

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

FAKULTA STAVEBNÍ

Katedra betonových a zděných konstrukcí



Bakalářská práce

**Zesilování železobetonových konstrukcí
kompozitními materiály**

2023

Vypracovala: Lenka Malínková

Vedoucí práce: Ing. Radek Štefan, Ph.D.



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta stavební
Thákurova 7, 166 29 Praha 6



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Malínková Jméno: Lenka Osobní číslo: 494192
Zadávající katedra: Katedra betonových a zděných konstrukcí (K133)
Studijní program: (B3651) Stavební inženýrství
Stud. obor/spec.: (3608R008) Konstrukce pozemních staveb

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Zesilování železobetonových konstrukcí kompozitními materiály
Název bakalářské práce anglicky: Strengthening of reinforced concrete structures with composite materials

Pokyny pro vypracování:

- Úvod
- Přehled problematiky - rešerše (materiály, způsoby zesilování, metody návrhu)
- Aplikace na vybraných příkladech
- Shrnutí
- Závěr

Seznam doporučené literatury:

- [1] Fa Sultan 14. Design and use of externally bonded fibre reinforced polymer reinforcement (FRP EBR) for reinforced concrete structures. 2001.
- [2] ČSN EN 1992-1-1. Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby.
- [3] ACI PRC-440.2-17. Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures.
- [4] TR 55 Design guidance for strengthening concrete structures using fibre composite materials.

Jméno vedoucího bakalářské práce: Ing. Radek Štefan, Ph.D.

Datum zadání bakalářské práce: 27.02.2023 Termín odevzdání BP v IS KOS: 22.05.2023
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 nutně 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“.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)



Čestné prohlášení

„Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracovala samostatně, a že jsem uvedla veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.“

V Praze dne

.....

Malínková Lenka



Poděkování

Chtěla bych poděkovat vedoucímu bakalářské práce Ing. Radkovi Štefanovi, Ph.D. za odborné vedení, věnovaný čas a cenné rady při vypracování této práce.



ABSTRAKT

Předmětem bakalářské práce je seznámit čtenáře s kompozitními materiály a s možností dodatečně zesilovat železobetonové konstrukce pomocí vláknových kompozitních materiálů (FRP materiálů).

Teoretická část v první kapitole představí druhy matic a výztuží pro kompozitní materiály, a následně popíše různé technologie výroby kompozitních materiálů. Druhá kapitola se zabývá dodatečným zesilováním železobetonových konstrukcí FRP materiály. Jsou zde popsány typy FRP materiálů pro zesilování a možné vady či poruchy železobetonových konstrukcí. Nachází se zde i postup výpočtu při návrhu zesílení železobetonové konstrukce pomocí externě lepených FRP lamel. V závěru teoretické části je popsán podrobný postup technologie zesilování stávajících konstrukcí.

V praktické části jsou uvedeny dva příklady pro návrh zesílení železobetonového obdélníkového nosníku. Příklady mají totožná zadání s rozdílem, že u prvního příkladu je navrženo zesílení pouze jednou lamelou a v druhém příkladu je navrženo zesílení dvěma lamelami.

KLÍČOVÁ SLOVA

FRP, kompozit, matrice, výztuž, vláknové kompozitní materiály, zesilování konstrukcí, ohyb, mezní stav únosnosti, mezní stav použitelnosti



ABSTRACT

The aim of the bachelor thesis is to familiarize the reader with composite materials and with the possibility of additional reinforcement of reinforced concrete structures using fibre composite materials (FRP materials).

The first chapter of the theoretical part presents the types of matrices and reinforcements for composite materials and then describes various technologies used for the production of composite materials. The second chapter deals with additional reinforcement of reinforced concrete structures with FRP materials. It describes the types of FRP materials used for reinforcement and possible defects or malfunctions of reinforced concrete structures. The calculation procedure for the design of reinforcement of reinforced concrete structures using externally bonded FRP lamellas is also included. At the end of the theoretical part, a detailed procedure of the technology of reinforcing the existing structures is described.

In the practical part, two examples are given for the design of reinforcement of a reinforced concrete rectangular beam. The examples have identical specifications, except that in the first example only one lamella is designed, while in the second example two lamella reinforcement is designed.

KEY WORDS

FRP, composite, matrix, reinforcement, fiber composite materials, strengthening of structures, bend, ultimate limit state, serviceability limit state



OBSAH

ÚVOD	9
TEORETICKÁ ČÁST	
1. FRP KOMPOZITY	11
1.1 Druhy matrice pro kompozity	13
1.1.1 Typy reaktivních pryskyřic	14
1.1.1.1 Nenasycené polyesterové pryskyřice (UP-R).....	14
1.1.1.2 Vinylesterové pryskyřice (VE-R)	14
1.1.1.3 Epoxidové pryskyřice (EP-R).....	15
1.1.1.4 Fenolické pryskyřice (PF-R).....	15
1.2 Druhy výztuží pro kompozity	16
1.2.1 Typy vláken.....	16
1.2.1.1 Skleněná vlákna (GF)	16
1.2.1.2 Uhlíková vlákna (CF).....	17
1.2.1.3 Aramidová vlákna (AF)	17
1.2.1.4 Přírodní vlákna	18
1.2.2 Vlastnosti vláken	18
1.2.3 Forma vláknových výztuží	19
1.3 Technologie výroby kompozitů	20
1.3.1 Ruční kladení.....	20
1.3.2 Pultruze (tažení)	21
1.3.3 Lisování se vstřikem matrice	21
1.3.4 Lisování za studena.....	22
1.3.5 Lisování za tepla	23
1.3.6 Lisování pomocí vakua.....	23
1.3.7 Lisování v autoklávu.....	24
1.3.8 Navíjení.....	25
1.3.9 Kontinuální laminování	26
1.3.10 Odstředivé lití	27



2. ZESILOVÁNÍ ŽB KONSTRUKCÍ FRP MATERIÁLY	28
2.1 Typy FRP materiálů pro zesilování.....	30
2.1.1 Tkaniny	30
2.1.2 Lamely.....	30
2.1.3 Tyče (výztuž)	31
2.2 Vady a poruchy ŽB konstrukcí.....	31
2.2.1 Pojmy	31
2.2.2 Analýza vad a poruch	32
2.3 Zjištění stavu konstrukce	33
2.4 Technologie zesilování	35
2.4.1 Příprava podkladu	35
2.4.2 Úprava povrchu zkorodované výztuže	37
2.4.3 Reprofilace betonového povrchu	38
2.4.4 Zesilování FRP materiály.....	39
2.5 Návrh zesílení	43
2.5.1 Návrh zesílení ŽB nosníku externě lepenými FRP lamelami.....	43
PRAKTICKÁ ČÁST	
3. NÁVRH A POSOUZENÍ ZESÍLENÍ ŽB PRVKU POMOCÍ CFRP LAMEL.....	58
3.1 Vzorový příklad – 1x CFRP lamela	58
3.2 Vzorový příklad – 2x CFRP lamela	66
3.3 Porovnání příkladů	74
ZÁVĚR.....	77

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ (pro výpočet)

SEZNAM OBRÁZKŮ

SEZNAM TABULEK



ÚVOD

Bakalářská práce se zabývá kompozitními materiály a zesilováním železobetonových konstrukcí pomocí vláknových kompozitních materiálů (FRP materiálů). Na začátek jsou v první kapitole představeny jednotlivé složky kompozitů, jako jsou typy vláken a matric. Poté jsou popsány různé technologie výroby kompozitů jako celku. Následující druhá kapitola se zabývá dodatečným zesilováním železobetonových konstrukcí FRP materiály. Nejprve jsou popsány typy výztuží pro zesilování, následně je popsán postup zjištění stavu konstrukce a popis návrhu zesílení FRP materiály. Kapitola je zakončena technologickým popisem postupu realizace zesilování stávajících konstrukcí. Poslední třetí kapitola je zaměřena na praktický výpočet zesílení železobetonového nosníku uhlíkovými lamelami, který je počítán podle americké normy ACI 440.2R-17. Na závěr kapitoly je provedeno porovnání zesílení obdélníkového železobetonového nosníku jednou a dvěma lamelami.



TEORETICKÁ ČÁST

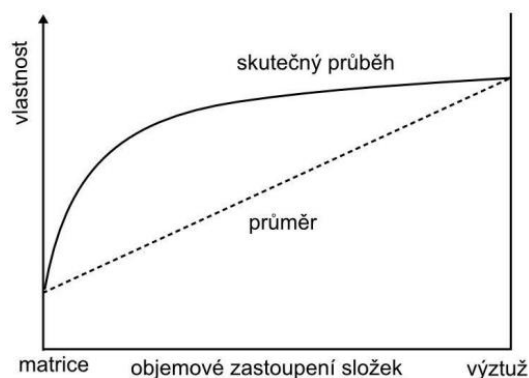


1. FRP KOMPOZITY

Názvem kompozit se označuje heterogenní materiál, ve kterém jsou kombinovány dvě nebo více fází, které se od sebe výrazně odlišují mechanickými, chemickými a fyzikálními vlastnostmi [1]. Za první kompozitní materiál ve stavebnictví se považuje směs slámy a hlíny, ze které se stavěly domy již ve starověkém Egyptě [2]. V dnešní době je jedním nejčastěji používaným materiálem ve stavebnictví beton, který je také kompozitním materiálem.

Materiály FRP (Fiber Reinforced Polymers) jsou vlákna vyztužované polymery. Vláknové kompozity se skládají z matrice (pojiva) a vysokopevnostních vláken. Matrice (pojivo) je druh pryskyřice, která má nízkou hustotu, snadnou zpracovatelnost a odolnost proti chemikáliím. Nevýhodou je však její nízký modul pružnosti, malá pevnost a křehkost. Z tohoto důvodu se v konstrukcích nepoužívá samostatně. Vlákna se používají nejčastěji skleněná, uhlíková, aramidová nebo přírodní. Vlákna mají vynikající pevnost a tuhost, ale samostatná vlákna jsou křehká a náchylná na poškození. [1]

Vlastnosti samostatných vláken nebo matrice se však nevyrovnají výsledným vlastnostem vláknových kompozitů. Jak je vidět na obrázku (Obr. 1), výsledný kompozit má výrazně lepší vlastnosti, než by odpovídalo poměrnému sečtení vlastností jednotlivých složek. Tento jev se nazývá synergický efekt, který je pro kompozitní materiály charakteristický. [3]



Obr. 1 Synergický efekt [4]



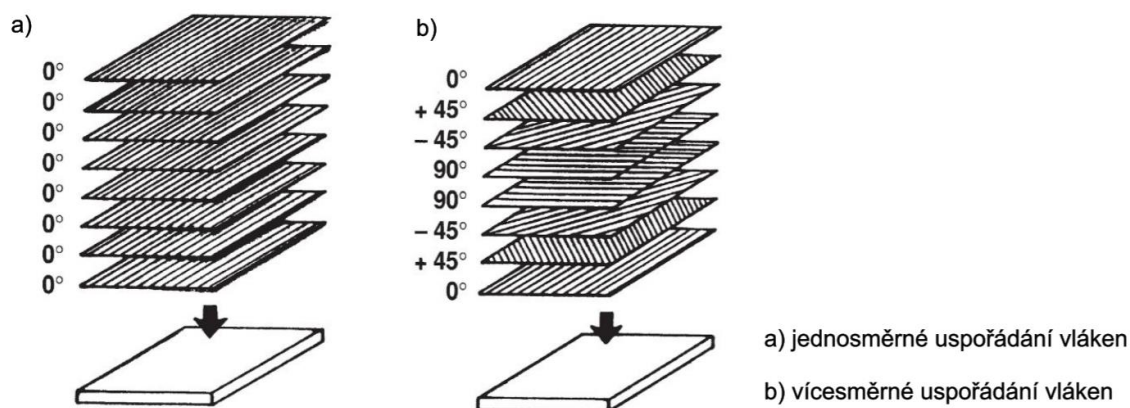
Vláknové kompozitní materiály se dělí podle různých strukturálních kritérií [1]:

- dle druhu matrice (*kap. 1.1*),
- dle typu vláken (*kap. 1.2.1*),
- dle formy vláknových výztuží (*kap. 1.2.3*),
- dle orientace vláken – jednosměrné,
- mnohoseměrné ,
- dle délky vláken – krátkovláknové (poměr délka/průměr < 100),
- dlouhovláknové (poměr délka/poměr > 100),



Obr. 2 Dělení vláknové výztuže [5]

- dle technologie výroby (*kap. 1.3*),
- dle způsobu 3D prostorového uspořádání výztuže,
 - lamina (jedna vrstva kompozitu),
 - lamináty (střídání vrstev lamin s různými orientacemi výztuže),
 - lamináty s tkanou výztuží,
 - lamináty s netkanou výztuží,
 - tažené profily,
 - navíjené profily.



Obr. 3 Uspořádání vláken v laminátu [6]



1.1 DRUHY MATRICE PRO KOMPOZITY

Matrice je pojivo, které prosycuje vlákna a následně po vytvrzení vzniká tvarově stálý výrobek označovaný jako kompozit. Úkolem matrice je zajištění geometrického tvaru výrobku, polohy vláken, spojení vláken, přenos zatížení z vlákna na vlákno a ochrana vláken před okolními vlivy. Aby matrice byla schopna zcela smočit vlákno bez bublin, musí mít vhodnou viskozitu a povrchové napětí. [1] [7]

Matrice se u polymerních kompozitů dělí na dvě hlavní skupiny [1] [7]:

1) termosety (reaktoplasty)

Vytvrzují se přidávkem katalyzátoru a urychlovače, příp. dodáním energie teplem či zářením. Popis nejdůležitějších typů reaktivních pryskyřic je popsán níže (*kap. 1.1.1*).

2) termoplasty

Termoplasty jsou za pokojové teploty pevné látky a až po zahřátí (cca nad 200 °C) jsou dostatečně tekuté. Výhodou termoplastů je výroba, při které nedochází k chemickému procesu, ale pouze k roztavení a ztuhnutí matice. Jejich největší nevýhodou a důvodem malého uplatnění je velká viskozita, která způsobuje defekty (bubliny, problematické smáčení, ...). Tato nevýhoda se dá vyřešit použitím již termoplastem předimpregnovaných vláken, což ovšem podstatně zvyšuje cenu a délku procesu výroby.

Pro vyztužení se používají:

- krátká vlákna (délka \approx 0,2 mm) – použití při vstřikování,
- dlouhá vlákna (délka do 25 mm) – použití při lisování,
- nekonečně dlouhá vlákna – polotovary pro další zpracování.

Pro výrobu kompozitů se nejčastěji používají termosety typu nenasycené polyesterové pryskyřice (UP-R), epoxidové pryskyřice (EP-R) nebo vinylesterové pryskyřice (VE-R).



1.1.1 TYPY REAKTIVNÍCH PRYSKYŘIC

1.1.1.1 Nenasycené polyesterové pryskyřice (UP-R)

Nenasycená polyesterová pryskyřice UP (=unsaturated polyesters) je nejčastěji používanou matricí do kompozitních materiálů z důvodu nízké ceny, dobrého smáčení vláken a vysoké rychlosti vytvrzování. Jedná se o polyfunkční oligomery, které mají ve svém řetězci několik reaktivních dvojných vazeb. Tyto pryskyřice jsou bezbarvé nebo nažloutlé roztoky v reaktivních rozpouštědlech. Jako reaktivní rozpouštědlo se nejčastěji používá styren. Při výrobě je možno barevnost ovlivnit pomocí různých barviv. Vytvrzují se radikálovou kopolymerací za normální nebo zvýšené teploty, při čemž dochází k 6 až 9% objemovému smrštění. Radikálová kopolymerace je řetězová reakce, při které dochází ke třem dějům. V prvním ději zvaném iniciace dochází k otevření původní dvojně vazby molekul oligoesteru a styrenu, aby vznikly stabilní jednoduché chemické C-C vazby. Druhým dějem je propagace, při které dochází k růstu (lineární růst nebo síťování). Posledním třetím dějem je terminace, při kterém dochází k zastavení reakce nebo pozorovatelnému zpomalení. [1]

1.1.1.2 Vinylesterové pryskyřice (VE-R)

Vinylesterové pryskyřice se občas nazývají epoxidové vinylestery nebo vinylestery na epoxidové bázi. Používají se pro náročnější aplikace, zejména pokud se pryskyřice vystaví velkému mechanickému namáhání nebo je vystavena agresivnímu chemickému prostředí. Další výhodou VE pryskyřice oproti UP pryskyřici je menší nasákavost a větší houževnatost. Nevýhodou je vyšší cena oproti UP pryskyřici. Vinylesterové pryskyřice jsou vhodné při výrobě kompozitů vyztužených uhlíkovými či skelnými vlákny. Pokud se při aplikaci nevyžadují speciální elektrické vlastnosti nebo použití při dlouhodobé vysoké teplotě, mohou vinylesterové pryskyřice nahradit dražší a hůře zpracovatelné pryskyřice. Vytvrzování probíhá stejně jako u nenasycené polyesterové pryskyřice. [1]



1.1.1.3 Epoxidové pryskyřice (EP-R)

Epoxidové pryskyřice se vyznačují nejlepší přilnavostí k výztuži oproti UP nebo VE pryskyřicím. Dalšími výhodami jsou výborné mechanické a elektrické vlastnosti, minimální smrštění (cca 2%), odolnost vůči vodě, roztokům alkálií a kyselin. Nevýhodou je vysoká cena, dodržování přesného poměru, horší zpracování z důvodu pomalého vytvrzování a vysoká viskozita. Viskozita se snižuje pomocí vysokovroucích rozpouštědel, zředěním s reaktivními rozpouštědly nebo zředěním látkou obsahující dvojnou vazbu schopnou polymerace. Chemická odolnost je závislá na druhu tvrdidla. Vytvrzování probíhá několika způsoby podle konečného použití pryskyřice. Jedním ze způsobů je polyadice probíhající na epoxidových skupinách. Dalším častým způsobem vytvrzování je polykondenzace na přítomných hydroxylových skupinách nebo polymerace epoxidových skupin. Při pokojové teplotě trvá vytvrzení několik dnů. Pokud se vytvrzuje za vyšších teplot, musí být dodrženy stanovené postupy. [1]

1.1.1.4 Fenolické pryskyřice (PF-R)

Fenolické pryskyřice se vyznačují chemickou a tepelnou odolností, tvarovou stálostí a nízkou hořlavostí. Důvodem jejich méně častému využití je vznik těkavých látek při vytvrzování a jejich křehkost. Vyrábějí se kondenzací fenolů a vodních roztoků aldehydů. Jednostupňová pryskyřice, která má molární poměr formaldehyd/fenol větší než 1 a reakce je katalyzována alkalickým katalyzátorem, se nazývá rezol. Dvoustupňová pryskyřice, která má molární poměr formaldehyd/fenol menší než 1 a reakce je za přítomnosti kyselého katalyzátoru, se nazývá novolak. Fenolické pryskyřice se vyrábějí se v tmavých krycích barevných odstínech z důvodu, že fenolické pryskyřice (převážně pryskyřice obsahující novolaky) na světle hnědnou a při vytvrzování mohou měnit barvu. V průběhu let nedochází k výrazným poklesům vlastností, pouze dochází ke ztrátě povrchového lesku a kvality povrchu. [1] [7]



1.2 DRUHY VÝZTUŽÍ PRO KOMPOZITY

Výztuž má v kompozitu funkci přenášet zatížení. Obsah vláken velmi ovlivňuje výsledné vlastnosti kompozitu. Níže je popis vlastností různých druhů vláken.

1.2.1 TYPY VLÁKEN

1.2.1.1 Skleněná vlákna (GF) [1] [7]

Skleněná vlákna se označují zkratkou GF (= Glass Fiber). Jedná se o tenká vlákna kruhového průřezu o průměru 3,5 až 24 μm . Skelná vlákna jsou označována E, C a R (S). Označení je dáno složením skla. V celém světě se nejběžněji používá sklo s označením E.

- Sklo E (electric) je vynikajícím elektrickým izolantem.
- Sklo C je chemicky odolné sklo (odolnost vůči kyselinám a agresivním látkám).
- Sklo R (resistence) má vyšší pevnost. V Evropě je toto sklo označováno písmenem R, v USA písmenem S (strenght) a v Japonsku písmenem T.
- Setkáváme se také s bezalkalickými skleněnými vlákny označované písmeny AR, která mají vysokou odolnost vůči alkáliím a používají se pro vyztužení betonu.



Obr. 4 Skleněná vlákna [8]



1.2.1.2 Uhlíková vlákna (CF)

Uhlíková vlákna se označují zkratkou CF (=Carbon Fiber). Jejich průměr se pohybuje od 5 do 10 μm . Vlákna se skládají nejčastěji z více než 90% uhlíku, <7% dusíku, <1% kyslíku a <0,3% vodíku. Vyznačují se velmi vysokou pevností, tuhostí, korozní odolností, dobrou tepelnou a elektrickou vodivostí. Mají však nízkou tažnost. Uhlíková vlákna mají i vysokou odolnost vůči dlouhodobému dynamickému namáhání. Další výhodou uhlíkových vláken oproti vláknům skelným je nižší hmotnost. [7]



Obr. 5 Uhlíkový provazec [9]

1.2.1.3 Aramidová vlákna (AF)

Jsou to syntetická vlákna označovaná AF (=Aramid Fiber). V obchodním řetězci se prodávají pod názvem Kevlar. Aramidové elementární vlákno kruhového průřezu má průměr přibližně 12 μm . Jeho povrch je lehce zdrsňený. Vyznačuje se vysokou pevností a tuhostí. Řadí se mezi nejlehčí vyztužovací vlákno. Má výrazně nižší pevnost v tlaku oproti pevnosti v tahu. Proto jsou aramidové kompozity využívány v konstrukcích s převážně tahovým namáháním. Vlákna jsou hydrofilní. Proto se musí před použitím vysušit, aby nedocházelo k narušení spoje vlákna s matricí nebo ke snižování pevnosti vlákna. [7]



Obr. 6 Aramidová vlákna [10]



1.2.1.4 Přírodní vlákna

Přírodní vlákna se dělí podle původu na rostlinná a zvířecí. Pro vyztužování plastů jsou však vhodná pouze rostlinná vlákna. Rostlinná vlákna jsou například len, bavlna, konopí, juta, sisal nebo ramie. Nejčastěji se pro výrobu používá len nebo juta. Mezi výhody patří odolnost vůči stárnutí, pevnost v tahu, nízká hustota a výhodná likvidace spalováním. Nevýhodou přírodních vláken jsou jejich vlastnosti závislé na podmínkách růstu, omezená délka vlákna, citlivost na působení vlhkosti a riziko rozkladu vláken při vysoké teplotě. [7]



Obr. 7 Přírodní lněný provazec [11]

1.2.2 VLASTNOSTI VLÁKEN

Materiál	Hustota ρ [kg/m ³]	Modul pružnosti E [GN/m ²]	Pevnost v tahu σ [MN/m ²]	Přetvoření ϵ [%]
E-sklo	2 540	72	2 400	2,6
S-sklo	2 490	86	4 500	2,0
HS-uhlík	1 750	240	3 500	1,1
HM-uhlík	1 950	350-650	2500-4000	0,5
Aramid	1 450	124	3 600	2,3
Len (65% celulózy)	1 500	80	2 000	3,0

Tab. 1 Vlastnosti vláken [12] [13] [14]

Poznámka: HS (high strength), HM (high modulus)



1.2.3 FORMA VLÁKNOVÝCH VÝZTUŽÍ

Jednotlivá vlákna se samostatně využívají pouze zřídka. Častějším způsobem je použití jiné formy výztuží, jako například roving, rohož nebo tkanina. Používání těchto forem výztuží je z důvodu snadnější manipulace, větší odolnosti proti šíření křehkých lomů nebo rychlejšímu růstu stěny výrobku při výrobě. [1] [7]

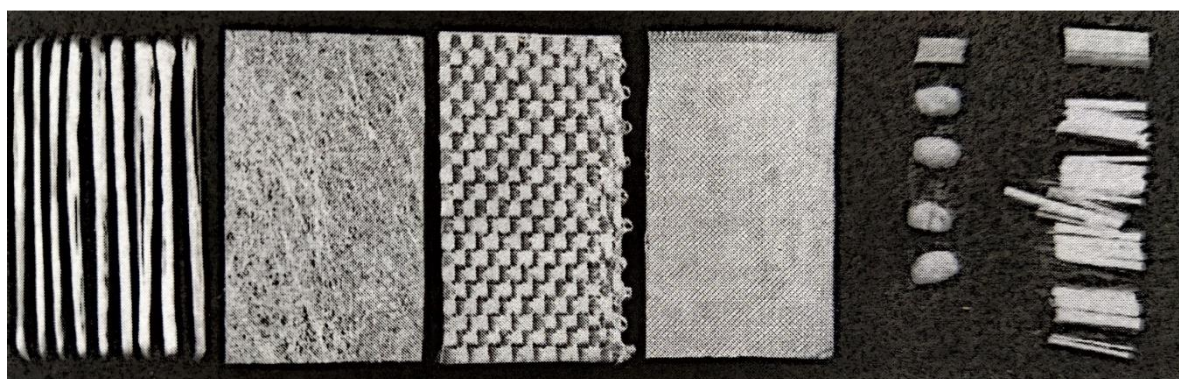
Jednotlivá vlákna spojujeme různými způsoby [1] [7]:

Pro reaktivní pryskyřice:

- a) roving (pramenec) – jednosměrné sdružení určitého počtu nekonečných vláken bez jejich zkručení,
- b) rohož – plošná výztuž skládající se z nahodile orientovaných vláken,
- c) tkanina z pramenců – plošné, propletené, vzájemně se křížící pramence,
- d) tkanina z vláken – plošné, propletené, vzájemně se křížící vlákna.

Pro termoplasty:

- e) krátká vlákna (délka \approx 0,2 mm),
- f) dlouhá vlákna (délka do 25 mm),
- g) nekonečně dlouhá vlákna.



a)

b)

c)

d)

e)

f)

Obr. 8 Formy vláknových výztuží [7]



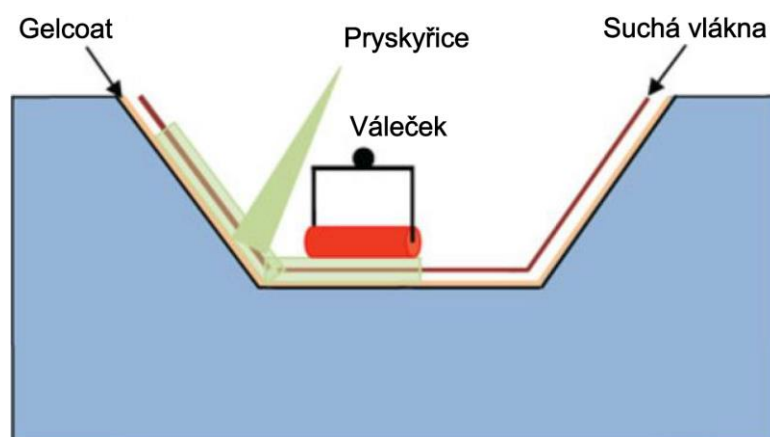
1.3 TECHNOLOGIE VÝROBY KOMPOZITŮ

1.3.1 Ruční kladení

Jedná se o nejstarší a nejrozšířenější proces výroby po celém světě. Je velmi často využíván díky své nízké ceně, jednoduchosti a potřebě pouze minimálního vybavení. Další výhodou metody je možnost výroby velkých a složitých dílců. Mezi nevýhody patří malá produktivita, kvalita materiálu podle zručnosti pracovníků a hladká pouze spodní část výrobku. Metoda ručního kladení za mokra se řadí se mezi otevřené technologie. [15]

Postup výroby:

V prvním kroku se na připravený povrch formy nanese ručně nebo stříkáním nevyztužená povrchová vrstva nazývaná gelcoat o tloušťce 0,3 až 1 mm. Vrstva zajišťuje především vizuální stránku materiálu a zároveň chrání materiál před okolním prostředím jako je například voda, povětrnostní vlivy atp. Poté, co částečně vytvrdne gelcoat, se ručně pokládají jednotlivé vrstvy výztuže, které jsou pomocí štětce nebo nanášecího válečku prosycovány pryskyřicí. Rýhovaným válečkem či štětcem se na závěr vytlačují vzduchové bubliny a odstraňuje přebytečná pryskyřice. V posledním kroku probíhá za normální teploty vytvrzování laminátu a následné vyjmutí z formy. [15]



Obr. 9 Schéma ručního kladení [16] (upraveno)

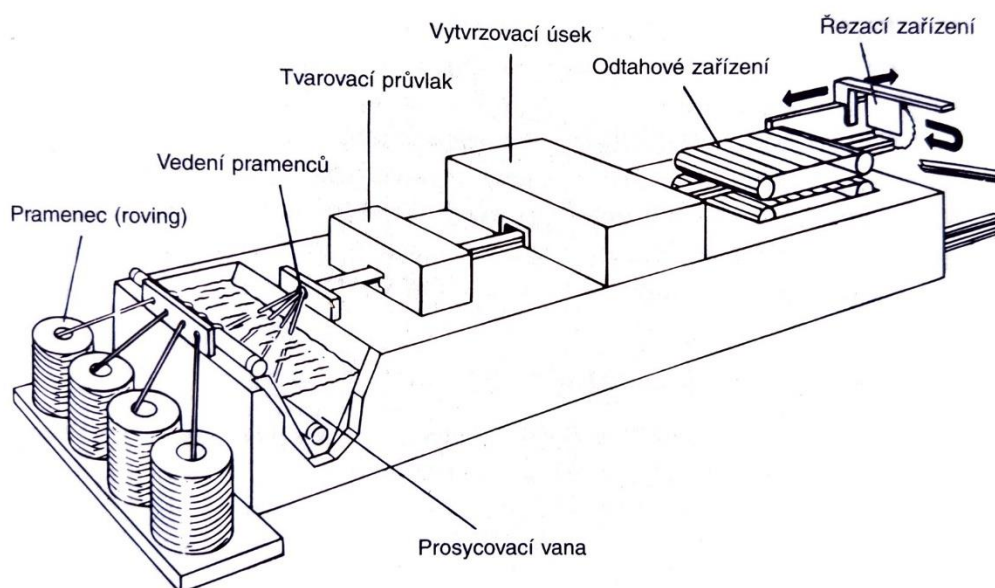


1.3.2 Pultruze (tažení)

Jedná se o automatizovanou metodu kontinuální výroby FRP kompozitních materiálů různých tvarů a délek tažením. Mezi výhody patří efektivita, malá pracnost, rychlost výroby, nízká cena a vysoký obsah výztuže (až 80%). Nevýhodou jsou však vysoké investiční náklady a náklady na provoz linky. [15]

Postup výroby:

Vlákna navinutá na cívkách jsou pomocí srovnávače rovnoměrně rozmístěna a tažena do vyhřívané ocelové formy pomocí tažného zařízení. Ve formě jsou vlákna smáčena směsí pryskyřice, plniva, barviva a případně dalších přísad pro zlepšení vlastností materiálu. Následně jsou vlákna s pryskyřicí vytvarována a vytvrzena do požadovaného tvaru. Na konci výrobní linky se provede řezání na požadovaný rozměr materiálu. [17]



Obr. 10 Schéma výroby tažením [7]

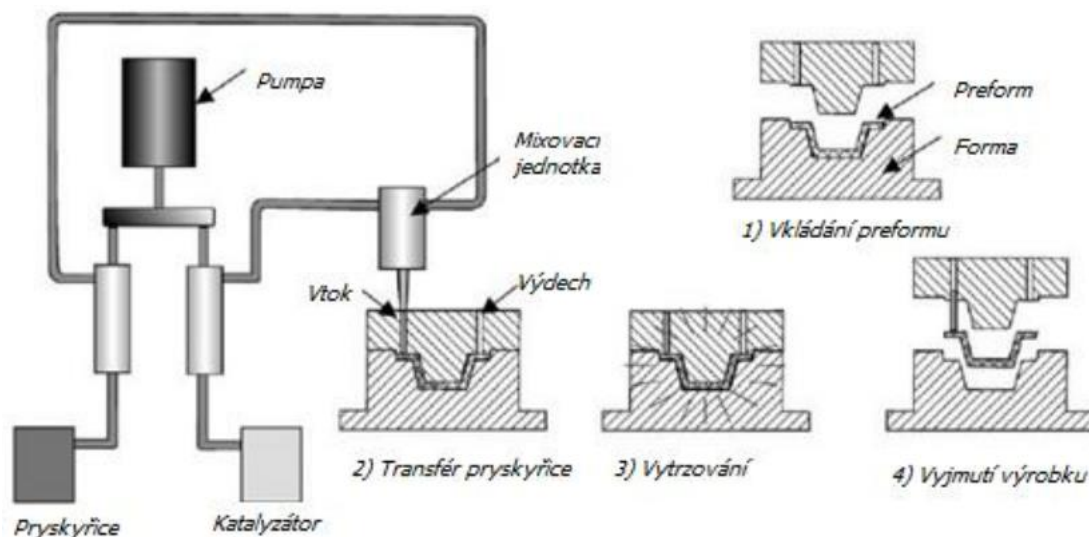
1.3.3 Lisování se vstřikem matrice

Jedná se o metodu využívající vysokotlaké vstřikování (tlak vzduchu cca 2 až 10 barů). Z tohoto důvodu musí být formy pevné a přizpůsobené pro vnitřní tlak. Povrch stěn musí být zároveň hladký a kluzký, kvůli bezproblémovému průchodu pryskyřice. Proto se před výrobou formy voskují. [18]



Postup výroby:

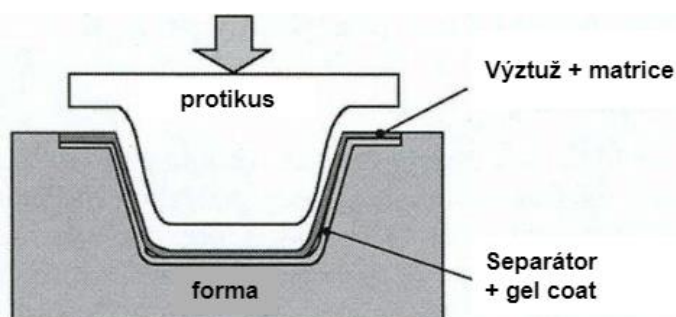
Do formy se vloží na předem připravený gelcoat suchá výztuž (kap. 1.3.1) a forma se uzavře horním dílem formy. Pomocí injektážní pistole se do formy pod tlakem vstříkuje pojivo, dokud nedojde k nasycení výztuže. Přebytečná pryskyřice vyteče z formy a kompozit se nechá ve formě vytvrdnout. [18]



Obr. 11 Proces výroby lisováním se vstříkem matrice [19]

1.3.4 Lisování za studena

Jedná se o podobný princip výroby jako u metody lisování se vstříkem. Matrice se však nevstříkuje pod tlakem, ale nanese se na vlákna. Poté se přebytečná pryskyřice vytláčí horním protikusem formy. Formy nejsou vyhřívány. Používá se nízký tlak (cca 0,03-1 MPa), tudíž se jedná o finančně méně nákladnou metodu. Tlak je vyvinut pomocí šroubových svěrek nebo hydraulických válců. Výsledný materiál, tzv. „výlisek“, má oboustranně hladký povrch. [15]



Obr. 12 Schéma lisování za studena [20]



1.3.5 Lisování za tepla

Jde o totožnou metodu jako lisování za studena (kap. 1.3.4). Jedinou odlišností těchto dvou metod je zahřívání formy. Výhodou je rychlost výroby malých a středních dílců díky krátkým výrobním cyklům. Nevýhodou je však pořizovací cena a vysoké náklady na provoz z důvodu vyhřívání forem. [15]

Při výrobě metodou lisování za tepla jsou formy vyhřívány pomocí elektrických nebo topných médií. Formy se nejčastěji dávají do hydraulického lisu, který vyvodí tlak 1 až 30 MPa. Jako materiál se používají lisovací tělesa (DMC = dough moulding compounds), lisovací směsi tzv. „premixy“ (BMC = bulk moulding compounds) nebo lisovací rohože tzv. „prepregy“ (SMC = sheet moulding compounds). [15]

Poznámka:

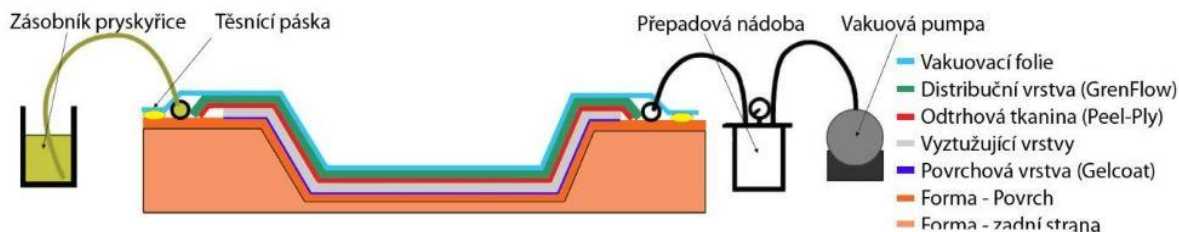
„Prepregy jsou polotovary k výrobě kompozitů, jejichž hlavní složkou je výztuž předimpregnovaná částečně vytvrzenými pryskyřicemi. Hlavní výhodou prepregů je vysoký podíl vláknové výztuže, stejnoměrnost a hladkost hotových dílů, které souvisí s předem definovatelným a přesným uložením výztuže.“ [21]

1.3.6 Lisování pomocí vakua

Jedná se o metodu, která se používá pro zlepšení mechanických vlastností nebo při potřebě většího obsahu výztuže a odsátí přebytečné pryskyřice. Lisování pomocí vakua je vylepšená metoda ručního kladení popsané výše. Vlákna musí být zajištěna proti posunu. Výhodou této metody jsou lepší vlastnosti a estetika obou stran kompozitního materiálu. Nevýhodou je však její náročnost. [15]

Postup výroby:

Postup výroby je ze začátku stejný jako u ručního kladení – výztuž je položena do formy na tzv. gelcoat (kap. 1.3.1). Odlišností je přikrytí výztuže odtrhovou tkaninou, která zajistí estetický vzhled druhé strany materiálu a dá se lehce bez poškození povrchu po vytvrzení odstranit. Povrch je následně přikryt distribuční vrstvou a vakuovou fólií. Okraje formy se musí utěsnit. Tlakem je do formy distribuována pryskyřice. Následně se pomocí podtlaku odsaje přebytek pojiva a vzduchových bublin. Vlivem podtlaku (cca 0,03-0,09 MPa) dojde k vytvrzení materiálu. [15]



Obr. 13 Schéma vakuové infuze [22]

1.3.7 Lisování v autoklávu

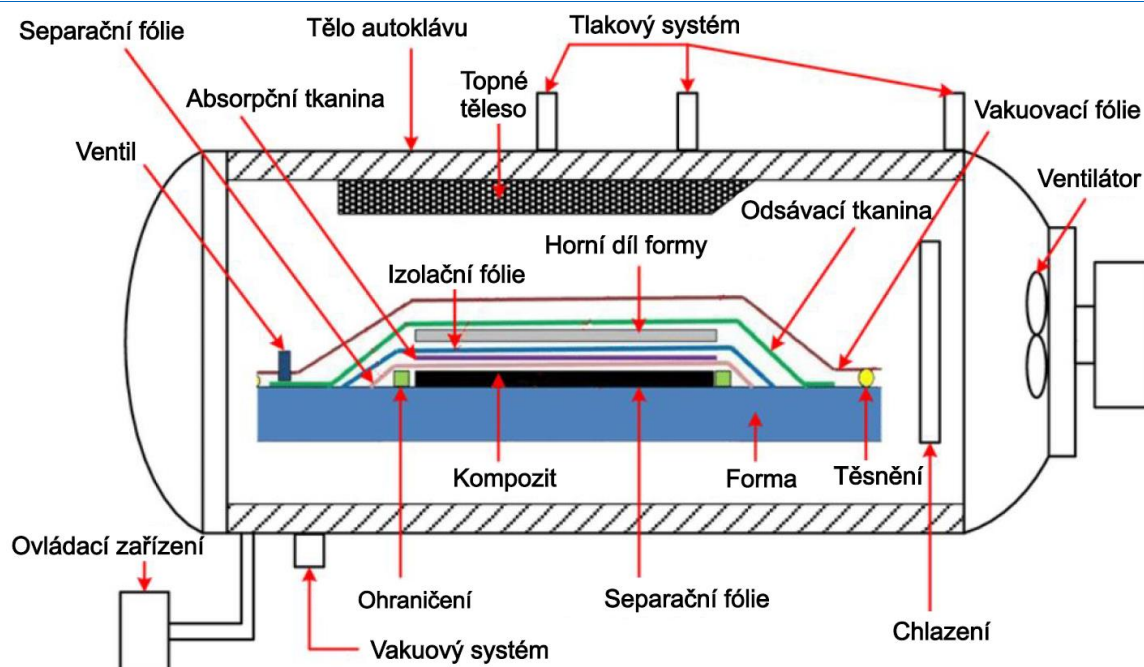
Jedná se o vylepšenou technologii lisování pomocí vakua. Skladba vrstev je stejná, ovšem celek se vloží do vyhřívaného autoklávu. Autokláv je kulatá či válcová uzavřená nádoba se zvýšenou teplotou a tlakem. Teplota se pohybuje kolem 180 °C, tlak přibližně 0,5 MPa a doba trvání lisování je 3 až 6 hodin. K výrobě se vždy používají tzv. prepregy (kap. 1.3.5). Výhodou této metody je vysoká kontrolovatelná kvalita, správné spojení materiálů, lepší vlastnosti a minimální obsah vzduchu. Velkou nevýhodou jsou však vysoké náklady, složitost metody, doba procesu a omezená velikost produktů. [23]

Postup výroby:

Příprava je totožná jako u metody lisování pomocí vakua až do odstranění vzduchu. Soustava vakuově zabalená se celá vloží do autoklávu. V něm, za dané teploty a tlaku, dochází k rovnoměrnému rozložení matrice a vytvrzení. Po stanoveném čase se produkt ochladí, odstraní se vakuová fólie a vyjme se z formy kompozitní výrobek. [23]



Obr. 14 Pohled na autokláv [24]



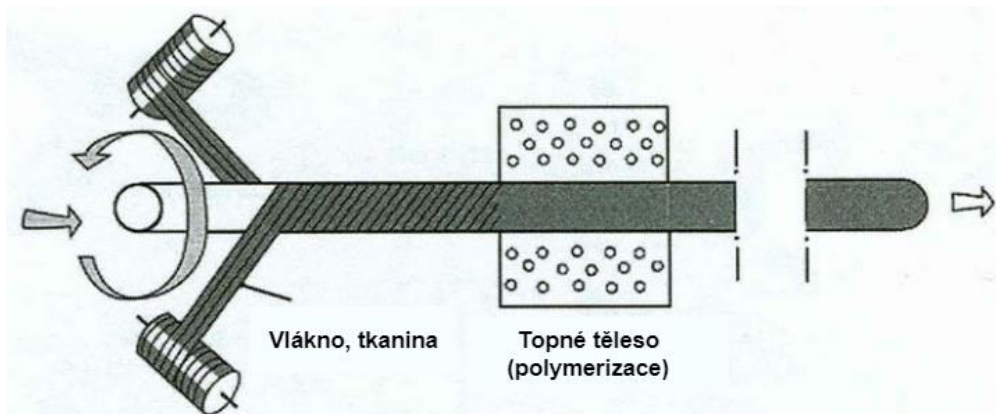
Obr. 15 Schématický řez autoklávem [25] (upraveno)

1.3.8 Navíjení

Navíjení je plně automatizovaná metoda vhodná pro výrobu dutých či plných výrobků složitých tvarů. Jedná se o nejprogressivnější metodu pro výrobu dutých kompozitů. Výhodou je pevnost a možnost opakovaně použít stejnou formu (jádro, případně trn). Nevýhodou je nesnadné odstraňování jádra z vytvrzeného výrobku. [15]

Postup výroby:

Do přístroje se připevní jádro (trn), které může být vyjímatelné nebo součástí výrobku. Výztuž se navíjí na jádro ve tvaru výrobku. Výztužná vlákna mohou být předem nebo dodatečně impregnována pryskyřicí. Pomocí počítače se naprogramuje předpětí vláken, úhel ukládání (0° až 90°) a rychlost otáčení a posunu. Po dostatečném navinutí vstupuje vlákno i s jádrem do pece, kde dochází při stálé rotaci k vytvrzení. [15]



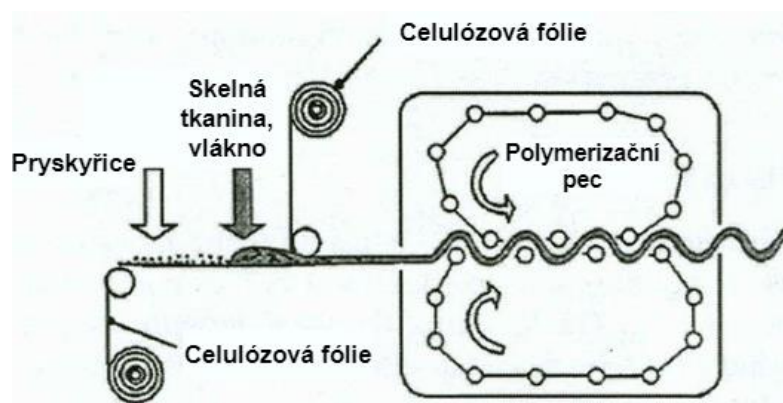
Obr. 16 Schéma navíjení [20]

1.3.9 Kontinuální laminování

Metoda se řadí mezi starší výrobní metody. Pomocí kontinuálního laminování lze vyrobit rovné laminátové desky nebo vlnité materiály. Vkládaná výztuž může být ve formě rohože, sekaného pramence nebo tkaného materiálu. Výhodou je vysoký výkon stroje. Mezi nevýhody pak můžeme zařadit maximální šířku 3 m. [18] [26]

Postup výroby:

Na separační nosnou fólii se nanese pryskyřice a výztužná vlákna. Zvrchu se směs překryje vrchní separační fólií a přitlačí se pomocí zhuťovacích válců, aby došlo k nasycení vláken a vyloučení vzduchových bublin. Následně dochází k vytvrzování v polymerizační peci. Na konci výrobní linky je umístěna řezačka, která ořízne materiál na požadovanou délku. [26]



Obr. 17 Schéma kontinuálního laminování [20]

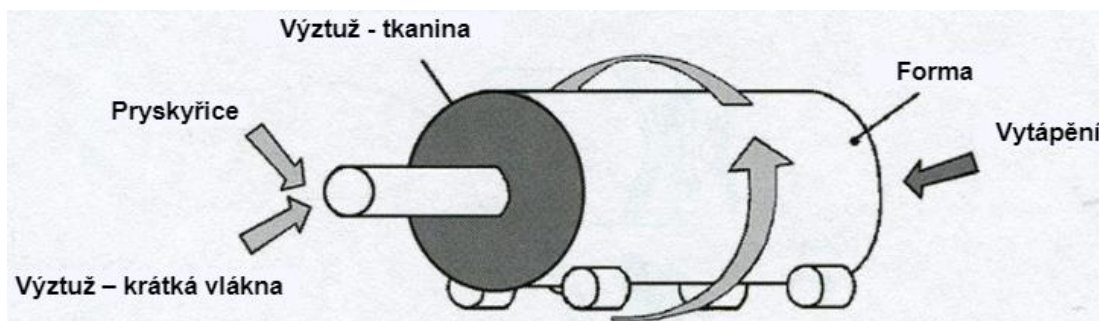


1.3.10 Odstředivé lití

Jedná se o technologii výroby vhodnou pro dutá tělesa.

Postup výroby:

Do duté rotující formy se vstříkuje směs nasekaných vláken, pryskyřice a plniv pro lepší vlastnosti materiálu. Směs je vstříkována pomocí stříkacího zařízení, které se pohybuje v podélné ose rotující formy. Vstříkovaná směs vlivem odstředivých sil vytvoří na povrchu formy vrstvu, která se působením odstředivých sil zhutňuje. Kvůli odolnosti obou povrchů materiálu se jako první a poslední vrstva vstříkuje pryskyřice. Díky smrštění lze vytvrzený materiál snadno vytáhnout z formy. [15]



Obr. 18 Schéma odstředivého lití [20]



2. ZESILOVÁNÍ ŽB KONSTRUKCÍ FRP MATERIÁLY

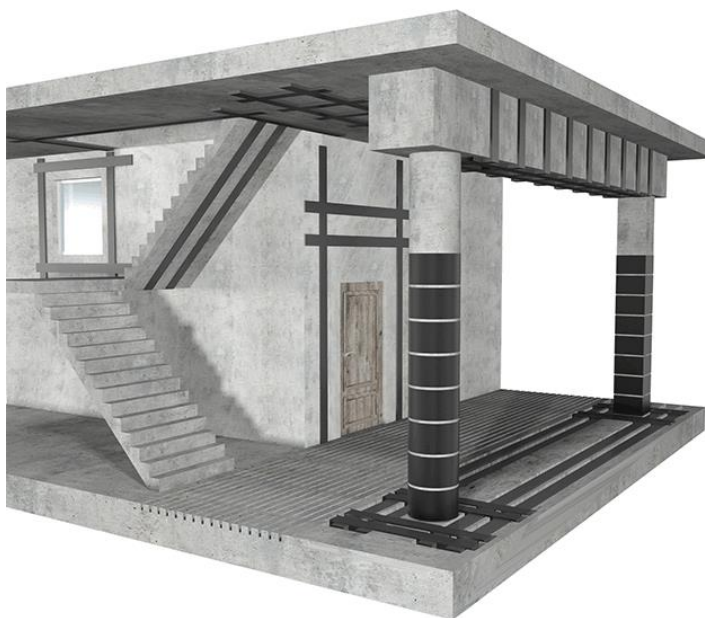
Mnoho objektů vyžaduje nejen opravu, ale velmi často jsou konstrukce přetíženy, a proto je vyžadováno i jejich zesílení. Zhoršující se stav vyžaduje rychlé, trvanlivé a nákladově efektivní řešení. Jedním z elegantních řešení tohoto problému je právě zesílení konstrukcí pomocí FRP materiálů. Zesilování FRP materiály principiálně navazuje na metodu zesilování opláštěváním pomocí ocelové bandáže. Oproti opláštěvání má však velkou řadu výhod.

Výhody [27]:

- rychlejší aplikace,
- snazší instalace,
- nízká hmotnost a téměř nulové přetížení konstrukcí,
- tenký profil, který zanedbatelně změní vzhled konstrukce,
- není zapotřebí permanentní lešení ani podpory,
- bezproblémová doprava materiálu.

Nevýhody [27]:

- nízká požární odolnost (rychlá ztráta mechanických vlastností při vysoké teplotě).



Obr. 19 Zesilování konstrukcí FRP materiály [17]



Důvody zesilování konstrukcí [28]:

- zvýšení užitečného zatížení (např. změna účelu konstrukce),
- oslabení konstrukce (vlivem nových prostupů),
- konstrukční chyba (chyba při návrhu nebo provádění),
- náhodné nebo mimořádné zatížení,
- prodloužení životnosti konstrukce,
- koroze výztuže,
- zvýšení agresivity prostředí,
- změna normových předpisů.

Materiály FRP se nemusí využívat pouze při rekonstrukcích. Často se již objevují i v novostavbách, kde je například limitována váha konstrukce nebo do chemicky agresivních prostředí. [27]

Nejvýznamnější světový výrobci FRP (pro stavebnictví):

- Sika (www.sika.com)
- FYFE (www.fyfeco.com)
- Watson Bowman Acme Corp (www.mbrace.com)
- Hughes Brothers (www.hughesbros.com)
- FiberForce Composites (www.fibreforce.co.uk)

Nejvýznamnější čeští výrobci FRP (pro stavebnictví):

- Sika CZ, s.r.o. (cze.sika.com)
- Prefa kompozity, a.s. (www.prefa-kompozity.cz)
- Sanax chemical construction s.r.o. (www.sanax.cz)
- 5M (www.5m.cz)



2.1 TYPY FRP MATERIÁLŮ PRO ZESILOVÁNÍ

V současné době se v České republice ve stavebnictví objevují nejčastěji dva typy FRP materiálů. Jedná se o CFRP a GFRP popsané níže.

Nejčastěji se využívá kombinace karbonových (uhlíkových) vláken s epoxidovou pryskyřicí z důvodu nejlepších mechanických vlastností a trvanlivosti. Tyto kompozity se označují CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymers). Skvělé vlastnosti se ovšem odráží na ceně, která je relativně vysoká. Uhlíková vlákna se používají v místech s dlouhodobým zatížením a v exteriéru (vyšší trvanlivost). Dalším velmi často využívaným kompozitním materiálem je GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymers). Jedná se o kombinaci skleněných vláken s epoxidovou pryskyřicí. Skleněná vlákna se používají v místech seismického zatížení nebo při krátkodobém zatížení. [29]

2.1.1 TKANINY

FRP tkaniny (nejčastěji CFRP, GFRP nebo AFRP) mají jednosměrně nebo obousměrně orientovaná vlákna. Používají se pro nosníky, sloupy, tunely, propusti nebo komplikované detaily. Jsou používané především pro posílení ve smyku nebo zesílení ovinutím. Mohou se používat současně s lamelami pro kombinované posílení a vyztužení. [17] [28]

2.1.2 LAMELY

FRP lamely (nejčastěji CFRP) jsou jednosměrná laminovaná vlákna. Většinou se používají pro zesilování v ohybu staticky nebo dynamicky zatížených konstrukcí (např. nosníků, sloupů, stropů, stěn, otvorů, mostů, ...). Lamely slouží jako dodatečná tahová výztuž. Může být lepená nebo předepnutá. V případě předepnutí se konce lamel mechanicky ukotví, což vede k ekonomičtějšímu využití vysoké únosnosti lamel. Vyrábějí se rovné nebo ve tvaru L. Lamely L-tvaru se většinou používají pro smykové zesílení T-nosníků. [28]



2.1.3 TYČE (VÝZTUŽ)

FRP tyče (nejčastěji CFRP) se využívají pro dodatečné vyztužení betonových, zděných či dřevěných konstrukcí. Používají se pro zesilování především v ohybu (např. nosníků, stropů, stěn, propustí, ...). [28]

2.2 VADY A PORUCHY ŽB KONSTRUKCÍ

2.2.1 POJMY [30]

- **Trvanlivost** = schopnost konstrukce odolávat vnějším vlivům
- **Životnost** = doba, během které by měla konstrukce vyhovovat požadavkům provozu v předpokládaných podmínkách (Tab. 2).

Kategorie návrhové životnosti	Informativní návrhová životnost (v letech)	Příklady
1	10	dočasné konstrukce ⁽¹⁾
2	10 až 25	vyměnitelné konstrukční části, např. jeřábové nosníky, ložiska
3	15 až 30	zemědělské a obdobné stavby
4	50	budovy a další běžné stavby
5	100	monumentální stavby, mosty a jiné inženýrské konstrukce

⁽¹⁾ Konstrukce nebo jejich části, které mohou být demontovány s předpokladem dalšího použití, se nemají považovat za dočasné.

Tab. 2 Informativní návrhové životnosti [31]

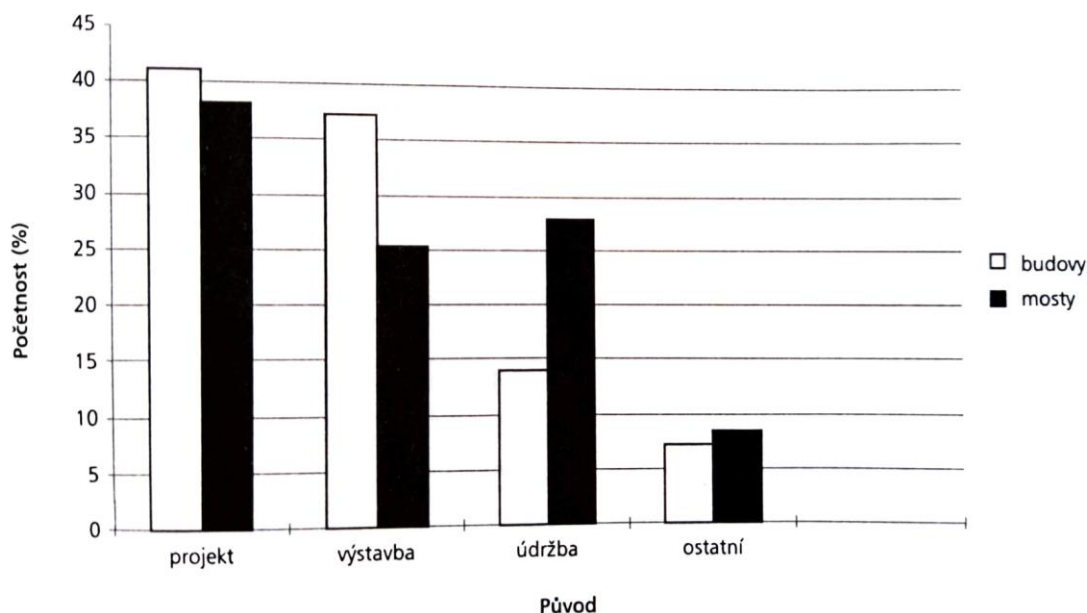
- **Oprava** = výměna původního poškozeného nebo opotřebeného prvku konstrukce za nový, při zachování funkčnosti (uvedení do provozuschopného nebo původního stavu)
- **Rekonstrukce** = znovuoobnovení, které má za následek změnu účelu nebo změnu technických parametrů (významnější kvalitativní změny a technické zhodnocení)
- **Vada** = nedostatek konstrukce způsobený chybným návrhem nebo provedením, který však neovlivní bezpečnost nebo trvanlivost konstrukce (např. nadměrný průhyb stropní konstrukce)
- **Porucha** = částečná nebo úplná ztráta funkčnosti konstrukce nebo prvku



2.2.2 ANALÝZA VAD A PORUCH

Důvody vzniku vad [30]:

- V projektové fázi – chybné konstrukční řešení a detaily
- V průběhu výstavby – chybné složení betonu, transportbeton, zpracování čerstvého betonu nebo chybné ukládání výztuže
- V průběhu užívání stavby – nedostatečná nebo nevhodná údržba, stárnutí, mimořádné zatížení, agresivita okolí



Obr. 20 Původ a početnost poruch [30]

Z grafu (Obr. 20) je patrné, že vady můžeme nejvíce eliminovat v projektové fázi. Mnoho vad vzniká také v průběhu výstavby, kdy kvalita konstrukce je ovlivněná kvalitou použitých materiálů a provedením technologických postupů.

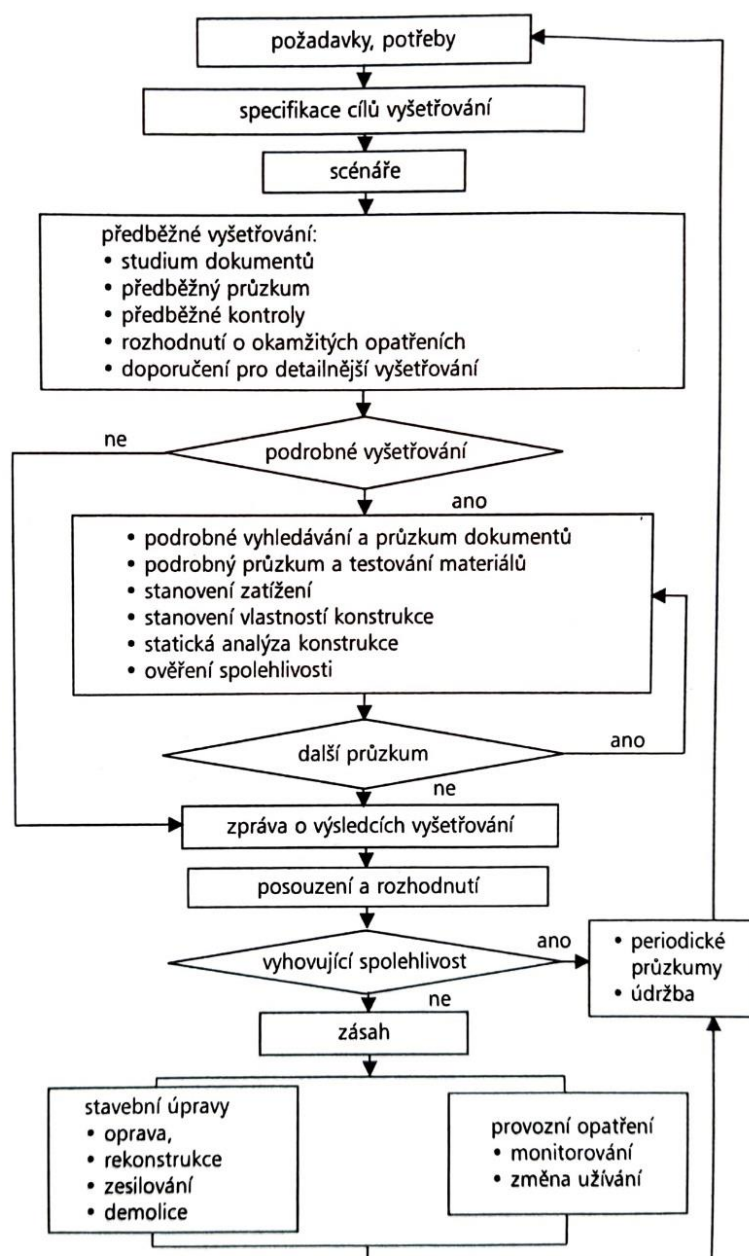
Dělení poruch dle statického hlediska [30]:

- staticky nevýznamné poruchy – mohou omezit použitelnost a trvanlivost, ale neohrožují únosnost stavby (oprava jednoduchá),
- staticky významné poruchy – omezují únosnost, trvanlivost a použitelnost (oprava musí být včas a vhodnou metodou),
- staticky velmi závažné, tzv. havarijní – ohrožují únosnost a stabilitu konstrukce (vyžadují okamžitý zásah).



2.3 ZJIŠTĚNÍ STAVU KONSTRUKCE

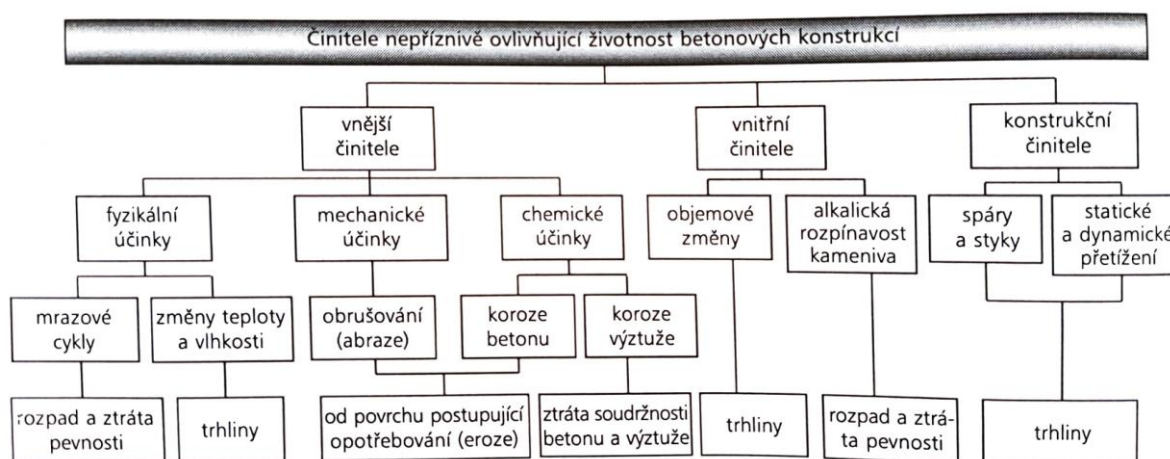
Pro správný návrh sanace je nutné znát aktuální stav ŽB konstrukce. Provádí se předběžný a následně podrobný průzkum, který musí být komplexní (zjistit poruchy konstrukce, kvalitu betonu, množství a rozmístění výztuží, zatížení na konstrukci, parametry prostředí, ...). Schéma postupu vyšetřování stávající konstrukce je vidět na Obr. 21.



Obr. 21 Schéma postupu vyšetřování stávající konstrukce [30]



Nejčastější příčiny poruch v průběhu užívání stavby jsou schematicky vykreslena níže (Obr. 22). Poruchy se projevují především trhlinami, drcením betonu nebo nadměrným přetvořením konstrukce. Větší trhliny způsobují ztrátu nebo částečné omezení spolehlivosti, bezpečnosti, použitelnosti a trvanlivosti konstrukce. Ne všechny trhliny však znamenají poruchu. Technologické trhliny jsou způsobeny deformačním účinkem objemových změn a nevyžadují sanaci. Naopak statické trhliny jsou způsobené silovými účinky zatížení nebo vlivem sedání v základové spáře a vyžadují pozornost.



Obr. 22 Schéma nepříznivých činitelů a následky jejich působení [30]



2.4 TECHNOLOGIE ZESILOVÁNÍ

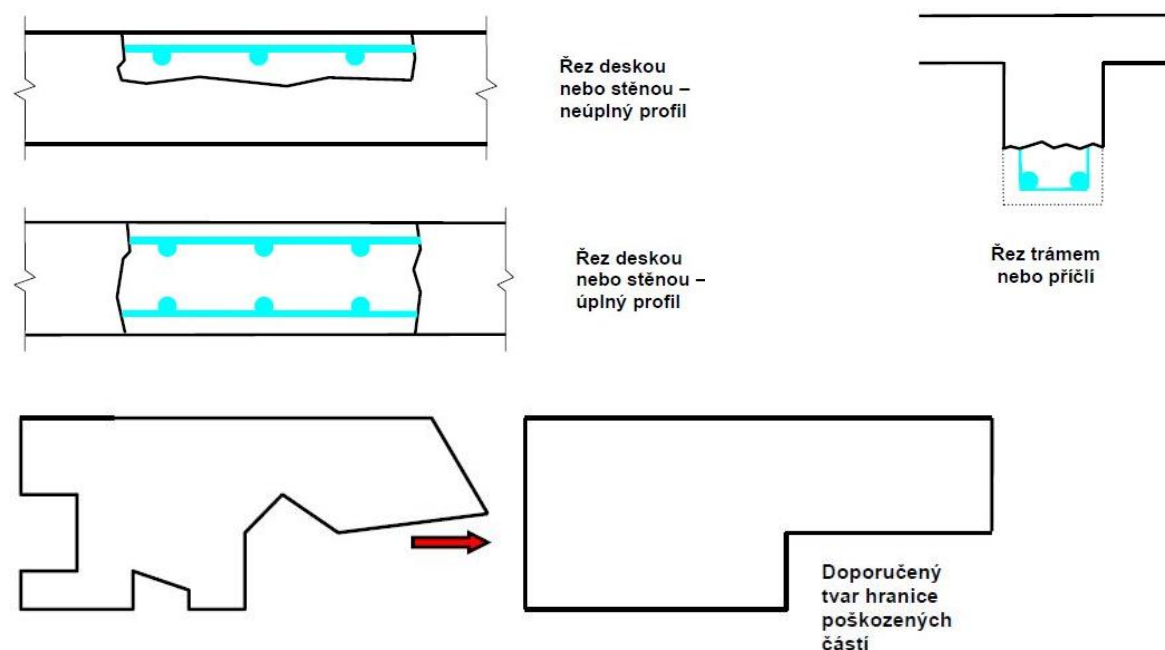
Před aplikací (nalepení) FRP materiálů musí být povrch konstrukce řádně připraven a očištěn. V této kapitole je popsán technický postup oprav a následná aplikace FRP materiálů.

2.4.1 PŘÍPRAVA PODKLADU

Příprava podkladu je prvním krokem při sanaci železobetonových konstrukcí. Technický postup a výběr prostředků musí zohledňovat charakter, povrch a rozsah poškození konstrukce, přístupnost konstrukce, bezpečnost, vliv sanace na okolí a cenu. [30]

❖ PRIMÁRNÍ ODSTRANĚNÍ BETONU

Hrubé odstranění betonu, chloridů a agresivních látek. Takzvaným akustickým trasováním se najdou dutá místa, která značí místo, kde došlo z důvodu korodující výztuže k oddělení krycí vrstvy. V těchto místech odstraníme krycí vrstvu betonu pomocí elektrických či pneumatických sbíjecích kladiv. Tato metoda je velmi účinná, ale nevýhodou je vznik trhlin i ve zdravém okolním betonu. Další možností je krycí vrstvu odstranit frézováním nebo řezáním. [30]



Obr. 23 Doporučená geometrie odstraňování betonu [32] (upraveno)



❖ PŘÍPRAVA PODKLADU

Odstranění nesoudržných nebo mechanicky poškozených částí povrchu a zároveň zdrsnění povrchu do hloubky přibližně 3 až 5 mm (ve výjimečných případech až do hloubky 10 mm). Pro přípravu povrchu se používá nejčastěji tryskání vodním paprskem, pískování (suché nebo mokré), frézy, brokování nebo jehlová pistole. [30]

❖ DOČIŠTĚNÍ POVRCHU

Odstranění prachových částic, olejů a ostatních látek z povrchu činíme proto, aby nedocházelo ke snížení soudržnosti mezi novou vrstvou a podkladem. V obyčejných případech stačí povrch opláchnout tlakovou vodou. V případě potřeby odstranění olejů nebo starých nátěrů se používá vysokotlaký vodní paprsek s vyšší teplotou vody. Chemické prostředky jsou rizikové a používají se pouze výjimečně. Metody a přístroje jsou přehledně uvedené níže (Tab. 3). [30]

Metoda	Přístroje a prostředky	Odstraňují se
Čištění tlakovou vodou do 20 Mpa	tlakové čerpadlo, vyhřívaná (do 150 °C) nebo nevyhřívaná voda, příp. chemické čisticí prostředky	nečistoty a řasy
Chemická	kyseliny, louhy, rozpouštědla	barvy, oleje a bitumeny (aplikace je riziková a nedoporučuje se)
Tlaková voda 10 až 60 Mpa	tlakové čerpadlo, voda, voda s obrusnou příměsí	nečistoty a méně pevné vrstvy
Otryskávání vodou 100 až 300 Mpa	vysokotlakové čerpadlo, voda, voda s obrusnou příměsí	porušené vrstvy betonu, vrstvy s obsahem chloridů, nátěry
Otryskávání pískem	vysokotlakový kompresor, křemičitý písek	nátěry, rez z výztuže
Brokování	brokovací přístroj, ocelové kuličky	vrstvy na podlahových plochách
Frézování	frézovací stroj	hlubší vrstvy betonu
Vysekávání	strojový nebo ruční sekáč	větší vrstvy betonu, obnažuje se výztuž
Opalování plamenem	plamenový hořák, acetylen a kyslík	organické nečistoty jako oleje, bitumeny; obnažuje se hrubé kamenivo; je nevyhnutelné očištění (omezená využitelnost)
Broušení	bruska	zvětralý povrch, cementové mléko, nátěry

Tab. 3 Metody a přístroje na přípravu betonového podkladu [30] (upraveno)

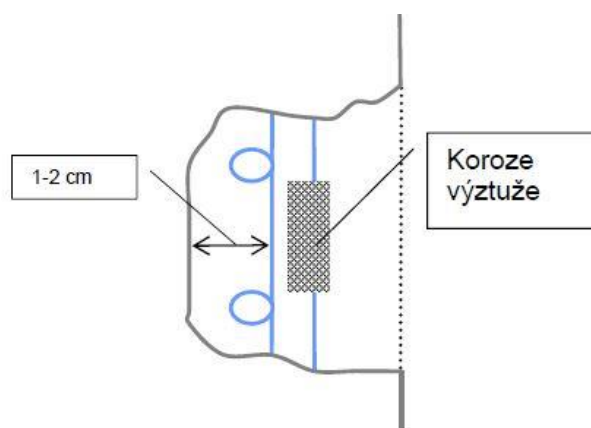


2.4.2 ÚPRAVA POVRCHU ZKORODOVANÉ VÝZTUŽE

Ke korodující výztuži musí být přístup ze všech stran, aby mohla být očištěna. Očištění výztuže se provádí drátěným kartáčem, kotoučem nebo otryskáváním vodou či pískem. Po očištění je potřeba výztuž co nejdříve ochránit před vznikem nové korozní vrstvy. Ochranu výztuže můžeme dosáhnout buďto vytvořením alkalického prostředí ($\text{pH} > 11,5$) vrstvou reprofilační hmoty na bázi cementu nebo pomocí nátěru. Nátěr výztuže není nutný, pokud bude výztuž zakryta požadovanou tloušťkou krycí vrstvy, která je uvedena v normě (Tab. 4). Pokud reprofilační materiál nemá dostatečnou přídržnost k podkladu, musí být vytvořen tzv. adhezní můstek. Nejčastěji se k vytvoření adhezního můstku používají polymercementové suspenze nebo epoxidové nátěry. [30]

Požadavek prostředí pro $c_{\text{min,dur}}$ (mm)							
Třída konstrukce	Stupeň vlivu prostředí podle tabulky 4.1						
	X0	XC1	XC2/XC3	XC4	XD1 / XS1	XD2/XS2	XD3/XS3
S1	10	10	10	15	20	25	30
S2	10	10	15	20	25	30	35
S3	10	10	20	25	30	35	40
S4	10	15	25	30	35	40	45
S5	15	20	30	35	40	45	50
S6	20	25	35	40	45	50	55

Tab. 4 Minimální hodnoty krycí vrstvy [33]

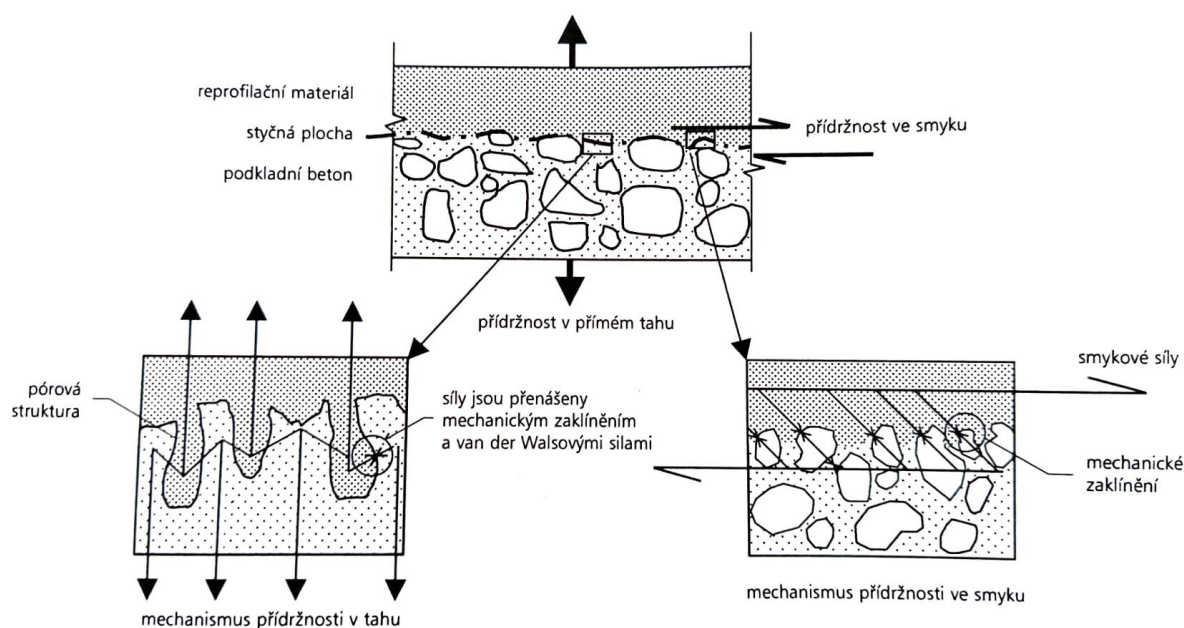


Obr. 24 Odstranění betonu kolem obnažené výztuže [32]



2.4.3 REPROFILACE BETONOVÉHO POVRCHU

Obnovení původního vzhledu a trvanlivosti poškozené části prvku docílíme reprofilací. U reprofilace je nutné zvolit vhodný materiál se stejnými nebo podobnými vlastnostmi jako původní materiál (fyzikální, chemické, elektrochemické vlastnosti). Mezi hlavní hlídané vlastnosti patří smršťování, soudržnost, dotvarování, propustnost nebo teplotní součinitel délkové roztažnosti. Smršťování a dotvarování nové vrstvy betonu je problém, protože podkladní beton se již nesmršťuje. Smrštění je většinou omezeno maximální hodnotou 0,5‰ a dá se ovlivnit přidáním vláknové výztuže do betonové směsi. Použitím nepropustného nebo málopropustného reprofilačního materiálu se omezí vznik koroze výztuže. Teplotní součinitel délkové roztažnosti se musí pohybovat co nejbližně stávajícímu betonu, aby při teplotních změnách nedocházelo k napětí ve styku materiálů. Soudržnost původního betonu a reprofilačního materiálu je schematicky zobrazeno v řezu níže (Obr. 25). [34] Pro reprofilaci povrchu se podle tloušťky opravované vrstvy používá ručně nanášená cementová malta, beton, plastbeton, stříkaný beton (suchá nebo mokrá aplikace) a jiné. [35]



Obr. 25 Mechanismus přidrženosti na styku [30]

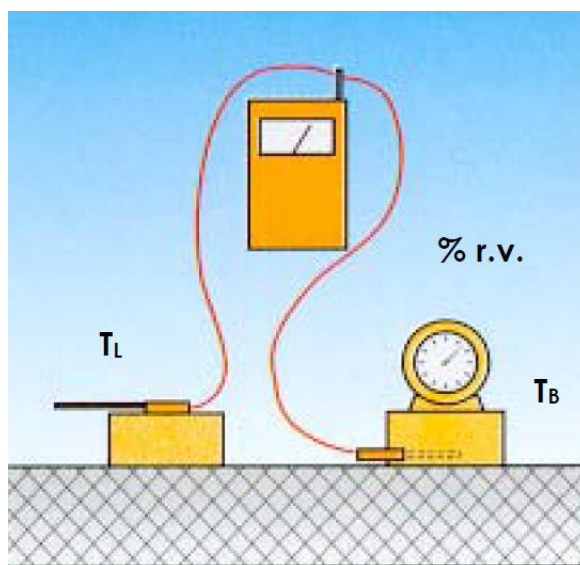


2.4.4 ZESILOVÁNÍ FRP MATERIÁLY

❖ ZESILOVÁNÍ POMOCÍ LAMEL

Nejprve je třeba si zvolit typ a rozměry lamely podle výpočtu (kap. 2.5). Lamely se nejčastěji vyrábějí v tloušťce 1,2 nebo 1,4 mm. Šířka je různá podle výrobce (např. 50, 80, 100 mm). Typy lamel se rozlišují podle použití na povrch betonu, oceli nebo dřeva. Pro zakřivené hrany se používají lamely ve tvaru „L“, které mají poloměr zaoblení minimálně 25 mm. [32]

Lamely se aplikují na připravený povrch, který nesmí být mokrá, zkarbonatovaný a splňuje požadavky na odtrhovou pevnost povrchu v rozmezí 1,5 až 2 MPa. Pro dosažení napjatosti lamely a zmenšení průhybu konstrukce se musí konstrukce dočasně podepřít například hydraulickým zvedákem. Při aplikaci je nutné sledovat okolní podmínky jako je teplota vzduchu, teplota podkladu, rosný bod a vlhkost podkladu, která musí být menší než 4%. [32]



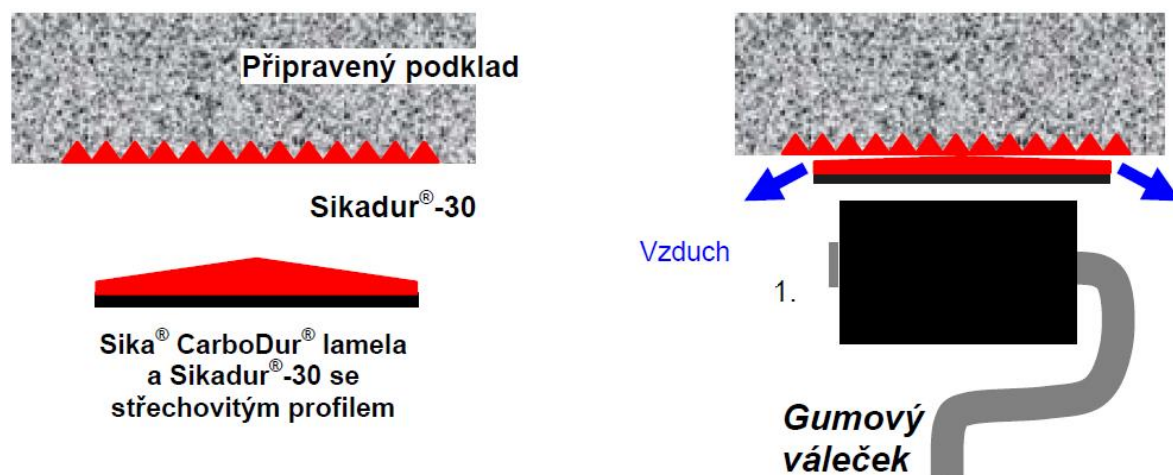
Obr. 26 Schéma měření okrajových podmínek [32]

Lamela se před lepením očistí od prachu a nečistot pomocí bílého hadříku a čističe, který je k tomu určen. Čistí se vždy strana, která se lepí na konstrukci z důvodu lepší přilnavosti materiálů. Ve většině případů se jedná o stranu bez potisku. [32]



Následně se namíchá epoxidové lepidlo. Jedná se o dvousložkové lepidlo, které se skládá ze složky A (bílé barvy) a složky B (černé barvy). Mísící poměr udává vždy výrobce lepidla. Například výrobce Sika udává mísící poměr A:B = 3:1. Nejprve si promícháme složku B, kterou poté přidáme ke složce A. Mícháme směs elektrickým šroubovým míchadlem při nízkých otáčkách (max. 500 ot/min). Mícháme do doby, dokud nebudou obě složky řádně spojeny a nevznikají barevné šmouhy. Výsledná barva lepidla je šedá. [32]

Lepidlo se nanese na připravený povrch v tloušťce 1 mm tak, aby lepidlo bylo dostatečně vetřené do podkladu a všechny póry byly zaplněny. V dalším kroku nanese lepidlo na povrch lamely určený k lepení (většinou se jedná o stranu bez potisku) pomocí speciálně vytvarované stěrky (ve tvaru stříšky nebo koryta). Výška lepidla je v místě stříšky přibližně 2 mm. Při aplikaci se uvažuje spotřeba 0,4 až 1 kg/m. Následně lamelu s lepidlem umístíme na připravené místo na konstrukci. Přitlačíme ji rovnoměrně pomocí gumového válečku tak, aby mezi lamelou a konstrukcí byla tloušťka epoxidového lepidla minimálně 1 mm. Přebytečné lepidlo na krajích lamely bude po dokončení aplikace odstraněno. Lamely jsou na svých koncích kotveny do drážek, aby se zabránilo odloupenutí. Po vytvrzení lepidla se lamela vyzkouší na dutá místa opatrným poklepáváním nebo prostřednictvím infračervené termografie. Kontrolu vyžadují především místa křížení a kotvení lamel. [32]



Obr. 27 Schéma lepení lamely [32]



❖ ZESILOVÁNÍ POMOCÍ TKANIN

Povrch konstrukce musí být připravený stejně jako v předchozí kapitole (zesilování pomocí lamel). Vždy se provádí test přilnavosti, kdy povrch musí mít dostatečnou pevnost v tahu a poskytovat min. odtrhovou sílu 1 MPa. Lepený povrch konstrukce srovnáme do naprosté roviny s maximální odchylkou 2 mm na 0,3 m délky. Hrany konstrukce musí být zaobleny (minimální poloměr 10 mm). Zaoblení se dosáhne broušením nebo pomocí malty. Jako lepidlo se používá pryskyřice, která se opět namíchá na místě ze složky A a složky B. Tkaniny mají dva způsoby aplikace – suchá a mokrá aplikace. [36]

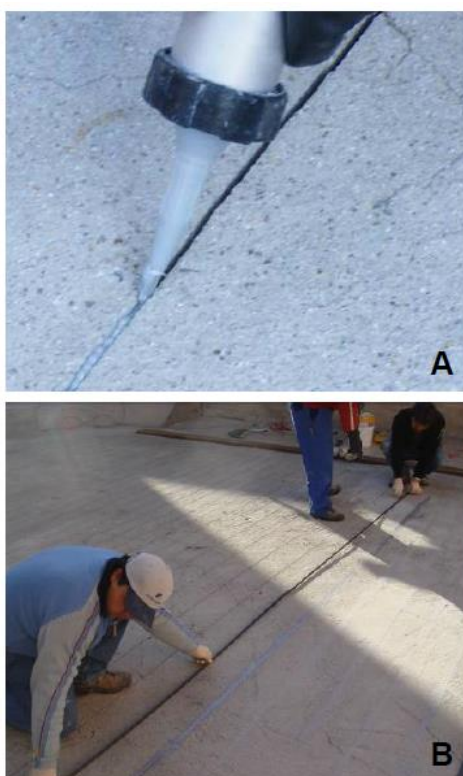
Suchá aplikace se doporučuje používat pro instalaci tkanin s plošnou hmotností menší než 450 g/m². Nejprve se rovnoměrně nanese pryskyřice na připravený povrch konstrukce pomocí válečku, štětky nebo zednické lžice. Pryskyřice musí vyplnit dutiny a nerovnosti na podkladu. Spotřeba pryskyřice se uvádí 0,5 až 1 kg/m². Suchá tkanina se vloží a následně zatlačí do pryskyřice pomocí plastového válečku. Směr zatlačování musí být vždy ve směru vláken. Suchá tkanina se tímto způsobem prosytí, až se na závěr na celém povrchu vytvoří vrstva lepidla. Poté, co je tkanina zcela impregnována, se odstraní přebytek pryskyřice plastickou stěrkou. [36]

Mokrá aplikace se doporučuje používat pro instalaci tkanin s plošnou hmotností větší než 450 g/m². Postup je podobný jako u suché aplikace s rozdílem, že se suchá tkanina impregnuje předem. Na připravenou desku se nanese přibližně 2/3 předpokládaného množství pryskyřice, položí se navrch suchá tkanina a pomocí válečku se ve směru vláken zatlačuje. Poté se zbylá 1/3 pryskyřice nanese na vrchní vrstvu tkaniny. Na podkladní vrstvu konstrukce se nanese tenká vrstva pryskyřice a na ní se následně aplikuje naimpregnovaná tkanina, která se přitlačí plastovým válečkem a vytlačí se přebytečný vzduch. Na závěr dochází k vytvrzení a případnému nanesení další vrstvy. [36]



❖ ZESILOVÁNÍ POMOCÍ DODATEČNĚ VKLÁDANÉ VÝZTUŽE

Instalace dodatečně vkládané výztuže je možná na mírně poškozený nebo popraskaný beton. Tato metoda nevyžaduje ani povrchovou pevnost v tahu. Musí se zjistit umístění a hloubka uložení výztuže, uložení vedení a další materiály uvnitř konstrukce, které se nesmí porušit. Na povrchu konstrukce se pomocí diamantové kotoučové pily vyřeže drážka, která se následně očistí od prachu, nečistot nebo postříků. Povrch může být suchý nebo vlhký, ale nesmí se objevit stojící voda nebo námraza. Výběr lepidla je závislý na typu aplikace (horizontální, vertikální). Lepidlo se naplní do dávkovací pistole a následně se vyplní drážka od spodu nahoru. Výztuž se dodává v požadované délce nebo bude případně nařezána na místě. Tyče musíme otřít od nečistot a následně zatlačit do drážky s lepidlem. Pokud je potřeba, může se aplikovat další vrstva lepidla na zaplnění drážky. Na závěr se vyrovná povrch zednickou lžící, vytlačí se přebytečný vzduch a odstraní se přebytečné lepidlo. Tato metoda se dá aplikovat i s lamelami. [37]



Obr. 28 Dodatečné vkládání výztuže [37]



2.5 NÁVRH ZESÍLENÍ

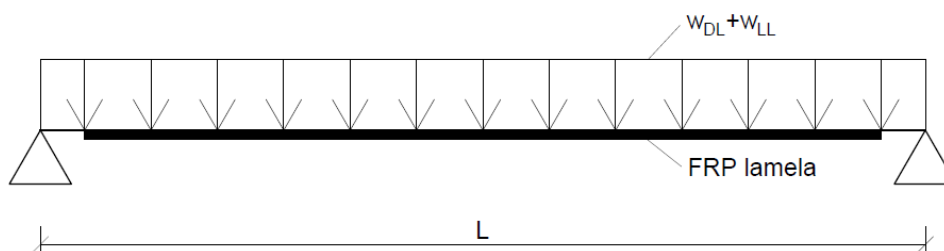
V kapitole je popsán postup výpočtu pro návrh zesílení jednostranně vyztužené konstrukce pomocí FRP lamel. Výpočet vychází z normy **ACI 440.2R-17**. Zkratka ACI znamená American Concrete Institute. Americká norma ACI 440.2R-17 popisuje návrh pro zpevnění železobetonových konstrukcí pomocí externě lepených FRP materiálů. Je zde popsán postup pro návrh zesílení lamelami nebo dodatečně vkládané výztuže. Uvedené symboly a názvy veličin v této práci vycházejí taktéž z normy ACI 440.2R-17. Práce se dále zaměřuje pouze na zesilování externě lepenými FRP lamelami.

2.5.1 Návrh zesílení ŽB nosníku externě lepenými FRP lamelami

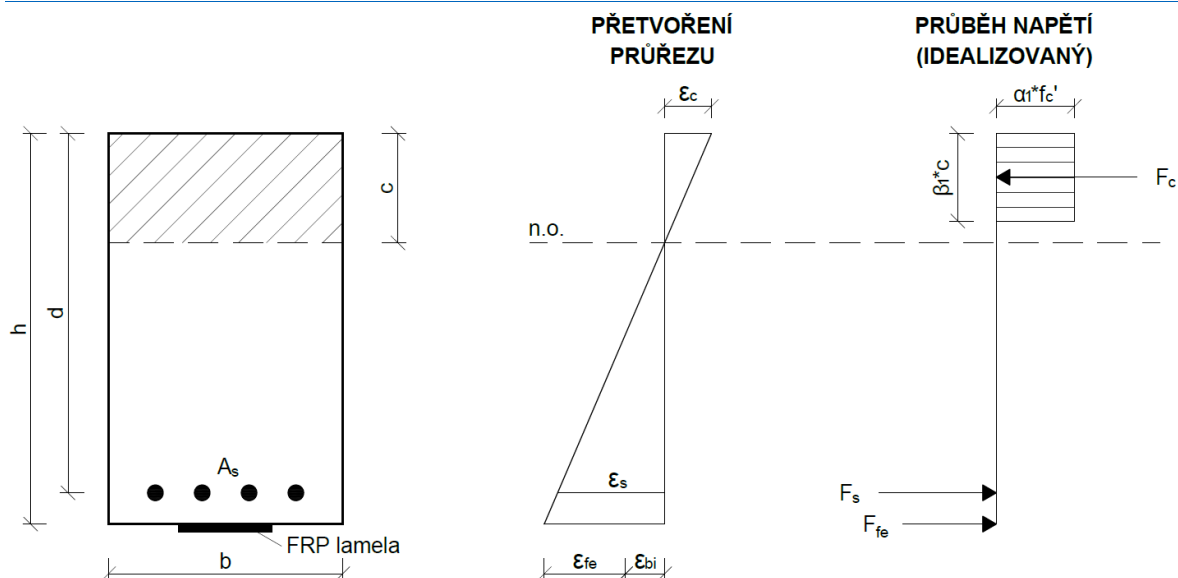
V této kapitole je popsán návrh zesílení železobetonového nosníku pomocí externě lepených FRP lamel. V prvním kroku se zjistí údaje o existujícím železobetonovém nosníku:

- nosník – délka, šířka, výška,
- materiál – třída betonu,
- vyztužení – třída oceli, umístění, průměr a počet prutů,
- zatížení – stálé, proměnné původní, proměnné předpokládané.

V dalším kroku se zvolí typ FRP lamely a vyhledají se její vlastnosti (rozměry, modul pružnosti, mezní přetvoření a pevnost v tahu). Následně můžeme začít s výpočtem momentů od zadaných zatížení.



Obr. 29 Schéma nosníku



Obr. 30 Schéma průřezu a vykreslení deformace a napětí

❖ VÝPOČET MOMENTŮ

Moment od stálého zatížení:

$$M_{DL} = \frac{1}{8} * w_{DL} * L^2 \quad (1.1a)$$

Moment od proměnného předpokládaného zatížení:

$$M_{LL} = \frac{1}{8} * w_{LL} * L^2 \quad (1.1b)$$

Moment od charakteristických zatížení:

$$M_s = M_{DL} + M_{LL} \quad (1.2)$$

- kde M_{DL} moment od stálého zatížení
 M_{LL} moment od proměnného předpokládaného zatížení
 M_s moment od charakteristických zatížení
 w_{DL} stálé zatížení
 w_{LL} proměnné předpokládané zatížení
 L délka nosníku



❖ MEZNÍ STAV ÚNOSNOSTI (MSÚ)

Dlouhodobý účinek okolního prostředí na FRP materiály může snižovat jejich vlastnosti. Z tohoto důvodu by měly být materiálové vlastnosti poskytnuté výrobcem sníženy pomocí redukčního součinitele C_E (viz Tab.5).

Návrhová pevnost v tahu FRP výztuže se stanoví:

$$f_{fu} = C_E * E_f * \varepsilon'_{fu} \quad (1.3)$$

- kde f_{fu} návrhová pevnost v tahu FRP výztuže
 C_E redukční součinitel pro FRP výztuž
 E_f modul pružnosti FRP výztuže
 ε'_{fu} zaručené mezní přetvoření FRP výztuže

Obdobně stanovíme i návrhové mezní přetvoření FRP výztuže:

$$\varepsilon_{fu} = C_E * \varepsilon'_{fu} \quad (1.4)$$

- kde ε_{fu} návrhové mezní přetvoření FRP výztuže
 C_E redukční součinitel pro FRP výztuž
 ε'_{fu} zaručené mezní přetvoření FRP výztuže

Typ prostředí	Typ vláken FRP materiálu	Redukční součinitel C_E
Vnitřní prostředí	Uhlíková	0,95
	Skleněná	0,75
	Aramidová	0,85
Vnější prostředí (mosty, mola a neuzavřené garáže)	Uhlíková	0,85
	Skleněná	0,65
	Aramidová	0,75
Agresivní prostředí (chemická prostředí a čistírny odpadních vod)	Uhlíková	0,85
	Skleněná	0,50
	Aramidová	0,70

Tab. 5 Redukční součinitel C_E [38] (upraveno)



Pro první výpočty se odhadne **předběžný součinitel pro účinnou výšku tlačené oblasti betonu β'_1** pomocí tabulky (Tab.6) v závislosti na zaručené pevnosti betonu v tlaku f'_c . Přímý výpočet se provede až dále (vzorec 1.23a).

f'_c [MPa]	β'_1
$17,24 \leq f'_c \leq 27,58$	0,85
$27,58 \leq f'_c \leq 55,16$	$0,85 - \frac{0,05 * [(f'_c * 145,038) - 4000]}{1000}$
$f'_c \geq 55,16$	0,65

Tab. 6 Předběžný součinitel β'_1 [39] (upraveno)

Dále se vypočítá modul pružnosti betonu, průřezová plocha betonářské výztuže, průřezová plocha externě lepené FRP výztuže, stupeň vyztužení podélnou betonářskou výztuží a podélnou FRP výztuží.

Modul pružnosti betonu se vypočítá pomocí vzorce:

$$E_c = 4700 * \sqrt{f'_c} \quad (1.5)$$

kde E_c modul pružnosti betonu
 f'_c zaručená válcová pevnost betonu v tlaku

Průřezová plocha betonářské výztuže se stanoví:

$$A_s = \frac{\pi * \varnothing^2}{4} * n_s \quad (1.6)$$

kde A_s průřezová plocha betonářské výztuže
 \varnothing průměr prutu betonářské výztuže
 n_s počet prutů betonářské výztuže

Výpočet průřezové plochy FRP výztuže:

$$A_f = n_f * t_f * b_f \quad (1.7)$$

kde A_f průřezová plocha FRP výztuže
 n_f počet FRP lamel
 t_f tloušťka FRP lamely
 b_f šířka FRP lamely



Stanoví se **výška tlačené oblasti průřezu** před zesílením:

$$c' = \frac{A_s * f_y}{\beta'_1 * b * f'_c} \quad (1.8)$$

- kde c' výška tlačené oblasti průřezu před zesílením
 A_s průřezová plocha betonářské výztuže
 f_y zaručená mez kluzu betonářské výztuže
 β'_1 předběžný součinitel pro účinnou výšku tlačené oblasti betonu
 b šířka průřezu
 f'_c zaručená válcová pevnost betonu v tlaku

Pro moment únosnosti nezesíleného průřezu se ještě vypočítá **rameno vnitřních sil**:

$$z = d - \frac{\beta'_1 * c'}{2} \quad (1.9)$$

- kde z rameno vnitřních sil
 d účinná výška průřezu
 β'_1 předběžný součinitel pro účinnou výšku tlačené oblasti betonu
 c' výška tlačené oblasti průřezu před zesílením

Moment únosnosti nezesílené konstrukce:

$$(Mn)_{w/o} = A_s * f_y * z \quad (1.10)$$

- kde $(Mn)_{w/o}$ moment únosnosti nezesílené konstrukce
 A_s průřezová plocha betonářské výztuže
 f_y zaručená mez kluzu betonářské výztuže
 z rameno vnitřních sil

Aby mohl být zadaný průřez vůbec zesílen, musí nezesílený průřez být schopný přenést část nového zatížení. To se ověří pomocí podmínky:

$$(Mn)_{w/o} > (1,1 * M_{DL} + 0,75 * M_{LL}) \quad (1.11)$$



Stupeň vyztužení podélnou betonářskou výztuží:

$$\rho_s = \frac{A_s}{b * d} \quad (1.12a)$$

Stupeň vyztužení podélnou FRP výztuží:

$$\rho_f = \frac{A_f}{b * d} \quad (1.12b)$$

- kde A_s průřezová plocha betonářské výztuže
 A_f průřezová plocha FRP výztuže
 b šířka průřezu
 d účinná výška průřezu

Při výpočtu se uvažuje rovnoměrné napětí v betonu, proto se musí ověřit předpoklad, že betonářská výztuž uvnitř průřezu je za mezí kluzu. Pokud by totiž výztuž za mezí kluzu nebyla, znamenalo by to, že konstrukce je nebezpečná (nevarovala by před kolapsem). Z tohoto důvodu je vyžadováno, aby u ohýbaných prvků byla vždy výztuž za mezí kluzu. Tento předpoklad lze ověřit pomocí **poměrné výšky tlačené oblasti**, která musí být menší (či rovna) normové hodnotě 0,45.

$$k = \sqrt{\left(\rho_s * \frac{E_s}{E_c} + \rho_f * \frac{E_f}{E_c}\right)^2 + 2 * \left(\rho_s * \frac{E_s}{E_c} + \rho_f * \frac{E_f}{E_c} * \left(\frac{h}{d}\right)\right)} - \left(\rho_s * \frac{E_s}{E_c} + \rho_f * \frac{E_f}{E_c}\right) \quad (1.13)$$

- kde k poměrná výška tlačené oblasti
 ρ_s stupeň vyztužení podélnou betonářskou výztuží
 ρ_f stupeň vyztužení podélnou FRP výztuží
 E_s modul pružnosti betonářské výztuže
 E_f modul pružnosti FRP výztuže
 h výška průřezu
 d účinná výška průřezu

Podmínka: $k \leq 0,45$



Pro další výpočet je potřeba stanovit moment setrvačnosti průřezu s trhlinami.

Předtím se však musí vypočítat **výška tlačené oblasti průřezu s trhlinami**

z rovnice pro jednostranně vyztužený průřez:

$$\frac{1}{2} * b * c_{cr}^2 = \frac{E_s}{E_c} * A_s * (d - c_{cr}) \quad (1.14)$$

Následně se vypočítá **moment setrvačnosti průřezu s trhlinami**:

$$I_{cr} = \frac{b * c_{cr}^3}{3} + \frac{E_s}{E_c} * A_s * (d - c_{cr})^2 \quad (1.15)$$

kde	I_{cr}	moment setrvačnosti průřezu s trhlinami
	b	šířka průřezu
	c_{cr}	výška tlačené oblasti průřezu s trhlinami
	E_s	modul pružnosti betonářské výztuže
	E_c	modul pružnosti betonu
	A_s	průřezová plocha betonářské výztuže
	d	účinná výška průřezu

Nyní se může pokračovat ve výpočtu **přetvoření betonu od stálého zatížení v době instalace FRP výztuže**:

$$\varepsilon_{bi} = \frac{M_{DL} * (h - k * d)}{I_{cr} * E_c} \quad (1.16)$$

kde	ε_{bi}	přetvoření betonu od stálého zatížení v době instalace FRP výztuže
	M_{DL}	moment od stálého zatížení
	h	výška průřezu
	k	poměrná výška tlačené oblasti
	d	účinná výška průřezu
	I_{cr}	moment setrvačnosti průřezu s trhlinami
	E_c	modul pružnosti betonu



Aby nedocházelo k přetržení externě lepené výztuže, musí se stanovit **maximální přetvoření FRP výztuže (při dosažení MSÚ)**, které musí být menší než 90% návrhového mezního přetvoření FRP výztuže:

$$\varepsilon_{fd} = 0,41 * \sqrt{\frac{f'_c}{n_f * t_f * E_f}} \leq 0,9 * \varepsilon_{fu} \quad (1.17)$$

kde	ε_{fd}	maximální přetvoření FRP výztuže (při dosažení MSÚ)
	f'_c	zaručená válcová pevnost betonu v tlaku
	n_f	počet FRP lamel
	t_f	tloušťka FRP lamely
	E_f	modul pružnosti FRP výztuže
	ε_{fu}	návrhové mezní přetvoření FRP výztuže

Pro další pokračování ve výpočtu se musí nejprve odhadnout výška tlačené oblasti železobetonového průřezu. Jedná se o vzdálenost neutrální osy od nejvíce tlačенého okraje průřezu. Počáteční **odhad výšky tlačené oblasti průřezu** se může stanovit odhadem nebo například pomocí vztahu:

$$c_o = 0,2 * d \quad (1.18)$$

kde	c_o	odhad výšky tlačené oblasti průřezu
	d	účinná výška průřezu

Poté, co se provedl odhad výšky tlačené oblasti, se může vypočítat **efektivní přetvoření FRP výztuže**. Efektivním přetvořením je myšleno, jak moc se může FRP lamela protáhnout, než dojde k porušení průřezu v ohybu. Podmínkou pro přetvoření je, aby bylo menší (či rovno) maximálnímu přetvoření FRP výztuže. Pokud by podmínka nevyhověla, bude se efektivní přetvoření rovnat maximálnímu přetvoření FRP výztuže.

$$\varepsilon_{fe} = 0,003 * \frac{h - c_o}{c_o} - \varepsilon_{bi} \leq \varepsilon_{fd} \quad (1.19)$$

Pokud $\varepsilon_{fe} > \varepsilon_{fd}$ tak $\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{fd}$



kde	ε_{fe}	efektivní přetvoření FRP výztuže
	h	výška průřezu
	c_o	odhad výšky tlačené oblasti průřezu
	ε_{bi}	přetvoření betonu od stálého zatížení v době instalace FRP výztuže
	ε_{fd}	maximální přetvoření FRP výztuže (při dosažení MSÚ)

Pomocí podobnosti trojúhelníku se dopočítá poměrné přetvoření pro beton a betonářskou výztuž. Pokud by přetvoření betonu vyšlo větší než 0,003, znamenalo by to, že dojde k tlakovému porušení průřezu. Americká norma umožňuje výpočet i při takovéto situaci a přetvoření betonu by se rovnalo 0,003.

Poměrné přetvoření betonu:

$$\varepsilon_c = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) * \frac{c_o}{h - c_o} \quad (1.20a)$$

Poměrné přetvoření betonářské výztuže:

$$\varepsilon_s = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) * \frac{d - c_o}{h - c_o} \quad (1.20b)$$

kde	ε_c	poměrné přetvoření betonu
	ε_s	poměrné přetvoření betonářské výztuže
	ε_{fe}	efektivní přetvoření FRP výztuže
	ε_{bi}	přetvoření betonu od stálého zat. v době instal. FRP výztuže
	c_o	odhad výšky tlačené oblasti průřezu
	d	účinná výška průřezu
	h	výška průřezu

Tahové napětí v betonářské výztuži vychází z Hookova zákona. Tahové napětí musí být menší (či rovno) než zaručená mez kluzu betonářské výztuže. Touto podmínkou se ověří, že betonářská výztuž je za mezí kluzu, což z hlediska bezpečnosti je vyžadováno. Pokud by podmínka nevyhověla, bude se tahové napětí rovnat zaručené mezi kluzu betonářské výztuže.

$$f_s = E_s * \varepsilon_s \leq f_y \quad (1.21a)$$

$$\text{Pokud } f_s > f_y \text{ tak } f_s = f_y$$



kde	f_s	tahové napětí v betonářské výztuži
	E_s	modul pružnosti betonářské výztuže
	ε_s	poměrné přetvoření betonářské výztuže
	f_y	zaručená mez kluzu betonářské výztuže

Podobně jako tahové napětí v betonářské výztuži se vypočítá i **efektivní tahové napětí v FRP výztuži**.

$$f_{fe} = E_f * \varepsilon_{fe} \quad (1.21b)$$

kde	f_{fe}	efektivní tahové napětí v FRP výztuži
	E_f	modul pružnosti FRP výztuže
	ε_{fe}	efektivní přetvoření FRP výztuže

Poměrné přetvoření betonu při dosažení pevnosti betonu:

$$\varepsilon'_c = \frac{1,7 * f'_c}{E_c} \quad (1.22)$$

kde	ε'_c	poměrné přetvoření betonu při dosažení pevnosti betonu
	f'_c	zaručená válcová pevnost betonu v tlaku
	E_c	modul pružnosti betonu

Nyní se přímým výpočtem vypočítá **součinitel pro účinnou výšku tlačené oblasti betonu β_1** a **součinitel definující pevnost betonu α_1** :

$$\beta_1 = \frac{4 * \varepsilon'_c - \varepsilon_c}{6 * \varepsilon'_c - 2 * \varepsilon_c} \quad (1.23a)$$

$$\alpha_1 = \frac{3 * \varepsilon'_c * \varepsilon_c - \varepsilon_c^2}{3 * \beta_1 * \varepsilon_c^2} \quad (1.23b)$$

kde	β_1	součinitel pro účinnou výšku tlačené oblasti betonu
	α_1	součinitel definující pevnost betonu
	ε'_c	poměrné přetvoření betonu při dosažení pevnosti betonu
	ε_c	poměrné přetvoření betonu



Dále se vypočítá přímým výpočtem **výška tlačené oblasti průřezu**:

$$c = \frac{A_s * f_s + A_f * f_{fe}}{\alpha_1 * f'_c * \beta_1 * b} \quad (1.24)$$

kde	c	výška tlačené oblasti průřezu
	A_s	průřezová plocha betonářské výztuže
	f_s	tahové napětí v betonářské výztuži
	A_f	průřezová plocha FRP výztuže
	f_{fe}	efektivní tahové napětí v FRP výztuži
	α_1	součinitel definující pevnost betonu
	f'_c	zaručená válcová pevnost betonu v tlaku
	β_1	součinitel pro účinnou výšku tlačené oblasti betonu
	b	šířka průřezu

Následně se porovná odhad a přímý výpočet výšky tlačené oblasti. Pokud se hodnoty neshodují, musí se provést nový odhad výšky tlačené oblasti a provést výpočet od vzorečku (1.15) znovu. Takto se postupuje do doby, než se bude odhad shodovat s výpočtem, a tím se dostane správná výsledná výška tlačené oblasti.

Poté, co se získá správný výsledek výšky tlačené oblasti, se může začít počítat moment únosnosti.

Příspěvek k momentu únosnosti od betonářské výztuže:

$$M_{ns} = A_s * f_s * \left(d - \frac{\beta_1 * c}{2} \right) \quad (1.25a)$$

Příspěvek k momentu únosnosti od FRP výztuže:

$$M_{nf} = A_f * f_{fe} * \left(h - \frac{\beta_1 * c}{2} \right) \quad (1.25b)$$

kde	M_{ns}	příspěvek k momentu únosnosti od betonářské výztuže
	M_{nf}	příspěvek k momentu únosnosti od FRP výztuže
	A_s	průřezová plocha betonářské výztuže
	f_s	tahové napětí v betonářské výztuži



d	účinná výška průřezu
β_1	součinitel pro účinnou výšku tlačené oblasti betonu
c	výška tlačené oblasti průřezu
A_f	průřezová plocha FRP výztuže
f_{fe}	efektivní tahové napětí v FRP výztuži
h	výška průřezu

Výsledný moment únosnosti konstrukce zesílené FRP lamelami:

$$M_n = M_{ns} + \psi_f * M_{nf} \quad (1.26)$$

kde	M_n	moment únosnosti konstrukce zesílené FRP lamelami
	M_{ns}	příspěvek k momentu únosnosti od betonářské výztuže
	ψ_f	(=0,85) redukční součinitel pevnosti FRP lamely
	M_{nf}	příspěvek k momentu únosnosti od FRP výztuže

Z důvodu bezpečnosti se musí výsledný moment únosnosti ještě zredukovat pomocí součinitele pro redukci únosnosti, který se vypočítá dle Tab.7.

Zredukováný moment únosnosti konstrukce zesílené FRP lamelami:

$$\phi * M_n \quad (1.27)$$

kde	ϕ	součinitel pro redukci únosnosti (Tab. 7)
	ϵ_s	poměrné přetvoření betonářské výztuže
	ϵ_{sy}	poměrné přetvoření výztuže na mezi kluzu

ϕ	0,9	pro	$\epsilon_s \geq 0,005$
	$0,65 + \frac{0,25 * (\epsilon_s - \epsilon_{sy})}{0,005 - \epsilon_{sy}}$	pro	$\epsilon_{sy} < \epsilon_s < 0,005$
	0,65	pro	$\epsilon_s \leq \epsilon_{sy}$

Tab. 7 Součinitel pro redukci únosnosti [38] (upraveno)



Moment od předpokládaných zatížení:

$$M_u = \frac{1}{8} * (1,2 * w_{DL} + 1,6 * w_{LL}) * L^2 \quad (1.28)$$

kde M_u moment od předpokládaných zatížení
 w_{DL} stálé zatížení
 w_{LL} proměnné zatížení
 L délka nosníku

Nyní se provede **podmínka spolehlivosti MSÚ** (mezního stavu únosnosti), která musí vyhovět. Pokud by nevyhověla, tak návrh zesílení konstrukce je špatný a musí se návrh zesílení změnit a vypočítat celý postup v této kapitole znovu.

Podmínka spolehlivosti MSÚ:

$$\phi * M_n \geq M_u \quad (1.29)$$

❖ **MEZNÍ STAV POUŽITELNOSTI (MSP)**

Mezní stav použitelnosti má za cíl posoudit, zda bude daná konstrukce schopna během své životnosti plnit svou funkci pro kterou byla navržena. Aby se zabránilo vzniku širokých trhlin a nadměrným přetvořením výztuže (a tím i celého nosníku), je zapotřebí posoudit zesílený průřez na mezní stav použitelnosti. Jelikož se posuzuje nosník na ohyb, je nejdůležitější omezit napětí ve výztuži. Z tohoto důvodu se vypočítá provozní napětí v betonářské a FRP výztuži a posoudí se s danými limity.

Provozní napětí v betonářské výztuži:

$$f_{s,s} = \frac{\left(M_s + \varepsilon_{bi} * A_f * E_f * \left(h - \frac{k*d}{3}\right)\right) * (d - k*d) * E_s}{A_s * E_s * \left(d - \frac{k*d}{3}\right) * (d - k*d) + A_f * E_f * \left(h - \frac{k*d}{3}\right) * (h - k*d)} \quad (1.30)$$

Podmínka: $f_{s,s} \leq 0,8 * f_y$



kde	$f_{s,s}$	provozní napětí v betonářské výztuži
	M_s	moment od charakteristických zatížení
	ε_{bi}	přetvoření betonu od stálého zatížení v době instalace FRP výztuže
	A_f	průřezová plocha FRP výztuže
	E_f	modul pružnosti FRP výztuže
	h	výška průřezu
	k	poměrná výška tlačené oblasti
	d	účinná výška průřezu
	E_s	modul pružnosti betonářské výztuže
	A_s	průřezová plocha betonářské výztuže

Provozní napětí v FRP výztuži:

$$f_{f,s} = f_{s,s} * \left(\frac{E_f}{E_s}\right) * \left(\frac{h - k * d}{d - k * d}\right) - \varepsilon_{bi} * E_f \quad (1.31)$$

Podmínka: $f_{f,s} \leq 0,55 * f_{fu}$

kde	$f_{f,s}$	provozní napětí v FRP výztuži
	$f_{s,s}$	provozní napětí v betonářské výztuži
	E_f	modul pružnosti FRP výztuže
	E_s	modul pružnosti betonářské výztuže
	h	výška průřezu
	k	poměrná výška tlačené oblasti
	d	účinná výška průřezu
	ε_{bi}	přetvoření betonu od stálého zatížení v době instalace FRP výztuže

❖ ZÁVĚR

Pokud se ve výpočtu splnili všechny dané podmínky, může se návrh považovat za správný a je možné tento návrh zesílení železobetonového prvku pomocí externě lepených FRP lamel zrealizovat.



PRAKTICKÁ ČÁST



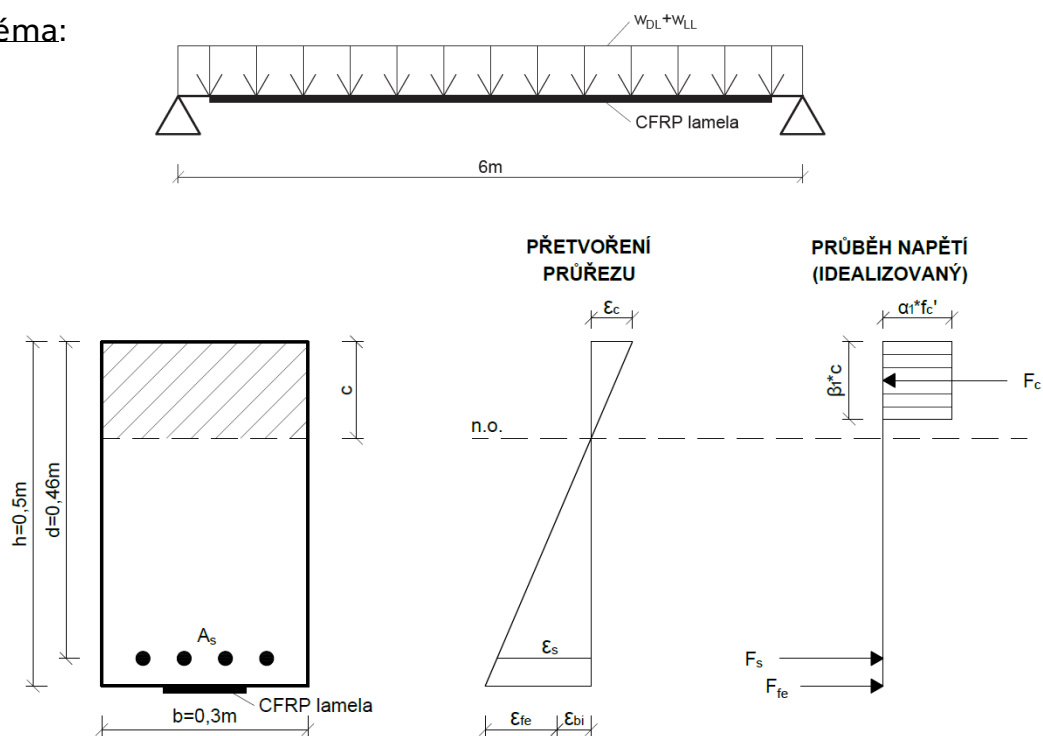
3. NÁVRH A POSOUZENÍ ZESÍLENÍ ŽB PRVKU POMOCÍ CFRP LAMEL

Pro praktickou ukázkou si uvedeme dva vzorové příklady, které budou vypočítány dle postupu uvedeného v kapitole 2.5. Výpočet vychází z normy ACI 440.2R-17. Výsledky v kapitole jsou zaokrouhleny. Pro přesnější výpočet byl využit tabulkový software Microsoft Excel. Jedná se o stávající železobetonový nosník, který bude v budoucnu přitížen větším proměnným zatížením. Z tohoto důvodu potřebujeme navrhnout a posoudit zesílení nosníku pomocí CFRP lamel.

3.1 VZOROVÝ PŘÍKLAD – 1x CFRP lamela

Železobetonový prostě uložený nosník obdélníkového průřezu 300x500 mm z betonu C30/37 je vyztužen 4 pruty o průměru 20 mm nosné výztuže B500B. Krytí nosné výztuže se odhaduje 30 mm. Teoretická vzdálenost podpor je 6 m. Nosník je zatížen stálým zatížením o velikosti 24 kN/m a proměnným spojitým rovnoměrným zatížením o velikosti 10 kN/m. Nové proměnné spojitě zatížení se předpokládá o velikosti 16 kN/m.

Schéma:



Obr. 31 Schéma a vykreslení nosníku č.1



Zvolená lamela: Sanax CarboLamela (typ M)

Vstupní parametry výpočtu		
ZATÍŽENÍ		
$w_{DL} =$	24 kN/m	Stálé zatížení
$w_{LL,p} =$	10 kN/m	Proměnné původní zatížení
$w_{LL} =$	16 kN/m	Proměnné předpokládané zatížení
NOSNÍK		
$L =$	6 000 mm	Délka nosníku
$h =$	500 mm	Výška průřezu
$b =$	300 mm	Šířka průřezu
$d =$	460 mm	Účinná výška průřezu
$f'_c =$	30 Mpa	Zaručená válcová pevnost betonu v tlaku
VÝZTUŽ (uvnitř průřezu)		
$f_y =$	500 Mpa	Zaručená mez kluzu betonářské výztuže
$n_s =$	4 x	Počet prutů betonářské výztuže
$\varnothing =$	20 mm	Průměr prutu betonářské výztuže
$E_s =$	205 000 Mpa	Modulu pružnosti betonářské výztuže
CFRP VÝZTUŽ (návrh)		
$n_f =$	1 x	Počet FRP lamel
$b_f =$	120 mm	Šířka FRP lamely
$t_f =$	1,4 mm	Tloušťka FRP lamely
$\epsilon'_{fu} =$	0,0141	Zaručené mezní přetvoření FRP výztuže
$E_f =$	210 000 Mpa	Modulu pružnosti FRP výztuže

Tab. 8 Vstupní parametry výpočtu č. 1

❖ VÝPOČET MOMENTŮ

Moment od stálého zatížení:

$$M_{DL} = \frac{1}{8} * w_{DL} * L^2 = \frac{1}{8} * 24 * 6^2 = 108 \text{ kNm}$$

Moment od proměnného předpokládaného zatížení:

$$M_{LL} = \frac{1}{8} * w_{LL} * L^2 = \frac{1}{8} * 16 * 6^2 = 72 \text{ kNm}$$

Moment od charakteristických zatížení:

$$M_s = M_{DL} + M_{LL} = 108 + 72 = 180 \text{ kNm}$$



❖ MEZNÍ STAV ÚNOSNOSTI (MSÚ)

Na základě vstupních hodnot se dopočítají další potřebné hodnoty pro výpočet. Pro náš příklad platí vnitřní prostředí s uhlíkovými vlákny, tudíž dle Tab.5 je redukční součinitel C_E roven 0,95.

Návrhová pevnost v tahu FRP výztuže:

$$f_{fu} = C_E * E_f * \varepsilon'_{fu} = 0,95 * 210\,000 * 0,0141 = \mathbf{2\,813\,MPa}$$

Návrhové mezní přetvoření FRP výztuže:

$$\varepsilon_{fu} = C_E * \varepsilon'_{fu} = 0,95 * 0,0141 = \mathbf{0,0134}$$

Modul pružnosti betonu:

$$E_c = 4\,700 * \sqrt{f'_c} = 4\,700 * \sqrt{30} = \mathbf{25\,743\,MPa}$$

Průřezová plocha betonářské výztuže:

$$A_s = \frac{\pi * \varnothing^2}{4} * n = \frac{\pi * 20^2}{4} * 4 = \mathbf{1\,256,64\,mm^2}$$

Průřezová plocha FRP výztuže:

$$A_f = n_f * t_f * b_f = 1 * 1,4 * 120 = \mathbf{168\,mm^2}$$

Předběžný součinitel pro účinnou výšku tlačené oblasti betonu:

$$\begin{aligned} \beta'_1 &= 0,85 - \frac{0,05 * [(f'_c * 145,038) - 4000]}{1\,000} = \\ &= 0,85 - \frac{0,05 * [(30 * 145,038) - 4\,000]}{1\,000} = \mathbf{0,832} \end{aligned}$$

Výška tlačené oblasti průřezu před zesílením:

$$c' = \frac{A_s * f_y}{\beta'_1 * b * f'_c} = \frac{1\,256,64 * 500}{0,832 * 300 * 30} = \mathbf{83,91\,mm}$$



Rameno vnitřních sil:

$$z = d - \frac{\beta'_1 * c'}{2} = 460 - \frac{0,832 * 83,91}{2} = \mathbf{425,09 \text{ mm}}$$

Moment únosnosti nezesílené konstrukce:

$$(Mn)_{w/o} = A_s * f_y * z = (1\,256,6 * 500 * 425,09) / 10^6 = \mathbf{267,08 \text{ kNm}}$$

$$(Mn)_{w/o} = 267,08 \text{ kNm} > (1,1 * M_{DL} + 0,75 * M_{LL}) = 172,8 \text{ kNm}$$

Podmínka splněna. Je možné nosník zesílit.

Stupeň vyztužení podélnou betonářskou výztuží:

$$\rho_s = \frac{A_s}{b * d} = \frac{1\,256,64}{300 * 460} = \mathbf{0,0091}$$

Stupeň vyztužení podélnou FRP výztuží:

$$\rho_f = \frac{A_f}{b * d} = \frac{168}{300 * 460} = \mathbf{0,0012}$$

Poměrná výška tlačené oblasti:

$$\begin{aligned} k &= \sqrt{\left(\rho_s * \frac{E_s}{E_c} + \rho_f * \frac{E_f}{E_c}\right)^2 + 2 * \left(\rho_s * \frac{E_s}{E_c} + \rho_f * \frac{E_f}{E_c} * \left(\frac{h}{d}\right)\right) - \left(\rho_s * \frac{E_s}{E_c} + \rho_f * \frac{E_f}{E_c}\right)} = \\ &= \sqrt{\left(0,0091 * \frac{205\,000}{25\,743} + 0,0012 * \frac{210\,000}{25\,743}\right)^2 + 2 * \left(0,0091 * \frac{205\,000}{25\,743} + 0,0012 * \frac{210\,000}{25\,743} * \left(\frac{500}{460}\right)\right)} \\ &\quad - \left(0,0091 * \frac{205\,000}{25\,743} + 0,0012 * \frac{210\,000}{25\,743}\right) = \mathbf{0,334} < \mathbf{0,45} \end{aligned}$$

Výška tlačené oblasti průřezu s trhlinami:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} * b * c_{cr}^2 &= \frac{E_s}{E_c} * A_s * (d - c_{cr}) \\ \frac{1}{2} * 300 * c_{cr}^2 &= \frac{205\,000}{25\,743} * 1\,256,64 * (460 - c_{cr}) \\ c_{cr} &= \mathbf{144,97 \text{ mm}} \end{aligned}$$

Pozn.: c_{cr} jsem vypočítala z rovnice pomocí kalkulačky CASIO CLASSWIZ FX 991 CE X.



Moment setrvačnosti průřezu s trhlinami:

$$\begin{aligned} I_{cr} &= \frac{b * c_{cr}^3}{3} + \frac{E_s}{E_c} * A_s * (d - c_{cr})^2 = \\ &= \frac{300 * 144,97^3}{3} + \frac{205\,000}{25\,743} * 1\,256,64 * (460 - 144,97)^2 = \\ &= \mathbf{1\,297\,810\,095\,mm^4} \end{aligned}$$

Přetvoření betonu od stálého zatížení v době instalace FRP výztuže:

$$\varepsilon_{bi} = \frac{M_{DL} * (h - k * d)}{I_{cr} * E_c} = \frac{108 * 10^6 * (500 - 0,334 * 460)}{1\,297\,810\,095 * 25\,743} = \mathbf{0,0011197}$$

Maximální přetvoření FRP výztuže (při dosažení MSÚ):

$$\begin{aligned} \varepsilon_{fd} &= 0,41 * \sqrt{\frac{f'_c}{n_f * t_f * E_f}} = 0,41 * \sqrt{\frac{30}{1 * 1,4 * 210\,000}} = \mathbf{0,0041416} \\ \varepsilon_{fd} &= 0,0041416 < (0,9 * \varepsilon_{fu}) = 0,012 \end{aligned}$$

Podmínka byla splněna.

Pro pokračování ve výpočtu se musí stanovit iteračním postupem (uvedeném v kapitole 2.5) výška tlačené oblasti (vzdálenost neutrální osy od nejvíce tlačného okraje průřezu).

Odhad výšky tlačené oblasti průřezu:

$$c_o = \mathbf{132,2\,mm}$$

Efektivní přetvoření FRP výztuže:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{fe} &= 0,003 * \frac{h - c_o}{c_o} - \varepsilon_{bi} = 0,003 * \frac{500 - 132,2}{132,2} - 0,0011197 = 0,0072268 \\ \varepsilon_{fe} &= 0,0072268 \not\leq \varepsilon_{fd} = 0,0041416 \end{aligned}$$

Podmínka neplatí tudíž: $\varepsilon_{fe} = \mathbf{0,0041416}$



Poměrné přetvoření betonu:

$$\varepsilon_c = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) * \frac{c_o}{h - c_o} = (0,0041416 + 0,0011197) * \frac{132,2}{500 - 132,2} = \mathbf{0,0018911}$$

Poměrné přetvoření betonářské výztuže:

$$\varepsilon_s = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) * \frac{d - c_o}{h - c_o} = (0,0041416 + 0,0011197) * \frac{460 - 132,2}{500 - 132,2} = \mathbf{0,0046891}$$

Tahové napětí v betonářské výztuži:

$$f_s = E_s * \varepsilon_s = 205\,000 * 0,0046891 = 961,27 \text{ MPa}$$

$$f_s = 961,27 \text{ MPa} \not\leq f_y = 500 \text{ MPa}$$

Podmínka neplatí tudíž: $f_s = \mathbf{500 \text{ MPa}}$

Podmínka nevyhověla, z čehož vyplývá, že betonářská výztuž uvnitř průřezu je za mezí kluzu, což je z důvodu bezpečnosti vyžadováno.

Efektivní tahové napětí v FRP výztuži:

$$f_{fe} = E_f * \varepsilon_{fe} = 210\,000 * 0,0041416 = \mathbf{869,74 \text{ MPa}}$$

Poměrné přetvoření betonu při dosažení pevnosti betonu:

$$\varepsilon'_c = \frac{1,7 * f'_c}{E_c} = \frac{1,7 * 30}{25\,743} = \mathbf{0,0019811}$$

Součinitel pro účinnou výšku tlačené oblasti betonu:

$$\beta_1 = \frac{4 * \varepsilon'_c - \varepsilon_c}{6 * \varepsilon'_c - 2 * \varepsilon_c} = \frac{4 * 0,0019811 - 0,0018911}{6 * 0,0019811 - 2 * 0,0018911} = \mathbf{0,744}$$

Součinitel definující pevnost betonu:

$$\alpha_1 = \frac{3 * \varepsilon'_c * \varepsilon_c - \varepsilon_c^2}{3 * \beta_1 * \varepsilon_c^2} = \frac{3 * 0,0019811 * 0,0018911 - 0,0018911^2}{3 * 0,744 * 0,0018911^2} = \mathbf{0,874}$$



Výpočet výšky tlačené oblasti průřezu:

$$c = \frac{A_s * f_s + A_f * f_{fe}}{\alpha_1 * f'_c * \beta_1 * b} = \frac{1\,256,64 * 500 + 168 * 869,74}{0,874 * 30 * 0,744 * 300} = \mathbf{132,2\text{ mm}}$$

Porovná se odhad a výpočet výšky tlačené oblasti. Hodnoty se shodují, tudíž je výsledná výška tlačené oblasti správná a může se ve výpočtu pokračovat dále.

Příspěvek k momentu únosnosti od betonářské výztuže:

$$M_{ns} = A_s * f_s * \left(d - \frac{\beta_1 * c}{2} \right) = 1\,256,64 * 500 * \left(460 - \frac{0,744 * 132,2}{2} \right) * 10^{-6}$$

$$\mathbf{M_{ns} = 258,11\text{ kNm}}$$

Příspěvek k momentu únosnosti od FRP výztuže:

$$M_{nf} = A_f * f_{fe} * \left(h - \frac{\beta_1 * c}{2} \right) = 168 * 869,74 * \left(500 - \frac{0,744 * 132,2}{2} \right) = \mathbf{65,87\text{ kNm}}$$

V tomto případě platí, že $\varepsilon_{sy} \left(= \frac{f_y}{E_s} = 0,00244 \right) < \varepsilon_s (= 0,0046891) < \mathbf{0,005}$,

tudíž dle Tab.7 se musí vypočítat součinitel pro redukci únosnosti dle vzorce:

$$\phi = 0,65 + \frac{0,25 * (\varepsilon_s - \varepsilon_{sy})}{0,005 - \varepsilon_{sy}} = 0,65 + \frac{0,25 * (0,0046891 - 0,00244)}{0,005 - 0,00244} = \mathbf{0,87}$$

Moment únosnosti konstrukce zesílené FRP lamelami:

$$M_n = M_{ns} + \psi_f * M_{nf} = 258,11 + 0,85 * 65,87 = \mathbf{314,1\text{ kNm}}$$

$$\phi * M_n = 0,87 * 314,1 = \mathbf{273,15\text{ kNm}}$$

Moment od předpokládaných zatížení:

$$M_u = \frac{1}{8} * (1,2 * w_{DL} + 1,6 * w_{LL}) * L^2 = \frac{1}{8} * (1,2 * 24 + 1,6 * 16) * 6^2 = \mathbf{244,8\text{ kNm}}$$

Podmínka spolehlivosti MSÚ:

$$\phi * M_n \geq M_u$$

$$273,15\text{ kNm} > 244,8\text{ kNm}$$

Podmínka byla splněna.



❖ MEZNÍ STAV POUŽITELNOSTI (MSP)

Provozní napětí v betonářské výztuži:

$$f_{s,s} = \frac{\left(M_s + \varepsilon_{bi} * A_f * E_f * \left(h - \frac{k * d}{3} \right) \right) * (d - k * d) * E_s}{A_s * E_s * \left(d - \frac{k * d}{3} \right) * (d - k * d) + A_f * E_f * \left(h - \frac{k * d}{3} \right) * (h - k * d)}$$
$$= \frac{\left(180 + 0,0011197 * 168 * 210\,000 * \left(500 - \frac{0,334 * 460}{3} \right) \right) * (460 - 0,334 * 460) * 205\,000}{1\,256,64 * 205\,000 * \left(460 - \frac{0,334 * 460}{3} \right) * (460 - 0,334 * 460) + 168 * 210\,000 * \left(500 - \frac{0,334 * 460}{3} \right) * (500 - 0,334 * 460)}$$

$$f_{s,s} = 328,99 \text{ MPa}$$

Podmínka:

$$f_{s,s} \leq 0,8 * f_y$$

$$328,99 \text{ MPa} < 400 \text{ MPa}$$

Podmínka byla splněna.

Provozní napětí v FRP výztuži:

$$f_{f,s} = f_{s,s} * \left(\frac{E_f}{E_s} \right) * \left(\frac{h - k * d}{d - k * d} \right) - \varepsilon_{bi} * E_f$$
$$f_{f,s} = 328,99 * \left(\frac{210\,000}{205\,000} \right) * \left(\frac{500 - 0,334 * 460}{460 - 0,334 * 460} \right) - 0,0011197 * 210\,000$$

$$f_{f,s} = 145,88 \text{ MPa}$$

Podmínka:

$$f_{f,s} \leq 0,55 * f_{fu}$$

$$145,88 \text{ MPa} < 1\,547 \text{ MPa}$$

Podmínka byla splněna.

❖ ZÁVĚR

Podmínka spolehlivosti mezního stavu únosnosti vyhověla. Podmínky pro napětí v mezním stavu použitelnosti také vyhověly. Z tohoto důvodu lze považovat návrh za správný a je možné návrh zesílení zrealizovat.



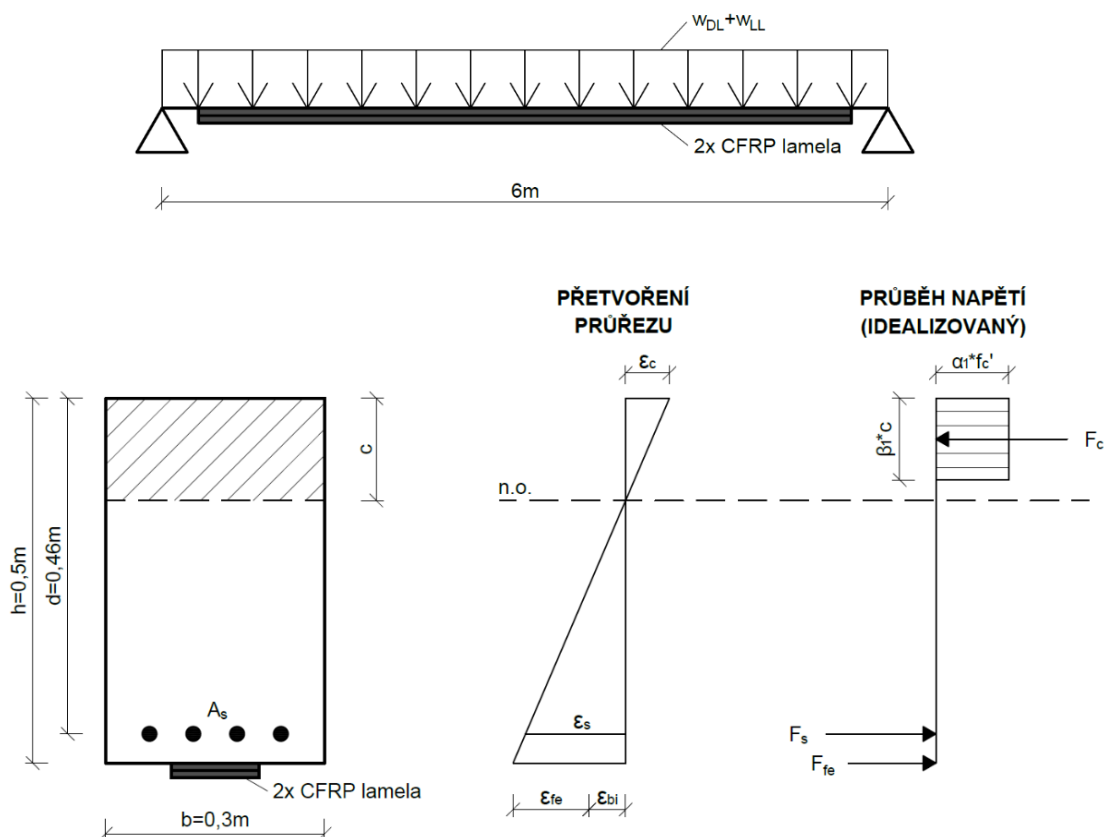
3.2 VZOROVÝ PŘÍKLAD – 2x CFRP lamela

V této kapitole bude proveden výpočet totožný s předchozím příkladem, který byl počítán v kapitole 3.1. Jedinou odlišností bude návrh zesílení, kdy místo jedné CFRP lamely zkusím navrhnout dvě. Lamely budou lepené na sobě.

Zadání vzorového příkladu:

Zadání je shodné jako v kapitole 3.1. Železobetonový prostě uložený nosník obdélníkového průřezu 300x500 mm z betonu C30/37 je vyztužen 4 pruty o průměru 20 mm nosné výztuže B500B. Krytí nosné výztuže se odhaduje 30 mm. Teoretická vzdálenost podpor je 6 m. Nosník je zatížen stálým zatížením o velikosti 24 kN/m a proměnným spojitým rovnoměrným zatížením o velikosti 10 kN/m. Nové proměnné spojitě zatížení se předpokládá o velikosti 16 kN/m.

Schéma:



Obr. 32 Schéma a vykreslení nosníku č.2



Zvolená lamela: Sanax CarboLamela (typ M)

Vstupní parametry výpočtu		
ZATÍŽENÍ		
$w_{DL} =$	24 kN/m	Stálé zatížení
$w_{LL,p} =$	10 kN/m	Proměnné původní zatížení
$w_{LL} =$	16 kN/m	Proměnné předpokládané zatížení
NOSNÍK		
$L =$	6 000 mm	Délka nosníku
$h =$	500 mm	Výška průřezu
$b =$	300 mm	Šířka průřezu
$d =$	460 mm	Účinná výška průřezu
$f'_c =$	30 Mpa	Zaručená válcová pevnost betonu v tlaku
VÝZTUŽ (uvnitř průřezu)		
$f_y =$	500 Mpa	Zaručená mez kluzu betonářské výztuže
$n_s =$	4 x	Počet prutů betonářské výztuže
$\varnothing =$	20 mm	Průměr prutu betonářské výztuže
$E_s =$	205 000 Mpa	Modulu pružnosti betonářské výztuže
CFRP VÝZTUŽ (návrh)		
$n_f =$	2 x	Počet FRP lamel
$b_f =$	120 mm	Šířka FRP lamely
$t_f =$	1,4 mm	Tloušťka FRP lamely
$\varepsilon'_{fu} =$	0,0141	Zaručené mezní přetvoření FRP výztuže
$E_f =$	210 000 Mpa	Modulu pružnosti FRP výztuže

Tab. 9 Vstupní parametry výpočtu č.2

❖ VÝPOČET MOMENTŮ

Moment od stálého zatížení:

$$M_{DL} = \frac{1}{8} * w_{DL} * L^2 = \frac{1}{8} * 24 * 6^2 = 108 \text{ kNm}$$

Moment od proměnného předpokládaného zatížení:

$$M_{LL} = \frac{1}{8} * w_{LL} * L^2 = \frac{1}{8} * 16 * 6^2 = 72 \text{ kNm}$$

Moment od charakteristických zatížení:

$$M_s = M_{DL} + M_{LL} = 108 + 72 = 180 \text{ kNm}$$



❖ MEZNÍ STAV ÚNOSNOSTI (MSÚ)

Na základě vstupních hodnot se dopočítají další potřebné hodnoty pro výpočet. Pro náš příklad platí vnitřní prostředí s uhlíkovými vlákny, tudíž dle Tab.5 je redukční součinitel C_E je roven 0,95.

Návrhová pevnost v tahu FRP výztuže:

$$f_{fu} = C_E * E_f * \varepsilon'_{fu} = 0,95 * 210\,000 * 0,0141 = \mathbf{2\,813\,MPa}$$

Návrhové mezní přetvoření FRP výztuže:

$$\varepsilon_{fu} = C_E * \varepsilon'_{fu} = 0,95 * 0,0141 = \mathbf{0,0134}$$

Modul pružnosti betonu:

$$E_c = 4\,700 * \sqrt{f'_c} = 4\,700 * \sqrt{30} = \mathbf{25\,743\,MPa}$$

Průřezová plocha betonářské výztuže:

$$A_s = \frac{\pi * \varnothing^2}{4} * n = \frac{\pi * 20^2}{4} * 4 = \mathbf{1\,256,64\,mm^2}$$

Průřezová plocha FRP výztuže:

$$A_f = n_f * t_f * b_f = 2 * 1,4 * 120 = \mathbf{336\,mm^2}$$

Předběžný součinitel pro účinnou výšku tlačené oblasti betonu:

$$\begin{aligned} \beta'_1 &= 0,85 - \frac{0,05 * [(f'_c * 145,038) - 4000]}{1\,000} = \\ &= 0,85 - \frac{0,05 * [(30 * 145,038) - 4\,000]}{1\,000} = \mathbf{0,832} \end{aligned}$$

Výška tlačené oblasti průřezu před zesílením:

$$c' = \frac{A_s * f_y}{\beta'_1 * b * f'_c} = \frac{1\,256,64 * 500}{0,832 * 300 * 30} = \mathbf{83,91\,mm}$$



Rameno vnitřních sil:

$$z = d - \frac{\beta'_1 * c'}{2} = 460 - \frac{0,832 * 83,91}{2} = \mathbf{425,09 \text{ mm}}$$

Moment únosnosti nezesílené konstrukce:

$$(Mn)_{w/o} = A_s * f_y * z = (1\,256,6 * 500 * 425,09) / 10^6 = \mathbf{267,08 \text{ kNm}}$$

$$(Mn)_{w/o} = 267,08 \text{ kNm} > (1,1 * M_{DL} + 0,75 * M_{LL}) = 172,8 \text{ kNm}$$

Podmínka splněna. Je možné nosník zesílit.

Stupeň vyztužení podélnou betonářskou výztuží:

$$\rho_s = \frac{A_s}{b * d} = \frac{1\,256,64}{300 * 460} = \mathbf{0,0091}$$

Stupeň vyztužení podélnou FRP výztuží:

$$\rho_f = \frac{A_f}{b * d} = \frac{336}{300 * 460} = \mathbf{0,0024}$$

Poměrná výška tlačené oblasti:

$$\begin{aligned} k &= \sqrt{\left(\rho_s * \frac{E_s}{E_c} + \rho_f * \frac{E_f}{E_c}\right)^2 + 2 * \left(\rho_s * \frac{E_s}{E_c} + \rho_f * \frac{E_f}{E_c} * \left(\frac{h}{d}\right)\right)} - \left(\rho_s * \frac{E_s}{E_c} + \rho_f * \frac{E_f}{E_c}\right) = \\ &= \sqrt{\left(0,0091 * \frac{205\,000}{25\,743} + 0,0024 * \frac{210\,000}{25\,743}\right)^2 + 2 * \left(0,0091 * \frac{205\,000}{25\,743} + 0,0024 * \frac{210\,000}{25\,743} * \left(\frac{500}{460}\right)\right)} \\ &\quad - \left(0,0091 * \frac{205\,000}{25\,743} + 0,0024 * \frac{210\,000}{25\,743}\right) = \mathbf{0,351} < \mathbf{0,45} \end{aligned}$$

Výška tlačené oblasti průřezu s trhlinami:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} * b * c_{cr}^2 &= \frac{E_s}{E_c} * A_s * (d - c_{cr}) \\ \frac{1}{2} * 300 * c_{cr}^2 &= \frac{205\,000}{25\,743} * 1\,256,64 * (460 - c_{cr}) \\ c_{cr} &= \mathbf{144,97 \text{ mm}} \end{aligned}$$

Pozn.: c_{cr} jsem vypočítala z rovnice pomocí kalkulačky CASIO CLASSWIZ FX 991 CE X.



Moment setrvačnosti průřezu s trhlinami:

$$\begin{aligned} I_{cr} &= \frac{b * c_{cr}^3}{3} + \frac{E_s}{E_c} * A_s * (d - c_{cr})^2 = \\ &= \frac{300 * 144,97^3}{3} + \frac{205\,000}{25\,743} * 1\,256,64 * (460 - 144,97)^2 = \\ &= \mathbf{1\,297\,810\,095\,mm^4} \end{aligned}$$

Přetvoření betonu od stálého zatížení v době instalace FRP výztuže:

$$\varepsilon_{bi} = \frac{M_{DL} * (h - k * d)}{I_{cr} * E_c} = \frac{108 * 10^6 * (500 - 0,351 * 460)}{1\,297\,810\,095 * 25\,743} = \mathbf{0,0010941}$$

Maximální přetvoření FRP výztuže (při dosažení MSÚ):

$$\begin{aligned} \varepsilon_{fd} &= 0,41 * \sqrt{\frac{f'_c}{n_f * t_f * E_f}} = 0,41 * \sqrt{\frac{30}{2 * 1,4 * 210\,000}} = \mathbf{0,0029286} \\ \varepsilon_{fd} &= 0,0029286 < (0,9 * \varepsilon_{fu}) = 0,012 \end{aligned}$$

Podmínka byla splněna.

Pro pokračování ve výpočtu se musí stanovit iteračním postupem (uvedeném v kapitole 2.5) výška tlačené oblasti (vzdálenost neutrální osy od nejvíce tlačeného okraje průřezu).

Odhad výšky tlačené oblasti průřezu:

$$c_o = \mathbf{150,09\,mm}$$

Efektivní přetvoření FRP výztuže:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{fe} &= 0,003 * \frac{h - c_o}{c_o} - \varepsilon_{bi} = 0,003 * \frac{500 - 150,09}{150,09} - 0,0010941 = 0,0058999 \\ \varepsilon_{fe} &= 0,0058999 \not\leq \varepsilon_{fd} = 0,0029286 \end{aligned}$$

Podmínka neplatí tudíž: $\varepsilon_{fe} = \mathbf{0,0029286}$



Poměrné přetvoření betonu:

$$\varepsilon_c = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) * \frac{c_o}{h - c_o} = (0,0029286 + 0,0010941) * \frac{150,09}{500 - 150,09} = \mathbf{0,0017255}$$

Poměrné přetvoření betonářské výztuže:

$$\varepsilon_s = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) * \frac{d - c_o}{h - c_o} = (0,0029286 + 0,0010941) * \frac{460 - 150,09}{500 - 150,09} = \mathbf{0,0035628}$$

Tahové napětí v betonářské výztuži:

$$f_s = E_s * \varepsilon_s = 205\,000 * 0,0035628 = 730,38 \text{ MPa}$$

$$f_s = 730,38 \text{ MPa} \not\leq f_y = 500 \text{ MPa}$$

Podmínka neplatí tudíž: $f_s = \mathbf{500 \text{ MPa}}$

Podmínka nevyhověla, z čehož vyplývá, že betonářská výztuž uvnitř průřezu je za mezí kluzu, což je z důvodu bezpečnosti vyžadováno.

Efektivní tahové napětí v FRP výztuži:

$$f_{fe} = E_f * \varepsilon_{fe} = 210\,000 * 0,0029286 = \mathbf{615 \text{ MPa}}$$

Poměrné přetvoření betonu při dosažení pevnosti betonu:

$$\varepsilon'_c = \frac{1,7 * f'_c}{E_c} = \frac{1,7 * 30}{25\,743} = \mathbf{0,0019811}$$

Součinitel pro účinnou výšku tlačené oblasti betonu:

$$\beta_1 = \frac{4 * \varepsilon'_c - \varepsilon_c}{6 * \varepsilon'_c - 2 * \varepsilon_c} = \frac{4 * 0,0019811 - 0,0017255}{6 * 0,0019811 - 2 * 0,0017255} = \mathbf{0,735}$$

Součinitel definující pevnost betonu:

$$\alpha_1 = \frac{3 * \varepsilon'_c * \varepsilon_c - \varepsilon_c^2}{3 * \beta_1 * \varepsilon_c^2} = \frac{3 * 0,0019811 * 0,0017255 - 0,0017255^2}{3 * 0,735 * 0,0019811^2} = \mathbf{0,841}$$



Výpočet výšky tlačené oblasti průřezu:

$$c = \frac{A_s * f_s + A_f * f_{fe}}{\alpha_1 * f'_c * \beta_1 * b} = \frac{1\,256,64 * 500 + 336 * 615}{0,841 * 30 * 0,735 * 300} = \mathbf{150,09\text{ mm}}$$

Porovná se odhad a výpočet výšky tlačené oblasti. Hodnoty se shodují, tudíž je výsledná výška tlačené oblasti správná a může se ve výpočtu pokračovat dále.

Příspěvek k momentu únosnosti od betonářské výztuže:

$$M_{ns} = A_s * f_s * \left(d - \frac{\beta_1 * c}{2} \right) = 1\,256,64 * 500 * \left(460 - \frac{0,735 * 150,09}{2} \right) * 10^{-6}$$

$$\mathbf{M_{ns} = 254,38\text{ kNm}}$$

Příspěvek k momentu únosnosti od FRP výztuže:

$$M_{nf} = A_f * f_{fe} * \left(h - \frac{\beta_1 * c}{2} \right) = 336 * 615 * \left(500 - \frac{0,735 * 150,09}{2} \right) = \mathbf{91,92\text{ kNm}}$$

V tomto případě platí, že $\varepsilon_{sy} \left(= \frac{f_y}{E_s} = 0,00244 \right) < \varepsilon_s (= 0,0035628) < \mathbf{0,005}$,

tudíž dle Tab.7 se musí vypočítat součinitel pro redukci únosnosti dle vzorce:

$$\phi = 0,65 + \frac{0,25 * (\varepsilon_s - \varepsilon_{sy})}{0,005 - \varepsilon_{sy}} = 0,65 + \frac{0,25 * (0,0035628 - 0,00244)}{0,005 - 0,00244} = \mathbf{0,76}$$

Moment únosnosti konstrukce zesílené FRP lamelami:

$$M_n = M_{ns} + \psi_f * M_{nf} = 254,38 + 0,85 * 91,92 = \mathbf{332,51\text{ kNm}}$$

$$\phi * M_n = 0,76 * 332,51 = \mathbf{252,61\text{ kNm}}$$

Moment od předpokládaných zatížení:

$$M_u = \frac{1}{8} * (1,2 * w_{DL} + 1,6 * w_{LL}) * L^2 = \frac{1}{8} * (1,2 * 24 + 1,6 * 16) * 6^2 = \mathbf{244,8\text{ kNm}}$$

Podmínka spolehlivosti MSÚ:

$$\phi * M_n \geq M_u$$

$$252,61\text{ kNm} > 244,8\text{ kNm}$$

Podmínka byla splněna.



❖ MEZNÍ STAV POUŽITELNOSTI (MSP)

Provozní napětí v betonářské výztuži:

$$f_{s,s} = \frac{\left(M_s + \varepsilon_{bi} * A_f * E_f * \left(h - \frac{k * d}{3} \right) \right) * (d - k * d) * E_s}{A_s * E_s * \left(d - \frac{k * d}{3} \right) * (d - k * d) + A_f * E_f * \left(h - \frac{k * d}{3} \right) * (h - k * d)} =$$
$$= \frac{\left(180 + 0,0010941 * 336 * 210\,000 * \left(500 - \frac{0,351 * 460}{3} \right) \right) * (460 - 0,351 * 460) * 205\,000}{1\,256,64 * 205\,000 * \left(460 - \frac{0,351 * 460}{3} \right) * (460 - 0,351 * 460) + 336 * 210\,000 * \left(500 - \frac{0,351 * 460}{3} \right) * (500 - 0,351 * 460)}$$

$$f_{s,s} = 313,27 \text{ MPa}$$

Podmínka:

$$f_{s,s} \leq 0,8 * f_y$$

$$313,27 \text{ MPa} < 400 \text{ MPa}$$

Podmínka byla splněna.

Provozní napětí v FRP výztuži:

$$f_{f,s} = f_{s,s} * \left(\frac{E_f}{E_s} \right) * \left(\frac{h - k * d}{d - k * d} \right) - \varepsilon_{bi} * E_f$$
$$f_{f,s} = 313,27 * \left(\frac{210\,000}{205\,000} \right) * \left(\frac{500 - 0,351 * 460}{460 - 0,351 * 460} \right) - 0,0010941 * 210\,000$$

$$f_{f,s} = 134,16 \text{ MPa}$$

Podmínka:

$$f_{f,s} \leq 0,55 * f_{fu}$$

$$134,16 \text{ MPa} < 1\,547 \text{ MPa}$$

Podmínka byla splněna.

❖ ZÁVĚR

Podmínka spolehlivosti mezního stavu únosnosti vyhověla. Podmínky pro napětí v mezním stavu použitelnosti také vyhověly. Z tohoto důvodu lze považovat návrh za správný a je možné návrh zesílení zrealizovat.



3.3 POROVNÁNÍ PŘÍKLADŮ

V této kapitole bude provedeno porovnání dvou příkladů (z kapitoly 3.1 a 3.2). Jedná se o železobetonový nosník obdélníkového jednostranně vyztuženého průřezu, který bude v budoucnu přitížen větším proměnným zatížením. Příklady jsou téměř totožné, až na návrh zesílení. Příklad z kapitoly 3.1 je zesílen pouze jednou lamelou, za to příklad z kapitoly 3.2 je zesílen dvěma lamelami. Níže v Tab.10 jsou uvedeny výsledky ručního výpočtu z kapitoly 3.1 a 3.2.

VELIČINA	VÝSLEDNÁ HODNOTA		JEDNOTKA
	1x LAMELA	2x LAMELA	
M_{DL}	108	108	kNm
M_{LL}	72	72	kNm
M_s	180	180	kNm
f_{fu}	2 813	2 813	MPa
ε_{fu}	0,0134	0,0134	
E_c	25 743	25 743	MPa
A_s	1 256,64	1 256,64	mm ²
A_f	168	336	mm ²
β'_1	0,832	0,832	
c'	83,91	83,91	mm
z	425,09	425,09	mm
$(Mn)_{w/o}$	267,08	267,08	kNm
ρ_s	0,0091	0,0091	
ρ_f	0,0012	0,0024	
k	0,334	0,351	
c_{cr}	144,97	144,97	mm
I_{cr}	1 297 810 095	1 297 810 095	mm ⁴
ε_{bi}	0,0011197	0,0010941	
ε_{fd}	0,0041416	0,0029286	
c	132,2	150,09	mm



VELIČINA	VÝSLEDNÁ HODNOTA		JEDNOTKA
	1x LAMELA (kap.3.1)	2x LAMELA (kap.3.2)	
ϵ_{fe}	0,0041416	0,0029286	
ϵ_c	0,0018911	0,0017255	
ϵ_s	0,0046891	0,0035628	
f_s	500	500	MPa
f_{fe}	869,74	615	MPa
ϵ'_c	0,0019811	0,0019811	
β_1	0,744	0,735	
α_1	0,874	0,841	
M_{ns}	258,11	254,38	kNm
M_{nf}	65,87	91,92	kNm
ϵ_{sy}	0,00244	0,00244	
ϕ	0,87	0,76	
M_n	314,1	332,51	kNm
$\phi * M_n$	273,15	252,61	kNm
M_u	244,8	244,8	kNm
$f_{s,s}$	328,99	313,27	MPa
$f_{f,s}$	145,88	134,16	MPa

Tab. 10 Porovnání výsledků z výpočtu

V tabulce výše jsou modře označeny hodnoty, které si nejsou rovny. Z důvodu dvojnásobného vyztužení u příkladu v kapitole 3.2 se nám samozřejmě zdvojnásobí i hodnoty průřezové plochy a stupeň vyztužení FRP výztuže.

Jelikož je nosník v kapitole 3.2 na spodní straně více vyztužen pomocí dvou lamel, dojde k menšímu průhybu a spodní tažená betonářská výztuž je méně přetvořena. Tento jev se nám projeví ve výpočtu tím, že výška tlačené oblasti průřezu bude pro druhý výpočet vyšší, a naopak všechna přetvoření pro betonářskou a FRP výztuž se sníží.



Ve druhém příkladu nám dojde také ke snížení napětí v FRP výztuži. To je vlivem spolupůsobení dvou lamel, které jsou nalepeny na sobě. V závěru se pro druhý příklad mírně zmenší příspěvek k momentu únosnosti od betonářské výztuže a více se zvětší příspěvek k momentu únosnosti od FRP výztuže, protože je větší zesílení pomocí dvou CFRP lamel a betonářská výztuž proto není tolik namáhaná. Výsledný moment únosnosti proto bude větší než u prvního příkladu s jednou lamelou. Jenže výsledný moment z důvodu bezpečnosti snižujeme součinitelem pro redukci únosnosti. Díky tomu ovšem dojde k výraznému snížení a zredukovaný moment únosnosti pro druhý příklad vyjde menší než pro první příklad s jednou lamelou. Tento jev je způsoben velkým vyztužením, kdy více výztuže vždy neznamena větší únosnost. Pokud je totiž prvek vyztužen příliš, dochází k menším přetvořením, dřívějšímu porušení a následnému kolapsu.



ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo vypracování literární rešerše o vláknových kompozitních materiálech (FRP materiálech) a o zesilování železobetonových konstrukcí externě lepenými kompozitními materiály.

První část práce je teoretickým přehledem, který se zabývá jednotlivými složkami jako jsou vlastnosti nebo typy vláken a pojiv. Následně jsou popsány různé technologie výroby kompozitů.

V druhé části se práce zaměřuje na zesilování železobetonových konstrukcí kompozitními materiály. Jsou zde uvedeny typy kompozitních vláknových výztuží pro zesilování konstrukcí, analýza vad a poruch konstrukcí, zjišťování stavu již stávající konstrukce, návrh zesílení a podrobný popis technologie zesilování stávajících konstrukcí.

Ve třetí části práce jsou uvedeny dva praktické příklady, kde se v obou příkladech jedná o totožný železobetonový jednostranně vyztužený nosník, který bude v budoucnu přitížen. Rozdíl je ovšem v návrhu zesílení, kde v prvním výpočtu je navržena pouze jedna uhlíková lamela a ve druhém výpočtu jsou navrženy dvě uhlíkové lamely na sobě. Po provedení výpočtu jsou výsledky porovnány. Porovnáním jsme zjistili zajímavost, že pokud v našem případě zdvojnásobíme FRP vyztužení na spodní straně nosníku, bude výsledná zredukovaná únosnost průřezu menší než při vyztužení pouze jednou lamelou. Tento jev je způsoben velkým vyztužením, kdy více výztuže vždy neznamena větší únosnost. Pokud je totiž prvek vyztužen příliš, dochází k menšímu přetvoření, dřívějšímu porušení a následnému kolapsu.

Téma kompozitních materiálů je v dnešní době velmi aktuální. Téma se stále vyvíjí a objevují se další možnosti využití kompozitů ve stavebnictví nebo i v jiných odvětvích, jako například v automobilovém průmyslu nebo strojírenství.



SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] JANČÁŘ, Josef. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2003. ISBN 80-214-2443-5.
- [2] JOHNSON, Todd. What is the Definition of a Composite Material? In: *ThoughtCo* [online]. 2021 [cit. 2023-03-09]. Dostupné z: <https://www.thoughtco.com/what-is-a-composite-820406>
- [3] KRATOCHVÍL, Bohumil, Václav ŠVORČÍK a Dalibor VOJTĚCH. *Úvod do studia materiálů*. 1. vyd. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2005. ISBN 80-708-0568-4.
- [4] JANDERA, Tomáš. *Diagnostický systém kompozitních materiálů* [online]. Plzeň, 2015 [cit. 2023-03-09]. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Václav Mentlík. Dostupné z: [https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/18890/1/DP_JanderaTommas_E13N0009P_Diagnosticky%20system%20kompozitnich%20materialu.pdf](https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/18890/1/DP_JanderaTomas_E13N0009P_Diagnosticky%20system%20kompozitnich%20materialu.pdf)
- [5] LAŠ, Vladislav. *Mechanika kompozitních materiálů*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2004. ISBN 80-704-3273-X.
- [6] VLČEK, Dalibor. *Technická dokumentace částí vyrobených z kompozitních materiálů* [online]. Brno, 2011 [cit. 2023-03-09]. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Josef Klement. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=39361



- [7] EHRENSTEIN, Gottfried Wilhelm. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [8] S-Glass Fiber High Strenght. In: *China Beihai Fiberglass* [online]. 2022 [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <https://www.fiberglassfiber.com/s-glass-fiber-high-strength-product/>
- [9] Carbon Fibers. In: *Teijin Limited* [online]. [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <https://www.teijin.com/products/carbon-fiber/>
- [10] Fibre2Fashion. Global textile sector explores the world of para-aramid. In: *Fibre2Fashion* [online]. 2014 [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <https://www.fibre2fashion.com/industry-article/7374/global-textile-sector-explores-the-world-of-para-aramid>
- [11] Len natural. In: *Atelier Johanna* [online]. [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <https://www.atelierjohanna.cz/obchod/len-natural/>
- [12] SULEIMAN, Osama Mohammed Elmardi. *Biaxial Buckling of Thin Laminated Composite Plates* [online]. Beau Bassin: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2018 [cit. 2023-03-11]. ISBN 978-613-8-23615-3. Dostupné z: <http://dglib.nilevalley.edu.sd:8080/jspui/bitstream/123456789/2371/1/978-613-8-23615-3%20Biaxial%20Buckling%20of%20Thin%20Laminated%20Composite%20Plates.pdf>
- [13] MIČKAL, Petr. *Odolnost FRP kompozitních materiálů vůči působení vybraných agresivních prostředí* [online]. Brno, 2017 [cit. 2023-03-11]. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební. Vedoucí práce Lenka Bodnárová. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=145126



- [14] CLYNE, T. W. a Derek HULL. *An introduction to composite materials* [online]. 3. vyd. United Kingdom: Cambridge University Press, 2019 [cit. 2023-03-11]. ISBN 978-0-521-86095-6. Dostupné z: https://books.google.cz/books?hl=cs&lr=&id=4oKWDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR11&dq=An+Introduction+to+Composite+Materials&ots=YWU11yKkCs&sig=4uISv8PXilzL7-98f0b6uPjyQqs&redir_esc=y#v=onepage&q=An%20Introduction%20to%20Composite%20Materials&f=false
- [15] ARCS. Technologie výroby kompozitů. In: *Spolek pro technickou podporu a propagaci polymerních kompozitů* [online]. 2023 [cit. 2023-02-16]. Dostupné z: <https://polymer-composites.cz/category/technologie/>
- [16] Hand lay up. In: *Indutch Composites Technology Private Limited* [online]. 2019 [cit. 2023-02-16]. Dostupné z: <https://indutch.in/process/hand-layup/>
- [17] Carbo systém. In: *Stado special construction* [online]. 2021 [cit. 2023-02-16]. Dostupné z: <http://www.stado.cz/statika-carbo-system>
- [18] HAVEL COMPOSITES. *Technologie výroby kompozitů* [online]. 2023 [cit. 2023-02-16]. Dostupné z: <https://www.havel-composites.com/uploads/files/Technologie%20výroby%20kompozitů.pdf>
- [19] SWIFT, K.G. a J.D. BOOKER. *Manufacturing Process Selection Handbook*. Spojené státy americké: Butterworth-Heinemann, 2013. ISBN 978-0-08-099360-7.



- [20] DOSTÁLOVÁ, Alena. Vláknové kompozitní materiály, jejich vlastnosti a výroba. In: *DocPlayer* [online]. 2016 [cit. 2023-02-16]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/4294044-Vlakovne-kompozitni-materialy-jejich-vlastnosti-a-vyroba.html>
- [21] Prepregy. In: *BOKATECH Composite Solutions* [online]. 2016 [cit. 2023-02-16]. Dostupné z: <http://www.bokatech.cz/produkty/prepregy/>
- [22] ŠAFARÍK, Ondřej. *Uplatnění vakuové infuze pro výrobu hybridních kompozitních systémů* [online]. Zlín, 2016 [cit. 2023-02-16]. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická. Vedoucí práce Ing. Lukáš Maňas. Dostupné z: <https://theses.cz/id/a0nn4f/>
- [23] GOWDA, Manoj K. Autoclave molding. In: *SlideShare* [online]. 2018 [cit. 2023-02-16]. Dostupné z: <https://www.slideshare.net/ManojK55/autoclave-molding>
- [24] Composite Autoclaves. In: *Melco Steel* [online]. 2012 [cit. 2023-02-16]. Dostupné z: <https://www.melcosteel.com/composite-autoclaves.html>
- [25] ZHANG, Leen, Wang XIAOPING, Jingyu PEI a Zhou YU. Review of automated fibre placement and its prospects for advanced composites. In: *ResearchGate* [online]. 2020 [cit. 2023-02-16]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Principles-of-autoclave-forming-45-46_fig5_339492381
- [26] American Composites Manufacturers Association. Continuous Lamination. In: *Compositeslab* [online]. 2023 [cit. 2023-02-16]. Dostupné z: <https://compositeslab.com/composites-manufacturing-processes/closed-molding/continuous-lamination/>



- [27] DOHNÁLEK, Pavel. Využití kompozitních materiálů pro zesilování železobetonových konstrukcí. *BETON: Sanace a rekonstrukce – Materiály a technologie* [online]. Praha: Beton TKS, 2005, č.3, s. 16-19 [cit. 2023-03-10]. ISSN 1213-3116. Dostupné z: https://www.ebeton.cz/wp-content/uploads/2005-3-16_0.pdf
- [28] SIKA CZ. Sika CarboDur - Zesilování konstrukcí pomocí uhlíkových kompozit [online]. Brno, 2010 [cit. 2023-03-21]. Dostupné z: <https://cze.sika.com/cs/dokumentace.html>
- [29] ŠILHAN, Ondřej. Zesilování stavebních konstrukcí dodatečně lepenou kompozitní výztuží. *Časopis Stavebnictví* [online]. Praha: Informační centrum ČKAIT, 2008 [cit. 2023-03-20]. Dostupné z: <https://www.casopisstavebnictvi.cz/clanky-zesilovani-stavebnich-konstrukci-dodatecne-lepenou-kompozitni-vyztuzi.html>
- [30] BILČÍK, Juraj a Jiří DOHNÁLEK. *Sanace betonových konstrukcí*. Bratislava: Jaga group, 2003. ISBN 80-889-0524-9.
- [31] ČSN EN 1990 ed.2. *Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2021, 100 s. Třídící znak 730002.
- [32] SIKA CZ. *Metodická příručka - Zesilování konstrukcí Sika CarboDur systém* [online]. Brno, 2008 [cit. 2023-03-21]. Dostupné z: <https://cze.sika.com/cs/dokumentace/metodicke-prirucky.html>
- [33] ČSN EN 1992-1-1. *Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. Ed.2. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2019. 208 s. Třídící znak 731201.



- [34] HAVLÍKOVÁ, Jana. *Sanace betonových konstrukcí v závislosti na diagnostice* [online]. Praha, 2016 [cit. 2023-03-21]. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Katedra technologie staveb. Vedoucí práce Miloslava Popenková. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/75728>
- [35] CIKRLÉ, Petr, Vlasta LOUTOCKÁ a Jitka UCHYTILOVÁ. *Průzkumy a opravy železobetonových konstrukcí meziválečného období* [online]. Brno: Národní památkový ústav, 2018 [cit. 2023-03-22]. Metodické listy (Metodické centrum moderní architektury). ISBN 978-80-7480-123-5. Dostupné z: https://www.npu.cz/uop/brno/web/mcma/metodiky/2018%20ML%20pruzkumy_a_opravy_zb_konstrukci.pdf
- [36] SIKA CZ. *Metodická příručka - Zesilování konstrukcí SikaWrap systémem* [online]. Brno, 2008 [cit. 2023-03-21]. Dostupné z: <https://cze.sika.com/cs/dokumentace/metodicke-prirucky.html>
- [37] SIKA CZ. *Metodická příručka – Vyztužení instalované blízko povrchu Sika CarboDur* [online]. Brno, 2011 [cit. 2023-03-27]. Dostupné z: <https://cze.sika.com/cs/dokumentace/metodicke-prirucky.html>
- [38] ACI 440.2R-17. *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*. Michigan, USA: American Concrete Institute, 2017. 117 s. ISBN: 978-1-945487-59-0.
- [39] ACI 318-14. *Building Code Requirements for Structural Concrete*. Michigan, USA: American Concrete Institute, 2014. 524 s. ISBN: 978-0-87031-930-3.



SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ (pro výpočet)

w_{DL}	stálé zatížení
$w_{LL,p}$	proměnné původní zatížení
w_{LL}	proměnné předpokládané zatížení
L	délka nosníku
h	Výška průřezu
b	šířka průřezu
d	účinná výška průřezu
f'_c	zaručená válcová pevnost betonu v tlaku
f_y	zaručená mez kluzu betonářské výztuže
n_s	počet prutů betonářské výztuže
\emptyset	průměr prutu betonářské výztuže
E_s	modul pružnosti betonářské výztuže
n_f	počet FRP lamel
b_f	šířka FRP lamely
t_f	tloušťka FRP lamely
ε'_{fu}	zaručené mezní přetvoření FRP výztuže
E_f	modul pružnosti FRP výztuže
M_{DL}	moment od stálého zatížení
M_{LL}	moment od proměnného předpokládaného zatížení
M_s	moment od charakteristických zatížení
C_E	redukční součinitel pro FRP výztuž
f_{fu}	návrhová pevnost v tahu FRP výztuže
ε_{fu}	návrhové mezní přetvoření FRP výztuže
E_c	modul pružnosti betonu
A_s	průřezová plocha betonářské výztuže
A_f	průřezová plocha FRP výztuže
β'_1	předběžný součinitel pro účinnou výšku tlačené oblasti betonu
c'	výška tlačené oblasti průřezu před zesílením
z	rameno vnitřních sil



$(Mn)_{w/o}$	moment únosnosti nezesílené konstrukce
q_s	stupeň vyztužení podélnou betonářskou výztuží
q_f	stupeň vyztužení podélnou FRP výztuží
k	poměrná výška tlačené oblasti
c_{cr}	výška tlačené oblasti průřezu s trhlinami
I_{cr}	moment setrvačnosti průřezu s trhlinami
ϵ_{bi}	přetvoření betonu od stálého zatížení v době instalace FRP výztuže
ϵ_{fd}	maximální přetvoření FRP výztuže (při dosažení MSÚ)
c_o	odhad výšky tlačené oblasti průřezu
c	výška tlačené oblasti průřezu (vzdálenost neutrální osy od nejvíce tlačeného okraje)
ϵ_{fe}	efektivní přetvoření FRP výztuže
ϵ_c	poměrné přetvoření betonu
ϵ_s	poměrné přetvoření betonářské výztuže
f_s	tahové napětí v betonářské výztuži
f_{fe}	efektivní tahové napětí v FRP výztuži
ϵ'_c	poměrné přetvoření betonu při dosažení pevnosti betonu
β_1	součinitel pro účinnou výšku tlačené oblasti betonu
α_1	součinitel definující pevnost betonu
M_{ns}	příspěvek k momentu únosnosti od betonářské výztuže
M_{nf}	příspěvek k momentu únosnosti od FRP výztuže
ϵ_{sy}	poměrné přetvoření výztuže na mezi kluzu
ϵ_t	poměrné přetvoření výztuže v nejvíce tažené výztuži
ϕ	součinitel pro redukci únosnosti
M_n	moment únosnosti konstrukce zesílené FRP lamelami
ψ_f	redukční součinitel pevnosti FRP lamely
$\phi * M_n$	zredukováný moment únosnosti konstrukce zesílené FRP lamelami
M_u	moment od předpokládaných zatížení
$f_{s,s}$	provozní napětí v betonářské výztuži
$f_{f,s}$	provozní napětí v FRP výztuži



SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 Synergický efekt [4]</i>	11
<i>Obr. 2 Dělení vláknové výztuže [5]</i>	12
<i>Obr. 3 Uspořádání vláken v laminátu [6]</i>	12
<i>Obr. 4 Skleněná vlákna [8]</i>	16
<i>Obr. 5 Uhlíkový provazec [9]</i>	17
<i>Obr. 6 Aramidová vlákna [10]</i>	17
<i>Obr. 7 Přírodní lněný provazec [11]</i>	18
<i>Obr. 8 Formy vláknových výztuží [7]</i>	19
<i>Obr. 9 Schéma ručního kladení [16] (upraveno)</i>	20
<i>Obr. 10 Schéma výroby tažením [7]</i>	21
<i>Obr. 11 Proces výroby lisováním se vstřikem matrice [19]</i>	22
<i>Obr. 12 Schéma lisování za studena [20]</i>	22
<i>Obr. 13 Schéma vakuové infuze [22]</i>	24
<i>Obr. 14 Pohled na autokláv [24]</i>	24
<i>Obr. 15 Schématický řez autoklávem [25] (upraveno)</i>	25
<i>Obr. 16 Schéma navíjení [20]</i>	26
<i>Obr. 17 Schéma kontinuálního laminování [20]</i>	26
<i>Obr. 18 Schéma odstředivého lití [20]</i>	27
<i>Obr. 19 Zesilování konstrukcí FRP materiály [17]</i>	28
<i>Obr. 20 Původ a početnost poruch [30]</i>	32
<i>Obr. 21 Schéma postupu vyšetřování stávající konstrukce [30]</i>	33
<i>Obr. 22 Schéma nepříznivých činitelů a následky jejich působení [30]</i>	34
<i>Obr. 23 Doporučená geometrie odstraňování betonu [32] (upraveno)</i>	35
<i>Obr. 24 Odstranění betonu kolem obnažené výztuže [32]</i>	37
<i>Obr. 25 Mechanismus přídržnosti na styku [30]</i>	38
<i>Obr. 26 Schéma měření okrajových podmínek [32]</i>	39
<i>Obr. 27 Schéma lepení lamely [32]</i>	40
<i>Obr. 28 Dodatečné vkládání výztuže [37]</i>	42
<i>Obr. 29 Schéma nosníku</i>	43
<i>Obr. 30 Schéma průřezu a vykreslení deformace a napětí</i>	44



Obr. 31 Schéma a vykreslení nosníku č.1	58
Obr. 32 Schéma a vykreslení nosníku č.2.....	66

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Vlastnosti vláken [12] [13] [14]	18
Tab. 2 Informativní návrhové životnosti [31]	31
Tab. 3 Metody a přístroje na přípravu betonového podkladu [30] (upraveno)..	36
Tab. 4 Minimální hodnoty krycí vrstvy [33].....	37
Tab. 5 Redukční součinitel CE [38] (upraveno)	45
Tab. 6 Předběžný součinitel $\beta'1$ [39] (upraveno).....	46
Tab. 7 Součinitel pro redukci únosnosti [38] (upraveno)	54
Tab. 8 Vstupní parametry výpočtu č.1	59
Tab. 9 Vstupní parametry výpočtu č.2.....	67
Tab. 10 Porovnání výsledků z výpočtu	75