



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV BETONOVÝCH A ZDĚNÝCH KONSTRUKCÍ

INSTITUTE OF CONCRETE AND MASONRY STRUCTURES

BETONOVÉ KONSTRUKCE VYZTUŽENÉ FRP VÝZTUŽÍ

CONCRETE STRUCTURES WITH FRP REINFORCEMENT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Matej Valent

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. FRANTIŠEK GIRGLE, Ph.D.

BRNO 2021



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3647R013 Konstrukce a dopravní stavby
Pracoviště	Ústav betonových a zděných konstrukcí

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Matej Valent
Název	Betonové konstrukce vyztužené FRP výztuží
Vedoucí práce	Ing. František Girgle, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2020
Datum odevzdání	28. 5. 2021

V Brně dne 30. 11. 2020

prof. RNDr. Ing. Petr Štěpánek, CSc.
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

Teoretické a konstrukční podklady v nutném rozsahu v návaznosti na zadání.

Platné předpisy a normy (včetně změn a oprav), např.:

ČSN EN 1990: Zásady navrhování konstrukcí;

ČSN EN 1991-1 až 7: Zatížení stavebních konstrukcí;

ČSN EN 1992-1-1: Navrhování betonových konstrukcí. Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby;

ČSN EN 206 Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda;

fib Bulletin no. 40: FRP reinforcement in RC structures;

ACI 440.1R-15: Guide for the design and construction of concrete reinforced with FRP bars;

CSA S806-12: Design and Construction of Building Structures with Fibre-reinforced Polymers.

Další literatura dle doporučení vedoucího bakalářské práce.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Textová část bude obsahovat pojednání týkající se využití kompozitních materiálů při návrhu betonových konstrukcí a to v rozsahu dle zadání vedoucího práce. Dále, pro zadanou konstrukci (resp. její dílčí část), bude proveden statický výpočet a návrh vyztužení s využitím kompozitní výztuže.

Ostatní činnosti a případná zjednodušení zadání provádějte v souladu s pokyny vedoucího bakalářské práce. Práce bude zpracována v rozsahu vědomostí, které odpovídají znalostem posluchače bakalářského studijního programu.

Požadované výstupy:

Textová část (obsahuje průvodní zprávu a ostatní náležitosti podle níže uvedených směrnic)

Přílohy textové části:

P1. Použité podklady, studie

P2. Statický výpočet

P3. Výkresová dokumentace

Bakalářská práce bude odevzdána v listinné a elektronické formě a pro ÚBZK 1x na CD.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část závěrečné práce zpracovaná podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (povinná součást závěrečné práce).

2. Přílohy textové části závěrečné práce zpracované podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání, a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (nepovinná součást závěrečné práce v případě, že přílohy nejsou součástí textové části závěrečné práce, ale textovou část doplňují).

Ing. František Girgle, Ph.D.
Vedoucí bakalářské práce

ABSTRAKT

Bakalárska práca sa zaoberá využitím FRP výstuže pri návrhu betónových konštrukcií. Navrhnutou konštrukciou je sedimentačná nádrž, ktorá sa skladá z dvoch prefabrikovaných segmentov. Celá konštrukcia sa nachádza v triede prostredia XC4.

V teoretickej časti je popísané zloženie jednotlivých typov FRP výstuží, ich vlastnosti a trvanlivosť. Pre GFRP výstuž je popísaný jej návrh na ohyb a šmyk, zároveň sú uvedené aj rozdielne prístupy pri návrhu na krátkodobú či dlhodobú únosnosť výstuže.

Praktická časť sa skladá z dvoch variantov. V prvom variante je do oboch prefabrikovaných segmentov navrhnutá betonárska výstuž B500B, v druhom variante je použitá kompozitná výstuž Schöck ComBAR®. Oba varianty sú navrhované na medzný stav únosnosti a následne sú vzájomne porovnávané. K praktickej časti práce je vyhotovený statický výpočet a výkresová dokumentácia.

KLÍČOVÁ SLOVA

sedimentačná nádrž, FRP (Fiber Reinforced Polymer), prefabrikovaný segment, kompozitná výstuž, železobetón, zaťaženie dopravou, zaťaženie teplotou, zemné tlaky, medzný stav únosnosti, návrh a posúdenie

ABSTRACT

The bachelor thesis deals with the usage of FRP reinforcement in concrete structure designs. The designed structure is a sedimentation reservoir that consists of two prefabricated segments. The construction is classified into the XC4 exposure category.

The theoretical part of the thesis provides an overview and explains particular types of FRP reinforcement, their properties, and mechanical durability. We describe GFRP reinforcement and its design for bending and shear, consecutively providing different approaches in a plan for a short-term or long-term carrying capacity.

The experimental part of the thesis contains two alternatives. The first application involves B500B reinforcement in both prefabricated segments, while the second part, it is using Schöck ComBAR® reinforcement instead. Moreover, both possibilities and their design take into consideration the ultimate limit state. Subsequently, the obtained results are compared. The experimental part of the thesis includes calculations as well as drawings documentation.

KEYWORDS

sedimentation reservoir, FRP (Fiber Reinforced Polymer), prefabricated segment, composite reinforcement, reinforced concrete, traffic load, thermal action, earth pressures, ultimate limit state, design and assessment

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Matej Valent *Betonové konstrukce vyztužené FRP výztuží*. Brno, 2021. 36 s., 146 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav betonových a zděných konstrukcí. Vedoucí práce Ing. František Girgler, Ph.D.

PREHLÁSENIE O ZHODE LISTINNEJ A ELEKTRONICKEJ FORMY ZÁVEREČNEJ PRÁCE

Prehlasujem, že elektronická forma odovzdanej bakalárskej práce s názvom *Betonové konstrukce vyztužené FRP výztuží* je zhodná s odovzdanou listinnou formou.

V Brně dne 25. 5. 2021

Matej Valent
autor práce

PREHLÁSENIE O PÔVODNOSTI ZÁVEREČNEJ PRÁCE

Prehlasujem, že som bakalársku prácu s názvom *Betonové konstrukce vyztužené FRP výztuží* spracoval samostatne a že som uviedol všetky použité informačné zdroje.

V Brně dne 25. 5. 2021

Matej Valent
autor práce

POĎAKOVANIE

V prvom rade by som rád poďakoval vedúcemu mojej bakalárskej práce Ing. Františkovi Girglemu, Ph.D. za jeho ochotu, včasné a rozsiahle odpovede na moje otázky a precíznosť pri kontrole mojej práce.

Moje veľké ďakujem patrí aj mojim spolužiakom, s ktorými sme počas celého štúdia a aj v období pandémie tvorili skvelý tím, ktorý si pomáhal a robil naše študentské dni ľahšími.

Nakoniec a zároveň moje najväčšie ďakujem patrí mojej manželke a dcére, ktoré mi vytvárali perfektné podmienky na učenie, celé štúdium ma podporovali a dokázali mi vyčariť úsmev na tvári každý jeden deň. Samozrejme ďakujem aj mojím rodičom, súrodencom, svokrovcom, priateľom a celej rodine, za obrovskú podporu a dôveru počas celého štúdia.

OBSAH

1. ÚVOD	10
2. ZLOŽENIE FRP VÝSTUŽE	10
2.1. Typy vlákien	11
2.1.1. Sklenené vlákna (GFRP)	12
2.1.2. Uhlíkové vlákna (CFRP)	12
2.1.3. Čadičové vlákna (BFRP)	12
2.1.4. Aramidové vlákna (AFRP)	13
2.2. Matrica	13
3. VLASTNOSTI MATERIÁLU	14
3.1. Fyzikálne vlastnosti	14
3.1.1. Koeficient tepelnej rozťažnosti	14
3.1.2. Hustota	14
3.2. Krátkodobé mechanické vlastnosti	15
3.2.1. Chovanie FRP výstuže v ťahu	15
3.2.2. Chovanie FRP výstuže v šmyku	17
3.3. Dlhodobé mechanické vlastnosti	17
3.3.1. Dotvarovanie	18
4. TRVANLIVOSŤ FRP VÝSTUŽE	18
4.1. Efekt alkalického prostredia a vlhkosti v betóne	18
4.2. Vplyv zvýšenej teploty na vlastnosti výstuže	19
4.3. Korózia matrice	19
5. NÁVRH KONŠTRUKCIE VYSTUŽENEJ POMOCOU FRP – MSÚ	20
5.1. Návrh minimálnej krycej vrstvy	20
5.2. Minimálna a maximálna plocha výstuže	20
5.3. Návrh prvkov namáhaných na ohyb	21
5.3.1. Porušenie tlakom	22
5.3.2. Porušenie ťahom	22
5.3.3. Určenie krátkodobej návrhovej únosnosti	23
5.3.3.1. Prístup podľa normy CSA S806-12	23
5.3.3.2. Prístup podľa smernice ACI 440.1R-15	23
5.3.3.3. Prístup podľa technickej správy <i>fib</i> Bulletin no.40	24
5.3.4. Určenie dlhodobej návrhovej únosnosti	24
5.3.4.1. Prístup podľa normy CSA S806-12	24
5.3.4.2. Prístup podľa smernice ACI 440.1R-15	24
5.3.4.3. Prístup podľa technickej správy <i>fib</i> Bulletin no.40	25
5.4. Návrh prvkov na šmyk	26
5.4.1. Posúdenie prvkov bez šmykovej výstuže	27
5.4.2. Posúdenie prvkov so šmykovou výstužou	27

6. POPIS PRAKTICKEJ ČASTI	28
6.1. Konštrukcia.....	28
6.2. Materiálové charakteristiky	28
6.3. Zaťaženie.....	29
6.3.1. Prefabrikát A	29
6.3.1.1. Stále zaťaženie	29
6.3.1.2. Premenné zaťaženie	29
6.3.2. Prefabrikát B	29
6.3.2.1. Stále zaťaženie	29
6.3.2.2. Premenné zaťaženie	29
6.4. Kombinácie.....	29
6.5. Dimenzovanie výstuže	30
6.5.1. Prefabrikát A	30
6.5.1.1. Štvorcová skruž.....	30
6.5.1.2. Zákrytová doska.....	30
6.5.2. Prefabrikát B	31
6.5.2.1. Steny nádrže	31
6.5.2.2. Spodná doska nádrže.....	31
6.5.2.3. Výstupok na prefabrikáte B	32
7. ZÁVER.....	33
8. ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV	34
9. ZOZNAM PRÍLOH	36

1. ÚVOD

V dnešnej dobe sa začínajú čoraz viac využívať nové alternatívne materiály na vyztuženie betónu. Dokonalou náhradou oceli v agresívnom prostredí je kompozitná výstuž, ktorá na rozdiel od oceli nepodlieha korózii. Najvhodnejšie využitie tohto materiálu je v konštrukciách, ktoré majú vysoké nároky na trvanlivosť, kde je nutná odolnosť voči chemickým vplyvom a kde nie je možné použiť betonársku výstuž, napr. z dôvodu elektromagnetickej indukcie.

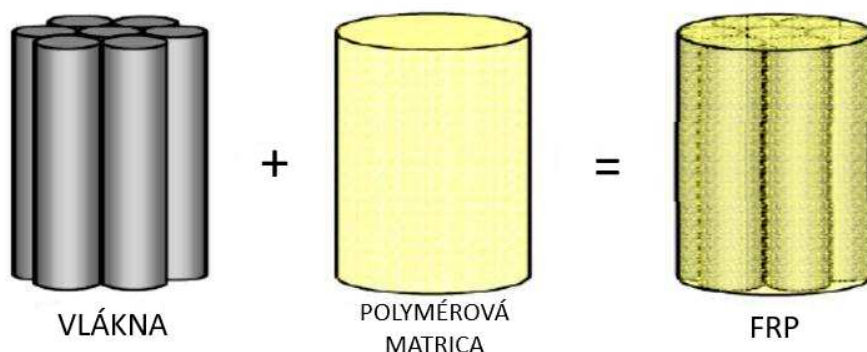
Kompozitná výstuž môže byť použitá pri zosilňovaní starších konštrukcií, alebo aj pri výstavbe nejakých nových. [1,3]

V tejto bakalárskej práci sa budeme zaoberať najmä využitím FRP (*fiber reinforced polymer*) výstuže, ktorú použijeme pri vyztužení sedimentačnej nádrže. Popis praktickej časti tejto práce je zhrnutý v kapitole č.6.

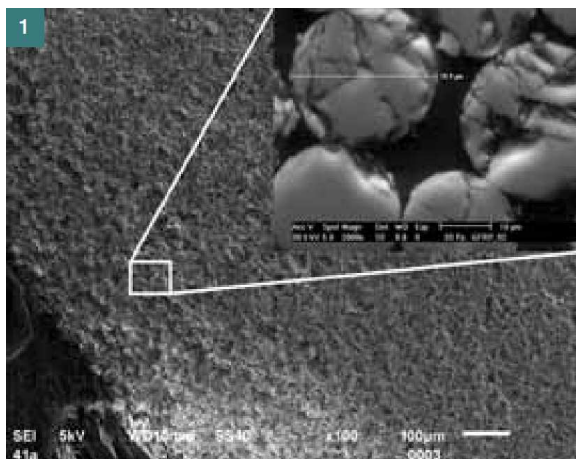
Cieľom bakalárskej práce je poukázať na rozdielny prístup pri navrhovaní kompozitnej výstuže oproti klasickej betonárskej výstuži, popísať hlavné výhody využitia kompozitnej výstuže v betóne, priblížiť čitateľom jej základné charakteristiky a jej dôležitosť v modernom stavebnom priemysle.

2. ZLOŽENIE FRP VÝSTUŽE

Kompozitná FRP výstuž sa skladá z vlákien a polymérovej matrice, ktorá chráni jednotlivé vlákna, zaisťuje ich vzájomné spolupôsobenie a drží pokope tvar celého kompozitu. Po tomto spojení vznikne trvanlivý materiál s vysokou pevnosťou v ťahu a nízkou objemovou hmotnosťou.



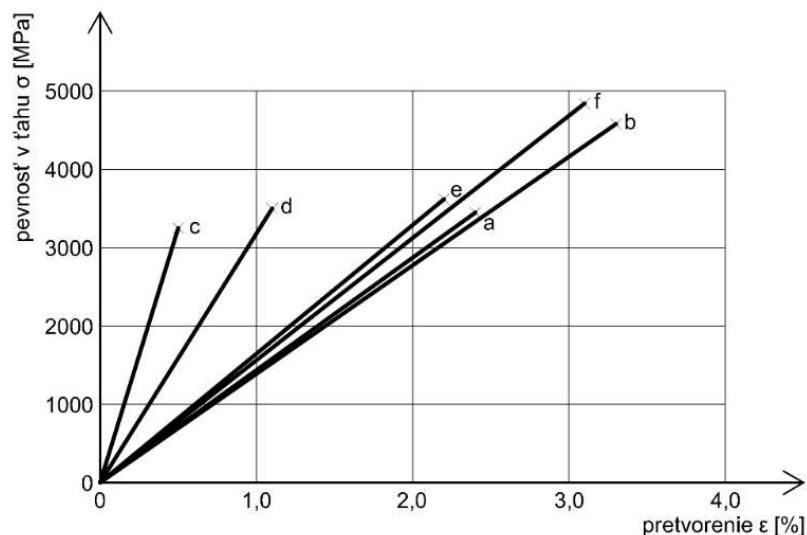
Obrázok 2.1: Zloženie FRP výstuže (prevzaté z [4])



Obrázok 2.2: Snímky rezu FRP výstuže z elektrónového mikroskopu, 100x zväčšený (prevzaté z [8])

2.1. Typy vláken

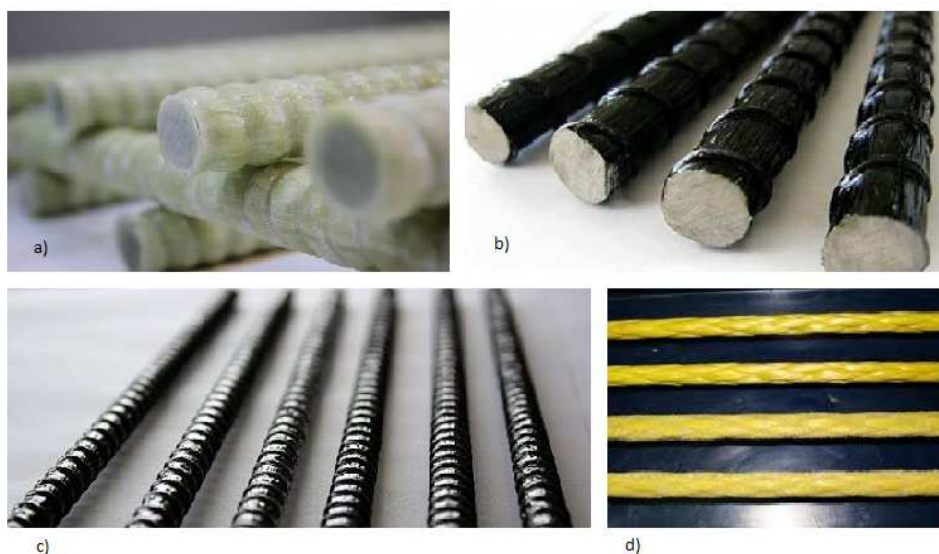
Vlákná sú hlavným nosným prvkom FRP výstuže. Nosné vlákna výstuže sú pomerne elastické, ale pri dosiahnutí pevnosti v ťahu je krehký a lámavý. Pracovný diagram výstuže má lineárny priebeh, až do porušenia. [1] Existuje veľa typov vláken, ktoré sú využívané pri výrobe FRP výstuže. Pri bežne dostupných výrobcach majú dominantné zastúpenie sklenené vlákna (*glass fiber reinforced polymer - GFRP*) a uhlíkové vlákna (*carbon fiber reinforced polymer - CFRP*). V praxi sa však môžeme stretnúť aj s inými typmi nosných vláken v FRP výstuži (napr. čadičové, aramidové, atď.).



Obrázok 2.3: Závislosť pevnosti v ťahu a pretvorenia rôznych typov vláken využívaných v FRP výstuži : a) sklenené vlákna typu E; b) sklenené vlákna typu S; c) uhlíkové vlákna typu HM; d) uhlíkové vlákna typu HS; e) aramidové vlákna (Kevlar 49); f) čadičové vlákna (údaje čerpané z [2])

Tabuľka 2.1: Typické vlastnosti vláken využívaných v FRP výstužiach (prevzaté z [2])

Typ vláken	Hustota	Pevnosť v ťahu	Modul pružnosti	Poissonovo číslo
	[kg/m ³]	[MPa]	[GPa]	[-]
GFRP (E)	2500	3450	72,4	0,22
GFRP (S)	2500	4580	85,5	0,22
GFRP (AR)	2270	1800-3500	70-76	-
CFRP (HM)	1950	2500-4000	350-650	0,20
CFRP (HS)	1750	3500	240	0,20
AFRP (Kevlar 49)	1440	3620	124	0,35
BFRP	2800	4840	89	-



Obrázok 2.4: Polymérové tyče vyzužené rozličnými vláknami: a) GFRP; b) CFRP; c) BFRP; d) AFRP (prevzaté zo [4; 5; 6; 7])

2.1.1. Sklenené vlákna (GFRP)

Sklenené vlákna označované ako GFRP sú najpoužívanejšie vlákna na výrobu kompozitov. Hlavnou zložkou na výrobu vlákien je zlúčenina oxidu kremičitého (SiO_2) [1]. Vo svete sú dostupné rôzne typy týchto vlákien, ktoré majú osobitné chemické vlastnosti.

Medzi najbežnejšie používané sklenené vlákna v stavebnom priemysle patria vlákna typu E, S, A a AR. Vlákna typu E sú najviac používané a z finančného hľadiska najprívetivejšie, pričom vlákna typu S majú vyššiu pevnosť v ťahu ako typ E (viz. Obrázok 2.3).

Nevýhodou týchto typov vlákien je, že sú náchylné na dotvarovanie a následné pretrhnutie vlákien vplyvom stáleho vysokého zaťaženia. K ich porušeniu môže dôjsť aj vplyvom alkalického prostredia - vlákna typu AR sú odolnejšie v tomto prostredí (viac o porušení v alkalickom prostredí je uvedené v kapitole 4.1). [2]

2.1.2. Uhlíkové vlákna (CFRP)

Základným prvkom CFRP výstuží sú dlhé uhlíkové vlákna. Väčšina uhlíkových vlákien sa dnes vyrába tepelným rozkladom polyakrylonitrilu (PAN).

Delia sa na štandardné (SM), vysokopevnostné (HS), s vysokým modulom pružnosti (HM) a ultravysokomodulárne (UHM) uhlíkové vlákna.

Majú vynikajúce mechanické vlastnosti, sú odolné aj pri dlhodobom zaťažení a pri vysokých teplotách. Ich najväčšou nevýhodou je vysoká cena (približne 10x drahšie ako sklenené vlákna typu E). [1; 2]

2.1.3. Čadičové vlákna (BFRP)

Čadičové vlákna majú lepšie fyzikálno-mechanické vlastnosti ako sklenené vlákna a zároveň sú oveľa lacnejšie, ako uhlíkové vlákna. Získavame ich tavením rozdrvených sopečných usadenín.

Hlavné výhody čadičových vlákien je požiarna odolnosť, dobrá akustické vlastnosti a sú odolné voči chemicky aktívnym látkam. [2]

2.1.4. Aramidové vlákna (AFRP)

Najlepší pomer medzi hmotnosťou a pevnosťou v ťahu, a zároveň najnižšiu objemovú hmotnosť zo všetkých typov vlákien majú práve aramidové vlákna [3].

Najpoužívanejšie aramidové vlákna sú tzv. "kevlarové" od firmy DuPont. Existuje niekoľko typov kevlarových vlákien, napr. Kevlar 29 (vysoká tolerancia pre nárazy a poškodenie), Kevlar 49 alebo Kevlar 149 (má najväčší Youngov modul pružnosti v ťahu). [2]

Kevlarové vlákna sú odolné proti únave materiálu a znesú aj pomerne vysoké teploty. Nevýhodou je, že dokážu absorbovať vodu a pri vysokej vlhkosti majú tendenciu vnútorne praskať, čím môže dôjsť k mikrotrhlinám. [2]

2.2. Matrica

Matrica slúži na prenos ťahových napätí z betónu do vlákien, na scelenie kompozitu do konečnej podoby a obvykle predstavuje 30-60% FRP výstuže. Ochraňuje vlákna pred fyzickým porušením a vonkajšími vplyvmi. Matrice sú oveľa poddajnejšie než nosné vlákna, preto je ich pevnosť v ťahu oproti vláknám rádovo menšia.

Pre FRP výstuž sa využívajú termosetické matrice, ktoré sú napr. z polyesterovej, epoxidovej alebo vinylesterovej živice. Nepriaznivými vlastnosťami matric sú náchylnosť na UV žiarenie a pri vyšších teplotách dochádza k negatívnym zmenám mechanických vlastností. [1]

Tabuľka 2.2: Fyzikálne vlastnosti termosetických matric (prevzaté z [1])

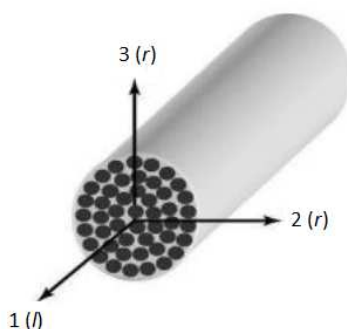
Vlastnosť	Typ matrice		
	Polyesterová	Epoxidová	Vinylesterová
Objemová hmotnosť [kg/m ³]	1200 - 1400	1200 - 1400	1150 - 1350
Pevnosť v ťahu [MPa]	34,5 - 104	55 - 130	73 - 81
Modul pružnosti [GPa]	2,1 - 3,45	2,75 - 4,10	3,00 - 3,50
Poissonovo číslo	0,35 - 0,39	0,38 - 0,40	0,36 - 0,39
Koeficient tepelnej rozťažnosti [10 ⁻⁶ /K]	55 - 100	45 - 65	50 - 75

3. VLASTNOSTI MATERIÁLU

Vlastností FRP výstuže ovplyvňuje postup výroby a tzv. zmesový pomer, ktorý popisuje jednotlivé časti kompozitu (nosné vlákna, typ matrice). Tieto vlastnosti môžu byť od každého výrobcu mierne odlišné, preto sa pri návrhu treba riadiť aktuálnymi údajmi z technického listu daného výrobcu. [9]

3.1. Fyzikálne vlastnosti

FRP výstuž má ortotropné chovanie, z čoho vyplýva, že v smere orientácie vlákien má odlišné hodnoty ako v smere kolmom na vlákna. V pozdĺžnom smere sú fyzikálne vlastnosti najviac ovplyvňované nosnými vláknami, pričom v priečnom smere kompozit najviac ovplyvňujú vlastnosti matrice. [9]



Obrázok 3.1: Priečny rez FRP výstuže so zobrazením hlavných osí (prevzaté z [1])

3.1.1. Koeficient tepelnej rozťažnosti

Koeficient tepelnej rozťažnosti má rozličnú hodnotu v pozdĺžnom a priečnom smere. Jeho hodnota závisí na objemovom podiele vlákien a druhu použitej matrice. FRP výstuž a betón majú rozdielny koeficient tepelnej rozťažnosti a vďaka tomuto faktoru vznikajú v konštrukcii prídavné sily, ktoré by sa mali vo výpočte zohľadniť. [1]

Tabuľka 3.1: Koeficient tepelnej rozťažnosti α pri objemovom množstve vlákien 50 až 70% (prevzaté z [1;10])

Koeficient tepelnej rozťažnosti α ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)				
Orientácia	GFRP	CFRP	AFRP	Oceľ
Pozdĺžny smer α_{fl}	6 až 10	-1 až 0	-6 až -2	12
Priečny smer α_{fr}	19 až 23	22 až 50	60 až 80	12

3.1.2. Hustota

Hustota FRP výstuže je daná percentuálnym podielom vlákien a typom použitej matrice. Je zhruba päťkrát menšia ako hustota oceli, preto sa s ňou na stavbe manipuluje oveľa lepšie ako s bežnou betonárskou výstužou. Na druhej strane netreba zabudnúť na fakt, že ju treba pri betonáži zaistiť v debnení proti nechcenému vyplávaniu. Priemerné hodnoty hustoty FRP výstuže sú uvedené v Tab. 3.2.

Tabuľka 3.2: Hustota ρ_f rôznych typov výstuže (prevzaté z [1])

Hustota ρ_f [kg/m^3]		
GFRP	CFRP	Oceľ
1750 - 2150	1450 - 1650	7850

3.2. Krátkodobé mechanické vlastnosti

Pri určení mechanických vlastností je nutné brať do úvahy výrobný postup a podiel použitých surovín v FRP výstuži. Kvôli tejto variabilite je nutné, aby každý výrobca výstuží sám uvádzal mechanické vlastnosti svojich produktov, ktoré získali zo skúšok materiálu. Skúšky by mali byť vyhotovené v certifikovaných skúšobniach.

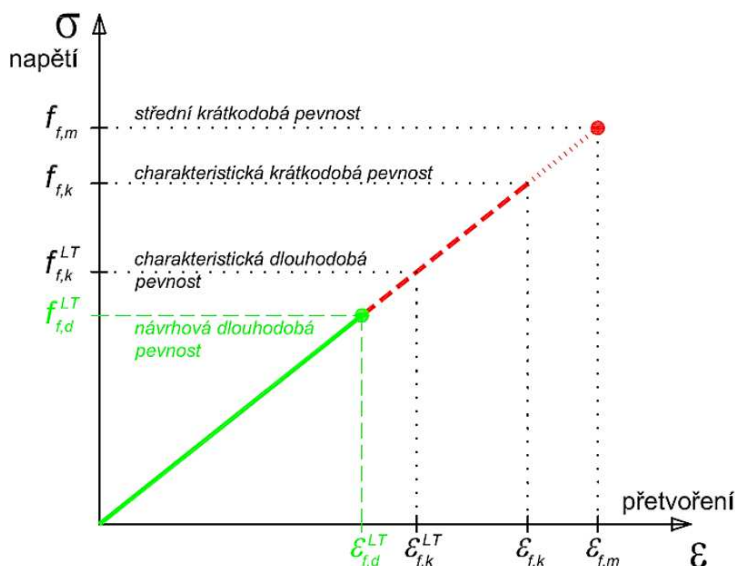
Tabuľka 3.3: Typické krátkodobé mechanické vlastnosti FRP a ich porovnanie s betonárskou výstužou (prevzaté z [1;8])

Vlastnosť	Materiál		
	Oceľ	GFRP	CFRP
Modul pružnosti (pozdĺžny smer) [GPa]	200	35-60	100-580
Modul pružnosti (pričný smer) [GPa]	200	8-9	10-12
Ťahová pevnosť v smere vlákien [MPa]	300-600	450-1600	600-3500
Tlaková pevnosť v smere vlákien [MPa]	300-600	cca 1/2 z ťahu	cca 1/2 z ťahu

3.2.1. Chovanie FRP výstuže v ťahu

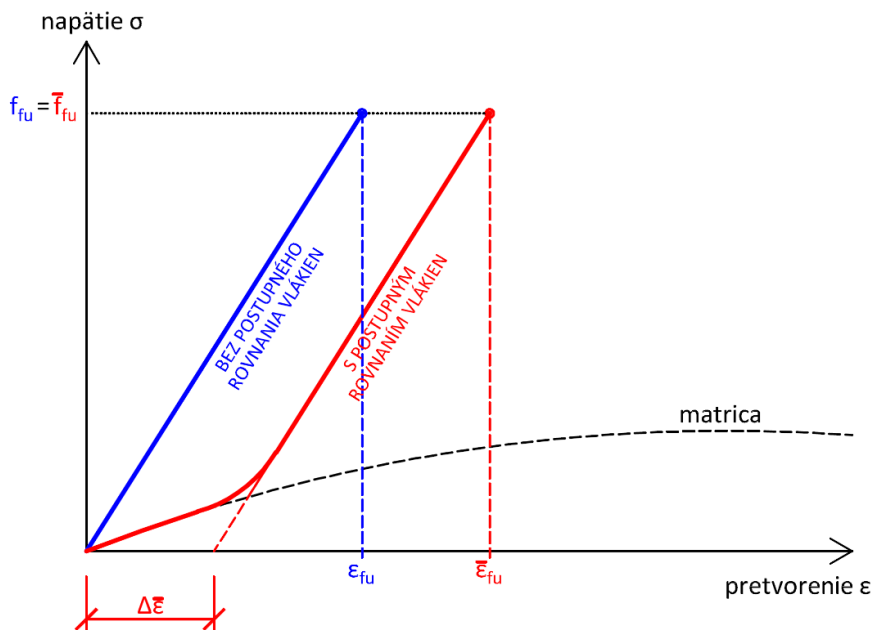
Na ťahovú únosnosť má pri FRP výstuži vplyv predovšetkým typ použitých vlákien, pomer objemu vlákien ku celkovému objemu výstuže, spôsob výroby výstuže, jej skladovanie a kontrola kvality výroby. Na rozdiel od ocele sa pevnosť v ťahu FRP výstuže mení podľa veľkosti priemeru použitej výstuže. Tieto zmeny sú väčšinou malé a sú spôsobené najmä výrobou – predovšetkým usporiadaním vlákien a vytvrdením prútu. [10]

Pokiaľ sú výstuže kvalitne spracované, tak je ich pracovný diagram lineárny (platí Hookov zákon) až do porušenia. [1]



Obrázok 3.2: Idealizovaný pracovný diagram FRP výstuže (prevzaté z [11])

Pri výrobe sa môžu vyrobiť aj nekvalitné výrobky, ktoré sa pri počiatočnom zaťažení správajú mätko a postupne sa v nich vyrovnávajú vlákna. Na začiatku vznikne väčšie pretvorenie – toto správanie je pre konštrukciu nežiadané. [1]



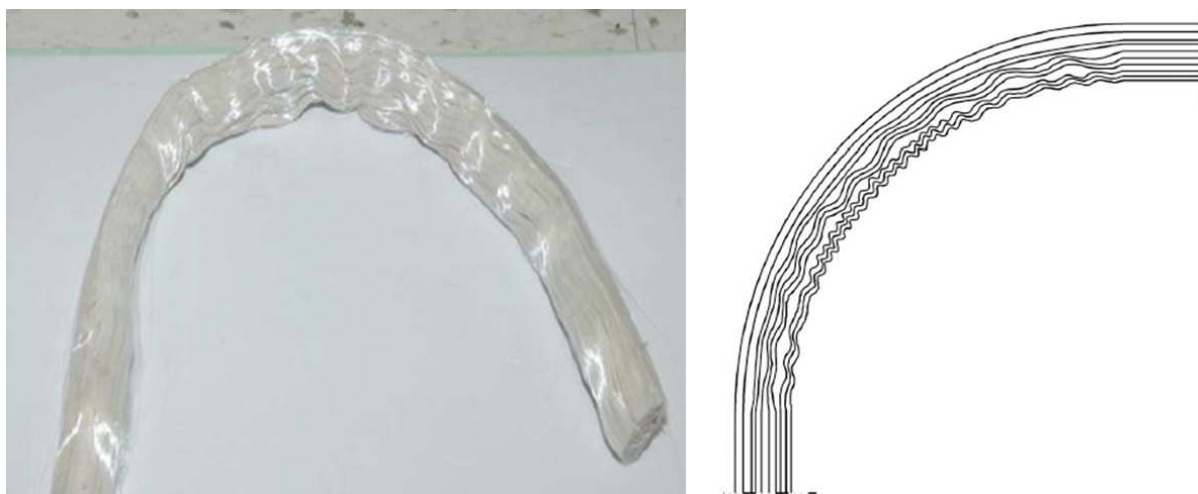
Obrázok 3.3: Idealizovaný pracovný diagram : a) kvalitná výstuž bez postupného rovnania vlákien; b) nekvalitná výstuž s postupným rovnaním vlákien (údaje čerpané z [1])

Pri výrobe ohýbaných prútov je nutné, aby boli ohýbané už vo výrobni, pretože po stuhnutí sa ich už nedá ďalej ohýbať. V ohýbaných častiach výstuže dochádza k nehomogenite (vlákna nie sú rovnako využité), a preto treba pri vnesení zaťaženia do konštrukcie uvažovať redukciu ťahovej pevnosti na 40-50%. [1]

Redukčný vzťah:

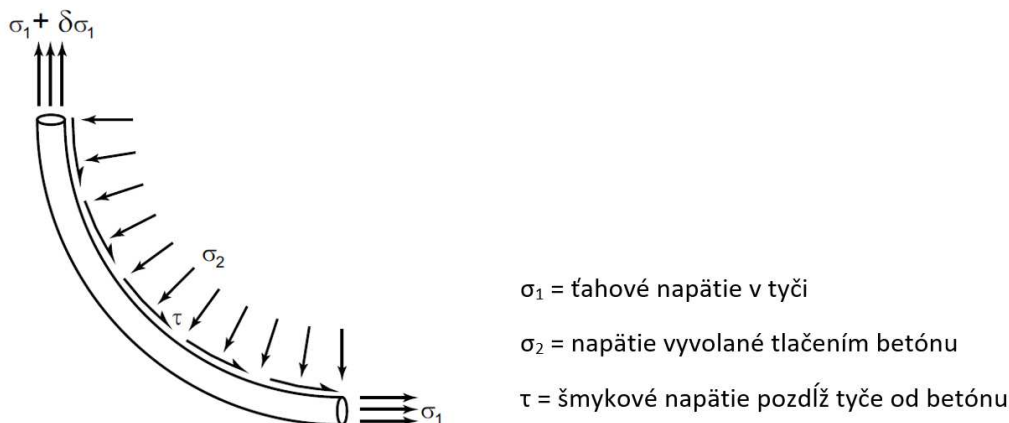
$$f_{fld}^b = \left(0,05 \cdot \frac{r_b}{\varnothing_f} + 0,3 \right) \cdot f_{fld} \leq f_{fld} \tag{3.1}$$

kde f_{fld}^b = návrhová pevnosť FRP výstuže s priemerom \varnothing_f v mieste ohybu s polomerom r_b



Obrázok 3.4: Zalomenie vnútorných vlákien v mieste ohybu FRP výstuže (čerpané zo [17])

V mieste ohybu musí FRP výstuž odolávať aj prídavným tlakovým a šmykovým napätiam od betónu – tieto napätia (viz. Obrázok 3.5) výrazne znižujú ťahovú pevnosť kompozitu.



Obrázok 3.5: Schéma pôsobiacich síl na ohýbanú časť zabetónovanej FRP výstuže (čerpané z [2])

3.2.2. Chovanie FRP výstuže v šmyku

Existujú dva spôsoby porušenia FRP výstuže šmykom - interlaminárny a priečny šmyk. Pri pôsobení šmykového namáhania sú najhlavnejšie vlastnosti použitej matrice. Lepšiu odolnosť proti šmykovému namáhaniu môžeme získať aj ovíjaním vlákien okolo vonkajšieho povrchu výstuže – vlákna pod uhlom môžu zlepšiť odolnosť v strihu.

Najdôležitejšie pri návrhu je vychádzať z hodnôt, ktoré sú garantované výrobcom navrhnutej výstuže (produkty by mali byť odskúšané certifikovanými skúšobňami). [1,2]

3.3. Dlhodobé mechanické vlastnosti

Pre návrh kompozitnej výstuže je mimoriadne dôležité zohľadniť všetky jej zmeny mechanických vlastností v čase. Okolité prostredie negatívne ovplyvňuje predovšetkým ťahovú únosnosť FRP výstuže – toto správanie výstuže zohľadňuje idealizovaný návrhový diagram (Obrázok 3.2).

Dôležité pre určenie dlhodobej únosnosti výstuže je stanoviť redukčný súčiniteľ pre krátkodobú únosnosť, aby sa obmedzila veľkosť napätia vo výstuži. Tento súčiniteľ by mal zohľadniť všetky okrajové podmienky, ktorým bude výstuž v priebehu jej životnosti vystavená. [11]

Dlhodobé vlastnosti FRP výstuže sa zisťujú pomocou skúšok odolnosti výstuže v alkalickom prostredí a testy dotvarovania výstuže, všetko v súlade s normou ISO 10406-1 z roku 2015. [11]

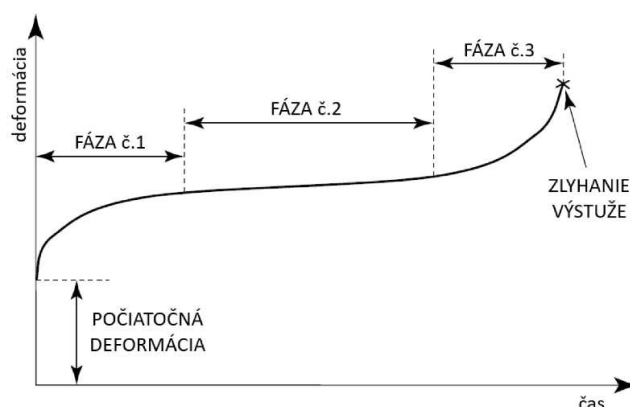
Podrobnejšie informácie o výpočte dlhodobej únosnosti a prístupoch jednotlivých smerníc a noriem k tejto problematike sa dočítame v kap. 5.3.4..

3.3.1. Dotvarovanie

Ak je kompozitná výstuž vystavená dlhodobému konštantnému napätiu, tak vo výstuži dochádza k postupnému nárastu deformácie – tomuto javu hovoríme dotvarovanie. Postupný proces dotvarovania výstuže sa dá pri FRP výstužiach rozdeliť do troch fáz.

Prvá fáza začína vnesením zaťaženia, po ktorom nastáva v krátkom časovom úseku v matici dotvarovanie a následne sa toto napätie prenesie na nosné vlákna. Pri výstužiach s väčším podielom vlákien je veľkosť deformácie od dotvarovania menšia.

Druhá fáza je tzv. stabilnou fázou, kde vďaka dominancii nosných vlákien nedochádza k významnému navýšeniu pretvorenia. Ideálny návrh konštrukcie by mal zostať po celú dobu životnosti v tejto fáze. Ak sa dotvarovanie dostane do tretej fázy, začne sa výstuž prudko deformovať a dôjde ku kolapsu výstuže. [1,2,11]



Obrázok 3.6: Typický nárast deformácie od dotvarovania FRP výstuže v závislosti na čase (čerpané z [1,2])

4. TRVANLIVOSŤ FRP VÝSTUŽE

Trvanlivosť FRP výstuže je úplne odlišná ako trvanlivosť bežnej betonárskej oceli. Kým oceľ potrebuje väčšiu kryciu vrstvu v agresívnych prostrediach kvôli korózií, tak vlákna v FRP výstuži sú chránené polymérou maticou. Matrica musí mať vysokú mechanickú pevnosť a tuhosť, nízku nasiakavosť a hlavne dostačujúcu tepelnú a chemickú odolnosť. [1]

4.1. Efekt alkalického prostredia a vlhkosti v betóne

Vplyv alkalického prostredia betónu významne ovplyvňuje životnosť najmä pri použití GFRP výstuže. Sklenené vlákna sú na toto prostredie najcitlivejšie kvôli prítomnosti oxidu kremičitého vo vláknach (matrica pomáha brániť prenikaniu alkalických iónov ku vláknam). [1]

Ak sú alkálie roztopené vo vode, tak poškadzujú spojenie matrice s vláknami a zhoršujú vlastnosti kompozitu v pozdĺžnom smere. Zvýšená teplota okolitého prostredia urýchľuje prebiehajúce chemické deje vo výstuži [11]. Publikácia [11] ukazuje ako sa pomocou zrýchlených skúšok získa dlhodobá pevnosť v ťahu, či modul pružnosti GFRP výstuže. Tieto hodnoty treba porovnať s výsledkami dlhodobých skúšok v skutočnom prostredí. [1]



Obrázok 4.1: Zrýchlená skúška FRP výstuže ponorenej do alkalických roztokov so zvýšenou teplotou (prevzaté z [11])

4.2. Vplyv zvýšenej teploty na vlastnosti výstuže

Najdôležitejšie pri teplotnom namáhaní je čas pôsobenia zvýšených teplôt na konštrukciu. Pri krátkodobom pôsobení sa vlastnosti FRP výstuže môžu vrátiť do pôvodného stavu, ale pri dlhodobom pôsobení vysokých teplôt na výstuž dôjde k nezvratnej chemickej zmene.

Je tiež potrebné rozlíšiť či sa jedná o bežný prevádzkový stav, alebo o mimoriadne požiarne zaťaženie. V prípade bežného stavu, počas ktorého sú konštrukcie dlhodobo vystavené teplotnému zaťaženiu, je doporučené využiť kompozitnú výstuž s T_g vyššou minimálne o 30 °C oproti najväčším očakávaným teplotám konštrukcie. Pri takomto zaťažení je vhodné zahrnúť do návrhu vplyv vyššej prevádzkovej teploty na životnosť.

Pri teplotnom namáhaní nás zaujímajú najmä vlastnosti matrice – vplyvom vysokej teploty sa poruší skôr, než sa porušia vlákna. Z návrhového hľadiska nás najviac zaujíma tzv. teplota skleného prechodu T_g , pri ktorej dochádza k významným zmenám fyzikálnych vlastností výstuže. Táto teplota sa líši predovšetkým použitým výrobným postupom matrice. Ak matrica stuhla pri vysokých teplotách, bude teplota T_g v intervale od 130 do 140 °C. Ak stuhla pri bežnej teplote, teplota T_g bude 50-80 °C. [1]

4.3. Korózia matrice

Odolnosť matrice proti degradácii závisí najmä na jej chemickom zložení a poriadnom stuhnutí FRP výstuže. Korózia matric sa rozdeľuje na fyzikálnu a chemickú.

Fyzikálna korózia je spôsobená spolupôsobením termosetického polyméru s okolitým prostredím. Chemická korózia nastáva vtedy, keď dôjde k rozštípeniu chemických väzieb pomocou chemickej reakcie s prostredím. [1]

5. NÁVRH KONŠTRUKCIE VYSTUŽENEJ POMOCOU FRP – MSÚ

Zásadný rozdiel medzi návrhom s klasickou betonárskou výstužou a FRP výstužou je, že kompozitná výstuž sa nedokáže chovať plasticky (viz. Obrázok 3.2). Jej krehké správanie pri ťahovom porušení poukazuje na fakt, že musíme zásadne zmeniť prístup v návrhu vystuženého prierezu týmto materiálom.

FRP výstuž má časovo závislé chovanie, preto je nutné ju posudzovať nielen na jej krátkodobú únosnosť, ale aj únosnosť dlhodobú. [1]

5.1. Návrh minimálnej krycej vrstvy

Krycia vrstva pri FRP výstuži nemusí byť až taká ako pri betonárskej oceli, pretože jej nehrozí korózia vplyvom okolitého prostredia. Avšak treba navrhnuť dostatočnú kryciu vrstvu na zaistenie súdržnosti s betónom, aby sa netvorili trhliny v konštrukcii a na ochranu výstuže proti požiariu. [14] Minimálne hrúbky krycích vrstiev podľa jednotlivých publikácií [2,10,12,15] sú uvedené v tabuľke (Tabuľka 5.1).

Tabuľka 5.1: Porovnanie hodnôt minimálnych krycích vrstiev FRP výstuže (prevzaté z [2,10,12,15])

Norma/ smernica	ACI 440.1R-15	CSA S806-12	fib Bulletin no.40	Schöck Combar®
Minimálna krycia vrstva	\varnothing_f	MAX ($2\varnothing_f$; 30 mm)	25 mm	\varnothing_f

\varnothing_f označuje priemer FRP výstuže. Publikácie [2] a [15] uvažujú ešte s pripočítaním tolerančného zväčšenia Δc_{dev} .

5.2. Minimálna a maximálna plocha výstuže

Minimálnu plochu FRP výstuže $A_{f,min}$ by sme mali navrhnuť tak, aby sme zabránili krehkému porušeniu nosnej konštrukcie. [14] Minimálnu plochu výstuže podľa [15] vypočítame zo vzorca

$$A_{f,min} = \frac{f_{ctm} \cdot W_c}{\sigma_f \cdot z} \quad (5.1)$$

kde f_{ctm} = stredná návrhová pevnosť betónu v ťahu;

W_c = prierezový modul v ohybe;

z = rameno vnútorných síl po vzniku trhliny;

σ_f = upravená ťahová pevnosť sa vypočíta zo vzťahu.

$$\sigma_f = 0,83 \cdot f_{fk}^{LT} \quad (5.2)$$

kde f_{fk}^{LT} = charakteristická dlhodobá ťahová pevnosť FRP výstuže.

Navrhnutá plocha výstuže by nemala prekročiť maximálnu plochu výstuže $A_{f,max}$, ktorú podľa [15] dostaneme zo vzťahu

$$A_{f,max} = 0,035 \cdot A_c \quad (5.3)$$

kde A_c = celková plocha prierezu.

5.3. Návrh prvků namáhaných na ohyb

Konstrukcia namáhaná na ohyb môže byť porušená dvomi spôsobmi. Ak je skutočné vyztuženie väčšie ako balančné vyztuženie, konstrukcia sa poruší rozdrvením betónu v tlačenej časti prierezu. Keď je balančné vyztuženie väčšie ako skutočné, dôjde k pretrhnutiu výstuže. Teoreticky sa môže konstrukcia porušiť aj balančne, kde by došlo k medzným pretvoreniam v oboch materiáloch súčasne (všetky tieto typy porušení sú graficky znázornené v Obrázku 5.1). [13]

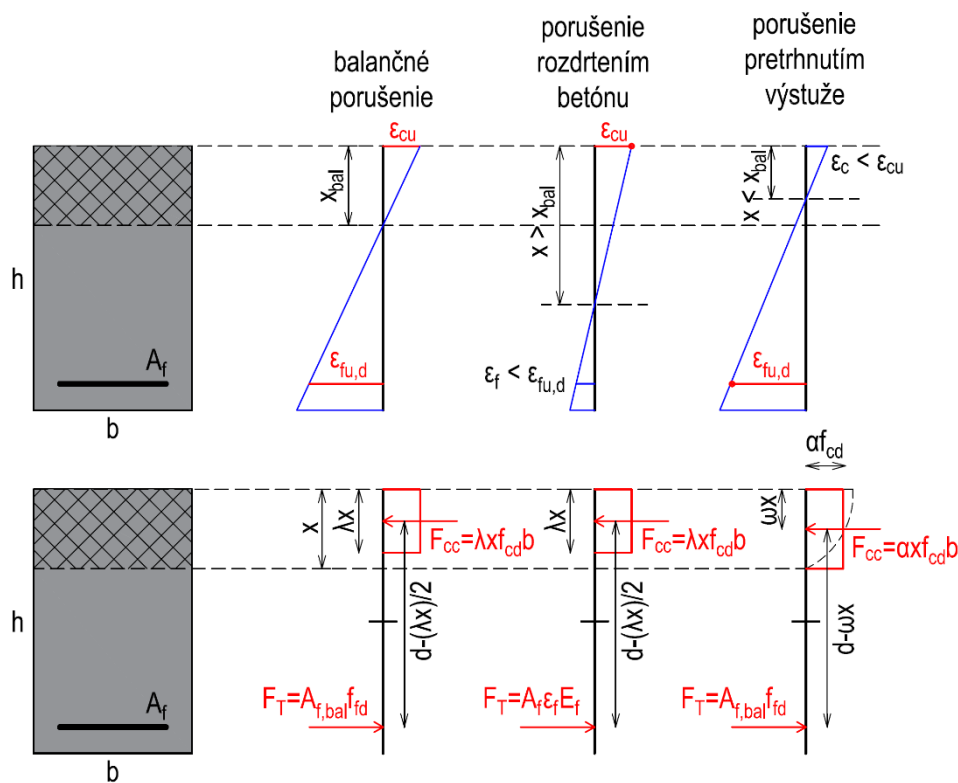
Za predpokladu, že je po deformácií prierez rovinný a po uvážení medzných pretvorení oboch materiálov, môžeme určiť balančnú polohu neutrálnej osy zo vzťahu

$$x_{bal} = \frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + \epsilon_{fu,d}} d \tag{5.4}$$

kde ϵ_{cu} = medzné pomerné pretvorenie betónu v tlaku;

$\epsilon_{fu,d}$ = návrhová hodnota medzného pomerného pretvorenia FRP výstuže v ťahu;

d = účinná výška prierezu.



Obrázok 5.1: Graficky znázornené priebehy napätia a pretvorenia po výške prierezu [13]

5.3.1. Porušení tlakom

Tlakové porušenie spôsobujúce rozdrvenie betónu vzniká, ak je plocha výstuže A_f väčšia ako balančná plocha $A_{f,bal}$. Z podmienky rovnováhy síl sa dá odvodiť vzťah pre výpočet momentu na medzi únosnosti M_{Rd} [1]:

$$M_{Rd} = \lambda x b f_{cd} \left(d - \frac{\lambda x}{2} \right) \quad (5.5)$$

kde λ = súčiniteľ pre efektívnu výšku tlačenej časti prierezu;
 x = vzdialenosť od krajných tlačných vlákien prierezu po neutrálnu os;
 b = šírka prierezu;
 f_{cd} = návrhová valcová pevnosť betónu v tlaku;
 d = účinná výška prierezu.

5.3.2. Porušení ťahom

Ak FRP výstuž dosiahne medzného návrhového pretvorenia $\epsilon_{fu,d}$, výstuž sa môže pretrhnúť a dôjde k porušeniu konštrukcie. V mieste tlačenej oblasti nebude dosiahnuté medzné pretvorenie ϵ_{cu} a preto bude priebeh napätia v tlačenej časti neznámy. V tomto prípade nevieme odhadnúť, či sa bude betón chovať plasticky, alebo lineárne. [1]

Publikácia [2] hovorí, že pri použití parabolicko-reakangulárneho diagramu betónu v tlaku môžeme moment únosnosti vypočítať podľa vzťahu

$$M_{Rd} = A_f f_{fd} \left(1 - \frac{\xi}{2} \right) \quad (5.6)$$

kde f_{fd} = návrhová krátkodobá ťahová pevnosť FRP výstuže;
 A_f = celková plocha použitej FRP výstuže v priereze;
 ξ = súčiniteľ, ktorý sa spočíta zo vzorca

$$\xi = \frac{x}{d} = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{fu} + \epsilon_c} \quad (5.7)$$



Obrázok 5.2: Fotografie zo skúšok ťahovej pevnosti porušených FRP výstuží: a)GFRP; b)CFRP [16]

5.3.3. Určenie krátkodobej návrhovej únosnosti

Každá norma alebo smernica má na základe skúšok určený svoj vlastný postup na určenie krátkodobej či dlhodobej návrhovej ťahovej únosnosti. V tejto bakalárskej práci sú navzájom porovnávané prístupy kanadskej normy CSA S806-12, americkej smernice ACI 440.1R-15 a prístup technickej správy Bulletin no.40, zhotovenou medzinárodnou organizáciou pre konštrukčný betón *fib (Fédération internationale du béton/ International Federation for Structural Concrete)*.

5.3.3.1. Prístup podľa normy CSA S806-12

V tejto norme je zavedený súčiniteľ bezpečnosti ϕ_f , ktorý zohľadňuje rozdielnosť vlastností materiálov, typ použitých vlákien a vplyv dlhodobo pôsobiaceho zaťaženia. Norma uvažuje $\phi_f = 0,75$ pre všetky typy vlákien, ale pri porušení konštrukcie pretrhnutím výstuže je nutné tento súčiniteľ znížiť. V takomto prípade sú definované súčinitele [12]:

- pre CFRP výstuž $\phi_f = 0,75$
- pre GFRP výstuž $\phi_f = 0,50$

5.3.3.2. Prístup podľa smernice ACI 440.1R-15

Americká smernica [10] uvažuje pevnosť v ťahu f_{fu}^* za počiatočnú pevnosť, ktorá nedbá na vplyv okolitého prostredia. Kvôli tomu sa táto pevnosť prenášobí redukčným súčiniteľom C_E zohľadňujúcim vplyv okolitého prostredia, ktoré môže výrazne znížiť ťahovú pevnosť FRP výstuže. Návrhová krátkodobá ťahová pevnosť FRP výstuže je určená podľa vzťahu

$$f_{fu} = C_E \cdot f_{fu}^* \tag{5.8}$$

kde f_{fu} = návrhová krátkodobá ťahová pevnosť FRP výstuže;

f_{fu}^* = zaručená ťahová pevnosť FRP výstuže;

C_E = redukčný súčiniteľ zohľadňujúci vplyv okolitého prostredia podľa typu použitých vlákien (viz. Tabuľka 5.2)

Tabuľka 5.2: Hodnoty redukčného súčiniteľa C_E [10]

Prostredie	Typ výstuže		
	GFRP	CFRP	AFRP
Suché	$C_E = 0,8$	$C_E = 1,0$	$C_E = 0,9$
Vlhké	$C_E = 0,7$	$C_E = 0,9$	$C_E = 0,8$

Výslednú návrhovú únosnosť prierezu v ohybe M_u dostaneme vynásobením momentu na medzi únosnosti M_n a redukčným súčiniteľom ϕ

$$M_u = M_n \phi \tag{5.9}$$

pričom hodnota ϕ je závislá na nasledovných typoch porušení:

- porušenie drvením betónu - $\phi = 0,65$
- porušenie pretrhnutím výstuže - $\phi = 0,55$

5.3.3.3. Prístup podľa technickej správy *fib* Bulletin no.40

Publikácia [2] uvažuje výpočet návrhovej krátkodobej ťahovej únosnosti FRP výstuže označenou f_{fd} nasledovne:

$$f_{fd} = \frac{f_{fk}}{\gamma_f} \tag{5.10}$$

kde f_{fk} = charakteristická krátkodobá ťahová pevnosť FRP výstuže;

f_{fd} = návrhová krátkodobá ťahová pevnosť FRP výstuže;

γ_f = materiálový súčiniteľ ($\gamma_f = 1,25$, pre všetky typy FRP výstuží).

5.3.4. Určenie dlhodobej návrhovej únosnosti

5.3.4.1. Prístup podľa normy CSA S806-12

Prístup normy CSA S806-12 je založený skôr na skúsenostiach s vlastnosťami FRP výstuže a úplne v ňom nezohľadňuje skutočné správanie výstuže. Majú stanovený redukčný súčiniteľ podľa typu materiálu FRP výstuže, ktorým je potrebné prenásobiť návrhovú krátkodobú únosnosť v ťahu f_{frpu} . Hodnoty maximálneho pretvorenia ťahanej GFRP výstuže pri dlhodobo konštantnom zaťažení nesmie prekročiť 0,2 %. [12]

Tabuľka 5.3: Stanovenie redukčného súčiniteľa na výpočet dlhodobej únosnosti podľa [12]

Typ výstuže	Dlhodobá únosnosť
GFRP	0,25 x f_{frpu}
CFRP	0,65 x f_{frpu}
AFRP	0,35 x f_{frpu}

5.3.4.2. Prístup podľa smernice ACI 440.1R-15

Táto smernica pristupuje k problematike dosť podobne ako [12], len má odlišné hodnoty povolenej dlhodobej únosnosti v ťahu označovanej f_{fs} . Dlhodobé redukčné súčinitele sú uvedené v tabuľke (Tabuľka 5.4). Maximálne dovolené pretvorenie ťahanej GFRP výstuže nie je v tejto smernici uvedené. [10]

Tabuľka 5.4: Stanovenie redukčného súčiniteľa na výpočet dlhodobej únosnosti podľa [10]

Typ výstuže	Dlhodobá únosnosť
GFRP	0,20 x f_{fu}
CFRP	0,55 x f_{fu}
AFRP	0,30 x f_{fu}

5.3.4.3. Prístup podľa technickej správy *fib* Bulletin no.40

V tejto publikácii je výpočet obmedzenia maximálneho dlhodobého ťahového napätia oveľa komplexnejší, ako v podkladoch [10] a [12]. Krátkodobú návrhovú pevnosť v ťahu f_{fd} musíme podeliť redukčným súčiniteľom $\eta_{env,t}$, v ktorom sú riadne zohľadnené všetky okolité podmienky. [1,2]

Výsledná dlhodobá ťahová únosnosť FRP výstuže sa určí podľa vzťahu

$$f_{fd}^{LT} = \frac{f_{fd}}{\eta_{env,t}} \quad (5.11)$$

kde f_{fd}^{LT} = dlhodobá ťahová únosnosť FRP výstuže;

f_{fko} = charakteristická krátkodobá ťahová pevnosť FRP výstuže;

f_{fd} = návrhová krátkodobá ťahová pevnosť FRP výstuže;

γ_f = materiálový súčiniteľ ($\gamma_f = 1,25$, pre všetky typy FRP výstuží);

$\eta_{env,t}$ = redukčný súčiniteľ, ktorý zohľadňuje dlhodobé účinky okolitého prostredia.

Redukčný súčiniteľ $\eta_{env,t}$ sa dá určiť dvomi spôsobmi. Pri prvom spôsobe musíme poznať experimentálne zistenú hodnotu napätia $f_{fk1000h}$. Pôsobením tohoto napätia by sa mala FRP výstuž porušiť v priebehu 1000 hodín od začiatku zaťažovania. [2]

Ak poznáme túto hodnotu, tak súčiniteľ $\eta_{env,t}$ sa určí zo vzorca

$$\eta_{env,t} = \frac{f_{fko}}{f_{fk1000h}} \cdot \frac{1}{((100-R_{10})/100)^n} \quad (5.12)$$

Ak hodnotu $f_{fk1000h}$ nepoznáme, tak postupujeme podľa vzťahu

$$\eta_{env,t} = \frac{1}{((100-R_{10})/100)^{n+2}} \quad (5.13)$$

kde f_{fko} = charakteristická krátkodobá ťahová pevnosť FRP výstuže;

$f_{fk1000h}$ = charakteristická krátkodobá ťahová pevnosť FRP výstuže v čase $t=1000$ h

R_{10} = redukčný súčiniteľ ťahovej pevnosti za desaťrocie dôsledkom životného prostredia

n = exponent sa skladá z ďalších štyroch členov, spočítame ho podľa vzťahu

$$n = n_{mo} + n_T + n_{SL} + n_d \quad (5.14)$$

kde n_{mo} = súčiniteľ vlhkosti prostredia, v ktorom bude výstuž zabudovaná (viz. Tabuľka 5.5)

n_T = súčiniteľ zohľadňujúci teplotu prostredia (viz. Tabuľka 5.6)

n_{SL} = súčiniteľ predpokladanej životnosti konštrukcie (viz. Tabuľka 5.7)

n_d = súčiniteľ rozdielu medzi reálnym a testovaným priemerom výstuže (viz. Tabuľka 5.8)

Tabuľka 5.5: Stanovenie súčiniteľa vlhkosti prostredia n_{mo} [2]

Typ prostredia		
Suché (RH cca 50%)	Mierna vlhkosť (betón nie je v stálom kontakte s vodou, RH cca 80%)	Mokrú prostredie (RH = 100%)
-1	0	1

Tabuľka 5.6: Stanovenie súčiniteľa zohľadňujúceho teplotu okolitého prostredia n_T [2]

Priemerná ročná teplota			
<5°C	5°C - 15°C	15°C - 25°C	25°C - 35°C
-0,5	0	0,5	1

Tabuľka 5.7: Stanovenie súčiniteľa podľa predpokladanej životnosti konštrukcie n_{sl} [2]

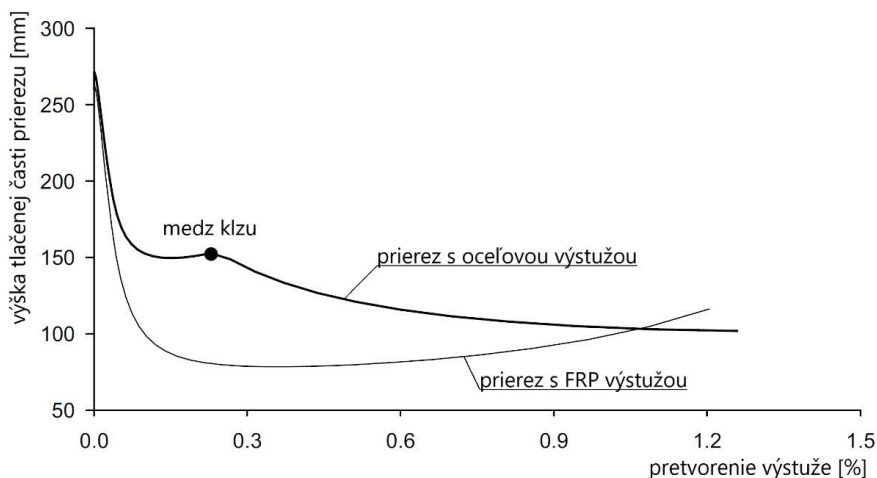
Životnosť konštrukcie			
1 rok	10 rokov	50 rokov	100 rokov
1	2	2,7	3

Tabuľka 5.8: Stanovenie súčiniteľa n_d podľa rozdielu medzi použitou a testovanou výstužou [2]

Rozdiel priemeru použitej výstuže oproti testovanému vzorku			
priemer je väčší než testovaný	priemer je rovnaký	priemer je menší, cca 75% testovaného	priemer je menší, cca 50% testovaného
0	0	0,5	1

5.4. Návrh prvkov na šmyk

Šmykovú únosnosť vyzuženého prvku podstatne ovplyvňuje výška tlačenej časti prierezu a vlastnosti použitej výstuže. Prierez vyzužený pozdĺžnou FRP výstužou má odlišnú šmykovú únosnosť ako železobetónový prierez. Z obrázku 5.3 sa dá odčítať, že šmyková únosnosť FRP výstuže je oproti železobetónu menšia okamžite po vytvorení trhlin v priereze, ale s nárastom deformácie sa zníženie únosnosti neprejaví až tak, ako v železobetóne. [1][2]



Obrázok 5.3: Správanie sa ocelevej a FRP výstuže s rovnakým priemerom výstuže a s rovnakým prierezom (čerpané z [2])

5.4.1. Posúdenie prvkov bez šmykovej výstuže

Publikácia [2] uvádza, že šmyková únosnosť konštrukcie vystuženej FRP výstužou môže byť vypočítaná rovnakým spôsobom ako pri železobetóne, avšak musíme prihliadať na nižšiu tuhosť kompozitnej výstuže na rozdiel od klasickej betonárskej výstuže.

Za predpokladu, že deformácie $\varepsilon_{fw} = \varepsilon_s$, môžeme pomocou uvedeného vzťahu vypočítať náhradnú plochu FRP výstuže:

$$A_e = A_f \frac{E_f}{E_s} \quad (5.15)$$

- kde A_e = náhradná plocha FRP výstuže;
 A_f = skutočná plocha FRP výstuže;
 E_f = modul pružnosti FRP výstuže;
 E_s = modul pružnosti betonárskej oceli.

Pri výpočte šmykovej únosnosti betónu môžeme použiť aj druhý vzťah z [2], ktorý zahrňuje rôzne normálové tuhosti pozdĺžnej výstuže [1]:

$$V_{cf} = 0,12 \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}}\right) \cdot \left(100 \cdot \frac{A_f}{b_w \cdot d} \cdot \frac{E_f}{E_s} \cdot \phi_\varepsilon \cdot f_{ck}\right)^{1/3} \cdot b_w \cdot d \quad (5.16)$$

- kde b_w = šírka prierezu;
 ϕ_ε = zohľadňuje väčšiu deformáciu v FRP výstuži, $\phi_\varepsilon = \varepsilon_{fw} / \varepsilon_y$ ($\varepsilon_{fw} = \varepsilon_{fw,lim} = 0,0045$).

5.4.2. Posúdenie prvkov so šmykovou výstužou

Únosnosť šmykovej výstuže dostaneme zo vzťahu

$$V_{Rd,f} = \frac{A_{fw} \cdot f_{fd}^b \cdot z}{s} \quad (5.17)$$

- kde A_{fw} = plocha jedného FRP strmienku;
 f_{fd}^b = redukovaná návrhová ťahová pevnosť FRP výstuže (viz. Kap.3.2.1);
 s = pozdĺžna vzdialenosť strmienkov;
 z = rameno vnútorných síl.

6. POPIS PRAKTICKEJ ČASTI

6.1. Konštrukcia

Riešenou konštrukciou bakalárskej práce je sedimentačná nádrž, ktorá sa skladá z dvoch prefabrikovaných segmentov. Oba prefabrikáty sú navrhované v dvoch variantoch – v prvom variante sú vyzužené betonárskou výstužou, v druhom variante sú vyzužené kompozitnou výstužou.

Prefabrikáty majú v sebe zabudované transportné kotvy, ktoré poslúžia na pohodlnú manipuláciu s oboma prvkami.

Statika prefabrikátov bola riešená metódou konečných prvkov vo výpočtovom programe SCIA Engineer 20.

6.2. Materiálové charakteristiky

Pre návrh oboch konštrukcií bola použitá pevnostná trieda betónu C45/55, betonárska výstuž B500B a kompozitná GFRP výstuž Schöck Combar®.

BETÓN C45/55

- charakteristická pevnosť betónu v tlaku $f_{ck} = 45 \text{ MPa}$
- súčiniteľ spoľahlivosti betónu $\gamma_c = 1,50$
- návrhová pevnosť betónu v tlaku $f_{cd} = 30 \text{ MPa}$
- pevnosť betónu v ťahu $f_{ctm} = 3,8 \text{ MPa}$
- limitné pretvorenie betónu v tlaku $\epsilon_{cu3} = 3,50 \text{ ‰}$
- modul pružnosti betónu $E_{cm} = 36 \text{ GPa}$

OCEĽ B500B

- charakteristická hodnota medze klzu betonárskej výstuže $f_{yk} = 500 \text{ MPa}$
- súčiniteľ spoľahlivosti betonárskej výstuže $\gamma_s = 1,15$
- návrhová hodnota medze klzu betonárskej výstuže $f_{yd} = 434,78 \text{ MPa}$
- pretvorenie betonárskej výstuže pri dosiahnutí medze klzu $\epsilon_{yd} = 2,174 \text{ ‰}$
- modul pružnosti betonárskej oceli $E_s = 200 \text{ GPa}$

GFRP - Schöck ComBAR®

- charakteristická krátkodobá pevnosť GFRP výstuže v ťahu $f_{fk} = 1350 \text{ MPa}$
- súčiniteľ spoľahlivosti GFRP výstuže $\gamma_f = 1,30$
- návrhová krátkodobá pevnosť GFRP výstuže v ťahu $f_{fd} = 1038,46 \text{ MPa}$
- modul pružnosti GFRP výstuže $E_f = 60 \text{ GPa}$
- redukčný súčiniteľ ťahovej pevnosti za dekádu $R_{10} = 15\%$
- charakteristická krátkodobá pevnosť GFRP výstuže v ťahu ($t=1000 \text{ h}$) $f_{fk,1000h} = 950 \text{ MPa}$
- charakteristická dlhodobá pevnosť GFRP výstuže v ťahu $f_{fk}^{LT} = 520,63 \text{ MPa}$
- návrhová dlhodobá pevnosť GFRP výstuže v ťahu $f_{fd}^{LT} = 400,53 \text{ MPa}$
- dlhodobé medzné pretvorenie GFRP výstuže $\epsilon_{fd}^{LT} = 6,676 \text{ ‰}$
- redukčný súčiniteľ zohľadňujúci dlhodobé účinky okolitého prostredia $n_{env,t} = 2,593$

6.3. Zataženie

V tejto kapitole sú uvedené použité zatažovacie stavy pôsobiace na konštrukciu. Detailnejšie informácie o zatažovacích stavoch sú popísané v statickom výpočte.

6.3.1. Prefabrikát A

6.3.1.1. Stále zataženie

ZS1 – Vlastná tiaž prefabrikátu

ZS2 – Zataženie zeminou

6.3.1.2. Premenné zataženie

ZS3 – Teplotné zataženie

ZS4a – Zataženie dopravou (koleso mimo nádrže)

ZS4b – Zataženie dopravou (koleso na nádrži)

6.3.2. Prefabrikát B

6.3.2.1. Stále zataženie

ZS1 – Vlastná tiaž prefabrikátu + vlastná tiaž prefabrikátu „A“

ZS2 – Zataženie zeminou + zataženie zeminou z prefabrikátu „A“

6.3.2.2. Premenné zataženie

ZS3 – Zataženie vodou v nádrži

ZS4 – Teplotné zataženie

ZS5a – Zataženie dopravou (koleso na okraji štvorcovej skruže – max. normálová sila v kratšej stene)

ZS5b – Zataženie dopravou (max. normálová sila v dlhšej stene)

ZS5c – Zataženie dopravou (koleso 0,5m od dlhšej steny nádrže – max. ohybový moment)

6.4. Kombinácie

Pre výpočet celkového zataženia boli použité kombinácie pre medzný stav únosnosti podľa výrazov 6.10a a 6.10b.

Výraz 6.10a :

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P + \gamma_{Q,1} \psi_{0,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

Výraz 6.10b :

$$\sum_{j \geq 1} \xi_j \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

Kombinácie boli vytvorené výpočtovým programom SCIA Engineer 20 na medzný stav únosnosti MSÚ – Sada B. Pre prefabrikát „A“ bolo vytvorených 10 kombinácií z piatich zatažovacích stavov a pre prefabrikát „B“ bolo vytvorených 13 kombinácií zo siedmich zatažovacích vzťahov.

6.5. Dimenzovanie výstuže

V tejto časti bude popísané vyztuženie častí prefabrikátov betonárskou a kompozitnou výstužou. Výstuže budú popísané len v základnom rastri pri jednotlivých povrchoch, prípadné doplnenia výstuže sú popísané v statickom výpočte.

6.5.1. Prefabrikát A

6.5.1.1. Štvorcová skruž

Betonárska výstuž B500B

Krytie výstuže = 25 mm

Vodorovná výstuž (vonkajšia aj vnútorná)

7 ks Ø12

Zvislá výstuž (vonkajšia aj vnútorná)

9 ks Ø12

Kompozitná GFRP výstuž - Schöck Combar®

Krytie výstuže = 15 mm

Vodorovná výstuž (vonkajšia aj vnútorná)

7 ks Ø12

Zvislá výstuž (vonkajšia aj vnútorná)

9 ks Ø12

6.5.1.2. Zákrytová doska

Betonárska výstuž B500B

Krytie výstuže = 25 mm

Dolná výstuž (smer Y)

Ø12/200 mm

Dolná výstuž (smer X)

Ø12/200 mm

Horná výstuž (smer Y)

Ø12/200 mm

Horná výstuž (smer X)

Ø16/200 mm

Kompozitná GFRP výstuž - Schöck Combar®

Krytie výstuže = 15 mm

Dolná výstuž (smer Y)

Ø12/200 mm

Dolná výstuž (smer X)

Ø12/200 mm

Horná výstuž (smer Y)

Ø12/200 mm

Horná výstuž (smer X)

Ø12/100 mm

6.5.2. Prefabrikát B

6.5.2.1. Steny nádrže

Betonárska výstuž B500B

Krytie výstuže = 25 mm

Vodorovná výstuž (vonkajšia)

Ø16/100 mm

Zvislá výstuž (vonkajšia)

Ø16/100 mm

Vodorovná výstuž (vnútorná)

Ø12/200 mm

Zvislá výstuž (vnútorná)

Ø12/200 mm

Kompozitná GFRP výstuž - Schöck Combar®

Krytie výstuže = 20 mm

Vodorovná výstuž (vonkajšia)

Ø16/100 mm

Zvislá výstuž (vonkajšia)

Ø16/100 mm

Vodorovná výstuž (vnútorná)

Ø12/200 mm

Zvislá výstuž (vnútorná)

Ø12/200 mm

6.5.2.2. Spodná doska nádrže

Betonárska výstuž B500B

Krytie výstuže = 25 mm

Dolná výstuž (smer Y)

Ø16/100 mm

Dolná výstuž (smer X)

Ø16/100 mm

Horná výstuž (smer Y)

Ø12/200 mm

Horná výstuž (smer X)

Ø12/200 mm

Kompozitná GFRP výstuž - Schöck Combar®

Krytie výstuže = 20 mm

Dolná výstuž (smer Y)

Ø16/100 mm

Dolná výstuž (smer X)

Ø16/100 mm

Horná výstuž (smer Y)

Ø12/200 mm

Horná výstuž (smer X)

Ø12/200 mm

6.5.2.3. Výstupok na prefabrikáte B**Betonárska výstuž B500B**

Krytie výstuže = 25 mm

Návrh výstuže : Ø10/200 mm

Kompozitná GFRP výstuž - Schöck Combar®

Krytie výstuže = 20 mm

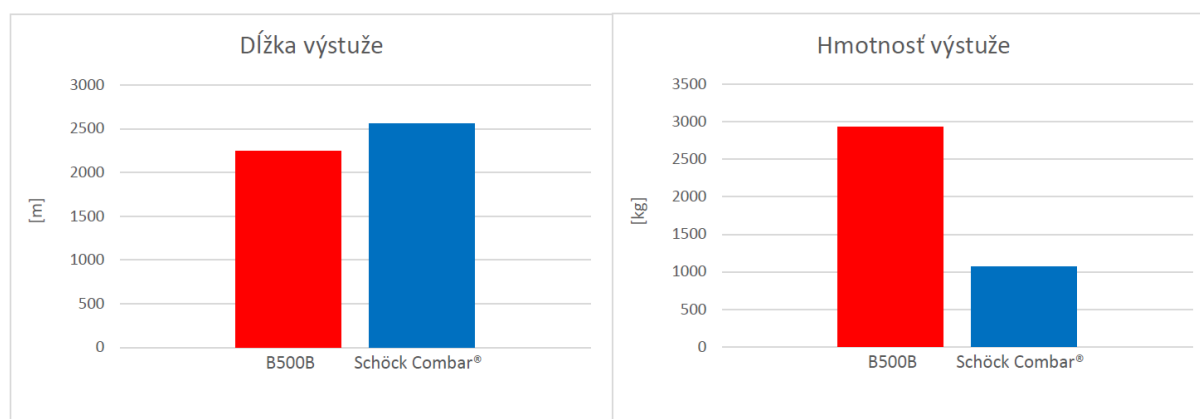
Návrh výstuže : Ø8/100 mm

7. ZÁVER

Celá konštrukcia pozostávajúca z oboch prefabrikátov je vyzužená betonárskou a kompozitnou výstužou. Obe tieto varianty majú navzájom porovnanú ich dĺžku (Graf 7.1) a hmotnosť (Graf 7.2).

Tabuľka 7.1: Dĺžka a hmotnosť výstuže v jednotlivých prefabrikátoch

Sedimentačná nádrž	Betonárska výstuž B500B		Schöck Combar®	
	dĺžka [m]	hmotnosť [kg]	dĺžka [m]	hmotnosť [kg]
Prefabrikát "A"	410,995	389,041	486,305	141,028
Prefabrikát "B"	1831,39	2537,008	2069,53	926,021
Σ	2242,385	2926,049	2555,835	1067,049



Graf 7.1: Porovnanie celkovej dĺžky výstuže

Graf 7.2: Porovnanie celkovej hmotnosti výstuže

Najväčšie ohybové momenty na konštrukcii spôsobuje teplota vody vo vnútri sedimentačnej nádrže. Na zmenšenie týchto momentov sa pripustil vznik trhlín – ohybová tuhosť betónu sa zredukovala na 75%. Tento predpoklad sme pri použití GFRP výstuže mohli ešte znížiť vzhľadom na väčšie doporučené hodnoty medzných širok trhlín oproti betonárskej výstuži, ale pre lepšie porovnanie ich dĺžok a hmotnosti sme ohybovú tuhosť nechali pri oboch materiáloch rovnakú.

Pri všetkých posúdeniach GFRP výstuže sa spočítal ohybový moment pri balančnom vyzužení. Nakoniec sme dospeli k záveru, že v celej konštrukcii budeme uvažovať porušenie pretrhnutím GFRP výstuže.

Návrh oboch variantov nám vyhovel.

8. ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

- [1]. BENKO, V., BILČÍK, J., GAŽOVIČOVÁ, N., GIRGLE, F., JANUŠ, O., HOLLÝ, I., MATUŠÍKOVÁ, A., PROKEŠ, J., ŠTĚPÁNEK, P. : "Navrhování betonových konstrukcí s FRP výztuží", srpen 2017
- [2]. Fib Bulletin No. 40: *FRP reinforcement in RC structures: technical report prepared by a working party of Task Group 9.3, FRP (Fibre Reinforced Polymer) reinforcement for concrete structures*. Lausanne: International Federation for Structural Concrete, September 2007. Bulletin Fédération internationale du béton. ISBN 978-2-88394-080-2.
- [3]. <https://stavba.tzb-info.cz/beton-malty-omitky/13577-uplatnenie-frp-vystuzi-v-betonovych-konstrukciach>
- [4]. <https://theconstructor.org/concrete/fibre-reinforced-polymer/1583/>
- [5]. Arnaud Rolland, Sylvain Chataigner, Karim Benzarti, Marc Quiertant, Pierre Argoul, et al.: *Mechanical behaviour of aramid fiber reinforced polymer (AFRP) rebar/concrete interfaces*. TRA 2014, Apr 2014, PARIS, France. 10p. fahal-01207699f
- [6]. <http://sk.antopfrp.com/fibre-polymer-rebar/glass-fibre-polymer-rebar/glass-fiber-increase-rebar.html>
- [7]. <http://ritmindustry.com/catalog/thermoplastics/basalt-fiber-reinforced-polymer-bar-2/>
- [8]. GIRGLE, F., PROKEŠ, J., JANUŠ, O., KOSTIHA, V., ŠTĚPÁNEK, P. : "Kompozitní výztuž do betonu perspektivní materiál pro odolné a trvanlivé betonové konstrukce", Beton TKS, 2017., roč.17, č.2, s.50-55,ISSN 1213-3116.
- [9]. LANÍKOVÁ, I., ed. „Seminář FRP výztuže: Brno 2014: Sborník semináře“, PROKEŠ J., GIRGLE F.: „FRP výztuže – výroba, druhy výztuží, vlastnosti“, s.9-25, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 29.4.2014. ISBN 978-80-214-4925-1.
- [10]. ACI 440.1R-15: *Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars*, American Concrete Institute, March 2015. ISBN 978-1-942727-10-1.
- [11]. GIRGLE, F., JANUŠ, O., KOSTIHA, V., BODNÁROVÁ, L., ŠTĚPÁNEK, P., ZLÁMAL, M., ČAIROVIĆ, D., MANSOUR, M. : "Dlouhodobé vlastnosti kompozitní výztuže při aplikaci v betonových konstrukcích", Beton TKS, 2019., roč.19, č.2, s.38-45, ISSN 1213-3116.
- [12]. CAN/CSA-S806-12:2012, *Design and construction of building structures with fibre-reinforced polymers*. ISBN 978-1-55491-931-4.
- [13]. GIRGLE, F., JANUŠ, O., MATUŠÍKOVÁ, A., ŠTĚPÁNEK, P. : "Navrhování betonových prvků vyztužených kompozitní výztuží – návrh na ohyb", Beton TKS, 2017., roč.17, č.3, s.54-59, ISSN 1213-3116.
- [14]. BENKO, V., BILČÍK, J., GAŽOVIČOVÁ, N., GIRGLE, F., HOLLÝ, I., ŠTĚPÁNEK, P. : "Manuál na navrhovanie GFRP výztuže do betónových konštrukcií". Bratislava: Slovenská komora stavebných inžinierov, 2015. ISBN 978-80-8076-117-2
- [15]. SCHÖCK COMBAR®: *Design guideline for ComBAR® reinforced concrete acc. to Eurocode 2*. [online] April 2016. Dostupné z: https://www.schoeck.com/view/6366/Design_Guideline_Schoeck_Combar_%5B6366%5D.pdf

- [16]. Qasim S. Khan, M. Neaz Sheikh, M. N. S. Hadi: *“Tension and compression testing of fibre reinforced polymer (FRP) bars”*, The 12th International Symposium on Fiber Reinforced Polymers for Reinforced Concrete Structures (FRPRCS-12) & The 5th Asia-Pacific Conference on Fiber Reinforced Polymers in Structures (APFIS-2015) Joint Conference, December 2015, Nanjing, China
- [17]. Ahmed, E. A., El-Sayed, A. K., El-Salakawy, E.F., Benmokrane B. (2010a). *“Bend Strength of FRP Stirrups: Comparison and Evaluation of Testing Methods.”* J. Compos. Constr., 14(1), 3-10.
- [18]. ČSN EN 1991-1-5 Zatížení konstrukcí – Část 1-5: *Obecná zatížení – Zatížení teplotou*, Praha: ČNI, 2007
- [19]. ČSN EN 1991-2 Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 2: *Zatížení mostů dopravou*, ČNI, 2005
- [20]. ČSN 73 0037. *Zemní tlak na stavební konstrukce*. Brno: Dům techniky ČSVTS, 1991
- [21]. HALFEN s.r.o. (part of Leviat): *HALFEN DEHA KKT KUGELKOPFTRANSPORTANKERSYSTEM, Produktinformation Technik*. [online] 2020. Dostupné z: https://downloads.halfen.com/catalogues/de/media/catalogues/liftingsystems/KKT_Leviat_20.pdf

9. ZOZNAM PRÍLOH

P1. Použité podklady, studie

P2. Statický výpočet

P3. Výkresová dokumentace

P3.001 Výkres tvaru prefabrikátov "A" a "B" M 1:25, 1:10

P3.002 Výkres betonárskej výstuže – prefabrikát "A" M 1:25

P3.003 Výkres betonárskej výstuže – prefabrikát "B" M 1:25

P3.004 Výkres kompozitnej výstuže – prefabrikát "A" M 1:25

P3.005 Výkres kompozitnej výstuže – prefabrikát "B" M 1:25