

Západočeská univerzita v Plzni

Fakulta aplikovaných věd

Katedra mechaniky

Stavební inženýrství - Moderní budovy

Navrhování a provádění staveb

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Halové vestavky a jejich statická analýza s použitím kompozitních materiálů jako náhrada za ocelové konstrukce

Zpracovatel: Bc. Lukáš OSIFČIN

Vedoucí práce: Ing. Petr KESL, Ph.D.

Rok: 2024

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta aplikovaných věd
Akademický rok: 2023/2024

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Lukáš OSIFČIN**
Osobní číslo: **A22N0153P**
Studijní program: **N0732P260002 Stavební inženýrství – Moderní budovy**
Specializace: **Navrhování a provádění budov**
Téma práce: **Halové vestavky a jejich statická analýza s použitím kompozitních materiálů jako náhrada za ocelové konstrukce**
Zadávající katedra: **Katedra mechaniky**

Zásady pro vypracování

Úvodní část s popisem řešeného konstrukčního prvku s použitím vybraných materiálů a konstrukčních řešení.

1. Vypracujte textové části dle zadání práce s obecným popisem a rozбором ocelových a kompozitních konstrukcí, a to po stránce návrhové tak po stránce konstrukční, se statickým schématem zatížení, řešením vnitřních sil s následným určením jejich použití v konstrukčních systémech pro analýzu konstrukce.
2. Zpracujte a připravte modely pro experimentální porovnání vzorků ocelových a kompozitních prvků na testování materiálových charakteristik s únosností řešeného materiálu dle vzorků.
3. Zpracujte a vyhodnoťte testovací vzorky jak pro ocelovou tak pro kompozitní konstrukci vestavku dle únosnosti, jejich vhodnosti či nevhodnosti s určením pevnosti daného materiálu pro používání v konstrukčních systémech.

Rozsah diplomové práce: **úvodní část – 50 – 60 stran A4**
Rozsah grafických prací: **práce skládající se ze schémat a textových částí a s exp. částí**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam doporučené literatury:

1. ČSN EN 1990 – Zásady navrhování stavebních konstrukcí
2. ČSN EN 1991 – Zatížení stavebních konstrukcí
3. ČSN EN 1993 – Navrhování ocelových konstrukcí
4. Navrhování kompozitních konstrukcí. ČKAIT 2009
5. Frick / Knoll – Stavební konstrukce I. a II. JAGA 2005

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Kesi, Ph.D.**
Katedra mechaniky

Datum zadání diplomové práce: **11. října 2023**
Termín odevzdání diplomové práce: **31. května 2024**

Doc. Ing. Miloš Železný, Ph.D.
děkan



Prof. Ing. Jan Vimmr, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 11. října 2023

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na dané téma vypracoval samostatně pod odborným dohledem vedoucího práce, a že jsem použil uvedenou literaturu a požadované softwary.

V Plzni dne 31. 5. 2024

.....

Bc. Lukáš OSIFČIN

Poděkování

Chtěl bych tímto poděkovat panu Ing. Petru KESLOVI, PhD. za správné a odborné vedení mé diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Janu KRYSTKOVI, PhD. za odborné rady a pomoc při provádění laboratorních pokusů. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat své rodině, blízkým a přátelům za jejich plnohodnotnou podporu během studia.

Anotace

Tématem diplomové práce jsou materiály z ocele a kompozitu. Část teoretická se zaměřuje na statická posouzení a výpočty. Část praktická se zaměřuje na posouzení vybraných ocelových a kompozitních prvků na ohyb. Součástí této části je návrh konstrukce halového vestavku jak z ocele, tak kompozitu.

Diplomová práce respektuje platné normy, vyhlášky a eurokódy.

Pro vypracování byly použity programy FIN EC, TestXpert II, RONN, BendiT a Microsoft Office.

Klíčová slova

ocel, kompozit, vzorec, halový vestavek, namáhání, model

Annotation

The topic of the master thesis is steel and composite materials. The theoretical part focuses on static design and calculations. The practical part focuses on the bending design of selected steel and composite elements. This part includes the design of a hall structure made of both steel and composite.

The thesis respects the applicable standards, decrees and Eurocodes.

The programs FIN EC, TestXpert II, RONN, BendiT and Microsoft Office were used for the preparation.

Keywords

steel, composite, formula, indoor building, stress, model

Obsah

Čestné prohlášení.....	- 4 -
Poděkování.....	- 5 -
Anotace	- 6 -
Klíčová slova	- 6 -
Annotation.....	- 7 -
Keywords	- 7 -
Úvod	- 10 -
A. 1 Teoretická část	- 11 -
Halová vestavba, vestavek	- 11 -
Vestavek a jeho dělení	- 11 -
Stěny ze sendvičových panelů.....	- 14 -
Technologické řešení.....	- 15 -
Ocel a namáhání.....	- 17 -
Navrhování ocelových konstrukcí	- 17 -
Druhy namáhání.....	- 17 -
Namáhání na tah	- 18 -
Namáhání na tlak	- 19 -
Namáhání na ohyb	- 22 -
Namáhání na smyk	- 25 -
Kombinované namáhání ohyb a tah	- 26 -
Kombinované namáhání ohyb a tlak.....	- 27 -
Kombinované namáhání ohyb a smyk	- 29 -
Kompozit a namáhání.....	- 30 -
Navrhování konstrukcí z kompozitu	- 30 -
Namáhání a porušení	- 31 -
Porušení tahovým namáháním	- 31 -
<i>Podélné tahové namáhání.....</i>	- 32 -
<i>Příčné tahové namáhání.....</i>	- 32 -
Porušení tlakovým namáháním.....	- 33 -
<i>Podélné tlakové namáhání</i>	- 33 -
<i>Příčné tlakové namáhání</i>	- 34 -
Porušení smykovým namáháním	- 34 -
A. 2 Praktická část	- 36 -

Příprava zkoušených vzorků	- 36 -
Pomůcky při laboratorních zkouškách	- 38 -
Popis laboratorního experimentu	- 39 -
Výsledky naměřených hodnot.....	- 40 -
Kompozit - ohyb (čtvercový profil).....	- 40 -
Kompozit - ohyb (obdélníkový profil).....	- 43 -
Kompozit - ohyb (L profil).....	- 45 -
Kompozit - ohyb (čtvercový profil).....	- 49 -
Ocel - ohyb (čtvercový profil).....	- 51 -
Kompozit - ohyb (čtvercový profil).....	- 53 -
Referenční model	- 54 -
Závěr	- 55 -
Seznam literatury	- 56 -
Seznam obrázků	- 58 -
Seznam tabulek	- 59 -
A. 3 Přílohová část.....	- 60 -

Úvod

Tématem diplomové práce je najít rozdíly mezi dvěma stavebními materiály. Jedná se o ocel a o kompozit. Určitým faktorem je ten, že ocel, která je známa mnoho let, lze nahradit materiálem ve formě kompozitu, se kterým se stavební odbor teprve seznamuje. V pozemním stavitelství se řeší moderní výstavba a materiály, kompozit je jedním z nich a pomalu se v oboru začíná využívat. Dalo by se říct, že kompozit může nahradit právě materiály, které se používají dodnes jako právě ocel.

Diplomová práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. V teoretické části se zaměříme nad hlavním tématem a to jsou halové vestavky, jejich rozdělení, konstrukce a přínosy. Zbývá část řeší spíše statickou stránku ocele a kompozitu, jejich stanovení základních mechanických vlastností, výpočtu jednotlivých činitelů a možné poruchy během laboratorních zkoušek, ale i v realitě.

Praktická část obsahuje některé ocelové a kompozitní prvky, které byly v laboratořích odzkoušeny. V obou případech se prvek posuzoval na ohyb a to jak v těžišti prvku, tak i na hranu. Bylo odzkoušeno několik prvků, vždy dvakrát stejný prvek, aby bylo zjištěno, zdali jsou výsledky shodné. V této části byl vytvořen referenční model v programu FIN EC 3D ve formě halového modulového vestavku, jak z oceli, tak z kompozitu a následně se jejich statické vlastnosti porovnávali.

A. 1 Teoretická část

Halová vestavba, vestavek

Vestavek a jeho dělení

Halová vestavba či vestavek je konstrukce, která je v dnešní době nedílnou součástí halových staveb, pokud daná stavba neobsahuje přístavek či oddělení pro administrativu. Jedná se o typ stavby, která odděluje nebo vytváří prostor a vymezení místa převážně pro administrativní a sociální zázemí, ale i pro skladové či technické zázemí.

Halové vestavky dělíme na několik druhů:

A) podle tvaru

- volně stojící
- přisazen ke stěně
- rohový

B) podle velikosti

- jednopodlažní
- dvoupodlažní
- zvýšené

C) podle typu nosné konstrukce

- ocelové
- plastové
- kompozitní

D) podle typu opláštění

- plechové
- dřevěné
- sádkartonové
- celoprosklené
- sendvičové

Nejčastějšími typy jsou vestavky volně stojící či třístranné. Nevýhody typu, který je přisazen ke stěně, tedy nemá čtvrtou stěnu, jsou možné akustické úniky a dodatečná montáž k nosnému systému halové stavby. [1], [15]

Jednopodlažní vestavky se realizují převážně pro administrativní účely. Do prostoru lze umístit i sociální zázemí, prostory pro skladování nebo skrytí technologických částí celkové stavby. Dvou či vícepodlažní typy jsou rozděleny a převážně opatřeny vnitřním nebo vnějším schodištěm. Rozdělen může být např., že

v přízemní části bude sociální zázemí a v nadzemní části bude administrativa. Zvýšené typy vestavků se realizují, pokud je nutnost, v co největší možné míře, ponechat plochu pro výrobu, proto se tyto typy realizují na ocelových stojinách, které jsou pevně ukotveny do podlahy pomocí šroubů nebo jsou opatřeny vlastním základem, pokud se jedná o vícepodlažní typy.

Hlavní nosný systém vestavků tvoří prutové prvky, které jsou mezi sebou kotveny a docílí tak pevné konstrukce. Prutové prvky se používají, protože opláštění tvoří nejen plná stěna, ale i okna a dveře.

Vestavky jsou k podlaze většinou přišroubovány nebo mají vlastní oddílatovaný základ. Pokud je konstrukce prefabrikovaná a dostatečně tuhá, lze ji na podlahu pouze uložit a nekotvit, protože vlastní tíha bude zaručovat nehybnost konstrukce.

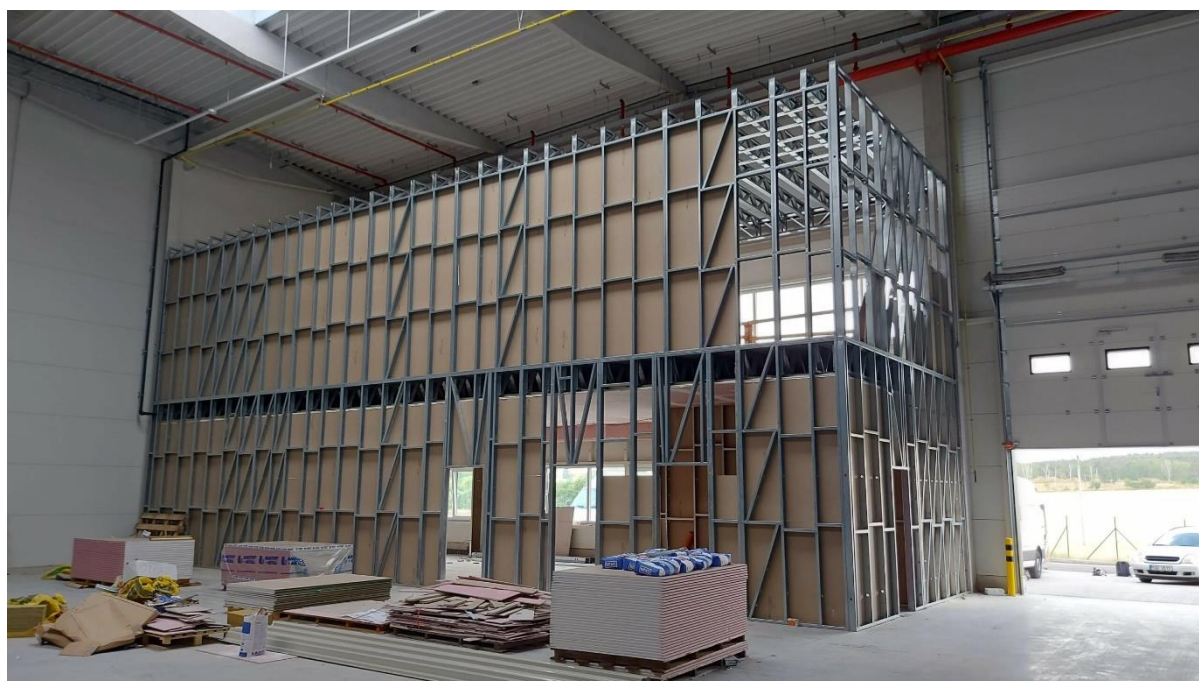
Nejpoužívanějšími typy halových vestavků jsou tvořeny ocelovým nosným systémem a opláštěn sendvičovými montovanými panely. Je nutno podotknout, že montované pláště jsou velmi rychle realizované a jejich modulovost je všestranná, lze snadno vymezit prostor pro výplně otvorů a kotvení případných pohyblivých příček, které oddělují jednotlivé místnosti uvnitř objektu. [16]



Obrázek č. 1 - Příklad halového zvýšeného vestavku se sendvičovým opláštěním [2]



Obrázek č. 2 - Příklad halového dvoupodlažního vestavku [2]



Obrázek č. 3 - Příklad realizace ocelového vestavku se SDK pláštěm [3]

Stěny ze sendvičových panelů

Jak bylo řečeno výše, nejtypičtější a nejpoužívanější plášť halových vestavek jsou sendvičové panely. Mimo opláštění stěn je lze využít i k opláštění střechy, pokud bude požadavek k pochozí střeše, lze je navrhnout s dostatečnou odolností a pevností. Panely jsou montované na nosný systém a díky funkci pero - drážka je lze dobře ukotvit i mezi sebou.

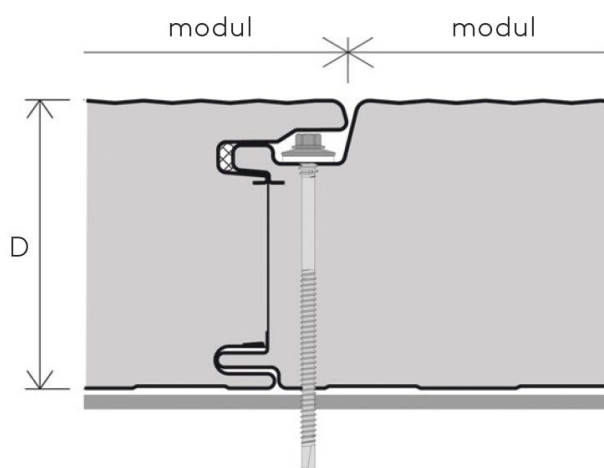
Pro daný typ a tloušťky panelu je nutno znát provozní podmínky, díky tomu lze panely navrhnout jako akustické, tepelněizolační i protipožární.

Výhodou těchto panelů je rychlá montáž, modulovost, možnost osazení výplní otvorů (okna, dveře, vrata).

Nevýhodami panelů je cena, pokud se jedná o atypický panel (zvýšené nároky na statické vlastnosti, požární odolnost). Pokud nejsou panely mezi sebou dostatečně utěsněny, může docházet k průniku hluku.

Součástí opláštění jsou i dělicí příčky, které mohou být navrženy napevno nebo přestavitelné. Toto je výhoda zejména pro prostory, které je nutno od zbytku interiéru oddělit.

Materiálové řešení panelů je veliká škála, nejčastěji se jedná o navržení s ocelovým povrchem a jádrem z minerální vaty nebo PIR pěny. Vnitřní stěny lze navrhnout jako ocelové s pozinkovaným profilem. [2]



Obrázek č. 4 - Příklad kotevní panelů [4]

Technologické řešení

Jako každý objekt, musí být i vestavek navržen technologicky tak, aby splňoval hygienické, bezpečnostní i provozní vyhlášky a normy.

1) Zdravotechnika

Ať se jedná o administrativní nebo technické zázemí, je nutno objekt napojit na zdravotnické instalace. Je nutné dodržovat požadavky, z hlediska hygieny a provozu, na kanalizaci i vodovod. Potrubí je vhodné ukryt do instalačních předstěn (pokud se jedná o montované panely) nebo do rámu vestavku (pokud se jedná o opláštění SDK deskami). Je nutno respektovat minimální rozměry sanitárních buněk a vzdálenosti mezi jednotlivými zařizovacími předměty.

2) Vytápění a chlazení

Vytápění a případné chlazení nemusí být vždy u objektu navrhováno. Pokud ale je nutné, lze využít zdroj pro halovou stavbu nebo musí být navržen vlastní zdroj. Pro halové vestavky lze využít např. splitové jednotky, elektrické přímotopy, případně i otopná tělesa.

3) Vzduchotechnika

U návrhu vzduchotechniky je to obdobné jako u vytápění. Buď u objektu nemusí být realizované, nebo se lze napojit ze stávajícího vedení, případně je navrženo samostatné řešení. U tohoto případu jsou vzduchotechnické jednotky většinou umístěny na střeše/stropu vestavku. Pokud by docházelo k nadměrnému hluku, je potřeba návrhu akustických opatření, např. akustický box.

4) Elektroinstalace

Vedení elektrických kabeláží jsou vždy po povrchu panelů a jsou skryty v instalačních žlabech. Musí být kladen důraz na dostatečné osvětlení celého zázemí halového vestavku. Umělé osvětlení lze kombinovat s osvětlením ze stávajícího halového objektu pomocí výplní otvorů.

5) Elektronická požární signalizace

Objekt halového vestavku je nutno napojit na EPS, už jen z toho důvodu, pokud by došlo k požáru samotného objektu, či celé stávající haly. Musí být zaručena maximální možnost úniku osob. V objektu je nutné umístit i informační tabulky, zejména v technickém zázemí.

6) Měření a regulace

Pokud se musí do objektu realizovat samostatné zdroje pro vytápění a vzduchotechniku, je nutno tyto zdroje mít napojené na MaR, aby v případě poruchy mohlo dojít k jejímu rychlému nalezení a opravě. [13], [14]

Kompletní halový vestavek je nutno sledovat jako objekt, který musí být navržen tak, aby byly splněny všechny požadavky na stavby:

- Mechanická únosnost a stabilita
- Požární odolnost
- Ochrana zdraví osob
- Ochrana proti hluku
- Bezpečnost při užívání
- Úspora energie a tepelná ochrana



Obrázek č. 5 - Příklad interiérového vybavení TZB [2]

Ocel a namáhání

Navrhování ocelových konstrukcí

Stejně jako jiné stavební materiály, také ocel podléhá podrobnému výpočtu. Při navrhování ocelových konstrukcí se musí dbát na veškerá zatížení, která by mohla na konstrukci působit, aby nedošlo k poškození, případné ztrátě stability a zhroucení konstrukce.

Pro správný návrh ocelových konstrukcí se využívá metoda mezních stavů, tj. mezní stav únosnosti a mezní stav použitelnosti. Mezní stavy nesmí být překročeny.

Mezní stav únosnosti určuje a stanovuje maximální únosnost, po kterou můžeme danou konstrukci zatížit. Nesmí se stát, že zatížení bude vyšší než požadovaná únosnost. Vždy se bere ta nejvíce nejnepříznivější kombinace zatížení. Tímto mezním stavem můžeme vypočítat hodnotu, kdy dojde k porušení stability, zjistíme možné překročení pevnosti nebo nadměrné deformace, případně zjistíme únavový a křehký lom konstrukce. Únavový lom vzniká z drobné praskliny, která se při dalším zatěžování materiálu zvětšuje. Ke křehkému lomu obvykle dochází v mnoha ocelových materiálech podléhajících běžnému používání.

Hlavním cílem mezního stavu použitelnosti je zajistit, aby u konstrukce nedocházelo k nadměrným průhybům a kmitáním. U tohoto mezního stavu počítáme s provozními zatíženími (i mimořádná zatížení). Tímto mezním stavem lze zjistit průhyby konstrukcí a dynamické odezvy, zejména kmitání. [19]

Druhy namáhání

Namáhání na ocelové prvky lze dělit na dvě skupiny:

1) Základní druhy namáhání

- a) Tah
- b) Tlak
- c) Ohyb
- d) Smyk

2) Kombinované namáhání

- a) Ohyb a tah
- b) Ohyb a tlak
- c) Ohyb a smyk

Namáhání na tah

Prvek, který je namáhán na tah, musí v každém svém místě splňovat danou podmínku pro návrhovou hodnotu tahové síly

$$\frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} \leq 1,0 \quad [-]$$

kde N_{Ed} - návrhová hodnota tahové síly [N]

$N_{t,Rd}$ - návrhová únosnost tahové síly [N]

Návrhová únosnost tahové síly se určí z výpočtu neoslabeného a oslabeného průřezu a vybrána bude menší hodnota. Průřez, který obsahuje otvory, např. pro spoje, je oslabený.

$$N_{pl,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}} \quad [N]$$

kde $N_{pl,Rd}$ - návrhová plastická únosnost neoslabeného průřezu [N]

A - plocha daného průřezu [m²]

f_y - charakteristická hodnota meze kluzu [Pa]

γ_{M0} - součinitel spolehlivosti materiálu (=1,00 [-])

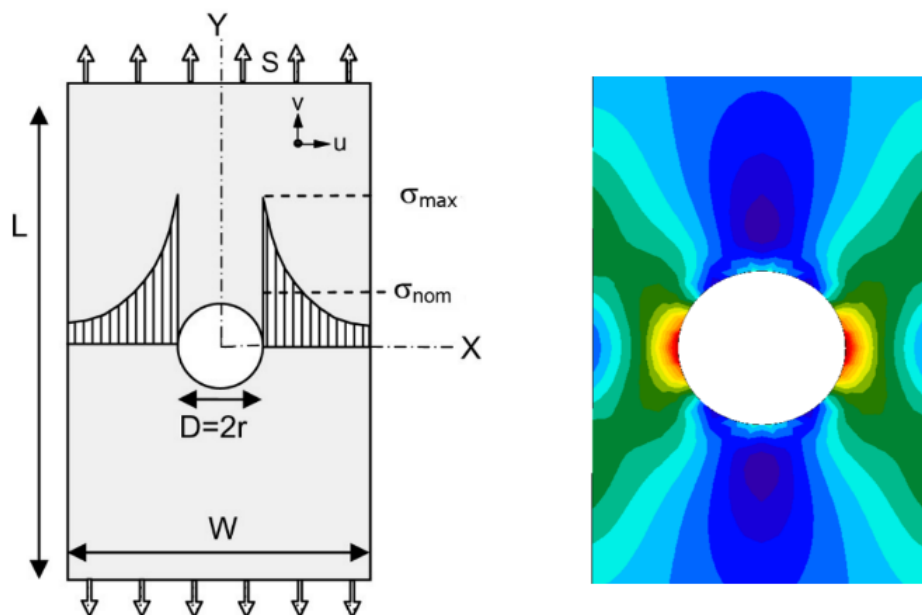
$$N_{u,Rd} = \frac{0,9 A_{net} f_u}{\gamma_{M2}} \quad [N]$$

kde $N_{u,Rd}$ - návrhová plastická únosnost oslabeného průřezu [N]

A_{net} - plocha daného oslabeného průřezu [m²]

f_u - charakteristická hodnota pevnosti v tahu [Pa]

γ_{M2} - součinitel spolehlivosti materiálu (=1,25 [-])



Obrázek č. 6 - Průběh napětí oslabeného průřezu [5]

Tažený prvek se z hlediska mezního stavu použitelnosti kontroluje zejména na průhyb, který je způsoben vlastní tíhou prvku. Dále může dojít ke kontrole z hlediska kmitání, kde může být prvek rozkmitáván vnějším zatížením (vítr, sníh, mimořádné zatížení).

Namáhání na tlak

Pokud se jedná o výpočet prostého tlačného namáhání, je nutno mimo do výpočtu zahrnout i vzpěrný tlak.

Prvek, který je namáhán prostým tlakem, musí v každém svém místě splňovat danou podmínku pro návrhovou hodnotu tlakové síly

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1,0 \quad [-]$$

kde N_{Ed} - návrhová hodnota tlakové síly [N]

$N_{c,Rd}$ - návrhová únosnost tlakové síly [N]

Návrhová únosnost tlakové síly se určí z výpočtu pro jednotlivé třídy průřezů. Průřezy se definují dle štíhlosti do čtyř tříd

průřezy 1. třídy - je možné předpokládat úplný plastický kloub

průřezy 2. třídy - je možné předpokládat plnou plastickou ohybovou únosnost, vyskytuje se zde lokální boulení

průřezy 3. třídy - je možné předpokládat pouze plnou pružnou únosnost, vyskytuje se zde lokální boulení

průřezy 4. třídy - ohybová nebo tlaková únosnost je ovlivněna lokálním boulením a proto je menší, než jejich plná pružná únosnost

$$N_{c,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}} [N]$$

kde $N_{c,Rd}$ - návrhová únosnost průřezu pro třídy průřezu 1, 2, 3 [N]

A - plocha daného průřezu [m²]

f_y - charakteristická hodnota meze kluzu [Pa]

γ_{M0} - součinitel spolehlivosti materiálu (= 1,00 [-])

$$N_{c,Rd} = \frac{A_{eff} f_y}{\gamma_{M0}} [N]$$

kde $N_{c,Rd}$ - návrhová únosnost průřezu pro třídy průřezu 4 [N]

A_{eff} - efektivní plocha daného průřezu [m²]

f_y - charakteristická hodnota meze kluzu [Pa]

γ_{M0} - součinitel spolehlivosti materiálu (= 1,00 [-])

Jak bylo řečeno výše, součástí posudku na prostý tlak je zároveň i vzpěr. U vzpěru zjišťujeme, zdali se po zatížení vrátí prvek do původního stavu. Pokud ale dojde k jeho vybočení, mluvíme o tzv. kritické, neboli Eulerovy, síle

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} [N]$$

kde N_{cr} - vypočítaná kritická síla [N]

I - moment setrvačnosti [m⁴]

E - modul pružnosti [Pa]

L - délka posuzovaného prutu [m]

Návrhová vzpěrná únosnost tlakové síly se určí z výpočtu pro jednotlivé třídy průřezů.

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M1}} [N]$$

kde $N_{b,Rd}$ - návrhová vzpěrná únosnost průřezu pro třídy průřezu 1, 2, 3 [N]

A - plocha daného průřezu [m^2]

f_y - charakteristická hodnota meze kluzu [Pa]

γ_{M1} - součinitel spolehlivosti materiálu (= 1,00 [-])

χ - součinitel vzpěrnosti pro způsob vybočení (daná výpočtem)
obvykle ≤ 1

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A_{eff} f_y}{\gamma_{M1}} [N]$$

kde $N_{b,Rd}$ - návrhová vzpěrná únosnost průřezu pro třídy průřezu 4 [N]

A_{eff} - efektivní plocha daného průřezu [m^2]

f_y - charakteristická hodnota meze kluzu [Pa]

γ_{M1} - součinitel spolehlivosti materiálu (= 1,00 [-])

Pro stanovení vzpěrné délky je nutno znát podepření posuzovaného prvku. Jedná se obecně o prostý nosník, konzola, vetknutý nosník, kombinace prostého a vetknutého nosníku a kombinace vetknutého a posuvně vetknutého nosníku.

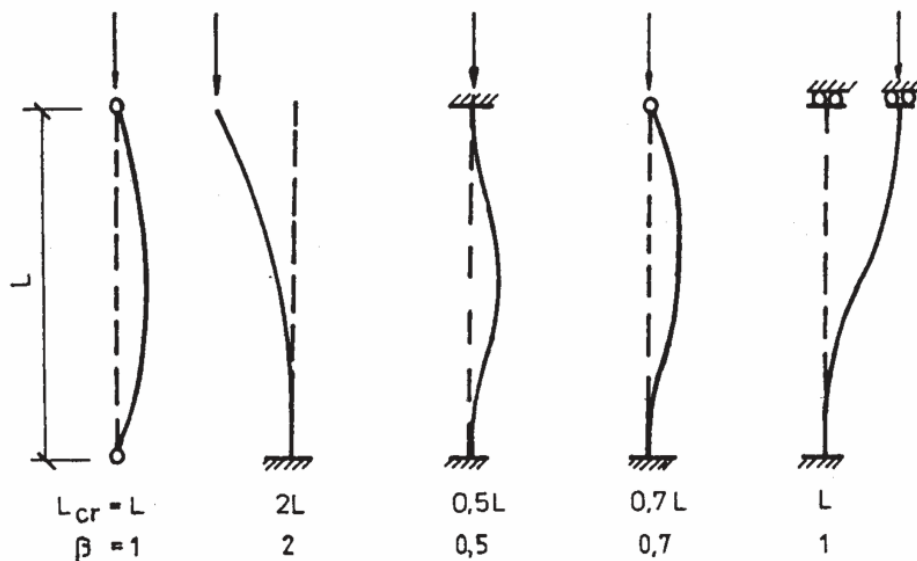
Vzpěrná délka je poté dána vztahem

$$L_{cr} = \beta L [m]$$

kde L_{cr} - vzpěrná délka dle typu uložení [m]

β - součinitel daného typu uložení [-]

L - délka posuzovaného prvku [m]



Obrázek č. 7 - Příklady uložení nosníků [6]

Posouzením daného prvku na tlačené namáhání zjišťujeme, jaká může být maximální síla, než daný prvek začne vybočovat. Vzpěrný tlak se ve většině případů řeší u štíhlých a velmi štíhlých prvků.

Namáhání na ohyb

Namáhání prvku ohybem je jeden z nejdůležitějších parametrů pro správné dimenzování. Vše, co prochází výpočtem, se dimenzuje obzvláště na ohybový moment. Návrhová hodnota ohybového momentu musí, stejně jako u tahu a tlaku, splňovat podmínku v každém průřezu

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1,0 \quad [-]$$

kde M_{Ed} - návrhová hodnota ohybového momentu [Nm]

$M_{c,Rd}$ - návrhová únosnost v ohybu [Nm]

Návrhová únosnost v ohybu je určena dle třídy průřezu a stanovuje se k hlavní ose průřezu

$$M_{c,Rd} = M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl}f_y}{\gamma_{M0}} \quad [Nm]$$

kde $M_{pl,Rd}$ - návrhová únosnost v ohybu pro třídy průřezu 1, 2 [Nm]

W_{pl} - průřezový modul plastický [m^3]

f_y - charakteristická hodnota meze kluzu [Pa]

γ_{M0} - součinitel spolehlivosti materiálu (= 1,00 [-])

$$M_{c,Rd} = M_{el,Rd} = \frac{W_{el,min} f_y}{\gamma_{M0}} \quad [Nm]$$

kde $M_{el,Rd}$ - návrhová únosnost v ohybu pro třídy průřezu 3 [Nm]

$W_{el,min}$ - průřezový modul elastický [m^3]

f_y - charakteristická hodnota meze kluzu [Pa]

γ_{M0} - součinitel spolehlivosti materiálu (= 1,00 [-])

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{eff,min} f_y}{\gamma_{M0}} \quad [Nm]$$

kde $M_{c,Rd}$ - návrhová únosnost v ohybu pro třídy průřezu 4 [Nm]

$W_{eff,min}$ - průřezový modul efektivní [m^3]

f_y - charakteristická hodnota meze kluzu [Pa]

γ_{M0} - součinitel spolehlivosti materiálu (= 1,00 [-])

Někdy se v konstrukcích setkáváme s namáháním ohybem v šikmé rovině, to znamená, že ohyb nepůsobí v hlavních centrálních osách daného průřezu. Proto je stanovena podmínka pro ohybovou únosnost pro každou osu odděleně

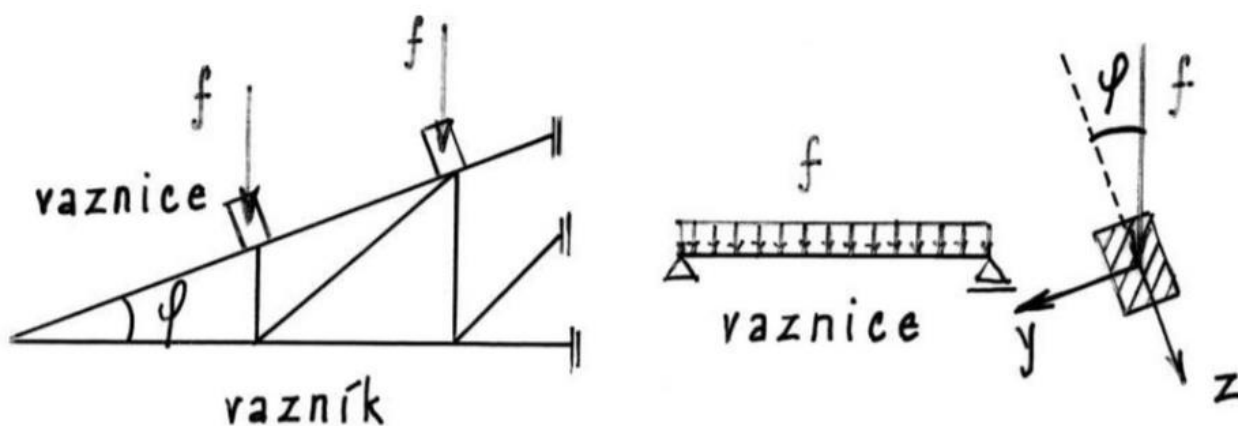
$$\left(\frac{M_{y,Sd}}{M_{c,y,Rd}} \right)^\alpha + \left(\frac{M_{z,Sd}}{M_{c,z,Rd}} \right)^\beta \leq 1,0 \quad [-]$$

kde $M_{y,Sd}$ a $M_{z,Sd}$ - návrhové hodnoty ohybového momentu v osách [Nm]

$M_{c,y,Rd}$ a $M_{c,z,Rd}$ - návrhové únosnosti v ohybu v osách [Nm]

α, β - součinitelé závislé na tvaru daného průřezu [-]

Požadované hodnoty jsou dané normami, ale lze je uvažovat = 1



Obrázek č. 8 - Příklad namáhání šikmým ohybem [7]

Zásadním cílem namáhaného průřezu je dodržet stanovený průhyb, aby nedocházelo k deformaci konstrukce, případně ke ztrátě stability celé konstrukce. Nadměrný průhyb lze snížit příčnými i podélnými výztuhy, které konstrukci zpevní a lze zabránit ke ztrátě stability. Pokud nelze prvek příčně ztužit, je nutno stanovit možné klopení prvku. Klopení se stanovuje pro obě hlavní centrální osy. Stanovením může vést k předimenzování prvku a s tím jsou spojené další negativa, jako je hmotnost prvku a jeho následné dostatečně tuhé uložení do podpor.

Stanovení průhybu ve středu nosníku je dán normovým výpočtem

$$w_s = \frac{5gl^4}{384EI_y} \text{ [m]}$$

kde w_s - výsledný průhyb nosníku [m]

g - návrhové stálé zatížení [N/m²]

l - délka daného nosníku [m]

E - modul pružnosti [Pa]

I_y - moment setrvačnosti průřezu v ose y [m⁴]

Průhyb se stanovuje jak pro 1. mezní stav, tak i pro 2. mezní stav. Pro 2. MS jsou dané normové hodnoty pro rozdílná místa a konstrukce. [21]

Namáhání na smyk

Smykové namáhání působí nejlépe ve spojení prvků mezi sebou, proto je nutné dbát na správný návrh. Stejně jako u ostatních druhů namáhání musí návrhová hodnota splňovat v každé části daného průřezu podmínku

$$\frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} \leq 1,0 \quad [-]$$

kde V_{Ed} - návrhová hodnota smykové (posouvající) síly [N]

$V_{c,Rd}$ - návrhová únosnost ve smyku [N]

U výpočtu návrhové únosnosti ve smyku musí být splněna plasticita a nesmí docházet ke kroucení

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v(f_y/\sqrt{3})}{\gamma_{M0}} \quad [Nm]$$

kde $V_{pl,Rd}$ - návrhová únosnost ve smyku [N]

A_v - plocha stěny ve smyku ve směru osy z [m²]

f_y - charakteristická hodnota meze kluzu [Pa]

γ_{M0} - součinitel spolehlivosti materiálu (= 1,00 [-])

Součástí výpočtu návrhové (plastické) únosnosti je podmínka, při které se uvažuje pružný návrh bez boulení

$$\frac{\tau_{Ed}}{f_y(\sqrt{3}\gamma_{M0})} \leq 1,0 \quad [-]$$

kde f_y - charakteristická hodnota meze kluzu [Pa]

γ_{M0} - součinitel spolehlivosti materiálu (= 1,00 [-])

τ_{Ed} - návrhové smykové napětí [Pa]

$$\tau_{Ed} = \frac{V_{Ed}S}{It}$$

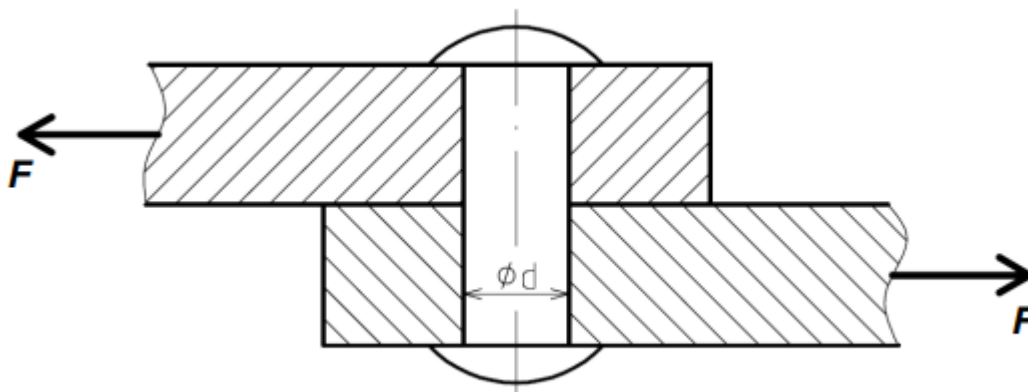
kde S - statický moment v místě posuzovaného bodu [Nm]

I - moment setrvačnosti daného průřezu [m⁴]

t - tloušťka v posuzovaném bodu [m]

Při namáhání smykem může docházet ke kroucení. Proto se prvky dimenzují a navrhují tak, aby kroucení bylo co nejmenší, v nejlepším případě k němu vůbec nedocházelo.

Kroucení může být prosté nebo vázané. Při prostém kroucení vzniká pouze smykové napětí. Při vázaném kroucení vzniká normálové napětí a druhotné smykové napětí, které ale ve většině případů je velmi malé, proto ho lze zanedbat.



Obrázek č. 9 - Příklad smykového namáhání [8]

Kombinované namáhání ohyb a tah

Výsledkem kombinace namáhání ohybu a tahu bude napětí v daném průřezu při pružném působení

$$\sigma = \frac{N_{t,Rd}}{A} + \frac{M_{Sd}}{W_{el,y}} \quad [Pa]$$

kde σ - největší napětí v průřezu [Pa]

$N_{t,Rd}$ - návrhové působení tahové síly [N]

A - plocha daného průřezu [m²]

M_{Sd} - návrhové působení ohybového momentu [Nm]

$W_{el,y}$ - průřezový modul elastický v ose y [m³]

U průřezové třídy 3 je podmínka, která určuje, že vypočítané napětí nesmí překročit hodnotu f_y/γ_{MO} , musí být stanovena podmínka

$$\frac{N_{t,Rd}}{A f_y} + \frac{M_{Sd}}{W_{el,y} f_y} \leq 1,0 \quad [-]$$

kde f_y - charakteristická hodnota meze kluzu [Pa]

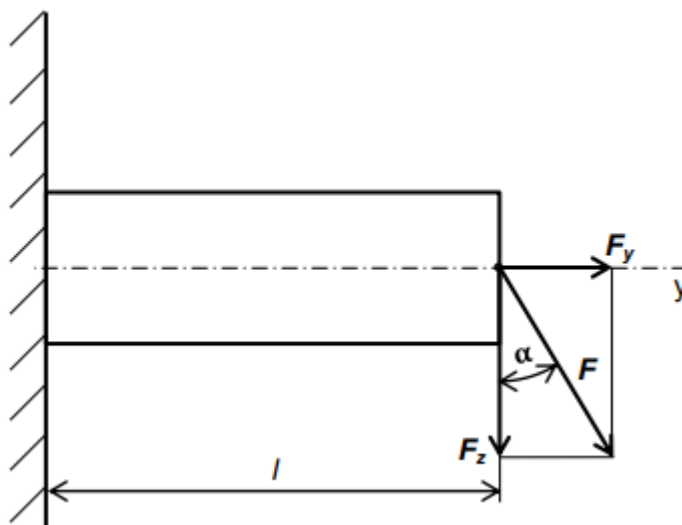
γ_{M0} - součinitel spolehlivosti materiálu (= 1,00 [-])

U kombinace ohybu a tahu lze počítat i se šikmým ohybem, který jak bylo řečeno výše, nepůsobí v hlavních centrálních osách

$$\frac{N_{t,Rd}}{N_{pl,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{pl,y,Rd}} + \frac{M_{z,Sd}}{M_{pl,z,Rd}} \leq 1,0 \quad [-]$$

kde $N_{pl,Rd}$ - návrhová únosnost tahové síly [N]

$M_{pl,y,Rd}, M_{pl,z,Rd}$ - návrhová únosnost v ohybu v ose y a z [Nm]



Obrázek č. 10 - Příklad kombinovaného namáhání ohyb a tah [9]

Kombinované namáhání ohyb a tlak

Dalo by se říct, že při namáhání prvku vzpěrným tlakem docházelo k působení síly a momentu. Pro jejich kombinaci je stanovena obecná podmínka

$$\frac{N_{Sd}}{\chi_y A f_y} + \frac{k_y M_{Sd}}{W_{pl,y} f_y} \leq 1,0 \quad [-]$$

kde N_{Sd} - návrhové působení tlačené síly [N]

χ_y - součinitel vzpěrnosti pro způsob vybočení v ose y (daná výpočtem)

A - plocha daného průřezu [m²]

f_y - charakteristická hodnota meze kluzu [Pa]

γ_{M1} - součinitel spolehlivosti materiálu (= 1,00 [-])

M_{Sd} - návrhové působení ohybového momentu [Nm]

$W_{pl,y}$ - průřezový modul plastický v ose y [m³]

k_y - součinitel, který je závislý na štíhlosti prutu, průběhu momentů, vlivu osově síly a poměru plastického a elastického průřezového modulu [-]

- součinitel je dán normovými hodnotami

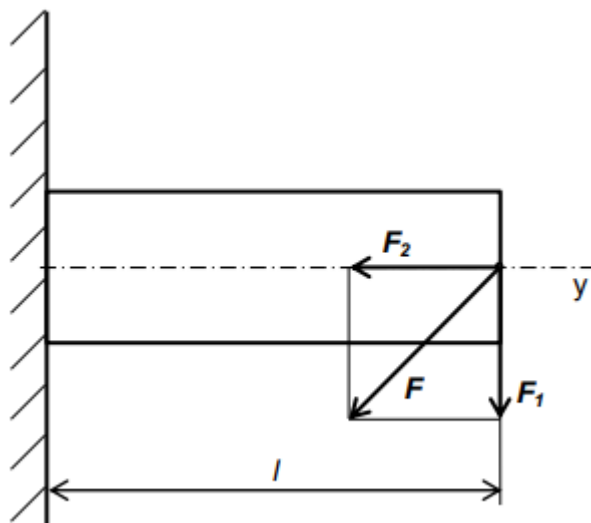
Stejně jako u kombinace ohyb a tah, i tady se lze setkat s kombinací se šikmým ohybem. Tato kombinace pro třídu průřezu 1 a 2 je dána podmínkou

$$\frac{N_{Sd}}{\chi_{\min} A f_y} + \frac{k_y M_{y,Sd}}{W_{pl,y} f_y} + \frac{k_z M_{z,Sd}}{W_{pl,z} f_y} \leq 1,0 \quad [-]$$

kde χ_{\min} - součinitel vzpěrnosti, určen jako menší hodnota χ_y či χ_z

Větší pravděpodobnost vybočení daného prutu je dána ve směru větší štíhlosti daného prutu.

Příkladem v praxi, kde se můžeme s těmito kombinacemi setkat, jsou vykonzolované konstrukce nebo příhradové nosníky. [20]



Obrázek č. 11 - Příklad kombinovaného namáhání ohyb a tlak [9]

Kombinované namáhání ohyb a smyk

Málokdy se setkáme s kombinací namáhání ohybu a smyku. Pokud ale stanovujeme únosnost daného průřezu v ohybu, musíme uvažovat

$$V_{Ed} \leq 0,5V_{pl,T,Rd} [N]$$

kde V_{Ed} - návrhová hodnota smykové síly [N]

$V_{pl,T,Rd}$ - návrhová únosnost smyku za ohybu [N]

Pokud je smyková síla menší než polovina plastické smykové únosnosti, účinek této síly je možno v ohybu zanedbat. Toto neplatí pro případy, pokud smykové boulení bude snižovat její únosnost.

Redukovaná únosnost v ohybu se stanoví dle výpočtu redukované meze kluzu

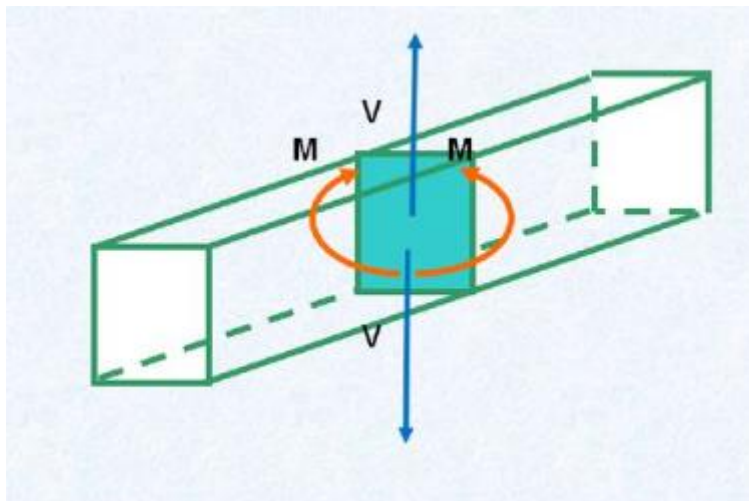
$$(1 - \rho)f_y [Pa]$$

kde f_y - charakteristická hodnota meze kluzu [Pa]

ρ - součinitel redukce pro smykovou plochu [-]

$$\rho = \left(\frac{2V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} - 1 \right)^2 [-]$$

Hodnotu $V_{pl,Rd}$ lze vypočítat viz. Namáhání na smyk.



Obrázek č. 12 - Příklad kombinovaného namáhání ohyb a smyk [10]

Dalšími druhy kombinovaného namáhání může být ohyb a kroucení, kde s tímto se nejvíce můžeme setkat u konstrukcí strojů. Výpočet tohoto namáhání lze přes dva možné přístupy, tj. přes průhyb nebo přes ohybový moment. Pokud stanovujeme toto namáhání, musíme předpokládat, že těleso při zatížení bude lineárně pružné, průhyby daného prvku budou minimální a charakteristické hodnoty E a I budou konstantní, tudíž se bude jednat o prizmatický prvek. [18]

Dále se v praxi můžeme setkat s kombinovaným namáháním ohyb, osová síla a smyk. Výpočet a stanovení výsledných hodnot je podobné jako u ostatních druhů namáhání. S tímto druhem namáhání se můžeme setkat u konzolových konstrukcí.

Kompozit a namáhání

Navrhování konstrukcí z kompozitu

Navrhované konstrukce z kompozitního materiálu musí stejně jako u ocele, být správně navrženy a realizovány, aby nedošlo ke ztrátě její stability. Výhodou těchto materiálů oproti oceli je jejich hmotnost. Díky ní je celá konstrukce lehčí a nemá vysoké nároky, zejména při zakládání.

Kompozitní prvky jsou složeny z vláken a pojiv (matrice). Obě tyto složky, které tvoří kompozitní celek, musí být řádně normově odzkoušeny.

Namáhání a porušení

Namáhání prvků z kompozitu je podobné jako u oceli. Prvky se z hlediska statického posouzení zkoumají na tah, tlak, ohyb a smyk.

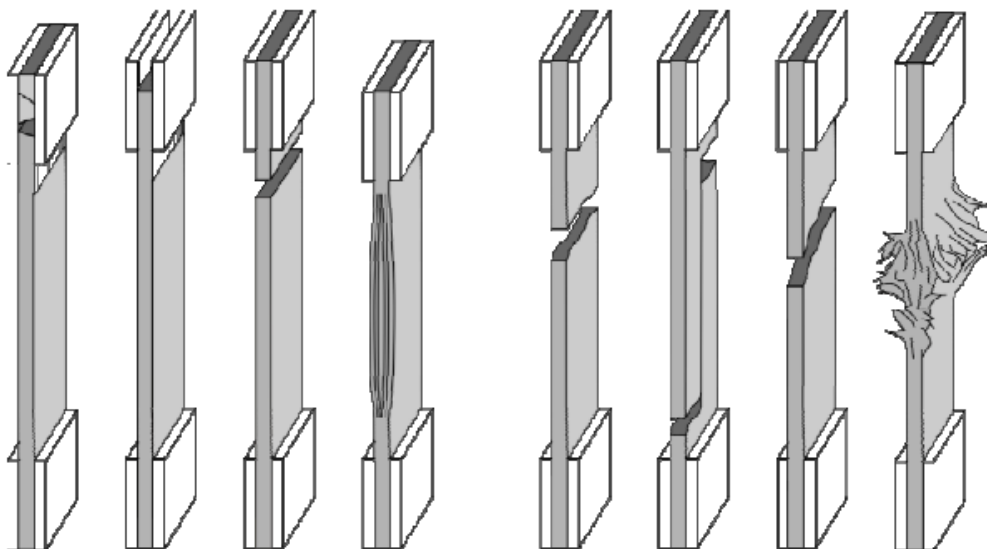
U některých kompozitů může dojít k jejich poruše dříve, než je stačíme zpozorovat okem (trhlina, přetržení vlákna, oddělení vláken od matrice).

V této části se spíše zaměříme na poruchy vyvolané laboratorními zkouškami vybraných druhů namáhání. V praxi se můžeme setkat s několika druhy statického porušení kompozitního prvku

- a) Porušení podélným tahovým namáháním
- b) Porušení příčným tahovým namáháním
- c) Porušení podélným tlakovým namáháním
- d) Porušení příčným tlakovým namáháním
- e) Porušení smykem

Porušení tahovým namáháním

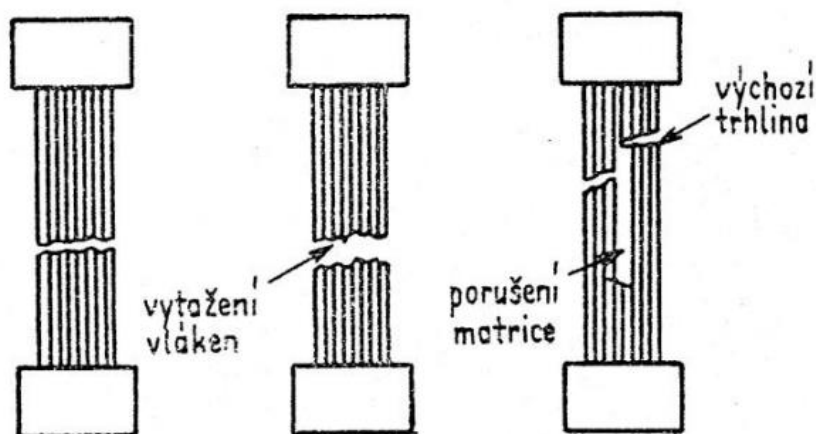
Laboratorní zkouškou pro tah získáme základní hodnoty pro podélný a příčný směr vláken kompozitu. Jedná se o modul pružnosti, pevnost v tahu a Poissonovo číslo.



Obrázek č. 13 - Nepřípustná a přípustná porušení [12]

Podélné tahové namáhání

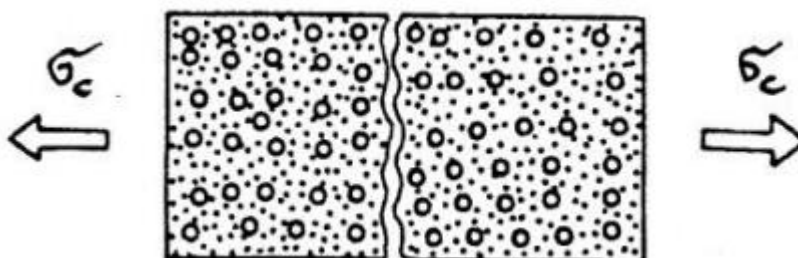
Prakticky po malém zatížení dochází u daného prvku k deformacím. Tyto deformace jsou minimalistické, ale se zvyšujícím se zatížením nabývají na velikosti. Při podélném namáhání se můžeme setkat s mechanismy porušení, které jsou určeny základními vlastnostmi kompozitu při výrobě. Jedná se o křehké porušení, porušení s vytažením vláken a porušení s oddělením složek či poruše matrice.



Obrázek č. 14 - Příklad podélného porušení kompozitů [11]

Příčné tahové namáhání

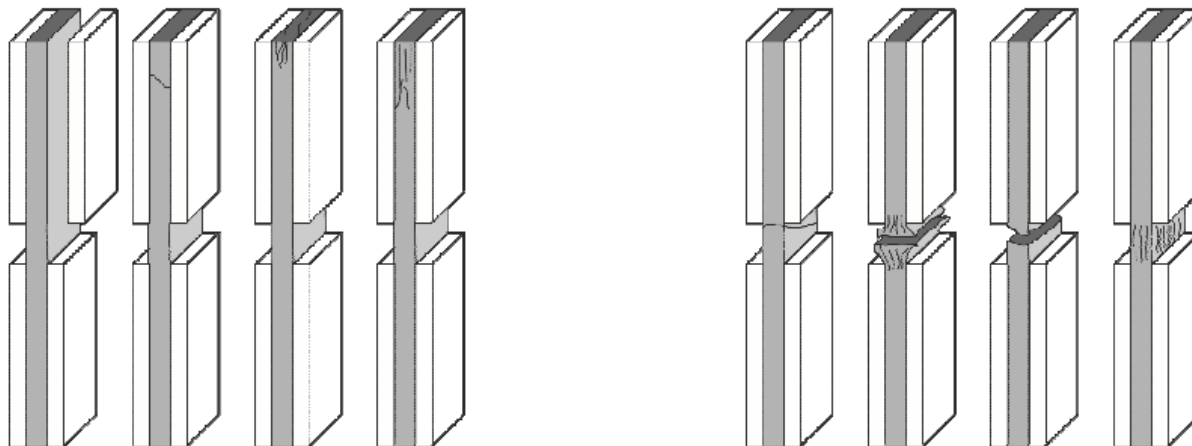
Při příčném tahovém namáhání je příčinou porušení koncentrace napětí mezi rozhraní vlákna a matrice. Občas může dojít i k poruše vláken, pokud mají nižší pevnost. Při příčném namáhání se můžeme setkat s mechanismy porušení, jedná se o porušení matrice tahovým napětím, oddělování složek na rozhraní a štěpení vláken.



Obrázek č. 15 - Příklad příčného porušení kompozitů [11]

Porušení tlakovým namáháním

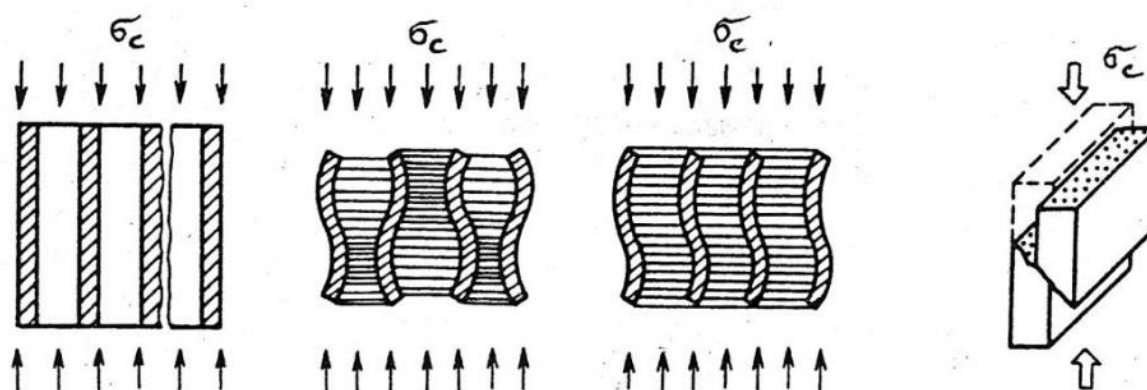
Laboratorní zkouškou pro tlak získáme základní hodnoty pro podélný a příčný směr vláken kompozitu. Jedná se o modul pružnosti a pevnost v tlaku



Obrázek č. 16 - Nepřípustná a přípustná porušení [12]

Podélné tlakové namáhání

Při podélném namáhání se můžeme setkat s mechanismy porušení, jedná se o příčně tlakové porušení, mikropohnutí vláken s extenzí deformací, se smykovou deformací a smykové porušení.



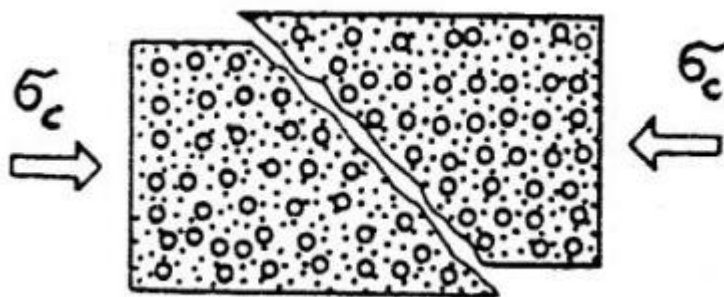
Obrázek č. 17 - Příklad podélného porušení kompozitů [11]

U mikropohnutí vláken s extenzní deformací není žádná vazba mezi jednotlivými vazbami. S tímto typem porušení se setkáváme, pokud je podíl vláken malý. Porušení začíná v matrici v místě s největším tahovým příčným přetvořením.

Mechanismus mikropohnutí vláken se smykovou deformací je opakem extenze. První poruchy vznikají na rozhraní vlákna a matrice smykovým napětím.

Příčné tlakové namáhání

Při podélném tlakovém namáhání dochází ke smykovému porušení matrice. S tím souvisí i následné oddělování jednotlivých složek a jejich případné drcení, štěpení vláken.



Obrázek č. 18 - Příklad příčného porušení kompozitů [11]

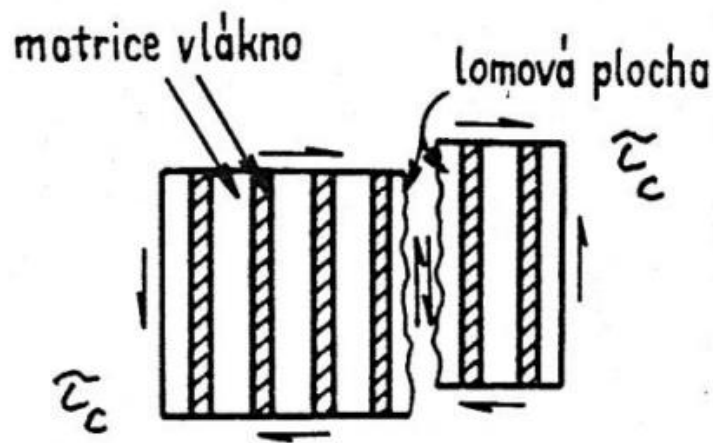
Dalo by se říci, že příčná mez pevnosti v tlaku u posuzovaných prvků kompozitního materiálu je menší než mez pevnosti v tahu.

Porušení smykovým namáháním

U prvku, který je namáhán smykem, dojde k oddělení vláken od matrice nebo dojde ke smykovému porušení matrice, protože má nižší charakteristické vlastnosti, než vlákno.

Smykové zkoušky, které jsou na dané prvky použity, mohou být jednoosý tah, smykové testy s dvojitým či trojitým vedením nebo smykový test s V vrubem. [11]

Veškeré zkoušky kompozitů jsou prováděné dle ASTM, což je zkušební metoda pro stanovení veškerých mechanických vlastností pro kompozity, které jsou vyztuženy vláknem. [12]



Obrázek č. 19 - Příklad smykového porušení kompozitů [11]

Mechanické vlastnosti kompozitních materiálů lze vypočítat dle normových vzorců, ale některé firmy udávají rozmezí těchto vlastností odzkoušených v laboratořích na požadovaných přístrojích.

Mechanické vlastnosti	Jednotka	Hodnota
Mezní pevnost v tahu	MPa	240 až 700
Modul pružnosti v tahu	GPa	18 – 40
Mezní napětí v tlaku	MPa	240 – 450
Modul pružnosti v tlaku	Gpa	19
Mezní pevnost v ohybu	MPa	240 až 1000
Modul pružnosti v ohybu	Gpa	11.0 – 40
Modul pružnosti ve smyku	GPa	2.9
Smykové napětí krátkého nosníku	MPa	31,0
Otlačení	MPa	240
Poissonovo číslo		0,33

Tabulka č. 1 - Mechanické vlastnosti kompozitů [23]

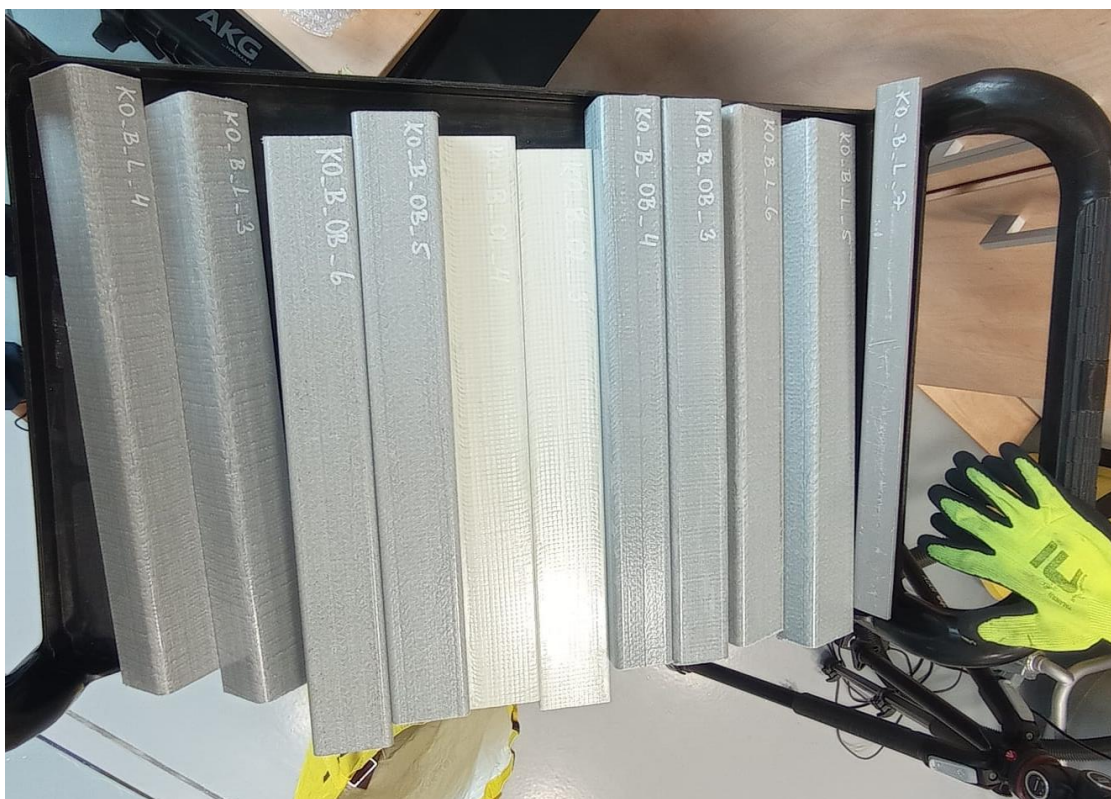
A. 2 Praktická část

Praktická část diplomové práce byla prováděna v laboratoři na Fakultě aplikovaných věd. Všechny zkoušky byly odborně sledovány panem Ing. Janem Krystkem, PhD. Zkouškami na ohyb byly, u ocele a kompozitu, stanoveny hodnoty, které byly následně porovnány s hodnotami, spočtené v programu FIN EC.

V programu byly vytvořeny dvě konstrukce, stejného charakteru, ale odlišné materiálovým složením. První byla z ocele, druhá z kompozitu.

Příprava zkoušených vzorků

Veškeré kompozity byly sehnány od firmy MEA po délce dva metry. Tyto prvky bylo nutné nařezat na základní délku a následně ofrézovat, aby nedošlo ke zranění při provádění pokusů. Základní délka všech ocelových vzorků i kompozitů činila 45 centimetrů. Všechny prvky byly očíslovány, jelikož nebyly číslovány vůbec, byl jim přidělen kód identifikace, pokračující dle číslování z roku 2022/2023, autorem Ing. Karolína Záhrubská. Veškeré prvky a jejich značení je vyobrazeno v následující tabulce.



Obrázek č. 20 - Připravené vzorky pro zkoušení [autor práce]

KOMPOZIT - ohyb (čtvercový profil)
OZNAČENÍ
KO_B_OB_3
KO_B_OB_4
KO_B_OB_5
KO_B_OB_6

KOMPOZIT - ohyb (obdélníkový profil)
OZNAČENÍ
KO_B_OL_3
KO_B_OL_4

KOMPOZIT - ohyb (L profil)
OZNAČENÍ
KO_B_L_3
KO_B_L_4
KO_B_L_5
KO_B_L_6
KO_B_L_7

KOMPOZIT - ohyb (čtvercový profil)
OZNAČENÍ
KO_BE_OB_1
KO_BE_OB_2

OCEL - ohyb (čtvercový profil)
OZNAČENÍ
OC_BE_O_1
OC_BE_O_2

Tabulka č. 2 - Označení jednotlivých vzorků [autor práce]

Veškeré rozměry daných zkoušených vzorků jsou popsány u jednotlivých částí daných zkoušek.

U kompozitu, kde máme čtvercový profil zkoušen na ohyb, v jednom případě je bodová síla v těžišti prvku, v druhém případě bodová síla působí na hranu prvku.

Pomůcky při laboratorních zkouškách

Před a při laboratorním experimentu bylo nutné použít několik pomůcek a ochranné vybavení ve formě brýlí a rukavic. Stroje a nástroje, které byly použity:

- Pokosová pila pro nařezání kompozitů (Toolson KGZ34000)
- Kapsový odsávač (Chrastava POC 14)
- Svinovací metr
- Rozkládací metr
- Zkušební stroj (Zwick Roell Z050)
- Software (TestXpert II)
- Svítidla
- Fotoaparát se stativem



Obrázek č. 21 - Zkušební stroj [autor práce]

Popis laboratorního experimentu

Kompletní laboratorní experiment proběhl v technické laboratoři na Fakultě aplikovaných věd. Prvky se zkoušely na stroji Zwick Roell Z050 pod odborným dohledem pana Ing. Jana Krystka, PhD. Po umístění a utažení upínacích čelistí byly jednotlivé zkoušky provedeny. Součástí zkoušky byl fotoaparát se stativem, osvětlovací technika, extenzometr pro měření deformací a software TestXpert II, který nám ukazoval jednotlivé hodnoty zatížení, času a deformace.

Pro všechny kompozity a ocelové prvky byla stanovena rychlost posunu síly na 2mm/min. Všechny prvky se posuzovaly na ohyb, kde po umístění vzorku se sledovala průběžná deformace, zatěžovací síla a napětí. Kromě zatížení prvku do těžiště prvku se posuzovala i zatěžovací síla na hranu daných prvků.

Celkem se posoudilo 13 vzorků z kompozitu a 2 vzorky ocele. Výsledné hodnoty daných komponent byly zpracovány do forem grafů v programu Python.

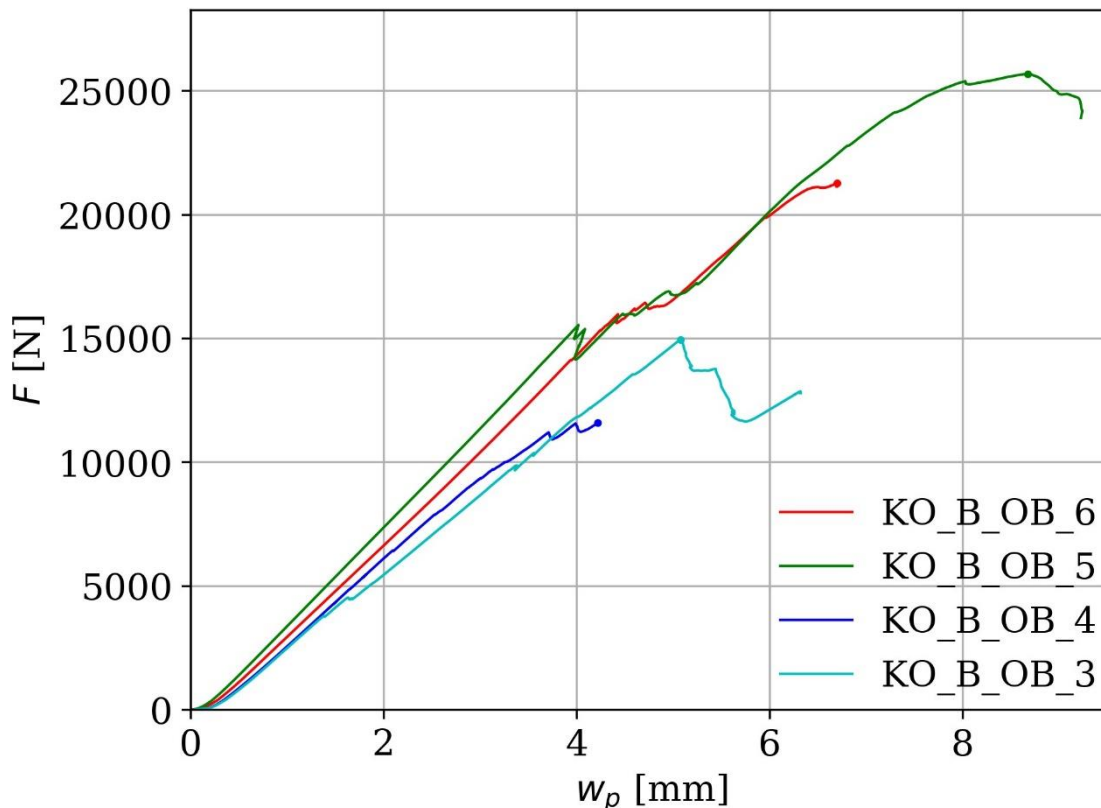
Výsledky naměřených hodnot

Kompozit - ohyb (čtvercový profil)

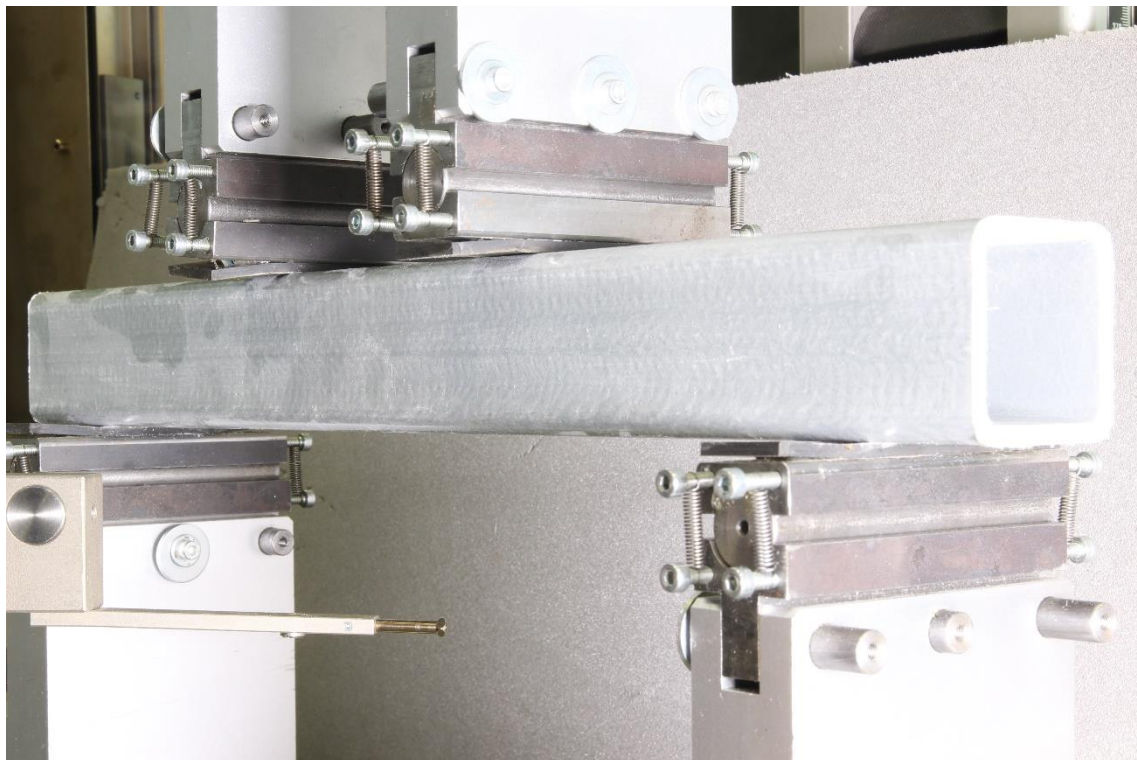
KOMPOZIT - ohyb (čtvercový profil)			
OZNAČENÍ	DÉLKA [mm]	ŠÍŘKA [mm]	TLOUŠŤKA [mm]
KO_B_OB_3	450	50	4
KO_B_OB_4	450	50	4
KO_B_OB_5	450	60	4
KO_B_OB_6	450	60	4

Tabulka č. 3 - Rozměry vzorků KO_B_OB [autor práce]

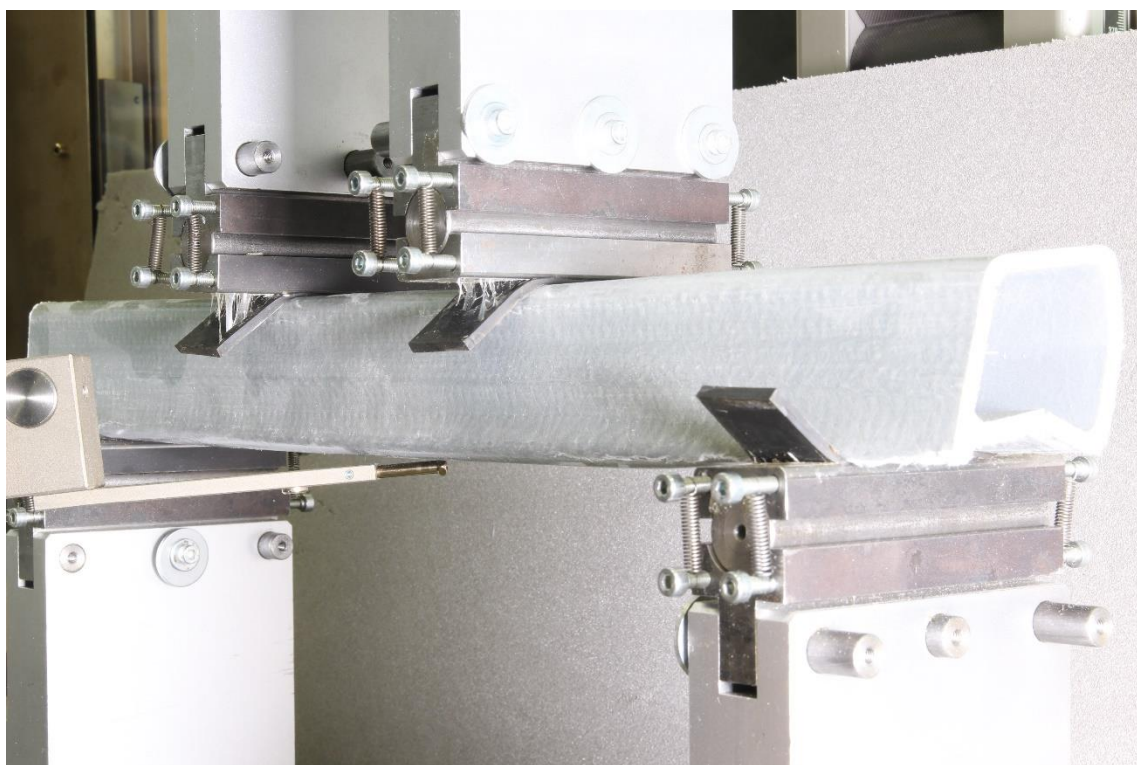
Datum zkoušení	5. 4. 2024
Čas zkoušení	10:20 - 12:45
Rychlost zatěžovací síly	2mm/min.
Rozteč podpor	360 mm



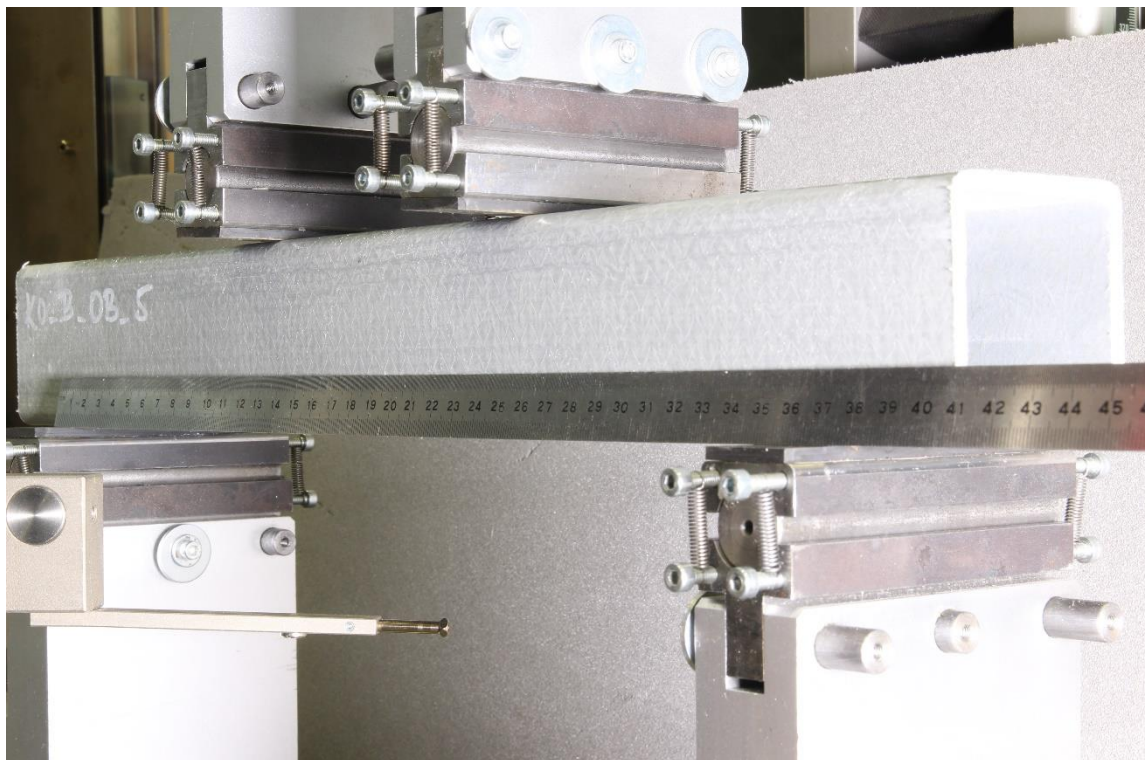
Obrázek č. 22 - Grafické výsledky vzorků KO_B_OB [autor práce]



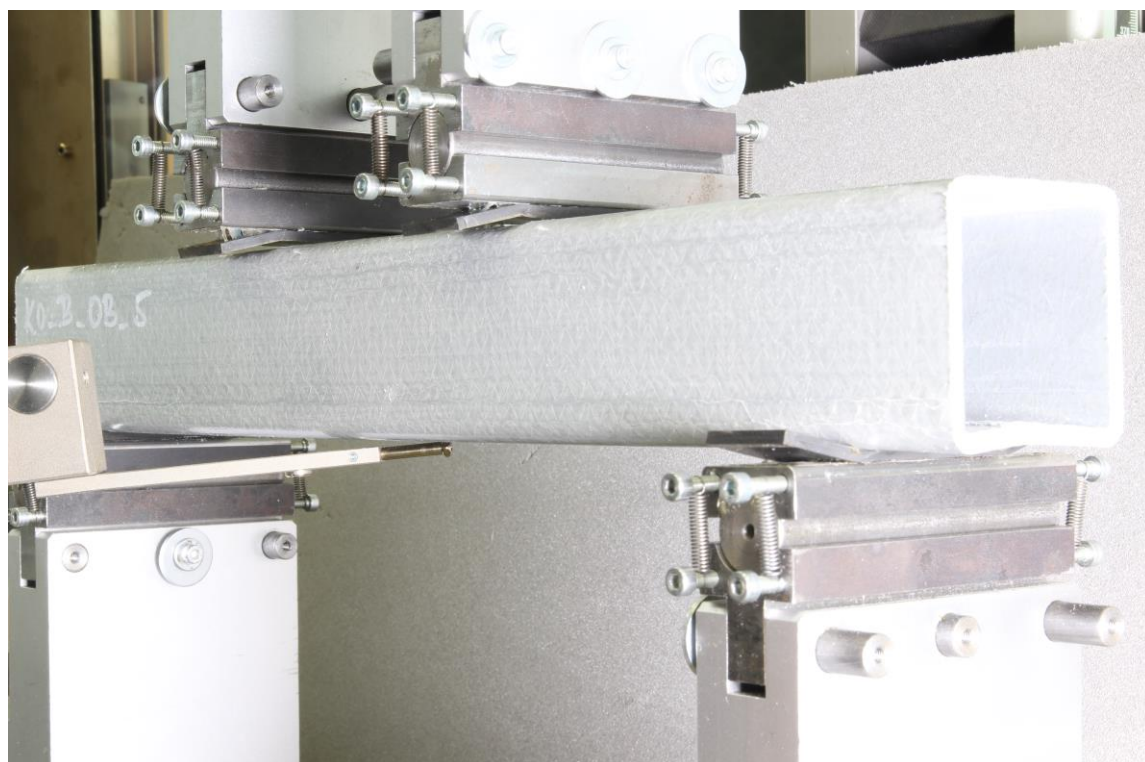
Obrázek č. 23 - KO_B_OB_3 před zkouškou [autor práce]



Obrázek č. 24 - KO_B_OB_3 po zkoušce [autor práce]



Obrázek č. 25 - KO_B_OB_5 před zkouškou [autor práce]



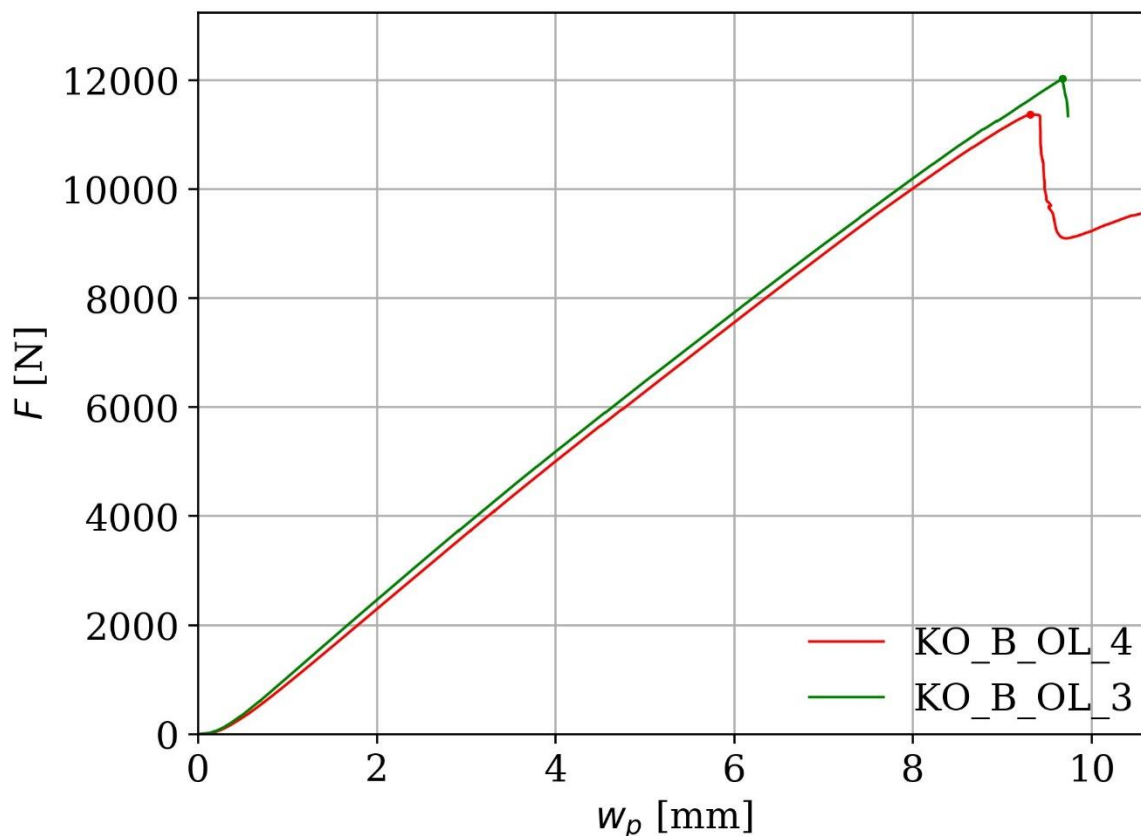
Obrázek č. 26 - KO_B_OB_5 po zkoušce [autor práce]

Kompozit - ohyb (obdélníkový profil)

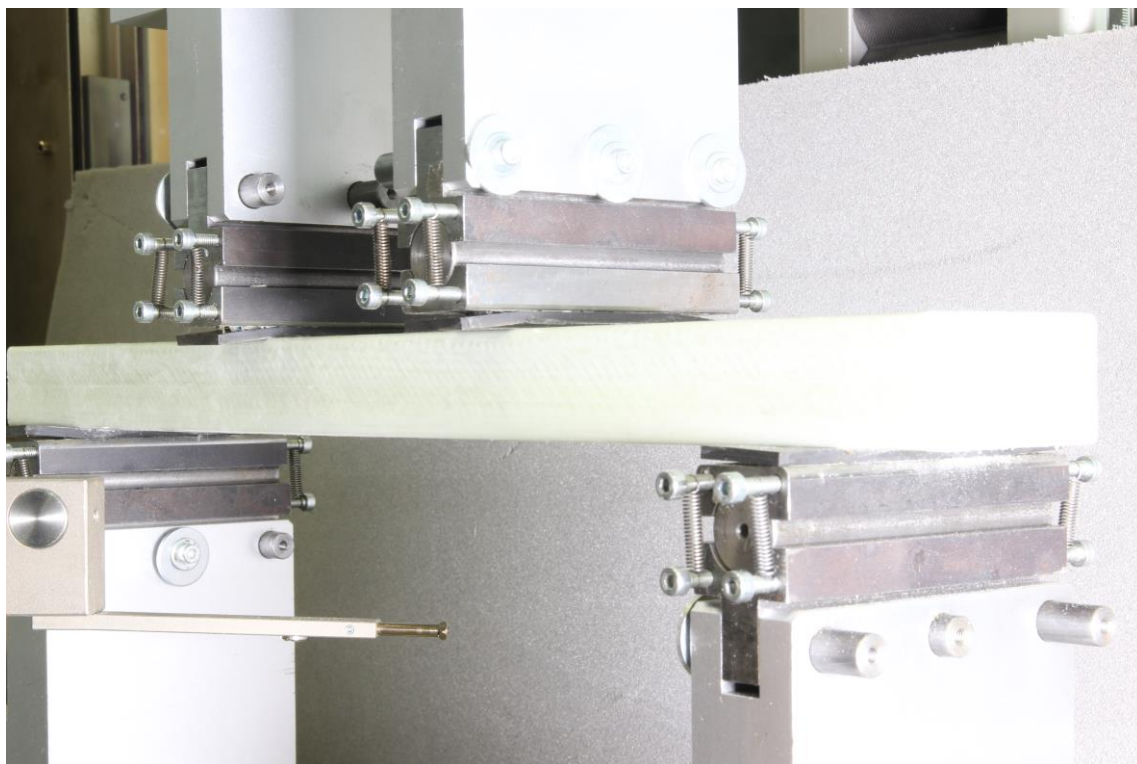
KOMPOZIT - ohyb (obdélníkový profil)				
OZNAČENÍ	DÉLKA [mm]	ŠÍŘKA [mm]	VÝŠKA [mm]	TLOUŠŤKA [mm]
KO_B_OL_3	450	60	30	3
KO_B_OL_4	450	60	30	3

Tabulka č. 4 - Rozměry vzorků KO_B_OL [autor práce]

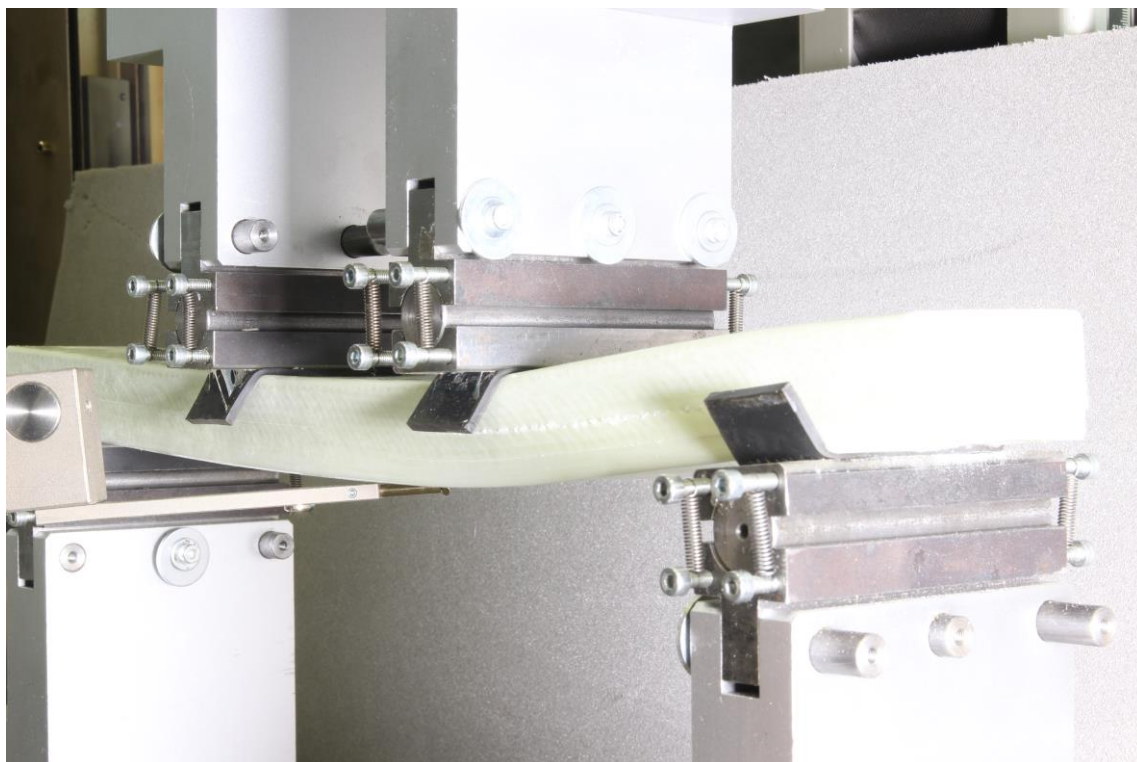
Datum zkoušení	5. 4. 2024
Čas zkoušení	10:20 - 12:45
Rychlost zatěžovací síly	2mm/min.
Rozteč podpor	360 mm



Obrázek č. 27 - Grafické výsledky zkoušení vzorků KO_B_OL [autor práce]



Obrázek č. 28 - KO_B_OL_4 před zkouškou [autor práce]



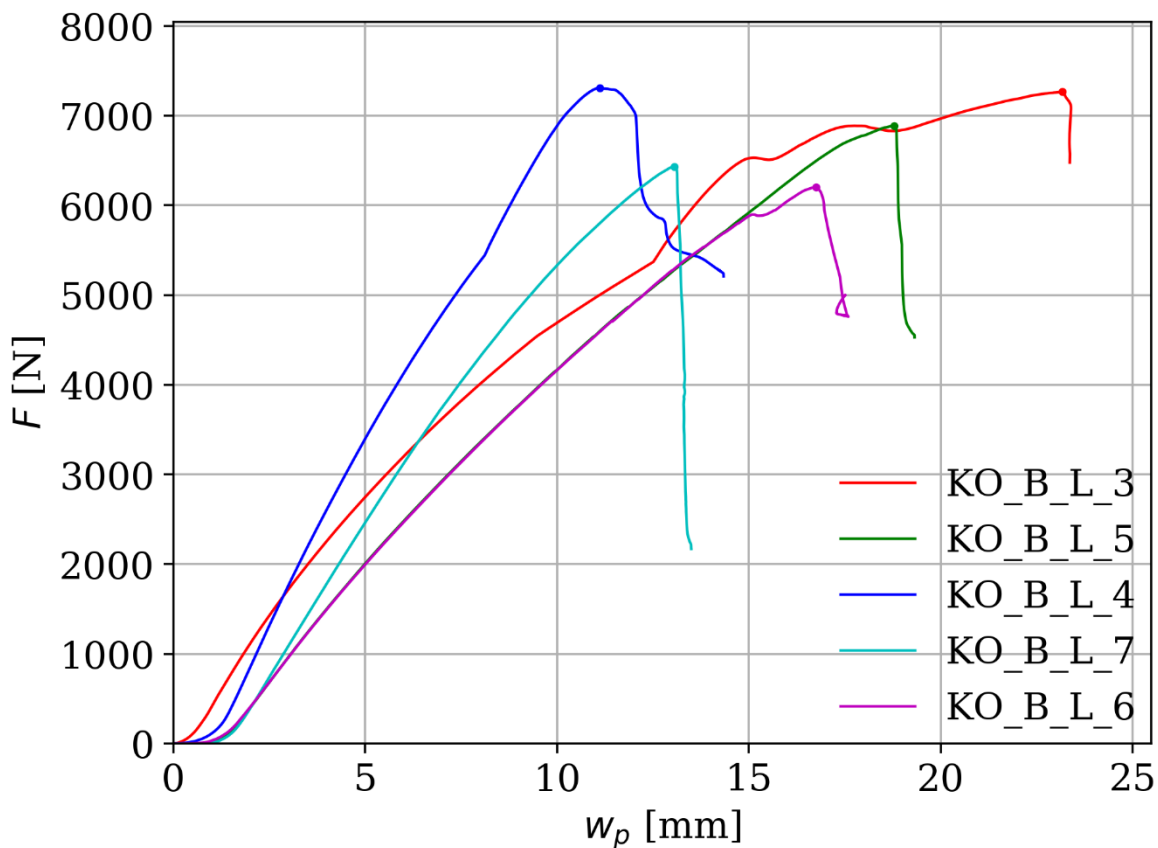
Obrázek č. 29 - KO_B_OL_4 po zkoušce [autor práce]

Kompozit - ohyb (L profil)

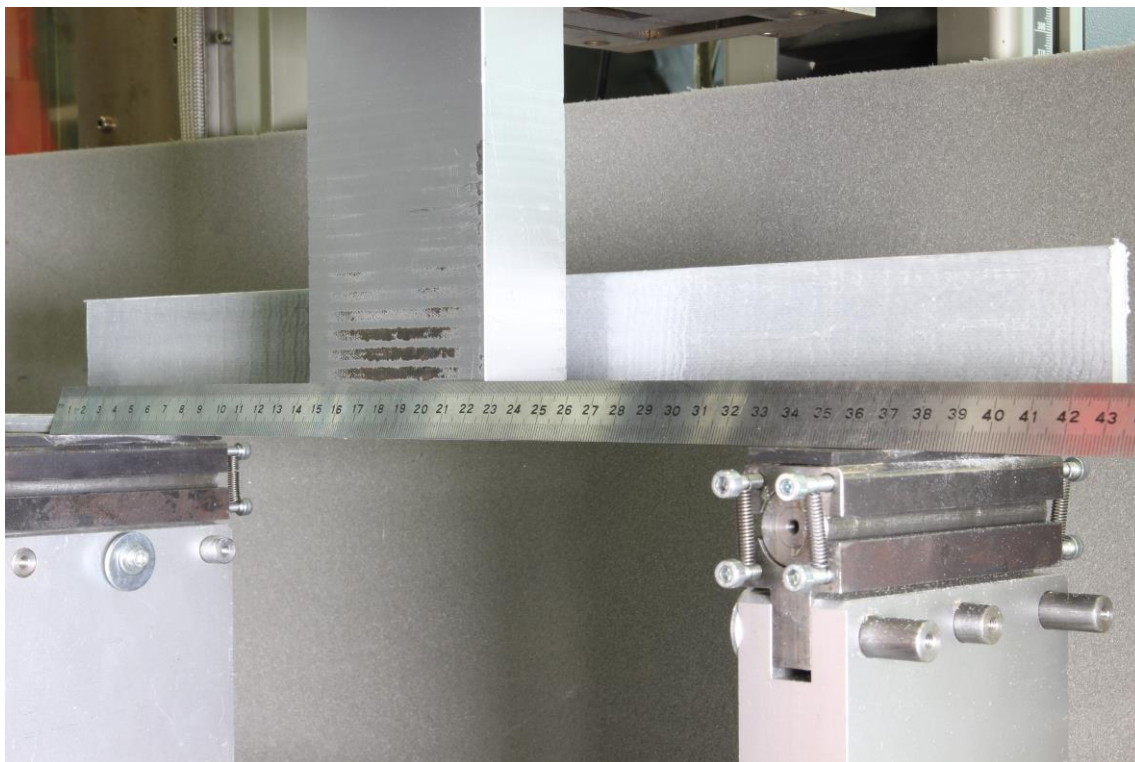
KOMPOZIT - ohyb (L profil)				
OZNAČENÍ	DÉLKA [mm]	ŠÍŘKA [mm]	VÝŠKA [mm]	TLOUŠŤKA [mm]
KO_B_L_3	450	50	50	6
KO_B_L_4	450	50	50	6
KO_B_L_5	450	60	40	6
KO_B_L_6	450	60	40	6
KO_B_L_7	450	40	40	6

Tabulka č. 5 - Rozměry vzorků KO_B_L [autor práce]

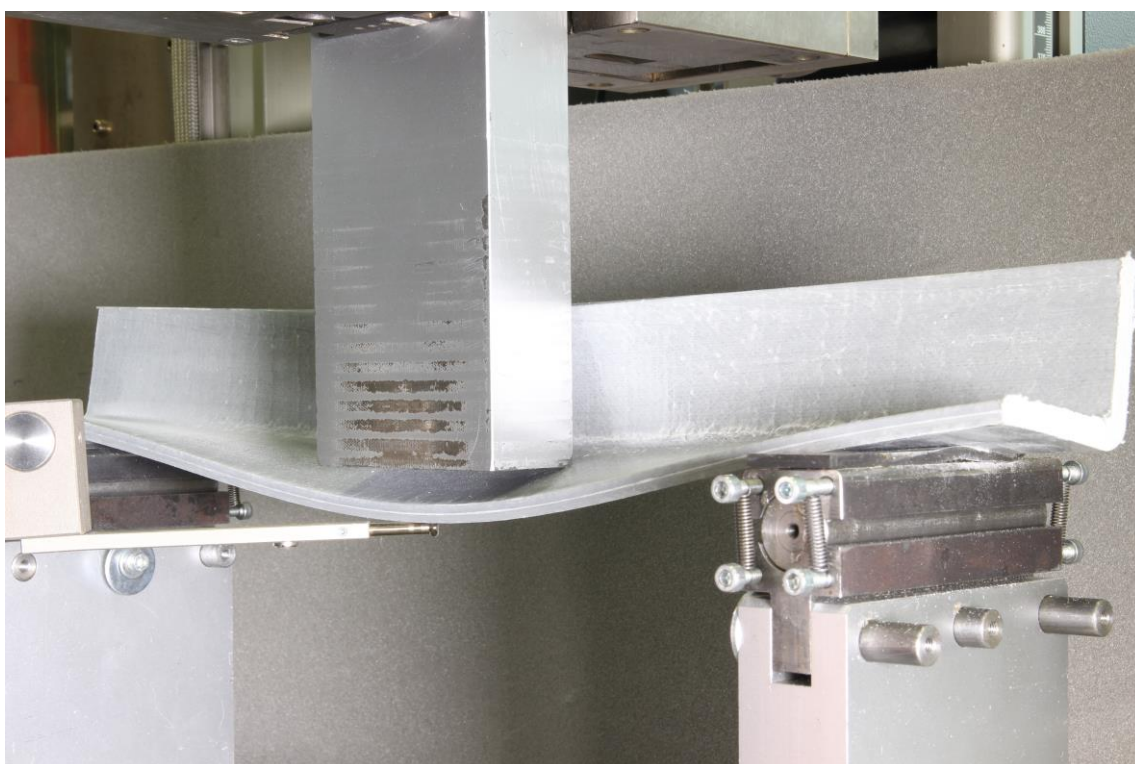
Datum zkoušení	5. 4. 2024
Čas zkoušení	10:20 - 12:45
Rychlost zatěžovací síly	2mm/min.
Rozteč podpor	360 mm



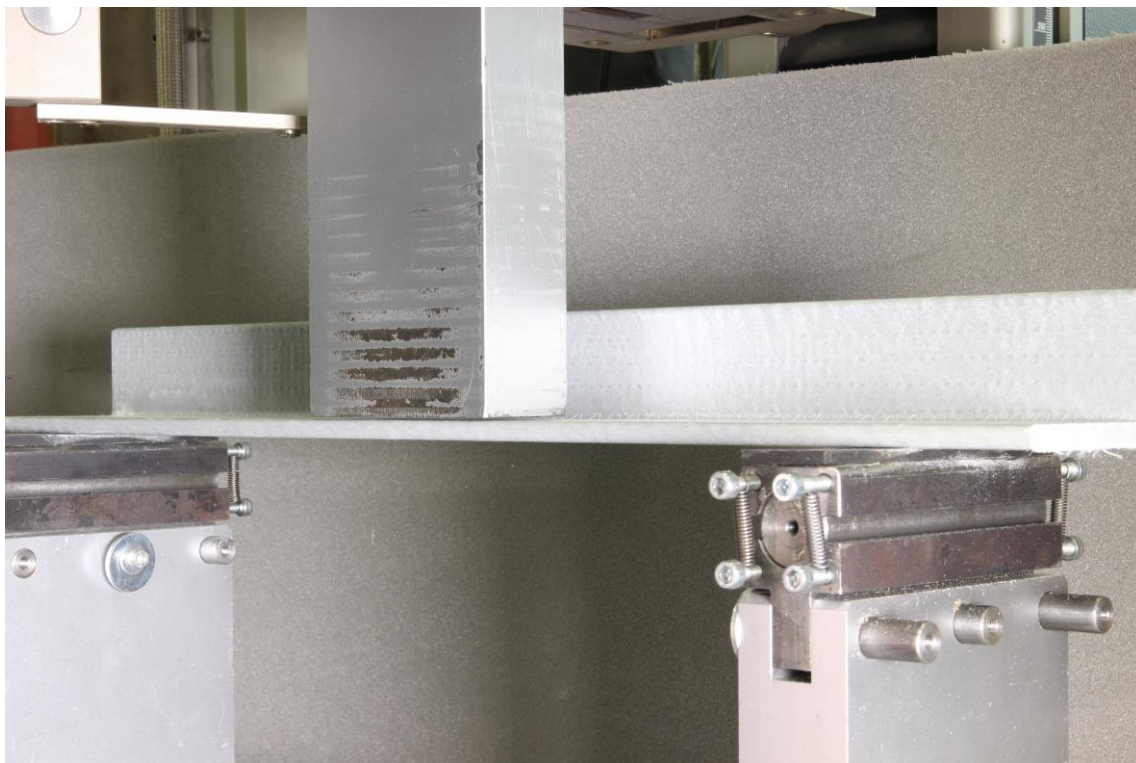
Obrázek č. 30 - Grafické výsledky vzorků KO_B_L [autor práce]



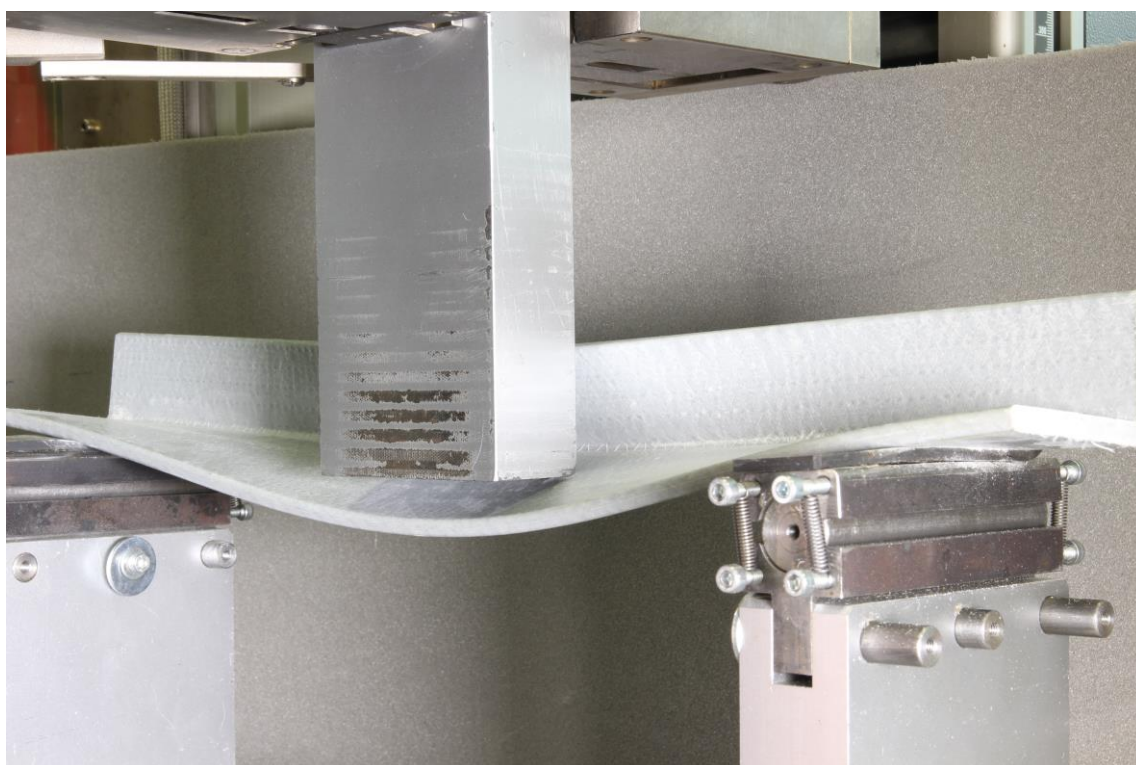
Obrázek č. 31 - KO_B_L_4 před zkouškou [autor práce]



Obrázek č. 32 - KO_B_L_4 po zkoušce [autor práce]



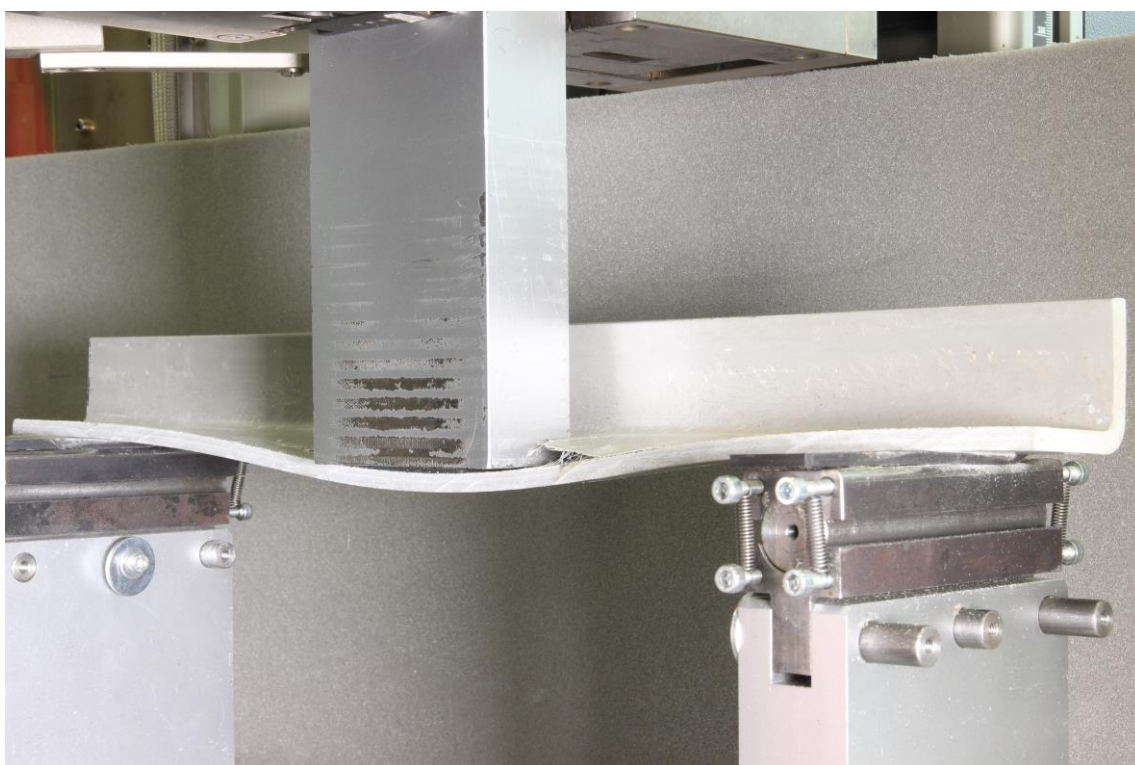
Obrázek č. 33 - KO_B_L_5 před zkouškou [autor práce]



Obrázek č. 34 - KO_B_L_5 po zkoušce [autor práce]



Obrázek č. 35 - KO_B_L_7 před zkouškou [autor práce]



Obrázek č. 36 - KO_B_L_7 po zkoušce [autor práce]

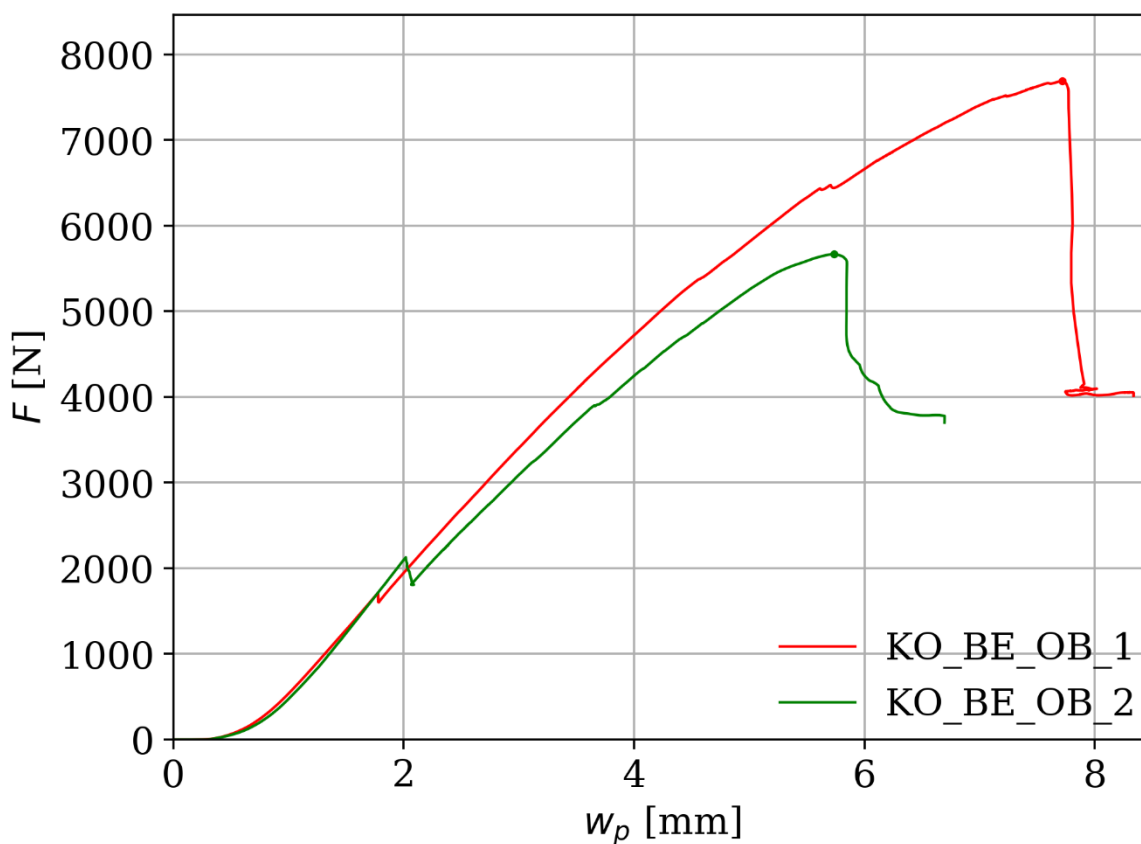
Kompozit - ohyb (čtvercový profil)

U těchto čtvercových profilů bylo zvoleno, oproti předešlým vzorkům, zatížení na hranu vzorku.

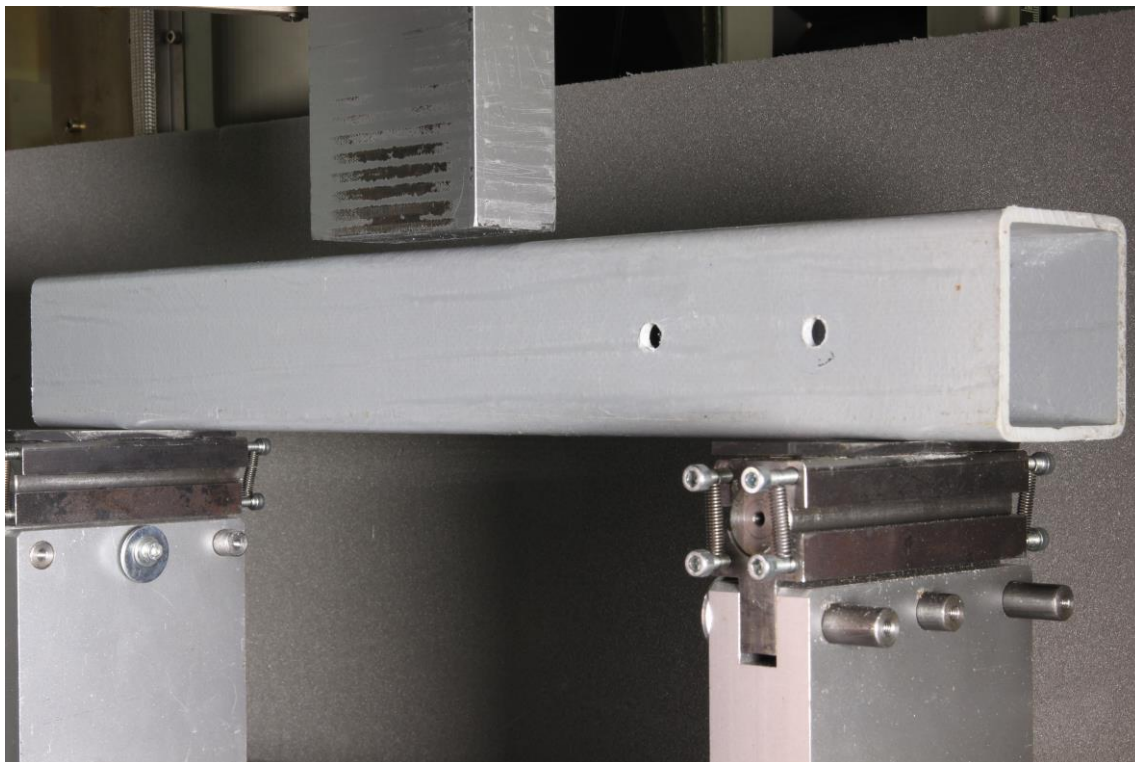
KOMPOZIT - ohyb (čtvercový profil)			
OZNAČENÍ	DÉLKA [mm]	ŠÍŘKA [mm]	TLOUŠKA [mm]
KO_BE_OB_1	450	60	4
KO_BE_OB_2	450	60	4

Tabulka č. 6 - Rozměry vzorků KO_BE_OB [autor práce]

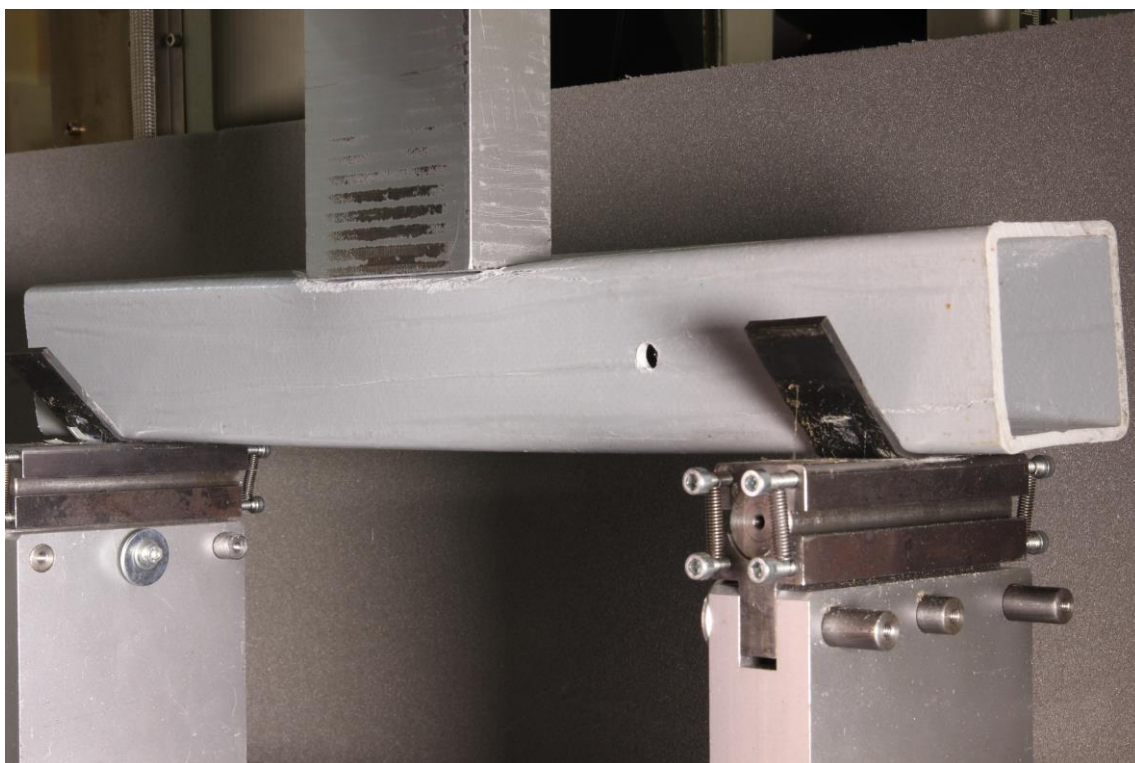
Datum zkoušení	9. 4. 2024
Čas zkoušení	8:05 - 8:50
Rychlost zatěžovací síly	2mm/min.
Rozteč podpor	360 mm



Obrázek č. 37 - Grafické výsledky vzorků KO_BE_OB [autor práce]



Obrázek č. 38 - KO_BE_OB_1 před zkouškou [autor práce]



Obrázek č. 39 - KO_BE_OB_1 po zkoušce [autor práce]

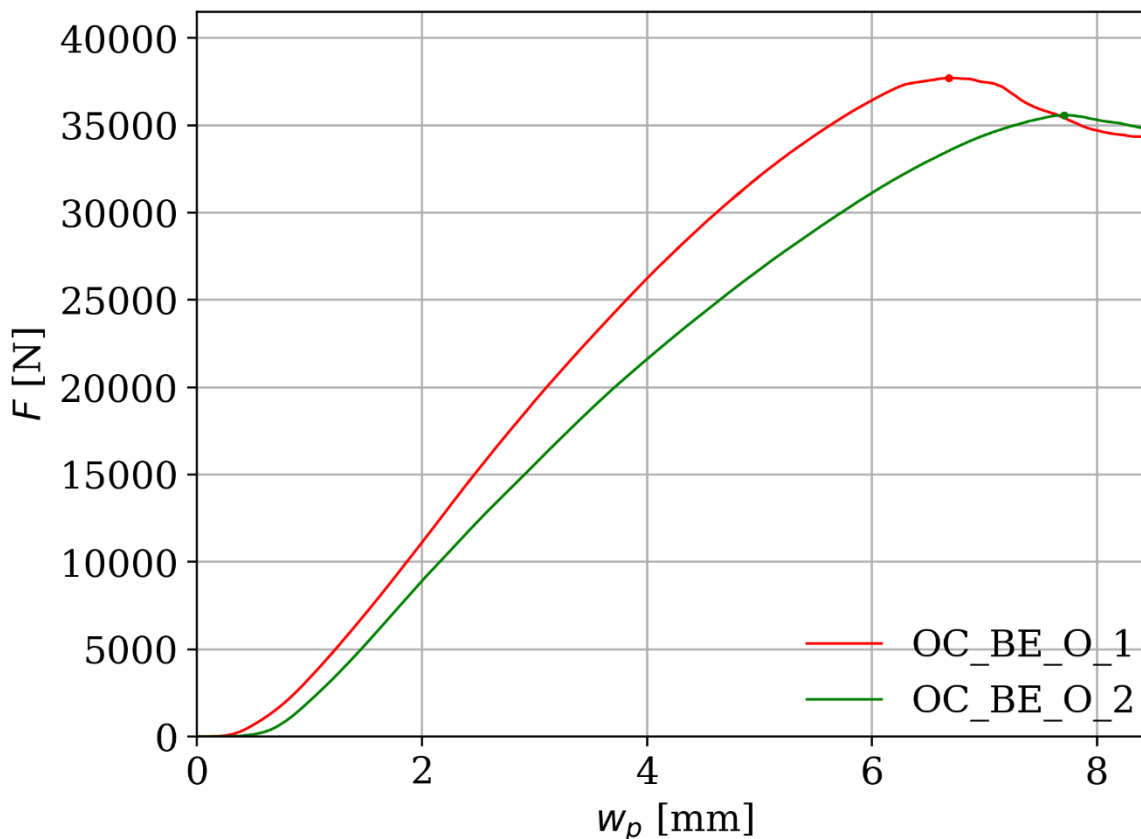
Ocel - ohyb (čtvercový profil)

U těchto čtvercových profilů bylo zvoleno zatížení na hranu vzorku.

OCEL - ohyb (čtvercový profil)			
OZNAČENÍ	DÉLKA [mm]	ŠÍŘKA [mm]	TLOUŠKA [mm]
OC_BE_O_1	450	60	3
OC_BE_O_2	450	60	3

Tabulka č. 7 - Rozměry vzorků OC_BE_O [autor práce]

Datum zkoušení	9. 4. 2024
Čas zkoušení	8:05 - 8:50
Rychlost zatěžovací síly	2mm/min.
Rozteč podpor	360 mm



Obrázek č. 40 - Grafické výsledky vzorků OC_BE_O [autor práce]



Obrázek č. 41 - OC_BE_O_2 před zkouškou [autor práce]



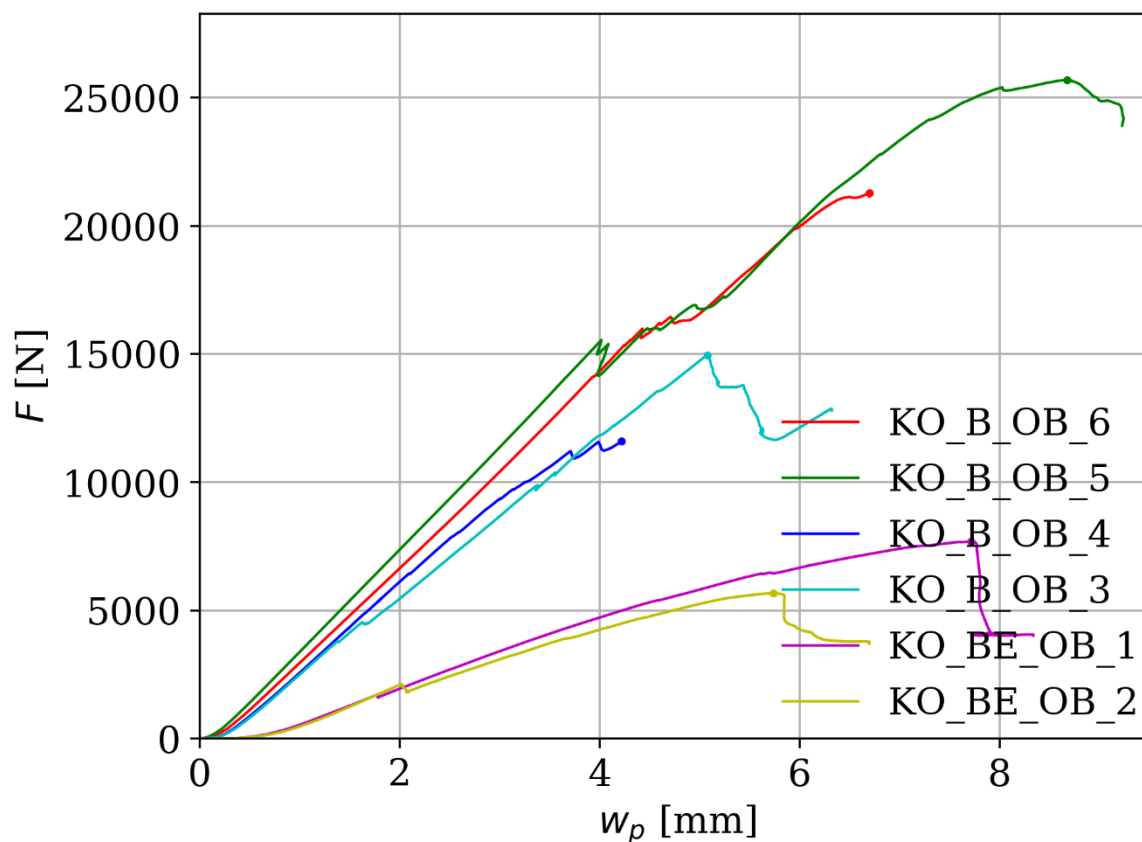
Obrázek č. 42 - OC_BE_O_2 po zkoušce [autor práce]

Kompozit - ohyb (čtvercový profil)

U těchto kompozitů byla zatěžovací síla mířena do těžiště vzorku a poté na hranu vzorku. Je zřejmé, že chování vzorku a zatěžovací síla je velmi odlišná.

KOMPOZIT - ohyb (čtvercový profil)			
OZNAČENÍ	DÉLKA [mm]	ŠÍŘKA [mm]	TLOUŠŤKA [mm]
zatížení do těžiště vzorku			
KO_B_OB_3	450	50	4
KO_B_OB_4	450	50	4
KO_B_OB_5	450	60	4
KO_B_OB_6	450	60	4
zatížení na hranu vzorku			
KO_BE_OB_1	450	60	4
KO_BE_OB_2	450	60	4

Tabulka č. 8 - Rozměry vzorků KO_B_OB a KO_BE_OB [autor práce]



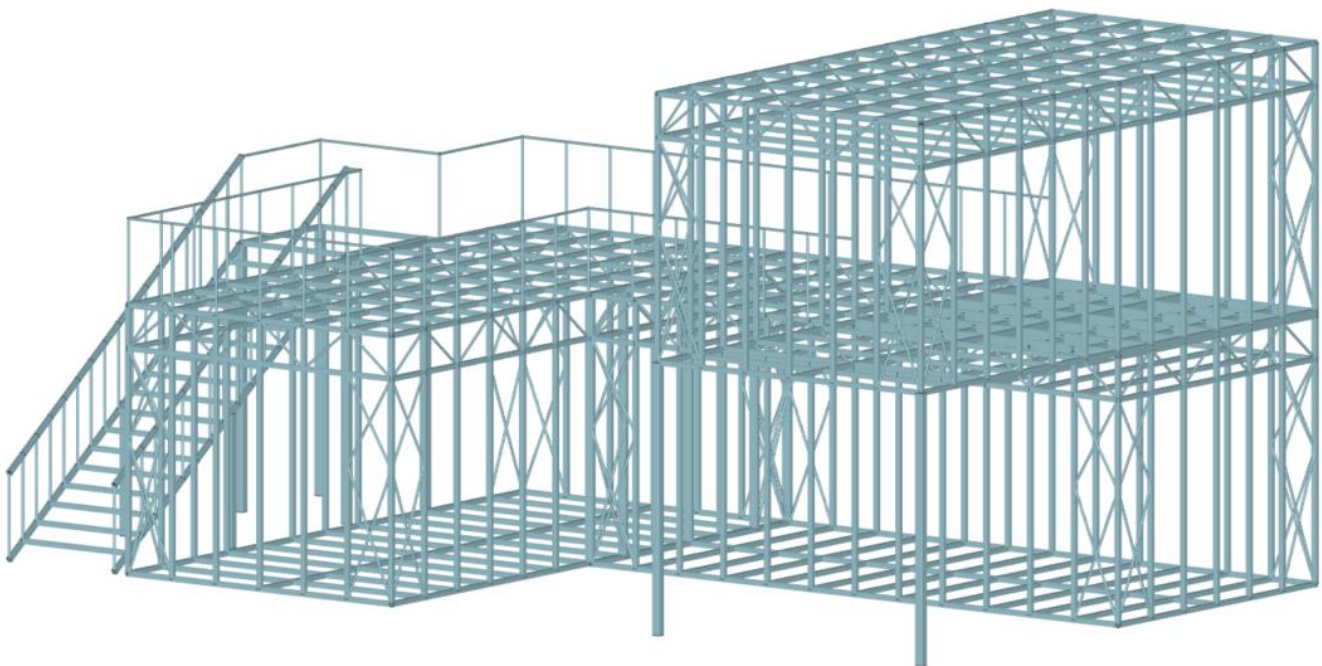
Obrázek č. 43 - Grafické výsledky vzorků KO_B_OB a KO_BE_OB [autor práce]

Referenční model

Součástí praktické části bylo vypracování 3D modelu v programu FIN EC 3D pod odborným dohledem vedoucího práce. Model tvoří halový vestavek, který je naprojektován jako dvoupodlažní kontejnerového typu. Modely byly vytvořeny dva, jeden z ocele, druhý z kompozitu.

Dle zatěžovacích stavů a stylu uložení byly stanoveny dimenze pro ocelové prvky. Poté se za podobných rozměrů navrhl model kompozitní a konstrukce se mezi sebou porovnávaly, nejen statickým chováním, ale i hmotností a cenou. Dimenzační prvky kompozitní konstrukce byly poté odzkoušeny v laboratoři.

Celkový návrh, včetně zatěžovacích stavů a výsledných dimenzí jednotlivých prvků, jsou součástí přílohy této diplomové práce.



Obrázek č. 44 - Ocelový model referenční konstrukce [autor práce]

Závěr

Cílem diplomové práce bylo popsání halového vestavku, jejich hlavní rozdělení, možnost provedení, uvedení hlavních výhod a nevýhod. Důležité bylo také popis provedení TZB do těchto konstrukcí. Dále bylo popsáno statické posouzení ocelových i kompozitních prvků z hlediska jejich namáhání a poruch. Je zřejmé, že kompozit se postupem času dostává na vrchol k ostatním hlavním stavebním materiálům a proto je nutné vědět, co může v dané situaci způsobovat jejich porušení.

Praktická část se zabývala posudkem jednotlivých kompozitních a ocelových prvků. Díky laboratorní zkoušce bylo zjištěno jejich kritický zlom při zatížení. U dvou zkoušek byl proveden ohyb na hranu prvku, nikoliv na střed, a to proto, aby se ukázalo statické chování prvku.

Součástí praktické části byl vyhotoven model referenční konstrukce ve formě halového vestavku, kde právě dimenzační prvky kompozitní konstrukce byly odzkoušeny. Mimo programu FIN EC 3D byl použit softwarový program RONN a BendiT, ve kterých byla zjištěna správnost výsledných sil.

Výpočtová část ze všech programů je také součástí této diplomové práce.

Seznam literatury

- [1] *LIKO-S*. Online. Dostupné z: <https://www.liko-vestavky.cz/cs/varianty-vestavku>. [cit. 2024-05-15].
- [2] *Polymont*. Online. Dostupné z: <https://www.polymont.cz/halove-vestavby/>. [cit. 2024-05-15].
- [3] *Borabela s.r.o.* Online. Dostupné z: <https://www.borabela.com/reference/vestavby-do-haly/>. [cit. 2024-05-15].
- [4] *CB Profil*. Online. Dostupné z: <https://www.cbprofil.cz/sendvicove-panely>. [cit. 2024-05-15].
- [5] *Idea StatiCa*. Online. Dostupné z: <https://www.ideastatica.com/cz/blog/moderni-konstrukce-vs-otvory-v-nosnicich>. [cit. 2024-05-15].
- [6] *Ocelové konstrukce*. Online. Dostupné z: <https://docplayer.cz/16556435-4-prednaska-ocelove-konstrukce-vs-technicka-univerzita-ostrava-fakulta-stavebni-podes-1875-este-milos-rieger.html>. [cit. 2024-05-15].
- [7] *Prostý tah*. Online. Dostupné z: <https://ppt-online.org/443869>. [cit. 2024-05-15].
- [8] *Namáhání na smyk*. Online. Dostupné z: https://www.spszengrova.cz/wp-content/uploads/2020/04/13_MEC_NAMAHANI_NA_SMYK_2_ROCNIK_1_CAST-UT.pdf. [cit. 2024-05-15].
- [9] *Složená namáhání*. Online. Dostupné z: https://www.spszengrova.cz/wp-content/uploads/2020/04/16_MEC_SLOZENA_NAMAHANI_2_ROCNIK-UT.pdf. [cit. 2024-05-15].
- [10] *Druhy namáhání*. Online. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/17773642/>. [cit. 2024-05-15].
- [11] *Mechanika kompozitů*. Online. Dostupné z: <file:///C:/Users/Uzivatel/Downloads/FSI-UMT-ucebni%20text-Mechanika%20kompozit%C5%AF-121217.pdf>. [cit. 2024-05-15].
- [12] *Zwick Roell*. Online. Dostupné z: <https://www.zwickroell.com/cs/oblasti-pouziti/kompozitni-materialy/astm-d3039-zkouska-tahem-kompozitu/#c137546>. [cit. 2024-05-15].
- [13] *InLIKO*. Online. Dostupné z: https://www.poziadavka.sk/katalogy/www.poziadavka.sk_3126_40610.pdf. [cit. 2024-05-15].
- [14] *VERTI*. Online. Dostupné z: <https://www.verti.cz/produkt/verti-modular/>. [cit. 2024-05-15].
- [15] *Mr. Merkur*. Online. Dostupné z: <https://www.merkurkonstrukce.cz/vestavba-do-haly/>. [cit. 2024-05-15].
- [16] *HalyComp*. Online. Dostupné z: <https://halycomp.cz/montovane-haly/halove-vestavby-a-vestavky>. [cit. 2024-05-15].
- [17] *Zákony pro lidi*. Online. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2009-268>. [cit. 2024-05-15].

[18] *Kombinované namáhání*. Online. Dostupné z: <https://euler.fav.zcu.cz/kmet/pp/kombinovane-namahani/kombinovane-namahani.pdf>. [cit. 2024-05-15].

[19] *Mezní stavy*. Online. Dostupné z: <https://people.fsv.cvut.cz/~machacek/pomucky/MSU-tah-prosty-tlak-smyk-ohyb-krouceni-kombinace.pdf>. [cit. 2024-05-15].

[20] *Prvky kovových konstrukcí*. Online. Dostupné z: https://www.fce.vutbr.cz/KDK/horacek.m1/BO002/BO002_Podklady_do_cviceni.pdf. [cit. 2024-05-15].

[21] *Tzbinfo.cz*. Online. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/172-vypocet-pruhybu-a-ohyboveho-momentu-nosniku>. [cit. 2024-05-15].

[22] VRANÝ, Tomáš a WALD, František. *OCELOVÉ KONSTRUKCE - Tabulky*. Online. Praha: ČVUT, 2005. [cit. 2024-05-20].

[23] *Prefa kompozity*. Online. Dostupné z: <https://www.prefa-kompozity.cz/technologie-vyroby/materialove-vlastnosti/>. [cit. 2024-05-15].

ČSN EN 1990 Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí

ČSN EN 1991 Eurokód 1: Zatížení konstrukcí

ČSN EN 1993 Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí

Seznam obrázků

Obrázek č. 1 - Příklad halového zvýšeného vestavku se sendvičovým opláštěním [2]	12
Obrázek č. 2 - Příklad halového dvoupodlažního vestavku [2]	13
Obrázek č. 3 - Příklad realizace ocelového vestavku se SDK pláštěm [3]	13
Obrázek č. 4 - Příklad kotevní panelů [4]	14
Obrázek č. 5 - Příklad interiérového vybavení TZB [2]	15
Obrázek č. 6 - Průběh napětí oslabeného průřezu [5]	19
Obrázek č. 7 - Příklady uložení nosníků [6]	22
Obrázek č. 8 - Příklad namáhání šikmým ohybem [7]	24
Obrázek č. 9 - Příklad smykového namáhání [8]	26
Obrázek č. 10 - Příklad kombinovaného namáhání ohyb a tah [9]	27
Obrázek č. 11 - Příklad kombinovaného namáhání ohyb a tlak [9]	29
Obrázek č. 12 - Příklad kombinovaného namáhání ohyb a smyk [10]	30
Obrázek č. 13 - Nepřípustná a přípustná porušení [12]	31
Obrázek č. 14 - Příklad podélného porušení kompozitů [11]	32
Obrázek č. 15 - Příklad příčného porušení kompozitů [11]	32
Obrázek č. 16 - Nepřípustná a přípustná porušení [12]	33
Obrázek č. 17 - Příklad podélného porušení kompozitů [11]	33
Obrázek č. 18 - Příklad příčného porušení kompozitů [11]	34
Obrázek č. 19 - Příklad smykového porušení kompozitů [11]	35
Obrázek č. 20 - Připravené vzorky pro zkoušení [autor práce]	36
Obrázek č. 21 - Zkušební stroj [autor práce]	38
Obrázek č. 22 - Grafické výsledky vzorků KO_B_OB [autor práce]	40
Obrázek č. 23 - KO_B_OB_3 před zkouškou [autor práce]	41
Obrázek č. 24 - KO_B_OB_3 po zkoušce [autor práce]	41
Obrázek č. 25 - KO_B_OB_5 před zkouškou [autor práce]	42
Obrázek č. 26 - KO_B_OB_5 po zkoušce [autor práce]	42
Obrázek č. 27 - Grafické výsledky vzorků KO_B_OL [autor práce]	43
Obrázek č. 28 - KO_B_OL_4 před zkouškou [autor práce]	44

Obrázek č. 29 - KO_B_OL_4 po zkoušce [autor práce]	44
Obrázek č. 30 - Grafické výsledky vzorků KO_B_L [autor práce]	45
Obrázek č. 31 - KO_B_L_4 před zkouškou [autor práce]	46
Obrázek č. 32 - KO_B_L_4 po zkoušce [autor práce]	46
Obrázek č. 33 - KO_B_L_5 před zkouškou [autor práce]	47
Obrázek č. 34 - KO_B_L_5 po zkoušce [autor práce]	47
Obrázek č. 35 - KO_B_L_7 před zkouškou [autor práce]	48
Obrázek č. 36 - KO_B_L_7 po zkoušce [autor práce]	48
Obrázek č. 37 - Grafické výsledky vzorků KO_BE_OB [autor práce]	49
Obrázek č. 38 - KO_BE_OB_1 před zkouškou [autor práce]	50
Obrázek č. 39 - KO_BE_OB_1 po zkoušce [autor práce]	50
Obrázek č. 40 - Grafické výsledky vzorků OC_BE_O [autor práce]	51
Obrázek č. 41 - OC_BE_O_2 před zkouškou [autor práce]	52
Obrázek č. 42 - OC_BE_O_2 po zkoušce [autor práce]	52
Obrázek č. 43 - Grafické výsledky vzorků KO_B_OB a KO_BE_OB [autor práce]	53
Obrázek č. 44 - Ocelový model referenční konstrukce [autor práce]	54

Seznam tabulek

Tabulka č. 1 - Mechanické vlastnosti kompozitů [23]	35
Tabulka č. 2 - Označení jednotlivých vzorků [autor práce]	37
Tabulka č. 3 - Rozměry vzorků KO_B_OB [autor práce]	40
Tabulka č. 4 - Rozměry vzorků KO_B_OL [autor práce]	43
Tabulka č. 5 - Rozměry vzorků KO_B_L [autor práce]	45
Tabulka č. 6 - Rozměry vzorků KO_BE_OB [autor práce]	49
Tabulka č. 7 - Rozměry vzorků OC_BE_O [autor práce]	51
Tabulka č. 8 - Rozměry vzorků KO_B_OB a KO_BE_OB [autor práce]	53

A. 3 Přílohová část