

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STAVEBNÍ**

KATEDRA BETONOVÝCH A ZDĚNÝCH KONSTRUKCÍ



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**VYZTUŽOVÁNÍ BETONOVÝCH KONSTRUKCÍ POMOCÍ
MATERIÁLŮ NA BÁZI UHLÍKU**

**REINFORCEMENT OF CONCRETE STRUCTURES BY
CARBON BASED MATERIALS**

2023

Vedoucí bakalářské práce:

Doc. Ing. Petr Bílý, Ph.D.

Vypracoval:

Matěj Rutrle

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Rutrlé Jméno: Matěj Osobní číslo: 491177
Zadávací katedra: Katedra betonových a zděných konstrukcí
Studijní program: Stavební inženýrství
Studijní obor/specializace: Konstrukce pozemních staveb

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Vyztužování betonových konstrukcí pomocí materiálů na bázi uhlíku

Název bakalářské práce anglicky: Reinforcement of concrete structures by carbon based materials

Pokyny pro vypracování:

- Přehled typů výztužných prvků na bázi uhlíku a jejich vlastností
- Oblasti použití, výhody, nevýhody a příklady aplikací jednotlivých možností vyztužení
- Popis postupu statického návrhu pro zvolenou variantu vyztužování
- Demonstrace postupu návrhu na praktickém příkladu

Seznam doporučené literatury:

- FprEN 1992-1-1: Eurocode 2: Design of concrete structures - pracovní verze nové generace Eurokódu 2
- Tyfo Design software od firmy Betosan s.r.o.
- Dohnálek, P.: Využití kompozitních materiálů pro zesilování železobetonových konstrukcí. Beton TKS 3/2005, s. 16-19. Dostupný online: <https://www.ebeton.cz/clanky/2005-3-16-vyuziti-kompozitnich-materialu-pro-zesilovani-zelezobetonovych-konstrukci/>
- <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061822038296>
- Muthukumarana, T.V. a kol.: A review on the variation of mechanical properties of carbon fibre-reinforced concrete. Construction and Building Materials 366, no. 130173. Dostupný online: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061822038296>
- Frhaan, W. K. M. a kol.: CFRP for strengthening and repairing reinforced concrete: a review. Innovative Infrastructure Solutions volume 6, no. 49. Dostupný online: <https://link.springer.com/article/10.1007/s41062-020-00417-5>
- Samostatně vyhledejte další vhodnou odbornou literaturu

Jméno vedoucího bakalářské práce: doc. Ing. Petr Bílý, Ph.D.

Datum zadání bakalářské práce: 20.2.2023 Termín odevzdání BP v IS KOS: 22.5.2023
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 bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v bakalářské 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“.

20.2.23

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předkládanou bakalářskou práci vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

V Praze

.....

Matěj Rutrle

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce, panu doc. Ing. Petru Bílému, Ph.D. za ochotu, vstřícnost, rychlost komunikace a rady ke zpracování této bakalářské práce.

Abstrakt:

Tato bakalářská práce nazvaná „Vyztužování betonových konstrukcí pomocí materiálů na bázi uhlíku“ se skládá ze dvou částí – teoretické a praktické.

Teoretická část se zaměřuje na historii využití uhlíku k vyztužování betonových konstrukcí, jeho výrobu a na vlastnosti uhlíku a uhlíkové výztuže a jejich porovnání s ocelí. Dále se zabývá jednotlivými typy uhlíkové výztuže, jejich vlastnostmi, výhodami a nevýhodami, použitím a způsobem aplikace.

Praktická část – pro zvolenou variantu (CFRP zesilování) je popsán postup statického návrhu vyztužení dle pracovní verze nové generace Eurokódu 2. Praktická část je zakončena návrhem sloupu ovinutého CFRP tkaninou a nosníku zesíleného vůči smyku pomocí CFRP dle postupu popsaného v pracovní verzi nové generace Eurokódu 2. Příloha obsahuje tabulku excel pro usnadnění automatizace výpočtu některých typů CFRP vyztužení.

Klíčová slova:

Betonové konstrukce, beton, uhlík, uhlíková výztuž, uhlíková vlákna, grafit, grafen, CFRP, plast vyztužený uhlíkovými vlákny, nová generace Eurokódu 2

Abstract:

This bachelor thesis named „Reinforcement of concrete structures by carbon based materials“ is comprised of 2 parts – theoretical and practical.

The theoretical part focuses on the history of the use of carbon based reinforcement, its manufacturing and the properties of carbon and carbon based reinforcement and their comparison with steel. Furthermore, it deals with individual types of carbon reinforcement, their properties, advantages and disadvantages, use and application methods.

Practical part – for the selected type (CFRP strengthening), the procedure of structural design of reinforcement according to the draft version of the new generation of Eurocode 2 is described. The practical part concludes with the design of a concrete column confined with CFRP wrapping and a beam strengthened against shear with CFRP according to the procedures described in the draft version of the new generation of Eurocode 2. The appendix then contains an excel table to facilitate the automation of the calculation of some types of CFRP reinforcement.

Keywords:

Concrete structures, concrete, carbon, carbon reinforcement, carbon fibre, graphite, graphene, CFRP, carbon fibre reinforced polymer, new generation of Eurocode 2

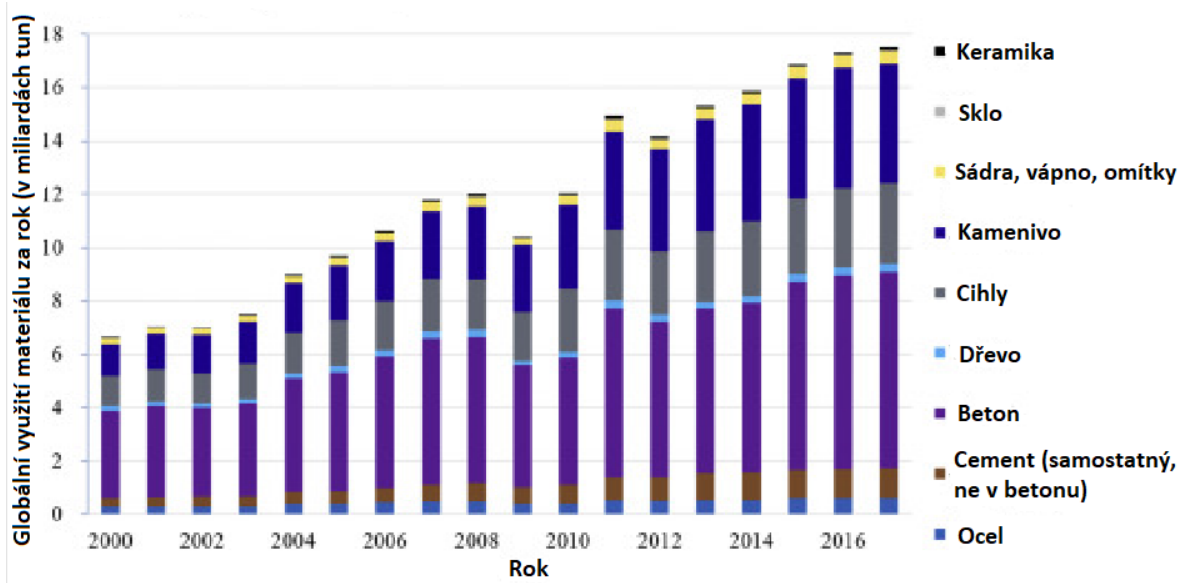
Obsah

Úvod.....	9
1. Uhlíková vlákna.....	11
1.1 Historie uhlíkových vláken.....	11
1.2 Výroba uhlíkových vláken.....	11
1.3 Vlastnosti uhlíkových vláken.....	14
1.4 Uhlíková vlákna z ekonomického hlediska.....	16
2. Typy uhlíkové výztuže.....	18
2.1 Obecně o CFRP.....	18
2.2 CFRP pro zesilování a sanaci stávajících konstrukcí.....	18
2.3 CFRP pro vyztužení novostaveb.....	21
2.4 Uhlíkový vláknobeton.....	26
3. Grafen.....	30
4. CFRP v nové generaci Eurokódu 2.....	33
4.1 Obecné zásady zesilování pomocí CFRP dle nové generace Eurokódu 2.....	33
4.2 Popis statického návrhu sloupu ovinutého CFRP dle nové generace Eurokódu 2.....	36
4.3 Faktor šroubovitého nebo přerušovaného ovinutí k_h	40
4.4 Popis statického návrhu prvku zesíleného pomocí CFRP na smyk dle nové generace Eurokódu 2.....	41
4.5 Popis statického výpočtu smykové odolnosti prvku se smykovým vyztužením.....	45
5. Příklad 1: Statický návrh sloupu ovinutého CFRP.....	48
5.1 Zadání.....	48

5.2	Výpočet železobetonového sloupu bez CFRP ovinutí.....	48
5.3	Výpočet sloupu ovinutého pomocí CFRP dle nové generace Eurokódu 2	49
6.	Příklad 2: Statický návrh smykového zesílení nosníku.....	54
6.1	Zadání	54
6.2	Výpočet smykové odolnosti nosníku bez CFRP zesílení dle nové generace Eurokódu 2	54
6.3	Výpočet smykové odolnosti nosníku s CFRP zesílením dle nové generace Eurokódu 2	55
	Závěr	59
	Seznam použitých zkratk	61
	Seznam použitých značek	61
	Literatura	65
	Seznam příloh.....	69

Úvod

Beton je kompozitní stavební materiál, jehož využití je zaznamenáno již v období starověkého Říma, moderní portlandský cement byl poprvé využit v 18. století. V současné době je beton nejpoužívanějším stavebním materiálem a jeho spotřeba stále narůstá (1). Beton má velmi dobré mechanické vlastnosti v tlaku, jeho tahová pevnost je však špatná. Z tohoto důvodu se do betonu přidává výztuž, která přebírá tahové napětí. Jako výztuž se používala a v současné době nadále používá převážně ocel.



Graf č. 1: Globální využití materiálů ve stavebnictví (1)

Železobeton byl patentován již v roce 1867 Josephem Monierem. Mechanické vlastnosti oceli jsou účely využití výztuže velmi dobré – má poměrně vysokou pevnost (jak v tahu, tak i v tlaku) a tažnost. Má ovšem také nedostatky – je drahá, má vysokou objemovou hmotnost, a hlavně podléhá korozi. Beton je sice silně zásaditý a tím pádem ocel pasivuje, ovšem stále je třeba provádět poměrně silnou krycí vrstvu betonu, aby ocel nebyla obnažena a vystavena okolním vlivům. V případě vážnějších trhlin nebo degradace betonu může ke korozi výztuže stále docházet.

Nabízí se tedy otázka, zda by se nedal nalézt materiál, který by svými mechanickými vlastnostmi vyrovnal, nebo i předčil ocel, měl nižší objemovou hmotnost a zároveň by nepodléhal korozi. Tímto materiálem, který má v určitých

případech potenciál nahradit ocel, je uhlík (popřípadě kompozitní materiály na jeho bázi). V současné době se používá hlavně k zesilování železobetonových konstrukcí, ale již byly postaveny první budovy, které jako betonářskou výztuž používají výhradně uhlíkovou výztuž. Jeho cena je zatím poměrně vysoká, a to zpomaluje jeho prosazování, ovšem s vyšší poptávkou by se cena mohla začít snižovat na hladinu, kde by se stal konkurenceschopný.

Cílem této bakalářské práce je popsat různé typy uhlíkové výztuže, jejich vlastnosti, výhody, nevýhody a způsoby aplikace. Poté se zabývá novou generací Eurokódu 2, ve které jsou již popsány podmínky a postupy dodatečného vyztužování pomocí uhlíkové výztuže. Dále jsou vypočítány 2 praktické příklady dle postupů popsaných v této normě. V příloze je pak vytvořena tabulka excel pro usnadnění výpočtu některých typů CFRP zesílení.

1. Uhlíková vlákna

Uhlíkové vlákno musí obsahovat alespoň 92 % uhlíku, abychom jej mohli považovat za uhlíkové. Při obsahu uhlíku nad 99 % se pak jedná o tzv. vlákno grafitové. V molekulární struktuře vlákna jsou atomy uhlíku spojeny v krystalové mřížce, která je rovnoběžná s osou vlákna. Vyskytují se ve formě krátkých nebo dlouhých vláken, která mají amorfni, krystalickou nebo částečně krystalickou strukturu. Struktura je závislá na výrobním procesu a podmínkách a výrazně ovlivňuje vlastnosti vlákna. (2)

1.1 Historie uhlíkových vláken

Uhlíková vlákna byla použita již koncem 19. století, kdy je využíval Edison k výrobě vláken žárovek. Velký rozvoj ve využití FRP (plastů vyztužených vlákny) včetně CFRP (plastů vyztužených uhlíkovými vlákny) nastal během 2. světové války, díky rychle se rozvíjícímu petrochemickému průmyslu. Nejprve byly vyvinuty především k využití v americkém vesmírném programu a v armádním letectví. Ceny se ovšem snížily natolik, že dovolily rozšíření do civilního letectví, automobilového průmyslu, a nakonec i do stavebnictví. Výzkum byl prováděn hlavně v USA, Japonsku a západní Evropě, velkou motivací bylo zesilování staveb proti seismicitě. (3)

1.2 Výroba uhlíkových vláken

Existuje více typů výroby uhlíkových vláken na základě prekurzoru, ze kterého se vyrábí. V současné době převažují tyto dva typy: na bázi smoly a na bázi PAN. (2)

Uhlíková vlákna na bázi PAN (polyakrylonitril) mají velmi vysokou pevnost v tahu (některá až 6 GPa) a nazývají se proto také vysokopevnostní (4). Asi 90 % veškerých uhlíkových vláken je vyráběno tímto způsobem. Výroba se skládá ze 4–5 kroků:

- Stabilizace – než mohou být vlákna karbonizována, musí dojít k chemickým změnám, které zajistí lepší tepelnou stabilitu vláken. Toho se dosáhne zahřátím vláken na 200–300 °C na 30–120 minut. To způsobí, že vlákna naberou molekuly kyslíku a přeskupí se jejich mřížka.

- Karbonizace – když jsou vlákna dostatečně tepelně stabilizována, zahřejí se na 1000–3000 °C po dobu několika minut v peci. Zde je přetlaková atmosféra se směsí plynů (hlavně dusík), ale není zde kyslík, který by za takto vysokých teplot způsobil vznícení vláken. Při zahřívání vlákna se ztrácí neuhlíkové atomy.
- Grafitizace – neprovádí se vždy, probíhá opět v inertní atmosféře za teplot 2400–3000 °C, vznikají grafitová vlákna s obsahem uhlíku i přes 99 %.
- Povrchová úprava – je potřeba mírně kontrolovaně oxidovat povrch uhlíkových vláken, aby se zlepšila jejich schopnost pojít se s epoxidy a jinými materiály používanými v kompozitech. Provádí se vystavením vláken účinku různých plynů – vzduchu, oxidu uhličitého, ozonu nebo ponořením do různých kapalin – chlornan sodný nebo kyselina dusičná. Vlákna mohou být také potažena elektrolyticky.
- Sizing – vlákna jsou natřena ochranným nátěrem, který je ochrání před poškozením při navíjení a tkání. Potěrové materiály musí být kompatibilní s pojivem kompozitu, ve kterém budou vlákna použita. Typicky to jsou epoxid, polyester, nylon nebo uretan. Potažená vlákna jsou navinuta na cívky (viz obrázek č.1), které se vloží do spřádacího stroje, a spředena. (5)



Obrázek č. 1: Cívky uhlíkových vláken, sekaná vlákna a desky (5)

Uhlíková vlákna na bázi smol mají velmi vysoký modul pružnosti v tahu, a nazývají se proto také vysokomodulová. (4) Okolo 10 % uhlíkových vláken je vyráběno tímto způsobem. Jako prekurzor jsou používány ropné nebo uhelné smoly. Smola musí být nejprve vyčištěna, jelikož obsahuje velké množství nečistot. Dále je výroba v podstatě stejná jako v případě uhlíkových vláken na bázi PAN. (6)

V tabulce č. 1 lze vidět, že vlastnosti nezávisí pouze na prekurzoru, ale také se velmi liší i vlákna ze stejného prekurzoru od různých výrobců. To může být způsobeno různými postupy výroby, různými teplotami a dobou při zahřívání v pecích, jakožto i různou kvalitou a čistotou prekurzoru.

Tabulka č. 1: Porovnání mechanických vlastností uhlíkových vláken na bázi PAN a smol (2)

Typ	Vlákno	Modul pružnosti v tahu (GPa)	Pevnost v tahu (GPa)	Duktilita (%)
Na bázi PAN				
	Celion GY-70(Celanese)	517	1.86	0.40
	HM-S Magnamite(Hercules)	345	2.21	0.60
	Grafil HM (Hysol Grafil)	370	2.75	0.70
	M50(Toray)	500	2.50	0.50
	Celion 1000(Celanese)	234	3.24	1.40
	IM-6(Hercules)	276	4.40	1.40
	Apollo IM 43–600(Hysol Grafil)	300	4.00	1.30
	Sta-grade besfight(Toho Beslon)	240	3.73	1.60
	Thornel 300(Amoco)	230	3.10	1.30
	Celion ST(Celanese)	235	4.34	1.80
	AS-6(Hercules)	241	4.14	1.70
	Apollo HS 38–750(Hysol Grafil)	260	5.00	1.90
	T 800(Toray)	300	5.70	1.90
	T-800H	290	5.60	–
	T-300	230	3.50	–
	M30	290	3.90	–

Typ	Vlákno	Modul pružnosti v tahu (GPa)	Pevnost v tahu (GPa)	Duktilita (%)
	T-50	390	2.40	–
	M-40	400	2.70	–
	M-46	450	2.35	–
	GY-70	520	1.80	–
	M-40 J	390	4.30	–
	M-46 J	450	4.20	–
	M-60 J	585	3.80	–
Na bázi smol				
	Thornel P-25(Amoco)	140	1.40	1.00
	P-55(Amoco)	380	2.10	0.50
	P-75(Amoco)	500	2.00	0.40
	P-100(Amoco)	690	2.20	0.30
	P-120(Amoco)	820	2.20	0.20
	E-35	241	2.80	–
	E-55	378	3.20	–
	E-75	516	3.10	–
	E-105	724	3.30	–
	E-120	827	3.40	–
	E-130	894	3.90	–

1.3 Vlastnosti uhlíkových vláken

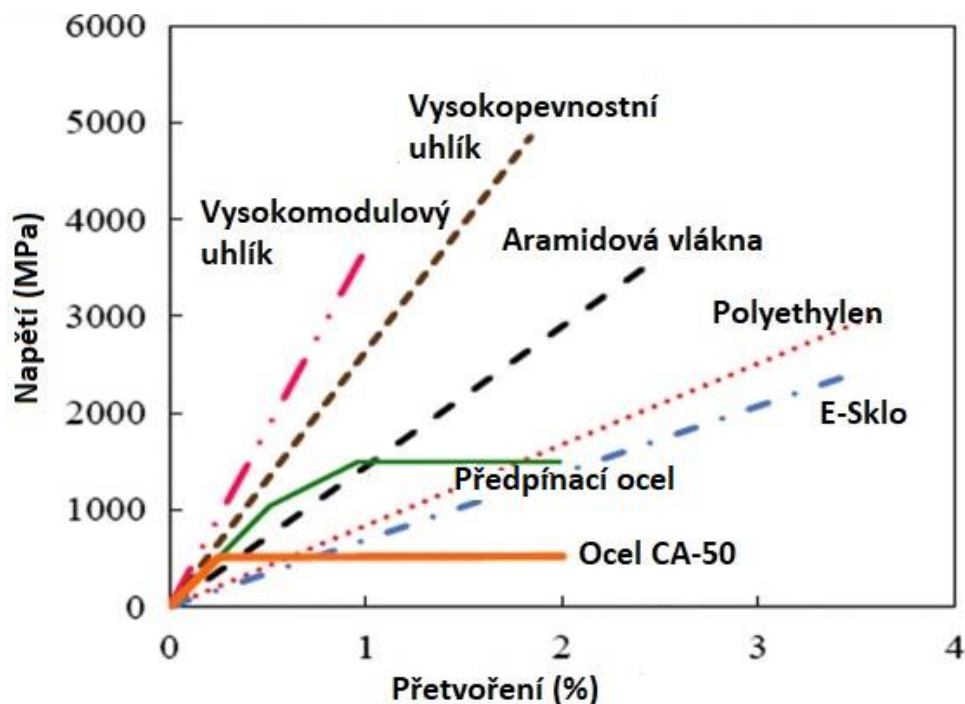
Jak již bylo zmíněno, vlastnosti uhlíkových vláken velmi záleží na jejich prekurzoru. Obecně mají skvělou pevnost v tahu, vysoký modul pružnosti, malé dotvarování, nízkou objemovou hmotnost, nekorodují a jsou chemicky stabilní. Dokážou vydržet i velmi vysoké teploty, teplota tání je cca 3700 °C. Mají nízký koeficient tepelné roztažnosti, vysokou tepelnou vodivost a dobrou elektrickou vodivost. Jsou ale také anizotropní, jejich mechanické vlastnosti ve směru kolmém na vlákna jsou výrazně horší. Při teplotách nad 400 °C u nich může docházet k oxidaci,

příčemž zásadité prostředí působí jako katalyzátor oxidace. Tuto skutečnost je potřeba zohlednit při posuzování požární odolnosti konstrukce. (2)

V tabulce č.2 můžeme vidět, že uhlíková vlákna se svými vlastnostmi mohou opravdu velmi výrazně lišit v závislosti na již zmíněné výrobě. Oproti ostatním stavebním materiálům pak mají výrazně vyšší teplotu tání. Vysokomodulová vlákna mají v porovnání s ostatními běžnými stavebními materiály nejnižší duktilitu a nejvyšší modul pružnosti, zatímco vysokopevnostní mají nejvyšší pevnost.

Tabulka č. 2: Porovnání vlastností vláken z jednotlivých stavebních materiálů (2)

Materiál	Hustota (g/cm³)	Teplota tání (°C)	Duktilita (%)	Modul pružnosti v tahu (GPa)	Pevnost v tahu (GPa)
Polyetylen	0.97	147	2.20	120	2.59
Kevlar	1.44	500	3.80	120	4.50
Ocel	7.85	1538	0.50	193	1.10
Uhlík (vysokomodulový)	1.50	3700	0.36	530	1.90
Uhlík (vysokopevnostní)	1.50	3700	2.00	280	5.70
Sisal	1.45	–	–	38.0	0.35
Konopné vlákno	1.40	175	–	75.0	0.69
E-sklo	2.55	<1725	4.70	72.4	3.40
S-sklo	2.50	<1725	5.20	86.9	4.50



Graf č. 2: Pracovní diagram uhlíkových vláken, oceli a dalších vláken ¹ (26)

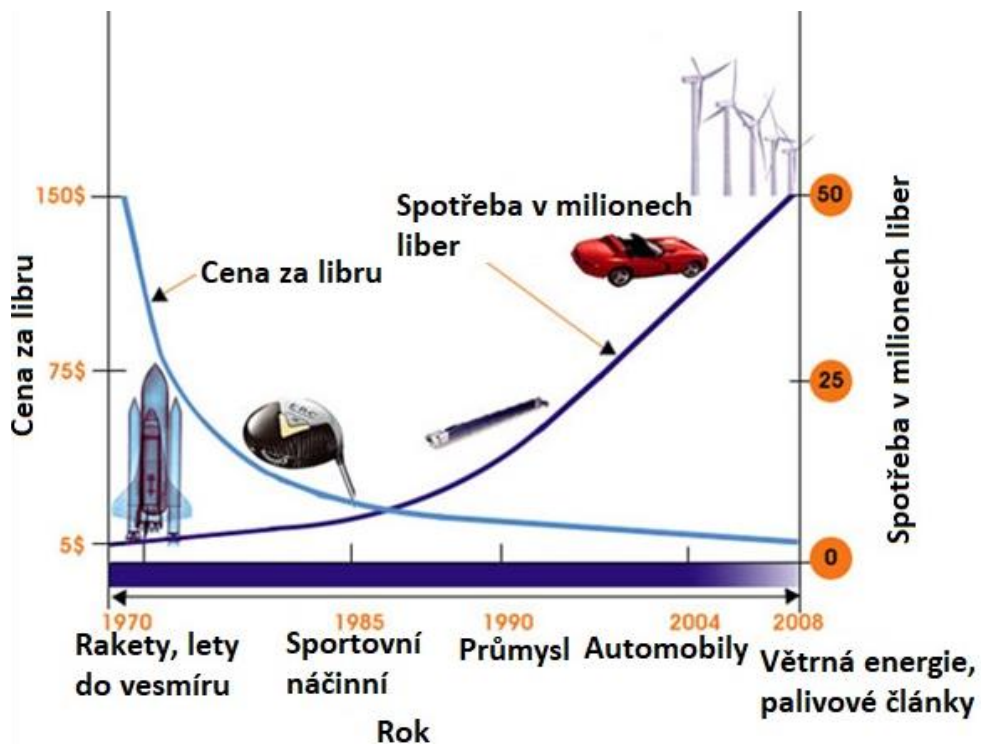
Z pracovního diagramu (viz graf č. 2¹) lze vyčíst, že uhlíková vlákna mají výrazně vyšší pevnost než ocel. Na rozdíl od betonářské oceli však nemají mez kluzu, chovají se celou dobu pružně a na mezi pevnosti dochází k přetržení vláken. Přetvoření na mezi pevnosti je výrazně nižší než u oceli. Z tohoto vyplývá, že konstrukce s výhradně uhlíkovou výztuží nebude varovat před kolapsem. Tomu lze předejít navržením konstrukce s větším množstvím výztuže, která se při reálném zatížení nemůže dostat na mez pevnosti uhlíkové výztuže.

1.4 Uhlíková vlákna z ekonomického hlediska

Většímu rozšíření uhlíkových vláken brání především jejich cena, která se pohybuje mezi 17–26 USD/kg. Cena skleněných vláken, která se dají využít pro výrobu GFRP (glass-fibre reinforced polymer), tedy skleněnými vlákny vyztužených plastů, se pohybuje okolo 1–24 USD/kg (7). Oproti tomu se cena oceli pohybuje mezi 0,7–1 USD/kg (8). Cena uhlíkové výztuže je tedy cca 25x vyšší než cena oceli, což v současné době brání masivnějšímu rozšíření uhlíkové výztuže ve stavebnictví i přes

¹ Ocel CA-50 je betonářská výztuž, obdobná oceli B500B. Označení CA-50 pochází z brazilských norem

její skvělé mechanické vlastnosti. Vzhledem k zvyšující se produkci uhlíkové výztuže se ovšem její cena velmi rychle snižuje (viz obrázek č.2) a v budoucnosti by se mohla stát rentabilní alternativou pro ocelovou výztuž.



Obrázek č. 2: Historický vývoj ceny uhlíkových vláken (27)

2. Typy uhlíkové výztuže

2.1 Obecně o CFRP

CFRP – Carbon fiber reinforced polymer (plast vyztužený uhlíkovými vlákny) je kompozitní materiál tvořený uhlíkovými vlákny a matricí. Uhlíková vlákna dodávají materiálu pevnost v tahu a tvoří hlavní nosný prvek materiálu. Matrice, kterou je většinou epoxid (ale také např. akryláty nebo polyestery), zajišťuje přenos sil mezi jednotlivými vlákny, přenos sil z okolního prostředí (podkladu) k vláknům, ale také zajišťují chemickou a mechanickou ochranu vláken. (9) CFRP je díky skvělým mechanickým vlastnostem uhlíkových vláken předurčena k využití v tahu. V tlaku přebírá úlohu hlavního nosného materiálu pojivo, které má ovšem oproti uhlíkovým vláknům několikanásobně nižší pevnost. (3)

U CFRP může docházet k synergickému efektu, tedy výsledný materiál kompozitu má lepší vlastnosti než jednotlivé složky, i než kdybychom pouze sečetli vlastnosti těchto složek. Z tabulky č. 3, která ukazuje příklad efektu přidání matrice k uhlíkovým vláknům, můžeme vidět, že již tak velmi vysoká pevnost uhlíkových vláken v tahu se při aplikaci pryskyřicové matrice zvýšila o cca 20 %. Naopak modul pružnosti se přidáním epoxidové matrice snížil. (10)

Tabulka č. 3: Vliv fixace uhlíkových vláken pryskyřicí – příklad (10)

Typ materiálu	Průměrná pevnost v tahu [MPa]
Čistá uhlíková vlákna o průřezu 3 mm ²	1410,8
Čistá uhlíková vlákna o průřezu 3,4 mm ²	1412,2
Uhlíková vlákna zalitá pryskyřicí o průřezu 3 mm ²	1719,6
Uhlíková vlákna zalitá pryskyřicí o průřezu 3,4 mm ²	1763,8

2.2 CFRP pro zesilování a sanaci stávajících konstrukcí

V současné době se CFRP používá hlavně externě na povrchu konstrukcí pro sanaci a zesilování zkorodovaných nebo jinak poškozených železobetonových konstrukcí, při zvýšení užitného zatížení (změna užívání stavby) a při chybách v návrhu nebo provedení. Výhodami tohoto využití jsou vysoká pevnost CFRP v tahu, rychlost a jednoduchost aplikace, korozní odolnost, zanedbatelné přetížení zesilované

konstrukce a velmi malý profil CFRP, který neovlivní světlé rozměry místnosti, ve které byla tato metoda použita. Naopak nevýhodou je vysoká cena a křehkost (například při vandalismu). Největším problémem je však požární odolnost. Uhlík sice vysokým teplotám odolává, ale matrice již ne. Proto je třeba vždy ochrana požáruvzdorným nátěrem nebo malbou. Dodatečná výztuž bývá ve formě tkaniny, desek či pásků (lamel). Samotná aplikace pak může probíhat dvěma způsoby. (9) (2)

Prvním metodou je aplikace tkaniny či vláken a pojiva přímo na místě použití. To zajišťuje vysokou variabilitu tvaru výsledné konstrukce, nevýhodou je naopak těžce kontrolovatelná kvalita (mohou vzniknout vzduchové kapsy pod tkaninou, které vedou ke zhoršení vlastností) (3). Využívá se metoda externího vyztužení, kdy se CFRP tkanina či vlákna aplikují na povrch stávající konstrukce (11). Způsob aplikace je následující:

- Ověření kvality betonu odtrhovou zkouškou
- Příprava povrchu betonu broušením nebo tryskáním
- Očištění povrchu, vysušení betonu, odvětrání vlhkosti, přetmelení povrchu pomocí zahuštěné pryskyřice
- Ověření kvality přípravy povrchu betonu odtrhovou zkouškou
- Penetrace betonu
- Napuštění tkaniny pryskyřicí (ruční nebo strojové, viz obrázky č. 3 a 4)



Obrázek č. 3: Ruční nanesení pryskyřice na tkaninu (9) Obrázek č. 4: Strojové nanesení pryskyřice na tkaninu (9)

- Aplikace tkaniny na podklad (viz obrázek č. 5)

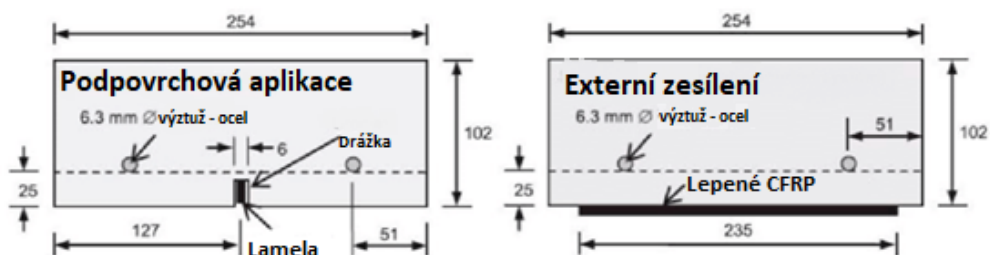


Obrázek č. 5: Aplikace tkaniny na podklad (9)

- Vyhlazení tkaniny (pod tkaninou nesmí zůstat bubliny vzduchu)
- Nanesení ochranného nátěru
- Vytvrzení všech vrstev (cca 2 dny) (9)

Druhou a používanější metodou je lepení lamel, desek či tyčí pomocí epoxidových lepidel na konstrukci. Lamely (viz obrázek č. 7), desky a tyče jsou vyrobeny přímo u výrobce, čímž je zajištěna jejich kvalita a také rychlost a snadnost aplikace (3). Opět lze využít způsob externího vyztužení, lze ale také využít metodu podpovrchovou (Near surface mounted, NSM), kdy se do konstrukce vyřízne drážka, do které se ztužující prvek vlepí (11). Na obrázku č. 6 lze vidět rozdíl mezi podpovrchovou a externí metodou. Způsob aplikace je následující:

- Příprava povrchu konstrukce bruskou (vytvoření drážky v případě NSM aplikace)
- Očištění povrchu konstrukce
- Rozmíchání dvousložkového epoxidového lepidla
- Nanesení lepidla na lamelu i konstrukci
- Aplikace lamely na konstrukci, přitlačení gumovým válečkem (9)



Obrázek č. 7: a) NSM (podvrchová) aplikace, b) externí vyztužení (29)



Obrázek č. 6: CFRP lamela (9)

2.3 CFRP pro vyztužení novostaveb

Vyztužení novostaveb pomocí CFRP se v současné době příliš nevyužívá především z důvodu vysoké ceny uhlíkové výztuže. Výhodami jsou vysoká pevnost CFRP v tahu, jeho odolnost vůči korozi, a tedy delší životnost, možnost menší krycí vrstvy betonu a možnost návrhu subtilnějších konstrukcí, které jsou architektonicky vzhlednější a zároveň šetří množství použitého betonu. Další výhodou je nižší hmotnost uhlíkové výztuže, a tedy nižší zatížení konstrukce vlastní tíhou, ale také nižší náklady na dovoz výztuže.

Nevýhodou je pak hlavně již zmíněná cena, ale také křehký lom uhlíkové výztuže, kvůli kterému konstrukce před kolapsem nevarují jako v případě oceli. Velkou nevýhodou je také špatná soudržnost mezi betonem a uhlíkovou výztuží a jejich zhoršené spolupůsobení, vyžadující větší kotvící délky. (9) (2) Alkalita betonu

také může vést při vyšších teplotách k oxidaci uhlíkové výztuže, v porovnání s ocelí je však výrazně chemicky stabilnější. Problémem je opět požární odolnost, která může být zajištěna dostatečnou krycí vrstvou betonu. (2)

Vyztužení novostaveb pomocí uhlíkové výztuže pak probíhá podobně jako u oceli. Tyče (viz obrázek č.8) či sítě (viz obrázek č.9) jsou uloženy do bedněni a zality betonem.

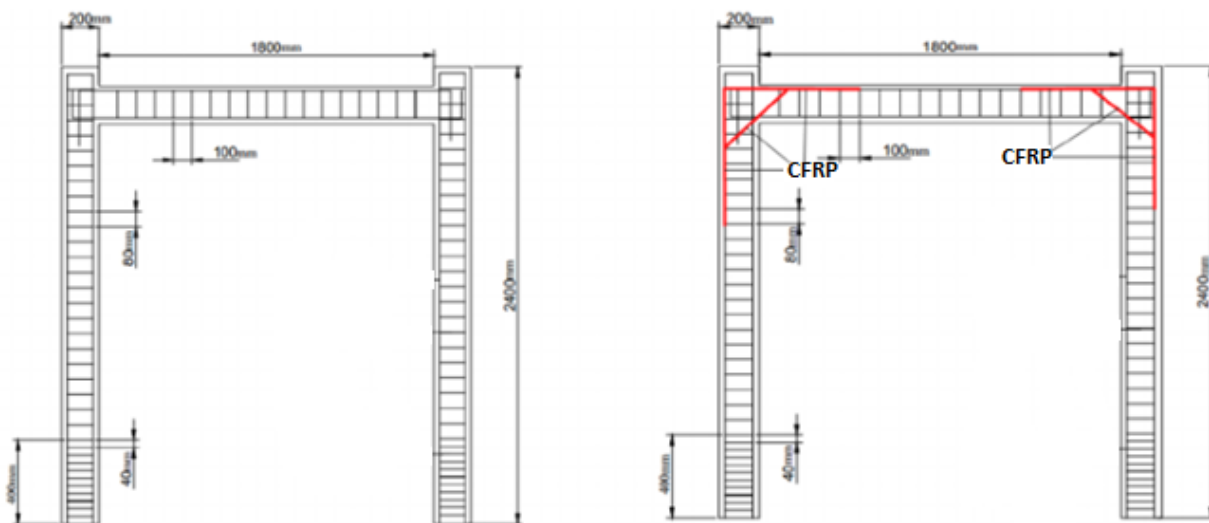


Obrázek č. 8: Tyče z CFRP výztuže (24)



Obrázek č. 9: Síť z CFRP výztuže (24)

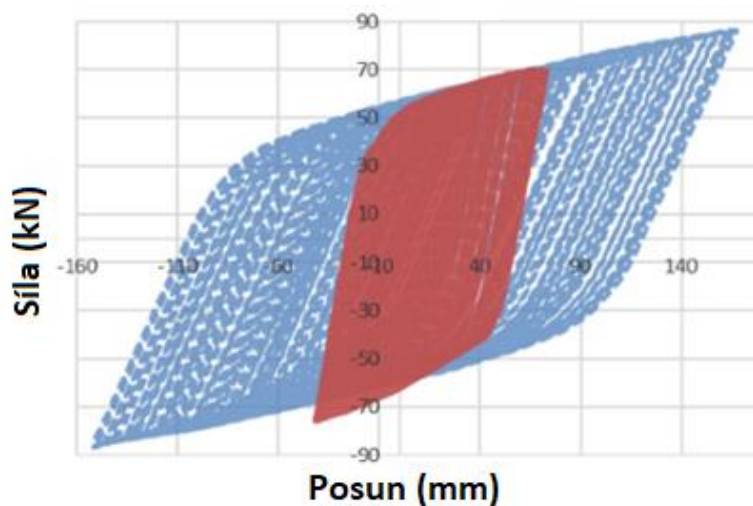
Vzhledem k ceně ovšem většinou neprobíhá vyztužení kompletně uhlíkovou výztuží, ale pouze vyztužení nejnamáhanějších míst konstrukce. Této metody může být využito například v seismicky aktivních oblastech, kde je velkou výhodou uhlíku nejen jeho vysoká pevnost, ale také odolnost vůči korozi při vzniku trhlin.



Obrázek č. 10: Schéma dodatečného vyztužení rámového rohu pomocí CFRP tyčí (červeně) (12)

Na obrázku č. 10 můžeme vidět schéma konstrukce betonového rámu s dodatečně vyztuženými rohy výztuží CFRP pro vyšší seismickou odolnost. (12)

Pomocí experimentálního testování seismických otřesů (viz graf č. 3) bylo zjištěno, že rám s rohy dodatečně vyztuženými pomocí uhlíkové výztuže přenesl maximální zatížení 85 kN při posunu 150 mm. Rám bez dodatečné uhlíkové výztuže pak přenesl maximální zatížení 69 kN při posunu 71 mm (12). Výsledky tohoto experimentu jsou však velmi nejednoznačné. Větší zatížení mohlo být sice přeneseno díky skvělým vlastnostem CFRP výztuže, ovšem velmi pravděpodobně to mohlo být způsobeno pouhým větším množstvím výztuže v kritickém rámovém rohu a dodatečná ocelová výztuž by posloužila téměř stejně dobře.

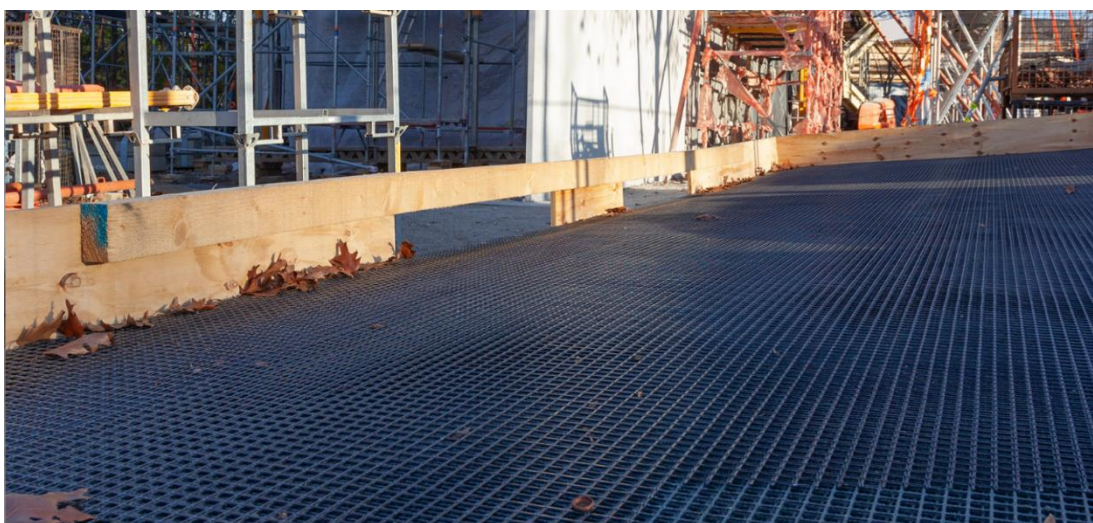


Graf č. 3: Hysterzní křivka pro seismické zatížení, porovnání rámu bez uhlíkové výztuže (červeně) a rámu s rohy vyztuženými pomocí uhlíkové výztuže (modře) (12)



Obrázek č. 11: Celkový pohled na stavbu CUBE (24)

V Drážďanech byla v roce 2022 v rámci projektu C³ – Carbon Concrete Composite již postavena první budova, s názvem CUBE (viz obrázek č.11 a č.13), s výhradně uhlíkovou výztuží (viz obrázek č.12). Byla použita CFRP výztuž v podobě sítí a tyčí s uhlíkovými vlákny na bázi PAN. Panely, ze kterých se část budovy skládala, byly prefabrikovány. Dovoz prefabrikátů je pak výrazně jednodušší a levnější díky lehčí a subtilnější konstrukci. Budova se nachází na kampusu Technické univerzity v Drážďanech a bude sloužit jako experimentální budova pro dlouhodobý výzkum betonu vyztuženého uhlíkem jak ze statického, tak i stavebně fyzikálního hlediska. (13) (14)



Obrázek č. 12: Uhlíková výztuž na stavbě CUBE (24)

Hlavním cílem tohoto projektu byl výzkum uhlíkem vyztuženého betonu, velký důraz byl také kladen na environmentalitu projektu. Vyztužením pomocí uhlíku lze ušetřit materiál, snížit energetickou náročnost a snížit produkci CO₂. (15)



Obrázek č. 13: Pohled na výstavbu budovy CUBE (24)

CFRP lze také použít k omotání ocelové výztuže za účelem zabránění její koroze (viz obrázek č. 14). (7)



Obrázek č. 14: Ocelová výztuž omotaná CFRP (7)

2.4 Uhlíkový vláknobeton

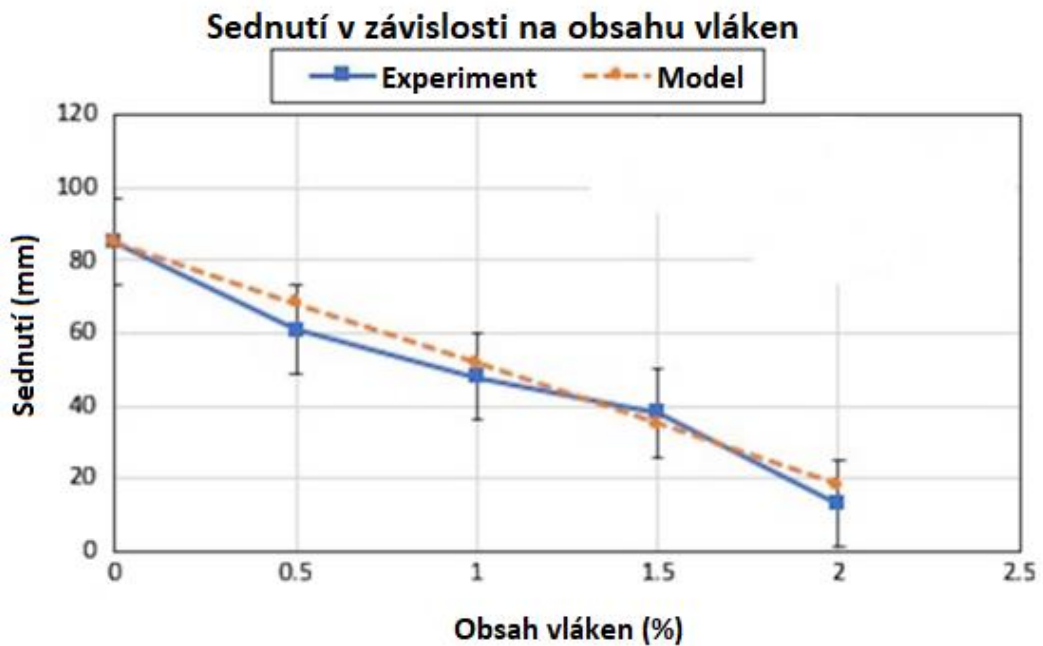
Vláknobeton s CFRP vlákny (viz obrázek č.15) je vlastně obdoba drátkobetonu, ve kterém jsou ovšem ocelové drátky nahrazeny CFRP vlákny. Nejedná se tedy o výztuž v pravém slova smyslu a v konstrukci s použitím vláknobetonu bude stále potřeba využít ohybové výztuže. Vlákna se při výrobě zamíchávají do čerstvého betonu. Vzhledem k tomu, že vlákna jsou velmi jemná (průměrná délka 6 mm, tloušťka 1 mm), mají velký měrný povrch a mohou se tak lepit ke stěnám mixu. Do směsi je proto třeba přidávat je postupně, jednak aby se zamezilo jejich přilepení na stěny míchacího zařízení a jednak aby docházelo k dokonalému rozmíchání ve směsi (netvořily se shluky vláken, tzv. ježky). (16)



Obrázek č. 15: CFRP vlákna přidávaná do betonu (16)

CFRP vlákna zlepšují pevnost betonu v tlaku, v tahu a pomáhají zamezovat vzniku trhlin od smršťování. Uhlíkový vláknobeton má také větší odolnost vůči vysokým teplotám oproti drátkobetonu a lépe odolává agresivnímu prostředí. Nevýhodou je pak opět jeho cena a také zhoršená zpracovatelnost betonu. (16)

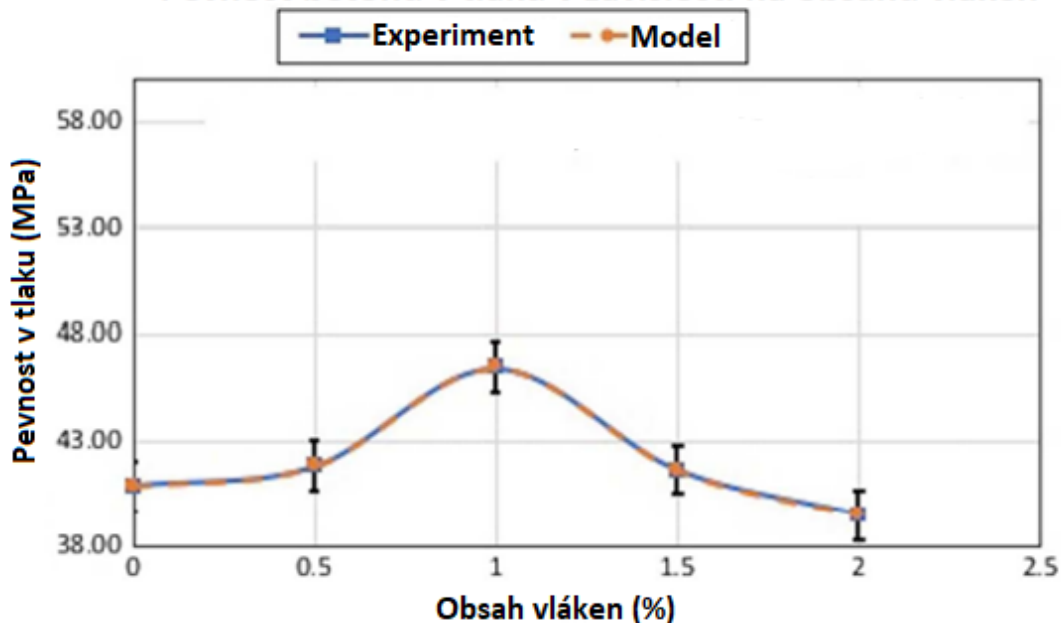
Zpracovatelnost CFRP vláknobetonu byla ve studii *Mechanical Properties of Carbon-Fiber-Reinforced Concrete* testována pomocí zkoušky sednutí kužele. Z Grafu č.4 lze vyčíst, že sednutí kužele klesá téměř lineárně se stoupajícím obsahem CFRP vláken. Při obsahu 2 % vláken bylo sednutí 13 mm, beton bez obsahu vláken pak sednul o 85 mm. (16)



Graf č. 4: Sednutí kužele v závislosti na obsahu CFRP vláken (16)

Pevnost betonu v tlaku (viz graf č.5) byla pozorována nejvyšší při obsahu vláken 1 %, a to nárůst pevnosti o 13,65 %. Při dalším zvyšování obsahu vláken se pak pevnost snižovala. Při obsahu vláken 2 % měl beton o 3,41 % nižší pevnost než beton, který žádná vlákna neobsahoval. (16)

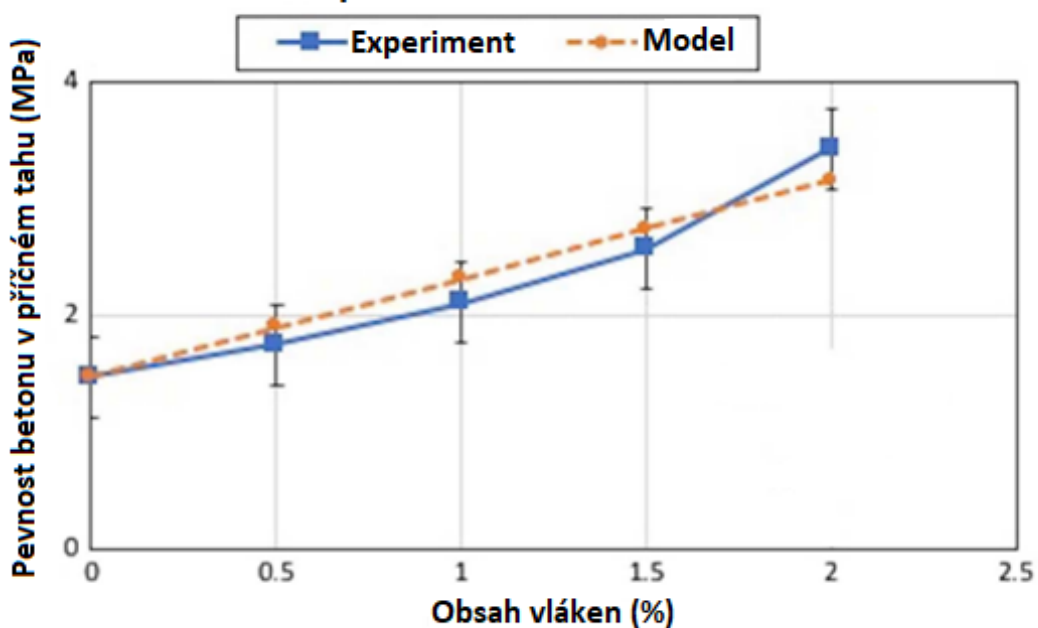
Pevnost betonu v tlaku v závislosti na obsahu vláken



Graf č. 5: Pevnost betonu v tlaku po 28 dnech s CFRP vlákny v závislosti na obsahu vláken (16)

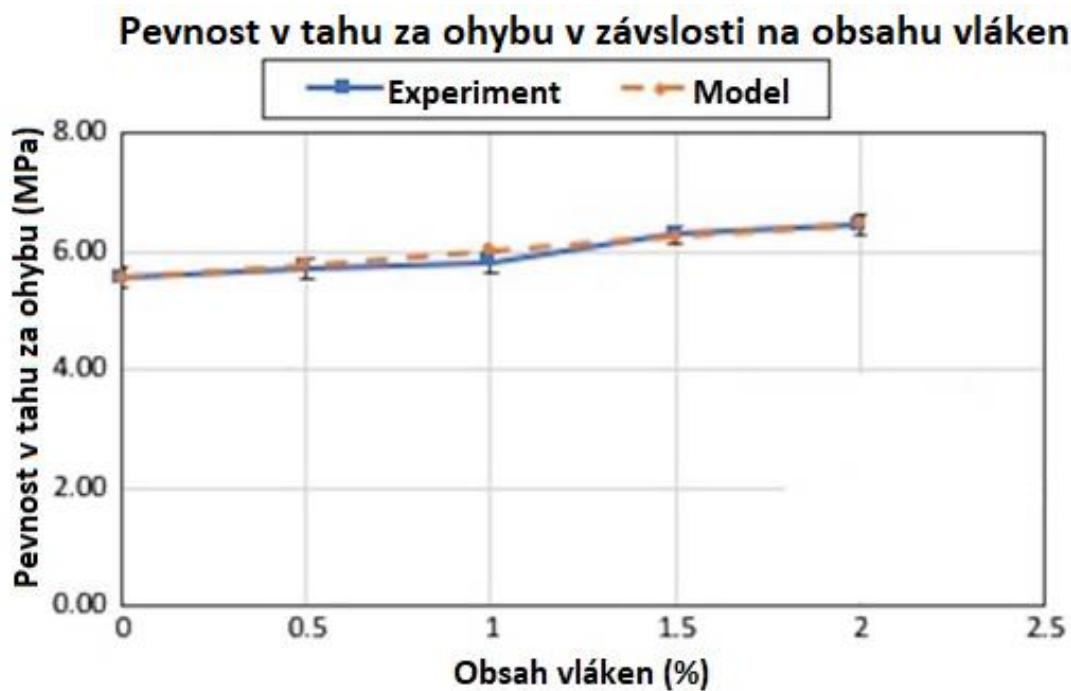
Pevnost betonu v příčném tahu roste téměř lineárně s obsahem vláken (viz graf č.6). Při obsahu vláken 2 % byla pevnost v příčném tahu o 132,6 % větší než u betonu bez vláken. (16)

Pevnost betonu v příčném tahu v závislosti na obsahu vláken



Graf č. 6: Pevnost betonu v příčném tahu po 28 dnech v závislosti na obsahu CFRP vláken (16)

Pevnost v tahu za ohybu pak vykazuje nejmenší změnu (viz graf č. 7). Při obsahu vláken 2 % byla o 13,82 % vyšší než u betonu bez vláken. (16)

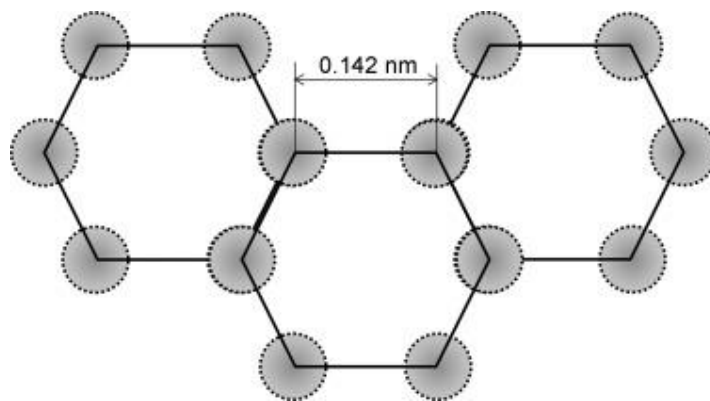


Graf č. 7: Pevnost v tahu za ohybu po 28 dnech v závislosti na obsahu vláken (16)

Z těchto grafů lze vyčíst, že nejlepší je obsah vláken okolo 1 %, kdy dochází ke zlepšení pevností v tahu bez ztrát pevnosti v tlaku, která při obsahu 1 % dosahuje maxima.

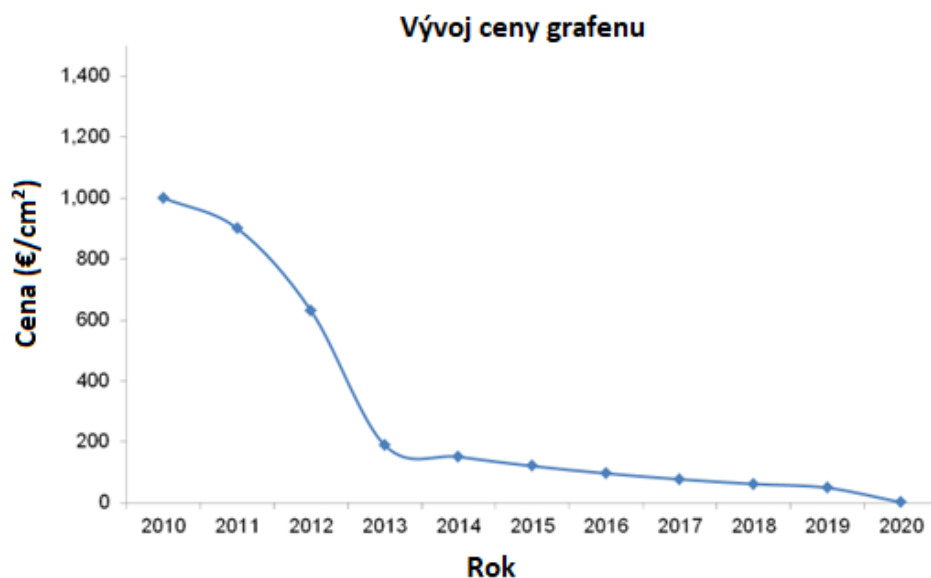
3. Grafen

Grafen je velmi moderní materiál se skvělými mechanickými a dalšími vlastnostmi. Jedná se o monomolekulární vrstvu grafitu, v které se atomy uhlíku vyskytují v šestiúhelníkové struktuře (viz obrázek č. 16) a jsou pevně vázány kovalentními vazbami. Poprvé byl vyroben v roce 2004 a za jeho objevení byla v roce 2010 udělena Nobelova cena za fyziku. (17) Velmi dobře vede elektřinu a je to nejpevnější dosud objevený materiál, dosahuje pevnosti v tahu až 130 GPa. Zároveň je velmi lehký, čtvereční metr grafenu váží 0,77 mg. (18)



Obrázek č. 16: Struktura grafenu (25)

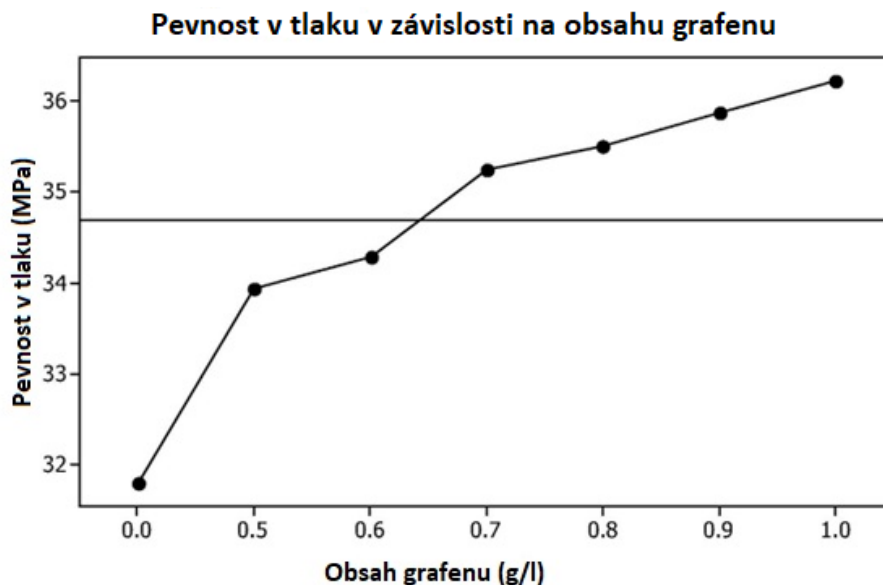
Hlavní nevýhodou je pak cena, která ovšem strmě klesá. Ještě v roce 2010 se pohybovala okolo 1000 USD/cm², v současné době klesla ke 2 USD/cm². (19)



Graf č. 8: Vývoj ceny grafenu za 1 cm² od roku 2010 do roku 2020 (19)

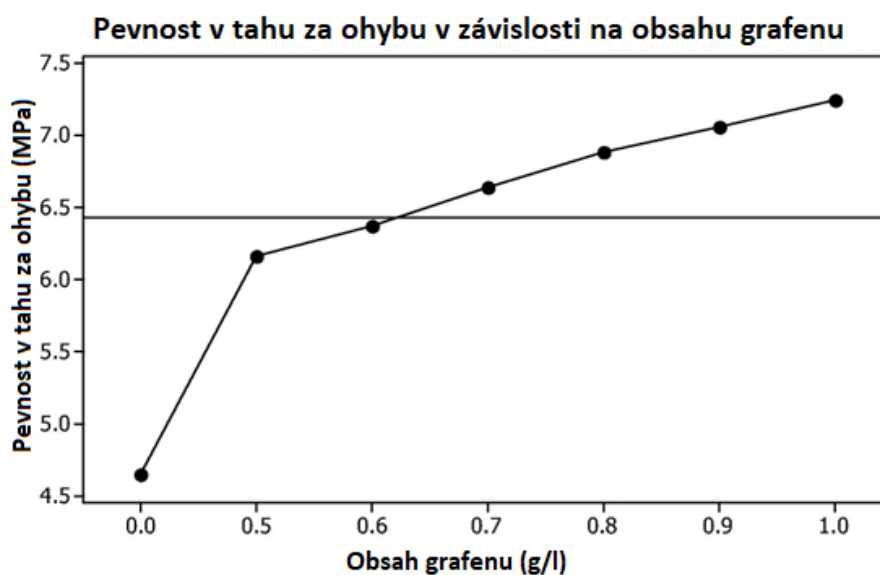
Grafen lze přidávat do betonu ve formě prášku dispergovaného v záměsové vodě. Grafen byl připraven z grafitového prášku, pomocí laurethsulfátu sodného (SLES) a dalších chemických látek. Tato směs byla mixována při 12 000 otáčkách za minutu po dobu 30 minut. Tímto způsobem vznikne SLES grafen. (20)

28denní pevnost betonu v tlaku se zvýšila o 13,8 % oproti betonu bez grafenu při obsahu 1 gram grafenu na litr záměsové vody (viz graf č. 9). (20)



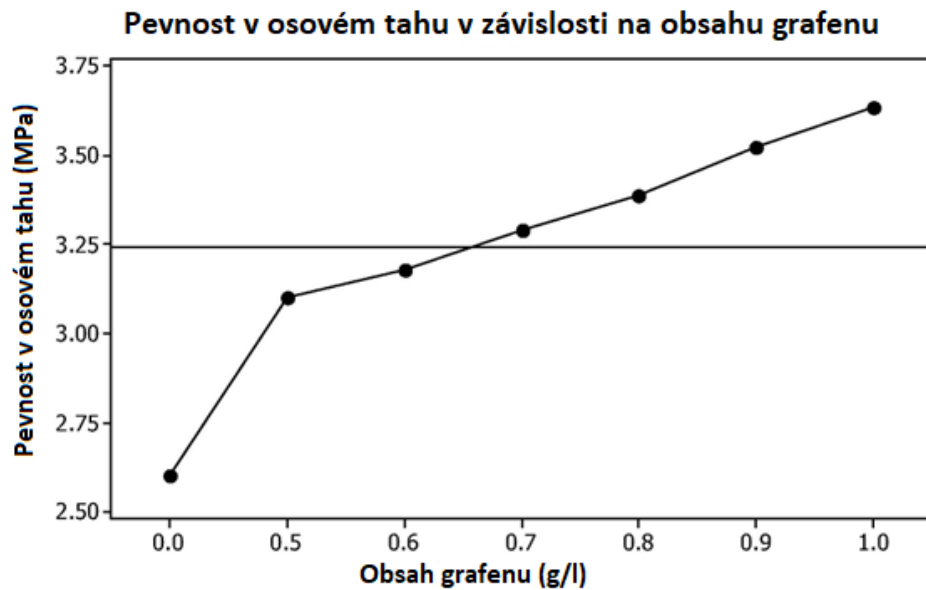
Graf č. 9: 28Denní pevnost v tlaku betonu s SLES grafenem (20)

Pevnost v tahu za ohybu zaznamenala výrazně vyšší změnu, a to až 64,8 % při obsahu grafenu 1 g/l záměsové vody (viz graf č.10). (20)



Graf č. 10: Pevnost v tahu za ohybu betonu s SLES grafenem (20)

Pevnost v osovém tahu pak zaznamenala nárůst až 45 % při obsahu 1 g/l záměsové vody (viz graf č. 11). (20)



Graf č. 11: Tahová pevnost betonu s SLES grafenem (20)

Kromě grafenu se pak ke zlepšení vlastností betonu dají použít i jiné nanomateriály na bázi uhlíku. V současné době je zkoumán vliv přidávání oxidu grafenu do betonu a také uhlíkových nanotrubic. (20)

4. CFRP v nové generaci Eurokódu 2

Pozn. 1: Následující sekce 4 se zabývá novou generací Eurokódu 2, která je zatím pouze v pracovní verzi (verze využitá jako zdroj pro tuto práci je ze září 2022). Údaje, data a postupy se s největší pravděpodobností již vůči finální verzi nebudou příliš lišit, ovšem čísla stránek, obrázky a označení sekcí ještě mohou zaznamenat větší či menší změny.

Pozn. 2: Následující kapitoly 4.1, 4.2, 4.4 a 4.5 jsou převzaty a přeloženy z pracovní verze nové generace Eurokódu 2. (11)

Nová generace Eurokódu 2 pojednává o zesilování stávajících čistě betonových, železobetonových i předpjatých konstrukcí z běžných betonů pomocí CFRP v příloze J. Zabývá se zesilováním lepenou CFRP výztuží, a to jak externí výztuží, tak NSM (podpovrchovou) výztuží, a to ve formě prefabrikovaných lamel, tyčí a tkanin.

4.1 Obecné zásady zesilování pomocí CFRP dle nové generace Eurokódu 2

Tabulka č. 4: Součinitele spolehlivosti pro CFRP (11)

Návrhová situace	Pevnost v tahu		Pevnost spojení
	CFRP lamely a tyče	CFRP tkanina aplikovaná in situ	Selhání betonu či lepidla
Určení	γ_f		γ_{BA}
Trvalé a přechodné zatížení	1,30	1,40	1,50
Mimořádné zatížení	1,10	1,15	1,15
Použitelnost	1,00	1,00	1,50
Únava materiálu	1,30	1,40	1,50

Pro získání návrhových hodnot pevnosti CFRP musí být aplikovány součinitele spolehlivosti, viz tabulka č.4.

CFRP musí splňovat tyto požadavky, abychom mohli navrhovat podle Eurokódu 2, přílohy J:

- Mezilaminární smyková pevnost CFRP lamel dle ČSN EN ISO 14130 musí být stejná nebo vyšší než pevnost lepeného spoje.
- Modul pružnosti v tahu (Youngův modul pružnosti) CFRP lamel se musí pohybovat mezi 150 000 MPa a 250 000 MPa včetně.
- Elastické přetvoření na jednotku šířky u CFRP tkanin musí splňovat:
 $20 \text{ kN/mm} \leq E_f \cdot A_f / b_f \leq 400 \text{ kN/mm}$
- Celková průřezová plocha všech vrstev uhlíkových vláken na jednotku šířky u CFRP tkanin ve směru hlavního tahového napětí musí splňovat:
 $100 \text{ mm}^2/\text{m} \leq A_f / b_f \leq 1800 \text{ mm}^2/\text{m}$
- Charakteristická pevnost lepidla v tahu f_{Atk} dle ČSN EN 1504-4 musí splňovat:
 $f_{\text{Atk}} \geq 14 \text{ N/mm}^2$

Lepené CFRP prvky sloužící k zesílení nesmí být použity v případech, kdy betonu bezprostředně hrozí degradace, případně je již přítomna. V těchto případech musí být nejprve provedena oprava betonu.

- Ve výše uvedených bodech platí:
 E_f – Youngův modul pružnosti CFRP
 A_f – průřezová plocha CFRP
 b_f – šířka pásu CFRP
 f_{Atk} – charakteristická pevnost lepidla v tahu

Pro navrhování zesilování musíme znát následující vlastnosti:

- f_{fuk} – charakteristická krátkodobá pevnost v tahu CFRP dle ISO 10406
- η_f – redukční součinitel tahové pevnosti CFRP dle ISO 10406 pro vystavení prostředí
- E_f – modul pružnosti v tahu ve směru vláken CFRP dle ISO 10406

- A_f – průřezová plocha CFRP

Pro lamely se průřezová plocha A_f spočítá jako:

$$A_f = b_f * t_f \quad (1)$$

Kde:

b_f je šířka lamely

t_f je tloušťka lamely

Pro tkaniny se tloušťka spočítá jako:

$$t_f = n_f^{k_f} * \frac{A_f}{b_f} \quad (2)$$

Kde:

n_f je počet vrstev tkaniny

A_f je průřezová plocha jedné vrstvy tkaniny

k_f je koeficient pro stanovení efektivní tloušťky pro určitý počet vrstev, $k_f = 0,85$ pro $n_f > 3$, jinak 1

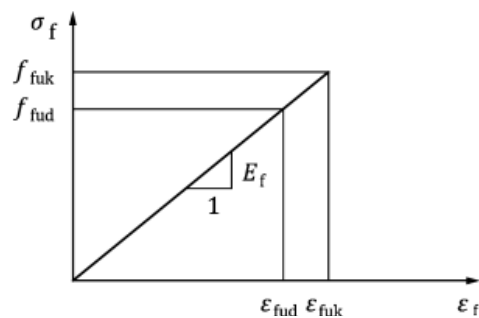
Výpočet návrhové pevnosti v tahu CFRP se provede podle vztahu:

$$f_{fud} = \frac{\eta_f * f_{fuk}}{\gamma_f} \quad (3)$$

Kde:

η_f je redukční součinitel pevnosti v tahu CFRP dle ISO 10406 zohledňující vliv podmínek prostředí, konzervativně může být brán jako 0,7 pokud nejsou dostupná přesnější data z testování CFRP

Norma počítá u CFRP s lineární závislostí přetvoření a napětí, viz graf č.12.



Graf č. 12: Pracovní diagram CFRP (11)

Trvanlivost CFRP zesílení by měla být zajištěna po celou návrhovou životnost stavby. Musí se počítat s vlivy přímého i nepřímého (odraženého od vody či sněhu) UV záření, vlivy vlhkosti a vlivy teplot a v případě potřeby musí být učiněna příslušná opatření (norma však blíže nespecifikuje za jakých podmínek a jaká opatření).

Prvky vyztužené pomocí CFRP by neměly být počítány lineárně pružnou metodou s redistribucí zatížení ani plastickou metodou. Prvky vyztužené CFRP by měly být posouzeny na ztrátu CFRP ztužení. CFRP ztužení by nemělo být navrženo tak, aby vydrželo trvalé účinky zatížení způsobem, kde by konstrukce při ztrátě či poškození CFRP nebyla schopna zabránit kolapsu, ledaže by byly následující body zohledněny v návrhu:

- Ztužení je navrženo tak, aby bylo chráněno před poškozením vandalismem nebo náhodným mechanickým poškozením
- Kolaps prvku nevyústí v progresivní kolaps konstrukce
- Ztužující prvky CFRP jsou chráněny před účinky požáru

Příloha J nové generace Eurokódu 2 řeší zesílení ohýbaných prvků, ovinutí sloupů, smykové zesílení, únavu CFRP, kotvení CFRP prvků a konstrukční zásady. V následující části jsou podrobněji popsána pouze vybraná témata (konkrétně ovinutí sloupu a zesílení na účinky smyku).

4.2 Popis statického návrhu sloupu ovinutého CFRP dle nové generace Eurokódu 2

Obecné zásady pro návrh prvků zesílených pomocí CFRP namáhaných ohybem s nebo bez normálové síly:

- Musí být zachována rovinnost průřezu po deformaci
- Pevnost betonu v tahu se nezapočítává
- Pevnost CFRP v tlaku se nezapočítává
- Prokluz mezi CFRP zesílením a betonovým podkladem se zanedbává
- Přetvoření výtzuže a betonu zesilovaného prvku namáhaného ohybem se musí určit před aplikací zesílení pro příslušné zatížení. Přetvoření

vznikající z dodatečných ohybových účinků po aplikaci zesílení se k nim musí přičíst a následně se provede ověření kapacity zesíleného prvku.

- Postupy dle tohoto Eurokódu se vztahují pouze na prvky z betonů s charakteristickou pevností betonu v tlaku mezi 12 MPa a 50 MPa, pokud není provedena přesnější analýza.
- Pevnost v tahu externího zesílení bývá většinou omezena únosností přípoje CFRP k betonu. Rovněž pevnost podpovrchové výztuže může být omezena únosností přípoje CFRP k betonu.

Specifické zásady pro návrh sloupů ovinutých CFRP:

- CFRP zesílení by mělo být provedeno po celé délce zesilovaného sloupu
- Smí být použito maximálně 10 vrstev CFRP
- Účinek ovinutí lepeným CFRP na normálově namáhaném sloupu může být uvažován za splnění následujících podmínek:

1. Charakteristická pevnost betonu v tlaku je nižší než 50 MPa
2. Průměr kruhového sloupu D , nebo efektivní průměr D_{eq} obdélníkového sloupu je větší nebo roven 150 mm
3. Excentricita prvního řádu splňuje podmínku:

$$\frac{e_0}{D_{eq}} \leq 0,20 \quad (4)$$

4. Štíhlost splňuje podmínku:

$$\frac{l_0}{D_{eq}} \leq 40 \quad (5)$$

5. Poloměr rohu pro obdélníkové průřezy r_c , je větší nebo roven 20 mm (viz obrázek č. 19)

- Zvýšení tlakové pevnosti betonu v důsledku ovinutí CFRP by mělo být zohledněno při výpočtu vlivů štíhlosti.
- Pro návrh průřezů ovinutých CFRP může být použit následující zjednodušený bilineární vztah mezi napětím a deformací:

$$\sigma_c = \frac{f_{cd} * \varepsilon_c}{0,00175} \quad \text{pro } 0 \leq \varepsilon_c \leq 0,00175 \quad (6)$$

$$\sigma_c = f_{cd} + \Delta f_{cd} * \frac{(\varepsilon_c - 0,00175)}{(\varepsilon_{cu} - 0,00175)} \quad \text{pro } \varepsilon_c \leq 0,00175 \leq \varepsilon_{cu} \quad (7)$$

Hodnota ϵ_{cu} může být brána jako 0,006 pokud nejsou dostupná přesnější data.

Navýšení pevnosti betonu Δf_{cd} ve sloupech v důsledku ovinutí CFRP může být spočítáno následovně:

Pro sloupy kruhového průřezu:

$$\Delta f_{cd} = 0 \quad \text{pro } \frac{t_f * f_{fud}}{D * f_{cd}} < 0,07 \quad (8)$$

$$\Delta f_{cd} = k_{cc} * \frac{t_f}{D} * f_{fud} \quad \text{pro } \frac{t_f * f_{fud}}{D * f_{cd}} \geq 0,07 \quad (9)$$

Kde:

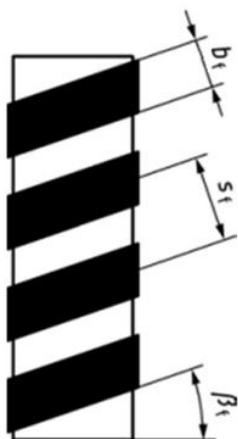
D je průměr kruhového sloupu.

f_{cd} je návrhová pevnost betonu v tlaku

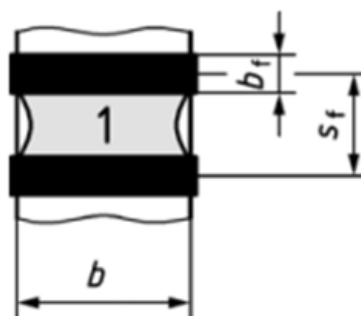
k_{cc} je faktor ovinutí, jehož hodnota může být brána jako 2,5 pro sloupy kruhového průřezu, pokud nejsou dostupná přesnější data.

Pokud je použito šroubovitě (viz obrázek č. 17) a/nebo přerušované (viz obrázek č. 18) ovinutí na sloupy kruhového průřezu, hodnota tahové pevnosti CFRP f_{fud} ve vzorcích (8) a (9) by měla být přenásobena faktorem k_h (faktor šroubovitěho nebo přerušovaného ovinutí), který se spočítá dle:

$$k_h = \left(1 - \frac{(s_f - b_f)}{2 * D}\right)^2 * \left(\frac{1}{1 + (\tan \beta_f)^2}\right)^2 \quad (10)$$



Obrázek č. 17: Šroubovitě ovinutí sloupu (11)



Obrázek č. 18: Přerušované ovinutí sloupu (11)

² Problematice tohoto koeficientu se věnuje kapitola 4.3

Pro sloupy obdélníkového průřezu:

$$\Delta f_{cd} = 0 \quad \text{pro } \left(\frac{b}{h}\right)^2 * k_e \frac{t_f * k_r * f_{fud}}{D_{eq} * f_{cd}} < 0,07 \quad (11)$$

$$\Delta f_{cd} = k_{cc} * \left(\frac{b}{h}\right)^2 * k_e * \frac{t_f}{D_{eq}} * k_r * f_{fud} \quad \text{pro } \left(\frac{b}{h}\right)^2 * k_e \frac{t_f * k_r * f_{fud}}{D_{eq} * f_{cd}} \geq 0,07 \quad (12)$$

Kde:

$$D_{eq}(\text{ekvivalentní průměr}) = \frac{2*b*h}{b+h} \quad (13)$$

$$k_e(\text{faktor efektivity ovinutí}) = 1 - \frac{(b-2*r_c)^2 + (h-2*r_c)^2}{3*b*h} \quad (14)$$

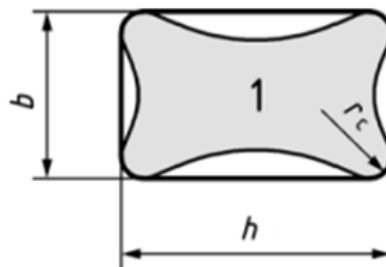
$$k_r(\text{faktor poloměru rohu}) = \begin{cases} 1,0 * \frac{r_c}{50} * \left(2 - \frac{r_c}{50}\right) & \text{pro } r_c < 50 \text{ mm} \\ 1,0 & \text{pro } r_c \geq 50 \text{ mm} \end{cases} \quad (15)$$

k_{cc} je faktor ovinutí, jehož hodnota může být brána jako 1,5 pro sloupy obdélníkového a čtvercového průřezu, pokud nejsou dostupná přesnější data.

Pokud je použito šroubovitě (viz obrázek č. 17) a/nebo přerušované (viz obrázek č. 18) ovinutí na sloupy obdélníkového průřezu, hodnota tahové pevnosti CFRP f_{fud} ve vzorcích (11) a (12) by měla být přenásobena faktorem k_h (faktor šroubovitěho nebo přerušovaného ovinutí), který se spočítá dle:

$$k_h = \left(1 - \frac{s_f - b_f}{2*b}\right) * \left(1 - \frac{s_f - b_f}{2*h}\right) * \left(\frac{1}{1 + (\tan \beta_f)^2}\right)^3 \quad (16)$$

Vzorce (11) a (12) by neměly být používány pro sloupy s půdorysným poměrem stran h/b větším než 2.



Obrázek č. 19: poloměr rohu r_c obdélníkového sloupu

³ Problematice tohoto koeficientu se věnuje kapitola 4.3

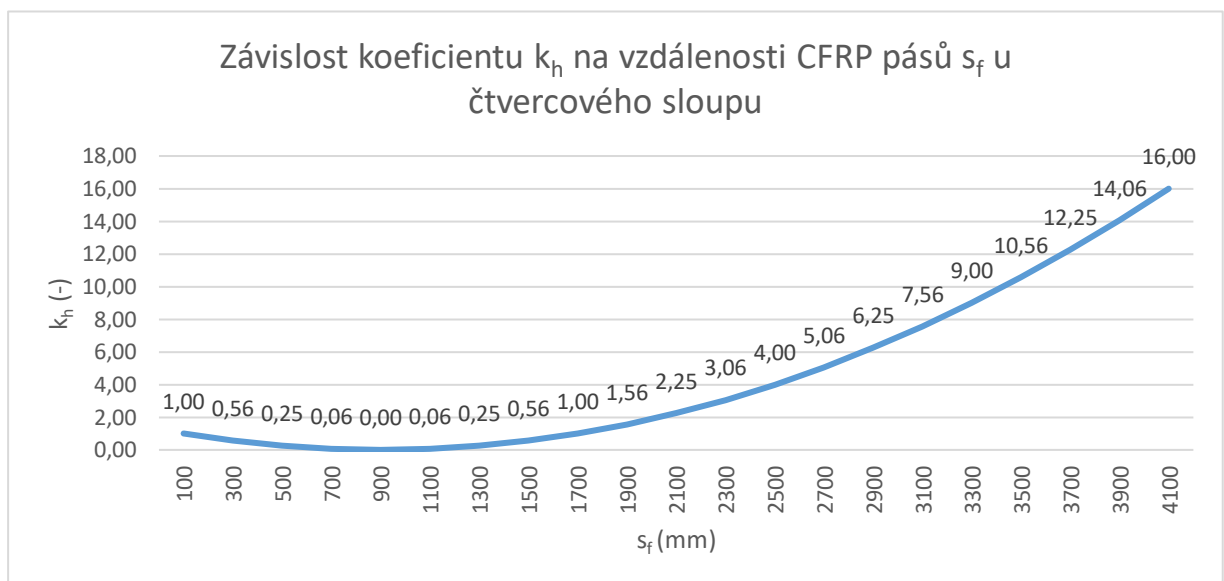
4.3 Faktor šroubovitého nebo přerušovaného ovinutí k_h

Tato kapitola se týká výpočetních vztahů (10) a (16). Při zpracování tabulky pro výpočet ovinutí sloupu v programu Microsoft Excel (podrobněji viz kapitola 5 a příloha 1) bylo zjištěno, že v normě chybí omezení vzdálenosti pásů CFRP s_f . Při zvětšování vzdálenosti pásů se účinnost ovinutí snižuje, což reflektuje právě hodnota součinitele k_h . Jeho hodnota postupně s rostoucí vzdáleností s_f klesá až k nule. To nastane, pokud platí:

$$\frac{s_f - b_f}{2 * D} = 1 \text{ u kruhových sloupů, případně } \frac{s_f - b_f}{2 * h} = 1 \text{ u sloupů obdélníkových}$$

Z logiky věci by tímto měl výpočet končit se závěrem, že pásy jsou již příliš daleko od sebe a nebudou tedy mít vliv na únosnost sloupu. Při dalším zvětšování vzdálenosti s_f však koeficient k_h u kruhových a čtvercových sloupů začíná znovu růst a to kvadraticky. U obdélníkových sloupů dokonce nejdříve nabývá záporných hodnot (což by znamenalo, že nalepení CFRP zhoršuje únosnost sloupu) až do doby kdy $\frac{s_f - b_f}{2 * b} = 1$, kdy znovu dosahuje nuly a dále také kvadraticky roste.

Při dostatečné vzdálenosti pásů s_f pak koeficient k_h nabývá hodnot vyšších než jedna, což by prakticky znamenalo, že čím dále pásy jsou, tím větší bude zlepšení vlastností sloupu, což samozřejmě z podstaty zesilování nedává smysl.



Graf č. 13: Závislost koeficientu k_h na vzdálenosti CFRP pásů s_f u čtvercového nebo kruhového sloupu

Z grafu č. 13 můžeme vidět, jak koeficient kvadraticky stoupá a při vzdálenosti 4,1 metru již nabírá hodnoty 16, což by znamenalo, že díky tomu, že pásy dáme 4,1 metru od sebe se zesílení zvýší 16x oproti celoplošnému zesílení, což je zjevný nesmysl. Pro graf byl použit sloup se stejnými parametry jako v kapitole č. 5.1, kromě šířky pásu b_f , která, vzhledem k tomu, že se jedná o diskrétní ovinutí, je brána jako 100 mm.

Vzhledem k těmto zjištěním by při výpočtech měla platit tato omezení:

$$s_f - b_f \leq 2 * D \text{ pro kruhové sloupy}$$

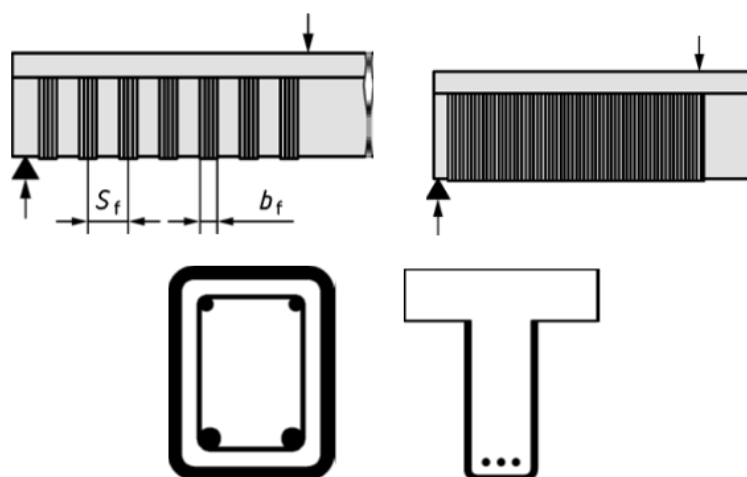
$$s_f - b_f \leq 2 * h \text{ pro sloupy obdélníkového průřezu}$$

Tato omezení zajistí, že hodnoty koeficientu k_h po dosažení nuly nebudou při dalším zvyšování vzdálenosti pásů s_f dále růst.

4.4 Popis statického návrhu prvku zesíleného pomocí CFRP na smyk dle nové generace Eurokódu 2

Pozn. 1: Pro zesílení na smyk platí obecné zásady pro návrh zesilování pomocí CFRP (viz kapitola 4.1).

Odolnost vůči smyku musí být v zásadě počítána dle kapitoly 8 nové generace Eurokódu (popis v další kapitole), pokud dle této kapitoly prvek vykazuje nedostatečnou odolnost vůči smyku, může být přistoupeno k zesílení prvku pomocí CFRP dle následujících postupů.



Obrázek č. 20: a) diskrétní (přerušované) zesílení, b) spojitě zesílení, c) uzavřené zesílení, d) otevřené zesílení (28)

Postupy této kapitoly se vztahují na smykové zesilování obdélníkových a T průřezů bez kotvících prvků, aplikované diskrétně (přerušovaně) nebo spojitě, viz obrázek č.20.

Smyková odolnost prvku zesíleného pomocí CFRP se spočítá dle vzorce:

$$\tau_{Rd,CFRP} = \tau_{Rd} + \tau_{Rd,f} \leq 0,5 * v * f_{cd} \quad (17)$$

Kde:

$$\tau_{Rd,f} = \frac{A_f}{s_f} * \frac{f_{wd}}{b_w} * (\cot\theta + \cot \alpha_f) * \sin\alpha_f \quad (18)$$

$$\frac{A_f}{s_f} = \begin{cases} \frac{2*t_f*b_f}{s_f} * \sin\alpha_f & \text{pro diskrétní zesílení} \\ 2 * t_f * \sin\alpha_f & \text{pro spojitě zesílení} \end{cases} \quad (19)$$

α_f (viz obrázek č.21) je úhel mezi zesilovacím prvkem a podélnou osou zesilovaného prvku

f_{wd} je návrhová smyková pevnost CFRP zesilovacího systému spočítaná dle vzorců (20), (21), (22) a (25)

τ_{Rd} je smyková odolnost samotného prvku bez zesílení CFRP, spočítaná dle kapitoly 8 nové generace Eurokódu 2

v je redukční koeficient pevnosti betonu se smykovými trhlinami

θ (viz obrázek č.21) je úhel smykových trhlin, měl by být brán jako 45° při výpočtu τ_{Rd} a $\tau_{Rd,f}$, pokud není provedena přesnější analýza

Pro uzavřené spojitě zesílení může být smyková pevnost CFRP zesílení spočítána dle vzorce:

$$f_{fwd} = 0,8 * k_r * f_{fud} \quad (20)$$

Kde:

k_r se spočítá dle vzorce (15) viz strana 40

f_{fud} se spočítá dle vzorce (3) viz strana 36

Pro otevřené diskrétní zesílení může být smyková pevnost CFRP zesílení spočítána dle vzorců:

Když kotevní délka všech CFRP lamel sahající do tlačené oblasti, l_{bf} , je menší než charakteristická maximální kotevní délka lepeného CFRP, $l_{bf,max}$, tak platí:

$$f_{fwd} = \frac{2}{3} * \frac{n * s_f}{l_{bf,max,k} * [(cot\theta + cot\alpha_f) * sin\alpha_f]} * f_{bfRd} \quad (21)$$

Když kotevní délka některých CFRP lamel sahající do tlačené oblasti, l_{bf} , je menší než charakteristická maximální kotevní délka lepeného CFRP, $l_{bf,max}$, tak platí:

$$f_{fwd} = \left[1 - \left(1 - \frac{2}{3} * \frac{n * s_f}{l_{bf,max,k} * [(cot\theta + cot\alpha_f) * sin\alpha_f]} \right) \frac{m}{n} \right] * f_{bfRd} \quad (22)$$

Kde (symbol integer vyjadřuje zaokrouhlení na celé číslo):

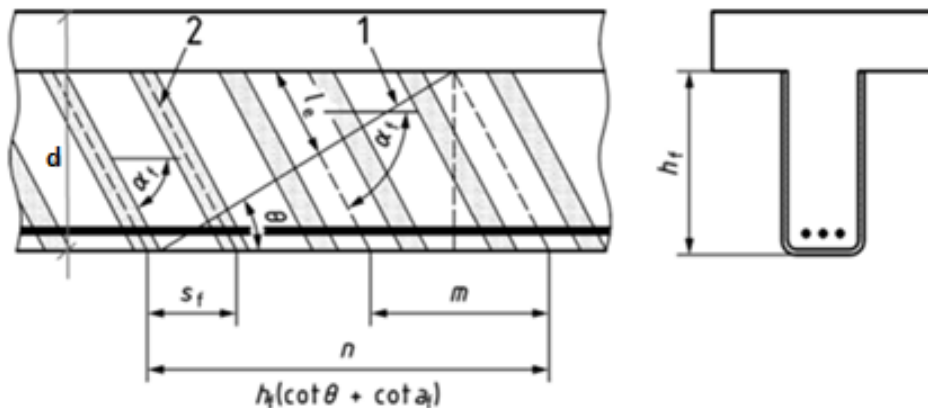
$$n = integer \left(\frac{h_f (cot\theta + cot\alpha_f)}{s_f} \right) \quad (\text{viz obrázek č.21}) \quad (23)$$

$$m = integer \left(\frac{l_{bf,max,k} (cot\theta + cot\alpha_f) * sin\alpha_f}{s_f} \right) \quad (\text{viz obrázek č.21}) \quad (24)$$

Pro otevřené spojitě zesílení může být smyková pevnost CFRP zesílení spočítána dle vzorců:

$$f_{fwd} = \begin{cases} \frac{2}{3} * \frac{\frac{h_f}{sin\alpha_f}}{l_{bf,max,k}} * f_{bfRd} & \text{pro } h_f / sin\alpha_f < l_{bf,max,k} \\ \left(1 - \frac{1}{3} * \frac{l_{bf,max,k}}{h_f / sin\alpha_f} \right) * f_{bfRd} & \text{pro } h_f / sin\alpha_f \geq l_{bf,max,k} \end{cases} \quad (25)$$

h_f – výška CFRP zesílení přes smykové trhliny (viz obrázek č.21)



Obrázek č. 21: Vysvětlivky k zesílení na smyk. 1) Smyková trhlina, 2) lamely pod úhlem α_f , m) lamely s $l_{bf} < l_{bf,max,k}$, n) lamely protínající smykovou trhlinu (1)

Kotevní délky pro výpočty (21), (22), (23), (24), (25):

Pozn. 2: Problematika kotevních délek u CFRP je rozsáhlejší tematika. V této kapitole je probrána pouze část, která je nutná pro výpočty smykového zesílení, a to pomocí zjednodušené metody

Povrchová tahová pevnost $f_{ctm,surf}$ betonu rozhoduje o únosnosti přípoje CFRP k betonu. Pokud nemůže být zjištěna zkouškou na prvku, může být odhadnuta dle vzorce:

$$f_{ctm,surf} = k_{c,surf} * f_{ctm} \quad (26)$$

Kde:

$k_{c,surf}$ je koeficient zohledňující polohu při betonáži pro odhad povrchové tahové pevnosti betonu

$$k_{c,surf} = \begin{cases} 0,3 + 0,6 * \left(\frac{f_{ck}}{60} - 0,2\right) & \text{pro polohu betonáže shora} \\ 0,4 + 0,5 * \left(\frac{f_{ck}}{60} - 0,2\right) & \text{pro polohu betonáže z boku} \\ 0,6 + 0,3 * \left(\frac{f_{ck}}{60} - 0,2\right) & \text{pro polohu betonáže zdola} \end{cases} \quad (27)$$

f_{ctm} je pevnost betonu v tahu (viz tabulka č. 5)

Tabulka č. 5: Pevnosti betonů (11)

f	Pevnostní třídy betonu														Řídící vzorce	
	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
f_{ck}	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90	100	—
f_{cm}	20	24	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	88	98	108	$f_{cm} = f_{ck} + 8 \text{ MPa}$
f_{ctm}	1,6	1,9	2,2	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8	4,1	4,2	4,3	4,5	4,7	4,9	5,1	$f_{ctm} = 0,3f_{ck}^{2/3}$ ($f_{ck} \leq 50 \text{ MPa}$) $f_{ctm} = 1,1f_{ck}^{1/3}$ ($f_{ck} > 50 \text{ MPa}$)
$f_{ctk;0,05}$	1,1	1,3	1,5	1,8	2,0	2,2	2,5	2,7	2,9	2,9	3,0	3,2	3,3	3,5	3,6	$f_{ctk;0,05} = 0,7f_{ctm}$ (5 %-fractile)
$f_{ctk;0,95}$	2,0	2,5	2,9	3,3	3,8	4,2	4,6	4,9	5,3	5,4	5,6	5,9	6,2	6,4	6,6	$f_{ctk;0,95} = 1,3f_{ctm}$ (95 %-fractile)

Odolnost kotvení externě lepeného CFRP lze spočítat dle vzorce:

$$f_{bfRD} = \frac{0,2}{\gamma_{BA}} \beta_1 \sqrt{\frac{E_f}{t_f} (f_{cm} * f_{ctm,surf})^{0,5}} \quad (28)$$

Kde:

β_1 je redukční faktor únosnosti kotvení s ohledem na délku kotvení

$$\beta_1 = \begin{cases} \frac{l_{bf}}{l_{bf,max,k}} * \left(2 - \frac{l_{bf}}{l_{bf,max,k}}\right) < 1 & \text{pro } l_{bf} < l_{bf,max,k} \\ 1 & \text{pro } l_{bf} \geq l_{bf,max,k} \end{cases} \quad (29)$$

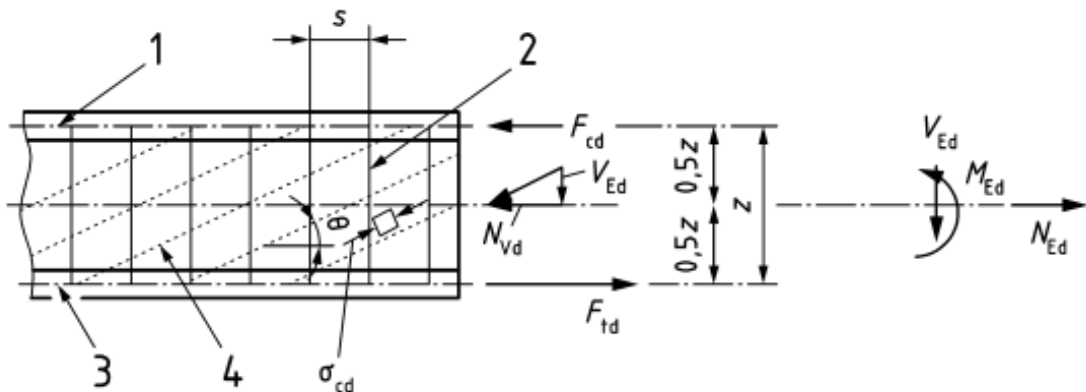
f_{cm} je střední pevnost betonu v tlaku měřená na válci (viz tabulka č. 5)

$$l_{bf,max,k} = 1,5 * \sqrt{\frac{E_f * t_f}{(f_{cm} * f_{ctm,surf})^{0,5}}} \quad (30)$$

4.5 Popis statického výpočtu smykové odolnosti prvku se smykovým vyztužením

Pozn. 1: Smyk je poměrně rozsáhlá tematika v nové generaci Eurokódu 2, kde se řeší také smyková odolnost průřezů bez smykového vyztužení atd. Vzhledem k tomu, že příloha J řešící zesilování pomocí CFRP se však zabývá pouze obdélníkovými a T průřezy, které většinou již mají smykové vyztužení v podobě třmínků, je zde popsán pouze postup výpočtu pro prvek s třmínky. Také nejsou popisovány postupy, které se netýkají obdélníkových a T průřezů, protože jejich návrh není popsán v příloze J. Zároveň nejsou popsány postupy pro stanovení úhlu θ , vzhledem k doporučení v příloze J brát tuto hodnotu jako 45°.

Na ověření smykové odolnosti prvku se smykovou výztuží se v nové generaci Eurokódu 2 používá příhradový model s tlačnými diagonálami (viz obrázek č. 22).



Obrázek č. 22: Příhradový model prvku namáhaného smykem, 1) osa tlačného pásu, 2) smykové vyztužení, 3) osa taženého pásu, 4) tlačné diagonály (11)

Kontrolní řezy by měly být posouzeny na všech kritických místech, včetně čela podpory, geometrických nespojitostí nebo při změně smykové vyztuže. Hodnota úhlu θ při zesilování pomocí CFRP je brána jako 45° .

Smyková odolnost prvku kolmá k podélné ose prvku dosažením meze kluzu smykové vyztuže se vypočte dle:

$$\tau_{Rd,sy} = \rho_w * f_{ywd} * \cot\theta \quad (31)$$

Kde:

f_{ywd} je návrhová mez kluzu smykového vyztužení

ρ_w je stupeň vyztužení smykovou vyztuží

$$\rho_w = \frac{A_{sw}}{b_w * s} \quad (32)$$

A_{sw} je průřezová plocha smykové vyztuže

b_w je šířka průřezu prutového prvku

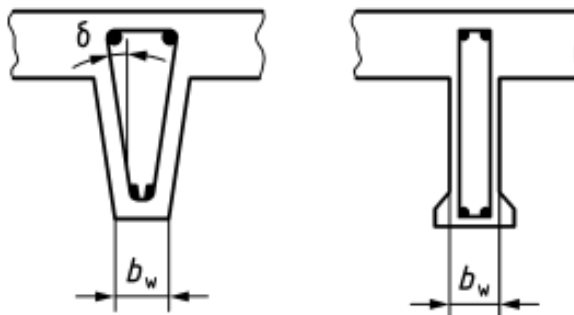
s je osová vzdálenost třmíneků

Smyková odolnost prvku kolmá k podélné ose prvku současným dosažením meze kluzu a zároveň porušením tlačného betonu se vypočte dle:

$$\tau_{Rd} = \rho_w * f_{ywd} * \cot\theta \leq \frac{v * f_{cd}}{2} \quad (33)$$

Vzhledem k tomu, že ve výpočtu počítáme s hodnotou $\theta=45^\circ$, ν může být bráno jako 0,5.

Pro průřezy s měnící se šířkou (např. T průřez) se hodnota b_w může brát konzervativně jako nejmenší šířka průřezu mezi taženým pásem a neutrální osou, viz obrázek č.23. Plocha výztuže A_{sw} by také měla být přenásobena v hodnotou $\cos\delta$, což je úhel mezi třmínkem a vertikální osou, viz obrázek č. 23.



Obrázek č. 23: Určení hodnoty b_w pro průřezy s proměnnou šířkou (11)

5. Příklad 1: Statický návrh sloupu ovinutého CFRP

5.1 Zadání

Předpokládejme železobetonový sloup vetknutý na obou koncích o výšce $L=3$ m a půdorysných rozměrech $h=400$ mm, $b=400$ mm, z betonu třídy C30/37, vyztužený ocelovou výztuží B500B. Podélná výztuž se nachází v rozích sloupu, počet podélných prutů $n_s=4$, průměr podélných prutů $\varnothing_s=16$ mm. Třmínky mají průměr $\varnothing_{tř}=8$ mm, krycí vrstva betonu $c=25$ mm. Poloměr rohů tohoto sloupu $r_c=40$ mm⁴.

5.2 Výpočet železobetonového sloupu bez CFRP ovinutí

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

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

$$E_s = 210 \text{ MPa}$$

$$f_{cd} = \eta_{cc} * k_{tc} \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 1 * 1 * \frac{30}{1,5} = 20 \text{ MPa} \quad ^5 \quad (34)$$

$$\eta_{cc} = \left(\frac{f_{ck,ref}}{f_{ck}} \right)^{\frac{1}{3}} \leq 1,0 \rightarrow \eta_{cc} = \left(\frac{40}{30} \right)^{\frac{1}{3}} = 1,1 \rightarrow \eta_{cc} = 1 \quad (35)$$

$$f_{ck,ref} (\text{referenční pevnost betonu v tlaku}) = 40 \text{ MPa}$$

$$k_{tc} = 1,0$$

$$\gamma_c = 1,5$$

$$d_1 = d_2 = c + \varnothing_{tř} + \frac{\varnothing_s}{2} = 25 + 8 + \frac{16}{2} = 41 \text{ mm} \quad (36)$$

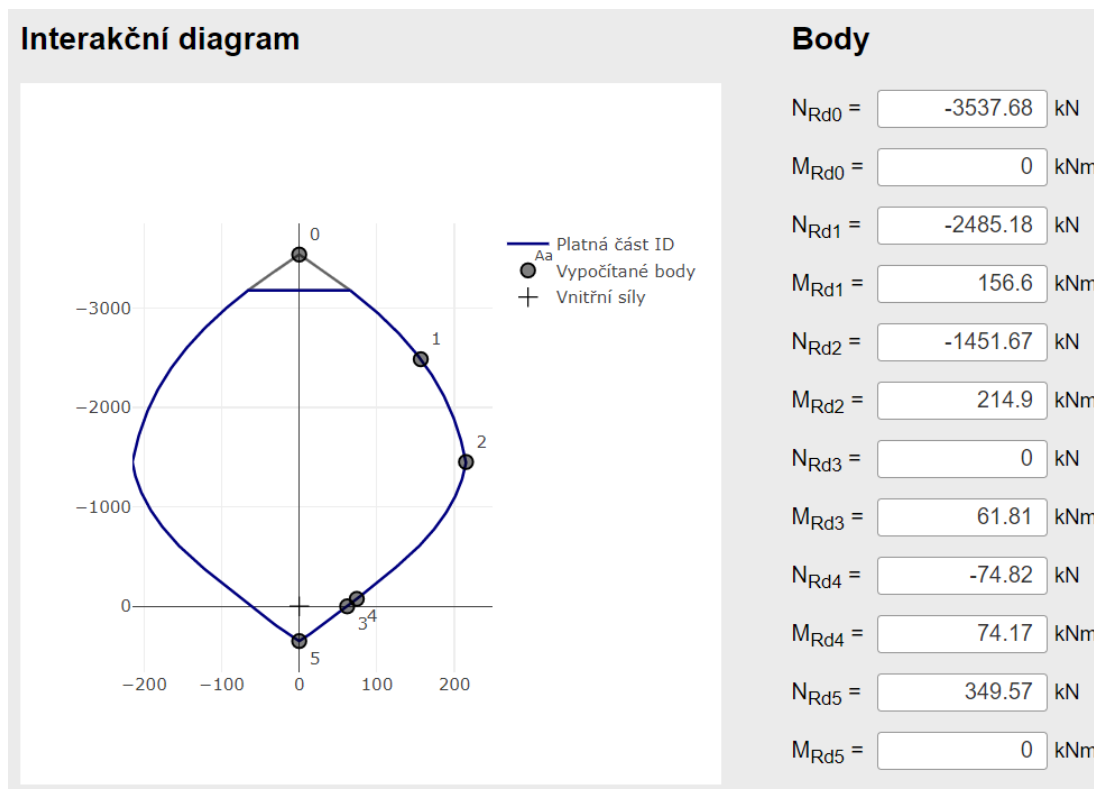
$$A_s = n_s * \pi * \varnothing_s^2 * \frac{1}{4} = 4 * \pi * 16^2 * \frac{1}{4} = 804 \text{ mm}^2 \quad (37)$$

$$A_{s1} = A_{s2} = \frac{A_s}{2} = \frac{804}{2} = 402 \text{ mm}^2 \quad (38)$$

$$A = b * h = 400 * 400 = 160\,000 \text{ mm}^2$$

⁴ Při výpočtu plochy betonu v interakčním diagramu je poloměr rohů zanedbán. Jedná se o změnu o cca 16 cm², tedy cca 1 %.

⁵ V nové generaci Eurokódu 2 se návrhová pevnost betonu v tlaku počítá mírně odlišně oproti stávajícímu postupu. U betonů o charakteristické pevnosti v tlaku do 40 MPa, se však změna postupu v běžných případech neprojeví, oba součinitele nabývají hodnoty 1,0.



Obrázek č. 24: Interakční diagram včetně hodnot bodů ŽB sloupu bez CFRP výztuže (21)

Na obrázku č. 24 můžeme vidět interakční diagram tohoto sloupu před ovinutím pomocí CFRP. Pro výpočet byl použit program InDiOn (21), který vychází z aktuálně platné verze Eurokódu 2. Pro beton třídy C30/37 by interakční diagram dle nové generace Eurokódu vycházel stejně až na drobnou změnu v oblasti oříznutí špičky v oblasti dostředného tlaku. Tato změna však v uvedeném postupu není podstatná

5.3 Výpočet sloupu ovinutého pomocí CFRP dle nové generace Eurokódu 2

Pro ztužení byla zvolena tkanina **Tyfo SCH-41** aplikovaná celoplošně ve 3 vrstvách – vlastnosti vytvrzeného kompozitu (22):

$$f_{fuk} = 986 \text{ MPa}$$

$$E_f = 95,8 \text{ GPa}$$

$$b_f = 1000 \text{ mm}$$

$$n_f = 3$$

$$A_f = 1\,000\text{ mm}^2$$

Kontrola splnění podmínek pro využití postupů v Eurokódu:

$$20\text{ kN/mm} < E_f \cdot A_f / b_f = 95,8 \cdot 1000 / 1000 = 95,8\text{ kN/mm} < 400\text{ kN/mm} \quad \checkmark$$

$$100\text{ mm}^2/\text{m} < A_f / b_f = 1\,000 / 1 = 1\,000\text{ mm}^2/\text{m} < 1800\text{ mm}^2/\text{m} \quad \checkmark$$

$$f_{atk} > 14\text{ N/mm}^2 \quad - \text{předpoklad} \quad \checkmark$$

$$f_{ck} = 30\text{ MPa} < 50\text{ MPa} \quad \checkmark$$

$$D_{eq} = \frac{2 \cdot b \cdot h}{b+h} = \frac{2 \cdot 400 \cdot 400}{400+400} = 400\text{ mm} > 150\text{ mm} \quad \checkmark \quad (39)$$

$$\frac{e_0}{D_{eq}} \leq 0,20 \rightarrow \frac{e_0}{400} \leq 0,20 \rightarrow e_0 < 80\text{ mm} - \text{předpoklad}$$

Vetknutý sloup (předpoklad):

$$l_0 = L \cdot 1/2 = 3 \cdot 1/2 = 1,5\text{ m} = 1500\text{ mm}$$

$$\frac{l_0}{D_{eq}} = \frac{1500}{400} = 3,75 < 40 \quad \checkmark$$

$$r_c = 40\text{ mm} > 20\text{ mm} \quad \checkmark$$

Výpočet:

$$f_{fud} = \frac{\eta_f \cdot f_{fuk}}{\gamma_f} = \frac{0,7 \cdot 986}{1,4} = 493\text{ MPa} \quad (40)$$

$$\eta_f = 0,7$$

$\gamma_f = 1,4$ - Viz tabulka č. 4 – Trvalé a přechodné zatížení, CFRP tkaniny aplikované in situ

$$t_f = n_f^{k_f} \cdot \frac{A_f}{b_f} = 3^1 \cdot \frac{1000}{1000} = 3\text{ mm} \quad (41)$$

$$k_f = 1$$

$$\left(\frac{b}{h}\right)^2 \cdot k_e \frac{t_f \cdot k_r \cdot f_{fud}}{D_{eq} \cdot f_{cd}} = \left(\frac{400}{400}\right)^2 \cdot 0,57 \frac{3 \cdot 0,96 \cdot 493}{400 \cdot 20} = 0,101 > 0,07 \quad (42)$$

$$D_{eq} = \frac{2 \cdot b \cdot h}{b+h} = \frac{2 \cdot 400 \cdot 400}{400+400} = 400\text{ mm} \quad (43)$$

$$k_e = 1 - \frac{(b-2 \cdot r_c)^2 + (h-2 \cdot r_c)^2}{3 \cdot b \cdot h} = 1 - \frac{(400-2 \cdot 40)^2 + (400-2 \cdot 40)^2}{3 \cdot 400 \cdot 400} = 0,57 \quad (44)$$

$$k_r = 1,0 * \frac{r_c}{50} * \left(2 - \frac{r_c}{50}\right) = 1,0 * \frac{40}{50} * \left(2 - \frac{40}{50}\right) = 0,96 \quad (45)$$

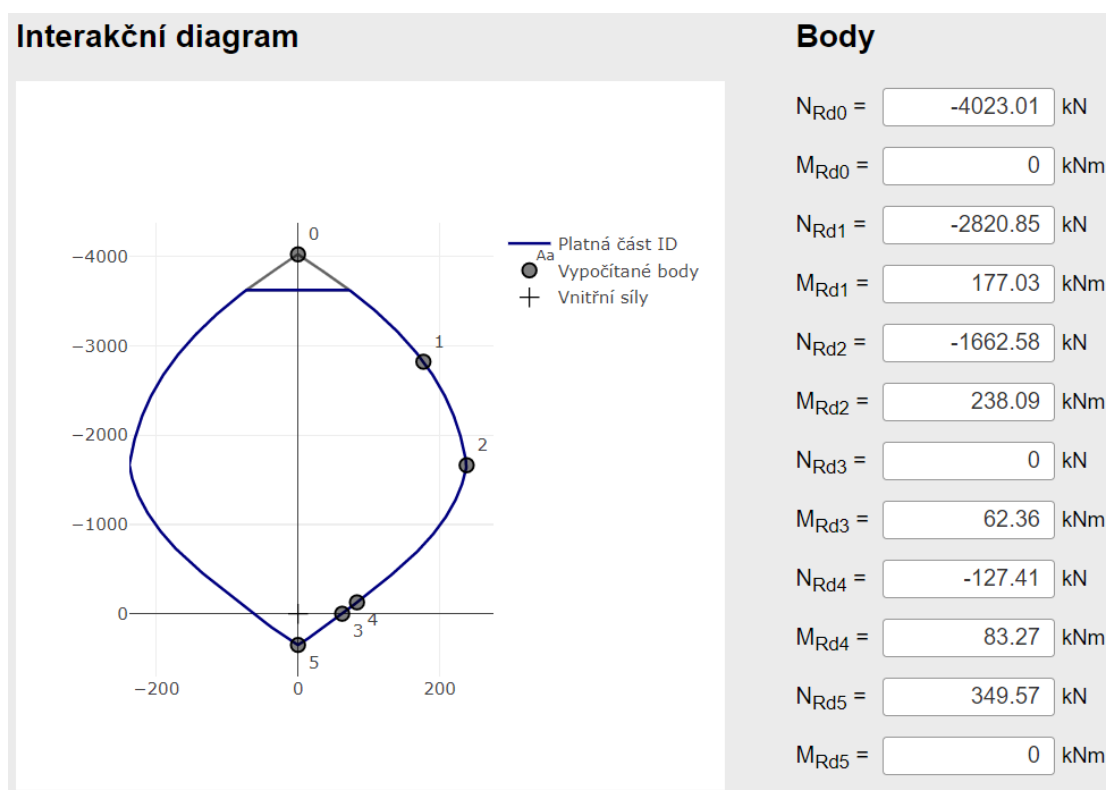
$$\Delta f_{cd} = k_{cc} * \left(\frac{b}{h}\right)^2 * k_e * \frac{t_f}{D_{eq}} * k_r * f_{fud} = 1,5 * \left(\frac{400}{400}\right)^2 * 0,57 * \frac{3}{400} * 0,96 * 493 = 3,03 \text{ MPa} \quad (46)$$

$$k_{cc} = 1,5$$

$$f'_{cd} = f_{cd} + \Delta f_{cd} = 20 + 3,03 = 23,03 \text{ MPa} \quad (47)$$

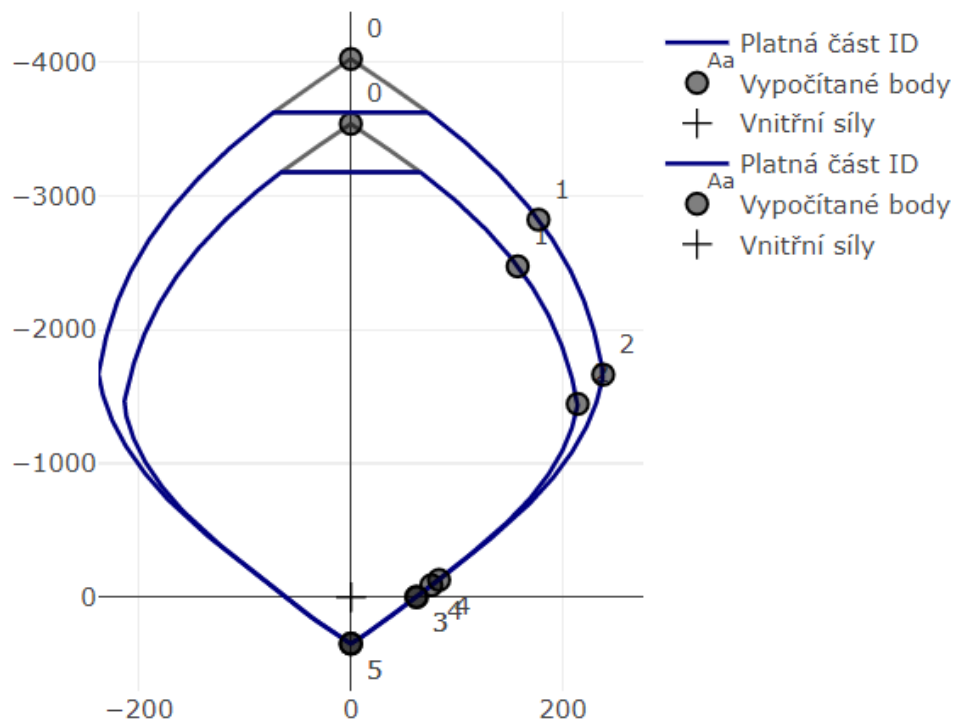
$$f'_{ck}{}^6 = f'_{cd} * \gamma_c = 23,03 * 1,5 = 34,55 \text{ MPa} \quad (48)$$

Na obrázku č. 25 můžeme vidět interakční diagram sloupu ovinutého CFRP tkaninou. Na obrázku č. 26 pak můžeme vidět porovnání interakčních diagramů sloupů s a bez CFRP ovinutí.



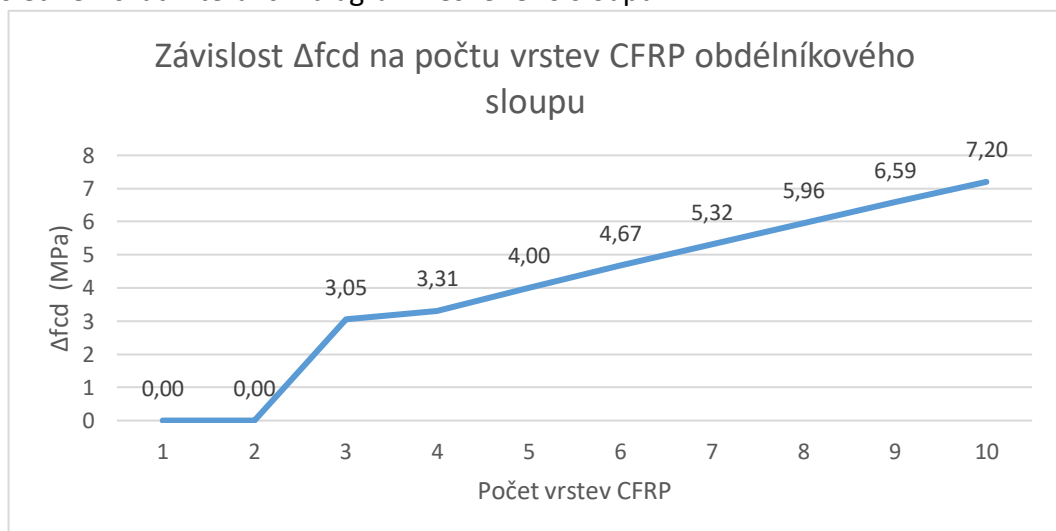
Obrázek č. 25: Interakční diagram včetně hodnot bodů ŽB sloupu s CFRP výztuží spočítaného dle nové generace Eurokódu 2 (21)

⁶ Tato hodnota je spočítána z důvodu výpočtu interakčního diagramu pomocí programu InDiOn, který vyžaduje jako vstup charakteristickou hodnotu pevnosti betonu v tlaku, kterou následně vydělí součinitelem 1,5 a použije pro výpočet správnou hodnotu pevnosti betonu v tlaku.

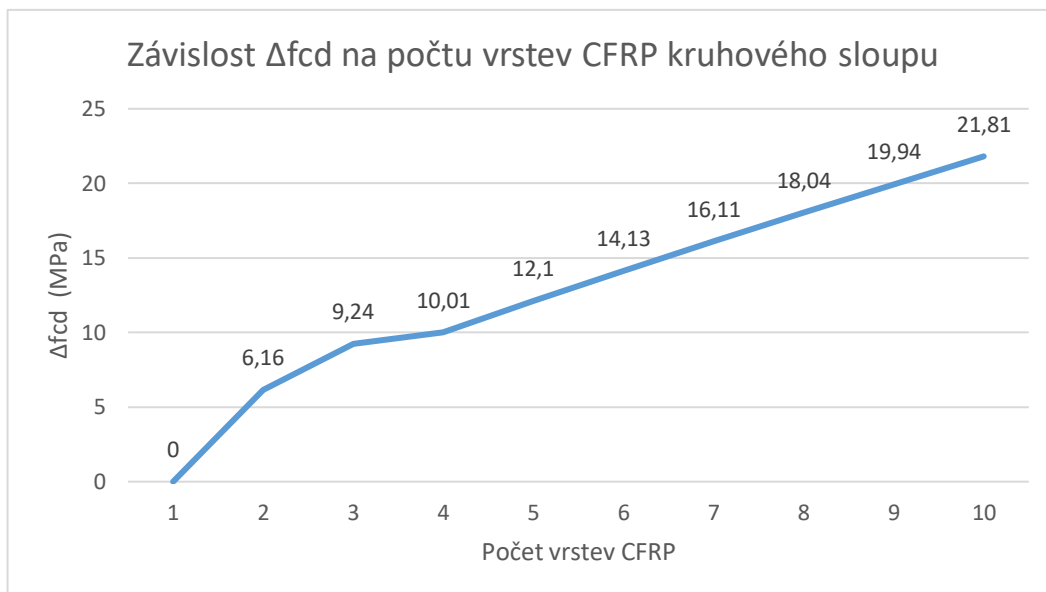


Obrázek č. 26: Porovnání interakčních diagramů sloupů s a bez CFRP ovinutí (21)

V programu Microsoft Excel byla vytvořena tabulka, která automaticky počítá Δf_{cd} pro kruhové a obdélníkové sloupy, viz příloha 1. S její pomocí byly vytvořeny tyto grafy 14 a 15, které zobrazují závislost Δf_{cd} na počtu vrstev tkaniny n_f . Díky této tabulce mohou projektanti snadno stanovit vliv ovinutí pro libovolný sloup a po dosažení charakteristické pevnosti betonu v tlaku (vztah (48)) do programu InDiOn následně získat interakční diagram zesíleného sloupu.



Graf č. 14: Závislost Δf_{cd} na počtu vrstev CFRP obdélníkového sloupu



Graf č. 15: Závislost Δf_{cd} na počtu vrstev CFRP kruhového sloupu

Graf pro obdélníkový sloup je pro sloup ze zadání, viz kapitola 5.1. Graf pro kruhový sloup je vytvořen pro sloup o průměru $D=400$ mm, což odpovídá efektivnímu průměru D_{eq} obdélníkového sloupu, který je rovněž 400 mm. Byla použita stejná tkanina (se stejnými vlastnostmi) i beton stejné třídy. Z grafů č. 14 a 15 můžeme vyzorovat, že norma počítá s výrazně vyšší efektivitou ovinutí pro sloupy kruhového půdorysného průřezu. To je výpočetně z velké části způsobeno koeficientem k_{cc} , který je pro kruhové sloupy 2,5, ale pro obdélníkové pouze 1,5.

Z fyzikálního hlediska je důvodem skutečnost, že v případě kruhového sloupu ovinutí zajišťuje rovnoměrnou trojosou napjatost betonu (hydrostatické namáhání), kdežto v případě obdélníkového sloupu je vliv ovinutí nerovnoměrný a napětí v betonu není hydrostatické, což vede ke vzniku dodatečných namáhání (smyk, příčný tah), redukujících normálovou únosnost prvku.

6. Příklad 2: Statický návrh smykového zesílení nosníku

6.1 Zadání

Předpokládejme železobetonový nosník obdélníkového průřezu výšky $h=600$ mm a šířky $b=300$ mm, z betonu třídy C30/37, vyztužený ocelovou výztuží B500B. Podélná výztuž se nachází v rozích nosníku, počet podélných prutů $n_s=4$, průměr podélných prutů $\varnothing_s=16$ mm. Dvoustřížné třmínky mají průměr $\varnothing_{tr}=10$ mm, osová vzdálenost $s=150$ mm. Poloměr rohů tohoto nosníku $r_c=40$ mm.

6.2 Výpočet smykové odolnosti nosníku bez CFRP zesílení dle nové generace Eurokódu 2

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

$$f_{yw} = 500 \text{ MPa}$$

$$E_s = 210 \text{ MPa}$$

$$f_{cd} = \eta_{cc} * k_{tc} \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 1 * 1 * \frac{30}{1,5} = 20 \text{ MPa} \quad (49)$$

$$\eta_{cc} = \left(\frac{f_{ck,ref}}{f_{ck}} \right)^{\frac{1}{3}} \leq 1,0 \rightarrow \eta_{cc} = \left(\frac{40}{30} \right)^{\frac{1}{3}} = 1,1 \rightarrow \eta_{cc} = 1 \quad (50)$$

$$f_{ck,ref} (\text{referenční pevnost betonu v tlaku}) = 40 \text{ MPa}$$

$$k_{tc} = 1,0$$

$$\gamma_c = 1,5$$

$$\gamma_s = 1,15$$

$$f_{ywd} = \frac{f_{yw}}{\gamma_s} = \frac{500}{1,15} = 435 \text{ MPa} \quad (51)$$

$$\theta = 45^\circ$$

$$\rho_w = \frac{A_{sw}}{b_w * s} = \frac{157,1}{300 * 150} = 3,49 * 10^{-3} \quad (52)$$

$$b_w = b = 300 \text{ mm}$$

⁷ V nové generaci Eurokódu 2 se návrhová pevnost betonu v tlaku počítá mírně odlišně oproti stávajícímu postupu. U betonů o charakteristické pevnosti v tlaku do 40 MPa, se však změna postupu v běžných případech neprojeví, oba součinitele nabývají hodnoty 1,0.

$$A_{sw} = N * \frac{\pi * \sigma_{tr}^2}{4} = 2 * \frac{\pi * 10^2}{4} = 157,1 \text{ mm}^2 \quad (53)$$

N (střížnost třmínku) =2

s=150 mm

$\nu = 0,5$

$$\tau_{Rd} = \rho_w * f_{ywd} * \cot\theta = 3,49 * 10^{-3} * 435 * \cot 45 = \mathbf{1,5 \text{ MPa}} \leq \frac{\nu * f_{cd}}{2} = 0,5 * \frac{20}{2} = 5 \text{ MPa} \quad \checkmark \quad (54)$$

6.3 Výpočet smykové odolnosti nosníku s CFRP zesílením dle nové generace Eurokódu 2

Pro ztužení byla zvolena tkanina **Tyfo SCH-41** aplikovaná celoplošně, uzavřeně, ve 2 vrstvách, úhel $\alpha_f = 90^\circ$ – vlastnosti vytvrzeného kompozitu (22):

$$f_{fuk} = 986 \text{ MPa}$$

$$E_f = 95,8 \text{ GPa}$$

$$b_f = 1000 \text{ mm}$$

$$n_f = 2$$

$$A_f = 1000 \text{ mm}^2$$

Kontrola splnění podmínek pro využití postupů v Eurokódu:

$$20 \text{ kN/mm} < E_f * A_f / b_f = 95,8 * 1000 / 1000 = 95,8 \text{ kN/mm} < 400 \text{ kN/mm} \quad \checkmark$$

$$100 \text{ mm}^2/\text{m} < A_f / b_f = 1000 / 1 = 1000 \text{ mm}^2/\text{m} < 1800 \text{ mm}^2/\text{m} \quad \checkmark$$

$$f_{atk} > 14 \text{ N/mm}^2 \quad - \text{ předpoklad} \quad \checkmark$$

Výpočet:

$$f_{fwd} = 0,8 * k_r * f_{fud} = 0,8 * 0,96 * 493 = 378,6 \text{ MPa} \quad (55)$$

$$f_{fud} = \frac{\eta_f * f_{fuk}}{\gamma_f} = \frac{0,7 * 986}{1,4} = 493 \text{ MPa} \quad (56)$$

$$\eta_f = 0,7$$

$\gamma_f = 1,4$ - Viz tabulka č. 4 – Trvalé a přechodné zatížení, CFRP tkaniny aplikované in situ

$$k_r = 1,0 * \frac{r_c}{50} * \left(2 - \frac{r_c}{50}\right) = 1,0 * \frac{40}{50} * \left(2 - \frac{40}{50}\right) = 0,96 \quad (57)$$

$$t_f = n_f^{k_f} * \frac{A_f}{b_f} = 2^1 * \frac{1000}{1000} = 2 \text{ mm} \quad (58)$$

$$k_f = 1$$

$$\tau_{Rd,f} = \frac{A_f}{s_f} * \frac{f_{fwd}}{b_w} * (\cot\theta + \cot\alpha_f) * \sin\alpha_f = 4 * \frac{378,6}{300} * (\cot 45 + \cot 90) * \sin 90 = 5,1 \text{ MPa} \quad (59)$$

Spojité zesílení:

$$\frac{A_f}{s_f} = 2 * t_f * \sin\alpha_f = 2 * 2 * \sin 90 = 4 \text{ mm} \quad (60)$$

$$\tau_{Rd,CFRP} = \tau_{Rd} + \tau_{Rd,f} = 1,5 + 5,1 = 6,6 \text{ MPa} > 0,5 * v * f_{cd} = 0,5 * 0,5 * 20 = 5 \text{ MPa} \quad \times \quad (61)$$

Výsledná hodnota smykové odolnosti nosníku bude 5 MPa, jelikož je omezena tlakem v betonu v tlačných diagonálách.

V programu Microsoft Excel byla opět vytvořena tabulka, která automaticky počítá $\tau_{Rd,CFRP}$, $\tau_{Rd,f}$ a τ_{Rd} pro všechny typy zesílení pomocí CFRP. Byl vytvořen graf (viz graf č. 16) závislosti $\tau_{Rd,f}$ na úhlu α_f pro stejné zadání jako v této kapitole, mění se pouze úhel α_f . Lze vidět, že graf je částí harmonické funkce. Rovnici

$$\tau_{Rd,f} = \frac{A_f}{s_f} * \frac{f_{fwd}}{b_w} * (\cot\theta + \cot\alpha_f) * \sin\alpha_f \quad (62)$$

kde

$$\frac{A_f}{s_f} = \begin{cases} \frac{2 * t_f * b_f}{s_f} * \sin\alpha_f & \text{pro diskrétní zesílení} \\ 2 * t_f * \sin\alpha_f & \text{pro spojitě zesílení} \end{cases} \quad (63)$$

lze vyjádřit jako:

$$\tau_{Rd,f} = \frac{2 * t_f * b_f}{s_f} * \sin \alpha_f * \frac{f_{fwd}}{b_w} * (\cot \theta + \cot \alpha_f) * \sin \alpha_f \quad (64)$$

případně

$$\tau_{Rd,f} = 2 * t_f * \sin \alpha_f * \frac{f_{fwd}}{b_w} * (\cot \theta + \cot \alpha_f) * \sin \alpha_f \quad (65)$$

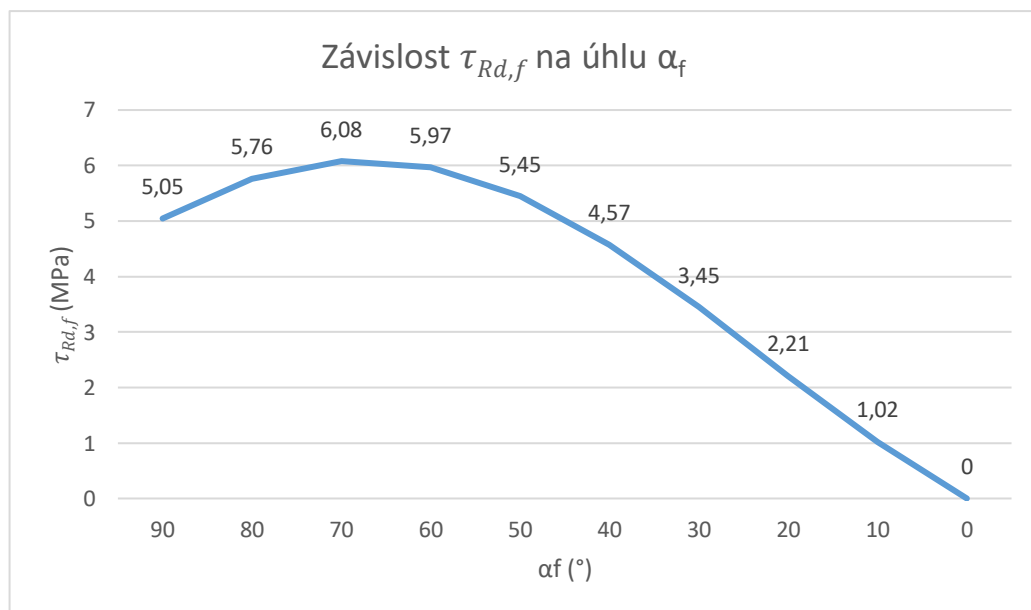
Za předpokladu, že všechny neznámé kromě α_f jsou již určeny (buď volbou tkaniny či průřezem zesilovaného prvku), můžeme tyto neznámé nahradit koeficientem k , $\cot \theta$ nahradíme hodnotou 1, vzhledem k tomu, že předpokládáme, že $\theta=45^\circ$:

$$\tau_{Rd,f} = k * \sin^2 \alpha_f * (1 + \cot \alpha_f) \quad (66)$$

Po derivaci (derivace vytvořena pomocí programu WolframAlpha (23)) vznikne rovnice:

$$2 * \sin \alpha_f * \cos \alpha_f (1 + \cot \alpha_f) - 1 \quad (67)$$

Z této derivace bylo pomocí programu WolframAlpha (23) zjištěno maximum pro α_f rovnající se 1,1781 rad, což je $67,5^\circ$ (funkce má ve skutečnosti 2 maxima, která jsou navíc periodická, ale na intervalu od 0° do 90° je toto maximum jediné). To znamená, že pro veškeré průřezy, spojitě či nespojitě uzavřeně zesílené na smyk



Graf č. 16: závislost $\tau_{Rd,f}$ na úhlu α_f

z výpočtu vychází jako nejúčinnější zesílení pod úhlem $\alpha_f = 67,5^\circ$. Tato skutečnost je vidět i na grafu č. 16.

Z fyzikálního hlediska je tato skutečnost poněkud zvláštní, vzhledem k tomu, že úhel vzniku smykových trhlin θ předpokládáme jako 45° a nejúčinnější by tak mělo být zesílení kolmé k těmto trhlinám, tedy zesílení pod úhlem $\alpha_f = 45^\circ$. Je to pravděpodobně způsobeno tím, že je ve výpočtu zohledněn fakt, že při návrhu běžné smykové výztuže se $\cot\theta$ předpokládá mezi 1-2,5, což odpovídá úhlům 45° - $26,6^\circ$. Předpoklad, že úhel θ je 45° je na samé hranici předpokladů při navrhování běžné smykové výztuže a skutečná trhlinka může být pod mnohem menším úhlem. Zvětšením úhlu α_f tedy bude skutečná smyková trhlinka spíše kolmá na navržené smykové zesílení.

Závěr

Cílem této práce byl popis typů, využití, vlastností, výhod, nevýhod a aplikace CFRP výztuže, čímž se zabývala teoretická část práce. Jako hlavní obecné výhody CFRP výztuže z ní vyplývají:

1. Výborné mechanické vlastnosti v tahu (pevnost a modul pružnosti), které dovolují použití menšího množství výztuže a subtilnějších konstrukcí
2. Odolnost vůči korozi, díky které je možné použití menší krycí vrstvy a návrh subtilnější konstrukce
3. Nízká objemová hmotnost, která zajišťuje jednodušší manipulaci a menší přetížení stavby
4. Jednoduchá aplikace dodatečného vyztužení
5. Tvarová flexibilita dodatečné výztuže při použití CFRP tkanin

Mezi její obecné nevýhody pak patří:

1. Vysoká cena, která v současné době prakticky znemožňuje její ekonomické využití
2. Komplikovanější výroba oproti oceli, což souvisí s cenou
3. Špatná požární odolnost způsobená materiálem matrice, přestože samotná uhlíková vlákna vydrží velmi vysoké teploty, CFRP výztuž je potřeba chránit před požárem
4. Pevnost v tlaku, kdy se uhlíková vlákna prakticky nezapojí do přenosu sil
5. Křehkost výztuže, náchylnost k poškození při vandalismu
6. Horší soudržnost mezi CFRP a betonem při využití CFRP tyčí jako ohybové výztuže

Teoretická část se také zabývala exotičtějšími způsoby zlepšení vlastností betonu pomocí nanomateriálů, a to konkrétně grafenu.

Dalším cílem této práce byl popis postupu statického návrhu pro zvolenou variantu vyztužování a jeho demonstrace na praktickém příkladu. V praktické části byl popsán způsob návrhu sloupu ovinutého CFRP tkaninou dle pracovní verze nové generace Eurokódu 2 a dle tohoto postupu vypočítán jednoduchý příklad. Tato norma k návrhu ovinutého sloupu přistupuje pomocí zlepšení pevnosti betonu v tlaku vlivem ovinutí CFRP. Dále byl vytvořena tabulka excel usnadňující automatizaci výpočtu vlivu ovinutí sloupu pomocí CFRP. Poté byl popsán způsob návrhu nosníku vyztuženého na smyk pomocí CFRP a dle tohoto postupu spočítán příklad. Rovněž pro tento výpočet byla vytvořena tabulka excel pro usnadnění automatizace.

Do této doby byla CFRP výztuž používána hlavně k zesilování stávajících konstrukcí. Jednalo se ovšem o velmi nákladnou metodu. Její klesající cena by však mohla způsobit, že se CFRP výztuž bude používat stále více. Její zařazení do nové generace Eurokódu je jasným důkazem, že se s vyztužováním pomocí CFRP do budoucna počítá.

Ovšem nemusí zůstat pouze u zesilování stávajících konstrukcí, ale je možné i její využití jako ohybové výztuže pro vyztužení novostaveb, obzvláště v náročných návrhových situacích. Tomu se nová generace Eurokódu věnuje v příloze R, která je obecně věnována problematice FRP (nejen CFRP) v novostavbách. Tato problematika nebyla předmětem této práce, je však zajímavým námětem pro další studium autora.

Seznam použitých zkratk

CFRP – carbon fiber reinforced polymer – plasty vyztužené uhlíkovými vlákny

FRP – fiber reinforced polymer – plasty vyztužené vlákny

GFRP – glass fiber reinforced polymer – plasty vyztužené skleněnými vlákny

PAN – polyakrylonitril

NSM – near surface mounted – podpovrchová výztuž

SLES – laurethsulfát sodný

USD – americký dolar

Seznam použitých značek

Latinka velká písmena:

A – plocha průřezu

A_f – průřezová plocha CFRP

A_s – plocha podélné výztuže

A_{s1} – plocha podélné výztuže u jednoho povrchu

A_{s2} – plocha podélné výztuže u druhého povrchu

A_{sw} – průřezová plocha smykové výztuže

D – průměr kruhového sloupu

D_{eq} – ekvivalentní průměr obdélníkového sloupu

E_f – modul pružnosti v tahu CFRP

E_s – modul pružnosti oceli v tahu

N – střižnost třmínku

Latinka malá písmena:

b – šířka průřezu sloupu/nosníku

b_f – šířka pásu/lamely CFRP

b_w – šířka průřezu prutového prvku

c – krycí vrstva výztuže

d_1 – vzdálenost podélné výztuže od povrchu

d_2 – vzdálenost podélné výztuže od povrchu

e_0 – excentricita prvního řádu

f'_{cd} – návrhová pevnost betonu v tlaku se započítáním vlivu ovinutí CFRP

f_{ck} – charakteristická pevnost betonu v tlaku se započítáním vlivu ovinutí CFRP

f_{Atk} – pevnost lepidla v tahu

f_{bfRd} – odolnost kotvení externě lepeného CFRP

f_{cd} – návrhová válcová pevnost betonu v tlaku

f_{ck} – charakteristická válcová pevnost betonu v tlaku

$f_{ck,ref}$ – referenční pevnost betonu v tlaku

f_{cm} – střední válcová pevnost v tlaku

f_{ctm} – pevnost betonu v tahu

$f_{ctm,surf}$ – povrchová pevnost betonu v tahu

f_{fud} – návrhová krátkodobá pevnost CFRP v tahu

f_{fuk} – charakteristická krátkodobá pevnost CFRP v tahu

f_{fwd} – návrhová smyková pevnost CFRP zesilovacího systému

f_{yk} – charakteristická mez kluzu podélného vyztužení

f_{ywd} – návrhová mez kluzu smykového vyztužení

f_{ywk} – charakteristická mez kluzu smykového vyztužení

h – výška průřezu sloupu/nosníku

h_f – výška CFRP zesílení přes smykové trhliny

$k_{c,surf}$ – koeficient zohledňující polohu při betonáži, pro odhad povrchové tahové pevnosti betonu

k_{cc} – faktor ovinutí sloupů ovinutých pomocí CFRP

k_e – faktor efektivity ovinutí obdélníkových sloupů pomocí CFRP

k_f – koeficient pro stanovení efektivní tloušťky pro určitý počet vrstev

k_h – faktor šroubovitého nebo přerušovaného ovinutí

k_r – faktor zohledňující poloměr rohů u obdélníkových průřezů

k_{tc} – součinitel zohledňující vliv vysokého trvalého zatížení na pevnost betonu v tlaku

l_0 – vzpěrná délka sloupu

l_{bf} – kotevní délka CFRP

$l_{bf,max,k}$ – charakteristická maximální kotevní délka lepeného CFRP

m – koeficient pro otevřené diskrétní zesílení, kde kotevní délka některých CFRP lamel sahající do tlačené oblasti, l_{bf} , je menší než charakteristická maximální kotevní délka lepeného CFRP, $l_{bf,max}$

n – koeficient pro otevřené diskrétní zesílení, kde kotevní délka všech CFRP lamel sahající do tlačené oblasti, l_{bf} , je menší než charakteristická maximální kotevní délka lepeného CFRP, $l_{bf,max}$

n_f – počet vrstev CFRP tkaniny

n_s – počet podélných prutů

s – osová vzdálenost třmíneků

s_f – osová vzdálenost CFRP pásu při diskrétním ovinutí/zesílení

t_f – tloušťka lamely/tkaniny CFRP

Řecká abeceda velká písmena:

β_1 – redukční faktor únosnosti kotvení s ohledem na délku kotvení

β_f – úhel šroubovitého ovinutí sloupu

Δf_{cd} – navýšení návrhové válcové pevnosti betonu v tlaku ovinutí CFRP

θ – úhel smykových trhlin

Řecká abeceda malá písmena:

α_f – úhel mezi zesilovacím prvkem a podélnou osou zesilovaného prvku

γ_{BA} – součinitel spolehlivosti spojení CFRP a betonu

γ_c – součinitel spolehlivosti betonu

γ_f – součinitel spolehlivosti CFRP v tahu

γ_s – součinitel spolehlivosti oceli

δ – úhel mezi třmínkem a vertikální osou

ϵ_c – přetvoření v betonu od tlaku

ϵ_{cu} – maximální přetvoření v betonu od tlaku

η_{cc} – faktor zohledňující rozdíl mezi tlakovou pevností neporušeného válce a efektivní pevnosti které lze dosáhnout v konstrukčním prvku

η_f – redukční součinitel tahové pevnosti v tahu CFRP pro vystavení prostředí

ν – redukční koeficient pevnosti betonu se smykovými trhlinami

ρ_w – stupeň vyztužení smykovou výztuží

σ_c – tlakové napětí v betonu

τ_{Rd} – návrhová odolnost průřezu vůči smyku bez přispění CFRP

$\tau_{Rd,CFRP}$ – celková návrhová odolnost průřezu zesíleného CFRP vůči smyku

$\tau_{Rd,f}$ – příspěvek CFRP k návrhové odolnosti průřezu vůči smyku

$\tau_{Rd,sy}$ – smyková odolnost prvku dosažením meze kluzu smykové výztuže

Ostatní znaky:

\varnothing_s – průměr podélné výztuže

$\varnothing_{tř}$ – průměr třmínků

Literatura

1. **HUANG, Beijia, Xiaofeng GAO, Xiaozhen XU, et al.** A Life Cycle Thinking Framework to Mitigate the Environmental Impact of Building Materials. *One Earth*. 2020, Sv. 3, 5, stránky 564-573.
2. **MUTHUKUMARANA, T.V., M.A.V.H.M. ARACHCHI, H.M.C.C. SOMARATHNA a S.N. RAMAN.** A review on the variation of mechanical properties of carbon fibre-reinforced concrete. *Construction and Building Materials*. 2023, Sv. 366, 130173.
3. **DOHNÁLEK, Pavel.** Využití kompozitních materiálů pro zesilování železobetonových konstrukcí. *Beton TKS*. 2005, stránky 16-19.
4. **NAITO, Kimiyoshi, Yoshihisa TANAKA, Jenn-Ming YANG a Yutaka KAGAWA.** Flexural Properties of PAN- and Pitch-Based Carbon Fibers. *Journal of the American ceramic society*. 2009, Sv. 92, 1, stránky 186-192.
5. **ZOLTEK CORPORATION.** How is Carbon Fiber Made? *Zoltek*. [Online] [Citace: 3. Březen 2023.] <https://zoltek.com/carbon-fiber/how-is-carbon-fiber-made/>.
6. **FRANK, Erik, Frank HERMANUTZ a Michael R. BUCHMEISER.** Carbon Fibers: Precursors, Manufacturing, and Properties. *Macromolecular Materials and Engineering*. 2012, Sv. 297, 6, stránky 493-501.
7. **FRHAAN, Waseem Khairi Mosleh, B. H. ABU BAKAR, Nahla HILAL a Abdulkader Ismail AL-HADITHI.** CFRP for strengthening and repairing reinforced concrete: a review. *Journal Innovative Infrastructure Solutions*. 2021, Sv. 6, 49.
8. **FUSION MEDIA LTD.** Steel Rebar Futures - (SRRc1). *Investing.com*. [Online] Fusion Media Ltd. [Citace: 10. Březen 2023.] <https://www.investing.com/commodities/steel-rebar>.

9. **VÁVRA, Zdeněk a DOHNÁLEK, Pavel.** Zesilování konstrukcí kompozitními tkaninami a uhlíkovými pásky. *Betosan*. [Online] [Citace: 3. Březen 2023.] https://www.betosan.cz/wp-content/uploads/prednaska_zesilovani.pdf.

10. **LOUDA, Petr.** Protokol z měření vysokopevnostních mikrovláken a kompozitů. *Frisiverto*. [Online] 2017. [Citace: 3. Březen 2023.] <https://www.frisiverto.cz/data/media/img/source/Studie.pdf>.

11. **FprEN 1992-1-1: Eurocode2: Design of concrete structures - pracovní verze nové generace Eurokódu 2.** Zář 2022.

12. **BASIM, Shahnaz, Farzad HEJAZI a Raizal Saifulnaz Bin Muhammad RASHID.** Embedded carbon fiber-reinforced polymer rod in reinforced concrete frame and ultra-high-performance concrete frame joint. *International Journal of Advanced Structural Engineering*. 2019, Sv. 11, 1, stránky 35–51.

13. **GÄRTNER, Chris.** The project building – the CUBE: Objectives and use concept. *bauen-neu-denken.de/*. [Online] Carbon Concrete Composite e.V., 2020. [Citace: 10. Březen 2023.] <https://www.bauen-neu-denken.de/en/the-project-building-the-cube-objectives-and-use-concept/>.

14. **PANHANS, Andreas.** Carbon reinforced concrete material cycle. *bauen-neu-denken.de/*. [Online] Carbon Concrete Composite e.V., 2020. [Citace: 10. Březen 2023.]

15. **GÄRTNER, Chris.** What is Carbon Reinforced Concrete (CRC)? *bauen-neu-denken.de/*. [Online] Carbon Concrete Composite e.V., 2020. [Citace: 10. Březen 2023.] <https://www.bauen-neu-denken.de/en/what-is-carbon-reinforced-concret-crc/>.

16. **GHANEM, Sahar Y. a Jonathan BOWLING.** Mechanical Properties of Carbon-Fiber–Reinforced Concrete. *Journal Advances in Civil Engineering Materials*. 2019, Sv. 8, 3.

17. **NOBEL PRIZE OUTREACH.** The Nobel Prize in Physics 2010 Press release. *Nobelprize.org*. [Online] Nobel Prize Outreach AB, 2010. [Citace: 11. Březen 2023.] <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2010/press-release/>.

18. **DE LA FUENTE, Jesus.** *graphenea.com. Graphene Structure*. [Online] Graphenea, Inc. [Citace: 11. Březen 2023.] <https://www.graphenea.com/pages/graphene-properties#.ZAxQIHbMK3A>.

19. **SPASENOVIC, Marko.** The Price Of Graphene. *graphenea.com*. [Online] Graphenea, Inc. [Citace: 11. Březen 2023.] <https://www.graphenea.com/pages/graphene-price#.ZAxWxnbMK3A>.

20. **DALAL, Sejal P. a Purvang DALAL.** Experimental Investigation on Strength and Durability of Graphene Nanoengineered Concrete. *Construction and Building Materials*. 2021, 276.

21. **HOLAN, Jakub, ŠTEFAN, Radek.** InDiOn - Interakční Diagram Online. *people.fsv.cvut.cz*. [Online] [Citace: 20. Březen 2023.] <https://people.fsv.cvut.cz/~holanjak/software/indion/program/>.

22. **Betosan s.r.o.** *Betosan.cz*. [Online] Betosan s.r.o. [Citace: 25. Březen 2023.] https://www.betosan.cz/wp-content/uploads/tyfo_sch_41_TL.pdf.

23. **Wolfram Alpha LLC.** WolframAlpha computational intelligence. *Wolfram Alpha*. [Online] Wolfram Alpha LLC. [Citace: 13. Duben 2023.] <https://www.wolframalpha.com/input?i=sin%5E2%28x%29+%28cot%28x%29+%2B+1%29>.

24. **CARBON CONCRETE COMPOSITES E.V.** We got the cube. *carbon-concrete.org/*. [Online] Carbon Concrete Composites e.V. [Citace: 10. Březen 2023.] <https://carbon-concrete.org/lets-get-cube/>.

25. **ZHU, Hongwei, Zhiping XU a Ying FANG.** *Graphene*. Beijing : Vydavatelství Tsinghua University Press Limited, 2018. 978-0-12-812651-6.

26. **DAS, Tushar Kanti, Prosenjit GHOSH a Narayan Ch. DAS.** Preparation, development, outcomes, and application versatility of carbon fiber-based polymer

composites: a review. *Advanced Composites and Hybrid Materials*. 2019, Sv. 2, 12, stránky 214–233.

27. **PATLOLLA, V. R., GEORGE, J., LOO, S. a R. ASMATULU.** *ASME 2014 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. 2014.

28. **BORZOVIČ, Viktor.** *Zosilňovanie existujúcich konštrukcií CFRP*. Mikulov : Školení: Navrhování dle nové generace Eurokódů, 2023.

29. **HASAN, Blawal, ULLAH, Sami.** *A review on FRP repairing of fire damaged RC members*. Islamabad : Department of Civil Engineering Capital University of Science and Technology, Islamabad Pakistan, 2021.

Seznam příloh

Příloha č.1 – Tabulka excel pro výpočet ovinutí sloupů a smykového zesílení nosníku pomocí CFRP