoto důvodu jsou vhodné zejména pro hodnocení napjatosti v místech, které jsou dostatečně vzdálené od spojů. Hlavní výhodou užití prutových prvků je při modelování příhradových konstrukcí a jsou největším možným zjednodušením, neboť přenáší pouze axiální síly, tj. namáhání prostým tlakem či tahem.

Geometrický model

Ke zvolení typu modelu je více přístupů. Obecně jsou trojrozměrné objemové prvky založeny na matematické teorii pružnosti, jenž popisuje chování zatěžovaných těles. Pro naši úlohu je důležité popsat nosník tak, abychom byli schopni nejen nadefinovat a dále pozorovat jeho geometrii s vnesením výrobních tolerancí, ale také sledovat celkové přetvoření.

Generování sítě konečných prvků

Aby byly výrazně a pozitivně ovlivněny obdržené výsledky, je nutno provést diskretizaci geometrického modelu a proměnit ho tak v konečnoprvkový model. Užité prostředí ANSYS, které patří k uživatelsky nejpřívětivějším a nabízí dvě hlavní možnosti, jak vygenerovat síť.

Přímá generace sítě (mapované sítě) - spočívá v urychlení zpracování sítě. Výhoda užití spočívá při aplikaci na prostorově jednoduché konstituci modelovaných prvků. Při tvorbě sítě se ale uživatel musí rozhodnout, jak rozdělit řešenou oblast na jednotlivé suboblasti, které topologicky vyhovují pro rozdělení na různé síťové prvky. U složitějších geometrických prvků nebo u prvků, kde jsou přítomny třeba jen radiusy nebo jiné zakřivení dochází k deformaci sítě a může se tak nepřímo zanechat chyba do následného výpočtu.

Automatické definování (free meshing) - uživatel zadává jen základní požadavky na typickou velikost prvku, případně na oblasti zahuštění sítě a vše tímto přenechá preprocessoru. Jedná se o výrazně jednodušší postup. Dalším z důležitých parametrů je hustota generované sítě. Hustota sítě výrazně ovlivňuje kvalitu získaných výsledků.

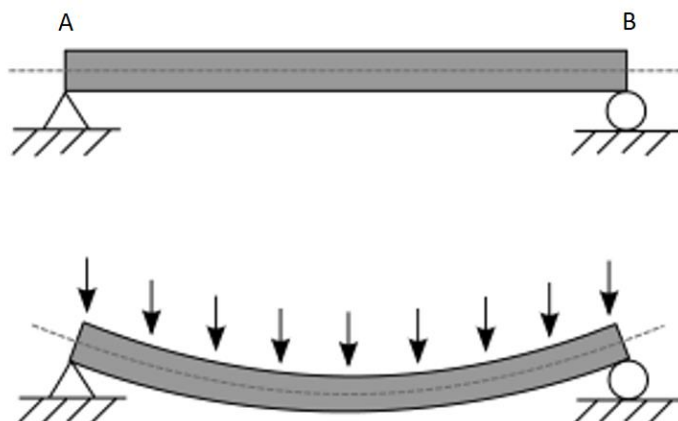
3.2 OKRAJOVÉ PODMÍNKY, ZATĚŽOVACÍ STAVY A VAZBY

3.2.1 OKRAJOVÉ PODMÍNKY

Okrajové podmínky nám definují hranice našeho návrhu či experimentu, ať virtuálního či reálného. Pro účely tohoto modelu i reálného experimentu budou platit vždy stejné okrajové podmínky. Jednou z podmínek je vztažený nosník (prut), který je definován svými průřezovými charakteristikami a tolerancemi, svojí délkou a svojí materiálovou charakteristikou. Jako základní materiál je volen S235JR, protože jde o standardní konstrukční ocel s širokou škálou obecného využití. Limity napjatosti definují normy. [2]

3.2.2 VAZBY

Pro fungování jak simulačního výpočtu, tak i reálného provedení experimentu musí úloha být staticky určitá. Jednotlivé vazby nosníku odebírají stupně volnosti podle jejich typu tak, aby byla zaručena řešitelnost soustavy, ale také aby chování virtuálního modelu odpovídalo skutečnému nosníku v laboratorních podmínkách.



Obrázek 3: Volba zavazbení nosníku.

Na základě výchozího předpokladu řešitelnosti se volí vazba A jako rotační a vazba B jako rotačně-posuvná. Tímto způsobem se umožní nosníku se, jak volně ohýbat, tak se i zamezí zkreslení výsledků sekundárními jevy.

3.2.3 ZATÍŽENÍ A ZATĚŽOVACÍ STAV

Aby bylo možné provést po modelaci simulaci, je zde vstupním parametrem také zatížení, a to:

Užitečné zatížení – je síla/síly, které jsou aplikovány na nosník a jde tedy o dominantní zatížení.

Vnější zatížení – toto zatížení zahrnuje působení gravitace na navržený nosník a jedná se o menší složku síly, ale nikoli zanedbatelnou

Zatěžovací stav – je množina jednotlivých zatížení na jednotlivých dílcích či styčnicích, která k sobě logicky patří, a jsou vzájemně neoddělitelná, tedy působí na konstrukci vždy dohromady. Každé definované zatížení je zahrnuto do některého zatěžovacího stavu. Nelze tedy zadávat zatížení, aniž by byl nejprve určen zatěžovací stav, kam je definováno zatížení. Každý zatěžovací stav má své číslo a název, čímž je jednoznačně určen. [6]

Zatěžovací stav 1 – působení vlivu vlastní tíhy nosníku.

Zatěžovací stav 2 – působení vlivu vlastní tíhy nosníku a tíhové účinky hmotnosti 50 kg ve středu vzdálenosti mezi vazbami.

3.2.4 DEFINICE POŽADOVANÝCH VÝSLEDKŮ SIMULACE

Z důvodu využití tenzometrie jakožto reálného experimentu musí výsledkem simulačního výpočtu MKP analýzy nosníku být jeho napjatost.

Napjatost lze díky vygenerované síti na modelu odečítat v každém vytvořeném uzlu. Mimo jiné je možné identifikovat konkrétní místo s maximální hodnotou napětí.

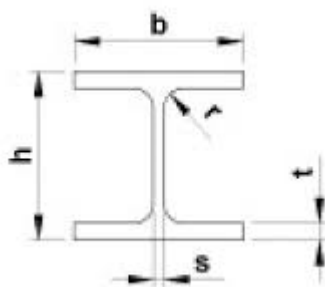
3.3 PROVEDENÍ ANALÝZY NOSNÍKU POMOCÍ MKP

Jako vstupní data simulace jsou použity celkem tři virtuální modely nosníku IPE 80 (dle ČSN EN 10025-2) jehož rozměrové charakteristiky jsou uvedeny v tabulce níže.

Model A – geometrický model nosníku IPE 80 definován svými rozměry včetně jejich záporných mezních úchylek (minimální množství materiálu).

Model B – geometrický model nosníku definován svými jmenovitými rozměry.

Model C – geometrický model nosníku definován svými rozměry zahrnující jejich kladné mezní úchyly (maximální množství materiálu).



Obrázek 4: Schéma průřezu nosníku IPE.

Modely A, B i C jsou podrobeny zatěžovacím stavům 1 a 2.

3.3.1 VÝSLEDEK ANALÝZY MKP

Výsledek analýzy nosníku IPE 80 znázorňuje jednotlivé napjatosti, kterých je možné dosáhnout v případě daného zatěžovacího stavu. Jednotlivé výsledky analýz tvoří rozptyl velikostí napětí, kterých je možné reálně dosáhnout v okrajových stavech vzhledem ke geometrickým rozměrům zkoumaného nosníku.

Tabulka 2: Výsledek analýzy MKP nosníku IPE 80.

	Model A [MPa]	Model B [MPa]	Model C [MPa]
Zatěžovací stav 1	1,463 MPa	1,456 MPa	1,432 MPa
Zatěžovací stav 2	12,020 MPa	14,087 MPa	16,963 MPa

Tato data ukazují rostoucí podíl výrobních geometrických tolerancí na ohybové napjatosti vlivem různého zatížení. Z výsledků je patrné, že napjatost nosníku pod vlivem vlastní tíhy se téměř nemění. To ovšem neplatí, pokud vystavíme nosník vnější posuvné síle kolmé k ose prutu, zde se vyskytuje již velká změna napjatosti. Tato výsledná data budou využita k verifikaci výsledků experimentálního měření ohybové napjatosti.

Následně je možné interpretovat rozptyl napjatosti pro nosník o průřezu IPE 80, které se mohou reálně vyskytnout za daných předpokladů. Interpretace spočívá v zahrnutí výsledků napjatosti z MKP analýzy a také ohybovou napjatost z analytického přístupu.

Z aplikace obou zatěžovacích stavů odečteme výsledná napětí, které jsou vázány ke třem rozměrovým charakteristikám nosníku, které se různí svým průřezem. Tyto data umožňují přesně určit pokles, ale také nárůst únosnosti nosníku vzhledem k zahrnutí vlivů výrobních tolerancí.

Tabulka 3: Rozdíl napětí přítomných na zkoumaném nosníku.

Zatěžovací stav	Maximum materiálu	Jmenovitý rozměr	Minimum materiálu	Procentuální rozdíl
Zatěžovací stav 1	1,432 MPa	1,456 MPa		-1,65 %
Zatěžovací stav 1		1,456 MPa	1,463 MPa	0,48 %
Zatěžovací stav 2	10,734 MPa	14,087 MPa		-23,80 %
Zatěžovací stav 2		14,087 MPa	16,01 MPa	+13,65 %

3.3.2 INTERPRETACE VÝSLEDKŮ VÝCHOZÍ MKP ANALÝZY

Obecně jsou všechny návrhy konstrukcí spjaty v rámci funkčních i pevnostních výpočtů se jmenovitými rozměry užitých profilů. Na základě provedené analýzy lze nyní porovnat a zhodnotit nárůst a pokles výskytu napjatosti mezi nosníkem definovaným jmenovitými rozměry a obou případů, kdy je tento nosník ovlivněn maximálními hodnotami jednotlivých kladných i záporných rozměrových úchylek průřezu.

Z Tabulka 3 lze konstatovat z rozdílů výsledků napjatosti při zatěžovacím stavu 1, že nemá velký význam se dále zabývat tímto stavem, neboť rozdíl napjatosti vlivem geometrických imperfekcí nabude rozdílu maximálně 1,65 %. Naopak rostoucí vliv lze pozorovat z výsledků zatěžovacího stavu č. 2, kde pokles napjatosti při aplikaci kladných hodnot geometrických odchylek vykazuje nižší hodnoty o 23,8 %. V opačném případě, a to při aplikaci záporných rozměrových odchylek se napjatost zvýší o více než 13 %. Tento podíl vyznačuje kritickou hranici, která může mít za následek fatální kolaps celé navrhované konstrukce. Je nutné uvážit následné sekundární jevy, které se běžně vyskytují v reálném prostředí a tyto konstrukce jsou jimi vystavovány, např. vibrace, počasí, aj.

Na základě Tabulka 3 je možné vytvořit předpoklad pro ověření měření v laboratorních podmínkách na měřicím standu, zdali hodnoty odpovídají reálným skutečnostem.

Tato analýza ukazuje, že rozptyl napjatosti mezi maximální zápornou a maximální kladnou hodnotou geometrickou tolerancí na základě výrobních nepřesností překračuje 30 %. Uvádí se zde značné důsledky, které jsou způsobeny právě případnou nepřesností výroby.

3.4 LABORATORNÍ EXPERIMENT

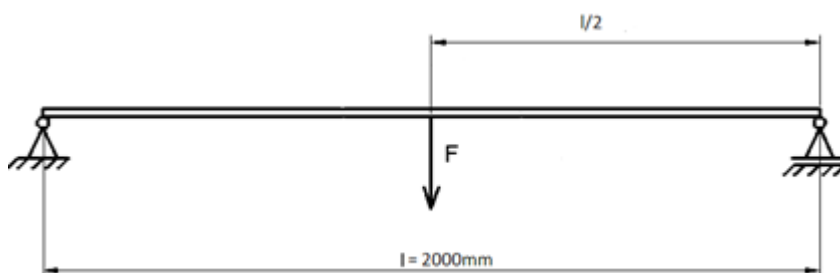
Experimentální ověření virtuálních modelů je zabezpečeno za pomoci měřicího pracoviště, které je ekvivalentem virtuální úlohy prostého nosníku na dvou podporách.

3.4.1 METODIKA MĚŘENÍ ROVINNÉ NAPJATOSTI

Pro úspěšné získání dat z měření je nutno vytvořit nejdříve postup na prvotním experimentu tak, abychom byli schopni eliminovat co nejvíce z přirozeného chování ocelových nosníků. To se týká zejména volby typu tenzometru a jeho instalace, kalibrace měřicího řetězce, provedení prvotního měření a série opakování měření na dvou nosnících stejného průřezu.

3.4.2 VOLBA A INSTALACE TENZOMETRU

Z důvodu neutrality je volena pro dané měření tenzometrické růžice a nikoli tenzometrický kříž. Takto se eliminuje nepřesnost v aplikaci tenzometru na nosník a zároveň lze zjistit reálnou odchylku natočení tenzometru od směrů hlavních napětí. Tenzometrické růžice jsou v dnešní době velmi využívány z důvodu různorodosti zkoumaných prvků. Jedná se o nejuniverzálnější způsob, jak zmapovat dvojnosou napjatost a téměř jakémkoli povrchu. Za předpokladu vícenásobného použití jedno-mřížkových tenzometrů namísto tenzometrických růžic lze snadno zanést několikanásobné chybovosti měření, které se nemusí jen sčítat, ale může mít také kulminační efekt. Toto vše je závislé na zkoumaném prvku.



Obrázek 5: Schéma úlohy měření rovinné napjatosti prostého nosníku na dvou podporách.

Měření rovinné napjatosti je provedeno konkrétně pomocí tenzometrické růžice HBM 1-RY81-3/120 s teplotní samokompensací pro ocel zapojené do čtvrtmostu. Instalace se provádí na důkladně obroušený a odmaštěný povrch nosníku v místě, kde předpokládáme největší napjatost a tím tedy i největší průhyb. Umístění tenzometru odpovídá virtuálnímu modelu nosníku, tj. přesně v polovině jeho délky na stojině mimo podélnou osu nosníku, aby nedošlo k umístění do středu smyku.

Aktivní část, tj. mřížka na fólii, se lepí vhodným lepidlem podléhající deformaci. Je použito lepidlo na bázi epoxidové pryskyřice, která je vhodná pro neporézní povrchy a má dlouhou životnost. V krajních případech, lze toto lepidlo nanášet i stříkáním pro získání tenké vrstvy. Pro vytvrzení lepidla je nutné působení tlaku a tepla. Příklady tenzometru jsou kovové. Tyto tenzometry vykazují nelineární závislost jeho odporu na deformaci.

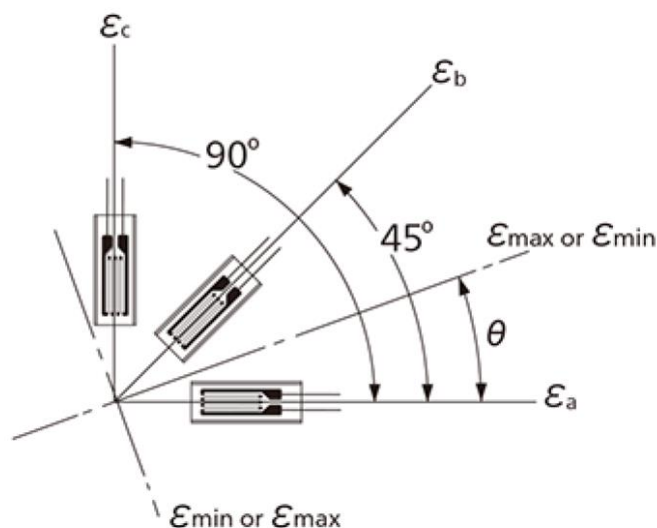
Po dokončení lepení a pájení kontaktů je nutno, aby nedošlo během měření či manipulace s nosníkem k poškození tenzometru, je použit silikon k jeho zakonzervování. Silikonový tmel určený pro tento účel je dostatečně poddajný, aby nebylo ovlivněno měření, ale dostatečně odolný, aby zamezil jakýmkoli vnějším vlivům k poškození tenzometru. Přesnost měření je také ovlivněna tzv. parazitními vlivy (např. teplota, velikost procházejícího proudu, aj.).

Měřicí soustavu je tedy nutno doplnit teplotním kompenzačním členem ke snížení nepřesností měření. Člen je nutno umístit co nejbližší k místu instalace tenzometru.

3.4.3 KALIBRACE MĚŘÍCÍ SOUSTAVY

Kalibrace před zahájením měření je nutno provést k nulovému a ustálenému stavu nosníku. Vstupní předpoklad nosníku je takový, že při kalibraci musí ležet na rovném povrchu, tak aby se neprojevila deformace způsobená jeho vlastní vahou či jeho jiný vnitřní silový účinek a nedošlo tak k jeho prvotní deformaci a tím zkreslení získaných dat.

Následně je konfigurován celý řetězec na nezátženém nosníku a po zadání správných vstupů a výstupů virtuálního prostředí lze odečítat naměřené hodnoty pro každou měřicí tenzometrickou mřížku v různici (popřípadě střední hodnoty). Po implementaci výpočetních formulí lze odečítat hodnoty v megapascálech (MPa).



Obrázek 6: Směry hlavních napětí. [26]

3.4.4 PŘEPOČET HODNOT

Po provedení měření jsou známy průměry středních hodnot ε_a , ε_b , ε_c , vypočítané ze sady hodnot po dobu měřicího cyklu (60 s). Nyní je nutno vypočítat výsledné hlavní napětí $\sigma_{1,2}$. O směrech těchto hlavních napětí lze konstatovat, že svírají úhel 90° a v ideálním případě mohou být souřadný systém nosníku a souřadný systém nalepeného tenzometru totožné. V reálném experimentu však tento stav prakticky nikdy nenastane. Tuto odchylku značí v předešlém schématu úhel θ . Hlavní napětí lze určit dle následujících vztahů vycházejících z Hookova zákona pro naši tenzometrickou různici s mřížkami svírající úhly $0/45/90^\circ$. [26]

$$\sigma_{1,2} = \frac{E}{1-\nu} \cdot \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_c}{2} \pm \frac{E}{\sqrt{2}(1+\nu)} \cdot \sqrt{(\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_c - \varepsilon_b)^2}, \quad (1)$$

$$\tan \theta = \frac{2\varepsilon_b - \varepsilon_a - \varepsilon_c}{\varepsilon_a - \varepsilon_c}, \quad (2)$$

3.4.5 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ

Vstupní hodnoty pro verifikaci jsou výstupní data z MKP modelů A a B zatížené stavem 2 a naměřených hodnot během experimentu. Tyto verifikace je možné také porovnat s analytickým výpočtem nosníku.

3.5 MĚŘENÍ OŘEVŘENÉHO PLNOSTĚNNÉM NOSNÍKU PRŮŘEZU „IPE“

Po vytvoření metodiky nyní lze provést reálné měření k ověření správnosti předpokladů a simulací ve virtuálním prostředí a potvrdit tak celou problematiku vlivů geometrických imperfekcí na únosnost nosníkového prvku skrze napětí, které se může vyskytovat a také vyskytuje v intervalu hodnot závislém právě na jeho rozměrových odchylkách.

Výsledek měření

Aby byly získány co nejpřesnější hodnoty, bude provedeno deset měření na dvou připravených nosnících. Každé měření spočívá v odečtu hodnot na každé jednotlivé tenzometrické mřížce každou 0,5 s po dobu 30 s. Tímto se získá celkem 60 hodnot, které budou ihned přepočítány dle kalibračního procesu (kap. 3.4.3) z milistrainů do jednotek MPa. Tato sada hodnot bude nadále aritmeticky zprůměrována do jedné hodnoty pro každou tenzometrickou mřížku.

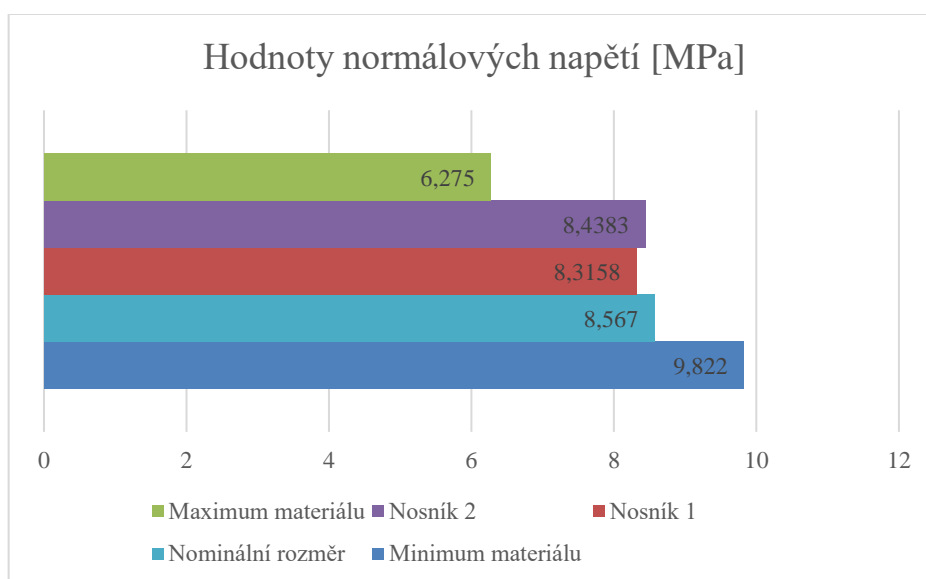
Tabulka 4: Naměřené hodnoty napětí jednotlivých tenzometrických mřížek v ruzici – nosník 1.

	Mřížka - ϵ_a [MPa]	Mřížka - ϵ_b [MPa]	Mřížka - ϵ_c [MPa]	Výsledné normálové napětí [MPa]
Měření 1	7,147	-3,071	-11,909	8,360
Měření 2	7,145	-3,067	-11,953	8,345
Měření 3	7,123	-3,057	-11,971	8,306
Měření 4	7,137	-3,054	-11,974	8,325
Měření 5	7,135	-3,085	-12,000	8,324
Měření 6	7,134	-3,078	-12,021	8,316
Měření 7	7,133	-3,065	-12,035	8,309
Měření 8	7,120	-3,080	-12,051	8,290
Měření 9	7,119	-3,097	-12,051	8,293
Měření 10	7,119	-3,080	-12,046	8,290

Tabulka 5: Naměřené hodnoty napětí jednotlivých tenzometrických mřížek v rúžici – nosník 2.

	Mřížka - ϵ_a [MPa]	Mřížka - ϵ_b [MPa]	Mřížka - ϵ_c [MPa]	Výsledné normálové napětí [MPa]
Měření 1	8,493	7,190	-11,574	8,738
Měření 2	8,380	7,184	-11,632	8,582
Měření 3	8,250	7,180	-11,664	8,408
Měření 4	8,190	7,172	-11,727	8,322
Měření 5	8,153	7,155	-11,803	8,261
Měření 6	8,166	7,163	-11,837	8,271
Měření 7	8,228	7,168	-11,875	8,345
Měření 8	8,265	7,147	-11,909	8,387
Měření 9	8,339	7,145	-11,953	8,476
Měření 10	8,432	7,123	-11,971	8,593

Za pomoci měřených hodnot napětí na jednotlivých mřížkách ϵ_a , ϵ_b a ϵ_c bylo možné dopočítat výsledné normálové napětí, a to poté porovnat s intervalem napjatosti z MKP analýzy na daném uzlu v přesném místě, kde byl aplikován tenzometr na nosník při experimentu. Tento interval je tvořen zatěžovacím stavem č. 2 pro modely A a C. V postprocesoru analýzy jsou zvoleny body, kde je možné odečítat normálové napětí.



Obrázek 7: Porovnání normálových napětí experimentu s hodnotami napětí z MKP analýzy.

Výsledky získané v rámci řešení experimentu měření ukazují na rozměrovou různorodost a s tím i spojenou závislost napjatosti jednotlivých nosníků. Tuto závislost je nutno řešit v případě, kdy je nosník na dvou podporách vystaven výraznějšímu vnějšímu zatížení. Příkladem může být právě MKP analýza Zatěžovacího stavu 1, kdy je zkoumaný prvek vystaven pouze vlastní tíze. Zde se změna a vliv výrobních tolerancí promítne pouze minimálně až zanedbatelně, tj. s rozdílem až 1,65 %. Po vystavení nosníku výraznějšímu vnějšímu zatížení, v tomto případě síle odpovídající 50 kg se dostaví změna únosnosti napjatosti v závislosti na geometrických úchylných rozměrech průřezu s velkým rozdílem.

Výsledkem experimentu měření jsou data, která ukazují, kam se může daný zkoumaný nosník ve skutečnosti rozměrově zařadit. Obecně vzato je brán předpoklad ideálního nosníku, který je popisován jmenovitými rozměry. Může se proto předpokládat na základě obrázku 26, že nosník č. 1 ve skutečnosti odpovídá rozměrově spíše kladným hodnotám geometrických průřezových tolerancí. Hodnota napětí je o 3 % nižší než hodnota normálové napětí odpovídající nosníku definovanému jmenovitým rozměrem jeho průřezu a o více než 15 % nižší než hodnota maximálního normálového napětí, které se může vyskytovat v rámci daného zatěžovacího stavu (vůči nosníku, jehož průřez je definován svými maximálními zápornými hodnotami tolerancí rozměru).

Při podrobení druhého nosníku experimentu lze vyvodit, že odpovídá svojí průřezovou charakteristikou případu, kdy je téměř totožný s nosníkem, který je definován nominálními rozměry. V porovnání s modelem nosníku o jmenovitých rozměrech, nosník 2 vykazuje snížení normálového napětí pouze o 1,5 %. V případě rozdílu, kdy je na nosníku nejmenší přípustné množství materiálu je pokles napětí 14 %.

Postupně jsou zde zkoumány dva nosníky stejného typu v laboratorních podmínkách. Bylo by dále vhodné tímto způsobem zmapovat chování napříč všemi používanými typy nosníků a zjistit tak závislost napjatosti na změně průřezové charakteristiky v rámci geometrických tolerancí, aby bylo možné lépe pracovat s možnými a reálnými vlivy zejména záporných hodnot geometrických tolerancí.

3.6 ANALÝZA MKP DALŠÍCH NOSNÍKŮ O PRŮŘEZU IPE A I

Analýza jednotlivých nosníků spočívá ve výpočtovém modelu. V předešlých krocích byl virtuální model podroben celkem dvěma zátěžovými stavům. Na základě sumarizace v podkapitole 3.4.5 výsledků, kde bylo rozhodnuto, že zatěžovacím stavem, který spočívá v účinku samostatné vlastní tíhy, se není vhodné dále zabývat. Výsledek simulace ukazoval největší odchylku v napětí 1,65 %, tato hodnota je velmi malá až zanedbatelná.

3.6.1 NOSNÍKY O PRŮŘEZU IPE

Výpočtový model vychází z celkem tří přiřazených modelů, kde dva z nich popisují okrajové hodnoty napjatosti. Jedná se o modely A a C. Výsledky simulací založených na těchto geometrických modelech budou dále srovnány se zatěžovacím stavem aplikovaným na modelu B. Takto bude dosaženo výsledných hodnot, které tvoří rozptyl velikostí napětí. O tomto rozptylu napětí lze konstatovat, že se může vyskytnout v reálném scénáři, například při opětovném podrobení nosníku laboratornímu měření. Jelikož byl stejným způsobem verifikován nosník IPE 80.

Tyto dosažené hodnoty lze doplnit o hodnoty napětí z tabulky 3 odpovídající Zatěžovacímu stavu 2 pro nosník IPE 80 pro porovnání a vyhodnocení nárůstu či poklesu napjatosti napříč nosníky o různém průřezu.

Tabulka 6: Rozdíl napětí přítomných na zkoumaných nosnících IPE 80, IPE 100 a IPE 120

<i>Typ nosníku</i>	Model A	Model B	Model C	Procentuální rozdíl
<i>IPE 80</i>	10,734 MPa	14,087 MPa		-23,80 %
<i>IPE 80</i>		14,087 MPa	16,01 MPa	+13,65 %
<i>IPE 100</i>	6,798 MPa	8,544 MPa		-20,43 %
<i>IPE 100</i>		8,544 MPa	9,540 MPa	+11,66 %
<i>IPE 120</i>	4,679 MPa	5,723 MPa		-18,24 %
<i>IPE 120</i>		5,723 MPa	6,296 MPa	+10,01 %

3.6.2 NOSNÍKY O PRŮŘEZU I

Nosníky s průřezem tvaru „I“ jsou z historického hlediska déle používanější v konstrukcích než prvky typu IPE. Jedná se o velmi podobný konstrukční prvek jako profil o průřezu IPE. Shodné vlastnosti v rámci volného trhu s hutním materiálem spočívají ve volbě materiálu, tj. S235JR (minimální mez kluzu 235 MPa) a technologie výroby spočívá ve válcování tyče za tepla dle EN 10365. Další společné vlastnosti profilů I a IPE je totožnost středu smyku s osou symetrie. Z hlediska zatěžování bude nosník vystaven stejné kolmé síle k podélné ose prutu jako v první modelové úloze v kapitole 0, tj. svislá osamocená síla procházející středem smyku prutu. Za tohoto předpokladu bude nosník namáhán pouze na ohyb a nikoli na krut. Rozdíl průřezu mezi profilem I a IPE náleží zejména v tvaru pásnic. Tvar pásnice profilu IPE je v průřezu obdélníkového tvaru, mezi stojinou a pásnicí je přítomen úhel 90° a vnitřní rádius, lišící se dle velikosti profilu. Pásnice profilu o průřezu „I“ tkví v tupém úhlu, jež svírá stojina s vnitřní stranou pásnice. Tento úhel činí dle EN 10025-2 104°. Vnitřní strana pásnice je opatřena po vnější hraně druhým zaoblením, které se taktéž jako vnitřní rádius mezi pásnicí a stojinou různí dle velikosti profilu.

Za výše zmíněných předpokladů budou prozkoumány za pomoci virtuálních modelů a simulací nosníky o délce 2 m ve stejné úloze prostého prutu na dvou podporách. Aby bylo možné porovnat chování dvou stejných velikostí nosníků, ale s odlišným průřezem, je nutno nejprve vytvořit jejich virtuální podobu skrze geometrické modely.

Ačkoli se jedná velikostně o velmi podobné prvky vůči nosníkům o průřezu IPE, lze pozorovat jejich hlavní rozdílnost napříč všemi vzniklými virtuálními modely. Tímto rozdílem je například plocha průřezu nosníku, ke které je možné vztáhnout jednotlivé rozdíly napjatosti a dále pozorovat změny jak mezi jednotlivými typy nosníků, tak mezi velikostmi dle průřezu.

Nejprve je nutno vypracovat analýzu chování napjatosti na nosnících o průřezu „I“. Tento proces bude vypracován identicky jako v předchozí kapitole. Každý jednotlivý výpočtový model vychází z celkem tří přiřazených geometrických modelů, kde modely A a C popisují limitní velikosti vyskytujících se napětí pro přítomnost nemensiho i největšiho množství materiálu na nosníku. Třetí model B slouží jako virtuální náhrada ideálně vyrobeného nosníku, se kterým bude limitní hranice napjatosti srovnána a posouzena jako pokles či nárůst napjatosti.

Na základě výsledných normálových napětí je možné nyní interpretovat pokles či nárůst napětí v závislosti na použitém nosníku. Určení procentuální změny je vždy vztažen k ideálnímu nosníku o jmenovitých rozměrech.

Tabulka 7: Rozdíl napětí přítomných na zkoumaných nosnících I 80, I 100 a I 120

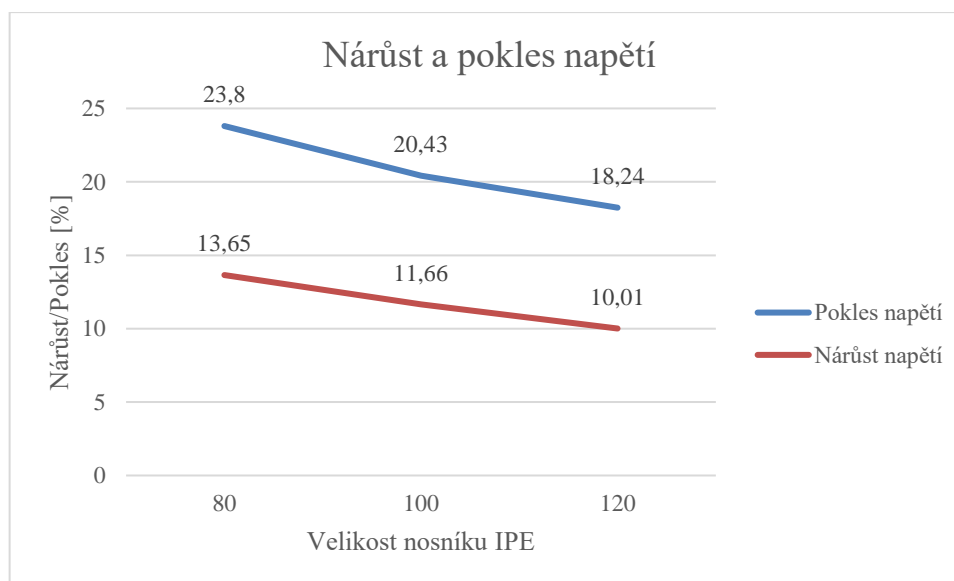
<i>Typ nosníku</i>	Model A	Model B	Model C	Procentuální rozdíl
<i>I 80</i>	12,020 MPa	14,727 MPa		-18,38 %
<i>I 80</i>		14,727 MPa	16,989 MPa	+15,36 %
<i>I 100</i>	7,323 MPa	8,743 MPa		-16,24 %
<i>I 100</i>		8,743 MPa	9,887 MPa	+13,09 %
<i>I 120</i>	5,186 MPa	5,960 MPa		-13,00 %
<i>I 120</i>		5,960 MPa	6,577 MPa	+10,35 %

4 HLAVNÍ VÝSLEDKY PRÁCE

Mezi hlavní výsledky byla zařazena verifikace vzorové úlohy, kdy ze dvou zatěžovacích stavů byl eliminován případ, kde nosník byl ze silových účinků pouze pod vlivem vlastní tíhy. Tento stav vykazoval při uvážení geometrický imperfekcí pouze minimální až zanedbatelné změny chování napjatosti. Z tohoto důvodu nebyl tento stav dále používán.

Pro druhý zatěžovací stav se podařilo ověřit správnost průběhu napjatosti na reálném zkoumaném prvku za použití měřicího laboratorního standu. Při sumarizaci těchto výsledků byla možná identifikace míry odlišnosti nosníku. Zdali zkoumaný nosník patří spíše do záporných hodnot tolerančního pole pro rozměrové hodnoty průřezu, nebo do kladných.

Za předpokladu ověření správnosti metodiky vyšetřování chování napjatosti nosníků bylo možné přejít k dalšímu kroku, a to zmapování napjatosti přítomné na nosnících o stejné konstituci, ale větší velikosti. Zjištěna jsou výsledná normálová napětí z výpočtových simulací založených na tří různých geometrických modelech pro dva další typy nosníku, a to IPE 100 a 120. Tato napětí jsou způsobena stejnou zátěžovou silou (ekvivalent zatížení břemenem o hmotnosti 50 kg) kolmou k podélné ose nosníku s uvážením vlastní tíhy nosníku. Nyní je možné porovnat jednotlivé nárůsty a poklesy napětí, které se mohou v rámci výrobních geometrických tolerancí vyskytnout v daném nosníku typu IPE 80, IPE 100 nebo IPE 120.

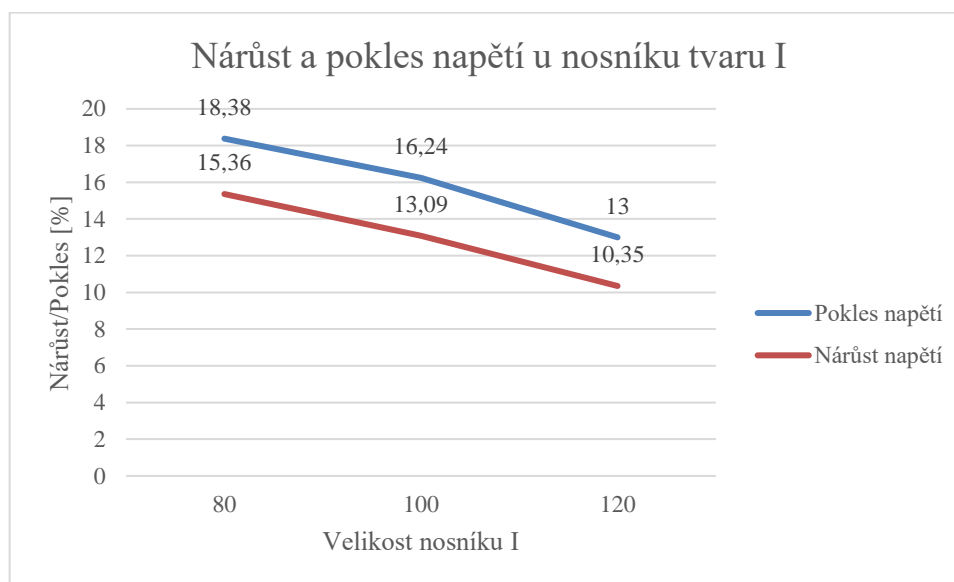


Obrázek 8: Graf nárůstu a poklesu maximálních napětí pro profily o průřezu IPE.

Procentuální rozdíly z MKP analýz založených na dvou sadách modelů nosníků jsou vyznačeny do dvou křivek. První křivka vyznačuje pokles napětí pro rozdíl napětí mezi nosníkem definovaným jmenovitými rozměry s kladnými hodnotami tolerančního pole mezních úchylek rozměrů a nosníkem, který je definován pouze svými nominálními hodnotami rozměrů. Za předpokladu použití stejného zatěžovacího stavu je zřejmé z Tabulka 6, že maximální hodnota přítomného napětí se snižuje s rostoucí plochou průřezu nosníku, tj. výběrem nosníku o větším průřezu. Tento pokles napětí je vyznačen červenou křivkou, odpovídající srovnání jmenovitého nosníku s nosníkem zahrnující maximální záporné hodnoty tolerančního pole mezních úchylek rozměrů průřezu. Tento pokles napětí je téměř lineární a dochází ke zmenšování celkového rozptylu napjatosti na zkoumaném nosníku s postupným zvětšováním průřezu nosníku. Tento

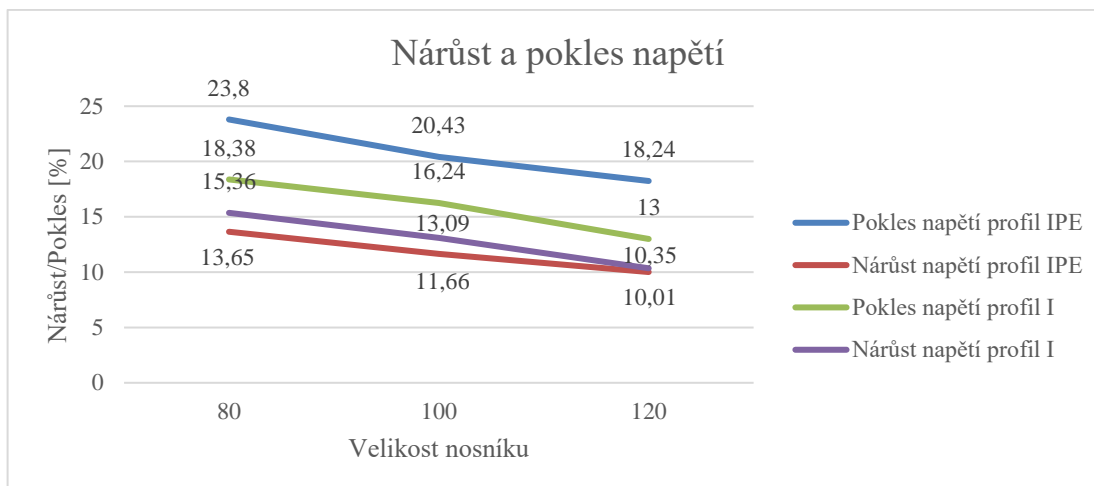
postup lze aplikovat prakticky na celou dostupnou škálu velikostí profilu na trhu. Existuje ale možnost, že vnější zatížení 50 kg, které je součástí užitého zatěžovacího bude více nepodstatné, a naopak vliv vlastní tíhy bude narůstat.

Níže je možné zjistit závislost výskytu napjatosti na nosnících o průřezu I. Výsledek simulací ukázal změnu chování oproti předchozím zkoumaným prvkům s průřezem IPE. Je možné znázornit závislost chování rozptylu napjatostí oproti stavu, kdy je zachován ideální tvar průřezu, tj. při jeho dokonalé výrobě. Ke znázornění pomůže následující graf.



Obrázek 9: Graf nárůstu a poklesu maximálních napětí pro profily o průřezu I.

Z grafu lze interpretovat postupné zmenšování celkového rozptylu napjatosti se zvětšujícím se průřezem definující nosník tak jako v předešlém případě pro profily průřezu IPE.



Obrázek 10: Souhrnný graf nárůstu a poklesu maximálních napětí pro profily o průřezu I a IPE.

Celkové porovnání chování napjatosti napříč třemi velikostmi profilů o dvou různých průřezových charakteristikách vykazuje téměř lineární závislost průběhu, viz. Obrázek 9. Celkový rozptyl napjatosti pro profily IPE je větší než pro profily o tvaru průřezu I. Pokles napětí u obou druhů profilů tvoří relativní rezervu ve spojení s konceptem navrhování konstrukcí. Dle křivky poklesu napětí pro tyče IPE tvoří tato rezerva pro výskyt napjatosti až necelých 24 %. Dle noremních předpisů jako Eurokód 3 [2] aj. je nutné dimenzovat navrhovaný prvek na 150 % zatížení. Z hlediska výskytu vyšších napětí na jednotlivých prvcích zapříčiněných jejich nepřesnou výrobou, mohou tyto hodnoty narůst až o více než 15 %. Tato hodnota se jeví jako relativně malá, ačkoli ve spojení se špatným nebo nepřesným předpokladem či zanesením ostatních vnějších vlivů a zatížení, může dojít ke kolapsu celé navrhované soustavy.

5 ZÁVĚR

Tato disertační práce je zaměřena na zjištění vlivů výrobních geometrických tolerancí na otevřený plnostěnný nosník. Postupně jsou v této práci rozebrány jednotlivé aspekty spjaté s touto problematikou. Následuje uvedení problematiky, ze které myšlenka této práce vzniká, a to na základě dynamických simulací lesních vyvážecích strojů, kde se tato problematika vyskytuje hned ve dvou případech. Prvním případem je hmotnostní úbytek materiálu, který způsobí nižší nárok na pohonný agregát. Druhá příčina je výskyt sekundárních vlivů na únosnost konstrukce. Například přítomnost vibrací v konstrukci v nechtěné či neuvážené míře má za následek fatální selhání celého strojního zařízení. Na tomto základu je dále uvedena průprava problematikou tvarových imperfekcí a stabilitou nosníku. Jako vhodná metoda pro řešení napjatosti nosníku, ke které je úmyslně vázán vliv výrobních rozměrových tolerancí, je zde uvedena metoda konečných prvků včetně náhledu na poměr náročnosti výpočtu ve srovnání s detailem modelu. Dále je zmíněná průprava použití tenzometrie jakožto experimentálního nástroje pro vyšetřování chování konstrukcí obecně.

Hlavním cílem této práce bylo zjistit, jak se chová nosník, který ve skutečnosti není definován jen svými jmenovitými rozměry, ale zahrnuje i geometrické tolerance průřezu. Prvním krokem byl vybrán zkoumaný profil nosníku, který je možné popsat virtuálním modelem, ale i laboratorně změřit v laboratorních podmínkách. S tímto předpokladem je vybrán profil nosník průřezu IPE 80. Šestá kapitola se podrobně zabývá volbou virtuálního modelu, okrajových podmínek, přímou generací síťovaného modelu a zatěžovacími stavby. Závěrem je provedena MKP analýza dvou tří definovanými maximálními kladnými a maximálními zápornými hodnotami geometrických tolerancí průřezu. Tato analýza je doprovázena analýzou založenou na nosníku definovaným svými nominálními hodnotami rozměrů průřezu.

V rámci výsledků MKP analýzy byl definován rozptyl napjatosti nosníku vlivem geometrických tolerancí. Tyto data ukazují, že rozdíl mezi jednotlivými simulovanými modely, které se zakládají na maximech hodnot geometrických tolerancí průřezu, dosahuje celkově až 30 %. Tento rozdíl zahrnuje mj. pozitivní vlivy, kdy nosník, který je tvořen větším zastoupením materiálu v rámci kladných hodnot rozměrových tolerancí z výroby, vykazuje o více než 23 % menší hodnotu napětí, než je tomu u nosníku definovaným svými jmenovitými rozměry. V opačném případě nosník s maximálními zápornými hodnotami, a tedy s maximálním úbytkem materiálu, vykazuje téměř o 14 % vyšší hodnotu napětí. Tento údaj je kritický z hlediska celkové únosnosti profilu v praktickém využití.

Aby se potvrdila správnost virtuálních simulací, bylo nutno postavit laboratorní stand, který dovolil pojmout reálně změřitelný nosník a také jej ekvivalentně zatížit, aby bylo možné získat data k porovnání. Za pomoci grantů Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy byl tento stand navržen, vyroben, sestaven a zprovozněn. Výhodou měřicího stanoviště byla možnost ekvivalentní náhrady zavazbení, aby simulovala chování rotační a rotačně posuvné vazby spočívající ve dvou nezávislých ramenech umožňující pohyb nosníku při jeho ohýbání v podélné ose a nedošlo tak k „vyrobení“ sekundárních a terciálních účinků, které by zkreslovaly výsledky. Po vytvoření celkové metodiky měření, instalace tenzometru, kalibrace měřicí soustavy, provedení měření a přepočtu hodnot lze provést celkem 10 měření pro oba skutečné nosníky a porovnat tak s výsledky simulace za pomoci MKP.

V rámci metodiky laboratorního měření byly pro výsledné porovnání naměřených hodnot a hodnot z MKP analýzy odečítány hodnoty odpovídající umístění odporového tenzometru na stojině profilu IPE. Po porovnání hodnot bylo možné potvrdit správnost hodnot na výstupu

virtuální simulace, ale i určit u obou nosníků na základě naměřeného napětí v jaké oblasti geometrických tolerancí se pohybují.

Následně byla problematika rozšířena o výzkum chování jiných velikostí nosníku IPE a dále je tento soubor srovnán se sadou profilů podobného, ačkoli dostatečně odlišného průřezu I. Výsledkem tohoto srovnání byl určen celkový procentuální rozptyl napjatosti, který se v rámci výrobních nepřesností může reálně vyskytovat na navrhovaných prvcích konstrukce.

Po celkovém shrnutí lze usoudit, že tyto tolerance mají výrazný vliv na celkový výskyt napjatosti v nosníku a tím i na celou jeho únosnost. Výsledky této disertační práce jsou využitelné v oboru ocelových strojních konstrukcích stavebních a manipulačních zařízení. Jsou také základem k dalším teoretickým úvahám, kam až sahají důsledky nejen rozměrových nedokonalostí. Další výzkum spočívá v aplikaci na vědecký projekt lesní vyvážky. Jiné možnosti jsou rozšířit tento pohled na problematiku mezi ostatní otevřené plnostěnné nosníky, ale i uzavřené plnostěnné nosníky. Tyto možnosti jsou vázány jak nároky na detailní výpočet, ale také na různorodost pohledu, například pozorování deformace. Zahrnutí kroutícího momentu do vnějšího zatížení na zkoumaný nosník, aj. Tato problematika se dále stává více komplexní.

6 LITERATURA

- [1] *Biographical Memoirs of Fellows of the Royal Society*. 12. 1997. ISSN 0080-4606. Dostupné také z: <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rsbm.1966.0008>
- [2] ČSN EN 1993-1-1 ed. 2 (731401): Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby. Ed. 2. Praha: Český normalizační institut, 2011.
- [3] DE DOMENICO, D., G. FALSONE a D. SETTINERI. Probabilistic buckling analysis of beam-column elements with geometric imperfections and various boundary conditions. *Meccanica*. 2018, 53(4-5), 1001-1013. DOI: 10.1007/s11012-017-0763-5. ISSN 0025-6455. Dostupné také z: <http://link.springer.com/10.1007/s11012-017-0763-5>
- [4] DUBINA, Dan, Ioan MARGINEAN a Florea DINU. Impact modelling for progressive collapse assessment of selective rack systems. *Thin-Walled Structures*. 2019, 143. DOI: 10.1016/j.tws.2019.106201. ISSN 02638231. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263823118316021>
- [5] DYER, Stephen A. *Wiley Survey of Instrumentation and Measurement*. Kansas: John Wiley, 2001. ISBN 0-471-39484-x.
- [6] EN 1993-1-1:2005: Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby. 1. Brusel: EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2005.
- [7] Findley W. A theory for the effect of mean stress on fatigue of metals under combined torsion and axial load or bending. *J. Eng. Ind.* 1959;81:301–306. doi: 10.1115/1.4008327.
- [8] FINDLEY, William N. a Gautam KHOSLA. Application of the Superposition Principle and Theories of Mechanical Equation of State, Strain, and Time Hardening to Creep of Plastics under Changing Loads. *Journal of Applied Physics*. 1955, 26(7), 821-832. DOI: 10.1063/1.1722102. ISSN 0021-8979. Dostupné také z: <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.1722102>
- [9] GOUGH, H. J. a H. V. POLLARD. The Strength of Metals under Combined Alternating Stresses. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*. 2006, 131(1), 3-103. DOI: 10.1243/PIME_PROC_1935_131_008_02. ISSN 0020-3483. Dostupné také z: http://journals.sagepub.com/doi/10.1243/PIME_PROC_1935_131_008_02
- [10] HLOUŠEK, D.; JONÁK, M. Using a Dynamic Simulation to Determine the Power Requirement for the Tracked Vehicle Movement. In *Transport Means 2018 Proceedings*. *Transport Means*. 1. Kaunas University of Technology, Kaunas, LITHUANIA: Kaunas University of Technology, Kaunas, LITHUANIA, 2018. p. 1024-1026. ISSN: 1822-296X.
- [11] IKEDA, K., K. MUROTA a I. ELISHAKOFF. Reliability of structures subject to normally distributed initial imperfections. *Computational Mechanics*. 1996, 59(3), 463-469. DOI: 10.1016/0045-7949(95)00273-1. ISSN 00457949. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0045794995002731>

- [12] KAŠPÁREK, J.; POKORNÝ, P. Analysis of the dynamics of a virtual prototype wheeled transport machine. In *Proceeding of International Conference Transport Means 2014. Transport Means*. Kaunas Univ Technol, Kaunas, LITHUANIA: KAUNAS UNIV TECHNOLOGY PRESS, K DONELAICIO 73, KAUNAS LT 3006, LITHUANIA, 2014. s. 99-102. ISBN: 9955-09-935-6. ISSN: 1822-296X.
- [13] KUCUKLER, Merih. Lateral instability of steel beams in fire: Behaviour, numerical modelling and design. *Journal of Constructional Steel Research*. 2020, 170. DOI: 10.1016/j.jcsr.2020.106095. ISSN 0143974X. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0143974X19308740>
- [14] LAI, Zhichao, Robert J. CONNOR, Amit H. VARMA a Duncan PATERSON. Retrofit of Steel Columns: Parametric Studies and Design. *Journal of Bridge Engineering*. 2016, 21(11). DOI: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000950. ISSN 1084-0702. Dostupné také z: [http://ascelibrary.org/doi/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0000950](http://ascelibrary.org/doi/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000950)
- [15] LIU, Yi a Liam GANNON. Experimental behavior and strength of steel beams strengthened while under load. *Journal of Constructional Steel Research*. 2009, 65(6), 1346-1354. DOI: 10.1016/j.jcsr.2009.01.008. ISSN 0143974X. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0143974X09000224>
- [16] MARINCA, Vasile a Nicolae HERISANU. Vibration of Nonlinear Nonlocal Elastic Column with Initial Imperfection. *Acoustics and Vibration of Mechanical Structures—AVMS-2017*. Cham: Springer International Publishing, 2018, 2018-12-21, , 49-56. Springer Proceedings in Physics. DOI: 10.1007/978-3-319-69823-6_6. ISBN 978-3-319-69822-9. Dostupné také z: http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-69823-6_6
- [17] NIEDERWANGER, A., M. LADINEK a G. LENER. Strain-life fatigue assessment of scanned weld geometries considering notch effects. *Engineering Structures*. 2019, 201. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109774. ISSN 01410296. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0141029619330317>
- [18] ODROBIŇÁK, Jaroslav, Matúš FARBÁK, Jakub CHROMČÁK, Ján KORTIŠ a Jozef GOCÁL. Real Geometrical Imperfection of Bow-String Arches—Measurement and Global Analysis. *Applied Sciences*. 2020, 10(13). DOI: 10.3390/app10134530. ISSN 2076-3417. Dostupné také z: <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/13/4530>
- [19] POULIN, C.M., T.J. BARRETT a M. KNEZEVIC. Inferring Post-Necking Strain Hardening Behavior of Sheets by a Combination of Continuous Bending Under Tension Testing and Finite Element Modeling. *Experimental Mechanics*. 2020, 60(4), 459-473. DOI: 10.1007/s11340-019-00577-1. ISSN 0014-4851. Dostupné také z: <http://link.springer.com/10.1007/s11340-019-00577-1>
- [20] QIN, Yong, Quanchao NA, Fang LIU, Haibin WU a Kun SUN. Strain gauges position based on machine vision positioning. *Integrated Ferroelectrics*. 2019, 200(1), 191-198. DOI: 10.1080/10584587.2019.1592066. ISSN 1058-4587. Dostupné také z: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10584587.2019.1592066>
- [21] *Samuel Hunter Christie* [online]. The Royal Society, 2020 [cit. 2020-07-29]. Dostupné z: https://makingscience.royalsociety.org/s/rs/people/viaf_3254784

- [22] SHI, Gang, Ziqian ZHANG, Le ZHOU, Lu YANG a Wenjing ZHOU. Experimental and numerical investigation on Local–Overall interactive buckling behavior of welded I-Section steel columns. *Thin-Walled Structures*. 2020, 151. DOI: 10.1016/j.tws.2020.106763. ISSN 02638231. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263823119315435>
- [23] SCHILLINGER, Dominik, Vissarion PAPADOPOULOS, Manfred BISCHOFF a Manolis PAPADRAKAKIS. Buckling analysis of imperfect I-section beam-columns with stochastic shell finite elements. *Computational Mechanics*. 2010, 46(3), 495-510. DOI: 10.1007/s00466-010-0488-y. ISSN 0178-7675. Dostupné také z: <http://link.springer.com/10.1007/s00466-010-0488-y>
- [24] Sir Charles Wheatstone. In: *Encyclopædia Britannica* [online]. Encyclopædia Britannica, 2020 [cit. 2020-03-19]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/biography/Charles-Wheatstone>
- [25] Stability of composite shell–type structures. *Stability and Vibrations of Thin Walled Composite Structures*. Elsevier, 2017, 2017, , 253-428. DOI: 10.1016/B978-0-08-100410-4.00007-7. ISBN 9780081004104. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780081004104000077>
- [26] *Strain Gauges: First choice for strain measurements*. Darmstadt, 2019. Dostupné také z: <https://www.hbm.com/fileadmin/mediapool/hbmdoc/technical/S01265.pdf>
- [27] SUN, Yao, Yating LIANG a Ou ZHAO. Testing, numerical modelling and design of S690 high strength steel welded I-section stub columns. *Journal of Constructional Steel Research*. 2019, 159, 521-533. DOI: 10.1016/j.jcsr.2019.05.014. ISSN 0143974X. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0143974X19303347>
- [28] VLK, Miloš, Lubomír HOUFEK, Pavel HLAVOŇ, Petr KREJČÍ, Vladimír KOTEK a Jiří KLEMENT. *Experimentální mechanika*. Studijní opory. Brno, 2003.
- [29] ZEINODDINI, V.M. a B.W. SCHAFER. Simulation of geometric imperfections in cold-formed steel members using spectral representation approach. *Thin-Walled Structures*. 2012, 60, 105-117. DOI: 10.1016/j.tws.2012.07.001. ISSN 02638231. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263823112001863>
- [30] ZHANG, Qingqing a Jian ZHANG. Internal force monitoring and estimation of a long-span ring beam using long-gauge strain sensing. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. DOI: 10.1111/mice.12569. ISSN 1093-9687. Dostupné také z: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/mice.12569>

7 AUTOROVO CV

Jméno, příjmení, titul:	David Hloušek, Ing.
Datum a místo narození:	26. srpna 1992, Zábřeh na Moravě
Státní příslušnost:	Česká republika
Vzdělání:	
01/09/2017 – do současnosti	Doktorské studium – Konstrukční a procesní inženýrství FSI, VUT v Brně, Brno <i>Vlivy výrobních tolerancí profilů nosníků na nosné konstrukce</i>
15/5/2018 – 28/01/2019	Specializační studium technického znalectví pro pracovníky znaleckých ústavů na VUT v Brně, ÚSI, VUT v Brně, Brno
01/09/2015 – 31/08/2017	Magisterské studium – Odbor transportních a stavebních strojů ÚADI, FSI, VUT v Brně, Brno
13/07/2011 – 31/08/2015	Bakalářské studium – Strojní inženýrství FSI, VUT v Brně, Brno

Pracovní zkušenosti:

2019 – do současnosti	AB Rent CZ, s.r.o. – Product Manager <i>Zajištění odborné a obchodní komunikace v rámci aktivního kontaktu s evropskými a asijskými výrobci stavebních strojů s ohledem na výměnu technický dat v rámci vývoje nové generace strojů.</i>
2012 – 2015	Elektro-montáž, Ing. Lubomír Hloušek <i>Výroba rozvaděčů, elektroinstalace, vzduchotechnika, spolupráce na technologických centrech, dílčí technologie na čerpání tekutých médií.</i>

Výuka:

- Vedení cvičení z předmětů: Nosné konstrukce strojů 1 (QN1), Experimentální metody (QEM), Dopravní a manipulační zařízení (EDO), Transportní zařízení (QTZ), Technologie a bezpečnost práce se zemními stroji (QBS), Stroje pro výrobu stavebních materiálů (NSM), Počítačové modelování strojních konstrukcí (QMK), Bakalářský projekt (FDS), Seminář k bakalářské práci (FES).
- Vedení bakalářských prací

Projekty:

- 2018 – Fond vědy FV 18-07 – Laboratorní pracoviště měření rovinné napjatosti otevřeného plnostěnného nosníku.
- 2019 – Fond vědy FV 19-01 – Variabilní laboratorní stand pro tenzometrické měření napjatosti.
- 2020 – Fond vědy FV 20-09 – Metodika měření tříosé napjatosti plnostěnných nosníků.