



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební  
Katedra pozemních staveb

Diplomová práce

Optimalizace množství hybridní výztuže v betonovém panelu  
Optimizing the amount of hybrid reinforcement in a concrete panel

Studijní program:	Stavební inženýrství
Studijní obor:	Konstrukce pozemních staveb
Vedoucí práce:	Ing. Tomáš Vlach, Ph.D.
Vypracoval:	Bc. Jaroslav Novotný

## Zadání diplomové práce

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Thákurova 7, 166 29 Praha 6



## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Novotný Jméno: Jaroslav Osobní číslo: 477006

Zadávající katedra: Katedra konstrukcí pozemních staveb (K124)

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor/specializace: Konstrukce pozemních staveb

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Optimalizace množství hybridní výztuže v betonovém panelu

Název diplomové práce anglicky: Optimizing the amount of hybrid reinforcement in a concrete panel

Pokyny pro vypracování:

- rešerše se zaměřením na aplikace hybridních výztuží do panelů, výhody a nevýhody
- vytvoření modelu pomocí zvoleného výpočetního programu (např. MS Excel, Mathcad apod.)
- optimalizace kombinace tradiční ocelové a různé kompozitní výztuže pro MSU
- experimentální ověření únosnosti vybraného panelu o rozměru přizpůsobeném laboratorním podmínkám
- vyhodnocení základních environmentálních parametrů dle dohody s vedoucím na zvolené varianty panelů

Seznam doporučené literatury:

- QU, Wenjun; ZHANG, Xiaoliang; HUANG, Haiqun. Flexural behavior of concrete beams reinforced with hybrid (GFRP and steel) bars. Journal of Composites for construction, 2009, 13.5: 350-359
- QIN, Renyuan; ZHOU, Ao; LAU, Denvid. Effect of reinforcement ratio on the flexural performance of hybrid FRP reinforced concrete beams. Composites Part B: Engineering, 2017, 108: 200-209

Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Tomáš Vlach, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 19. 9. 2022

Termín odevzdání DP v IS KOS: 9. 1. 2023

Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

19.9.2022

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

## Abstrakt

Náplní předkládané práce je ověření možnosti použití tradiční ocelové a kompozitní výztuže v betonových vyztužených konstrukcích na vzorovém příkladu stropního panelu. Na začátku v rešeršní části jsou popsány vlastnosti kompozitů obecně, betonu, ocelové výztuže, kompozitní výztuže a průzkum již provedených prací na téma hybridní výztuže. Dále se práce zaměřuje na vzájemné porovnání panelů dle použité výztuže a betonu po finanční stránce pomocí python skriptu. Závěrem je navržen běžný stropní panel na typický rozpon ve stavebnictví s použitím hybridní výztuže a dále pak návrh, realizace a testování experimentálního zmenšeného panelu v laboratoři.

## Abstract

The aim of the thesis is the use of traditional steel reinforcement and composite reinforcement in concrete ceiling panel. At the beginning composites, concrete, steel reinforcement and composite are described in general. Then several materials like concrete, steel reinforcement a composite reinforcement are described more in detail. Also, several previously published papers about hybrid reinforcement are briefly described. Then the thesis is focused on use of a python script designed to calculate the most favorable ceiling panel by price. The last part of the thesis is about the design of a general ceiling concrete panel reinforced with hybrid reinforcement and its experimental verification.

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto závěrečnou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této závěrečné práce, je legální.

.....  
Podpis

V Praze dne 9.1.2023

Jaroslav Novotný

## Poděkování

Rád bych poděkoval všem, kteří mi pomáhali s přípravou práce, nebo mě jakkoliv podporovali během jejího vytváření. Zejména bych pak chtěl poděkovat mým rodičům, kteří mě celé moje studium podporovali, mým přátelům, kteří mi byli vždy nápomocní, a hlavně mému vedoucímu práce Ing. Tomáši Vlachovi, Ph.D., který mi byl ve všech směrech oporou.

## Obsah

Úvod .....	8
Úvod do problematiky .....	8
Motivace .....	9
Cíl práce.....	9
Seznam použitých symbolů.....	10
Teoretická část .....	12
Rešerše .....	12
1. Kompozity obecně .....	12
2. Beton .....	13
3. Železobeton .....	15
4. Ocelová výztuž .....	16
5. Vysokohodnotný beton .....	17
6. Kompozitní výztuž.....	18
7. Rešerše stávajících aplikací s hybridní výztuží.....	24
8. Shrnutí obecných vlastností FRP .....	28
Optimalizační program v jazyce Python .....	30
1. Úvod.....	30
2. Optimalizace průměrů výztuže.....	31
3. Optimalizace pevnosti betonu.....	33
4. Optimalizace neocelové výztuže .....	35
5. Závěr optimalizace.....	38
Návrh teoretického běžného stropního panelu .....	39
Výpočet MSU a MSP .....	39
6. Vyhodnocení základních environmentálních parametrů .....	47

Návrh experimentálního stropního panelu .....	48
1.    Předběžný výpočet MSU a MSP.....	48
Experimentální část.....	53
1.    Návrh experimentu.....	53
2.    Příprava vzorků .....	58
3.    Průběh experimentu a naměřené hodnoty.....	63
Závěr.....	71
Zdroje .....	73
Seznam obrázků, fotek a grafů .....	76
Python skript použitý pro optimalizaci MSÚ .....	78

## Úvod

### Úvod do problematiky

Diplomová práce se zabývá základním pohledem a hodnocením možnosti využití hybridní výztuže v betonovém panelu.

S technickým vývojem a stále se zvyšujícími nároky na materiály dochází k vývoji nových i vylepšování stávajících materiálů, které mají vysokou pevnost, odolnost a houževnatost. Jsou využívány v nejnáročnějších odvětvích jako je kosmonautika, letectví, nebo automobilový průmysl. I přes svoje nesporné výhody, mají tyto materiály i nevýhody, které v této práci postupně rozeberu a pokusím se minimalizovat jejich negativní dopad na výsledný produkt. Práce má za cíl hledat co možná nejlepší poměr klasické ocelové a „moderní“ kompozitní výztuže a jejich následné neoptimálnější umístění v konstrukci.

Teoretická část této práce je rozdělena do 4 částí.

První částí je rešerše používaných materiálů, průzkum dnes používaných metod a již provedených experimentů na stejná či související témata. Zaměřuje se na použití železobetonu, případně i vysokohodnotného betonu a různých netradičních výztuží, případně jejich kombinací s jinými výztužnými materiály.

Druhá část se zaměřuje na vývoj jednoduchého programu v programovacím jazyku Python a jeho následného použití k porovnání únosností modelových stropních panelů o různých tloušťkách, pevnostech betonu, průměrech výztuží a použití kompozitní výztuže.

Třetí část práce je v logické návaznosti zaměřena na návrh typického stropního panelu s běžným rozponem používaným ve stavebnictví s hybridní výztuží (ocelová a kompozitní) a na následnou optimalizaci tohoto panelu.

Poslední čtvrtá část práce je zaměřena na návrh rozměrově menšího stropního panelu s hybridní výztuží přizpůsobeného časovým možnostem a možnostem dostupného zkušebního zařízení, která vychází z návrhu panelu reálných rozměrů v předchozí části práce. Na tomto experimentálním panelu jsou následně ověřeny mé předpoklady z výpočtu. Naměřené hodnoty jsou porovnávány s vypočtenými hodnotami. Praktická část je tedy



zaměřena na přípravu a výrobu navržených panelů a na jejich následné experimentální testování v laboratoři.

## Motivace

Hlavní motivací pro vytvoření této diplomové práce byla možnost propojení teoretických výpočtů s experimentální částí a vidět tak chování materiálů různých výztuží, obecně vyztuženého betonového průřezu, při reálném experimentu. Další motivací byla možnost podílet se na prověření použitelnosti nových materiálů ve stavebnictví, a tak možná i mírně napomocť dalšímu vývoji. Poslední motivací byla moje vrozená touha po detailním pochopení fungování výpočtů a obecně maximálním přenesení výpočetní zátěže z člověka na počítač, což mi bylo umožněno při vývoji programu v jazyce Python.

## Cíl práce

Hlavním cílem práce je správný návrh a optimalizace vyztuženého betonového stropního panelu na namáhání ohybovým momentem a následné jednoduché ověření předpokládaných vlastností experimentem. Vypočtené a naměřené hodnoty budou porovnány a následně bude vyhodnoceno, jak moc reálné chování koresponduje s předpokládaným chováním stanoveným na základě výpočtu. Dále se práce věnuje vyhodnocení základních environmentálních parametrů vybraných variant panelů dle dohody s vedoucím. Výsledkem tedy je porovnání výhod a nevýhod jednotlivých variant v širších souvislostech.

## Seznam použitých symbolů

$b$	šířka panelu
$h$	výška panelu
$l$	délka panelu
$c$	krytí výztuže
$E_{cm}$	střední modul pružnosti betonu v tlaku
$f_{ck}$	charakteristická pevnost betonu v tlaku
$f_{cd}$	návrhová pevnost betonu v tlaku
$E_s$	modul pružnosti oceli
$f_{yk}$	charakteristická pevnost oceli
$f_{yd}$	návrhová pevnost oceli v tahu
$\varnothing_y$	průměr ocelové výztuže
$S_y$	rozteč ocelové výztuže
$E_{\check{c}}$	modul pružnosti kompozitní čedičové výztuže
$f_{\check{c}k}$	charakteristická pevnost kompozitní čedičové výztuže
$f_{\check{c}d}$	návrhová pevnost kompozitní čedičové výztuže
$\varnothing_{\check{c}}$	průměr kompozitní čedičové výztuže
$S_{\check{c}}$	rozteč kompozitní čedičové výztuže
$A_{s,min}$	minimální plocha výztuže
$S_{max}$	maximální rozteč výztuže
$A_{s,prov}$	plocha výztuže

Hodnoty dle ČSN EN 1992-1-1 ed.2 kapitola 7.4.3.[1]

$\alpha$	uvažovaná přetvárná veličina, např. poměrné přetvoření, křivost nebo pootočení
$\alpha_I, \alpha_{II}$	hodnoty parametru vypočteného pro stav bez trhlin a s plně rozvinutými trhl.
$\zeta$	rozdělovací součinitel (kterým se umožňuje zohlednit takové zpevnění průřezu)
$\sigma_s$	napětí v tahové výztuži vypočtené pro průřez s trhlinami
$\sigma_{sr}$	napětí v tahové výztuži vypočtené pro průřez s trhlinami při zatížení způsobujícím vznik prvních trhlin

$\Phi_{(\infty,t_0)}$	součinitel dotvarování pro příslušné zatížení a časový interval
$\epsilon_{cs}$	poměrné přetvoření od celkového smršťování
$S$	statický moment průřezové plochy výztuže k těžišti průřezu
$I$	moment setrvačnosti průřezu
$\alpha_e$	účinný poměr modulů pružnosti
$1/r$	křivost na nosníku od nerovnoměrného zatížení teplotou
$\Delta T$	rozdíl teplot při horním a dolním povrchu prvku
$t_0$	stáří betonu v okamžiku prvního zatížení ve dnech
$h_0$	náhradní rozměr průřezu
$S,N,R$	třídy cementu
$l_t$	dlouhodobé (long-term)
$l_{st}$	krátkodobé (short-term)
$f$	průhyb

## Teoretická část

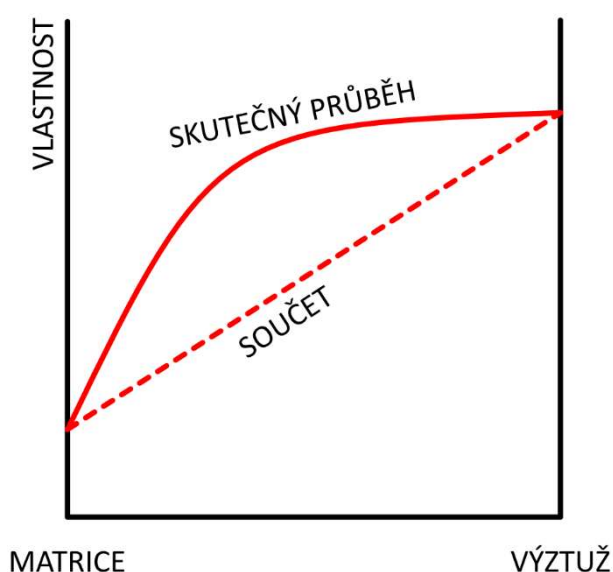
### Rešerše

#### 1. Kompozity obecně

Základním principem kompozitních materiálů je spojení dvou materiálů s rozdílnými vlastnostmi za účelem vytvoření materiálu s jinými vlastnostmi.

Kompozitní materiály jsou známé již od počátků lidské civilizace. Za první kompozitní materiál by se dala považovat hlína smíchaná se slámou, která se používala v Mezopotámii již 4 tisíce let před naším letopočtem.

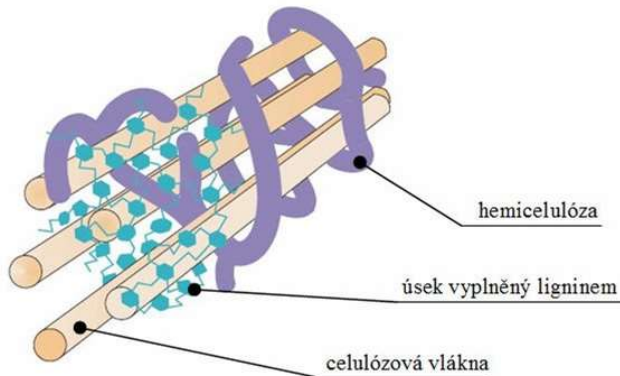
U kompozitních materiálů je sledovatelný jev zvaný synergismus, který znamená, že vlastnosti výsledného materiálu jsou lepší než obyčejný poměrový součet vlastností obou složek[2]. Synergie je velice důležitá, protože díky ní dochází k získání materiálů se zcela novými vlastnostmi. Tyto vlastnosti si do jisté míry můžeme definovat, a tak upravovat výsledné chování kompozitu.



*Obr. 1 - Znárodnění synergismu[3]*

Kompozity se vyskytují i v přírodě, nejznámějším zástupcem přírodních kompozitů je pravděpodobně dřevo, které se skládá z celulózových vláken a ligninu. To, že je dřevo složené z vláken a výplňového materiálu je také důvod diametrálně odlišného chování ve směru vláken a kolmo na vlákna. Ve směru vláken má dřevo vysokou pevnost v tahu, ale zároveň dobře distribuuje vodu. Kolmo k vláknům je pevnost mnohem nižší jak při stlačování, tak i

odtrhávání jednotlivých vláken od sebe. Dřevo každý známe, a proto si myslím, že je dobré jako vzor pro představu, jak v dalších odstavcích zmíněné kompozity vyrobené člověkem mohou fungovat.



Obr. 2 – Skladba dřeva [4]

Pro kompozity, které jsou vytvořeny uměle, je charakteristické, že se vyrábějí různými druhy mechanického mísení nebo spojování jednotlivých složek[5]. Tímto se kompozity liší například od slitin, které jsou jako kompozity také heterogenní. Slitiny však vznikají pomocí fázové přeměny např. při tuhnutí[5].

## 2. Beton

Beton je kompozitní stavební materiál, sestávající z pojiva, plniva, vody, přísad a příměsí[6]. Beton je jedním z nejpoužívanějších materiálů na světě. Nejčastějším druhem betonu je cementový beton, kde je pojivo cement a plnivem je jemné, nebo hrubé kamenivo. Nedílnou součástí výroby betonu je voda.

Po smíchání kameniva, cementu, a vody vzniká tekutá směs, která může mít, dle požadavků a následného použití přísad, různou konzistenci. Vzniklá směs je jednoduše tvarovatelná. Cement reaguje s vodou a vzniká proces zvaný hydratace betonu. Přestože se často říká, že beton získává své vlastnosti vysycháním, jedná se spíše o krystalizaci cementu[7]. Proces krystalizace začíná asi hodinu po smíchání s vodou a provází ho vznik množství tepelné energie. Krystalizace probíhá tím rychleji, čím je vyšší okolní teplota. Příliš vysoké teploty však nejsou ideální, a proto se například při stavbách přehrad musí beton chladit. Proces krystalizace se snižováním teploty zpomaluje až se při teplotě pod +5 °C se úplně zastaví.

Pokud dojde k dlouhodobému poklesu teploty v době zrání betonu pod 0 °C[8], může dojít k jeho trvalému znehodnocení. Beton nepotřebuje ke krystalizaci vzduch, a proto tuhne i pod vodou[9].

Prostý beton (=beton bez výztuže) má vysokou pevnost v tlaku, oproti tomu má velice nízkou pevnost v tahu. Proto se beton kombinuje s dalšími materiály, které výslednému kompozitu dodávají pevnost v tahu tam, kde je to potřeba. V dnešní době se asi nejčastěji používá ocelová výztuž, čímž vzniká tzv. železobeton.

Beton je pevný, před krystalizací dobře tvárný materiál a je velice trvanlivý. Má vysokou pevnost v tlaku, vysokou tepelnou akumulaci a je nehořlavý.

Betony se označují písmenem C a dvojicí čísel rozdělenými lomítkem. Číslo značí charakteristickou válcovou a krychelnou pevnost v MPa. (C16/20 je beton s válcovou pevností 16MPa a krychelnou 20MPa)[10]. Od C50/60 se mluví o tzv. vysokopevnostním betonu (HPC).

Obecně se beton považuje za vyzrálý po 28 dnech[11].

Existují různé druhy speciálních betonů, např. pórobeton, drátkobeton, stříkaný beton, sklobeton, samozhutnitelný beton atd.[6].

K dosažení různých vlastností betonu se používají nejrůznější přísady: zrychlovače tuhnutí, zpomalovače tuhnutí, provzdušňovací přísady, plastifikátory (lepší zpracovatelnost betonu), protimrazové přísady, vodotěsnící přísady, barviva atd[12].

### 3. Železobeton

Železobeton je kompozitní materiál, ve kterém je relativně nízká pevnost betonu v tahu a duktilita kompenzována ocelovou výztuží, která má mnohonásobně vyšší tahovou pevnost i duktilitu [13]. Je jedním z nejpoužívanějších stavebních materiálů [14]. Výztuž je ve většině případů vkládána do bednění před zalitím betonem, jsou však možné i dodatečná vyztužení např. předpínací výztuží. Beton v železobetonových konstrukcích zajišťuje mnoho funkcí, nejdůležitějšími jsou tlaková pevnost, ochrana výztuže před korozi, požární odolnost, držení výztuže na správném místě atd.

První známou budovou, k jejíž výstavbě byl použit železobeton, je Nevianská šikmá věž ve městě Neviansk na Uralu, která byla postavena již v roce 1725 [15].



*Obr. 3 – Nevianská šikmá věž [16]*

## 4. Ocelová výztuž

Za účelem zvýšení únosnosti a snížení deformací betonu se do bednění vkládá tzv. betonářská výztuž (také betonářská ocel), čímž vzniká železobeton. V drtivé většině případů je betonářská ocel tvořena tyčemi s plným kruhovým průřezem. Aby beton a ocel spolupůsobily, je velice důležitá soudržnost, která je u ocelové výztuže zajištěna především tvarovanými výstupky na povrchu tyče, tzv. žebry. Mírná koróze povrchu výztuže před zabetonováním není ke škodě, ba naopak, napomáhá, díky zvětšené morfologii povrchu, soudržnosti. Koróze však nesmí dosáhnout takového stavu, aby se z výztuže odlupovaly a odpadávaly části povrchu.



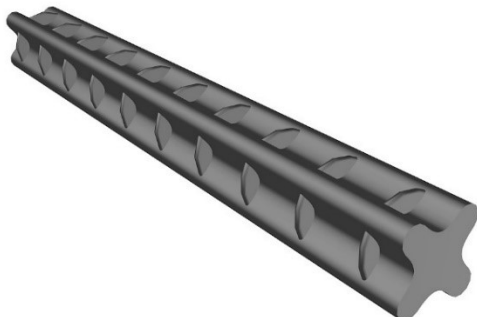
*Obr. 4 – Tradiční ocelová výztuž [17]*

Pevnost oceli v tahu obecně dosahuje 300 až 600 MPa, což je několika násobně vyšší hodnota, než dosahují běžné betony v tlaku. Některé takzvané vysokohodnotné betony přesahují i hodnotu pevnosti v tlaku 100 MPa – HPC (z anglického high performance concrete). Existují i betony označované za ultra-vysokohodnotné – UHPC (z anglického ultra-high performance concrete), které dosahují krychelné pevnosti nad mezi 150 MPa)[18].

V místech s koncentrací vysokého napětí mohou být tyčové ocelové výztuže nahrazeny za tepla válcovanými profily, např. I, IPE, U, HEB, apod. Krom tyčových výztuží a válcovaných profilů se mohou do betonové směsi přidat drátky a vlákna z různými materiály. Potom mluvíme o tzv. drátkobetonech a vláknobetonech.



Pro betonářskou výztuž se vžil slangový název „roxor“ [19], který byl původně určen pouze pro jeden specifický typ výztuže používaný v minulém století, který je vidět na Obr. 5.



*Obr. 5 – Betonářská výztuž typu Roxor [20]*

## 5. Vysokohodnotný beton

Na konci minulého století bylo nutné při stavbě některých náročnějších staveb používat betony s vyššími pevnostmi, než bylo do té doby zvykem. Tím vznikla nová kategorie betonů s názvem „vysokopevnostní betony“. Z dnešního pohledu se nejednalo o úplně speciální betony jako známe dnes, spíše se jednotlivé materiály vybíraly s větší pečlivostí a tím mohla být zajištěna i celkově lepší vlastnosti [21].

Postupem času však nároky na vlastnosti betonu stouply a pouhá lepší kontrola vlastností nestačila. Proto se postupně začaly vyvíjet přísady, díky kterým by se těchto požadovaných vlastností dalo dosáhnout. Jednalo se zejména o plastifikátory a superplastifikátory, díky kterým mohlo dojít ke snížení vodního součinitele v betonu. Důsledkem použití těchto přísad byla změna vlastností, ke kterým patřila zejména vysoká tekutost, vysoký modul pružnosti, vyšší pevnost a vyšší trvanlivost. Termín „vysokopevnostní beton“ již nadále nevystihoval vlastnosti daného materiálu, a tak se začal používat nový termín „vysokohodnotný beton“, jako beton s vysokou pevností, ale zároveň s dalšími užitečnými vlastnostmi [21].

Z materiálového hlediska by se dal vysokohodnotný beton popsat jako beton s velmi nízkou pórovitostí [22]. Těto vlastnosti je dosaženo především použitím menšího množství záměsové vody, díky čemuž jsou částice cementu a minerální příměsi uspořádány mnohem těsněji u sebe [22]. Těsnější uspořádání způsobuje vyšší pevnost, což je jedna z hlavních vlastností vysokohodnotných betonů [22].

## 6. Kompozitní výztuž

### A. Úvod

FRP kompozity jsou obecně materiály složené ze dvou odlišných složek, z nosných vláken, která jsou orientovaná ve směru pnutí výztuže a dále pak polymerní matricí[23]. Výsledné vlastnosti kompozitu jsou dány především typem jednotlivých složek a pak také jejich množstevním poměrem. Šikovnou kombinací těchto dvou složek je možné dosáhnout různých vlastností výsledné výztuže a tím pokrýt různorodé nároky na mechanicko-fyzikální vlastnosti. Ortotropní chování je důležitým rysem výztuže FRP, který je výsledkem jejich fyzikální podstaty – materiálové charakteristiky FRP výztuží dosahují rozdílných hodnot ve směru orientace nosných vláken a ve směru kolmém na tato vlákna[23]. V podélném směru (tj. ve směru orientace vláken) jsou hodnoty výsledných vlastností definovány hlavně vlastnostmi vláken, zatímco v příčném směru je nositelem mechanických vlastností matrice. Obecně by se dalo konstatovat, že FRP výztuže dosahují ve směru vláken násobně (10x až 100x) lepších hodnot než ve směru kolmo k vláknům[23]. Nejběžnějšími typy použitých vláken jsou skelná vlákna (vzhledem k alkalickému prostředí betonu je doporučováno použití alkaliresistentního skla[23]), uhlík, čedič a aramid. Dle použitého vlákna kompozitní výztuže se mění i označení. GFRP (výztuž tvořena skelnými vlákny), CFRP (uhlíková výztuž), AFRP (aramidová výztuž)[23]. Všechny typy nosných vláken jsou lineárně elastické a zároveň křehce lámavé[23]. Z tohoto důvodu jsou kompozitní výztuže při namáhání ve směru vláken lineárně elastické s křehkým lomem při dosažení mezního napětí a pracovní diagram má lineární průběh až do porušení[23].

Jednotlivé druhy nosných vláken se dají kvůli snížení nákladů a upravení parametrů kombinovat[24]. Tímto procesem vznikají tzv. hybridní výztuže[24]. V tomto bodě je nutné konstatovat, že pojem hybridní výztuž se v této práci používá ještě v jiném významu. Jedná se o použití materiálově odlišných výztuží v jednom prvku (panelu, stěně atd.).

## B. Stručná historie

Po prvních kompozitních materiálech v podobě spojení hlíny a slámy se vývoj kompozitů nezastavil. Ve 13. stol. n. l. Mongolové začali vyrábět první kompozitní luky[25]. Spojením dřeva, kostí a zvířecího lepidla a následným slisováním a obalením břízovou kůrou vznikly luky, které byly extrémně přesné a byly jedním z důvodů Čingischánových úspěšných tažení. Tyto luky byly do vynálezu střelného prachu jedny z nejsilnějších zbraní na celém světě.

Největšího rozmachu se však kompozity dočkaly teprve vynálezem umělé hmoty. Do té doby používané přírodní pryskyřice získávané z rostlin a zvířat, začaly být nahrazovány novými moderními materiály. Na začátku 20. století se totiž začaly vyrábět umělé materiály jako vinyl, polystyren, fenolová pryskyřice, nebo polyester. Tyto nové materiály předčily svými vlastnostmi přírodní materiály. Samotné plasty však nebyly schopné nabídnout takové vlastnosti, aby se daly použít ve stavebních materiálech jako samotná výztuž. To se změnilo v roce 1935, kdy společnost Owens Corning přišla se skelnými vlákny[26]. Sklená vlákna ve spojení s pryskyřicí vytváří velice silný a lehký materiál. Tento okamžik by se dal považovat za vznik FRP.

Mnoho velkých vynálezů vzniklo za dob války. Během druhé světové války byly vláknové kompozity přesunuty z laboratoře do reálného použití. Alternativní materiály byly potřebné na vylehčení v leteckém inženýrství. Krom nízké hmotnosti a vysoké pevnosti se kompozity začaly používat i tam, kde byl nutný nerušený průstup rádiových vln, např. kryty na radary.

Po druhé světové válce, kdy ochably potřeby použití kompozitů na výrobu válečných strojů, se společnosti snažily najít nová odbytiště. V roce 1946 byl představen první komerční trup lodi z kompozitního materiálu. V tomto období se do popředí dostává Brandt Goldsworthy, který bývá zmiňován jako „otec kompozitů“[25]. Krom mnoha vylepšení v procesů výroby kompozitů, byl první, který představil sklolaminátové surfovací prkno a tím navždy změnil tento sport. Za zmínku určitě stojí i vynález procesu zvaného pultruze. Jedná se proces výroby vláknových kompozitů v nekonečné délce. Od 70. let se začaly hojně používat i další materiály na výrobu vláknových kompozitů. S pomocí aramidových vláken se začal vyrábět materiál zvaný kevlar, který se stal standardem ve výrobě neprůstřelných vest.

Pokud se zaměříme na použití FRP ve stavebnictví, určitě stojí za zmínku použití předepjatého vláknového skelného kompozitu (GFRP) k vyztužení lepeného dřevěného mostu v Rusku roku 1975[27]. V Evropě se v 80. letech 20. století začaly zkoumat možnosti použití FRP výztuží při opravě a zvýšení únosnosti mostů[27]. V 90. letech získaly ohlas zejména díky použití v betonových nosných konstrukcích Japonského maglevu[27].

### C. Materiály kompozitních výztuží

#### a. Vlákna

##### *Skelná vlákna*

Skelná vlákna jsou tvořena silikátovým základem ( $\text{SiO}_2$ ) a jejich výroba probíhá tažením taveniny směsi oxidů Si (a dále pak Al, Ca, Mg, Pb a B) a většinou s malým podílem oxidů alkalických kovů Na a K[28]. Jednotlivá vlákna se po výrobě a úpravě jejich povrchu sdružují do pramenců (rovingů) a navíjí se následně na cívku. Aby nedocházelo při manipulaci s vlákny k abrazi a následnému snížení pevnosti, pokrývají se ochranným povlakem[29]. Na ochranu se používají lubrikační látky jako je vosk, olej, škrob, želatina a polyvinylalkohol, nebo vazebné prostředky, které mají dobrou afinitu ke sklu i k matrici[30]. V případě skleněných vláken určených pro aplikaci do betonu hovoříme poté o alkalicky odolných vláknech (AR z anglického alkali-resistant), které mají povrchovou úpravu fibril odolnou silně alkalickému prostředí betonu.

Základní vlastnosti:

$f_u = 1700\text{-}4600 \text{ MPa}$ ,  $E = 72\text{-}89 \text{ GPa}$

##### *Aramidová vlákna*

Jedná se o textilie vyráběných z aramidů (typ polyamidů). Název vznikl ze spojení slov aromatický polyamid. V dnešní době existují dva druhy aramidů. Meta-aramidy, které vynikají tepelnou odolností a elektroizolačními vlastnostmi, se používají jako elektrické izolanty, ochranné oděvy pro hasiče, závodníky, nebo vojáky. Tento materiál odolává teplotám až  $400^\circ\text{C}$ . Zástupcem tohoto typu aramidu je materiál s obchodním názvem Nomex®[31]. Druhým typem jsou para-aramidy, které mají oproti meta-aramidům vyšší pevnost v tahu a

vyšší modul pružnosti. Používají se na neprůstřelné vesty, ochranné rukavice, nebo na výztuže potrubí. Zástupcem tohoto aramidu je např. Kevlar®[31].

Základní vlastnosti:

$f_u = 2900-3600$  MPa,  $E = 70-179$  GPa

### *Uhlíková vlákna*

Uhlíkové vlákno, nebo také karbonové vlákno, je materiál tvořený převážně atomy uhlíku ve formě dlouhých řetězců o průměru 5-10  $\mu\text{m}$ [32]. Uhlíková vlákna mají velké množství užitečných vlastností, ke kterým patří zejména vysoká tuhost, vysoká pevnost v tahu, nízká hmotnost, vysoká chemická odolnost, vysoká odolnost vůči teplotě a nízká tepelná roztažnost[32]. Díky těmto vlastnostem nacházejí uhlíková vlákna uplatnění v leteckém průmyslu, stavebním inženýrství, nebo sportovních potřebách. Negativem je jejich vyšší pořizovací cena oproti jiným materiálům s podobnými vlastnostmi.

$f_u = 3800-5000(7000)$  MPa,  $E = 220-240(900)$  GPa

### *Čedičová vlákna*

Čedič neboli bazalt je velice častá výlevná vyvřelá hornina tmavě šedé, nebo černé barvy. Čedič se skládá z velkého množství různých látek, přičemž největší zastoupení má oxid křemičitý ( $\text{SiO}_2$ ). Dle množství této látky se čediče dělí na alkalické (do 42%  $\text{SiO}_2$ ), středně kyselé (43%-46%  $\text{SiO}_2$ ) a kyselé (nad 46%  $\text{SiO}_2$ ), přičemž kyselé čediče jsou jediné, které se hodí na výrobu vláken[33]. Čediče následně obsahují látky jako  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{CaO}$  nebo  $\text{MgO}$ . Čedič není pro lidstvo úplně novým materiálem, je dobře známý již z dob starověkého Říma, kdy se používal na dláždění cest[33]. Dnes se však jeho využití, zejména díky možnosti výroby vláken, může rozšířit i do jiných odvětví. To je podpořeno vlastnostmi jako odolnost proti vysokým teplotám, tepelně izolační vlastnosti, odolnost vůči kyselému prostředí, mechanická odolnost, nízká absorpce vody, nebo nižší energetické nároky na výrobu, než má ocel, nebo skelná vlákna[33].

$f_u = 2800-4800$  MPa,  $E = 86-90$  GPa

## b. Matrice kompozitní výztuže

Matrice spojuje jednotlivá výztužná vlákna dohromady, přenáší zatížení mezi nimi, dává kompozitní výztuži její tvar a definuje kvalitu povrchu. Matrice může být tvořena polymery, keramikou, kovy, nebo uhlíkem[34]. Nejčastěji používané matrice pro komerční použití jsou matrice polymerní. Matrice keramické a kovové se typicky používají v prostředích s vysokými teplotami jako jsou motory. Uhlíkové matrice se používají v aplikacích, kde se očekávají extrémně vysoké teploty, jako jsou karbonové brzdy, nebo raketové trysky.

Polymerové matrice se dále dělí na reaktoplastové a termoplastové.

### *Reaktoplastové matrice*

Nejčastěji používaným typem polymerových matic jsou matrice reaktoplastové. Jedná se o typ polymerů, které tepelnou, nebo chemickou reakcí se stávají nerozpustné a neroztavitelné[34]. Po vytvrnutí se reaktoplasty již nedají tvarovat, je však možné je používat i při vysokých teplotách a mají vyšší pevnost než termoplastové matrice.

Zástupci reaktoplastových matic jsou nenasycené polyestery (UP), vinylestery (VE) a epoxidy (EP)[35].

### *Termoplastové matrice*

Na rozdíl od reaktoplastů, jejichž výsledné vlastnosti po vytvrzení není možné zvrátit, jsou termoplasty možné po prvotním vychladnutí znovu zahřát a dále tvarovat a svařovat dle potřeby. Po ochladnutí zase získávají svou pevnost.

Zástupci termoplastových matic jsou polypropyleny (PP) a polyamidy (PA)[35].

#### D. Popis

V dnešní době se asi nejčastěji ve vyztužených betonových konstrukcích používá ocel. Vysoká pevnost v tahu a poměrně vysoký modul pružnosti dělá z oceli velice dobrý materiál. Z pohledu trvanlivosti, ceny, nebo energetické náročnosti si však ocel nevede úplně nejlépe, a proto se postupně začíná v některých případech uvažovat o její náhradě.

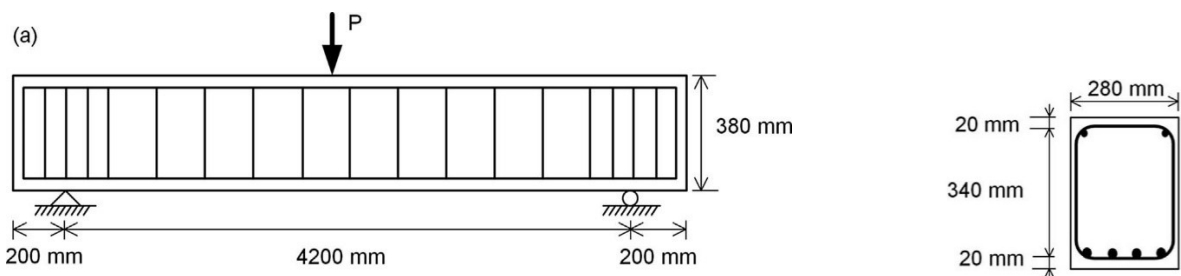
FRP výztuže mají vyšší odolnost vůči agresivnímu prostředí, což může mít velký vliv na životnost zejména u mostovek a vozovek, kde je klasická výztuž velmi náchylná ke korozi[36]. U ocelové výztuže závisí na trvanlivosti a prostředí krytí výztuže, které pak u FRP může být mnohem nižší a tím se mohou snížit celkové náklady.

V dnešní době, kdy se snažíme o co nejmenší dopad na životní prostředí, může být dalším faktorem pro použití FRP až o 68% nižší množství šedé energie nutné k výrobě, než je u klasické výztuže[37].

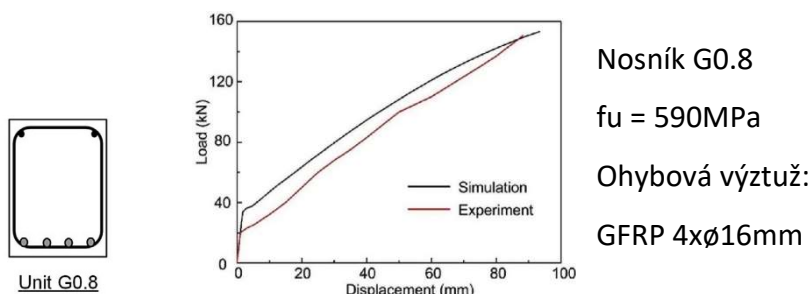
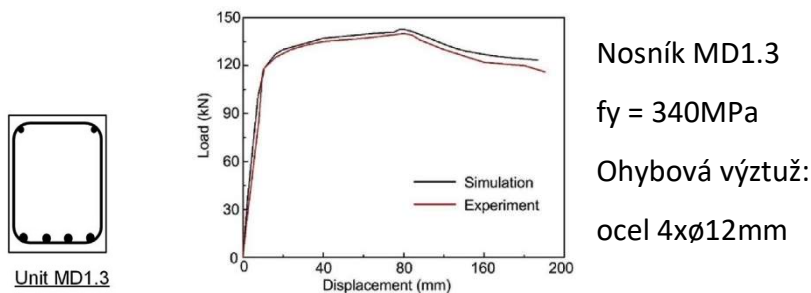
Krom dříve zmíněných vlastností, vykazuje FRP lineární elastické chování až do kolapsu a celkově nevykazuje žádnou duktilitu v porovnání s ocelovou výztuží [23]. Tato vlastnost je velký problém při použití jako vnitřní výztuž betonových konstrukcí, protože neposkytuje dostatečné varování v případě přetížení/porušení konstrukce a následného kolapsu. Z důvodu zvýšení duktility betonových konstrukcí vyztužených vláknovými kompozity (RC reinforced concrete – FRPRC) se začalo uvažovat o smíšeném vyztužování konstrukcí FRP a ocelí. Přidáním ocelové výztuže dojde celkově ke značnému zvýšení duktility u konstrukcí s FRP výztužemi.

## 7. Rešerše stávajících aplikací s hybridní výztuží.

Například v článku „Effect of reinforcement ratio on the flexural performance of hybrid FRP reinforced concrete beams od Renyuan Qin, Ao Zhou, Denvi Lau“[36] se zaměřují na použití hybridní výztuže v nosníku, přesněji ocelové výztuže v kombinaci s výztuží ze skelných vláken. Je vytvořeno celkem 6 vzorků, které se nejprve řeší metodou konečných prvků a následně se vytvoří reálné modely, které se zatěžují a porovnávají se výsledky teoretické a praktické. Z jednotlivých grafů je patrné, že ačkoliv prvek má o podobných průměrech výztuže vyšší únosnost při použití GFRP, je to vykoupeno nižším modulem pružnosti, to znamená i vyšším průhybem a minimální signalizací kolapsu. Problém nenadálého kolapsu konstrukce s kompozitní výztuží by právě mohl být vyřešen kombinací s výztuží ocelovou.



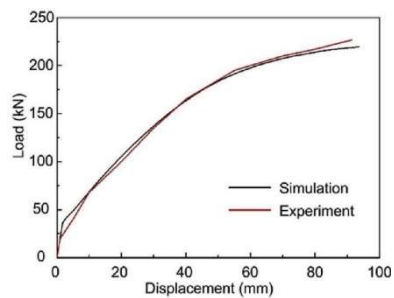
Obr. 6 – Čl. 1 – Schéma zatěžovaného nosníku [36]







Unit G2.1



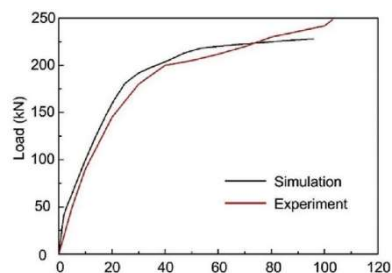
Nosník G2.1

 $f_u = 580\text{MPa}$ 

Ohybová výztuž:

GFRP 4x $\phi$ 25mm

Unit G1.0-T0.7



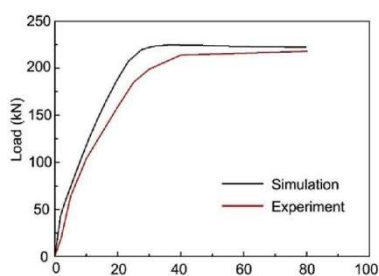
Nosník G1.0-T0.7

 $f_y = 600\text{MPa}$ ,  $f_u = 580\text{MPa}$ 

Ohybová výztuž:

ocel 2x $\phi$ 20mm, GFRP 2x $\phi$ 25mm

Unit G0.6-T0.7



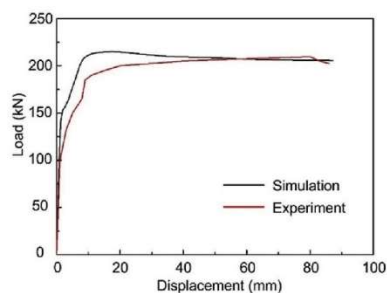
Nosník G0.6-T0.7

 $f_y = 550\text{MPa}$ ,  $f_u = 590\text{MPa}$ 

Ohybová výztuž:

ocel 2x $\phi$ 25mm, GFRP 2x $\phi$ 19mm

Unit T0.2



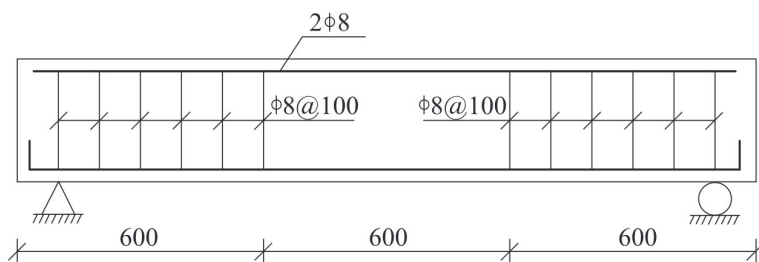
Nosník T0.2

 $f_y = 510\text{MPa}$ 

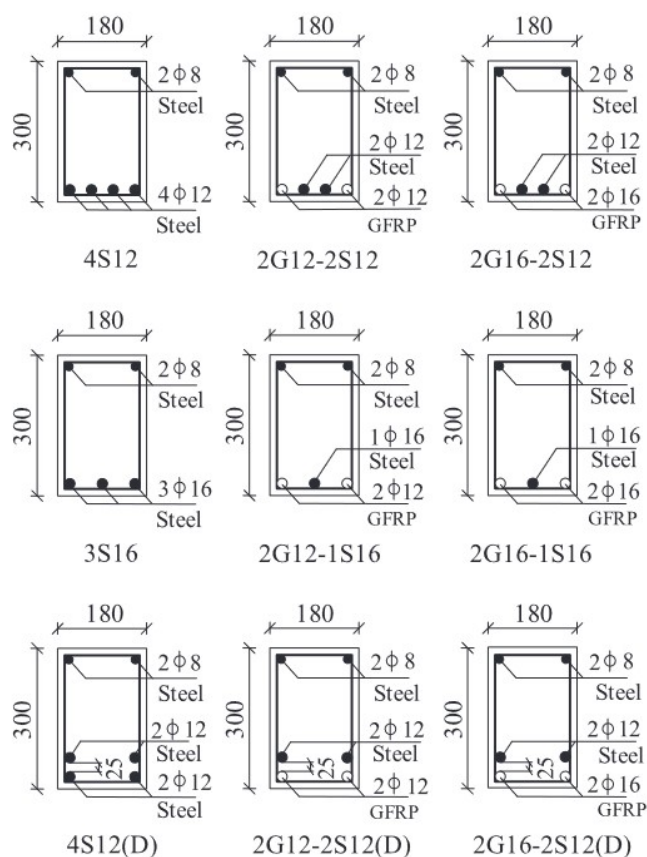
Ohybová výztuž:

ocel 2x $\phi$ 25mm

Druhým příkladem článku zaměřeného na použití hybridní výztuže je „Flexural behavior and serviceability of concrete beams hybrid-reinforced with GFRP bars and steel bars, Xiangjie Ruan, Chunhua Lu\*, Ke Xu, Guangyu Xuan, Mingzhi Ni“[38], ve kterém se také zkoumají nosníky s kombinovanou ocelovou a skleněnou výztuží. V tomto případě jsou však přidány i prvky s výztužením ve dvou vrstvách, přesněji řečeno, přesunutí kompozitní výztuže blíž k spodnímu povrchu a ochrana ocelové výztuže větší vrstvou krytí.



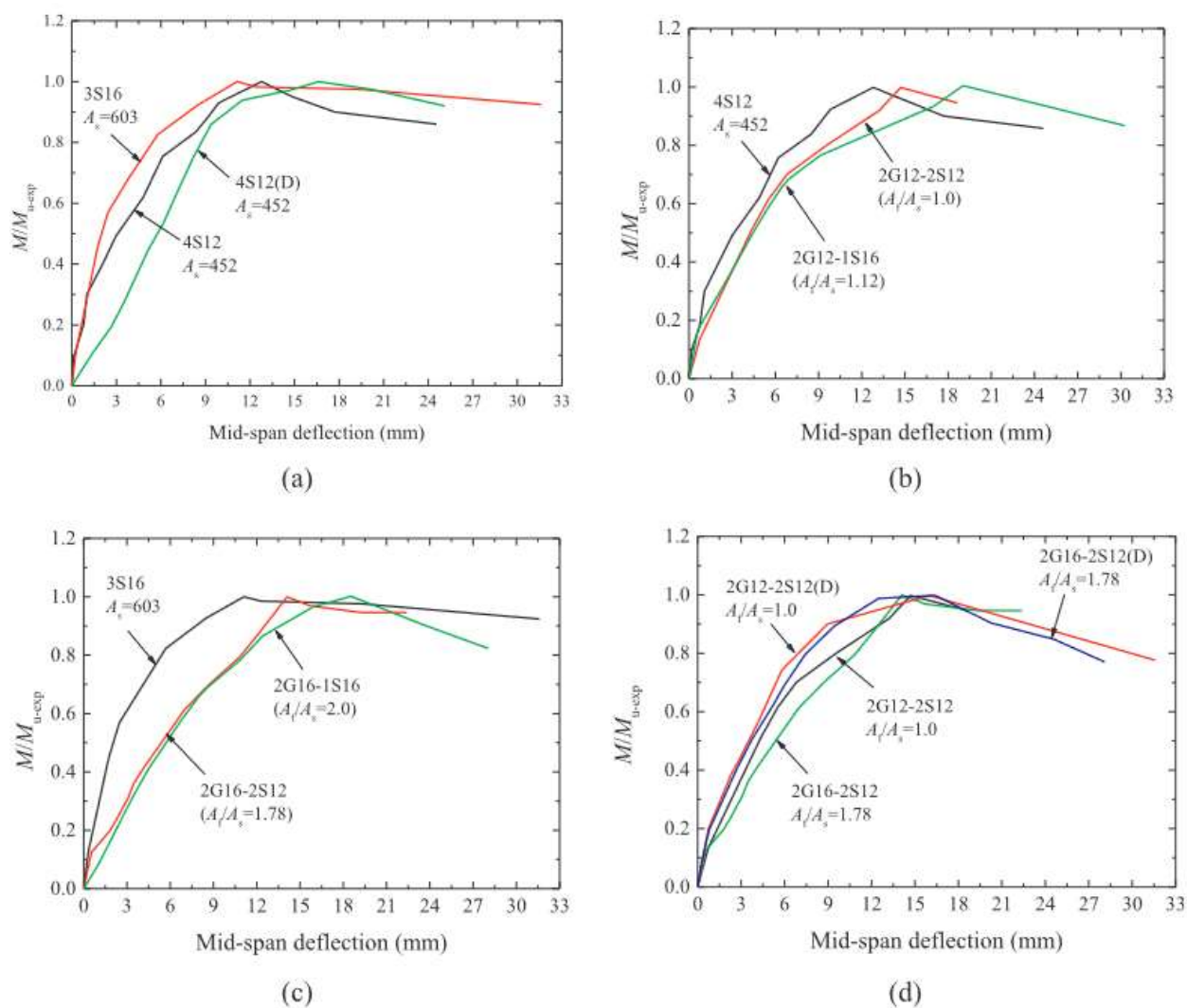
Obr. 7 – Čl. 2 – Schéma zatěžovaného nosníku [38]



Obr. 8 – Čl. 2 – Průřez jednotlivých zkušebních nosníků [38]

Poměrně zajímavý jev je pozorovatelný u nosníku 2G12-2S12(D) a 2G12-2S12 (Obr. 9 (d)), kde má první nosník menší deformace v průběhu zatěžování, přestože jsou výztuže umístěné ve

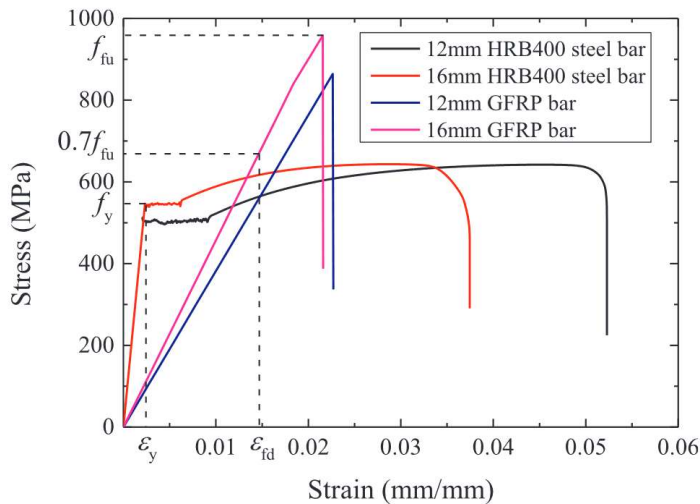
dvou řadách a ocelová výztuž má tak menší rameno sil. Pravděpodobně dochází k lepšímu spolupůsobení ocelové a kompozitní výztuže a využití jejich rozdílných vlastností.



Obr. 9 – Čl. 2 – Graf znázorňující průběh zatěžování[38]

## 8. Shrnutí obecných vlastností FRP

Na následujícím grafu Obr. 10 jsou vidět pracovní diagramy ocelové výztuže a FRP výztuže ze skelných vláken. Z grafu jsou patrné 3 hlavní rozdílné vlastnosti FRP výztuží a ocelových výztuží. Je to nižší modul pružnosti, vyšší únosnost a nízká duktilita.



Obr. 10 – Graf porovnávací výztuž ocelovou a výztuž z vláknového kompozitu [38]

### Klady

- Vysoká pevnost a nízká hmotnost
- Korozivzdornost
- Tvarová stálost
- Nízká tepelná vodivost
- Elektrická nevodivost
- Magnetická netečnost
- Nárazuvzdornost
- (Nízká cena výroby)

## Zápory

- Citlivost na mechanické poškození
- Nízká požární odolnost – nutná izolace
- Nemožnost ohýbání na stavbě
- Nízký modul pružnosti – mimo uhlíková vlákna
- Nízká duktilita
- Nízká pevnost ve stříhu

# Optimalizační program v jazyce Python

## 1. Úvod

Již od začátku mého studia na ČVUT mě bavilo si co nejvíce ulehčovat a urychlovat práci, jak už vytvářením vlastních Excelů na nejrůznější výpočty, tak učení se v nových softwarech, které mi byly schopné usnadnit a urychlit práci. Ze začátku jsem se tyto informace a poznatky snažil předávat mým spolužákům a možná je trochu namotivovat na podobné aktivity, ale po nějaké době jsem si uvědomil, že ne všichni jsou takhle nadšení do technologií a radši si spoustu věcí udělají na papíře. Proto jsem byl velice nadšený, že jsem dostal možnost si vytvořit vlastní jednoduchý program na optimalizaci.

Vytvářením programu jsem se naučil základy v jazyce Python, a hlavně jsem zjistil na jaké věci si při vytváření dalšího programu dávat pozor.

Původním záměrem pro předmět „133P03C – Projekt 3C“ bylo vytvořit program na optimalizaci tradiční železobetonové jednostranně pnuté desky dle mezního stavu únosnosti. Program měl za úkol hledat nejlepší možné poměry mezi průměry výztuže, jejich vzdálenosti a výšky panelu. Největší výzva během programování nebyl samotný výpočet únosnosti, nebo snad tvorba uživatelského rozhraní, ale hlavně automatický výpočet krytí ocelové výztuže.

Po vytvoření tohoto základního programu na výpočet MSÚ jsem ho dále modifikoval, aby byl schopný počítat s různými pevnostmi betonu a s výztužemi z jiných materiálů, než je ocel.

### *Software:*

Visual Studio

### *Programovací jazyk:*

Python 3.8

### *Použité moduly:*

Anaconda – numpy, matplotlib, re, tkinter

Math

## 2. Optimalizace průměrů výztuže

Návrh ŽB desky na 90% využití v MSÚ a následné vyhodnocení ceny na základě objemu ŽB a výztuže (Beton 3000Kč/m<sup>3</sup>, Ocel 46.6Kč/kg).

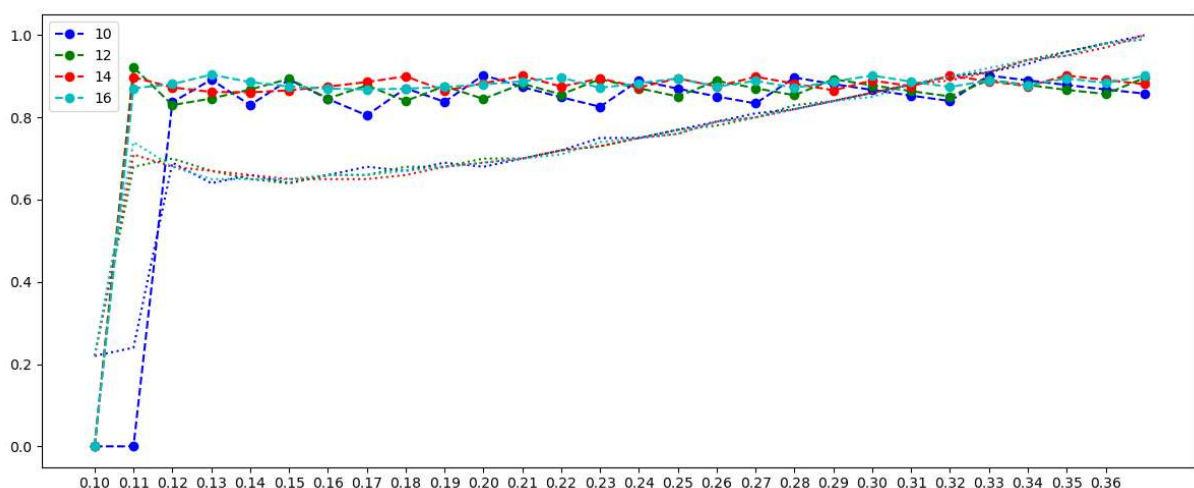
Po zadání hodnot do vstupního formuláře a stisknutí tlačítka „výpočet“ se nagenarují tloušťky zkoumaných panelů. Na začátku se vychází z empirického vzorce 1/20 – 1/25 rozponu a následně se přidá rozpětí +- 100mm okolo této hodnoty. Následující výpočty se defaultně vypočítají pro průměry výztuže 10, 12, 14 a 16 mm. Pro každou tloušťku panelu a průměr výztuže se spočítají jednotlivá MRd. Na koci se spočítají ceny a vygeneruje se jejich poměr k maximální ceně.

The screenshot shows a software window titled "Optimalizace" with the following input fields:

- Třída betonu: C30/37
- Třída oceli: B500B
- Stupeň vlivu prostředí: XC1
- Životnost konstrukce: 50 let
- Desková konstrukce: Ano
- Zvláštní kontrola: Ne
- Rozpon: 6
- Stálé zatížení char. - skladba: 1
- Proměnné zatížení char.: 3

A "Výpočet" button is located at the bottom left of the form.

Obr. 11 – Uživatelské rozhraní optimalizace



Obr. 12 – Graf znázorňující výsledek optimalizace ocelové výztuže

Na vodorovné ose jsou zobrazeny jednotlivé tloušťky ŽB desky v metrech.

Svislá osa je společná pro cenu a MSÚ. Cena je vyjádřena jako poměr jednotlivé ceny daného panelu a ceny maximální (tzn. ceny nejdražšího panelu v dané optimalizaci). Únosnost je vyjádřena jako poměr maximálního momentu k MRd.

Graf je barevné rozdělen dle použitého průměru výztuže. Čárkovanou čarou je zobrazena únosnost a tečkovaně cena.

Pokud během výpočtu nevyhoví  $\kappa_{s\_bal}$ , jsou únosnosti nulové, což je vidět na začátku grafického výstupu u tlouštěk desky 100 mm a 110 mm a příslušných výztuží.

Z grafu je patrné, že neekonomičtěji, z hlediska cen hmot, vychází nejlépe, při zadaných parametrech, tloušťky desky kolo 150 mm.



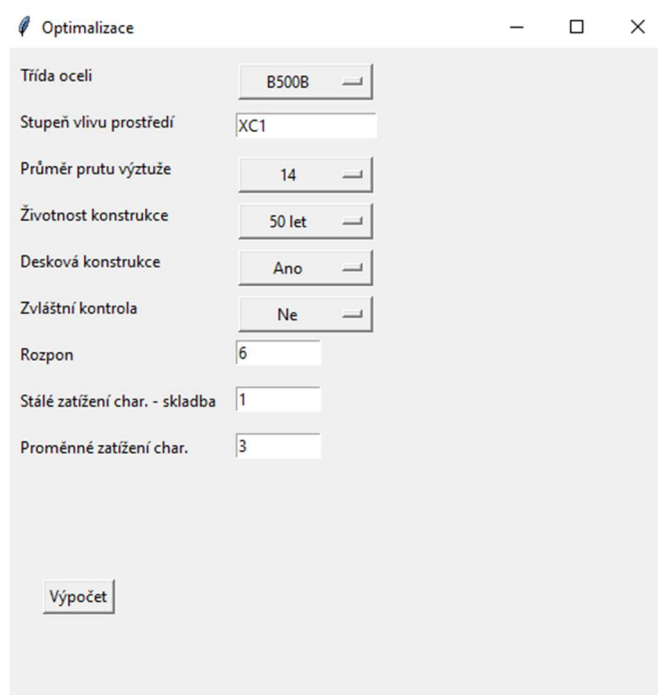
### 3. Optimalizace pevnosti betonu

Po dokončení první funkční verze optimalizačního programu jsem se pustil do úprav na generování výsledků dle různých pevností betonu a následného výpočtu ceny.

Upravil jsem podle potřeb i uživatelské rozhraní, kde zmizela možnost výběru pevnosti betonu a nahradila ji možnost výběru průměru výztuže.

K výpočtu byly použity následující ceny v Kč/m<sup>3</sup>:

C8/10: 1600, C12/15: 1800, C16/20: 1900, C20/25: 2000, C25/30: 2200, C30/37: 2400, C35/45: 2600

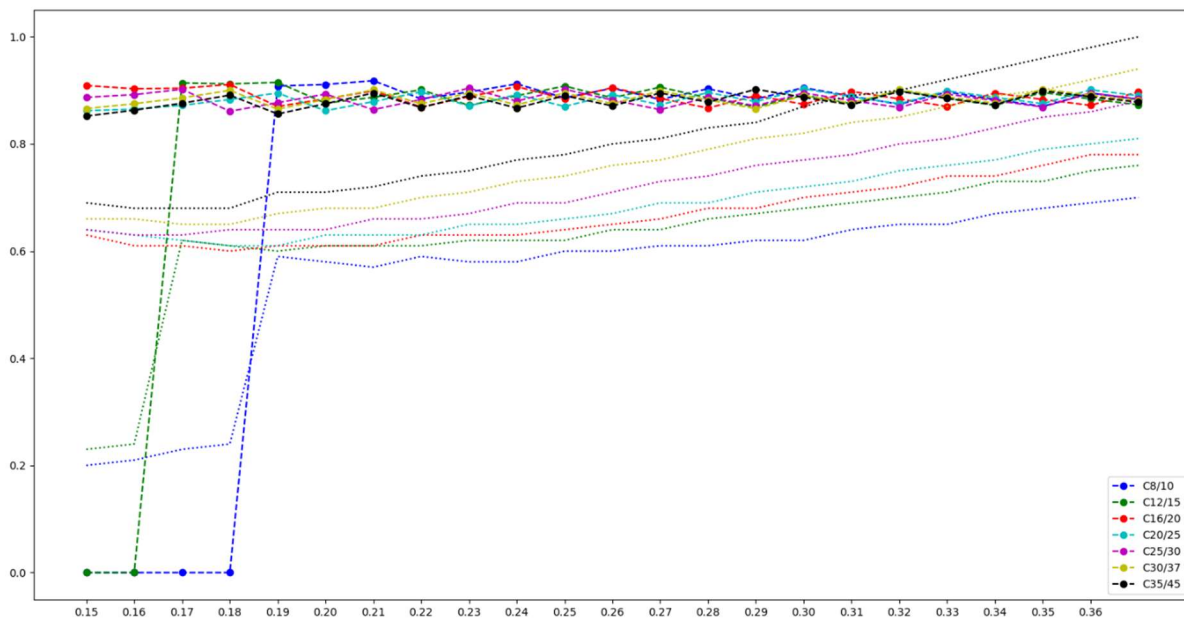


The screenshot shows a window titled 'Optimalizace' with a standard Windows title bar (minimize, maximize, close). The interface contains several input fields and buttons:

- Třída oceli: B500B (dropdown menu)
- Stupeň vlivu prostředí: XC1 (text input)
- Průměr prutu výztuže: 14 (dropdown menu)
- Životnost konstrukce: 50 let (dropdown menu)
- Desková konstrukce: Ano (dropdown menu)
- Zvláštní kontrola: Ne (dropdown menu)
- Rozpon: 6 (text input)
- Stálé zatížení char. - skladba: 1 (text input)
- Proměnné zatížení char.: 3 (text input)
- Výpočet (button)

**Obr. 13 – Uživatelské rozhraní optimalizace**

V následujícím grafu jsou podle barev rozděleny jednotlivé pevnosti. Čárkovanou čarou jsou znázorněny únosnosti – program je defaultně nastaven na cca 90% využití. Tečkované čáry znázorňují poměry ceny k maximální ceně.



**Obr. 14 – Graf znázorňující výsledek optimalizace pevnosti betonu**

Z výsledků je jasně patrné, že za daných cenových podmínek a klasického v průřezu nevylehčeného panelu by nejnižší cena panelu vyšla u betonu s pevností C8/10 a to u tloušťky 210 mm. U ostatních pevností cena už jenom stoupá.

## 4. Optimalizace neocelové výztuže

Návrh ŽB desky na 90% využití v MSÚ a následné vyhodnocení ceny na základě objemu betonu a výztuže.

Pro návrh byla vybrána stropní konstrukce s rozponem 6 m, zatížením  $4\text{kN/m}^2$  a stupeň vlivu prostředí XC1.

Na porovnání byly použity následující výztuže:

### *Ocel B500B*

$f_{yk}=500\text{MPa}$ ,  $E=210\text{GPa}$

### *Čedičové pruty Orlimex*

$f_k=1200\text{Mpa}$ ,  $E=50\text{GPa}$

### *Prefa kompozity*

Sklo (GFRP)  $f_k=1050\text{Mpa}$ ,  $E=50\text{GPa}$

Sklo – uhlík (C\_GFRP)  $f_k=1050\text{Mpa}$ ,  $E=75\text{GPa}$  dle výrobce cca 5x dražší než GFRP

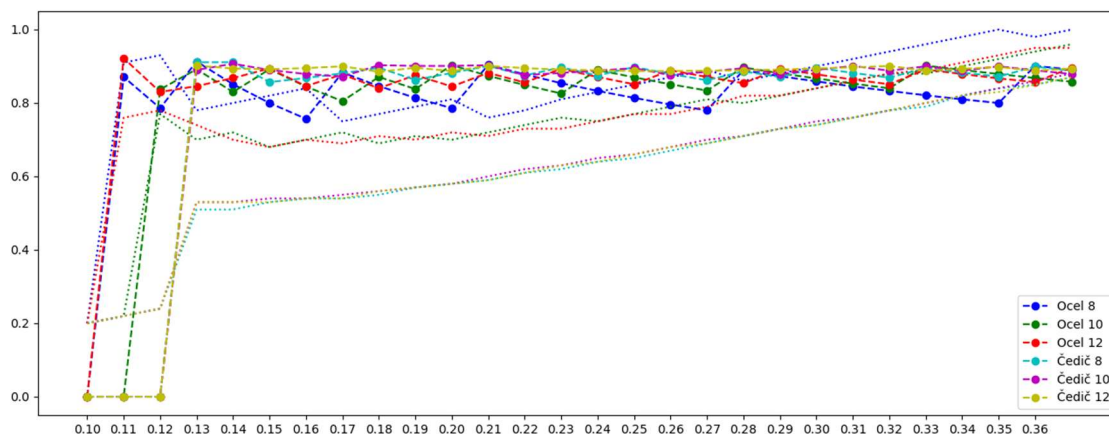
Uhlík (CFRP)  $f_k=1700\text{Mpa}$ ,  $E=94\text{GPa}$  dle výrobce cca 10x dražší než GFRP

Na vodorovné ose jsou zobrazeny jednotlivé tloušťky ŽB desky

Každý graf, jsou v podstatě dva grafy dohromady. Svislá osa je společná pro cenu a MSÚ. Cena je vyjádřena jako poměr jednotlivé ceny a ceny maximální. Únosnost je vyjádřena jako poměr maximálního momentu k MRd.

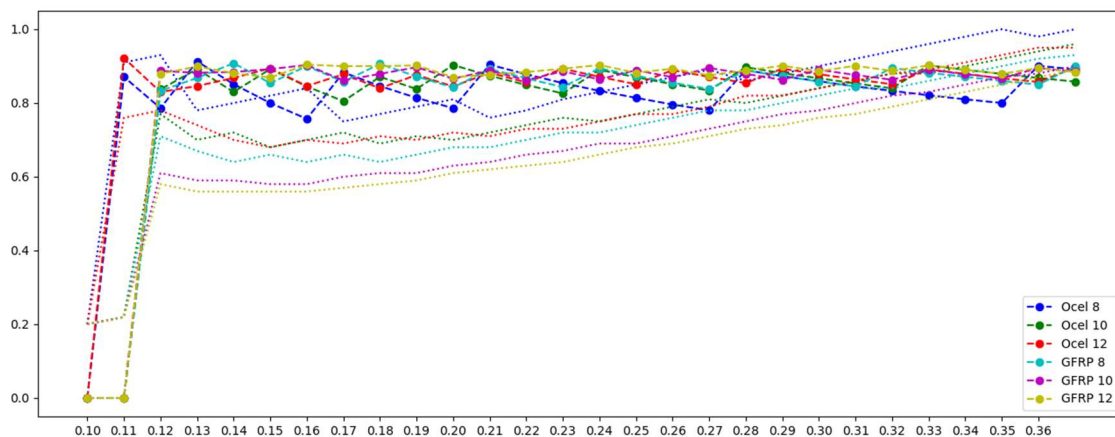
Graf je barevně rozdělen dle použitého materiálu a průměru výztuže. V každém grafu je použita klasická ocelová výztuž a k ní jedna ze 4 kompozitních výztuží zmíněných dříve. Čárkovanou čarou je zobrazena únosnost a tečkovaně cena.

V grafu s čedičovou výztuží je jednoznačně vidět, že nejnižší cena, při stejné únosnosti, je u ocelové výztuže někde okolo tloušťky desky 160 mm, zato čedič se dostává na mnohem nižší cenu i při tloušťce 130 mm. U nižších tloušťek již nevychází  $\text{ksi}_{\text{bal}}$  a proto graf prudce klesá na hodnotu 0.



Obr. 15 – Graf znázorňující výsledek optimalizace čedičové výztuže

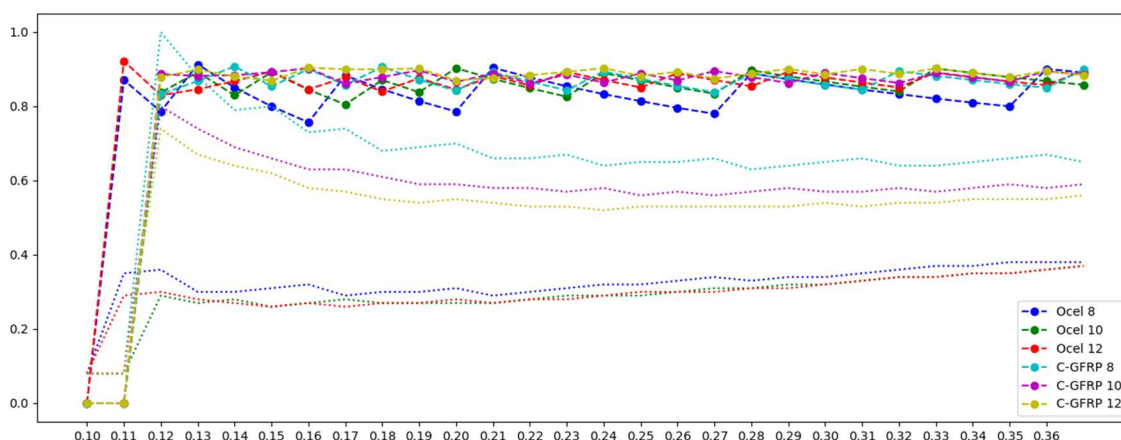
Kompozitní výztuž tvořená skelnými vlákny vychází levněji než ocelová výztuž, ale cenová úspora je mírně nižší než u výztuže čedičové.



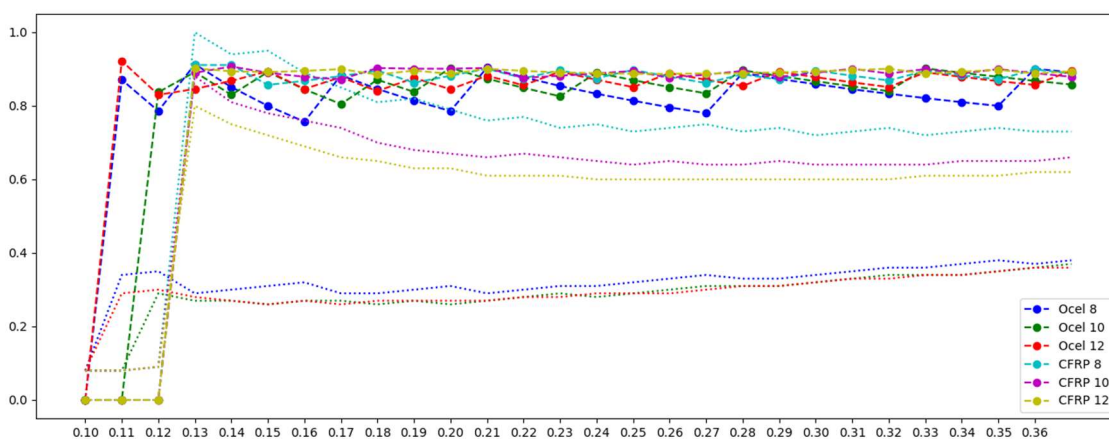
Obr. 16 – Graf znázorňující výsledek optimalizace GFRP výztuže

Zbývající dva kompozity, kde jsou použita uhlíková+skelná vlákna a samostatná uhlíková vlákna nevyhází cenově příliš výhodně, ba naopak. To však neznamená, že se v budoucnu jejich cena nemůže, například díky většímu objemu výroby, snížit na nižší hodnotu, než je ocelová výztuž.

Dnes se však tyto dva kompozity dle informací od výrobce příliš nepoužívají, a tak není jejich cena příliš příznivá kvůli velmi vysokým maržím.



Obr. 17 – Graf znázorňující výsledek optimalizace C-GFRP výztuže



Obr. 18 – Graf znázorňující výsledek optimalizace CFRP výztuže

Z prvních dvou grafů (Obr. 15 a Obr. 16) vidět, že náhrada tradiční ocelové výztuže jinou netradiční výztuží může být více ekonomická, je ale nutné zdůraznit, že tyto výztuže mají nižší modul pružnosti, a proto by pravděpodobně nebyly o tolik výhodnější při výpočtu MSÚ. Ze spodních dvou grafů (Obr. 17 a Obr. 18) je patrné, že neocelová výztuž vychází dokonce draž a není již ekonomicky výhodná.

## 5. Závěr optimalizace

Při pohledu na jednotlivé výsledky, při daných cenových podmínkách, docházím k několika závěrům.

Prvním je, že čistě z pohledu ceny materiálu železobetonových panelů vychází nejlépe co možná nejmenší průměr výztuže. Menší výztuže mají výhodu, že jsou lehčí a dá se s nimi lépe manipulovat, na druhou stranu je pak nutné pokládat větší množství výztuže a více vázat. Je proto asi nutné konstatovat, že cena materiálu nebude jedinou důležitou položkou při optimalizaci celkové ceny.

Dalším závěrem z této optimalizace je fakt, že při daných cenách se vyplatí používat beton s co možná nejhorší pevností, a to i přes fakt, že se u nižších tříd betonů musí použít vyšší krytí. Pro danou konstrukci minimální požadovaná třída betonu i s ohledem na životnost se podle normových požadavků tedy jeví jako optimální.

Při úvaze o náhradě ocelové výztuže kompozitní výztuží dává asi největší smysl použití čedičových výztuží, které se dnes již prodávají jako hotový produkt a mají i přijatelnou cenu. Je však znovu nutné zdůraznit, že tato optimalizace i z důvodu omezeného času na zpracování probíhala čistě v mezích MSÚ a vzhledem k mnohem nižším modulům pružnosti by byl velmi zajímavý i návrh optimalizace pro MSP.

## Návrh teoretického běžného stropního panelu

Tato část práce se zaměřuje na návrh běžného plného panelu bez vylehčení průřezu o rozponu 5 m a běžném zatížení s využitím hybridní výztuže. V tomto případě se jedná o výztuž čedičovou, která byla v předchozí kapitole vybrána jako nejekonomičtější. Abychom využili užitečné vlastnosti kompozitní výztuže, tzn. odolnost vůči agresivnímu prostředí, jsou výztuže panelu uloženy ve dvou rovinách. Ocelová výztuž s klasickou vypočtenou krycí vrstvou dle normových požadavků a kompozitní výztuž se sníženou krycí vrstvou na 10 mm. Panel je navržen na maximální možný průhyb  $1/250 \cdot L$ . Na závěr jsou vyhodnoceny parametry navrženého panelu a panelu s klasickou ocelovou výztuží o odpovídajícím průhybu.

### Výpočet MSU a MSP

#### Vstupní hodnoty

Posuzovaný průřez

$$b := 1 \text{ m}$$

$$h := 240 \text{ mm}$$

$$l := 5 \text{ m}$$

#### Beton C30/37 XC1

$$E_{cm} := 33 \text{ GPa}$$

$$f_{ck} := 30 \text{ MPa}$$

$$f_{cd} := \frac{f_{ck}}{1.5} = 20 \text{ MPa}$$

$$f_{cm} := f_{ck} + 8 \text{ MPa} = 38 \text{ MPa}$$

$$f_{cm0} := 10 \text{ MPa}$$

$$f_{ctm} := 0.3 \cdot \left( \frac{f_{ck}}{\text{MPa}} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot \text{MPa} = 2.896 \text{ MPa}$$

$$f_{ct,ef,28} := 0.5 \cdot f_{ctm} = 1.448 \text{ MPa}$$

$$f_{ct,ef,90} := f_{ctm} = 2.896 \text{ MPa}$$

**Ocel B500B**

$$E_y := 200 \text{ GPa}$$

$$f_{yk} := 500 \text{ MPa}$$

$$f_{yd} := \frac{f_{yk}}{1.15} = 435 \text{ MPa}$$

**Orlitech Čedičová tyč**

$$E_c := 50 \text{ GPa}$$

$$f_{ck} := 1200 \text{ MPa}$$

$$f_{cd} := \frac{f_{ck}}{1.15} = 1043 \text{ MPa}$$

**Krytí**

$$\phi_y := 12 \text{ mm}$$

$$c_{min.b} := \phi_y$$

$$c_{min.dur} := 10 \text{ mm} \text{ dle tabulky 4.1}$$

$$\Delta c_{dur.y} := 0 \text{ mm}$$

$$\Delta c_{dur.st} := 0 \text{ mm}$$

$$\Delta c_{dur.add} := 0 \text{ mm}$$

$$\Delta c_{dev} := 10 \text{ mm} \text{ pro betonování na upravené podloží zvětšit o 40mm, pro betonování na zeminu zvětšit o 75mm}$$

$$c_{min} := \max(c_{min.b}, c_{min.dur} + \Delta c_{dur.y} - \Delta c_{dur.st} - \Delta c_{dur.add}, 10 \text{ mm})$$

$$c_{nom} := c_{min} + \Delta c_{dev} = 22 \text{ mm}$$

$$c := 25 \text{ mm}$$



**Zatížení**

Druh zatížení	$f_k$ [kN/m']	$f_d$ [kN/m']
<b>Stálé</b>		
Vlastní tíha	$g_{0k} := 25 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \cdot b \cdot h$	$g_{0d} := 1.35 \cdot g_{0k} = 8.1 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$
Podlaha	$g_{1k} := 2 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$	$g_{1d} := 1.35 \cdot g_{1k} = 2.7 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$
Příčky	$g_{2k} := 1.5 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$	$g_{2d} := 1.35 \cdot g_{2k} = 2.03 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$
<b>Užité</b>		
Obytné plochy a plochy pro domácí činnosti	$q_{k,st} := 0.75 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$ $q_{k,it} := 0.75 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$	$q_d := 1.5 \cdot (q_{k,st} + q_{k,it}) = 2.25 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

$$g_{it} := g_{0k} + g_{1k} + g_{2k} = 9.5 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$q_{st} := q_{k,st} = 0.75 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$q_{it} := q_{k,it} = 0.75 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$q_k := q_{k,st} + q_{k,it}$$

**Kombinace zatížení**

Návrhová kombinace

$$f_d := g_{0d} + g_{1d} + g_{2d} + q_d = 15.075 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Charakteristická kombinace

$$f_k := g_{0k} + g_{1k} + g_{2k} + q_k = 11 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Častá kombinace

$$\psi_1 := 0.5$$

$$f_o := g_{0k} + g_{1k} + g_{2k} + q_k \cdot \psi_1 = 10.25 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Kvazi-stálá kombinace

$$\psi_2 := 0.3$$

$$f_q := g_{0k} + g_{1k} + g_{2k} + q_k \cdot \psi_2 = 9.95 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Maximální momenty

$$M_{Ek} := \frac{1}{8} \cdot f_k \cdot l^2 = 34.375 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{Ed} := \frac{1}{8} \cdot f_d \cdot l^2 = 47.109 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Ostatní údaje

$$RH := 60\%$$

R

$$RH_0 := 100\%$$

$$t_0 := 28 \text{ dní}$$

Počátek zatěžování

$$t_\infty := 50 \cdot 365 = 18250 \text{ dní}$$

Konec zatěžování

$$t_s := 7 \text{ dní}$$

Konec ošetřování betonu

## Výpočet únosnosti

$$\varnothing_y = 12 \text{ mm}$$

$$\varnothing_\xi = 10 \text{ mm}$$

Účinná výška průřez

Krycí vrstva pro ocelovou výztuž je  $c = 25 \text{ mm}$ , ale krycí čedičové výztuže je snižené na 10mm.

$$s_y := 250 \text{ mm}$$

$$s_\xi := 75 \text{ mm}$$

$$n_y := \frac{b}{s_y} = 4$$

$$n_\xi := \frac{b}{s_\xi} = 13.333$$

$$d_f := h - \frac{\left(10 \text{ mm} + \frac{\varnothing_\xi}{2}\right) \cdot \left(\pi \cdot \left(\frac{\varnothing_\xi}{2}\right)^2 \cdot n_\xi \cdot f_{cd}\right) + \left(c + \frac{\varnothing_y}{2}\right) \cdot \left(\pi \cdot \left(\frac{\varnothing_y}{2}\right)^2 \cdot n_y \cdot f_{yd}\right)}{\left(\pi \cdot \left(\frac{\varnothing_\xi}{2}\right)^2 \cdot n_\xi \cdot f_{cd}\right) + \left(\pi \cdot \left(\frac{\varnothing_y}{2}\right)^2 \cdot n_y \cdot f_{yd}\right)} = 223 \text{ mm}$$

Nutná plocha výztuže

$$\eta := 1$$

$$\lambda := 0.8$$

$$A_{sd} := \frac{b \cdot d_f \cdot \eta \cdot f_{cd}}{f_{yd}} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot M_{Ed}}{b \cdot d_f^2 \cdot \eta \cdot f_{cd}}}\right) = 499.005 \text{ mm}^2$$

$$A_{s,min} := \max\left(0.26 \cdot b \cdot d_f \cdot \frac{f_{ctm}}{f_{yk}}, 0.0013 \cdot b \cdot d_f\right) = 335.211 \text{ mm}^2$$

$$s_{max} := 2 \cdot h = 480 \text{ mm}$$

$$A_{s,prov,f} := n_y \cdot \left(\pi \cdot \left(\frac{\varnothing_y}{2}\right)^2\right) + n_\xi \cdot \left(\pi \cdot \left(\frac{\varnothing_\xi}{2}\right)^2\right) \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yk}} = 2638 \text{ mm}^2$$

$$x := \frac{A_{s,prov,f} \cdot f_{yd}}{b \cdot \lambda \cdot \eta \cdot f_{cd}} = 72 \text{ mm}$$

$$\xi_{bal,1} := \frac{700 \text{ MPa}}{700 \text{ MPa} + f_{yd}} = 0.617$$

$$\frac{x}{d_f} = 0.322 < \xi_{bal.1} = 0.617$$

$$M_{RK} := A_{s,prov,f} \cdot f_{yk} \cdot \left( d_f - \lambda \cdot \frac{x}{2} \right) = 255.722 \text{ kN} \cdot \text{m} > M_{Ed} = 47.109 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

## Výpočet průhybů

### Výpočet součinitele dotvarování

$$d_E := h - \frac{\left( 10 \text{ mm} + \frac{\phi_c}{2} \right) \cdot \left( \pi \cdot \left( \frac{\phi_c}{2} \right)^2 \cdot n_c \cdot E_c \right) + \left( c + \frac{\phi_y}{2} \right) \cdot \left( \pi \cdot \left( \frac{\phi_y}{2} \right)^2 \cdot n_y \cdot E_y \right)}{\left( \pi \cdot \left( \frac{\phi_c}{2} \right)^2 \cdot n_c \cdot E_c \right) + \left( \pi \cdot \left( \frac{\phi_y}{2} \right)^2 \cdot n_y \cdot E_y \right)} = 214.865 \text{ mm}$$

$$A_{s,prov,E} := n_y \cdot \left( \pi \cdot \left( \frac{\phi_y}{2} \right)^2 \right) + n_c \cdot \left( \pi \cdot \left( \frac{\phi_c}{2} \right)^2 \right) \cdot \frac{E_c}{E_y} = 714 \text{ mm}^2$$

Plocha průřezu

$$A_c := b \cdot h = 0.24 \text{ m}^2$$

Obvod průřezu vystaveného okolnímu prostředí

$$u := 2 \cdot b = 2 \text{ m}$$

$$h_0 := \frac{2 \cdot A_c}{u} = 240 \text{ mm}$$

$$\alpha_1 := \max \left( \left( \frac{35 \text{ MPa}}{f_{cm}} \right)^{0.7}, 1 \right) = 1$$

$$\alpha_2 := \max \left( \left( \frac{35 \text{ MPa}}{f_{cm}} \right)^{0.2}, 1 \right) = 1$$

$$\alpha_3 := \max \left( \left( \frac{35 \text{ MPa}}{f_{cm}} \right)^{0.5}, 1 \right) = 1$$

$$\varphi_{RH} := \left( 1 + \frac{1 - \frac{RH}{100\%}}{0.1 \cdot \sqrt[3]{\frac{h_0}{\text{mm}}}} \cdot \alpha_1 \right) \cdot \alpha_2 = 1.644$$

$$\beta_{f_{cm}} := \frac{16.8}{\sqrt{\frac{f_{cm}}{\text{MPa}}}} = 2.725$$

$$\beta_{t_0} := \frac{1}{0.1 + t_0^{0.2}} = 0.488$$

$$\varphi_0 := \varphi_{RH} \cdot \beta_{f_{cm}} \cdot \beta_{t_0} = 2.188$$

$$\beta_H := \min \left( 1.5 \left( 1 + \left( 0.012 \cdot \frac{RH}{100\%} \right)^{18} \right), \frac{h_0}{\text{mm}} + 250 \cdot \alpha_3, 1500 \cdot \alpha_3 \right) = 610$$

$$\beta_{t_{t_0}} := \left( \frac{t_{\infty} - t_0}{\beta_H + t_{\infty} + t_0} \right)^3 = 0.898$$

$$\varphi := \varphi_0 \cdot \beta_{t_{t_0}} = 1.965$$

$$E_{c,eff} := \frac{E_{cm}}{1 + \varphi} = 11.131 \text{ GPa}$$

### Průřezové charakteristiky

Dlouhodobý moment setrvačnosti bez trhlin

$$\alpha_{e,lt} := \frac{E_y}{E_{c,eff}} = 17.967$$

$$x_{l,lt} := \frac{0.5 \cdot b \cdot h^2 + (\alpha_{e,lt} - 1) \cdot A_{s,prov.E} \cdot d_E}{b \cdot h + (\alpha_{e,lt} - 1) \cdot A_{s,prov.E}} = 0.125 \text{ m}$$

$$I_{l,lt} := \frac{1}{12} \cdot b \cdot h^3 + b \cdot h \cdot \left(x_{l,lt} - \frac{h}{2}\right)^2 + (\alpha_{e,lt} - 1) \cdot A_{s,prov.E} \cdot (d_E - x_{l,lt})^2 = 0.001256 \text{ m}^4$$

Dlouhodobý moment setrvačnosti na konstrukci s plně rozvinutými trhlinami

$$x_{ll,lt} := \frac{(\alpha_{e,lt} - 1) \cdot A_{s,prov.E}}{b} \cdot \left(-1 + \sqrt{1 + \frac{2 \cdot b \cdot d_E}{(\alpha_{e,lt} - 1) \cdot A_{s,prov.E}}}\right) = 0.061 \text{ m}$$

$$I_{ll,lt} := \frac{1}{3} \cdot b \cdot x_{ll,lt}^3 + \alpha_{e,lt} \cdot A_{s,prov.E} \cdot (d_E - x_{ll,lt})^2 = 0.00038 \text{ m}^4$$

Krátkodobý moment setrvačnosti bez trhlin

$$\alpha_{e,st} := \frac{E_y}{E_{cm}} = 6.061$$

$$x_{l,st} := \frac{0.5 \cdot b \cdot h^2 + (\alpha_{e,st} - 1) \cdot A_{s,prov.E} \cdot d_E}{b \cdot h + (\alpha_{e,st} - 1) \cdot A_{s,prov.E}} = 0.121 \text{ m}$$

$$I_{l,st} := \frac{1}{12} \cdot b \cdot h^3 + b \cdot h \cdot \left(x_{l,st} - \frac{h}{2}\right)^2 + (\alpha_{e,st} - 1) \cdot A_{s,prov.E} \cdot (d_E - x_{l,st})^2 = 0.001184 \text{ m}^4$$

Krátkodobý moment setrvačnosti na konstrukci s plně rozvinutými trhlinami

$$x_{ll,st} := \frac{(\alpha_{e,st} - 1) \cdot A_{s,prov.E}}{b} \cdot \left(-1 + \sqrt{1 + \frac{2 \cdot b \cdot d_E}{(\alpha_{e,st} - 1) \cdot A_{s,prov.E}}}\right) = 0.036 \text{ m}$$

$$I_{ll,st} := \frac{1}{3} \cdot b \cdot x_{ll,st}^3 + \alpha_{e,st} \cdot A_{s,prov.E} \cdot (d_E - x_{ll,st})^2 = 0.00015 \text{ m}^4$$

### Poměrné smršťování

Plocha průřezu

$$A_c = 0.24 \text{ m}^2$$

Obvod průřezu vystaveného okolnímu prostředí

$$u = 2 \text{ m}$$

$$h_0 = 240 \text{ mm}$$

$$h_0 := \frac{h_0}{\text{mm}}$$

Součinitel  $k_h$

$$k_h := 0.000000000001881 \cdot h_0^4 - 0.000000005755462 \cdot h_0^3 + 0.000006457532852 \cdot h_0^2 - 0.003140132303599 \cdot h_0 + 1.25677655677\dots$$

$$k_h = 0.802$$

Součinitele  $\alpha_{sd1}$  a  $\alpha_{sd2}$  pro různé typy cementů

$$R \quad \alpha_{sd1} := 6 \quad \alpha_{sd2} := 0.11$$

$$N \quad \alpha_{sd1} := 4 \quad \alpha_{sd2} := 0.12$$

$$S \quad \alpha_{sd1} := 3 \quad \alpha_{sd2} := 0.13$$

$$\text{Vybrané hodnoty: } R \quad \alpha_{sd1} := 6 \quad \alpha_{sd2} := 0.11$$

Poměrné autogenní smršťování

$$\varepsilon_{ca,\infty} := 2.5 \cdot \left( \frac{f_{ck}}{\mathbf{MPa}} - 10 \right) \cdot 10^{-6} = 0$$

$$\beta_{as,t} := 1 - e^{-0.2 \cdot t_{\infty}^{0.5}} = 1$$

$$\varepsilon_{ca,t} := \varepsilon_{ca,\infty} \cdot \beta_{as,t} = 0$$

Poměrné smršťování vysycháním

$$\beta_{RH} := 1.55 \cdot \left( 1 - \left( \frac{RH}{RH_0} \right)^3 \right) = 1.215$$

$$\alpha_{sd1} = 6$$

$$\varepsilon_{cd,0} := 0.85 \cdot \left( \left( 220 + 110 \cdot \alpha_{sd1} \right) \cdot e^{-\alpha_{sd2} \cdot \frac{f_{cm}}{f_{cm0}}} \right) \cdot 10^{-6} \cdot \beta_{RH} = 0.001$$

$$\beta_{ds,t,ts} := \frac{t_{\infty} - t_s}{(t_{\infty} - t_s) + 0.04 \cdot \sqrt{h_0^3}} = 0.992$$

$$\varepsilon_{cd,t} := \beta_{ds,t,ts} \cdot k_h \cdot \varepsilon_{cd,0} = 0$$

Celkové poměrné smršťování

$$\varepsilon_{cs} := \varepsilon_{ca,t} + \varepsilon_{cd,t} = 0.001$$

### Výpočet průhybů dle normy ČSN EN 1992-1-1 ed.2

$$\beta_{lt} := 0.5$$

$$M_{cr,lt} := f_{ctm} \cdot \frac{I_{l,lt}}{h - x_{l,lt}} = 31.509 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\zeta_{lt} := 1 - \beta_{lt} \cdot \left( \frac{M_{cr,lt}}{M_{Ek}} \right)^2 = 0.58$$

$$\beta_{st} := 1$$

$$M_{cr,st} := f_{ctm} \cdot \frac{I_{l,st}}{h - x_{l,st}} = 28.919 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\zeta_{st} := 1 - \beta_{st} \cdot \left( \frac{M_{cr,st}}{M_{Ek}} \right)^2 = 0.292$$

Průhyby pro dlouhodobé zatížení

$$f_{l,lt} := \frac{5}{384} \cdot \frac{(g_{lt} + q_{lt} \cdot \psi_2) \cdot l^4}{E_{c,eff} \cdot I_{l,lt}} = 0.006 \text{ m}$$

$$f_{ll,lt} := \frac{5}{384} \cdot \frac{(g_{lt} + q_{lt} \cdot \psi_2) \cdot l^4}{E_{c,eff} \cdot I_{ll,lt}} = 0.019 \text{ m}$$

Průhyby pro krátkodobé zatížení

$$f_{l,st} := \frac{5}{384} \cdot \frac{(q_{st} \cdot \psi_2) \cdot l^4}{E_{cm} \cdot I_{l,st}} = 0.000047 \text{ m}$$

$$f_{ll,st} := \frac{5}{384} \cdot \frac{(q_{st} \cdot \psi_2) \cdot l^4}{E_{cm} \cdot I_{ll,st}} = 0.00036 \text{ m}$$

Průhyby od smršťování

$$\zeta_{lt} = 0.58 \quad l = 5 \text{ m} \quad q_{st} = 0.75 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad A_{s,prov,E} = 0.000714 \text{ m}^2$$

$$I_{l,lt} = 0.001256 \text{ m}^4 \quad \varepsilon_{cs} = 0.000526$$

$$r_{sh,I} := \frac{I_{l,lt}}{\varepsilon_{cs} \cdot \alpha_{e,lt} \cdot A_{s,prov,E} \cdot (d_E - x_{l,lt})} = 2061 \text{ m}$$

$$\frac{1}{r_{sh,I}} = 0.000485 \frac{1}{\text{m}}$$

$$r_{sh,II} := \frac{I_{ll,lt}}{\varepsilon_{cs} \cdot \alpha_{e,lt} \cdot A_{s,prov,E} \cdot (d_E - x_{ll,lt})} = 366 \text{ m}$$

$$\frac{1}{r_{sh,II}} = 0.002736 \frac{1}{\text{m}}$$

$$r_{sh} := \frac{1}{\frac{1}{r_{sh,I}} \cdot (1 - \zeta_{lt}) + \frac{1}{r_{sh,II}} \cdot \zeta_{lt}} = 559 \text{ m}$$

$$\frac{1}{r_{sh}} = 0.0017903 \frac{1}{\text{m}}$$

$$f_{sh} := \frac{1}{8} \cdot l^2 \cdot \frac{1}{r_{sh}} = 5.6 \text{ mm}$$

Průhyby celkem

$$f_{lt} := f_{l,lt} \cdot (1 - \zeta_{lt}) + f_{ll,lt} \cdot \zeta_{lt} = 13.2 \text{ mm}$$

$$f_{st} := f_{l,st} \cdot (1 - \zeta_{st}) + f_{ll,st} \cdot \zeta_{st} = 0.1 \text{ mm}$$

$$f := f_{st} + f_{lt} + f_{sh} = 19 \text{ mm}$$

$$f_{max} := \frac{l}{250} = 20 \text{ mm}$$

## 6. Vyhodnocení základních environmentálních parametrů

Vyhodnocení základních environmentálních parametrů porovnává navržený hybridní panel a panel s odpovídajícím průhybem s ocelovou výztuží (tzn. 19 mm). Pro beton a ocel jsou použity hodnoty volně přístupné na internetu[39], pro kompozitní výztuž jsou použity hodnoty dodané výrobcem[40].

Materiál	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	Spotřeba primární energie (PEI) [MJ/kg]	Svázané emise CO <sub>2</sub> (GWP) [kg CO <sub>2</sub> ekv./kg]
Beton C30/37	2400.00	0.5749	0.1099
Ocel B500B	7850.00	22.5279	1.4820
Kompozitní výztuž Orlitech	2000.00	18.5900	3.1220

*Obr. 19 – Environmentální parametry použitých materiálů*

Panel s hybridní výztuží	Hmotnost [kg]	Spotřeba primární energie (PEI) [MJ]	Svázané emise CO <sub>2</sub> (GWP) [kg CO <sub>2</sub> ekv.]
Beton C30/37 5x1x0.24 m	2880.00	1655.79	316.49
Ocel B500B 4x12 mm	17.76	400.01	26.31
Čedič 13.33x10 mm	10.47	194.63	32.69
		2250.42	375.49

*Obr. 20 – Vyhodnocení environmentálních parametrů pro panel s hybridní výztuží*

Panel s ocelovou výztuží	Hmotnost [kg]	Spotřeba primární energie (PEI) [MJ]	Svázané emise CO <sub>2</sub> (GWP) [kg CO <sub>2</sub> ekv.]
Beton C30/37 5x1x0.24 m	2880.00	1655.79	316.49
Ocel B500B 7x12 mm	31.07	700.02	46.05
		2355.81	362.54

*Obr. 21 – Vyhodnocení environmentálních parametrů pro panel s ocelovou výztuží*

Z hodnotících tabulek vyplývá, že i přes poměrně příznivé environmentální vlastnosti nevyhází panel s hybridní výztuží výrazně lépe než panel s výztuží ocelovou. Při hodnocení svázaných emisí CO<sub>2</sub> dokonce vychází lépe panel s výztuží ocelovou. Důvodem je jednoduše velmi vysoké množství výztuže, které je nutné k dodržení předepsaného průhybu panelu.

## Návrh experimentálního stropního panelu

Návrh experimentálního stropního panelu principem kopíruje návrh předchozího běžného panelu, ale je přizpůsoben rozměrově možnostem laboratoře a dostupného zkušebního zařízení. Jsou navrženy celkem 3 panely, první je vyztužen pouze ocelovou výztuží, druhý hybridní výztuží (ocelovou a čedičovou) a třetí kompozitní výztuží. Všechny 3 panely jsou napočítány na srovnatelnou únosnost 50kN od zkušebního zařízení dle charakteristických hodnot jednotlivých materiálů. Na tuto hodnotu je následně dopočítán i odpovídající průhyb dle ČSN EN 1992-1-1. Krytí je v rámci laboratorních podmínek uvažováno pouze 15 mm.

### 1. Předběžný výpočet MSU a MSP

#### Vstupní hodnoty

##### Posuzovaný průřez

$$b := 0.6 \text{ m}$$

$$h := 100 \text{ mm}$$

$$l := 1.5 \text{ m}$$

##### Beton C30/37 XC1

$$E_{cm} := 33 \text{ GPa}$$

$$f_{ck} := 30 \text{ MPa}$$

$$f_{cm} := f_{ck} + 8 \text{ MPa} = 38 \text{ MPa}$$

$$f_{ctm} := 0.3 \cdot \left( \frac{f_{ck}}{\text{MPa}} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot \text{MPa} = 2.896 \text{ MPa}$$

##### Ocel B500B

$$E_s := 200 \text{ GPa}$$

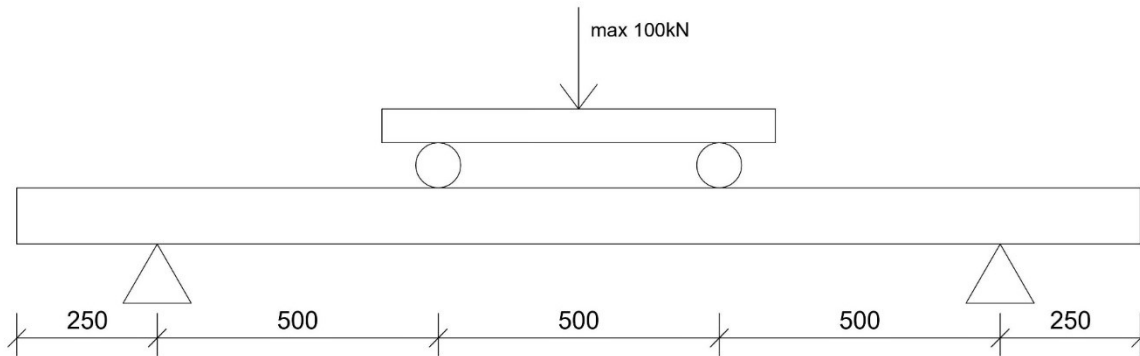
$$f_{yk} := 500 \text{ MPa}$$

##### Orlitech Čedičová tyč

$$E_{\xi} := 50 \text{ GPa}$$

$$f_{\xi} := 1200 \text{ MPa}$$



**Zatížení**

Jelikož maximální možná síla na testovacím zařízení je 100kN, navrhuj panel, který by měl dosáhnout únosnosti při síle 50kN.

Maximální momenty

Moment od vlastní tíhy

$$M_{vl,t} := \frac{1}{8} \cdot \left( 25 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \cdot b \cdot h \right) \cdot l^2 = (4 \cdot 10^{-1}) \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Moment od lisu

$$P := 25 \text{ kN}$$

$$M_{lis} := P \cdot 0.5 \text{ m} = 13 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{Ek} := M_{vl,t} + M_{lis} = 13 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

**Výpočet únosnosti**

$$\varnothing := 6 \text{ mm}$$

Účinná výška průřez

$$d := h - c - \left( \frac{\varnothing}{2} \right) = (8 \cdot 10^{-2}) \text{ m}$$

Nutná plocha výztuže

$$\eta := 1$$

$$\lambda := 0.8$$

$$A_{s,min} := \max \left( 0.26 \cdot b \cdot d \cdot \frac{f_{ctm}}{f_{yk}}, 0.0013 \cdot b \cdot d \right) = 74 \text{ mm}^2$$

$$s_{max} := 2 \cdot h = 200 \text{ mm}$$

**Návrh výztuže - ocel**

$$\varnothing = 6 \text{ mm}$$

$$s := 50 \text{ mm}$$

$$n := \frac{b}{s} = 12$$

$$A_{s,prov} := n \cdot \left( \pi \cdot \left( \frac{\varnothing}{2} \right)^2 \right) = 339 \text{ mm}^2$$

$$x := \frac{A_{s,prov} \cdot f_{yk}}{b \cdot \lambda \cdot \eta \cdot f_{cm}} = 9 \text{ mm}$$

$$\frac{x}{d} = 1 \cdot 10^{-1} < \xi_{bal,1} = 6 \cdot 10^{-1}$$

$$M_{Rk} := A_{s,prov} \cdot f_{yk} \cdot \left( d - \lambda \cdot \frac{x}{2} \right) = 13 \text{ kN} \cdot \text{m} > M_{Ek} = 13 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

**Průhyb při kolapsu**

$$\alpha_{e,st} := \frac{E_s}{E_{cm}} = 6$$

$$x_{ll,st} := \frac{(\alpha_{e,st} - 1) \cdot A_{s,prov}}{b} \cdot \left( -1 + \sqrt{1 + \frac{2 \cdot b \cdot d}{(\alpha_{e,st} - 1) \cdot A_{s,prov}}} \right) = 19 \text{ mm}$$

$$I_{ll,st} := \frac{1}{3} \cdot b \cdot x_{ll,st}^3 + \alpha_{e,st} \cdot A_{s,prov} \cdot (d - x_{ll,st})^2 = 9533730 \text{ mm}^4$$

$$f_{ll,st} := \frac{23}{648} \cdot \frac{P \cdot l^3}{E_{cm} \cdot I_{ll,st}} + \frac{5}{384} \cdot \frac{\left( 25 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \cdot b \cdot h \right) \cdot l^4}{E_{cm} \cdot I_{ll,st}} = 10 \text{ mm}$$

**Návrh výztuže - hybrid**

$$\varnothing = 6 \text{ mm}$$

$$n_y := 4 \quad n_{\zeta} := 3$$

$$\text{poměr} := \frac{f_{\zeta}}{f_{yk}} = 2$$

$$A_{s,prov} := n_y \cdot \left( \pi \cdot \left( \frac{\varnothing}{2} \right)^2 \right) + n_{\zeta} \cdot \left( \pi \cdot \left( \frac{\varnothing}{2} \right)^2 \right) \cdot \text{poměr} = 317 \text{ mm}^2$$

$$x := \frac{A_{s,prov} \cdot f_{yk}}{b \cdot \lambda \cdot \eta \cdot f_{cm}} = 9 \text{ mm}$$

$$\frac{x}{d} = 1 \cdot 10^{-1} < \xi_{bal,1} = 6 \cdot 10^{-1}$$

$$M_{Rk} := A_{s,prov} \cdot f_{yk} \cdot \left( d - \lambda \cdot \frac{x}{2} \right) = 12 \text{ kN} \cdot \text{m} > M_{Ek} = 13 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

**Průhyb při kolapsu**

$$\text{poměr} := \frac{E_{\zeta}}{E_s} = 3 \cdot 10^{-1}$$

$$A_{s,prov} := n_y \cdot \left( \pi \cdot \left( \frac{\varnothing}{2} \right)^2 \right) + n_{\zeta} \cdot \left( \pi \cdot \left( \frac{\varnothing}{2} \right)^2 \right) \cdot \text{poměr} = 134 \text{ mm}^2$$

$$\alpha_{e,st} := \frac{E_s}{E_{cm}} = 6$$

$$x_{ll,st} := \frac{(\alpha_{e,st} - 1) \cdot A_{s,prov}}{b} \cdot \left( -1 + \sqrt{1 + \frac{2 \cdot b \cdot d}{(\alpha_{e,st} - 1) \cdot A_{s,prov}}} \right) = 13 \text{ mm}$$

$$I_{ll,st} := \frac{1}{3} \cdot b \cdot x_{ll,st}^3 + \alpha_{e,st} \cdot A_{s,prov} \cdot (d - x_{ll,st})^2 = 4321408 \text{ mm}^4$$

$$f_{ll,st} := \frac{23}{648} \cdot \frac{25 \text{ kN} \cdot l^3}{E_{cm} \cdot I_{ll,st}} + \frac{5}{384} \cdot \frac{\left( 25 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \cdot b \cdot h \right) \cdot l^4}{E_{cm} \cdot I_{ll,st}} = 22 \text{ mm}$$

**Návrh výztuže - čedič**

$$\varnothing = 6 \text{ mm}$$

$$n_y := 0 \quad n_{\zeta} := 5$$

$$\text{poměr} := \frac{f_{\zeta}}{f_{yk}} = 2$$

$$A_{s,prov} := n_y \cdot \left( \pi \cdot \left( \frac{\varnothing}{2} \right)^2 \right) + n_{\zeta} \cdot \left( \pi \cdot \left( \frac{\varnothing}{2} \right)^2 \right) \cdot \text{poměr} = 339 \text{ mm}^2$$

$$x := \frac{A_{s,prov} \cdot f_{yk}}{b \cdot \lambda \cdot \eta \cdot f_{cm}} = 9 \text{ mm}$$

$$\frac{x}{d} = 1 \cdot 10^{-1} < \xi_{bal,1} = 6 \cdot 10^{-1}$$

$$M_{Rk} := A_{s,prov} \cdot f_{yk} \cdot \left( d - \lambda \cdot \frac{x}{2} \right) = 13 \text{ kN} \cdot \text{m} > M_{Ek} = 13 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

**Průhyb při kolapsu**

$$\text{poměr} := \frac{E_{\zeta}}{E_s} = 3 \cdot 10^{-1}$$

$$A_{s,prov} := n_y \cdot \left( \pi \cdot \left( \frac{\varnothing}{2} \right)^2 \right) + n_{\zeta} \cdot \left( \pi \cdot \left( \frac{\varnothing}{2} \right)^2 \right) \cdot \text{poměr} = 35 \text{ mm}^2$$

$$\alpha_{e,st} := \frac{E_s}{E_{cm}} = 6$$

$$x_{ll,st} := \frac{(\alpha_{e,st} - 1) \cdot A_{s,prov}}{b} \cdot \left( -1 + \sqrt{1 + \frac{2 \cdot b \cdot d}{(\alpha_{e,st} - 1) \cdot A_{s,prov}}} \right) = 7 \text{ mm}$$

$$I_{ll,st} := \frac{1}{3} \cdot b \cdot x_{ll,st}^3 + \alpha_{e,st} \cdot A_{s,prov} \cdot (d - x_{ll,st})^2 = 1274682 \text{ mm}^4$$

$$f_{ll,st} := \frac{23}{648} \cdot \frac{25 \text{ kN} \cdot l^3}{E_{cm} \cdot I_{ll,st}} + \frac{5}{384} \cdot \frac{\left( 25 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \cdot b \cdot h \right) \cdot l^4}{E_{cm} \cdot I_{ll,st}} = 74 \text{ mm}$$

## Experimentální část

### 1. Návrh experimentu

Na experiment jsou navrženy celkem 3 panely, které mají krom rozdílné výztuže většinu parametrů shodných. Panely jsou vyztuženy ocelovou, FRP a hybridní výztuží, aby bylo možné jednoznačně porovnat rozdíl v chování různých výztuží. Nejen z časových důvodů byl pro experiment vybetonován pouze jeden panel od každého druhu výztuže.

Výška: 100 mm

Délka: 2000 mm

Šířka: 600 mm

Ocel B500B / Čedičová výztuž Orlitech

Beton předpokládané třídy pevnosti C30/37, složení vybrané betonové směsi je prezentováno v tabulce Tab. 1:

Složka	Množství [kg] na 1 m <sup>3</sup>
voda	169
cem I 42,5 R	260
písek 0/4	710
stěrk 4/8	520
stěrk 8/16	609

**Tab. 1 – Složení směsi**

Pro ověření pevnosti použitého betonu je vybetonováno a odzkoušeno 5 zkušebních těles.

	1	2	3	4	5
a [mm]	150.29	150.16	150.56	150.13	150.3
b [mm]	150.16	150.29	150.15	150.21	150.13
c [mm]	151.39	147.44	150.27	151.85	152.7
Síla [kN]	739.2	839.6	682.9	774.3	839.6

**Tab. 2 – Rozměry a síly na lisu jednotlivých zkušebních těles**

Měření	1	2	3	4	5
Pevnost [MPa]	32.5	37.9	30.3	33.9	36.6

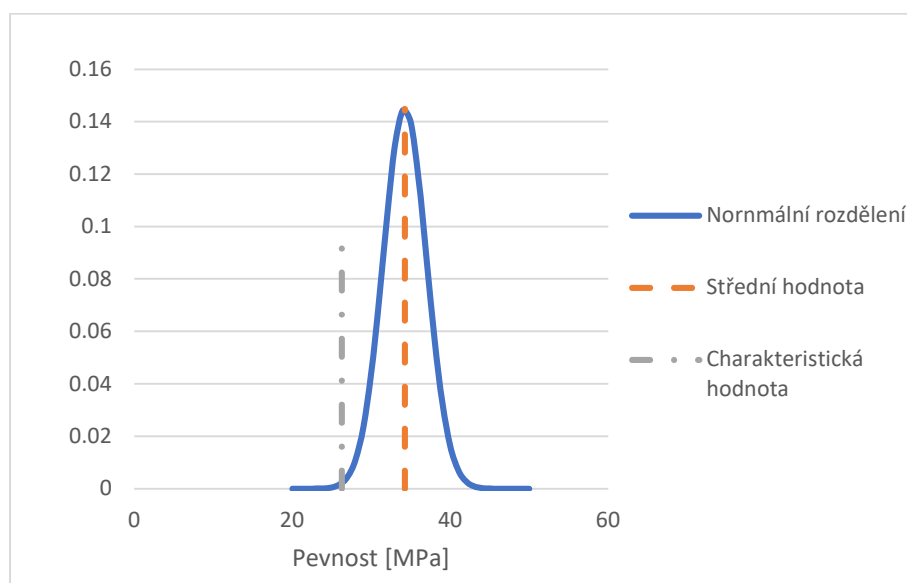
**Tab. 3 – Vypočtené pevnosti zkušebních těles**

Výpočet		
Veličina	Symbol	Hodnota
Střední hodnota	$f_{\text{cube},m}$	34.2 MPa
Počet měření	n	5
Směrodatná odch.	$\sigma(s_x)$	2.8 MPa
Variační koeficient	$V_x$	0.1
Součinitel $k_n$	$k_n$	2.3 (6 měř.; $V_x$ nez.)
Charakteristická hodnota	$f_{\text{cube},k}$	26.3 MPa
Návrhová hodnota	$f_{\text{cube},d}$	17.5 MPa

Tab. 4 – Výsledná pevnost

Rozdělení pravděpodobnosti		f(x)	%
Střední hodnota	34.2 MPa	0.144994	14.49938
$x_m - 3\sigma$	26.0 MPa	0.001611	0.161074
$x_m + 3\sigma$	42.5 MPa	0.001611	0.161074

Tab. 5 – Rozdělení pravděpodobnosti



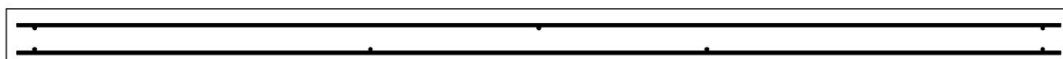
Obr. 22 – Graf znázorňující normální rozdělení pevnosti

Pevnostně zvolený beton po provedení materiálových zkoušek odpovídá nižší pevnostní třídě, než byla předpokládána. Střední hodnota však je blízko uvažované charakteristické hodnotě pro výpočet, tedy experimentální naměřené výsledky by mohly být velmi blízko vypočítaným.

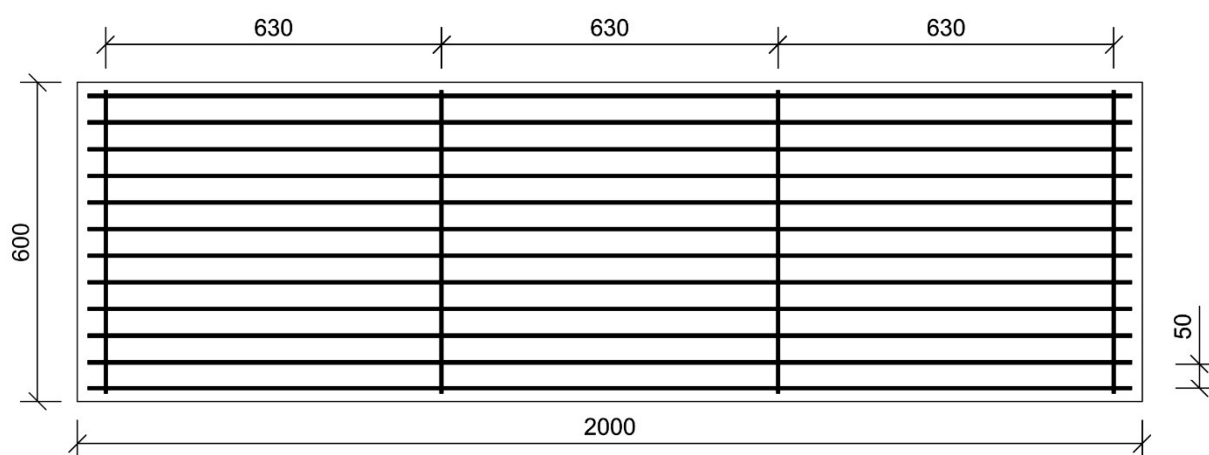
### A. Panel 1 – Ocel

Prvním zkušebním vzorkem je panel o rozměru 2000x600x100mm z betonu C30/37. Jako hlavní ohybová výztuž je zde použita betonářská výztuž B500B o průměru 6 mm a celkovém počtu 12 kusů. Rozdělovací výztuže jsou z betonářské oceli B500B o průměru 6 mm pouze konstrukčně z důvodu propojení podélných prutů, na které je tento experiment zaměřen.

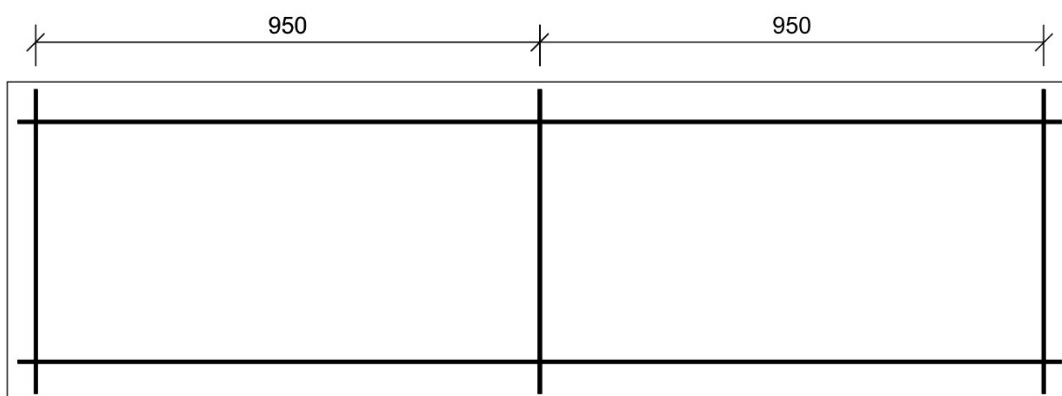
#### Řez



#### Spodní výztuž



#### Horní výztuž

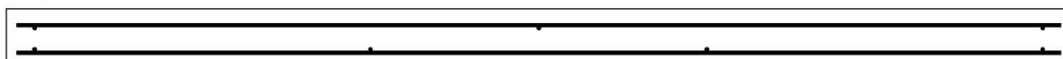


Obr. 23 – Schéma vyztužení panelu s klasickou ocelářskou výztuží

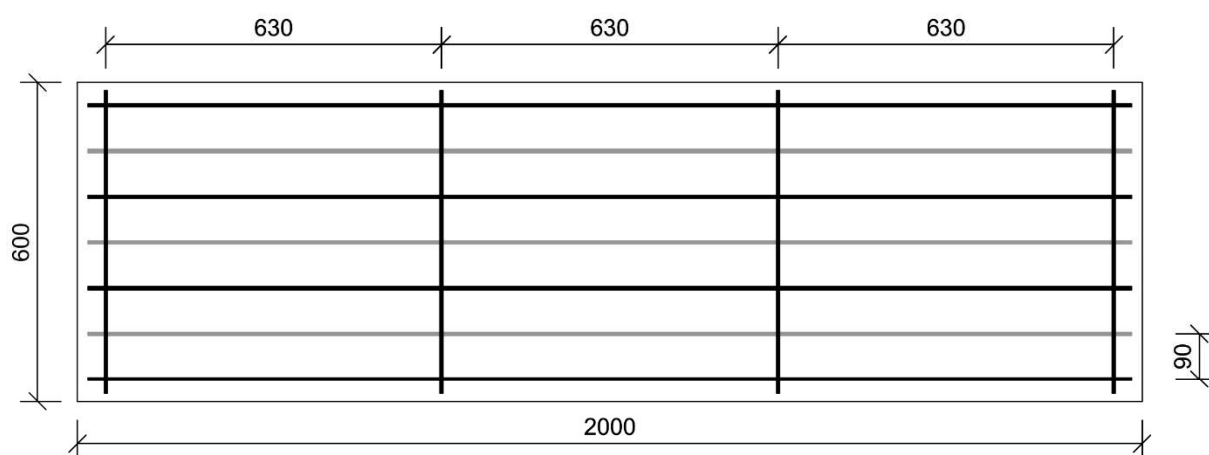
### B. Panel 2 – Hybrid

Druhým zkušebním vzorkem je panel o rozměru 2000x600x100mm z betonu C30/37. Jako hlavní ohybová výztuž je zde použita betonářská výztuž B500B o průměru 6 mm a celkovém počtu 4 kusů, která je doplněna čedičovou výztuží Orlitech o průměru 6 mm a celkovém počtu 3 kusů. Rozdělovací výztuže jsou z betonářské oceli B500B o průměru 6 mm.

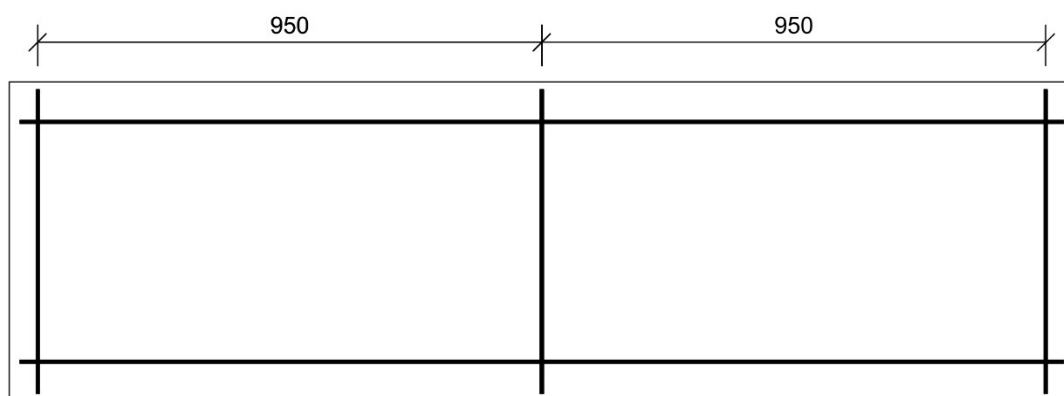
Řez



Spodní výztuž



Horní výztuž



Obr. 24 – Schéma vyztužení panelu s hybridní – klasickou ocelářskou a čedičovou výztuží



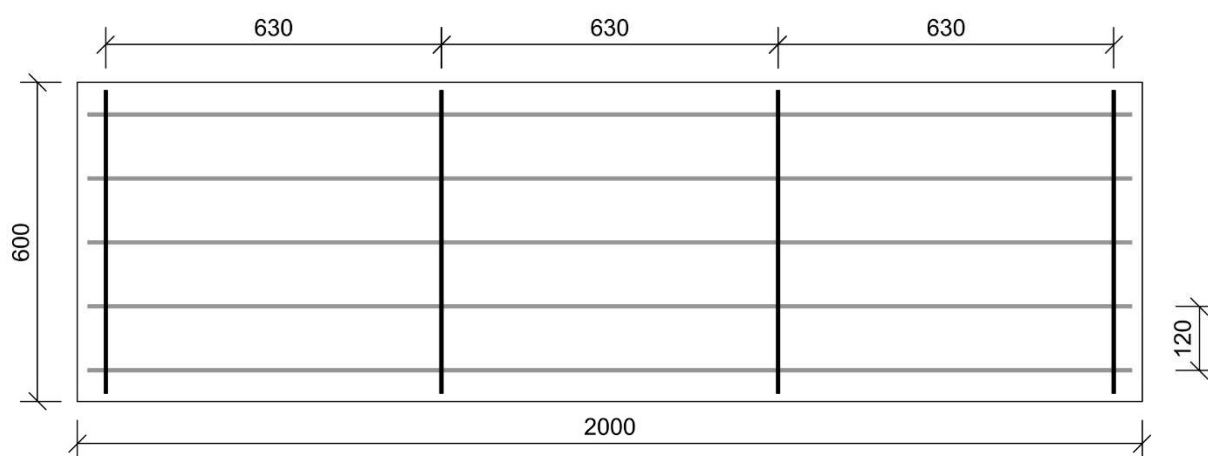
### C. Panel 3 – Kompozitní čedičová výztuž

Posledním zkušebním vzorkem je panel o rozměru 2000x600x100mm z betonu C30/37. Jako hlavní ohybová výztuž je zde použita čedičová výztuž Orlitech o průměru 6 mm a celkovém počtu 5 kusů. Rozdělovací výztuže jsou z betonářské oceli B500B o průměru 6 mm.

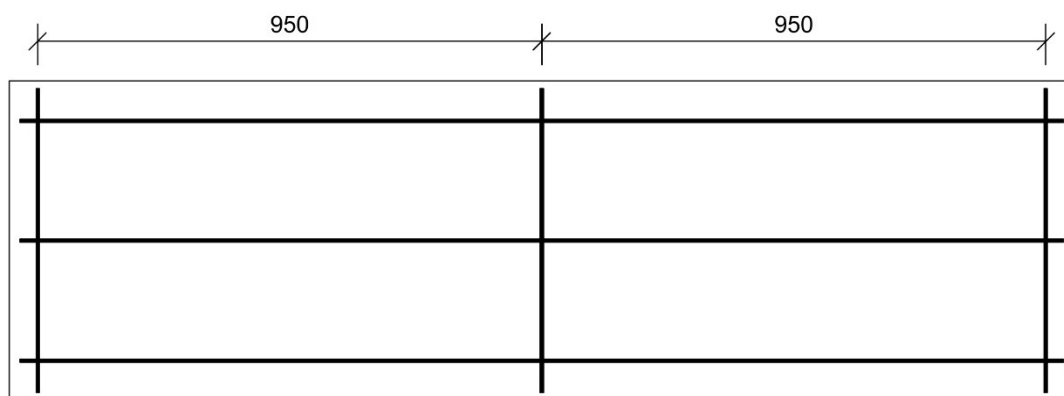
Řez



Spodní výztuž



Horní výztuž



Obr. 25 – Schéma vyztužení panelu s čedičovou výztuží

## 2. Příprava vzorků

### A. Forma

Forma je vyrobena z dřevotřískové desky o tloušťce 15 mm a její povrch je laminátový, aby se dosáhlo hladkého povrchu a minimální nasákavosti. Forma je sešroubována vruty, které se při odbedňování odšroubují a vzorek bude možné jednoduše vyjmout. Vnitřní rozměr formy je tedy 2000x600x100 mm pro všechny panely.



*Obr. 26 – Foto formy na betonáž vzorku*

### B. Vyvázení výztuže

Před betonáží jednotlivých vzorků je nejprve potřeba připravit výztuž.

Na hlavní ohybovou výztuž je použita betonářská výztuž B500B o průměru 6 mm, nebo kompozitní čedičová výztuž Orlitech o průměru 6 mm, případně jejich kombinace u hybridu. Obě v délce 2 m (při této zkoušce zkoumáme zejména mechanické vlastnosti a nedbáme v tomto experimentu na trvanlivost). Ostatní rozdělovací/pomocná výztuž je tvořena betonářskou výztuží B500B o průměru 6 mm, která je potřeba zkrátit na požadovanou délku pomocí úhlové brusky. Rozdělovací výztuž je pouze pro účel vyvázení a zajištění polohy hlavní výztuže. Horní podélná výztuž o průměru 6 mm je umístěna v panelu primárně pro zajištění celistvosti a v případě přetržení dolní nosné výztuže zabraňuje pádu zkušebního vzorku na čidla a podlahu laboratoře.

Do formy se vkládají jednotlivé pruty hlavní ohybové výztuže, přes které se následně pokládá rozdělovací výztuž, se kterou se hlavní ohybová výztuž sváže armovacím drátem.

První se připravuje výztuž do panelu s čistě betonářskou výztuží o průměru 6 mm a počtu 12 kusů, které se přivazují ke 4 kusům rozdělovací výztuže stejného průměru. S ocelovou výztuží se pracuje poměrně příjemně, protože drží tvar a nekroučí se. Oproti dvou dalším panelům je zde vyšší množství výztuže a tím i stoupá časová náročnost na provedení vázání.



*Obr. 27 – Foto připravené spodní výztuže pro první panel s čistě ocelovou výztuží*

Další na řadě je panel s výztuží hybridní, tzn. se smíšenou výztuží z prutů klasické ocelářské a čedičové. V tomto případě je výhodné nejdříve navázat ocelovou výztuž a až následně pracovat s čedičovou výztuží. Z obrázku je patrné, že čedičová výztuž o průměru 6 mm je mírně zahnutá a poddajná a je nutno ji mírně přihnout, aby byla na správném místě.



*Obr. 28 – Foto nsvázané ocelové a čedičové výztuže*



*Obr. 29 – Foto připravené spodní výztuže pro druhý panel po ohnutí čedičové výztuže*

Poslední připravovanou výztuží je ta, kde hlavní ohybovou výztuž tvoří pouze čedičové pruty průměru 6 mm, které jsou přivázané k ocelové výztuži průměru 6 mm. Tato varianta má výhodu toho, že je prutů poměrně málo a sníží se tak čas potřebný k svázání. Drobná komplikace však nastává při snaze o srovnání prutů do rovnoběžnosti, chybí tu totiž jakýkoliv prvek, který by přímost udržoval, nicméně nepředpokládá se výrazný negativní vliv na výsledky experimentu.



**Obr. 30 – Foto připravené spodní výztuže pro třetí panel s čistě čedičovou výztuží**

Vzhledem k tomu, že při tomto experimentu používáme čedičovou výztuž, která po vyčerpání únosnosti projevuje skoro nulovou duktilitu, je nutné použít i horní výztuž, která zajistí, že vyčerpaný průřez nedopadne na podlahu, kterou by mohl poškodit. Proto byla aplikována již výše zmíněná horní podélná výztuž, která je vidět na Obr. 28.



**Obr. 31 – Foto připravené horní výztuže**

Po připravení spodní a horní výztuže je nutné na bednění aplikovat odbedňovací olej. Po naolejování se výztuže uloží do bednění, přidají se distanční tělíska a vše se sváže armovacím drátem. Po svázání je možné panel vybetonovat.



*Obr. 32 – Foto s naolejovaným bedněním a připravenou svázanou výztuží*

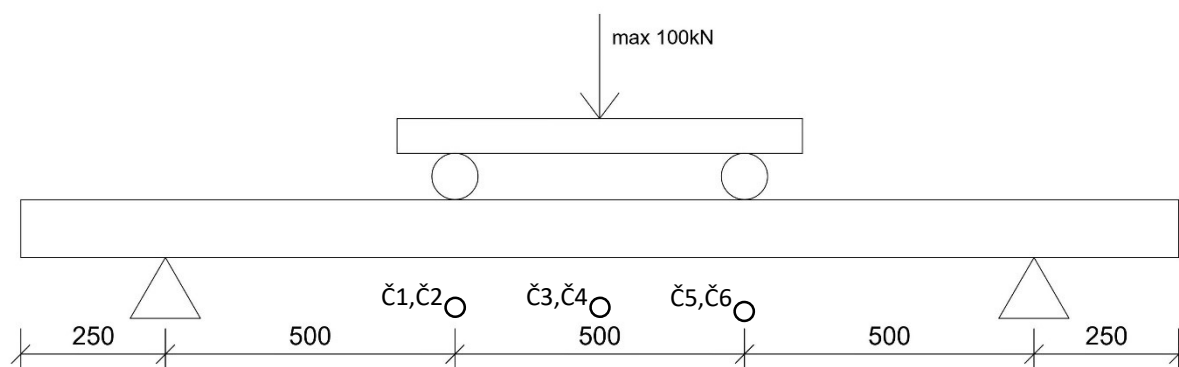
Odformování panelu probíhá den po betonáži. Forma se následně vyčistí, sešroubuje a připraví pro betonáž dalšího zkušebního vzorku.



*Obr. 33 – Foto odbedněného panelu*

### 3. Průběh experimentu a naměřené hodnoty

Jednotlivé panely jsou zatěžovány 4 bodovým ohybem s maximální možnou silou 100kN. Panely jsou dimenzovány s použitím charakteristických hodnot na únosnost 50kN. Průběh zatěžování je na lisu, respektive měřící stanici, nastaven na konstantní rychlost zatěžování posunem 3 mm/min až do porušení. Průhyb je měřen 6 čidly umístěnými pod testovanými panely. Dvě čidla jsou umístěna uprostřed rozpětí panelu a zbylé čtyři čidla jsou umístěna v páru vždy 500 mm od krajních podpor (tzn. přímo pod místy zatěžování) Obr. 34.



Obr. 34 – Schéma zatěžování



Obr. 35 – Foto panelu připraveného k destruktivní zatěžovací zkoušce

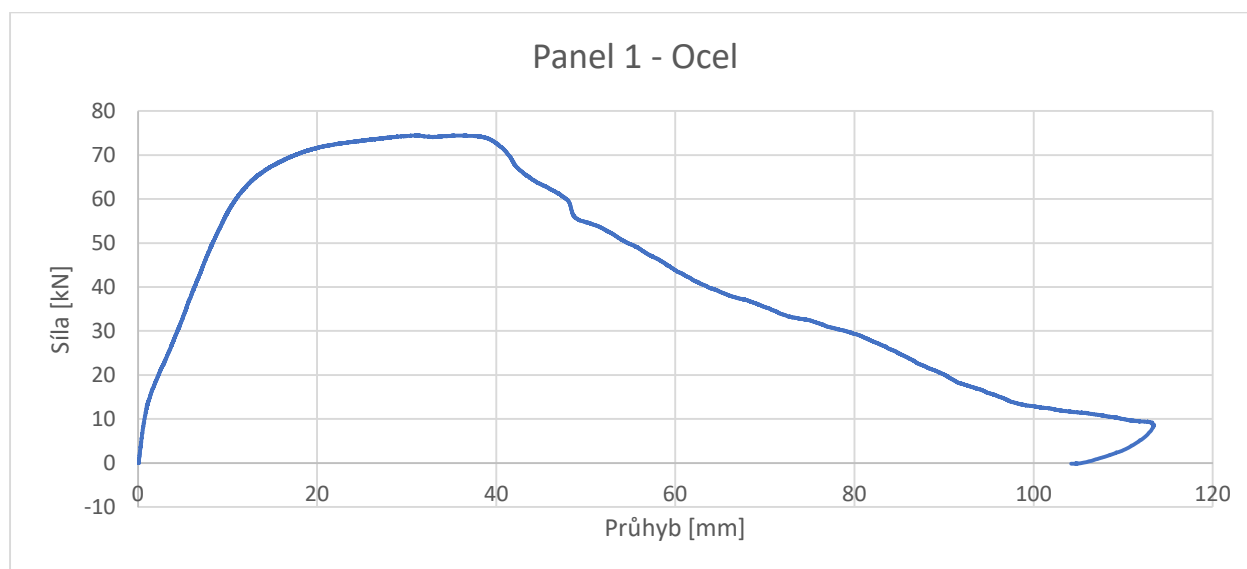
### A. Zatěžování – Panel 1 – Ocel

Prvním testovacím vzorkem je panel tvořený betonem C30/37 a ocelovou výztuží B500B 12x6 mm. Při předběžném návrhu se počítalo s dosažením únosnosti při síle 50 kN a průhybu 10 mm. (Při použití naměřené pevnosti betonu z testovacích vzorků a střední pevnosti oceli (680MPa[43]), vychází dosažení únosnosti na 72kN)

Z průběhu zatěžování (Obr. 37) je patrné, že do dosažení síly 60 kN vykazuje panel lineární chování. Následně se ocel dostává k hranici elastického chování při síle na lisu cca 72 kN. Při dosažení síly 75 kN panel ztrácí pevnost. Panel však dále zatěžujeme do úplné destrukce, aby byl porovnatelný způsob porušení mezi jednotlivými panely.

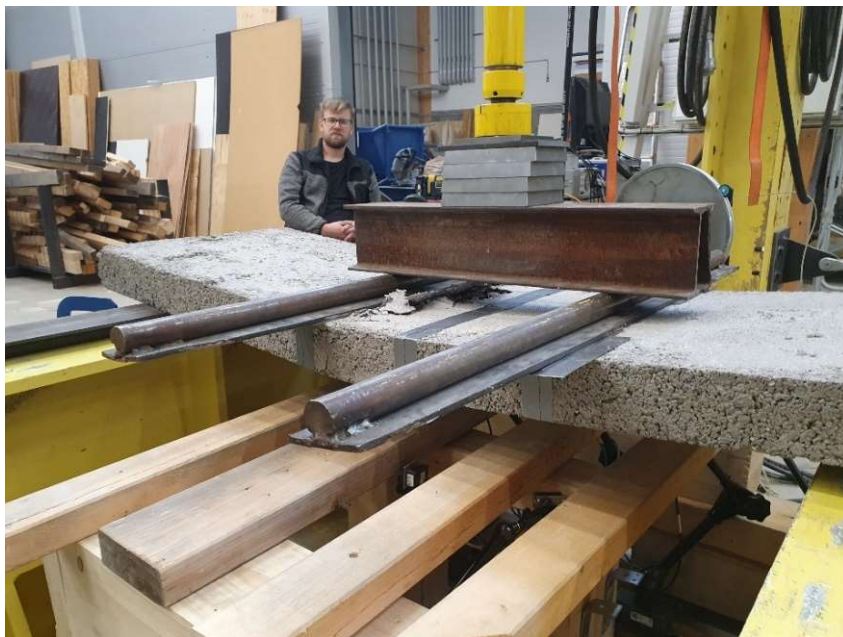


Obr. 36 – Odkaz na video zatěžování panelu 1



Obr. 37 – Graf znázorňující průběh zatěžování panelu s ocelovou výztuží





*Obr. 38 – Panel 1 při drcení betonu*



*Obr. 39 – Panel 1 na hranici úplné destrukce*

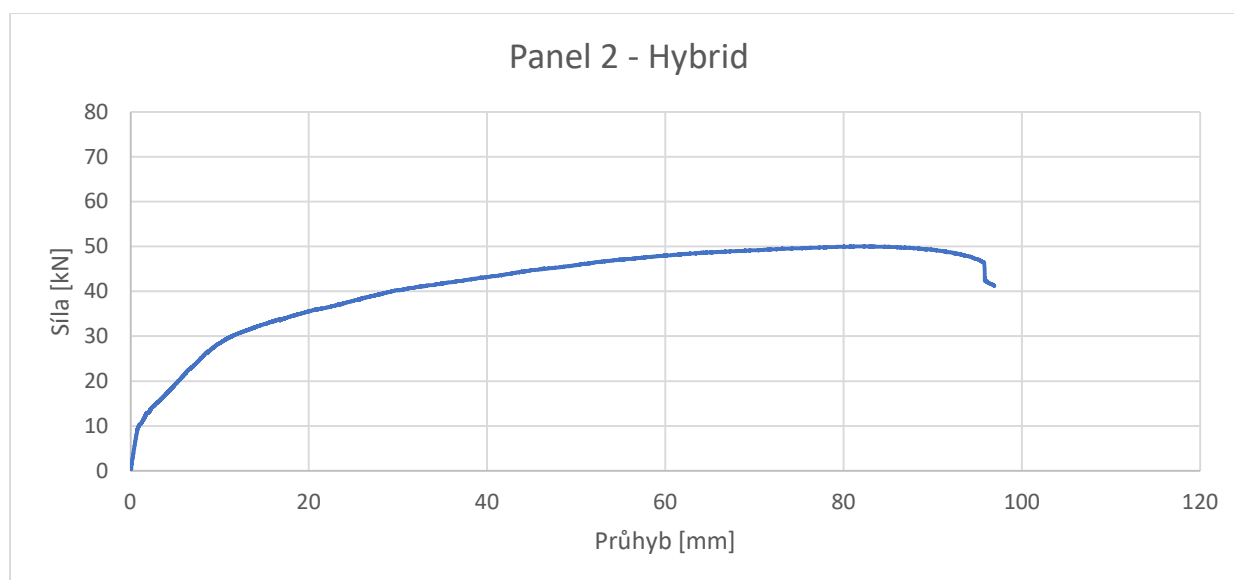
### B. Zatěžování – Panel 2 – Hybrid

Druhým testovacím vzorkem je panel tvořený betonem C30/37 a hybridní výztuží, složenou z ocelové výztuže B500B 4x6mm a z kompozitní čedičové výztuže Orlitech 3x6mm. Při předběžném návrhu se počítalo s dosažením únosnosti při síle 48 kN a průhybu 22 mm.

Z průběhu zatěžování (Obr. 41) je patrné, že únosnost panelu v podstatě přesně odpovídá vypočteným hodnotám poměrně přesně. Průhyb se však při maximální únosnosti liší 4x. Z průběhu je patrné, že při síle 30 kN přešla ocelová výztuž pravděpodobně do plastického stavu a tím se vývoj průhybu změnil. Před kolapsem byly slyšet zvuky odpovídající praskání výztuže.



Obr. 40 – Odkaz na video zatěžování panelu 2



Obr. 41 – Graf znázorňující průběh zatěžování panelu s hybridní výztuží



*Obr. 42 – Panel 2 při maximální únosnosti*

Po odtižení panelu je odkryta místy krycí vrstva u spodní ohybové výztuže, nebo JE následně po experimentu dále mechanicky odstraněna a je zjištěno, že došlo opravdu k přetržení ocelové výztuže a roztřepení (kolapsu) kompozitní výztuže (Obr. 43).



*Obr. 43 – Panel 2 roztřepená kompozitní výztuž a přetržená ocelová výztuž*

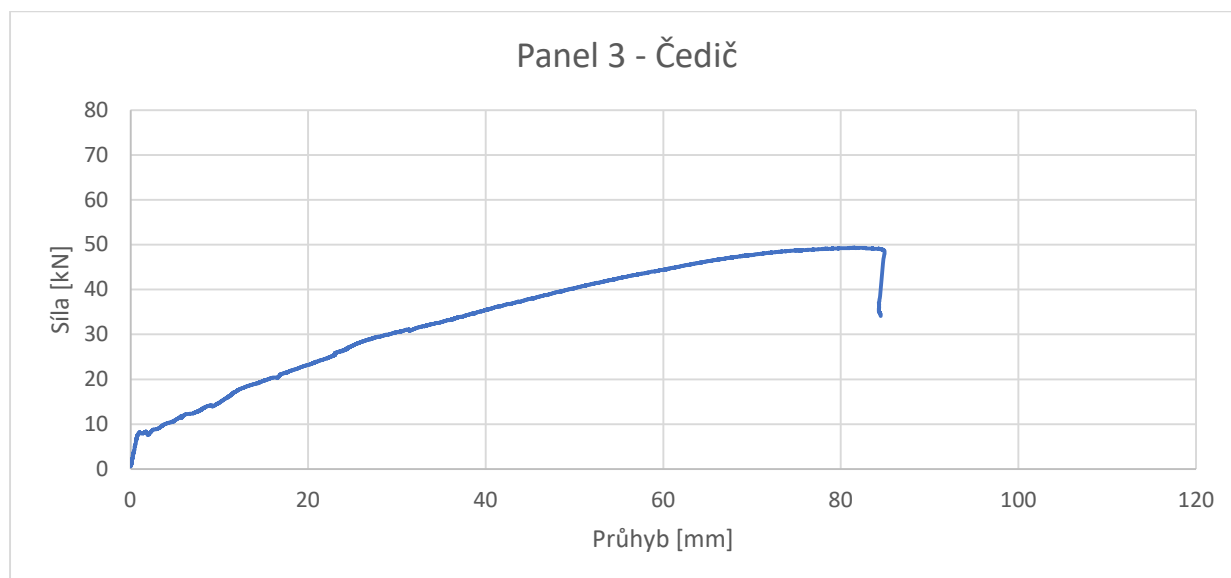
### C. Zatěžování – Panel 3 – Čedič

Posledním testovacím vzorkem je panel tvořený betonem C30/37 a kompozitní čedičovou výztuží Orlitech 5x6mm. Při předběžném návrhu se počítalo s dosažením únosnosti při síle 50 kN a průhybu 74 mm.

Z průběhu zatěžování (Obr. 41) je patrné, že únosnost panelu odpovídá vypočteným hodnotám a průhyb při dosažení únosnosti také.



Obr. 44 – Odkaz na video zatěžování panelu 3



Obr. 45 – Graf znázorňující průběh zatěžování panelu s čedičovou výztuží

Při prvotním pohledu (Obr. 46) na zkolabovaný panel se mohlo prvním pohledem zdát, že došlo k vytažení kompozitní výztuže z panelu, což by znamenalo nedostatečnou soudržnost kompozitní výztuže a betonu. Po bližším prozkoumání se spíše jedná o usmyknutí betonu při extrémním průhybu, kde došlo i k odpadávání větších částí betonové matrice.



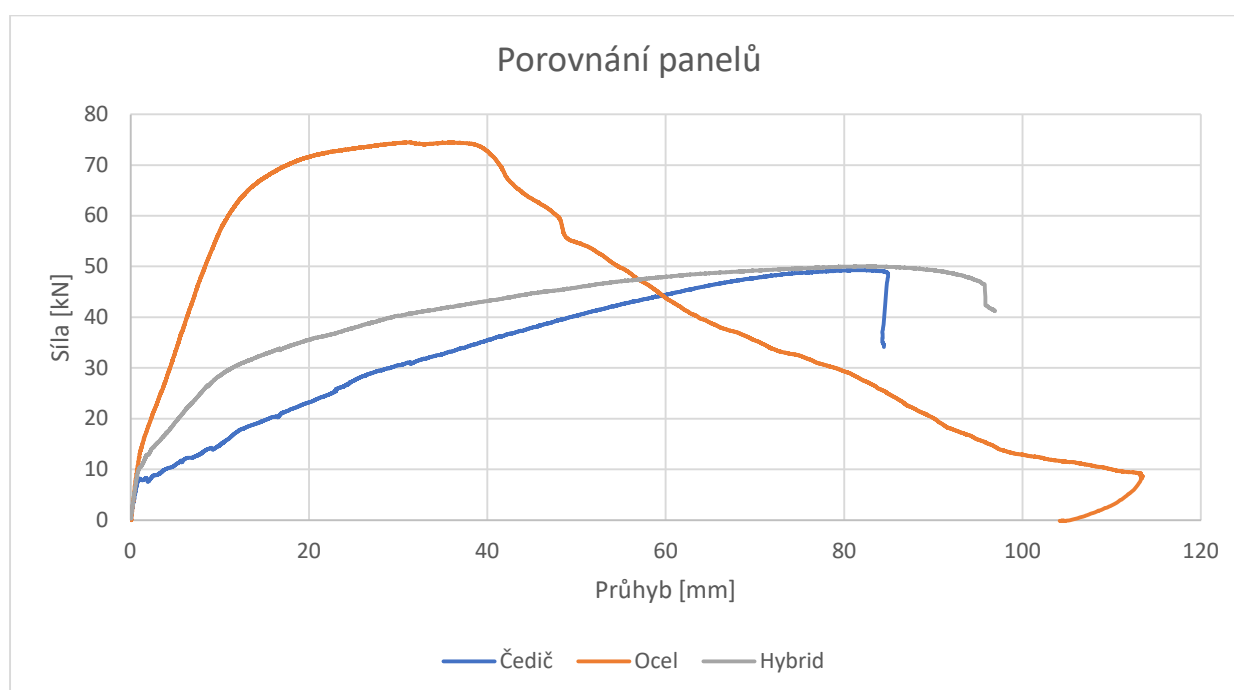
*Obr. 46 – Panel 3 foto kolapsu 1*



*Obr. 47 – Panel 3 foto kolapsu 2*

#### D. Porovnání zatěžování

Z průběhu zatěžování (Obr. 48) je bohužel patrné, že se při předběžném návrhu experimentálních panelů nepodařilo úplně přesně sladit únosnost panelu s výztuží ocelovou a panelů s výztuží hybridní a pouze kompozitní. Tento nesoulad je způsoben mnohem vyšší reálnou průměrnou pevností oceli (680MPa[43]), než je její charakteristická pevnost a naopak minimální mírou pevnostní rezervy u kompozitní čedičové výztuže při použití charakteristických hodnot pevnosti dle technického listu. Z grafu je nicméně patrné, že u panelu s hybridní výztuží došlo ke snížení průhybů na začátku zatěžování a při dosažení únosnosti bylo dosaženo i fáze, kdy konstrukce varuje před kolapsem (síla se snížila, ale stále docházelo ke zvětšení deformace). Je nutno poznamenat, že ke kolapsu u těchto dvou panelů došlo až při extrémní deformaci cca 85 a 95 mm, čemuž odpovídají křivosti dokonce cca 1/19 a 1/16. V ten samý moment měl už panel s ocelovou výztuží výrazně menší působící sílu.



Obr. 48 – Graf znázorňující porovnání průběhu zatěžování jednotlivých panelů

## Závěr

Při rozhodování mezi použitím klasické ocelové výztuže, nebo některé kompozitní výztuže, je určitě důležité zohlednění několika faktorů.

Prvním faktorem je určitě trvanlivost, která je u klasické ocelové výztuže bez přidané ochranné úpravy poměrně nízká. Ke korozi a následné ztrátě požadovaných vlastností dochází poměrně jednoduše. Naopak kompozitní výztuž má v tomto ohledu převahu, protože nekoroduje a poměrně dobře odolává agresivnímu prostředí, čímž se může jevit jako ideální materiál například při použití na mostech a obecně vozovkách, kde klasická ocelová výztuž velmi trpí. S tím ruku v ruce jde i možná nižší krycí vrstva betonu a tím poměrně výrazná úspora materiálu a financí.

Druhým faktorem je cena, která je u čedičových a skelných kompozitů poměrně příznivá. Z dat, která jsem měl k dispozici, vyšlo, že stropní panely o stejné únosnosti jsou při použití kompozitní čedičové výztuže opravdu cenově výhodnější než panely s výztuží ocelovou. Je však nutno zdůraznit, že aby panely dosáhly i požadovaných průhybů, vyšly by finančně stejně, nebo dokonce draž než panely s výztuží ocelovou.

Třetím důležitým faktorem je signalizace konstrukce před kolapsem, která je u kompozitní výztuže v podstatě nulová, z tohoto důvodu je kompozitní výztuž pravděpodobně nemožné použít jako jedinou výztuž v konstrukci. Dalším faktorem k diskusi by byla také požární odolnost kompozitní výztuže, která obsahuje hořlavý epoxid.

Čtvrtým faktorem je environmentální náročnost. Musím se přiznat, že jsem si myslel, že kompozitní výztuž vyjde mnohem lépe než výztuž ocelová, bohužel nízký modul pružnosti nás nutí použít mnohem větší množství kompozitní výztuže a tím jdou její příznivé environmentální vlastnosti stranou.

Nakonec bych chtěl obecně popsat práci s kompozitní výztuží. Měl jsem možnost pracovat s výztuží Orlitech 6 mm. Tato výztuž se dodává ve svitcích a po nakrácení na požadované délky zůstává stále mírně zahnutá. Pokud je v konstrukci alespoň částečně použita ocelová výztuž, dá se kompozitní výztuž poměrně dobře vázat, pokud je však použita pouze výztuž kompozitní, je poměrně složité s ní pracovat, protože se velice jednoduše deformuje. Celkově

jsem měl z kompozitní výztuže pocit, že je poměrně křehká a při neopatrné manipulaci se může jednoduše poškodit.

Celkově si myslím, že u obecných aplikací, jako jsou stropy v rodinných a bytových domech, zvítězí klasická ocelová výztuž. Dobře se s ní manipuluje, člověk nemá strach, že ji poškodí a dá se na stavbě ohýbat dle potřeby. Pokud se však bude jednat o aplikace, kde je nutná vyšší životnost, nebo je prostředí agresivní, může být použití hybridní výztuže (kompozitní výztuž umístěna blíže k povrchu a ocel hlouběji s vyšším krytím) poměrně zajímavou alternativou.



## Zdroje

- [1] „Vaněček - 2018 - Studijní obor Konstrukce pozemních staveb.pdf". Viděno: 7. leden 2023. [Online]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/74327/F1-DP-2018-Vanecek-Ondrej-Analyza%20deformaci%20zelezobetonovych%20desek.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>
- [2] „9. prednaska TNT\_ základní.pdf". Viděno: 25. prosinec 2022. [Online]. Dostupné z: [https://elearning.tul.cz/pluginfile.php/283151/course/section/72988/9.%20prednaska%20TNT\\_%20z%C3%A1kladn%C3%AD.pdf](https://elearning.tul.cz/pluginfile.php/283151/course/section/72988/9.%20prednaska%20TNT_%20z%C3%A1kladn%C3%AD.pdf)
- [3] „170.pdf". Viděno: 25. prosinec 2022. [Online]. Dostupné z: [http://147.33.74.135/knihy/uid\\_isbn-80-7080-568-4/pdf/170.pdf](http://147.33.74.135/knihy/uid_isbn-80-7080-568-4/pdf/170.pdf)
- [4] „Print page". [http://web2.mendelu.cz/af\\_291\\_projekty2/vseo/print.php?page=4009&typ=html](http://web2.mendelu.cz/af_291_projekty2/vseo/print.php?page=4009&typ=html) (viděno 10. listopad 2022).
- [5] „152.pdf". Viděno: 25. prosinec 2022. [Online]. Dostupné z: [http://147.33.74.135/knihy/uid\\_isbn-80-7080-600-1/pdf/152.pdf](http://147.33.74.135/knihy/uid_isbn-80-7080-600-1/pdf/152.pdf)
- [6] „Beton", *Wikipedie*. 20. prosinec 2022. Viděno: 25. prosinec 2022. [Online]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Beton&oldid=22242741>
- [7] „Hydratace | Ebeton", 17. srpen 2021. <https://www.ebeton.cz/pojmy/hydratace/> (viděno 25. prosinec 2022).
- [8] „BETONOVÁNÍ ZA NÍZKÝCH TEPLŮ". <https://www.stachema.cz/zajimavosti/betonovani-za-nizkych-teplot:a87.htm> (viděno 25. prosinec 2022).
- [9] „Jak dlouho tvrdne beton?", 1. listopad 2016. <https://www.stavebni-vzdelani.cz/jak-dlouho-tvrdne-beton/> (viděno 25. prosinec 2022).
- [10] Soft. spol. s r. o. www.softconsult.com, „Konstrukční beton". [https://www.cemix.cz/aktuality/konstrukcni-beton?utm\\_source=partner\\_web\\_izom&utm\\_medium=banner&utm\\_campaign=Betony&utm\\_term=&utm\\_content=300\\*250](https://www.cemix.cz/aktuality/konstrukcni-beton?utm_source=partner_web_izom&utm_medium=banner&utm_campaign=Betony&utm_term=&utm_content=300*250) (viděno 25. prosinec 2022).
- [11] „ČSN EN 12390-3 | ČSN online". <https://csnonline.agentura-cas.cz/Detailnormy.aspx?k=509868> (viděno 7. leden 2023).
- [12] „Přísady do betonu". <https://cze.sika.com/cs/produkty-pro-stavebnictvi/prisady-do-betonu.html> (viděno 25. prosinec 2022).
- [13] „2225\_BETON.pdf". Viděno: 25. prosinec 2022. [Online]. Dostupné z: [https://concrete.fsv.cvut.cz/esf/presentace/2225\\_BETON.pdf](https://concrete.fsv.cvut.cz/esf/presentace/2225_BETON.pdf)
- [14] „Doprava betonu a stavebních materiálů po Vltavě. Za letošek o 3000 nákladáků ve městě méně | iMaterialy". [https://www.imaterialy.cz/rubriky/informace-vyrobce/doprava-betonu-a-stavebnich-materialu-po-vltave-za-letosek-o-3000-nakladaku-ve-meste-mene\\_46950.html](https://www.imaterialy.cz/rubriky/informace-vyrobce/doprava-betonu-a-stavebnich-materialu-po-vltave-za-letosek-o-3000-nakladaku-ve-meste-mene_46950.html) (viděno 25. prosinec 2022).
- [15] Slukin, V. M. (2001). *Demidovskie gnezda : Nev'iansk, Verkhniĭ Tagil, Nizhniĭ Tagil. Elena Arapova, Tatiana Kononova. Ekaterinburg: ID „Sokrat". p. 26. ISBN 5-88664-106-8. OCLC 56187883.*
- [16] „Fichier:Невьянская башня Демидовых.JPG — Wikipédia". [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:%D0%9D%D0%B5%D0%B2%D1%8C%D1%8F%D0%BD%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%8F\\_%D0%B1%D0%B0%D1%88%D0%BD%D1%8F\\_%D0%94%D0%B5%D0%BC%D0%B8%D0%B4%D0%BE%D0%B2%D1%8B%D1%85.JPG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:%D0%9D%D0%B5%D0%B2%D1%8C%D1%8F%D0%BD%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%8F_%D0%B1%D0%B0%D1%88%D0%BD%D1%8F_%D0%94%D0%B5%D0%BC%D0%B8%D0%B4%D0%BE%D0%B2%D1%8B%D1%85.JPG) (viděno 11. listopad 2022).
- [17] „Způsoby výroby betonářské výztuže a problematika jejího svařování (2. část)", *TZB-info*. <https://stavba.tzb-info.cz/beton-malty-omitky/18715-zpusoby-vyroby-betonarske-vyztuze-a-problematika-jejeho-svarovani-2-cast> (viděno 11. listopad 2022).
- [18] „Vysokohodnotné betony - Českomoravský beton – výroba betonu, doprava betonu a čerpání betonových směsí". <https://www.transportbeton.cz/transportbetony/vysokohodnotne-betony.html> (viděno 7. leden 2023).
- [19] ESTAV.cz, „Vlastnosti a typy betonářské výztuže. Proč je špatně říkat roxor? Už dávno neexistuje jen jeden typ", *ESTAV.cz*. <https://www.estav.cz/cz/10655.vlastnosti-a-typy-betonarske-vyztuze> (viděno 25. prosinec 2022).
- [20] „Betonářská výztuž", *Wikipedie*. 7. květen 2022. Viděno: 11. listopad 2022. [Online]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Beton%C3%A1%C5%99sk%C3%A1\\_v%C3%BDztu%C5%BE&oldid=21239658](https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Beton%C3%A1%C5%99sk%C3%A1_v%C3%BDztu%C5%BE&oldid=21239658)
- [21] O. Veleba, „Studium vlivu složení na mechanické vlastnosti vysokohodnotného betonu", *Study of the influence of composition on the mechanical properties of high performance concrete*, Viděno: 26. prosinec 2022. [Online]. Dostupné z: <http://dspace.vutbr.cz/handle/11012/13572>

- [22] „30278956.pdf“. Viděno: 25. prosinec 2022. [Online]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/30278956.pdf>
- [23] „Moderní kompozitní materiály jako náhrada klasické výztuže do betonu | iMaterialy“. [https://www.imaterialy.cz/rubriky/materialy/moderni-kompozitni-materialy-jako-nahrada-klasicke-vyztuze-do-betonu\\_42548.html](https://www.imaterialy.cz/rubriky/materialy/moderni-kompozitni-materialy-jako-nahrada-klasicke-vyztuze-do-betonu_42548.html) (viděno 4. prosinec 2022).
- [24] „katalog\_kompozitni\_vyztuze\_cze\_m.pdf“. Viděno: 25. prosinec 2022. [Online]. Dostupné z: [https://www.prefa-kompozity.cz/wp-content/uploads/2015/09/katalog\\_kompozitni\\_vyztuze\\_cze\\_m.pdf](https://www.prefa-kompozity.cz/wp-content/uploads/2015/09/katalog_kompozitni_vyztuze_cze_m.pdf)
- [25] R. R. Nagavally, „COMPOSITE MATERIALS - HISTORY, TYPES, FABRICATION TECHNIQUES, ADVANTAGES, AND APPLICATIONS“, *Compos. Mater.*, s. 6, 2016.
- [26] P. A. DOLARY\$6, 4 miliardy\$Provozní zisk 346 milionů \$Čistý příjem 226 milionů \$Aktiva celkem 7, 55 miliardy \$Celkový kapitál 3, 69 miliardy \$Počet zaměstnanců 17, a 000webová Stránka Www.korekce.com, „Owens Corning“, *Encyklopedie*. [https://wikijii.com/wiki/Owens\\_Corning](https://wikijii.com/wiki/Owens_Corning) (viděno 25. prosinec 2022).
- [27] uesuae, „Fiber Reinforced Polymer / Plastic (FRP)“, *UES*, 28. červenec 2022. <https://www.universalengineeringconsultants.com/post/fiber-reinforced-polymer-plastic-frp> (viděno 27. listopad 2022).
- [28] „vlakna.pdf“, *Google Docs*. [https://drive.google.com/file/d/13IaXaUZ1GDDetCdZ1KaufjHLRdTLNomu/view?usp=sharing&usp=embed\\_facebook](https://drive.google.com/file/d/13IaXaUZ1GDDetCdZ1KaufjHLRdTLNomu/view?usp=sharing&usp=embed_facebook) (viděno 10. prosinec 2022).
- [29] „F2-BP-2018-Zitek-Adam-priloha-vlakna.pdf“. Viděno: 25. prosinec 2022. [Online]. Dostupné z: <https://dSPACE.cvu.cz/bitstream/handle/10467/79503/F2-BP-2018-Zitek-Adam-priloha-vlakna.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>
- [30] A. Vlákén, „COMPARISON PROPERTIES OF THE SELECTED INORGANIC FIBRES“.
- [31] S. Zande, „What Are The Differences Between Meta-Aramid And Para-Aramid yarns?“ <https://www.servicethread.com/blog/what-are-the-differences-between-meta-aramid-and-para-aramid-yarns> (viděno 4. prosinec 2022).
- [32] carbon2, „Carbon Fibres: Production, Properties and Potential Use – Material Science Research India“. <http://www.materialsciencejournal.org/vol14no1/carbon-fibres-production-properties-and-potential-use/> (viděno 4. prosinec 2022).
- [33] „Basalt fiber: from earth an ancient material for innovative and modern application — it“, 17. květen 2019. <https://web.archive.org/web/20190517081412/http://www.enea.it/it/seguici/pubblicazioni/EAI/anno-2011/indice-world-view-3-2011/basalt-fiber-from-earth-an-ancient-material-for-innovative-and-modern-application/> (viděno 4. prosinec 2022).
- [34] „Materials & Processes: Resin matrices for composites“. <https://www.compositesworld.com/articles/the-matrix> (viděno 10. prosinec 2022).
- [35] „matrice.pdf“, *Google Docs*. [https://drive.google.com/file/d/1xKu2cZA3gkL3PC\\_DgIXrOVUoFScaVFtL/view?usp=sharing&usp=embed\\_facebook](https://drive.google.com/file/d/1xKu2cZA3gkL3PC_DgIXrOVUoFScaVFtL/view?usp=sharing&usp=embed_facebook) (viděno 10. prosinec 2022).
- [36] R. Qin, A. Zhou, a D. Lau, „Effect of reinforcement ratio on the flexural performance of hybrid FRP reinforced concrete beams“, *Compos. Part B Eng.*, roč. 108, s. 200–209, led. 2017, doi: 10.1016/j.compositesb.2016.09.054.
- [37] D. Lau a H. J. Pam, „Experimental study of hybrid FRP reinforced concrete beams“, *Eng. Struct.*, roč. 32, č. 12, s. 3857–3865, pro. 2010, doi: 10.1016/j.engstruct.2010.08.028.
- [38] X. Ruan, C. Lu, K. Xu, G. Xuan, a M. Ni, „Flexural behavior and serviceability of concrete beams hybrid-reinforced with GFRP bars and steel bars“, *Compos. Struct.*, roč. 235, s. 111772, bře. 2020, doi: 10.1016/j.compstruct.2019.111772.
- [39] „Envimat.cz - Katalog fyzikálních a environmentálních profilů stavebních konstrukcí“. <http://www.envimat.cz/> (viděno 7. leden 2023).
- [40] „A-6mm-1.1.00242.2021\_MRPI-EPD\_Orlimex-CZ-s.r.o.-\_Basalt-Fibre-Reinforced-Polymer-Rebar-6mm-FINAL.pdf“. Viděno: 7. leden 2023. [Online]. Dostupné z: [https://orlitech.co.uk/wp-content/uploads/2022/08/A-6mm-1.1.00242.2021\\_MRPI-EPD\\_Orlimex-CZ-s.r.o.-\\_Basalt-Fibre-Reinforced-Polymer-Rebar-6mm-FINAL.pdf](https://orlitech.co.uk/wp-content/uploads/2022/08/A-6mm-1.1.00242.2021_MRPI-EPD_Orlimex-CZ-s.r.o.-_Basalt-Fibre-Reinforced-Polymer-Rebar-6mm-FINAL.pdf)
- [41] „Envimat.cz - Materiály - Beton prostý“. <http://www.envimat.cz/materialy/betony-a-zelezobetony/prosty/beton-prosty.html> (viděno 7. leden 2023).
- [42] „Envimat.cz - Materiály - Ocel, výztuž do betonu“. <http://www.envimat.cz/materialy/kovy/ocel-vyztuz-do-betonu.html> (viděno 7. leden 2023).

[43] „218458803.pdf“. Viděno: 24. prosinec 2022. [Online]. Dostupné z:  
<https://core.ac.uk/download/pdf/218458803.pdf>

## Seznam obrázků, fotek a grafů

Obr. 1 - Znázornění synergismu[3] .....	12
Obr. 2 – Skladba dřeva [4].....	13
Obr. 3 – Nevianská šikmá věž [16] .....	15
Obr. 4 – Tradiční ocelová výztuž [17].....	16
Obr. 5 – Betonářská výztuž typu Roxor[20] .....	17
Obr. 6 – Čl. 1 – Schéma zatěžovaného nosníku [36].....	24
Obr. 7 – Čl. 2 – Schéma zatěžovaného nosníku [38].....	26
Obr. 8 – Čl. 2 – Průřezy jednotlivých zkušebních nosníků [38] .....	26
Obr. 9 – Čl. 2 – Graf znázorňující průběh zatěžování[38] .....	27
Obr. 10 – Graf porovnávající výztuž ocelovou a výztuž z vláknového kompozitu [38] .....	28
Obr. 11 – Uživatelské rozhraní optimalizace .....	31
Obr. 12 – Graf znázorňující výsledek optimalizace ocelové výztuže .....	31
Obr. 13 – Uživatelské rozhraní optimalizace .....	33
Obr. 14 – Graf znázorňující výsledek optimalizace pevnosti betonu .....	34
Obr. 15 – Graf znázorňující výsledek optimalizace Čedičové výztuže .....	36
Obr. 16 – Graf znázorňující výsledek optimalizace GFRP výztuže .....	36
Obr. 17 – Graf znázorňující výsledek optimalizace C-GFRP výztuže .....	37
Obr. 18 – Graf znázorňující výsledek optimalizace CFRP výztuže.....	37
Obr. 19 – Environmentální parametry použitých materiálů.....	47
Obr. 20 – Vyhodnocení environmentálních parametrů pro panel s hybridní výztuží .....	47
Obr. 21– Vyhodnocení environmentálních parametrů pro panel s ocelovou výztuží.....	47
Obr. 22 – Graf znázorňující normální rozdělení pevnosti.....	54
Obr. 23 – Schéma vyztužení panelu s klasickou ocelářskou výztuží .....	55
Obr. 24 – Schéma vyztužení panelu s hybridní – klasickou ocelářskou a čedičovou výztuží ..	56
Obr. 25 – Schéma vyztužení panelu s čedičovou výztuží.....	57
Obr. 26 – Foto formy na betonáž vzorku .....	58
Obr. 27 – Foto připravené spodní výztuže pro první panel s čistě ocelovou výztuží .....	59
Obr. 28 – Foto nsvázané ocelové a čedičové výztuže.....	60
Obr. 29 – Foto připravené spodní výztuže pro druhý panel po ohnutí čedičové výztuže.....	60
Obr. 30 – Foto připravené spodní výztuže pro třetí panel s čistě čedičovou výztuží .....	61

Obr. 31 – Foto připravené horní výztuže .....	61
Obr. 32 – Foto s naolejovaným bedněním a připravenou svázanou výztuží.....	62
Obr. 33 – Foto odbedněného panelu .....	62
Obr. 34 – Schéma zatěžování.....	63
Obr. 35 – Foto panelu připraveného k destruktivní zatěžovací zkoušce.....	63
Obr. 36 – Odkaz na video zatěžování panelu 1.....	64
Obr. 37 – Graf znázorňující průběh zatěžování panelu s ocelovou výztuží .....	64
Obr. 38 – Panel 1 při drcení betonu.....	65
Obr. 39 – Panel 1 na hranici úplné destrukce.....	65
Obr. 40 – Odkaz na video zatěžování panelu 2.....	66
Obr. 41 – Graf znázorňující průběh zatěžování panelu s hybridní výztuží.....	66
Obr. 42 – Panel 2 při maximální únosnosti.....	67
Obr. 43 – Panel 2 roztřepená kompozitní výztuž a přetržená ocelová výztuž.....	67
Obr. 44 – Odkaz na video zatěžování panelu 3.....	68
Obr. 45 – Graf znázorňující průběh zatěžování panelu s čedičovou výztuží .....	68
Obr. 46 – Panel 3 foto kolapsu 1.....	69
Obr. 47 – Panel 3 foto kolapsu 2.....	69
Obr. 48 – Graf znázorňující porovnání průběhu zatěžování jednotlivých panelů .....	70

## Python skript použitý pro optimalizaci MSÚ

```
import re
import math
from struct import pack
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np

#####
# EXCEPTIONS
#####
def ValErr(message):
    raise ValueError(message)

#####
# ZNÁMÉ HODNOTY
#####
vyztuz_prumer_list = [
    6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 25, 28, 32, 36, 40]

st_vlivu_prostredi_list_norma = [
    "X0",
    "XC1", "XC2", "XC3", "XC4",
    "XD1", "XD2", "XD3",
    "XF1", "XF2", "XF3", "XF4",
    "XA1", "XA2", "XA3",
    "XM1", "XM2", "XM3",
    "XS1", "XS2", "XS3"]

tr_beton_list = ["C8/10", "C12/15", "C16/20",
    "C20/25", "C25/30", "C30/37", "C35/45", "C40/50",
    "C45/55", "C50/60", "C55/67", "C60/75", "C70/85",
    "C80/95", "C90/105", "C100/115",]

tr_ocel_list_norma = ["B420B", "B500A", "B500B", "B550A", "B550B"]

#####
# Vstupní data
#####

class ModelParameters:
    def __init__(self, h = 0.250, L = 6, gk_skladba = 1, qk = 3,
        tr_beton="C30/37", tr_vyztuz=500,
        st_vlivu_prostredi = "XC1", vyztuz_prumer = 0.012,
        ziv_80_let = False, ziv_100_let = False,
        desk_kce = False, zvl_kontrola = False, b = 1,
        souc_spoleh_vyztuz = 1.15):
        self.h = h
        self.L = L
        self.gk_skladba = gk_skladba
        self.qk = qk
        self.tr_beton = tr_beton
        self.tr_vyztuz = tr_vyztuz
        self.st_vlivu_prostredi = st_vlivu_prostredi
        self.vyztuz_prumer = vyztuz_prumer
```

```

self.ziv_80_let = ziv_80_let
self.ziv_100_let = ziv_100_let
self.desk_kce = desk_kce
self.zvl_kontrola = zvl_kontrola
self.b = b
self.souc_spoleh_vyztuz = souc_spoleh_vyztuz
### KONTROLA
# stupně vlivu prostředí prostředí
st_vlivu_prostredi_list = re.findall(r"[X][0]|[X][SCDFAM][1-4]", st_vlivu_prostredi)
st_vlivu_prostredi_list_err = re.split(r" |, |; |,|;", st_vlivu_prostredi)
for i in st_vlivu_prostredi_list_err:
    if i not in st_vlivu_prostredi_list_norma:
        print("!!!Nalezeny neplatné stupně vlivu prostředí!!!")
        print("Nalezené platné stupně prostředí: ")
        print(st_vlivu_prostredi_list)
        print("Platné stupně prostředí: ")
        print(st_vlivu_prostredi_list_norma)
        break
if not st_vlivu_prostredi_list:
    print("Platné stupně prostředí: ")
    print(st_vlivu_prostredi_list_norma)
    ValErr("Nenalezeny žádné platné stupně prostředí")
# třída betonu
if tr_beton not in tr_beton_list:
    ValErr("Neznámá třída betonu")
# třída oceli
#if tr_vyztuz not in tr_ocel_list_norma:
# ValErr("Neznámá třída oceli")
self.st_vlivu_prostredi_list = st_vlivu_prostredi_list

#p = ModelParameters(st_vlivu_prostredi="blb XC1")
#print(p.st_vlivu_prostredi_list)

#####
# VLASTNOSTI MATERIÁLŮ
#####
#BETON
# pevnost v tlaku charakteristická hodnota
def fck(par):
    fck = int(re.findall(r"[0-9][0-9]", par.tr_beton)[0]) #MPa
    fck *= 1000 #KPa
    return fck

def fcd(par):
    souc_spoleh_beton = 1.5
    fcd = fck(par)/souc_spoleh_beton
    return fcd
# pevnost v tlaku stredni hodnota
def fcm(par):
    fcm = fck(par) + 8.0
    return fcm
# pevnost v tahu stredni hodnota
def fctm(par):
    fctm = 0.3*fck(par)**(2/3)
    return fctm

```

```

#pevnost v tahu dolni kvantil
def fctk005(par):
    fctk005 = 0.7 * fctm(par)
    return fctk005
#pevnost v tahu horní kvantil
def fctk095(par):
    fctk095 = 1.3 * fctm(par)
    return fctk095
# modul pružnosti střední hodnota
def Ecm(par):
    Ecm = 9500 * fcm(par)**(1/3)
    return Ecm

# VYZTUŽ
def fyk(par):
    fyk = par.tr_vyztuz #MPa
    fyk *= 1000 #kPa
    return fyk

def fyd(par):
    fyd = fyk(par)/par.souc_spoleh_vyztuz
    return fyd #kPa

#####
# PŘEDBĚŽNÉ ROZMĚRY
#####

def predbezny_navrh_h(par):
    # prostě uložene h = L/25 ~ L/20
    return round((((par.L / 25) + (par.L / 20)) / 2), 2)

#####
# KRYTÍ
#####

def c_nom(par: ModelParameters):
    st_vlivu_prostredi_list = par.st_vlivu_prostredi_list
    vyztuz_prumer = par.vyztuz_prumer
    tr_beton = par.tr_beton
    ziv_80_let = par.ziv_80_let
    ziv_100_let = par.ziv_100_let
    desk_kce = par.desk_kce
    zvl_kontrola = par.zvl_kontrola

### 4.4.1.2 Minimální krycí vrstva cmin
# cmin = max {cmin,b; cmin,dur + Δcdur,γ – Δcdur,st – Δcdur,add; 10 mm} (4.2)
# cmin,b minimální krycí vrstva z hlediska soudržnosti, viz 4.4.1.2 (3);
# cmin,dur minimální krycí vrstva z hlediska podmínek prostředí, viz 4.4.1.2 (5);
# Δcdur,γ přídatná bezpečnostní složka, viz 4.4.1.2 (6)
# Δcdur,st redukce minimální krycí vrstvy při použití nerezové oceli viz 4.4.1.2 (7);
# Δcdur,add redukce minimální krycí vrstvy při použití přídatné ochrany, viz 4.4.1.2 (8).

Δcdev = 10      #doporucena hodnota

```



```

# pro betonovani na upravene podlozi zvetsit o 40mm
# pro betonovani na zeminu zvetsit o 75mm

c_min_b = vyztuz_prumer

def c_min_dur():
    def tr_kce():
        #doporucena trida konstrukce
        dop_tr_kce = "S4"
        tr_kce_list = ["S1", "S2", "S3", "S4", "S5", "S6",]
        tr_kce_num = tr_kce_list.index(dop_tr_kce)
        st_vlivu_prostredi_43N_dict = {
            "X0": 0, "XC1": 1, "XC2": 2, "XC3": 3,
            "XC4": 4, "XD1": 5, "XD2": 6, "XD3": 7, }
        tr_beton_43N_dict = {
            0 : "C20/25", 1 : "C25/30", 2 : "C30/37", 3 : "C35/45",
            4 : "C40/50", 5 : "C40/50", 6 : "C40/50", 7 : "C45/55", }
        st_vlivu_prostredi_num = 0
        for i in st_vlivu_prostredi_list:
            if i in st_vlivu_prostredi_43N_dict:
                if st_vlivu_prostredi_43N_dict[i] > st_vlivu_prostredi_num:
                    st_vlivu_prostredi_num = st_vlivu_prostredi_43N_dict[i]

        if not st_vlivu_prostredi_num == 0:
            if tr_beton_list.index(tr_beton_43N_dict[st_vlivu_prostredi_num]) <= tr_beton_list.index(tr_beton):
                tr_kce_num -= 1

        if ziv_80_let:
            tr_kce_num += 1
        if ziv_100_let:
            tr_kce_num += 2
        if desk_kce:
            tr_kce_num -= 1
        if zvl_kontrola:
            tr_kce_num -= 1

        return tr_kce_list [tr_kce_num]

    tr_kce_dict = {
        "S1": [10, 10, 10, 15, 20, 25, 30],
        "S2": [10, 10, 15, 20, 25, 30, 35],
        "S3": [10, 10, 20, 25, 30, 35, 40],
        "S4": [10, 15, 25, 30, 35, 40, 45],
        "S5": [15, 20, 30, 35, 40, 45, 50],
        "S6": [20, 25, 35, 40, 45, 50, 55],
    }
    st_vlivu_prostredi_44N_dict = {
        "X0": 0, "XC1": 1, "XC2": 2, "XC3": 2, "XC4": 3,
        "XD1": 4, "XS1": 4, "XD2": 5, "XS2": 5, "XD3": 6, "XS3": 6}
    st_vlivu_prostredi_num = 0
    for i in st_vlivu_prostredi_list:
        if i in st_vlivu_prostredi_44N_dict:
            if st_vlivu_prostredi_44N_dict [i] > st_vlivu_prostredi_num:
                st_vlivu_prostredi_num = st_vlivu_prostredi_44N_dict [i]

    c_min_dur = tr_kce_dict [tr_kce()] [st_vlivu_prostredi_num]

```

```
#kontrola
def kontrola_c_nom():
    print(st_vlivu_prostredi_num)
    print(tr_kce())
    print("C_min_dur")
    print(c_min_dur)
    print(st_vlivu_prostredi_num)
    print(st_vlivu_prostredi_list)
    print(vyztuz_prumer)
    print(tr_beton)
    print(ziv_80_let)
    print(ziv_100_let)
    print(desk_kce)
    print(zvl_kontrola)

    return c_min_dur

Δcdur_γ = 0      #doporucena hodnota
Δcdur_st = 0    #doporucena hodnota
Δcdur_add = 0   #doporucena hodnota

c_min = max(c_min_b, c_min_dur() + Δcdur_γ - Δcdur_st - Δcdur_add, 10)
#obrus
if "XM3" in st_vlivu_prostredi_list:
    c_min += 15
elif "XM2" in st_vlivu_prostredi_list:
    c_min += 10
elif "XM1" in st_vlivu_prostredi_list:
    c_min += 5

c_nom = c_min + Δcdev #mm
#zaokrouhleni na 5mm
def zaokroh():
    if c_nom % 5 == 0:
        c_nom = c_nom
    else:
        c_nom = c_nom - (c_nom % 5) + 5
    return(c_nom)

c_nom /= 1000 #m
return c_nom

#####
# ZATÍŽENÍ
#####
#h = predbezny_navrh_h()

def gk_vl_tiha(par):
    obj_tiha_beton = 25 #kN/m3
    gk_vl_tiha = par.h * par.b * obj_tiha_beton
    return gk_vl_tiha

def deska_fk(par):
    fk = gk_vl_tiha(par) + par.gk_skladba + par.qk #kN/m
    return fk
```

```

def deska_fd(par):
    fd = gk_vl_tiha(par) * 1.35 + par.gk_skladba * 1.35 + par.qk * 1.5 #kN/m
    return fd

def deska_Vd(par):
    deska_Vd = 1/2*deska_fd(par)*par.L
    return deska_Vd

def deska_Mmaxd(par):
    Mmaxd = 1/8 * deska_fd(par) * par.L**2
    return Mmaxd

#####
# NÁVRH VÝZTUŽE
#####

lambda_c = 0.8
eta_c = 1.0

#ucinna vyska prurezu
def d(par):
    d = par.h - c_nom(par) - par.vyztuz_prumer/2
    return round(d, 3) #m
#minimální plocha výztuže
def as_min(par):
    as_min = min(0.26*par.b*d(par)*(fctm(par)/fyk(par)), 0.0013*par.b*d(par))
    return as_min
#nutná plocha výztuže
def asd(par):
    x = d(par)
    MEd = deska_Mmaxd(par)
    asd = ((par.b*x*eta_c*fcd(par))/fyd(par))*( 1-((1-((2*MEd)/(par.b*(x**2)*eta_c*fcd(par))))**(1/2)))
    print("xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx")
    print("x = {0}".format(x))
    print("MEd = {0}".format(MEd))
    print("fcd = {0}".format(fcd(par)))
    print("fyd(par) = {0}".format(fyd(par)))
    print("asd = {0}".format(asd))
    return asd
#maximalni vzdalenost prutu
def max_b_prut(par):
    max_b_prut = min(2 * par.h, 0.250)
    return max_b_prut
#plocha jednoho prutu
def S_prut(par):
    S_prut = math.pi*((par.vyztuz_prumer/2)**2) #m2
    return S_prut

def vyztuz_min_pocet(par):
    #zaokrouhleni vzdlaneosti
    zaokrouhleni = 0.010
    #využití
    vyuziti = 0.9
    min_vyztuz_pocet = (max(asd(par),as_min(par))/S_prut(par))
    vyuz_vyztuz_pocet = min_vyztuz_pocet / vyuziti

```

```

max_vzdalenost = par.b / vyuz_vyztuz_pocet
vzdalenost = (max_vzdalenost // zaokrouhleni) * zaokrouhleni
vyztuz_pocet = par.b / vzdalenost
print("Pro prut {0} m, tloustky desky {1} m je vzdalenost prutu {2}".format(par.vyztuz_prumer, par.h,
vzdalenost))
#vyztuz_pocet=6
return vyztuz_pocet
# navržená plocha výztuže
def as_(par):
    as_ = vyztuz_min_pocet(par)*S_prut(par)
    return as_ #m2

#####
# POSOUZENÍ VÝZTUŽE
#####
def vzdalenost_x(par):
    vzdalenost_x = ( as_(par)*fyd(par) )/( par.b*lambda_c*eta_c*fcd(par) )
    return vzdalenost_x #m

def kontrola_dle_ksi_bal_1(par):
    ksi_bal_1 = 700000/(700000+fyd(par))
    pomer = vzdalenost_x(par)/d(par)
    if pomer < ksi_bal_1:
        return True
    else:
        return False

def mRd(par):
    mRd = as_(par) * fyd(par) * (d(par) - lambda_c * vzdalenost_x(par) /2)
    return mRd

def deska_kontrola_moment(par):
    mEd = deska_Mmaxd(par)
    if mRd(par) > mEd:
        return True
    else:
        return False

#####
# OPTIMALIZACE
#####

def grafy(par: ModelParameters):

    cena_beton_list = {"C8/10":1600, "C12/15":1800, "C16/20":1900,
        "C20/25":2000, "C25/30":2200, "C30/37":2400, "C35/45":2600,}
        #Kč/m3
    cena_vyztuz_ocel_list = {6:70, 8:62, 10:51.3 , 12:51.3 , 14:51.2 ,16:51.3}
    cena_vyztuz_komp_list = {6:400, 8:283, 10:232, 12:219, 14:194, 16:179, 18:179}
    tloustky = []
    unosnost = []
    ceny = []
    ceny_pomer = []
    desky_tl_dolni_mez = max(predbezny_navrh_h(par) - 0.200, 0.100)
    desky_tl_horni_mez = predbezny_navrh_h(par) + 0.1
    tloustka = desky_tl_dolni_mez

```

```

while tloustka <= desky_tl_horni_mez:
    tloustka = round(tloustka, 3)
    tloustky.append(tloustka)
    tloustka += 0.010
vypocty_list1 = [["Ocel 8"    ,"C30/37", 0.008, 500, 1.15, 492187],
                ["Ocel 10"   ,"C30/37", 0.010, 500, 1.15, 405017],
                ["Ocel 12"   ,"C30/37", 0.012, 500, 1.15, 403811],
                ["GFRP 8"    ,"C30/37", 0.008, 1050, 1.3, 676409],
                ["GFRP 10"   ,"C30/37", 0.010, 1050, 1.3, 560225],
                ["GFRP 12"   ,"C30/37", 0.012, 1050, 1.3, 503991],]

vypocty_list2 = [["Ocel 8"    ,"C30/37", 0.008, 500, 1.15, 492187],
                ["Ocel 10"   ,"C30/37", 0.010, 500, 1.15, 405017],
                ["Ocel 12"   ,"C30/37", 0.012, 500, 1.15, 403811],
                ["C-GFRP 8"  ,"C30/37", 0.008, 1050, 1.3, 5*676409],
                ["C-GFRP 10" ,"C30/37", 0.010, 1050, 1.3, 5*560225],
                ["C-GFRP 12" ,"C30/37", 0.012, 1050, 1.3, 5*503991],]

vypocty_list3 = [["Ocel 8"    ,"C30/37", 0.008, 500, 1.15, 492187],
                ["Ocel 10"   ,"C30/37", 0.010, 500, 1.15, 405017],
                ["Ocel 12"   ,"C30/37", 0.012, 500, 1.15, 403811],
                ["CFRP 8"    ,"C30/37", 0.008, 1700, 1.3, 10*676409],
                ["CFRP 10"   ,"C30/37", 0.010, 1700, 1.3, 10*560225],
                ["CFRP 12"   ,"C30/37", 0.012, 1700, 1.3, 10*503991],]

vypocty_list = [["Ocel 8"    ,"C30/37", 0.008, 500, 1.15, 492187],
                ["Ocel 10"   ,"C30/37", 0.010, 500, 1.15, 405017],
                ["Ocel 12"   ,"C30/37", 0.012, 500, 1.15, 403811],
                ["Čedič 8"   ,"C30/37", 0.008, 1700, 1.3, 726144],
                ["Čedič 10"  ,"C30/37", 0.010, 1700, 1.3, 751211],
                ["Čedič 12"  ,"C30/37", 0.012, 1700, 1.3, 733881],]

# generuje unosnosti jednotlivých tloustek a prurezu vyztuze v mRd
for i in vypocty_list:
    par.tr_beton = i[1]
    par.tr_vyztuz = i[3]
    par.vyztuz_prumer = i[2]
    par.souc_spoleh_vyztuz = i[4]
    cena_vyztuz = i[5]

    unosnost_vi = []
    ceny_vi = []

    for h in tloustky:
        par.h = h
        if kontrola_dle_ksi_bal_1(par):
            unosnost_vi.append(round(deska_Mmaxd(par)/mRd(par), 3))
        else:
            unosnost_vi.append(0)
    unosnost.append(unosnost_vi)

    for h in tloustky:
        par.h = h
        as_2 = 0
        if kontrola_dle_ksi_bal_1(par):
            as_2 = as_(par)

```

```
    beton = cena_beton_list[i[1]] * (1 * h - as_2)
    ocel = as_2 * cena_vyztuz
    ceny_vi.append(int(beton + ocel))
    ceny.append(ceny_vi)

#maximalni cena
def cena_max():
    ceny_max = []
    for i in ceny:
        ceny_max.append(max(i))
    cena_max = max(ceny_max)
    return cena_max
cena_max = cena_max()
ceny_pomer = [[round(s/cena_max, 2) for s in xs] for xs in ceny]

#print(tloustky)
#print(unosnost)
f = plt.figure()
f.set_figwidth(16)
f.set_figheight(6)

print(ceny)
print(ceny_pomer)
print(cena_max)
colors = ["b", "g", "r", "c", "m", "y", "k"]
for i in range(len(unosnost)):
    plt.plot(tloustky, unosnost[i], "bo--", label=vypocty_list[i][0], color=colors[i],)
    plt.plot(tloustky, ceny_pomer[i], ":", color=colors[i],)
    plt.xticks(np.arange(tloustky[0], tloustky[len(tloustky)-1], 0.010))
    plt.legend()
#print(tloustky, ceny_pomer)
plt.show()

par = ModelParameters()
grafy(par)
```