



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

## ÚSTAV BETONOVÝCH A ZDĚNÝCH KONSTRUKCÍ

INSTITUTE OF CONCRETE AND MASONRY STRUCTURES

## VYUŽITÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ PŘI NÁVRHU BETONOVÝCH KONSTRUKCÍ

USE OF COMPOSITE MATERIALS FOR THE DESIGN OF CONCRETE STRUCTURES

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

David Vašátko

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. FRANTIŠEK GIRGLE, Ph.D.

BRNO 2020



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

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

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

<b>Student</b>	David Vašátko
<b>Název</b>	Využití kompozitních materiálů při návrhu betonových konstrukcí
<b>Vedoucí práce</b>	Ing. František Girgle, Ph.D.
<b>Datum zadání</b>	30. 11. 2019
<b>Datum odevzdání</b>	22. 5. 2020

V Brně dne 30. 11. 2019

---

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

---

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

## **PODKLADY A LITERATURA**

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

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

ČSN EN 1990: Zásady navrhování konstrukcí;

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

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

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

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

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

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

Další literatura dle doporučení vedoucího bakalářské práce.

## **ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ**

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

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

Požadované výstupy:

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

Přílohy textové části:

P1. Použité podklady, studie

P2. Statický výpočet

P3. Výkresová dokumentace

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

## **STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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

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

## **ABSTRAKT**

Kompozitní výztuž (FRP) je perspektivní materiál pro vyztužování konstrukcí. Její uplatnění je vhodné především do prostředí s vysokým enviromentálním namáháním, nebo do prostředí zatíženého fyzikálními jevy. Tato bakalářská práce je zaměřena na vnitřní FRP výztuž.

Teoretická část se zabývá způsobem výroby, typy používaných materiálů, chováním při daném druhu namáhání a rozdílných přístupech při návrhu na krátkodobou nebo dlouhodobou únosnost kompozitní výztuže.

V praktické části je posouzen prefabrikovaný dílec, na který byl požadavek nemagnetické výztuže. Posouzení je provedeno pro dvě varianty, které jsou rozdílné v typu hlavní nosné výztuže. V první variantě je hlavní výztuž z nerezové oceli a ve druhé variantě z GFRP.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

kompozitní výztuž, FRP (Fiber Reinforced Polymer), nekovová výztuž, nerezová výztuž, prefabrikovaný dílec, nesouměrný průřez, požární odolnost

## **ABSTRACT**

Composite reinforcement tends to be perspective material for construction reinforcing. Its application is suitable especially for areas with high level of environmental stress, or environment loaded with physical phenomenon. This thesis is focused on inner FRP reinforcement.

Theoretical part deals with mode of production, types of used materials, behavior depending on stress type and different approaches towards designing for short-term or long-term load capacity of composite reinforcement.

Practical part includes assessment of precast element, dealing with requirement of non-magnetic reinforcement. Assessment is designed with two alternatives, each of them differing in type of main load-bearing reinforcement. First one works with stainless steel reinforcement, the second one with GFRP one.

## **KEYWORDS**

composite reinforcement, FRP (Fiber Reinforced Polymer), non-metallic reinforcement, stainless steel reinforcement, precast element, asymmetrical cross-section, fire resistance

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

David Vašátko *Využití kompozitních materiálů při návrhu betonových konstrukcí*. Brno, 2020. 66 s., 92 s. příloh Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav betonových a zděných konstrukcí. Vedoucí práce Ing. František Girgle, Ph.D.

## **BIBLIOGRAPHIC CITATION**

David Vašátko *Využití kompozitních materiálů při návrhu betonových konstrukcí*. Brno, 2020. 66 pp., 92 pp. of appendices Bachelor's Thesis. Brno University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Institute of Concrete and Masonry Structures. Supervisor Ing. František Girgle, Ph.D.

## **PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE**

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce s názvem *Využití kompozitních materiálů při návrhu betonových konstrukcí* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

## **PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE**

Já, David Vašátko prohlašuji, že bakalářskou práci s názvem *Využití kompozitních materiálů při návrhu betonových konstrukcí* je moje vlastní práce a výsledek mého vlastního zkoumání. Jasně jsem uvedl všechny citované, nebo parafrázované materiály a poskytl reference všech zdrojů.

## **DECLARATION OF CONFORMITY OF THE PRINTED AND ELECTRONIC FORM OF THE FINAL THESIS**

I declare that the electronic form of the submitted bachelor's thesis titled *Využití kompozitních materiálů při návrhu betonových konstrukcí* is identical to the submitted printed form.

## **DECLARATION OF AUTHORSHIP OF THE FINAL THESIS**

I, David Vašátko declare that this bachelor's thesis titled *Využití kompozitních materiálů při návrhu betonových konstrukcí* is my own work and the result of my own original research. I have clearly indicated the presence of quoted or paraphrased material and provided references for all sources.

V Brně, 4. 5. 2020

---

David Vašátko

autor

## **PODĚKOVÁNÍ**

Zde bych rád poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Františku Girglemu Ph.D. za přátelský přístup, čas a pomoc, kterou mi poskytl během bakalářského studia a především při tvorbě této bakalářské práce. Zároveň děkuji Ing. Ivě Rozsypalové a Ing. Ďorđe Čairović za možnost zúčastnit se laboratorního zkoušení GFRP na účinky zvýšené teploty.

Velké díky patří celé rodině za možnost studia a neustálou podporu. Rád bych také poděkoval blízkým přátelům a přítelkyni Anetě za důvěru, podporu a trpělivost během celého studia.

---

## Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod .....</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>Historie .....</b>	<b>12</b>
<b>3</b>	<b>Výroba .....</b>	<b>13</b>
3.1	Využití .....	13
3.2	Výrobky .....	14
3.2.1	Vnitřní FRP výztuž.....	14
3.2.2	Rozptýlená výztuž .....	15
3.2.3	Vnější nekovová výztuž – lamely, tkaniny.....	15
3.2.4	Kompozitní předpínací tyče a lana .....	16
<b>4</b>	<b>Materiálové charakteristiky .....</b>	<b>17</b>
4.1	Vlákna.....	18
4.1.1	Skleněná vlákna.....	18
4.1.2	Uhlíková vlákna.....	18
4.1.3	Aramidová vlákna .....	18
4.1.4	Basaltová (čedičová) vlákna.....	19
4.2	Matrice .....	19
4.2.1	Termosetické polymery .....	19
4.2.2	Termoplastické polymery .....	20
<b>5</b>	<b>Materiálové vlastnosti .....</b>	<b>22</b>
5.1	Fyzikální vlastnosti .....	22
5.1.1	Hustota.....	22
5.1.2	Součinitel teplotní roztažnosti .....	23
5.1.3	Teplota skelného přechodu.....	24
5.1.4	Vliv zvýšené teploty na betonové konstrukce vyztužené FRP výztuží	24
<b>6</b>	<b>Krátkodobé mechanické vlastnosti.....</b>	<b>29</b>
6.1	Chování FRP výztuže v tahu .....	29
6.2	Chování FRP výztuže v tlaku .....	30

6.3	Chování FRP výztuže ve smyku.....	31
6.4	Soudržnost .....	31
<b>7</b>	<b>Dlouhodobé mechanické vlastnosti.....</b>	<b>33</b>
7.1	Dotvarování výztuže (Creep).....	33
7.2	Relaxace.....	34
7.3	Únava.....	34
7.4	Stanovení návrhové únosnosti FRP výztuže při dlouhodobém namáhání..	
	.....	35
7.4.1	Přístup dle ACI 440.1R-15 [3] .....	35
7.4.2	Přístup dle CSA 806-12 [10] .....	36
7.4.3	Stanovení dlouhodobé únosnosti dle fib Bulletin No. 40 [4] .....	36
<b>8</b>	<b>Trvanlivost FRP výztuže.....</b>	<b>38</b>
8.1	Účinek alkalického prostředí betonu a vlhkosti.....	38
8.2	Teplotní namáhání .....	40
8.3	Koroze polymerní matrice .....	40
8.4	Účinek ultrafialového záření.....	41
8.5	Působení solí .....	41
8.6	Teplotní roztažnost .....	41
8.7	Účinek zmrazovacích a rozmrazovacích cyklů .....	41
<b>9</b>	<b>Navrhování betonových konstrukcí na účinky požáru.....</b>	<b>42</b>
9.1	Metoda Izotermie 500 °C.....	44
<b>10</b>	<b>Zásady navrhování konstrukcí s kompozitní výztuží.....</b>	<b>47</b>
10.1	Základní ustanovení.....	47
10.2	Návrhová životnost staveb.....	48
10.3	Dílčí materiálové součinitele .....	49
10.4	Navrhování na základě zkoušek .....	49
10.5	Minimální krycí vrstva.....	49
<b>11</b>	<b>Navrhování betonových konstrukcí vyztužených FRP na MSÚ .....</b>	<b>50</b>
11.1	Návrh na ohyb.....	50

---

11.1.1	Základní předpoklady návrhu prvku vyztuženého FRP výztuží [20]	50
11.1.2	Stanovení únosnosti ohýbaného průřezu vyztuženého FRP výztuží, způsoby porušení .....	51
11.1.3	ACI 440.1R-15 [3].....	52
11.1.4	fib Bulletin No.40 – FRP Reinforcement in RC Structures [4].....	55
11.1.5	Kanadská norma CSA S806-12 [10] .....	56
11.2	Návrh na smyk .....	57
11.2.1	Mechanismy pro přenos smykového napětí v průřezu vyztuženého FRP výztuží .....	57
11.2.2	Způsoby smykového porušení v prvcích vyztužených FRP.....	59
11.2.3	Přístup k návrhu prvků při smykovém namáhání.....	59
11.2.4	Prvky bez smykové výztuže .....	59
11.2.5	Prvky se smykovou výztuží.....	60
<b>12</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>62</b>
<b>13</b>	<b>Seznam použitých zdrojů.....</b>	<b>63</b>
<b>14</b>	<b>Seznam příloh .....</b>	<b>66</b>

---

## 1 Úvod

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem betonových prvků vyztužených nekovovou výztuží (FRP výztuže) s přihlédnutím na mimořádné zatížení požárem.

Tradiční betonářská výztuž ztrácí své mechanické vlastnosti, což může být důsledkem nevyhovující konstrukce na mezní stavy únosnosti a mezní stavy použitelnosti. Ke zrychlené korozi oceli a degradaci betonu přispívá místo, kde se stavba nachází. V blízkosti komunikací, kde probíhá rozmrazování pomocí soli, (stupeň vlivu prostředí XD, koroze způsobená chloridy a XF střídavé působení mrazu a rozmrazování) [1]. U těchto prostředí je intenzita korozního namáhání značná, což má přímý dopad na životnost stavby.

Do oblastí s vysokým enviromentálním namáháním je vhodná kompozitní výztuž, která nepodléhá korozi. Vlákny vyztužené polymery (ang. Fiber Reinforced Polymer – FRP) jsou složeny z nosných vláken a polymerní matrice. Ze vzájemného spojení jednotlivých složek jsou získány výsledné vlastnosti a tvar produktu. Vlákna mají nosnou funkci, matrice zajišťuje vzájemné spolupůsobení s vlákny a vytváří jim ochranu, přenáší tahové napětí z betonu do vláken. Chování a vlastnosti FRP se liší v závislosti na použitém typu vláken a matrice. Na trhu je široké spektrum vláken a matric, ale nejpoužívanější jsou skleněná a uhlíková vlákna, z polymerních matric to jsou nejčastěji polyesterové, epoxidové a vinylesterové pryskyřice. [2]

---

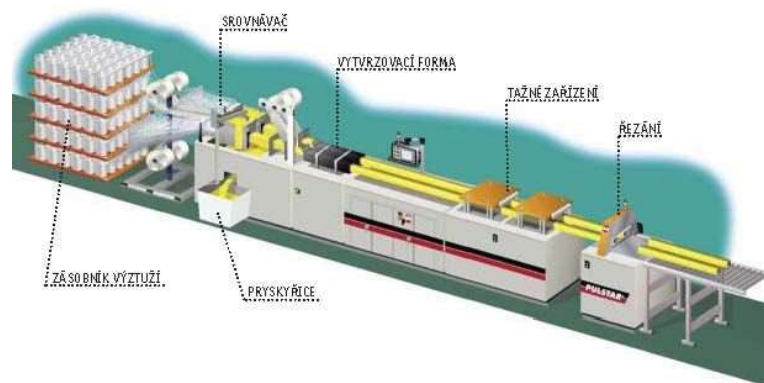
## 2 Historie

Rozvoj FRP sahá až k období po druhé světové válce, kdy se v letectví začal klást důraz na lehkost a vysokou pevnost kompozitních materiálů [3]. Postupem času se ve stavebnictví začala hledat náhrada za typickou ocelovou výztuž, která podléhá korozi. Kolem 90. let se objevila kompozitní výztuž jako další řešení problému s korozi. Aplikace se našla v konstrukcích blízko moře, v chemickém průmyslu a prostředí, ve kterém dochází ke zvýšené korozi klasické ocelové výztuže. V USA například využili předpjaté tyče z aramidů. V Nizozemsku vyztužili hlukové bariéry podél dálnice pomocí FRP z důvodu namáhání podpěr agresivním prostředím, rozmrazovacích solí a výfukovými plyny. První pěší lávka kompletně z FRP výztuže vznikla ve Velké Británii v roce 1996 a následovalo to několik dalších projektů lávek, mostů nebo třeba i obkladových panelů. Mnoho aplikací kompozitní výztuže lze nalézt v Japonsku, kde se vedl například výzkum na magnetický levitační systém pro železniční dopravu [4]. V Severní Americe se na přelomu století využívala FRP výztuž k výstavbě mostů, kde se využívalo nekovové výztuže pro vyztužení mostovky [3]. V dnešní době dochází ke zvýšené pozornosti ohledně kompozitních výztuží. Výzkumy probíhají téměř po celém světě, k velkému rozmachu dochází v Severní Americe, Japonsku, ale i v Evropě.

### 3 Výroba

Kompozitní materiál se skládá minimálně ze dvou prvků. V případě FRP výztuže dochází ke spojení nosných vláken a polymerní matrice v jeden produkt. Ve výsledném produktu hraje velkou roli, jaký typ vláken a polymerní matrice se během výroby využije. V tuzemském trhu se nejvíce využívají vlákna skleněná, uhlíková, ale využívají se také aramidová nebo čedičová. Jako matrice se využívají polyesterové, epoxidové či vinylesterové pryskyřice [2]. Je možné také kombinovat více druhů vláken. U kompozitního prvku je snaha zkombinovat takové vstupní parametry, aby vlastnosti nově vzniklého materiálu maximalizovaly výhody a minimalizovaly nevýhody jednotlivých složek.

Nejběžnější způsob výroby FRP výztuží je pultruze, případně kombinace pultruze a technologie ovíjení. V průběhu výroby musí dojít k dokonalému spojení vláken a matrice. Pultruze je proces kontinuální výroby konstrukčních prvků o konstantním průřezu, schéma pultruzní linky je na obrázku 3.1. Na začátku výrobní linky je zásobník na výztužná vlákna (rovingy). Nejdříve výztužná vlákna vstupují do srovnávače, aby byla vlákna rovnoměrně rozmístěna po průřezu. V dalším kroku je výztuž kontinuálně smáčena v tekuté pryskyřici a je vtahována do tvarovače. V ohřívané části vytvrzovací formy dochází k vytvrzení pryskyřice a hotový profil je dál tažen na podávacím zařízení, kde je na konci linky řezán na potřebnou délku [2].



Obrázek 3.1: schéma pultruzní linky [5]

#### 3.1 Využití

Kompozitní výztuž je vhodná do prostředí, které je vysoce environmentálně namáhané. V tomto prostředí dochází k zrychlené degradaci tradiční ocelové výztuže.

FRP výztuže je tedy vhodné navrhovat do konstrukcí, které vyžadují dlouhodobou trvanlivost a odolnost vůči korozi výztuže, odolnost proti chemickým vlivům. Dále se využívá do míst, kde je potřeba minimalizovat elektrickou vodivost, zabezpečit průchod elektromagnetických vln, ve kterých budou dodatečně vyvrtávány velké otvory (snadné řezání FRP výztuže) [2], [4]. Nevýhodou kompozitní výztuže může být její vysoká pořizovací cena, avšak to nemusí nutně platit pro výztuž se skleněnými vlákny. Výrobky, kde jsou hlavní vlákna skleněná, jsou již v dnešní době široce rozšířené a tím i finančně dostupné. V případě, že je konstrukce v prostředí, kde dochází ke zrychlené korozi ocelové výztuže, dochází k redukování průřezové plochy výztuže, konstrukce nedosáhne požadované životnosti, což vede k dalším nečekaným nákladům na sanace. FRP výztuže jsou vhodné do prostředí, kde jsou betonové konstrukce vystaveny chloridům (např.: desky mostů, betonová svodidla, chodníky a římsy mostů, propusti...), mořským chloridům (např.: loděnice, mořské hráze, přístaviště...), náchylné ke korozi (např.: rafinérie, úpravný vody, nádrže a potrubí čistíren odpadních vod...), vystaveny vysokým napětím a elektromagnetickým polím (např.: železnice, snímkování magnetickou rezonancí, hliníkové hutě a ocelárny, oblasti citlivé na radiové frekvence, kabelové kanály...), dočasné konstrukce (tunely, podzemní zdi do kterých budou vyváženy otvory), zakládání se zvýšenými nároky na odolnost vůči korozi, zesilování a restaurování zdiva a památek.

## 3.2 Výrobky

Kompozitních výrobků je široké spektrum, v tomto případě je použití omezeno na oblast stavebnictví, kde je FRP výztuž využívána pro vnitřní a vnější aplikace. Vnější (externí) FRP výztuž, předpínací výztuž ani rozptýlená výztuž není předmětem této bakalářské práce, podrobněji zde proto nejsou řešeny.

### 3.2.1 Vnitřní FRP výztuž

Pro vyztužení monolitických a prefabrikovaných betonových prvků lze využít alternativní náhradu za tradiční betonářskou výztuž v podobě vnitřních výztužných kompozitních tyčí (obrázek 3.4) o různých průměrech a povrchových úpravách. Je možné také nalézt upravené prvky v podobě mříží, či prvků pro kotvení. Výztuže se vyrábí spojením matrice s vlákny (skleněná, uhlíková, aramidová, basaltová) - cílem je využít výhod obou materiálů. Své využití nachází především ve

vysoce environmentálně namáhaných prostředích. Tato bakalářská práce je zaměřena na tento typ FRP výztuže.



Obrázek 3.2: Vnitřní kompozitní výztuž o různých průměrech [6]

### 3.2.2 Rozptýlená výztuž

Do betonové směsi se při výrobě běžně rozptýlí ocelové výztužné drátky. V tomto případě jsou běžné ocelové drátky nahrazeny drátky z kompozitního materiálu. Rozptýlená výztuž má vliv na zlepšení mechanických vlastností, lepší pevnost betonu v tlaku a tahu, snížení vlivu smršťování betonu, zvýšení požární odolnosti. Rozptýlená výztuž se především používají pro průmyslové lité podlahy, základové desky, tunelové ostění (zvýšení požární odolnosti).

### 3.2.3 Vnější nekovová výztuž – lamely, tkaniny

Externí výztuž se využívá k dodatečnému zesilování konstrukcí namáhaných normálovou silou, posouvající silou, ohybovým, popřípadě kroutícím momentem nebo kombinací výše uvedených namáhání. Zesilování se provádí pomocí lepených lamel (obrázek 3.2) nebo tkaninami (obrázek 3.3) [2].



Obrázek 3.3: lamely z uhlíkových vláken pro dodatečné vnější zesilování [7]



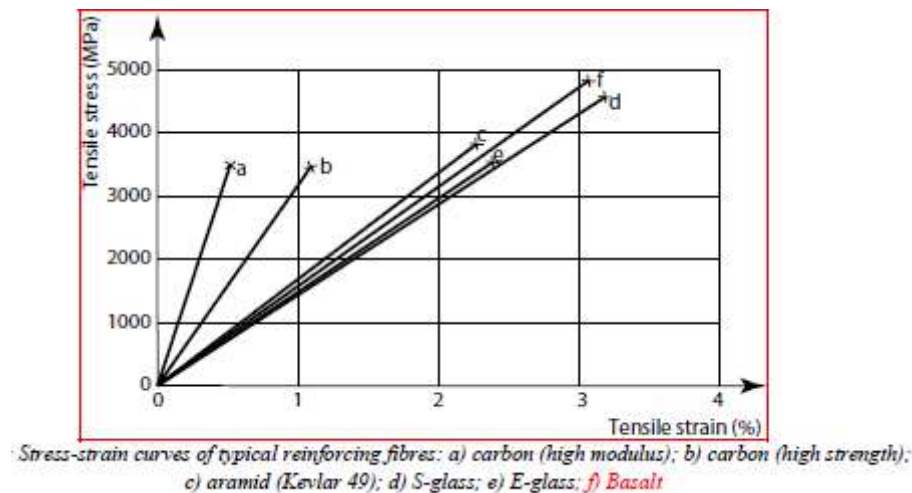
Obrázek 3.4: tkaniny z FRP pro dodatečné vnější zesilování [4]

### 3.2.4 Kompozitní předpínací tyče a lana

Pro předpjaté prvky se používají ocelové předpínací tyče nebo vícedrátová lana. Tradiční ocel lze nahradit kompozitním materiálem. Předpínací kompozitní výztuže se vyrábějí především na bázi uhlíkových a aramidových vláken, skleněná vlákna se pro předpjaté konstrukce nedoporučují [2], [4].

## 4 Materiálové charakteristiky

V kompozitní výztuži záleží na typu vláken, jejich uspořádání, matici, ale také na podmínkách výroby, povrchové úpravě a průřezu prvku. FRP kompozity vykazují anizotropní chování, což znamená, že mají jiné materiálové charakteristiky ve směru vláken a ve směru kolmém na podélnou osu. V podélném směru určují vlastnosti především vlákna, která mají vysokou pevnost v tahu, vysoký modul pružnosti (jsou křehká). Je vyžadován malý rozdíl pevností mezi jednotlivými vlákny, vlastnosti používaných vláken jsou uvedeny v tabulce 4.1. Na obrázku 4.1. je znázorněno, jak výsledná pevnost a přetvoření závisí na typu použitých vláken. Všechna využívaná vlákna mají lineárně pružné chování až do porušení [4].



Obrázek 4.1: pracovní diagram v závislosti napětí na přetvoření jednotlivých vláken [4]

Ve směru kolmém na podélnou osu určuje vlastnosti především matrice, která zajišťuje celistvost kompozitu, spojuje jednotlivá nosná vlákna, přenáší tahové namáhání z betonu do vláken a chrání vlákna před vlivem okolního prostředí a mechanickým porušením. Matrice jsou výrazně poddajnější než vlákna, její pevnost v tahu je menší než pevnost v tahu vláken. Vlastnosti matic jsou uvedeny v tabulkách 4.2 a 4.3. Matrice přímo ovlivňuje mechanické a fyzikální vlastnosti výsledného produktu [2].

## 4.1 Vlákna

### 4.1.1 Skleněná vlákna

Nejčastěji používaná vlákna pro kompozitní výztuže jsou skleněná, jejichž hlavní složkou je sloučenina oxidu křemičitého. Existuje velké množství skleněných vláken, každé z nich má různé vlastnosti. E sklo (E-glass, electrical glass) je nejlevnější a má široké uplatnění v průmyslu, S sklo (s-glass, structural/high strength glass) má vyšší tahovou pevnost a vyšší modul pružnosti než E-sklo, ovšem je také dražší. AR sklo (AR-glass, Alkali resistant glass) je odolné vůči působení alkálií v betonu, A sklo (A-glass, window glass). Pevnost v tahu skleněných vláken se se zvyšující teplotou zmenšuje, stejný důsledek má i dlouhodobé vystavení vláken alkalickému prostředí. Vlákna jsou náchylná na dotvarování a následné porušení přetržením. Skleněná vlákna jsou dobrými tepelnými a elektrickými izolanty. Mají vysokou pevnost, malou finanční náročnost, jejich nevýhodou je nízký modul pružnosti [2], [4].

### 4.1.2 Uhlíková vlákna

Výrobní proces spočívá v tepelném rozkladu polyakrylonitrilových vláken (PAN). Způsob výroby závisí na požadovaném modulu pružnosti. Pomocí grafitizace dostaneme uhlíková vlákna s vysokým modulem pružnosti (HM – high modulus), (UHM – ultra high modulus), dále můžeme mít vlákna standardní (SM – standard modulus), vysokopevnostní (HS – high strength). Uhlíková vlákna jsou dlouhá, tvořená několika paralelními vlákny. Mají vysokou pevnost v tahu a tuhost, vysoký modul pružnosti, malé prodloužení při porušení. Jsou stabilní s rostoucí teplotou, odolná vůči agresivnímu prostředí, jejich chování je také lineárně pružné až do porušení. Porušení i u tohoto typu vláken je selhání křehkým lomem. Největší nevýhoda je velmi vysoká cena [4], [2].

### 4.1.3 Aramidová vlákna

Polymerní vlákna při použití vhodného způsobu zpracování mohou vykazovat vysokou pevnost a tuhost. Aramid je obecný pojem pro skupinu organických vláken, které mají nízkou měrnou hmotnost a vysokou pevnost v tahu v poměru k váze. Většina z nich je známá pod svým obchodním názvem jako například kevlar. Kevlar má několik druhů, které se liší vlastnostmi, ale všechny jsou odolné vůči nárazu, nedegradují ve

většinou chemikálií, mají nízké tečení, jsou schopné zvládat relativně vysoké teploty. Pevnost a modul pružnosti lineárně klesá s rostoucí teplotou, jsou ovšem citlivá na UV světlo a na vysokou vlhkost [4].

#### 4.1.4 Basaltová (čedičová) vlákna

Jedná se o jednosložkový kompozitní materiál, získaný tavením a drcením usazenin lávy. Tato vlákna mají lepší fyzikálně mechanické vlastnosti než skleněná vlákna a jsou levnější než uhlíková vlákna. Hlavní výhodou je ohnivzdornost, schopnost akustické izolace a izolace vibrací. Čedičová vlákna jsou díky vysokému bodu tavení velmi dobrá v konstrukcích s vysokou požární odolností [4].

Tabulka 4.1: základní vlastnosti používaných vláken pro FRP výztuž [2], [4]

Typ vláken	Hustota [kg/m <sup>3</sup> ]	Pevnost v tahu [MPa]	Modul pružnosti [GPa]	Teplota tavení [°C]
Skleněná vlákna				
E	2500	3400	72,5	1100-1550
A	2500	2750	73	
AR	2300	1800-3500	70-76	
S	2500	4580	85,5	
Uhlíková vlákna				
SM	1700	3700	250	1200-2400
HS	1800	4800	250	
HM	1950	3000	500	
UHM	2100	2400	800	
Aramidová	1440	2700-3600	60-170	-
Basaltová	2800	4840	89	-

## 4.2 Matrice

Pro FRP výztuže máme dvě základní třídy polymerních matic, termosetickou a termoplastickou. Rozdíl je ve způsobu výroby, především v mechanických vlastnostech a chování daných polymerů při zvýšené teplotě. Základní vlastnosti jsou uvedeny v tabulkách 4.2 a 4.3.

### 4.2.1 Termosetické polymery

Při vytvrzování dochází k zasíťování polymerů, které jim dávají tvar. Jsou nevratně vytvořené, nelze měnit jejich tvar zahřátím. Při zvyšování teploty začínají měknout a dochází ke zhoršování mechanických a fyzikálních vlastností. V případě dalšího zvýšení

teploty se matrice začne rozkládat. Jsou lehké pro zpracování a levné. Mají nižší koeficient teplotní roztažnosti a lepší odolnost proti rozpouštědlům [4].

#### 4.2.1.1 Epoxidové pryskyřice

Při výrobě dochází k vytvoření příčných vazeb, kde se kapalná epoxidová pryskyřice mění na pevný materiál. Příčné vazby mají vliv na výsledné vlastnosti tuhého epoxidu. Modul pružnosti, pevnost v tahu, teplotní stabilita a chemická odolnost se zlepšují se zvyšující se hustotou příčných vazeb, přitom se snižuje lomová houževnatost a deformace. Mezi výhody patří vysoké mechanické vlastnosti, lehké zpracování a malé smršťování během tvrdnutí. Hlavní nevýhoda je dlouhý vytvrzovací proces. Dříve se za nevýhodu považovala vysoká pořizovací cena, to už v dnešní době neplatí. Teplota skelného přechodu pro epoxidové pryskyřice je od 95 do 175 °C [4]

#### 4.2.1.2 Vinylesterová pryskyřice

Díky své chemické struktuře mají menší příčné vazby, díky nimž jsou pružnější a mají vyšší lomovou houževnatost než polyestery. Často se používají ke skleněným vláknům, mohou se také kombinovat s ostatními pryskyřicemi. Vykazují dobrou chemickou odolnost a pevnost v tahu, dochází k rychlému vytvrzování. Mají vysokou odolnost proti kyselinám, zásadám, rozpouštědlům a peroxidům. Ve spojení s bromem mají vysokou ohnivzdornost. Teplota skelného přechodu pro vinylesterové pryskyřice je od 70 do 163 °C [4].

#### 4.2.1.3 Polyesterová pryskyřice

Je dostupné široké množství typů polyesterů na základě výběru dikyseliny, což ovlivňuje i jejich pružnost. Mohou mít dobrou UV odolnost, takže se nabízí jejich využití v exteriéru. Polyesterové matrice mohou dosáhnout různých vlastností v závislosti na použitých látek, plynů. Například můžeme dosáhnout zlepšení v požární odolnosti. Jejich nevýhoda je velká objemová ztráta, nejsou vhodné do alkalického prostředí v betonu. Teplota skelného přechodu pro polyesterové pryskyřice je v rozsahu od 70 do 100 °C [4].

### 4.2.2 Termoplastické polymery

Tyto polymery nevytvářejí zesítnění, což má za důsledek, že mohou po zahřátí měnit tvar. Při zpracování za horka přecházejí z pevného stavu do měkkého, ale jejich vlastnosti se po ukončení zpracování a vychladnutí navrátí. Kompozity

s termoplastickými polymery mohou být opravovány. Není zde závislost na počtu přechodů z tuhého do měkkého stavu. Během zpracování nepodstupují žádné chemické proměny. Jako termoplastické polymery se například využívají polyetherketonová vlákna (PEEK), polyfenylsulfid (PPS), polysulfon (PSUL) [4].

Tabulka 4.2: základní vlastnosti termosetických matric [4]

Typ matrice	Hustota [kg/m <sup>3</sup> ]	Tahová pevnost [MPa]	Modul pružnosti [GPa]	Koeficient teplotní roztažnosti [10 <sup>-6</sup> /K]	Poissonovo číslo [-]
Polyesterová	1200-1400	34,5-104	2,1-3,45	55-100	0,35-0,39
Epoxydová	1200-1400	55-130	2,75-4,10	45-65	0,38-0,40
Vinylesterová	1150-1350	73-81	3,0-3,5	50,75	0,36-0,39

Tabulka 4.3: základní vlastnosti termoplastických matric [4]

Typ matrice	Hustota [kg/m <sup>3</sup> ]	Tahová pevnost [MPa]	Modul pružnosti [GPa]	Koeficient teplotní roztažnosti [10 <sup>-6</sup> /K]	Poissonovo číslo [-]
PEEK	1320	100	3,24	47	0,4
PPS	1360	52,7	3,3	49	0,37
PSUL	1240	70,3	2,48	56	0,37

## 5 Materiálové vlastnosti

Použití nekovových výztužných tyčí v betonových konstrukcích je velice ovlivněno jejich fyzikálními a mechanickými vlastnostmi. FRP výztužné prvky mohou být vyrobeny tak, aby splňovaly různé požadavky pro veškeré konstrukce, kam je výztuž navrhována. Výroba se dá velmi ovlivnit. Můžeme využít různých druhů matic a vláken, které navíc mohou být v různých průměrech na rowingu. Velice záleží na orientaci vláken a druhu výrobního procesu (pultruze, splétání, tkaní). U všech procesů je vyžadováno, aby byly prováděny v nejvyšší kvalitě a nebyly veliké rozdíly mezi jednotlivými výrobky. Vlastnosti materiálů dále ovlivňuje historie zatížení, teplota, vlhkost i doba trvání zatížení. Je potřeba rozlišovat materiálové charakteristiky na krátkodobé a dlouhodobé.

### 5.1 Fyzikální vlastnosti

#### 5.1.1 Hustota

Výslednou hustotu kompozitního prvku, která se označuje  $\rho_c$ , lze vypočítat dle směšného pravidla ve tvaru:

$$\rho_c = \rho_f \cdot V_f + \rho_m \cdot V_m, \quad (1)$$

kde se sčítají hustoty jednotlivých složek. Přesněji hustota vláken  $\rho_f$  a hustota matrice  $\rho_m$ . Hustoty jednotlivých složek musí být roznásobeny jejich objemovým zastoupením v prvku, které se označují  $V_f$  pro vlákna a  $V_m$  pro matrice [4].

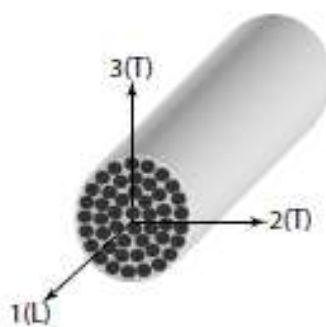
V tabulce 5.1 jsou uvedené hustoty kompozitních prvků z různých vláken (při objemovém množství vláken v průřezu  $V_f = 0,5-0,75$ ) a matic ve srovnání s ocelí. Z této tabulky vyplývá, že hustota kompozitních prvků je několikanásobně nižší než hustota oceli. Nižší hustota vede k lehčí manipulaci s výztuží na stavbě a nižším nákladům na dopravu [4], [3]. Hrozí však vyplavání výztuže při betonáži a je tedy nutnost výztuž v bednění fixovat [2].

Tabulka 5.1: hustota [ $\text{kg/m}^3$ ] kompozitní výztuže v závislosti na typu vláken a matrice, hustota oceli [4]

Matrice	FRP			Ocel
	CFRP	AFRP	GFRP	
Polyesterová	1430-1650	1310-1430	1750-2170	7850
Epoxydová	1440-1670	1320-1450	1760-2180	
Vinylesterová	1440-1630	1300-1410	1730-2150	

### 5.1.2 Součinitel teplotní roztažnosti

Součinitel teplotní roztažnosti FRP výztuže se označuje  $\alpha_f$ , závisí na typu zvolených vláken, matrice a jejich objemovém zastoupení ve výsledném prvku. FRP výztuže mají rozdílný součinitel teplotní roztažnosti v příčném směru  $\alpha_{ft}$  a ve směru podélném  $\alpha_{fl}$ . Jednotlivé směry jsou znázorněny na obrázku 5.1 [4]. V podélném směru určují součinitel především vlastnosti použitých vláken, ve směru příčném především vlastnosti matrice.



Obrázek 5.1: znázornění jednotlivých směrů FRP výztuže [4], 1(L) podélný směr, 2(T) = 3(T) příčný směr

Srovnání součinitelů teplotní roztažnosti oceli, betonu a některých kompozitních prvků je uvedeno v tabulce 5.2. Z důvodu rozdílných součinitelů teplotní roztažnosti kompozitní výztuže a betonu vznikají v konstrukci (především ve výztuži) přídavné síly, které je nutno zahrnout do výpočtu. Jejich velikost je závislá na vlastnostech výztuže. Nebezpečné jsou především situace, kdy rozdílná tepelná roztažnost generuje přídavné tahové síly. V příčném směru v betonovém prvku vyztuženého FRP výztuží (z důvodu vyšší tuhosti betonu než matrice) jsou přídavné síly zanedbatelné. V podélném směru závisí na typu vláken. U skleněných vláken přídavné tahové síly nevznikají ( $\alpha_{fl} = \alpha_c$ ). V případě CFRP z důvodu výrazně nižšího součinitele teplotní roztažnosti uhlíku vůči betonu se ve výztuži generují přídavné tahové nebo tlakové síly. Problematiku s přídavnými silami je nutno také řešit u dodatečně vyztužených konstrukcích. Zde může být rozdílná teplotní roztažnost FRP výztuže, lepidla, zesilovaného prvku [2], [8].

Tabulka 5.2: součinitel teplotní roztažnosti  $\alpha$  pro GFRP a CFRP výztuž, ocel a beton. (Platí pro objemové množství vláken  $V_f = 0,5-0,75$ ) [3], [2], [4]

Součinitel teplotní roztažnosti $\alpha$ ( $\times 10^{-6}/K$ )				
Orientace	GFRP	CFRP	Ocel	Beton
Podélný směr $\alpha_{fl}$	6 až 10	-1 až 0	12	7,2 až 10,8
Příčný směr $\alpha_{ft}$	19 až 23	22 až 50	12	7,2 až 10,8

### 5.1.3 Teplota skelného přechodu

Při působení vyšších teplot na matici dochází k významnému měknutí polymerní matrice (přechod z tuhého do kaučukovitého stavu) a změně mechanických vlastností. Tato teplota (rozsah teplot) se označuje jako teplota skelného přechodu  $T_g$  (glass transition temperature). Hodnota  $T_g$  je závislá na typu použité polymerní matrice a způsobu zpracování. Při vyšších teplotách, přibližně od 70 do 180 °C, začínají termosetické polymery měknout a porušovat se.  $T_g$  je prakticky použitelná veličina pro navrhování konstrukcí. Představuje limitní hodnotu stability nosných vlastností FRP výztuže [2]. Při teplotách od 100 do 200 °C kompozitní výztuže měknou a deformují se. Při teplotách přibližně od 300 do 500 °C dochází k rozkladu polymerní matrice, uvolňování tepla a těkavých toxických látek [2]. Při teplotách blízkých teplotě skelného přechodu polymerní matrice přestává přenášet smykové napětí. Dochází ke snížení tahové pevnosti, modulu pružnosti a především nedochází k přenosu napětí z betonu do výztuže (ztráta soudržnosti) [2]. Vzniká zde lokální efekt jako je například zvětšená šířka trhlin a zvětšené průhyby. Ztráta soudržnosti může vést ke ztrátě únosnosti a následnému kolapsu celé konstrukce [4].

### 5.1.4 Vliv zvýšené teploty na betonové konstrukce vyztužené FRP výztuží

Při vystavení kompozitních prvků zvýšeným teplotám dochází ke změně jejich vlastností. Rozhodující hodnota, při které kompozitní výztuž mění své fyzikální a mechanické vlastnosti, je teplota skelného přechodu  $T_g$ . Změna vlastností se především týká matrice, u které závisí na složení a vlastnostech, méně závisí na typu a vlastnostech vláken. Dále je důležitý typ a velikost teplotního zatížení, zda se jedná o normální provozní stav, nebo mimořádný stav v podobě požárního zatížení. V případě působení mimořádného požárního zatížení je nutno rozlišovat chování nechráněné kompozitní

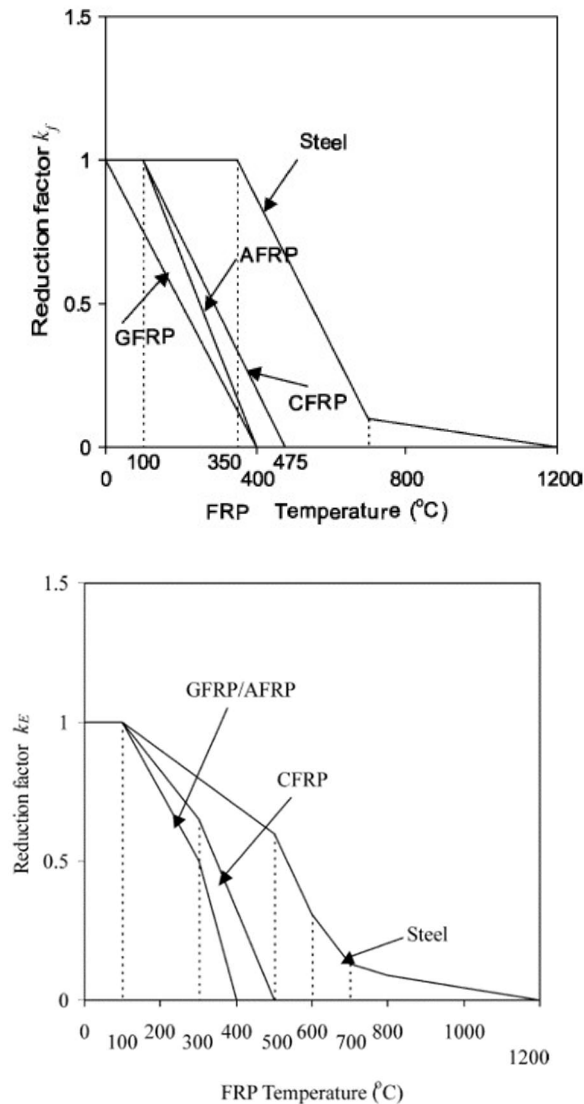
výztuže (při teplotách vyšších jak teplota skelného přechodu  $T_g$ ) a chování betonového průřezu vyztuženého FRP výztuží [3], [9].

Betonové prvky vyztužené FRP výztuží mají při požárním zatížení odlišné chování oproti betonovému prvku, který je vyztužený betonářskou výztuží. Při teplotách vyšších než je teplota skelného přechodu, začíná kompozitní prvek postupně ztrácet svoji tuhost. Matrice přestává přenášet smykové napětí a dochází ke snížení tahové pevnosti, modulu pružnosti a především nedochází k přenosu napětí z betonu do výztuže (ztráta soudržnosti). Nelze uvažovat s kompozitní výztuží jako celkem [2]. Vzniká zde lokální efekt jako je například zvětšená šířka trhlin a zvětšené průhyby [4]. Vhodným uspořádáním, zvýšení krycí vrstvy výztuže, typu použité třídy betonu, typu kameniva lze požární odolnost zvýšit. Důležité jsou oblasti, kde je kompozitní výztuž kotvena. V případě kotvení v místech konstrukce, kde není výztuž vystavena teplotám vyšším než teplota skelného přechodu, nedochází ke snížení soudržnosti (pevnosti) mezi výztuží a betonem. Výztuž je schopná přenášet tahové namáhání (bránit celkovému kolapsu konstrukce) i v případě, kdy je FRP výztuž ve světlé části rozponu prvku vystavena vyšším teplotám, které významně převyšují teplotu skelného přechodu  $T_g$ . Celkový kolaps konstrukce nastává v případě, kdy zvýšené teploty dosáhnou oblastí, kde je výztuž kotvena, popřípadě teplota dosáhne teploty degradace výztužných vláken. Přibližné teploty, kdy dojde ke ztrátě celkové únosnosti konstrukce jsou 880 °C pro skleněná vlákna, 1600 °C pro uhlíková vlákna [10], [4], [2], [3].

Celistvost výztuže je zajištěna v případě, že je kompozitní výztuž vystavena nižším teplotám než  $T_g$ . Při působení nižších teplot, než teplota skelného přechodu, dochází k urychlení chemických a fyzikálních reakcí, které ve výztuží probíhají (stárnutí, dotvarování apod.). Při dlouhodobém vystavení tomuto prostředí je nutno tento fakt uvážit do návrhu konstrukce. V případě krátkodobého zatížení teplotou nižší než je  $T_g$ , nedochází ke změně vlastností výztuže při tahovém namáhání [2].

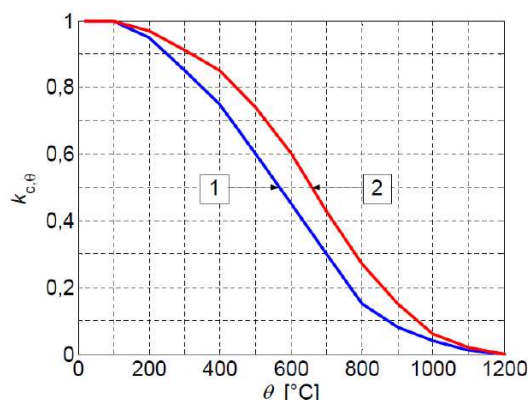
Snižující se pevnost v tahu a modul pružnosti se musí redukovat součiniteli, které tuto skutečnost zohledňují, viz. obrázek 5.2. Redukční součinitelé jsou různé v závislosti na typu kompozitní výztuže. Pro určení snížené pevnosti v tahu používáme součinitel  $k_f$ , pro modul pružnosti součinitel  $k_E$ , např. lze využít přístup dle [9]. Tento přístup je v souladu s platnou normou ČSN EN 1992-1-2 [11]. Tyto redukční součinitelé jsou určeny pro samostatnou nechráněnou výztuž. V případě kotvení výztuže

v místech, kde teplota nedosahuje teploty skelného přechodu  $T_g$ , je tento přístup příliš konzervativní.



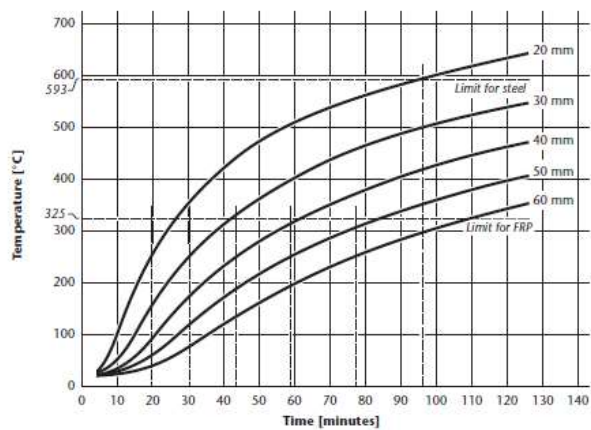
Obrázek 5.2: redukční součinitel pro FRP výztuže (porovnání s ocelí dle ČSN EN 1992-1-2 [11]) v závislosti na teplotě, nahoře redukční součinitel  $k_f$  pro tahovou pevnost, dole redukční součinitel  $k_E$  pro modul pružnosti [9]

Požár má negativní vliv i na mechanické vlastnosti betonu. Vysoká teplota degraduje všechny mechanické charakteristiky betonu. V některých případech může dojít k tomu, že se začne rozpadat povrchová vrstva betonu. Ve výpočtu se musí fakt snižující pevnosti v tlaku s rostoucí teplotou zohlednit pomocí redukčního součinitele. Jeho křivku můžeme vidět na obrázku 5.3. Výslednou sníženou pevnost v tlaku  $f_{cT}$ , získáme z původní pevnosti  $f_c$  vynásobenou o redukční součinitel  $k_c$  pro uvažovanou teplotu. [9]



Obrázek 5.3: redukční součinitel  $k_{c,\theta}$  pro určení snížené pevnosti betonu v tlaku při zvýšené teplotě [12]; 1 – beton s křemičitým kamenivem, 2 – beton s vápencovým kamenivem

Kanadská norma [10] uvádí, že únosnost betonového prvku vyztuženého FRP výztuží závisí na tloušťce krycí vrstvy výztuže, typu kameniva, typu použité kompozitní výztuže a kritické teplotě. Při této teplotě je konstrukce schopna přenášet právě působící zatížení při dané mimořádné situaci. Další zvýšení teploty vede ke snížení únosnosti a následnému kolapsu konstrukce. Pomocí zkoušek bylo zjištěno, že pro ocelovou výztuž je kritická teplota 593 °C. Při této teplotě ztrácí ocelová výztuž 50 % své únosnosti, kterou má při běžné pokojové teplotě [10]. Pro FRP výztuž tedy také platí, že kritická hodnota je považována, kdy dojde k 50 % redukci únosnosti FRP prutů. Pro kompozitní výztuž se skleněnými vlákny se uvádí teplota 325 °C [10]. Tyto hodnoty jsou použity pro grafy v příloze normy [10]. Grafy ukazují závislost tloušťky krycí vrstvy, času, teploty, tloušťky desky. Závisí také na typu použitého betonu, objemové hmotnosti, měrné tepelné kapacitě a typu kameniva. Na obrázku 5.4 lze vidět, že pro dosažení požární odolnosti 1 h, na desce o tloušťce 120 mm, kritickou teplotu FRP výztuže 325 °C je požadováno krytí přibližně 40 mm. Tato hodnota je informativní a závisí na typu pevnosti výztuže. Pro každou FRP výztuž může být jiná [10].



Obrázek 5.4: závislost tloušťky krycí vrstvy betonu pro FRP výztuž v betonové desce o tloušťce 120 mm, při dosažení kritické teploty 325 °C [10]

## 6 Krátkodobé mechanické vlastnosti

Na mechanické vlastnosti FRP výztuže má vliv mnoho faktorů. Záleží, zdali se jedná o dynamické nebo statické zatížení. Dále to ovlivňuje historie zatížení a doba trvání zatížení. Velkou roli má také prostředí, ve kterém se kompozitní prvek nachází: vlhkost, teplota. Největší vliv na mechanických vlastnostech má samotná FRP výztuž. Záleží na způsobu výroby: zda byla výztuž vyráběna pultruzí nebo kombinací pultruze a technologie ovíjení. Záleží také na typu zvolených vláken, kde rozhoduje jejich průměr, orientace, materiál. Na výsledné hodnoty má vliv matrice. Velice důležitý je výrobní postup a jeho kvalita provedení. Každý výrobce má tedy jiný výsledný produkt, u kterého je nutno přesně specifikovat jeho mechanické a fyzikální vlastnosti v technickém listu. Tyto vlastnosti musí výrobce stanovit pomocí zkoušek. Výrobce by měl také uvést zkušební postup (předpis), podle kterého získal výsledné hodnoty [3], [2].

### 6.1 Chování FRP výztuže v tahu

FRP výztuže mají anizotropní chování, neboť vlastnosti výztuže jsou jiné ve směru podélné (hlavní) osy a ve směru příčném. Pevnost v tahu ovlivňuje především druh použitých vláken, protože matrice má výrazně nižší pevnost v tahu než vlákna. Vlastnosti vláken, jejich orientace, objemové zastoupení v průřezu a také zdali je použit jeden nebo více typů vláken. Vliv na výslednou pevnost má způsob výroby, jeho kvalita provedení a skladování výsledného produktu. Vlastnosti FRP výztuže ovlivňuje velikost průřezu (větší průměr výztuže obvykle vykazuje horší mechanické vlastnosti než stejná kompozitní výztuž o nižším průměru) [3], [2].

Výztuž složená z jednoho typu vláken má při osovém namáhání vždy lineární pracovní diagram až do porušení, jelikož po celou dobu platí Hookův zákon. U méně kvalitních produktů je možno se setkat s počátečním měkkým chováním výztuže, než by odpovídal výpočet dle Hookova zákona. V důsledku postupného rovnání vláken v průřezu vznikají vyšší počáteční deformace. Toto chování není pro výztuž určenou do betonových konstrukcí žádoucí [2].

Výrobci musí uvádět k výrobku základní charakteristiky pro krátkodobé chování FRP výztuže v tahu (tabulka 6.1). Těmi jsou pevnost v tahu  $f_{F(l)}$ , kterou určuje především pevnost vláken, modul pružnosti  $E_{F(l)}$ , poměrné přetvoření  $\varepsilon_{F(l)}$ . Tyto hodnoty

by se měly prověřit pomocí zkoušek a odpovídat 0,05 a 0,95 kvantilu. Výrobce by měl také uvést jakou metodou byly zkoušky provedeny [4], [2], [3].

Tabulka 6.1: typické krátkodobé tahové vlastnosti FRP výztuže a oceli, pro objemové množství vláken 50 až 75 % [2], [4]

Vlastnost	GFRP	CFRP	AFRP	Ocel
Modul pružnosti (podélný směr) $E_{fl}$ [GPa]	35-60	100-580	40-125	200
Mezní napětí v tahu (podélný směr) $f_{flm}$ [MPa]	450-1600	600-3500	1000-2500	450-600
Mezní přetvoření v tahu $\varepsilon_{fl}$ [-]	1,2-3,7	0,5-1,7	1,9-4,4	5-20

Výztuž vyrobená pultruzí vykazuje nejlepší tahové vlastnosti při osovém namáhání ve směru vláken. Odsklon směru namáhání od podélné osy způsobuje snížení únosnosti výztuže (ortotropní chování výztuže). Únosnost výztuže dramaticky klesá při větším odklonu výslednice od osy než 10 až 15°. Je tedy vhodné navrhovat FRP výztuž namáhanou převážně centrickým tahem [2].

FRP výztuže vyrobené z termosetových pryskyřic nelze po jejich vytvrzení dále ohýbat, aby nedošlo k jejich porušení. V případě potřeby ohybů, je toto nutno provést ve výrobě. U FRP tyčí s ohyby je nutno z důvodu nehomogenity rozprostření vláken a jejich nestejném využití při vnesení zatížení uvažovat s redukcí tahové pevnosti přibližně o 40 až 50 % ve srovnání s pevností v tahu rovné výztuže. Výsledná hodnota závisí na poměru poloměru ohybu ku průměru výztuže [3], [2], [4].

## 6.2 Chování FRP výztuže v tlaku

V dnešní době se při návrhu FRP výztuže nedoporučuje uvažovat s jejich tlakovou pevností. Pevnost v tlaku je nižší než pevnost v tahu. Hodnoty pro pevnost v tlaku jsou závislé na geometrii vzorku a na zkušební metodě. Způsob selhání závisí na vlastnostech matrice, vláken a jejich objemovém zastoupení v průřezu. V tlakovém namáhání má také FRP výztuž nižší modul pružnosti i pevnosti. Tlakové porušení je způsobeno vznikem mikrotrhlin vláken, příčným tahovým lomem způsobeným Poissonovou konstantou (poměr relativní prodloužení k příčnému zkrácení) a smykovým porušením vláken bez vlivu kroucení. Metody, které charakterizují chování FRP výztuže v tlaku zatím nebyly standardizovány. Vlastnosti FRP výztuže při namáhání v tlaku pro jednotlivý výrobek by měl poskytnout výrobce, který by měl také uvést zkušební metodu a postup, jak bylo hodnot dosaženo [4], [2], [3].

### 6.3 Chování FRP výztuže ve smyku

V FRP výztuži dochází k porušení smykem dvěma způsoby. Toto porušení je vztahováno k osám kompozitního prvku, interlaminární (podélný) smyk a příčný smyk (střih). K podélnému smyku dochází především u výztuží, pomocí kterých se dodatečně vyztužují konstrukce. V případě FRP výztuže, která je v betonovém průřezu, se vyskytuje podélný smyk v kotevních oblastech výztuže. V betonovém průřezu vzniká především příčný smyk (střih), k tomuto namáhání dochází např. u smykových trnů [4], [2], [3].

Chování FRP výztuže při smykovém namáhání především ovlivňují vlastnosti matrice. V případě čistého střihu má vliv na výslednou pevnost typ použitých vláken, jejich modul pružnosti a orientace vláken. Předpokládá se, že výztuž s vyšším modulem pružnosti bude mít vyšší mezní střihovou odolnost. Výztuže, u kterých jsou vlákna umístěna pod úhlem s odklonem od podélné osy, se zvyšuje smyková odolnost. Tohoto efektu lze dosáhnout ovíjením vnějšího povrchu výztuže. V případě návrhu výztuže je nutno vycházet z údajů, které uvádí výrobce v technických listech k dané výztuži. Výrobce by měl také uvést zkušební postup, pomocí kterého se dosáhlo výsledných hodnot. Není zcela popsáno dlouhodobé chování FRP výztuže ve smyku [2], [3], [4].

### 6.4 Soudržnost

K přenosu napětí z betonového prvku do kompozitní výztuže dochází pomocí soudržnosti mezi betonem a FRP výztuží. Přenos napětí je ovlivněn chováním konstrukce jako celku, průhybem konstrukce, šířkou a vzdáleností trhlin, dále minimální tloušťkou krycí vrstvy výztuže a nutnou kotevní délkou. Soudržnost především ovlivňuje tvar a typ povrchové úpravy FRP výztuže a její mechanické vlastnosti, jako je například modul pružnosti. Dále také závisí na okolních podmínkách, které mohou negativně ovlivňovat soudržnost FRP výztuže a okolního betonu, například zvýšené teploty. V případě působení vyšších teplot, které dosahují teploty skelného přechodu matrice, dochází k měknutí matrice a následně ke ztrátě soudržnosti mezi betonem a kompozitní výztuží. [4], [2], [3].

Zakotvená FRP výztuž přebírá napětí z betonového prvku několika způsoby:

- adhezí povrchu výztužné vložky k betonu
- třením při posunu mezi výztuží a okolním betonem

- 
- mechanickým zaklesnutím nerovností povrchu výztuže do okolního betonu [2], [3].

Chování FRP výztuže je odlišné od chování klasické ocelové výztuže, kde při porušení dochází k drcení betonu v blízkosti žebírek ocelové výztuže. U FRP výztuže nejčastěji dochází k porušení přetržením výztuže - v případě, že je dodržena její kotevní délka, nebo vytržením výztuže z betonu. V těchto případech tedy nedochází k porušení okolního betonu, pevnostní třída betonu nemá zásadní vliv na porušení. Největší vliv má smyková únosnost matrice v podélném smyku a proto je tento fakt je nutno zohlednit při dlouhodobém působení FRP výztuže v betonu. Z důvodu nižší tuhosti matrice než betonu je sníženo riziko vzniku příčných tahových sil v kotevní oblasti a vzniku trhlin podél výztuže. Díky tomu je možné snížit tloušťku krycí vrstvy betonu [4], [3], [2].

Soudržnost je třeba zajistit vhodnou povrchovou úpravou FRP výztuže, není doporučeno využívat hladkou kompozitní výztuž bez povrchové úpravy. Běžně využívané povrchové úpravy jsou: pískování, žebírka, ovíjení apod. Rozdílné povrchové úpravy kompozitní výztuže vykazují také rozdílné vlastnosti v soudržnosti. Existuje tedy mnoho typů úprav a mnoho zkušebních postupů pro určení soudržnosti FRP výztuže s betonem. Výrobce by tedy měl uvést způsob zkoušení a údaje týkající se soudržnosti pro daný prvek [3], [4], [2].

## 7 Dlouhodobé mechanické vlastnosti

Kompozitní výztuž se liší od klasické ocelové výztuže v mnoha směrech a to i v dlouhodobých vlastnostech. FRP výztuž má v čase proměnné vlastnosti, což se z důvodu bezpečnosti musí zohlednit při návrhu konstrukce na požadovanou životnost [2], [4].

### 7.1 Dotvarování výztuže (Creep)

Dotvarování výztuže je termín, který popisuje postupné narůstání deformace materiálu v čase, které jsou způsobené od dlouhodobého konstantního zatížení. Materiál může náhle selhat i v případě, kdy je zatížení nižší než krátkodobá pevnost výztuže. Toto chování se nazývá „creep“. U FRP výztuže je třeba rozlišovat dva problémy: dotvarování při dlouhodobém zatížení a dlouhodobou pevnost v tahu při konstantním zatížení. Je nutno zajistit, aby výztuž nesehala dříve, než je dosaženo navržené životnosti konstrukce [2], [4].

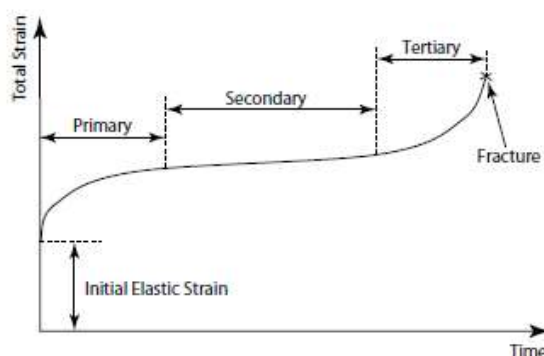
Typický průběh deformace je znázorněn na obrázku 7.1, kde je křivka rozdělena do tří fází. Po vnesení zatížení se výztuž elasticky deformuje během krátkého časového úseku – fáze I. Tento jev lze vysvětlit postupným přerozdělením vneseného zatížení z celého kompozitu na jednotlivá vlákna [2]. Platí, že okamžitě po vnesení zatížení lze počáteční přetvoření  $\varepsilon_0$  vypočítat jako

$$\varepsilon_0 = \frac{\sigma}{E_{fL} \cdot V_f + E_m \cdot (1 - V_f)} = \frac{\sigma}{E_{fL}}, \quad (2)$$

kde  $E_{fL}$  je modul pružnosti nosných vláken,  $V_f$  podíl vláken v myšleném jednotkovém řezu,  $E_m$  modul pružnosti matrice. Po vnesení zatížení dochází k dotvarování matrice a přenosu působícího napětí z matrice na nosná vlákna. Tato redukce probíhá pro většinu polymerních materiálů lineárně vzhledem k logaritmu času [2]. Redistribuce napětí z matrice do vláken je pro nízké hladiny přetvoření vratná, po odtížení vzorku dochází k postupnému vymizení přetvoření způsobeného dotvarováním kompozitu [4], [2].

Druhá fáze dotvarování je vyznačována mírným, ale konstantním růstem napětí po dlouhou dobu. V této fázi je nosnost určována především vlákny, konstrukce je v běžném provozu. V druhé fázi by správně navržená konstrukce měla působit po celou dobu životnosti. Třetí fáze je charakterizována prudkým nárůstem deformace. Následkem je křehké selhání vláken kompozitu. Je důležité stanovit poměr dlouhodobě

působícího zatížení ke krátkodobé únosnosti, aby se konstrukce po dobu navrhované životnosti nedostala do třetí fáze a nedošlo k náhlému přetržení výztuže a tím ke kolapsu konstrukce [2], [4].



Obrázek 7.1: idealizovaný nárůst deformace (dotvarování) kompozitní výztuže v závislosti na čase [2], [4]

Životnost (odolnost) FRP výztuže roste, pokud klesá poměr mezi dlouhodobě aplikovaným zatížením a krátkodobou pevností [2]. Toto ovlivňuje typ použitých vláken, jejich orientace a jejich objemové zastoupení i typ použité matrice. Dále to ovlivňují faktory jako vysoká teplota, vlhkost, vystavení UV záření, koncentrované alkalické prostředí a další. V případě způsobu zatížení, kdy je únosnost řízena především matricí, dochází k vyšší hodnotě dotvarování, klesá příznivý vliv vláken [2], [4].

## 7.2 Relaxace

Relaxace je jev, kdy dochází ke snižování počátečního napětí ve výztuži v závislosti na čase. Výztuž je při konstantní teplotě zatížena konstantní deformací a je sledován pokles napětí. Míra relaxace představuje procentuální snížení napětí ve výztuži při daném časovém úseku oproti napětí, které bylo ve výztuži při prvotním zatížení. Relaxace je běžně uváděna pro časový úsek jednoho milionu let. Hodnota relaxace závisí na typu použitých vláken, průměru výztuže a především na teplotě [4].

## 7.3 Únava

Únava je degradace celistvosti materiálu, kdy dochází ke vzniku mikrotrhlin v původně celistvém kompozitním materiálu. Důsledkem je zhoršení mechanických vlastností jako je pevnost či modul pružnosti. Tento jev je způsoben velkým počtem cyklů zatížení. Je možno se setkat s pojmy jako únavová pevnost, únavová tuhost či

únavový limit, to označuje hodnotu napětí, po kterou může být výztuž bez porušení cyklicky namáhána [2], [4].

Kompozitní výztuž vykazuje dobré únavové vlastnosti díky jejich vysoké mezi únavy a odolnosti vůči korozi. Porušení únavou může nastat v matrici (trhliny v matrici, praskání matrice), nosných vláknech (štěpení vláken, přetržení vláken), spojování trhlín, kontakt mezi vlákny a matricí (delaminace). Únavové chování závisí na typu a vlastnostech vláken, více však na vlastnostech a typu matrice. Faktory prostředí velmi významně ovlivňují únavové chování kompozitní výztuže, jako je vlhkost, zásadité a kyselé roztoky, teplota. CFRP výztuže mají nejlepší únavové vlastnosti, jsou nejméně náchylné k selhání únavou. V jednom milionu cyklů je únavová pevnost pro CFRP zhruba na mezi 50 až 70 % počáteční statické pevnosti. GFRP výztuže jsou náchylnější k selhání únavou než ocelové výztuže. V tomto případě je pro jeden milion cyklů únavová pevnost na mezi přibližně 30 % počáteční statické pevnosti [3], [2], [4].

#### **7.4 Stanovení návrhové únosnosti FRP výztuže při dlouhodobém namáhání**

Působení okolního prostředí a vlivy dlouhodobého zatížení zásadně ovlivňují dlouhodobou tahovou únosnost FRP výztuže, modul pružnosti není zásadně ovlivněn. Určení dlouhodobé tahové únosnosti kompozitní výztuže lze zjednodušeně určit zredukováním krátkodobé únosnosti. Redukční součinitel by měl zahrnovat vlivy okolního prostředí, okrajové podmínky, kterým bude výztuž vystavena po celou životnost stavby. Je nutno zohlednit také materiál FRP výztuže (typ matrice, vláken, povrchová úprava), požadovanou životnost, typ okolního prostředí (vnitřní, vnější výztuž, vlhkost, teplota, pH) a průměr FRP výztuže. Jednotlivé směrnice (normy) uvažují jiné postupy pro určení dlouhodobé pevnosti FRP výztuže [13].

##### **7.4.1 Přístup dle ACI 440.1R-15 [3]**

Určení krátkodobé návrhové pevnosti FRP výztuže v tahu je uvedeno v kapitole 11.1.3, kde do vztahu vstupuje redukční součinitel  $C_E$ , který v závislosti na typu vláken a environmentálního prostředí ovlivňuje návrhovou pevnost. Dlouhodobá pevnost je určena v závislosti na typu vláken (tabulka 7.1) jako procentuální omezení krátkodobé návrhové pevnosti.

Tabulka 7.1: stanovení dlouhodobé pevnosti dle typu použitých vláken [3], kde  $f_{fu}$  krátkodobá pevnost v tahu FRP výztuže vystavené environmentálnímu zatížení

Typ vláken	určení dlouhodobé pevnosti
uhlíková	0.55 $f_{fu}$
skleněná	0.20 $f_{fu}$
aramidová	0.30 $f_{fu}$

#### 7.4.2 Přístup dle CSA 806-12 [10]

Norma CSA 806 omezuje protažení GFRP výztuže od dlouhodobého zatížení na hodnotu maximálně 2 %. Dlouhodobá únosnost pro GFRP má být uvážena jako 25 % z krátkodobé návrhové tahové pevnosti, pro CFRP je to 65 % [10].

#### 7.4.3 Stanovení dlouhodobé únosnosti dle fib Bulletin No. 40 [4]

Směrnice [4], uvažuje nový přístup pro určení dlouhodobé pevnosti v tahu. Tento přístup na rozdíl od přístupů v publikacích [3], [10] zohledňuje všechny vlivy, které ovlivňují dlouhodobou pevnost FRP výztuže jako je vlhkost, teplota, prostředí, předpokládaná životnost. Je tedy možné stanovit přesnější hodnotu, která bude více odpovídat skutečným vlivům, kterým bude FRP výztuž po dobu životnosti vystavena. Návrh je založen na degradačních zkouškách daného typu výztuže, není tedy tak konzervativní a dovoluje využití vyššího potenciálu FRP výztuže [4].

Návrhová dlouhodobá pevnost FRP výztuže v tahu, pro požadovanou životnost se určí ze vztahu:

$$f_{fd} = \frac{f_{fk0}}{\eta_{env,t} \cdot \gamma_f}, \quad (3)$$

kde je  $f_{fk0}$  charakteristická krátkodobá pevnost,  $\eta_{env,t}$  redukční součinitel prostředí,  $\gamma_f$  materiálový součinitel. Správné určení redukčního součinitele je zásadní pro spolehlivý výpočet dlouhodobé pevnosti FRP výztuže. Součinitel  $\eta_{env,t}$  lze při znalosti charakteristické pevnosti výztuže vystavené agresivnímu prostředí a zatížené po dobu 1000 h ( $f_{fk1000h}$ ) určit jako:

$$\eta_{env,t} = \frac{f_{fk0}}{f_{fk1000h}} \cdot \frac{1}{\left(\frac{100-R_{10}}{100}\right)^n}, \quad (4)$$

kde je  $R_{10}$  redukce tahové pevnosti v procentech za dekádu na logaritmickém měřítku,  $n$  zohledňuje vliv vlhkosti a teplotu prostředí, kterému bude výztuž vystavena, předpokládanou životnost, případné použití jiného průměru výztuže oproti testovanému vzorku. V případě, že není známa dlouhodobá pevnost FRP výztuže pro čas 1000 h ( $f_{fk1000h}$ ), využije se vztah:

$$\eta_{env,t} = \frac{1}{\left(\frac{100-R_{10}}{100}\right)^{n+2}} \cdot \quad (5)$$

Tento vztah však není tak přesný a bezpečný jako vztah (4). Pro určení optimálního návrhu kompozitní výztuže je vhodné, aby výrobce udával hodnotu pevnosti v tahu zatížené výztuže po dobu 1000 h v alkalickém prostředí [4], [13].

## 8 Trvanlivost FRP výztuže

Na betonovou konstrukci vyztuženou kompozitní výztuží působí přímá, nepřímá a také enviromentální zatížení. Všechny tyto zatížení v konstrukci vyvolávají napětí. Konstrukci je tedy nutno posoudit na jednotlivé mezní stavy a dodržet podmínky spolehlivosti pro počáteční i dlouhodobé mechanické vlastnosti FRP výztuže, které jsou navíc ovlivněny účinky prostředí. Pro vyhodnocení dlouhodobého chování FRP výztuže se sledují procesy porušení: dotvarování, relaxace a únava výztuže (viz. kapitola 7), nasákavost a její vliv na fyzikální a mechanické vlastnosti. Tyto procesy mohou být způsobeny vnějším prostředím: vlhkost a vodní roztoky, požár, tepelné účinky (vysoké teploty, zmrazovací a rozmrazovací cykly), dlouhodobé a únavové zatížení, kyselé nebo alkalické roztoky, UV záření [2], [3], [4].

Mechanické, fyzikální a chemické účinky prostředí snižují dlouhodobou pevnost FRP výztuže. Literatury uvádí redukční součinitele, které vyhodnotili na základě zkoušek. Tyto součinitele vychází z poměru dlouhodobé a krátkodobé pevnosti. Součinitele nemusí odpovídat danému druhu výztuže u daného výrobce. V zemích EU bylo dohodnuto, že bude navrhování na enviromentální zatížení součástí stavebně technického osvědčení výrobce a nikoliv směrnic (norem). Ve směrnici na navrhování FRP výztuže budou pro každý materiál definovány pouze obecné a bezpečné charakteristické hodnoty. Parametry uvedené ve stavebně technickém osvědčení pro daný typ FRP výztuže mají přednost před obecnou směrnicí [2].

Trvanlivost a dlouhodobé vlastnosti FRP výztuže ze strany materiálu ovlivňuje matrice, vlákna, rozhraní mezi maticí a vlákny. Matrice chrání vlákna před působením vlhkosti a alkalického prostředí. Je nutné, aby byla vlákna dobře obalena maticí, nevyskytovaly se trhliny, dutiny, matrice byla dostatečně vytvrzena, dobré rozhraní matrice vlákna [4]. Další předpoklady pro trvanlivost a dlouhodobé vlastnosti jsou uvedeny v kapitole 7.4.

### 8.1 Účinek alkalického prostředí betonu a vlhkosti

Jeden z hlavních problémů FRP výztuže je pronikání vlhkosti a vodních roztoků, kontakt s alkalickým prostředím [2]. Rychlost degradace polymerních kompozitních výztuží vystavených kapalinám je úměrná rychlosti absorpce tekutiny [2].

Při hydrataci cementu v betonu vzniká hydroxid vápenatý a další hydratační produkty. Při dané vlhkosti vznikají alkalické roztoky s vysokým pH v rozmezí 10,5 až 13,0, které snižují mezní pevnost v tahu kompozitní výztuže. FRP výztuž je vhodná do cementových směsí, v kterých je nižší zastoupení portlandského slínku, jako je například směsný cement či vysokopecní cement. Ocelová výztuž se naopak do těchto cementových směsí s nízkou hodnotou pH nehodí, z důvodu nedostatečného vytvoření pasivačního filmu [2]. Výsledná hodnota závisí na zkušební metodě, složení roztoku, teplotě, času. Vyšší teploty (působí jako akcelerační faktor probíhajících chemických jevů) a delší doba vystavení alkalickému prostředí snižují odolnost FRP výztuže vůči alkalickým roztokům (obrázek 8.1). Výsledná snížená pevnost FRP výztuže při působení alkalického prostředí závisí na typu matrice, typu vláken, rozhraní mezi vlákny a maticí [3].

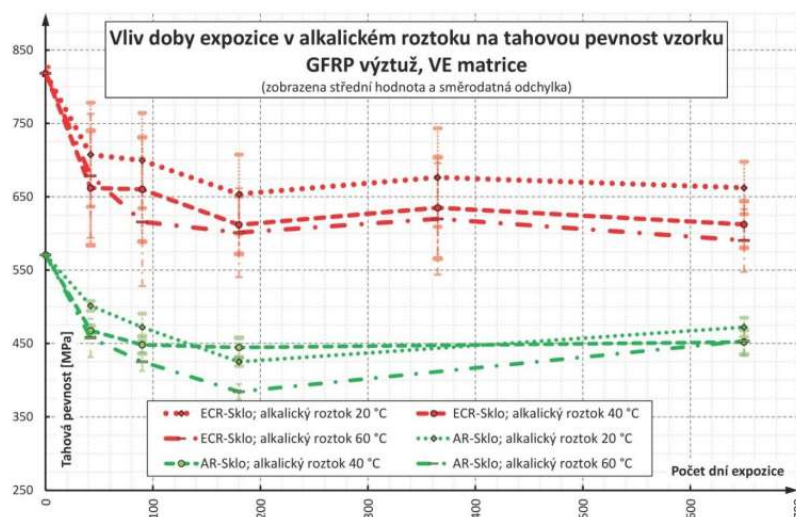
Polymerní matrice chrání vlákna, u kterých dochází k poškození kombinací dvou degradačních procesů [2]:

- 1 Chemickou korozi skleněných vláken v alkalickém prostředí
- 2 Koncentrací a zvětšováním objemu hydratačních produktů mezi jednotlivými vlákny

Matrice však zcela nezabrání, aby se roztoky, které ovlivňují trvanlivost FRP výztuže, dostaly až k povrchu vláken přes póry a mikrotrhliny v maticí. Jejich výskyt a množství závisí na nedokonalostech ve výrobě, tahovém napětí. Velký výskyt nedokonalostí v maticí vede k usnadnění pronikání vlhkosti, roztoků s vysokým pH, soli, až k rozhraní mezi maticí a vlákny. V publikacích [2], [3], [4] se uvádí, že bylo zjištěno, že vinylesterové (epoxidové) matrice mají dobrou odolnost proti proniknutí vlhkosti, polyesterové pryskyřice neposkytují skleněným vláknům potřebnou ochranu proti pronikání alkalických iontů [2]. Trvanlivost v alkalickém prostředí ovlivňují vlákna. Skleněná vlákna jsou citlivá na alkalické prostředí v důsledku přítomnosti oxidu křemičitého ve skleněných vláknech [2]. V literatuře [3] je uvedeno, že v GFRP může dojít ke snížení pevnosti v tahu od 0 do 75 % oproti počáteční pevnosti. U AFRP a CFRP k tak výraznému snížení nedochází. U GFRP stále probíhají výzkumy týkající se působení alkalického prostředí na skleněná vlákna [4], [2], [3].

Vlhkost v různé relativní hodnotě působí jako změkčovadlo pryskyřice a narušuje vazby v polymerních řetězcích. To způsobuje z hlediska dlouhodobých vlastností

změnu pevnosti v tahu a modulu pružnosti, deformací, houževnatosti. Vede to k praskání polymerní matrice, hydrolyze, separaci vláken a matrice. Karbonatace betonu snižuje pH v betonu a tím se zvyšuje možnost aplikace FRP výztuže do betonového prvku. Nižší hodnota pH přispívá k trvanlivosti a odolnosti vláken v kompozitní výztuži, naopak negativně ovlivňuje pasivaci ocelové výztuže a následnou korozi [4].



Obrázek 8.1: závislost pevnosti v tahu GFRP výztuže na expoziční době a teplotě prostředí [13]

## 8.2 Teplotní namáhání

Velmi důležitý vliv okolního prostředí, který velmi významně mění fyzikální a mechanické vlastnosti FRP výztuže je teplotní namáhání, které navíc také působí jako urychlovač probíhajících chemických dějů (například při působení alkálií). Při teplotním namáhání hraje hlavní roli typ použité matrice a její vlastnosti. Teplotní namáhání z časového hlediska má krátkodobý nebo dlouhodobý účinek. Krátkodobý účinek je obecně fyzikální a po návratu teploty na výchozí hodnotu je vratný [2]. Při dlouhodobém působení teploty na FRP výztuž dochází k nevratné chemické změně, tento účinek se označuje jako stárnutí [2]. Z hlediska účinků zvýšených teplot na vlastností polymerní matrice jsou významné hodnoty jako: teplota skelného přechodu, teplotní roztažnost, teplotní vodivost. Více kapitoly 5.1.3 a 4.2.1.

## 8.3 Koroze polymerní matrice

Odolnost polymerní matrice proti chemické korozi závisí na jejím chemickém složení a vazbě mezi monomery. Jako polymerní matrice pro FRP výztuž se používají

termosetické polymery, které mohou degradovat několika způsoby, hlavní dvě skupiny degradace jsou fyzikální a chemická [2].

#### **8.4 Účinek ultrafialového záření**

Působení ultrafialového záření a vlhkosti, na vnitřní FRP výztuž před uložením do betonu nebo při použití externí výztuže, negativně ovlivňuje pevnost v tahu v důsledku degradace polymerních složek. Správné konstrukční postupy a pryskyřičné přísady mohou tyto povětrnostní vlivy zmírnit. Doporučuje se tedy, aby kompozitní výztuže před uložením do betonové směsi byly chráněny před přímým slunečním zářením a vlhkostí. Po uložení výztuže do betonové směsi se účinky UV záření neprojevují [4], [2], [3].

#### **8.5 Působení solí**

Působení různých typů solí nemusí nutně znamenat snížení pevnosti a tuhosti FRP výztuže. Některé studie ovšem zjistili 0 až 20 % snížení počáteční pevnosti v tahu v GFRP tyčích vystavených solnému roztoku při pokojové teplotě a cyklických teplotách zmrazování a rozmrazování [3]. Nelze přesně určit k jakému snížení pevnosti v závislosti na typu matrice a vláken dochází v závislosti na čase. Je možné, že při pokusech došlo k napadení v důsledku vlhkosti, alkalického napadení vláken. Existují příznaky, že solné roztoky jsou mírně horší prostředí, než je působení ve sladké vodě [4].

#### **8.6 Teplotní roztažnost**

Součinitel teplotní roztažnosti závisí na typu vláken a matrice, je rozdílný v příčném a podélném směru FRP výztuže. Tato problematika se týká především externích výztuží a betonových prvků vyztužených CFRP výztuží. Podrobnější řešení problematiky teplotní roztažnosti FRP výztuže je uvedeno v kapitole 5.1.2.

#### **8.7 Účinek zmrazovacích a rozmrazovacích cyklů**

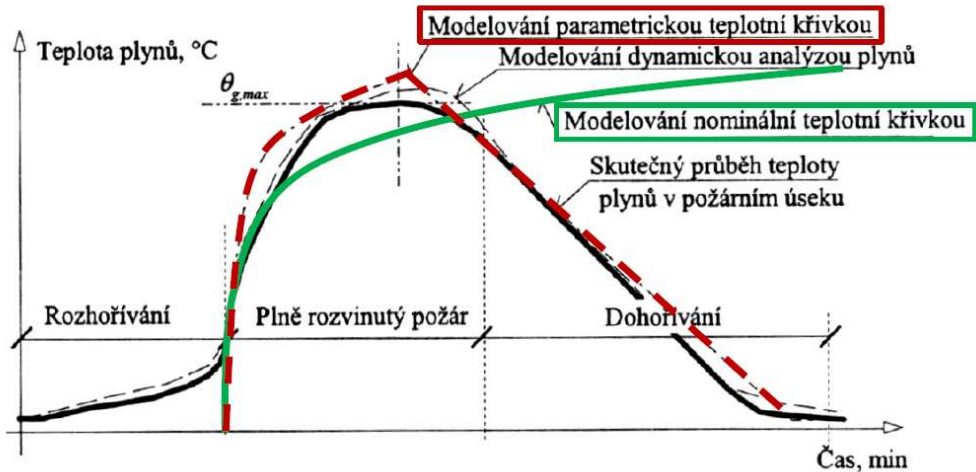
Zmrazovací a rozmrazovací cykly mohou vytvořit trhliny v betonu, přes které se urychlí přístup roztoku k FRP výztuži. Roztoky mohou vyvolat degradaci polymerní matrice a následně vláken. Zmrazovací a rozmrazovací cykly významněji neovlivňují mechanické vlastnosti FRP výztuže [2].

## 9 Navrhování betonových konstrukcí na účinky požáru

Hoření je redoxní exotermní reakce, která vzniká a probíhá za určitých podmínek. Požár je nekontrolované hoření a řadí se mezi mimořádné zatížení. Je tedy nutné zajistit, aby po stanovenou dobu zůstala zachována únosnost a stabilita nosných konstrukcí, nedocházelo k šíření ohně a kouře mezi požárními úseky a mimo objekt, osoby mohli bezpečně opustit budovu a v neposlední řadě mohl být proveden bezpečný zásah jednotek požární ochrany. Požární bezpečnost staveb se rozlišuje na aktivní protipožární opatření a pasivní protipožární opatření. Aktivní požární ochrana působí do celkového vzplanutí a patří sem např.: jednotky hasičského záchranného sboru, samočinná hasicí zařízení, elektrická požární signalizace a další. Do pasivní požární ochrany se řadí vhodně zvolené stavební materiály, rozdělení objektu na požární úseky, bezpečné únikové cesty, požární odolnost nosné konstrukce [14], [15].

U konstrukce, která je vystavena účinku požáru musí být zajištěna požární odolnost. Schopnost konstrukce, jejích částí nebo prvků musí splňovat požadovaná kritéria při daném účinku požáru po stanovenou dobu, aniž by došlo k porušení jejich funkcí. Základní kritéria požární odolnosti se rozdělují na kritérium únosnosti (R), celistvosti (E), izolační schopnosti (I) a mechanické odolnosti vůči nárazu (M). Nosná funkce zajištění únosnosti konstrukce při požárním zatížení na požadovanou dobu je obvykle 30, 60 nebo i více minut. Požárně dělící funkce představují dělící prvky ohraničující požární úsek. Dělící prvky zabraňují šíření požáru a horkých plynů během požárního zatížení. Stavební prvky se dělí do skupin dle hořlavosti na nehořlavé (třída reakce na oheň A1) až extrémně hořlavé (třída reakce na oheň F).

Průběh požáru v požárním úseku lze popsat závislostí teploty plynů na čase: tento průběh určují teplotní křivky v obrázku 8.1. Jsou zde vidět tři fáze působení požáru. V první fázi rozhořívání je malý nárůst teploty plynů, požár je stále v místě vzniku. Když teplota plynů dosáhne 500-600 °C lze požár považovat za plně rozvinutý. V druhé fázi je rychlý nárůst teploty plynů a veškeré hořlavé látky hoří. Požár vyplňuje celý prostor požárního úseku. Poslední je fáze dohořívání, kde dochází ke snížení teploty plynů. Na konci průběhu teplotní křivky je teplota v požárním úseku stejná jako před vypuknutím požáru [15], [14].



Obrázek 9.1: teplotní analýza požárního úseku, teplotní křivky [15]

Konstrukci při mimořádném požárním zatížení lze řešit jako celek, nebo po částech. Je nutno zohlednit okrajové podmínky, podepření podpor, pokles podpor, deformace. Pro návrh je možno využít tabulkové hodnoty, zjednodušené výpočetní metody, zpřesněné výpočetní metody, provedení zkoušek požární odolnosti, kombinace zkoušek a výpočtu. Pro posouzení konstrukce z hlediska únosnosti po stanovenou dobu vystavení účinkům požáru  $t$  je nutno, aby platil vztah ve tvaru

$$E_{d,fi} \leq R_{d,t,fi}, \quad (6)$$

kde je  $E_{d,fi}$  účinek návrhových zatížení včetně teplotní roztažnosti a deformace,  $R_{d,t,fi}$  odpovídající únosnost za požáru. Uvažuje se mimořádná návrhová situace pro stanovení účinků  $E_{d,fi}$  vstupuje do vztahu součinitel  $\psi_{1,1}$  nebo  $\psi_{2,1}$ . Zjednodušeně lze získat účinek zatížení při požáru  $E_{d,fi}$  z výpočtu při běžné teplotě ze vztahu

$$E_{d,fi} = \eta_{fi} E_d, \quad (7)$$

kde je  $E_d$  návrhová hodnota odpovídající síly nebo momentu pro návrh při běžné teplotě pro základní kombinaci zatížení,  $\eta_{fi}$  redukční součinitel pro úroveň návrhového zatížení pro požární zatížení. Pro redukční součinitel je možno konzervativně uvažovat hodnotu 0,7 pro betonové konstrukce, 0,65 pro zděné konstrukce nebo je možné provést přesný výpočet. Pro případ, kdy při návrhu za běžné teploty byla uvažována kombinace 6.10, lze určit

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + \psi_{fi} \cdot Q_{k,1}}{\gamma_G \cdot G_k + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1}}, \quad (8)$$

v případě, že byla při návrhu za běžné teploty uvažována kombinace 6.10a a 6.10b, uvažuje se větší hodnota z

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + \psi_{fi} \cdot Q_{k,1}}{\gamma_G \cdot G_k + \gamma_{Q,1} \cdot \psi_{0,1} \cdot Q_{k,1}}, \quad (10.1)$$

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + \psi_{fi} \cdot Q_{k,1}}{\xi \cdot \gamma_G \cdot G_k + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1}}, \quad (10.2)$$

kde je  $Q_{k,1}$  hlavní proměnné zatížení,  $G_k$  charakteristická hodnota stálého zatížení,  $\gamma_G$  dílčí součinitel pro stálé zatížení,  $\gamma_{Q,1}$  dílčí součinitel pro proměnné zatížení 1,  $\psi_{fi}$  kombinační součinitel pro časté nebo kvazistálé hodnoty dané jako buďto  $\psi_{1,1}$  nebo  $\psi_{2,1}$ ,  $\xi$  redukční součinitel pro nepříznivé stálé zatížení  $G$  [15], [14].

Pro návrh betonových průřezů na účinky požáru, lze využít tabulkové hodnoty, zjednodušené výpočtové metody, zpřesněné výpočtové metody. Zjednodušené výpočtové metody (metoda izotermy 500 °C, zónová metoda) jsou komplikovanější oproti tabulkovému návrhu, ale dávají přesnější výsledky. Pro jejich určení je nutno znát rozložení teploty v posuzovaném průřezu pro posuzovaný čas požárního zatížení [16], [17].

## 9.1 Metoda Izotermy 500 °C

Metodu lze využít pro normovou i parametrickou teplotní křivku, výpočet pro ohýbané prvky, kombinace ohybu a normálové síly. Je zaveden předpoklad, že beton vystavený teplotě vyšší jak 500 °C je poškozen požárem a ve výpočtech zanedbán. Beton s nižší teplotou není nijak poškozen, má stejnou únosnost jako při běžné pokojové teplotě. V tabulce 8.1 jsou uvedeny minimální šířky průřezu, pro které jde uplatnit metoda izotermy 500 °C. Teplota ve výztuži úměrně redukuje její pevnost. Metoda předpokládá, že soudržnost výztuže s betonem je zajištěna i v nezapočítané části betonu. Výztuž, která se v této oblasti nachází je tedy možno započítat. Další důležitý předpoklad pro použití metody izotermy 500 °C je, že průřez zůstává rovinný i po deformaci: to platí i pro průřez který byl poškozen požárem.

Tabulka 9.1 Nejmenší šířka průřezu jako funkce požární odolnosti a hustoty požárního zatížení [17]

Požární odolnost	R 60	R 90	R 120	R 180	R 240
Nejmenší šířka průřezu [mm]	90	120	160	200	280
Hustota požárního zatížení [MJ/m]	200	300	400	600	800
Nejmenší šířka průřezu [mm]	100	140	160	200	240

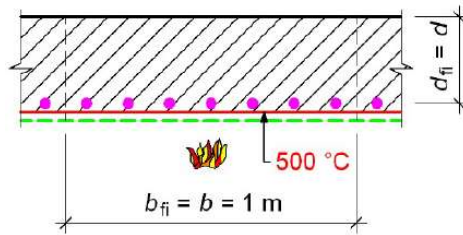
Pro výpočet je nutné znát rozložení teploty (teplotní profil) v posuzovaném průřezu, na základě toho se stanoví poloha izotermy 500 °C. Další kroky jsou zredukování průřezu o plochu betonu, kde působí vyšší teplota jak 500 °C (nová šířka a výška příčného průřezu). S plochou, kde je vyšší teplota jak 500 °C se neuvažuje. Pevnost betonu v místech, kde je teplota nižší jak 500 °C se nijak nesnižuje. Tato pevnost se uvažuje jako při teplotě 20°C. Stanovení teploty v těžišti jednotlivých výztuží: Pro určení teploty jednotlivých výztuží je možno využít teplotních profilů. Redukovaný deskový průřez je na obrázku 8.2. Na obrázku 8.3 je redukovaný trémový průřez, který lze idealizovat na pravoúhlý průřez. Návrhová hodnota tlakové pevnost betonu se určí ze vztahu

$$f_{cd,fi,20^{\circ}C} = \frac{f_{ck}}{\gamma_{C,fi}}, \quad (11)$$

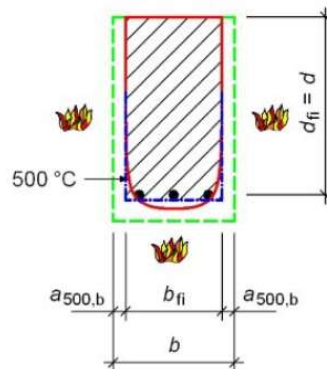
kde  $f_{ck}$  je charakteristická hodnota pevnosti betonu v tlaku při běžné teplotě,  $\gamma_{C,fi}=1$  dílčí součinitel spolehlivosti betonu při požární situaci. Únosnost výztuže, která je vystavená negativním účinkům požáru je potřeba redukovat součinitelem  $k_{s,\theta}$ . Redukovaná únosnost ocelové výztuže při působení zvýšené teploty se vypočte

$$f_{syd,fi} = k_{s,\theta} \frac{f_{yk}}{\gamma_{Sfi}}, \quad (12)$$

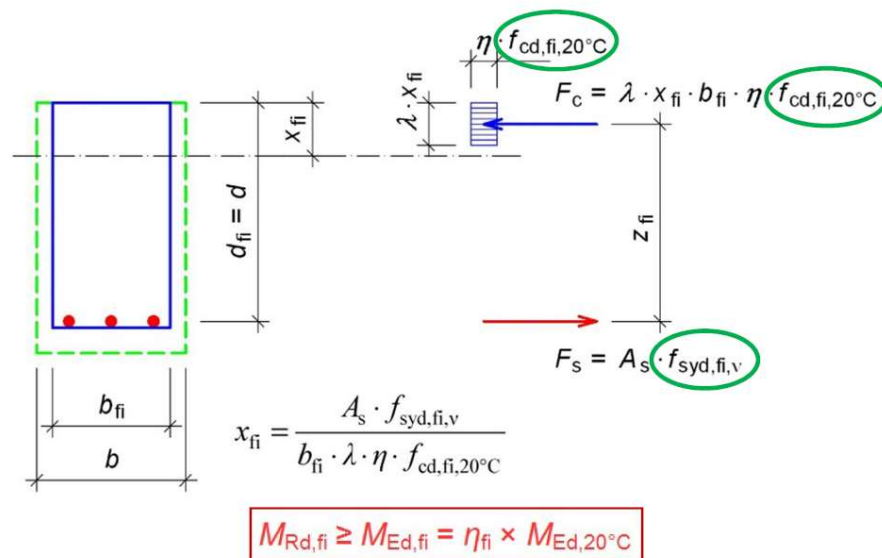
kde  $k_{s,\theta}$  je součinitel pro redukci charakteristické hodnoty meze kluzu betonářské výztuže odpovídající teplotě výztuže  $\theta$ ,  $f_{yk}$  charakteristická hodnota meze kluzu betonářské výztuže při běžné teplotě,  $\gamma_{Sfi}=1$  dílčí součinitel spolehlivosti výztuže při požární situaci. Pro stanovení součinitele redukce charakteristické hodnoty  $k_{s,\theta}$  je možno využít grafy nebo tabulky. Hodnoty se mohou lišit pro taženou a tlačенou výztuž. Po určení materiálových charakteristik se běžnou metodou (obrázek 8.4) pro výpočet ohýbaného vyztuženého betonového prvku určí návrhová hodnota únosnosti redukovaného průřezu, která se porovná s příslušnou návrhovou hodnotou od zatížení [17], [16].



Obrázek 9.2: stanovení redukovaného deskového (stěnového) průřezu, při působení požáru z tažené strany průřezu [16]



Obrázek 9.3: Stanovení redukovaného prutového průřezu, při působení požáru z tažené strany průřezu [16]



Obrázek 9.4: Výpočet ohýbaného průřezu na redukovaném průřezu, posouzení návrhových momentů od zatížení a únosnosti [16]

## 10 Zásady navrhování konstrukcí s kompozitní výztuží

Níže jsou uvedeny některé zásady pro návrh převážně ohýbaných betonových konstrukcí vyztužených pomocí FRP výztuže. Mezní únosnost průřezu může být dosažena porušením betonu, FRP výztuže nebo balančním porušením (porušení obou materiálů ve stejný okamžik). [2]

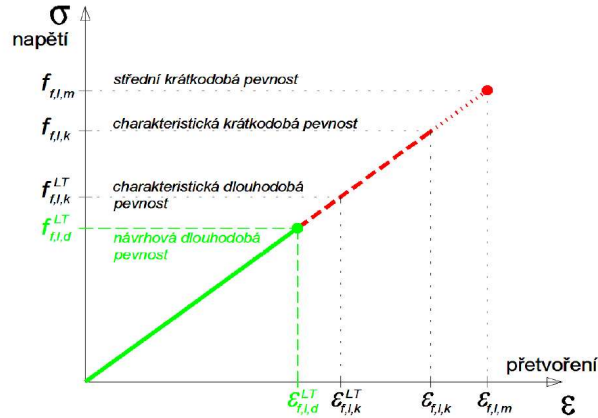
### 10.1 Základní ustanovení

Betonové konstrukce vyztužené vnitřní nekovovou výztuží by měly být (stejně jako prvky s klasickou ocelovou výztuží) navrženy v souladu s platnými normativními dokumenty, především normou ČSN EN 1990 [18] a ČSN EN 1992-1-1 [19]. Prvky je také možno navrhovat dle doporučení uvedených v [3], [4], [10]. V případě využití zahraničních návrhových dokumentů je nutno zohlednit rozdílné přístupy k určení spolehlivosti dle daného předpisu. Rozdílné jsou především přístupy ke stanovení návrhových hodnot, zatížení, odolnosti. Vždy by měla být splněna požadovaná spolehlivost konstrukce dle norem ČSN EN 1990 [18] a ČSN EN 1992-1-1 [19], [2].

Konstrukce by měla být navržena a provedena tak, aby odolala všem nepříznivým vlivům a účinkům zatížení po celou životnost stavby, a to i během jejího provádění. Dále je požadována dostatečná odolnost, spolehlivost a trvanlivost celé konstrukce [2]. Návrh má být proveden dle mezních stavů metodou dílčích součinitelů dle ČSN EN 1990 [18]. Zatížení by mělo být stanoveno v souladu s normami řady ČSN EN 1991 a kombinace dle ČSN EN 1990 [18]. Vlastnosti materiálů a geometrické údaje mají respektovat ČSN EN 1990 [18]. Návrhové veličiny FRP výztuže mají přihlídnout a zohlednit vlivy prostředí a dlouhodobé účinky zatížení. Při návrhu by měl být uvažován idealizovaný návrhový diagram FRP výztuže (obrázek 10.1). Pro materiálové charakteristiky betonu a uvažované součinitele platí EN 1992-1-1 [19], [2].

Při návrhu konstrukcí vyztužených FRP výztuží, kde je uvažováno zatížení požárem dle ČSN EN 1992-1-2 [11], je třeba zajistit požadovanou požární odolnost prvku [2]. Požární odolnost může být zajištěna například vhodným konstrukčním uspořádáním. V případě kotvení v místech, kde není výztuž vystavena vysokým teplotám, při kterých dochází ke ztrátě soudržnosti mezi betonem a výztuží. Únosnost konstrukce lze zajistit i v případě mimořádného požárního zatížení. Řešení tématu odolnosti konstrukce při působení mimořádného zatížení je přiblíženo v kapitole 9 a

5.1.4. Při návrhu konstrukce s provozním teplotním zatížením je nutno zajistit, aby nejvyšší teplota betonového průřezu byla o 30 °C nižší než je teplota skelného přechodu polymerní matrice Tg [2].



Obrázek 10.1: idealizovaný návrhový diagram FRP výztuže [20]

### 10.2 Návrhová životnost staveb

Doporučená návrhová životnost staveb pro konstrukce vyztužené FRP výztuží je uvažována dle normy ČSN EN 1990 [18], viz. tabulka 10.1. Hodnoty jsou stejné jako pro konstrukce vyztužené tradiční ocelovou výztuží. Pro návrh životnosti kompozitní výztuže je nutno zohlednit dlouhodobé účinky od zatížení a působení nepříznivého prostředí, kterému bude konstrukce vystavena.

Tabulka 10.1: Indikativní návrhová životnost, ČSN EN 1990 [18]

Kategorie návrhové životnosti	Indikativní návrhová životnost (v letech)	Příklady
1	10	Dočasné konstrukce
2	10 až 25	Vyměnitelné konstrukční části
3	25 až 50	Zemědělské a obdóné stavby, stavby pro energetiku, stožáry
4	50	Budovy a další běžné stavby (i jejich součásti)
5	100	Mosty a jiné inženýrské konstrukce (i jejich součásti)
6	120	Monumentální stavby a tunely, hráze

### 10.3 Dílčí materiálové součinitele

Hodnota parciálního součinitele betonu  $\gamma_c$ , pro ověření mezního stavu únosnosti by měla být uvažována dle EN 1992-1-1 [19]. Parciální součinitel FRP výztuže  $\gamma_F$ , je nutno uvážit dle očekávaného způsobu porušení prvku. Je doporučeno tuto hodnotu stanovit na základě statistického vyhodnocení dat získaných ze zkoušek vzorku jako 0,1% kvantil daného rozdělení viz. kapitola 11.1.4 [2].

### 10.4 Navrhování na základě zkoušek

Navrhování prvků vyztužených FRP výztuží lze (a je doporučeno) podpořit zkouškami v souladu s normou ČSN EN 1990 [18], [2].

### 10.5 Minimální krycí vrstva

Krycí vrstva FRP výztuže v betonovém prvku nemá za úkol zajišťovat ochranu proti korozi výztuže od nepříznivých vlivů prostředí jako je tomu u ocelové výztuže. Minimální krycí vrstva musí mít takovou tloušťku, aby byla zajištěna soudržnost mezi betonem a FRP výztuží a tím vytřena ochrana před účinky požáru. Jednotlivé směrnice (normy) předepisují rozdílnou krycí vrstvu  $c$ , příklady uvedeny v tabulce 10.2. Tloušťka krycí vrstvy je závislá na složení FRP výztuže, typu celého prvku, požárním zatížení. Při působení požárního zatížení krycí vrstva zajišťuje definovanou požární odolnost konstrukce vyztužené FRP výztuží, viz. kapitola 5.1.4. Výsledná tloušťka má přímý vliv na požární odolnost konstrukce, kotvení FRP výztuže soudržností betonu, šířku trhlin [2].

Tabulka 10.2: minimální tloušťky krycí vrstvy FRP výztuže v betonovém průřezu [10], [3], [4],

$\varnothing_F$  – průměr výztuže

Norma (směrnice)	CSA S806 [7]	fib [4]	ACI 440 [3]
minimální tloušťka krycí vrstvy $c_{min}$	$2\varnothing_F, 30 \text{ mm}$	25 až 40 mm	$2\varnothing_F$

U dočasných konstrukcí, prvku, které mají pouze dočasnou funkci, lze minimální krycí vrstvu, požadavek na trvanlivost, požární odolnost při návrhu snížit na hodnotu zajišťující pouze soudržnost. Doporučená hodnota tloušťky krycí vrstvy v konstrukcích, prvcích s dočasnou funkcí  $c = \max \{ \varnothing_F; 10 \text{ mm} \}$  [2].

## 11 Navrhování betonových konstrukcí vyztužených FRP na MSÚ

### 11.1 Návrh na ohyb

Rozdílné vlastnosti FRP výztuže a tradiční betonářské výztuže je nutno zohlednit při návrhu a posudku průřezu. Důležitý je především fakt, že kompozitní výztuž nevykazuje duktilní chování (nemá plastickou větev u návrhového diagramu). FRP výztuž vykazuje proměnlivé vlastnosti v závislosti na čase a prostředí. Průřez je nutno posoudit nejen na krátkodobou únosnost průřezu, ale také na dlouhodobou pevnost (únosnost) výztuže. Tato problematika byla řešena v kapitole 7. Idealizovaný návrhový diagram FRP výztuže v tahu je na obrázku 10.1. Pro řešení návrhu a posouzení betonových průřezů vyztužených FRP výztuží, jsou v této bakalářské práci zohledněny zahraniční návrhové podklady:

- publikace fib Bulletin No.40 – FRP Reinforcement in RC Structures [4]
- americká směrnice ACI 440.1R-15 – Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars [3]
- kanadská norma CSA S806-12: Design and Construction of Building Structures with Fibre-reinforced Polymers [10].

#### 11.1.1 Základní předpoklady návrhu prvku vyztuženého FRP výztuží [20]

Mezní stav, tj. mezní únosnost průřezu nastane při dosažení mezního poměrného přetvoření alespoň v jednom z materiálů (tj. mezní přetvoření v tlačeném betonu  $\epsilon_c$ , popřípadě mezní návrhové přetvoření v tahu ve výztuži  $\epsilon_{cfu,d}$ ). Předpoklady návrhu lze definovat v následujících bodech:

- průřez zůstává rovinný i po deformaci
- beton v tahu nepůsobí
- je zajištěna dokonalá soudržnost mezi betonem a FRP výztuží (poměrné přetvoření betonu  $\epsilon_c$  v blízkosti výztuže a poměrné přetvoření výztuže v tahu  $\epsilon_F$  jsou uvažována shodná)
- napětí v tlačené části průřezu se stanoví dle definovaného pracovního diagramu betonu v tlaku

- napětí v FRP výztuži je uvažováno lineárně pružné až do porušení, při návrhu musí být přihlédnuto k omezení napětí ve výztuži s ohledem na působení trvalého zatížení a podmínky prostředí
- příspěvek tlakové únosnosti FRP výztuže je zanedbán (z důvodu nedostatku přesných informací o působení FRP v tlaku).

### 11.1.2 Stanovení únosnosti ohýbaného průřezu vyztuženého FRP výztuží, způsoby porušení

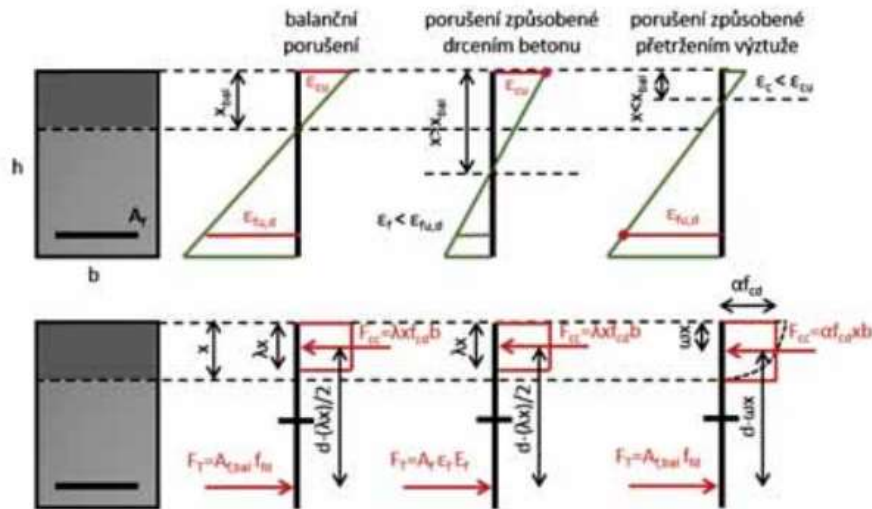
Porušení ohýbaného betonového průřezu vyztuženého FRP výztuží může nastat drcením betonu, popřípadě přetržením výztuže. Teoreticky je možné takzvané balanční porušení, v tomto případě dojde současně k porušení betonu i výztuže. Mezní přetvoření je dosaženo v obou materiálech současně [20]. S ohledem na křehké chování FRP výztuže je preferováno, aby k porušení došlo v oblasti tlačných vláken betonu. Vyztužení je vyšší než v balančním stavu. Z důvodu nižšího modulu pružnosti FRP výztuže v porovnání s ocelovou betonářskou výztuží dochází v tažené oblasti k viditelnému rozvoji trhlin. V případě nižšího vyztužení než v balančním stavu dojde k náhlému tahovému porušení výztuže. V krajních vláknech tlačného betonu není dosaženo mezního přetvoření  $\varepsilon_{cu}$ , je požadována vyšší míra bezpečnosti [20].

Při předpokladu rovinnosti průřezu po deformaci a uvážení mezních přetvoření v obou materiálech lze vyjádřit balanční polohu neutrální osy ve tvaru [20]

$$x_{bal} = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{fu,d}} \cdot d, \quad (13)$$

kde je  $d$  účinná výška průřezu,  $\varepsilon_{cu}$  mezní přetvoření betonu v tlaku a  $\varepsilon_{fu,d}$  návrhová hodnota mezního poměrného přetvoření FRP výztuže v tahu.

Z předpokladu rovnováhy sil na průřezu lze pomocí výpočtu stanovit balanční plochu vyztužení  $A_{f,bal}$ . V případě porovnání se skutečně navrženou plochou FRP výztuže  $A_f$  lze určit způsob porušení průřezu. Při stanovení balanční plochy vyztužení lze použít rovnoměrné rozdělení napětí v tlačné části průřezu, neboť v krajních vláknech průřezu je dosaženo mezního přetvoření [20]. Uvažované chování průřezu je na obrázku 11.1.



Obrázek 11.1: průběh přetvoření a napětí po výšce průřezu [20]

### 11.1.3 ACI 440.1R-15 [3]

#### 11.1.3.1 Stanovení krátkodobé návrhové únosnosti

Počáteční krátkodobá pevnost FRP výztuže by měla být poskytnuta výrobcem. Tato pevnost nezahrnuje účinky dlouhodobého zatížení (creep, relaxace, únava) a nepříznivých vlivů prostředí (viz. kapitola 8). Stanovení dlouhodobých vlastností FRP výztuže dle směrnice [3] je uvedeno v kapitole 7.4.1. Působení nepříznivého prostředí (alkálie, vlhkost, teplota a další) snižuje pevnost FRP výztuže v tahu. Výpočet návrhové pevnosti FRP výztuže v tahu  $f_{fu}$  je dle vztahu

$$f_{fu} = C_E \cdot f_{fu}^*, \quad (14)$$

kde je  $f_{fu}^*$  střední hodnota pevnosti FRP výztuže v tahu,  $C_E$  součinitel zohledňující enviromentální prostředí. Hodnoty  $C_E$  jsou pro jednotlivá vlákna uvedena v tabulce 11.1. V součiniteli  $C_E$  jsou zahrnuty účinky od teplotního zatížení, které nedosahuje hodnot  $T_g$ . Neuvažuje se zde s předpokládanou životností ani oblastí, kam je konstrukce navržena.

Návrhová hodnota poměrného přetvoření  $\epsilon_{fu}$  se určí obdobně, a to ze vztahu,

$$\epsilon_{fu} = C_E \cdot \epsilon_{fu}^*, \quad (15)$$

kde  $\epsilon_{fu}^*$  je zaručené mezní přetvoření.

Směrnice v tomto případě uvažuje, že modul pružnosti FRP výztuže se nezmění. Uvažuje se zde střední modul pružnosti uvedený výrobcem ve tvaru

$$E_f = E_{f,ave} \cdot \quad (16)$$

Tabulka 11.1: Součinitel zohledňující nepříznivý vliv prostředí pro vnitřní FRP výztuž [3].

Typ vláken	Enviromentální redukční součinitel CE
uhlíková	1.0
skleněná	0.8
aramidová	0.9

### 11.1.3.2 Návrh a posouzení prvku vyztuženého FRP na ohyb

Betonové prvky vyztužené ocelovou výztuží se navrhují tak, aby při ohybovém namáhání nedocházelo k drcení betonu. Tahová napětí a přetvoření v průřezu přebírá ocelová výztuž. Plastická větev pracovního diagramu betonářské oceli zajišťuje duktilní chování průřezu. Rozvoj trhlin varuje před případným selháním prvku. Absence duktilního chování FRP výztuže má za následek okamžité prasknutí FRP výztuže a selhání konstrukce při dosažení mezního přetvoření v průřezu. Přístup k návrhu FRP výztuže je tedy odlišný. V případě porušení konstrukce je drcení betonu preferovaný způsob porušení před přetržením výztuže.

Výpočet je založen na předpokladech:

- průřez zůstává rovinný i po deformaci
- maximální přetvoření v betonu je 0,003
- s betonem v tahu se neuvažuje
- chování FRP výztuže je lineárně pružné až do porušení
- mezi betonem a FRP výztuží je dokonalá soudržnost.

Ohybová únosnost betonového prvku vyztuženého FRP výztuží závisí na způsobu porušení, ke kterému dojde buď drcením betonu nebo přetržením FRP výztuže. Způsob, jakým bude prvek porušen určuje takzvaný balanční poměr, při kterém dojde k drcení betonu i přetržení výztuže. Tento poměr se určí při porovnání skutečné plochy vyztužení  $q_f$  a balanční plochy vyztužení  $q_{fb}$ . Přesné odvození a určení balanční plochy vyztužení je uvedeno ve směrnici [3]. V případě, je-li skutečný stupeň vyztužení menší než balanční stupeň vyztužení ( $q_f < q_{fb}$ ), dochází k přetržení FRP výztuže, v opačném případě ( $q_f > q_{fb}$ ) dojde k drcení betonu.

V případě drcení betonu ( $Q_f > Q_{fb}$ ) lze napětí v tlačené části betonu zjednodušit na obdélníkový tvar. V [3] je přesné odvození vzorce pro výpočet momentu na mezi únosnosti při tlakovém porušení ve tvaru

$$M_n = A_f f_f \left(d - \frac{a}{2}\right), \quad (17)$$

kde je  $A_f$  plocha navržené FRP výztuže,  $f_f$  návrhová pevnost FRP výztuže v tahu,  $d$  účinná výška průřezu,  $a$  výška náhradního obdélníkového rozdělení napětí.

Platí-li ( $Q_f < Q_{fb}$ ) dojde k porušení - přetržení FRP výztuže. V takovém případě metoda uvažuje přetvoření v betonu  $\varepsilon_c$  a výšku tlačené části betonu  $c$  jako neznámé, není plně využit beton v tlaku. Průběh napětí po tlačené betonové části je neznámý, nelze ho přesně určit a nahradit obdélníkem. Není jasné, zda se beton chová lineárně nebo plasticky. Směrnice [3] uvádí zjednodušený vztah, při kterém je určena maximální výška tlačené části betonu. Moment na mezi únosnosti se vypočte ze vztahu:

$$M_n = A_f f_{fu} \left(d - \frac{\beta_1 c_b}{2}\right), \quad (18)$$

kde je  $A_f$  plocha FRP výztuže,  $f_{fu}$  návrhová pevnost výztuže v tahu,  $d$  účinná výška průřezu,  $\beta_1$  součinitel rozdělení napětí,  $c_b$  výška tlačené části průřezu při balančním způsobu porušení,  $c_b = x_{bal}$ .

Při výsledném návrhu musí platit, že návrhová hodnota momentu od zatížení je menší jak redukovaná návrhová hodnota únosnosti, dle vztahu:

$$\phi M_n \geq M_u, \quad (19)$$

kde  $\phi$  je redukční faktor ohybové únosnosti z důvodu zajištění dostatečné rezervy přetvoření FRP výztuže. Tato hodnota se mění v závislosti na způsobu porušení betonového průřezu v případě porušení drcením betonu  $\phi = 0,65$ , při porušení přetržením výztuže  $\phi = 0,55$ . Skutečné provedení prvku může být odlišné od výpočtu (např. použití vyšší třídy betonu). Nemusí dojít k porušení drcením betonu, ale přetržením výztuže. Proto je pro zajištění přechodu mezi dvěma hodnotami  $\phi$  uvažováno porušení drcením betonu až od hodnoty  $Q_f > 1,4Q_{fb}$ .

### 11.1.4 fib Bulletin No.40 – FRP Reinforcement in RC Structures [4]

#### 11.1.4.1 Stanovení krátkodobé návrhové únosnosti

Určení dlouhodobých vlastností FRP výztuže dle směrnice [4] je uvedeno v kapitole 7.4.3. S přihlédnutím k fib Model Code 2010 je možno návrhovou pevnost v tahu FRP výztuže  $f_{fd}$  určit dle vztahu

$$f_{fd} = \frac{f_{fk}}{\gamma_f}, \quad (20)$$

kde  $f_{fk}$  je charakteristická hodnota pevnosti v tahu FRP výztuže,  $\gamma_f$  součinitel pro všechny typy vláken o hodnotě 1,25. Pro krátkodobou únosnost není uvažován součinitel zohledňující vliv prostředí viz. kapitola 8.

#### 11.1.4.2 Návrh a posouzení prvku vyztuženého FRP na ohyb

Při řešení betonových prvků vyztužených betonářskou výztuží se předpokládá:

- průřez zůstane rovinný i po deformaci
- mezi betonem a výztuží je dokonalá soudržnost a tím zajištěna kompatibilita přetvoření obou materiálů.

Tyto předpoklady se používají i pro FRP výztuž, ale při porušení soudržnosti mezi FRP výztuží a betonem nemusí tyto předpoklady platit. Je nutno uvažovat FRP výztuž pouze s vhodnými vlastnostmi.

Publikace [4] uvádí příklady způsobu porušení betonového prvku vyztuženého FRP výztuží. K porušení dojde v tlačené části betonu nebo přetržením tažené výztuže. Tahové porušení závisí na typu FRP výztuže, soudržnosti. V místě působení tahového napětí vznikají trhliny a FRP výztuž brání proti jejím vzniku a rozevírání se. Je velký rozdíl v tuhosti neporušeného průřezu a průřezu, který je porušen trhlinou. Mění se tedy i napětí ve výztuži. Tento jev vede ke vzniku povrchových smykových napětí, což způsobuje velké požadavky na soudržnost mezi FRP výztuží a betonem. Může mít za následek nadměrný prokluz v oblasti trhliny. Z důvodu bezpečnosti je zde doporučeno, aby v prvku došlo k porušení drcením betonu. Příručka [4] uvádí způsob výpočtu balančního stupně vyztužení  $q_{fb}$ .

Pro výpočet návrhových momentů na mezi únosnosti je využíváno Eurocodu-2. S tlačnou výztuží se neuvažuje. V případě, jeli skutečný stupeň vyztužení  $q_f$  vyšší než

balanční stupeň vyztužení  $q_{fb}$  a dojde k porušení drcení betonu, je moment na mezi únosnosti určen ze vztahu

$$M_u = \eta f_{cd} b d^2 (\lambda \xi) \left(1 - \frac{\lambda \xi}{2}\right) \quad (21)$$

kde je  $\eta$  součinitel tlakové pevnosti v betonu,  $f_{cd}$  návrhová pevnost betonu v tlaku,  $b$  šířka průřezu,  $d$  účinná výška průřezu,  $\lambda$  součinitel pro určení efektivní výšky tlačené části betonu (v závislosti na pevnosti betonu),  $\xi$  poměrná výška tlačené části průřezu za předpokladu lineárního průběhu přetvoření určena vzhledem

$$\xi = \frac{x}{d} = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_f + \varepsilon_{cu}} \quad (22)$$

Pokud je stupeň skutečného vyztužení nižší než stupeň balančního vyztužení, dojde k porušení přetržení - tažené výztuže. Pro stanovení momentu únosnosti  $M_u$  je nutno určit přetvoření betonu v krajních vláknech  $\varepsilon_c$ , které je možno určit například iteračně (podrobně řešeno v [4]). Výsledný návrhový moment na mezi únosnosti  $M_u$  lze určit ze vztahu

$$M_u = \frac{A_f f_{fk}}{\gamma_f} \left(1 - \frac{\xi}{2}\right), \quad (23)$$

kde je  $A_f$  navržená plocha FRP výztuže,  $f_k$  charakteristická pevnost FRP výztuže,  $\gamma$  materiálový součinitel,  $\xi$  poměrná výška tlačené části průřezu za předpokladu lineárního průběhu přetvoření

$$\xi = \frac{x}{d} = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{fu} + \varepsilon_c} \quad (24)$$

## 11.1.5 Kanadská norma CSA S806-12 [10]

### 11.1.5.1 Stanovení krátkodobé návrhové únosnosti

Určení dlouhodobých vlastností dle normy [10] je uvedeno v kapitole 7.4.2. V normě [10] pro určení návrhové pevnosti v tahu FRP výztuže zavádí součinitel odolnosti materiálu  $\phi_F$ , který redukuje charakteristickou hodnotu pevnosti v tahu FRP výztuže bez ohledu na typ vláken na 75 %. Pro předpjeté FRP výztuže je tento součinitel jiný v závislosti na typu předpjetí a typu použitých vláken.

### 11.1.5.2 Návrh a posouzení prvku vyztuženého FRP výztuží na ohyb

Norma [10] předpokládá dokonalou soudržnost mezi FRP výztuží a okolním betonem, maximální přetvoření v tlačných vláknech betonu 0,0035, pevnost betonu v tahu se zanedbává, pevnost FRP výztuže v tlaku se neuvažuje, přetvoření betonu a

FRP výztuže je přímo úměrné vzdálenosti od neutrální osy. Především je zde uvedena podmínka, že moment stanovený z minimální plochy  $M_r$  musí být větší nebo roven 1,5 násobku momentu na mezi vzniku trhlin  $M_{cr}$ .

$$M_r = 1,5M_{cr} \quad (25)$$

## 11.2 Návrh na smyk

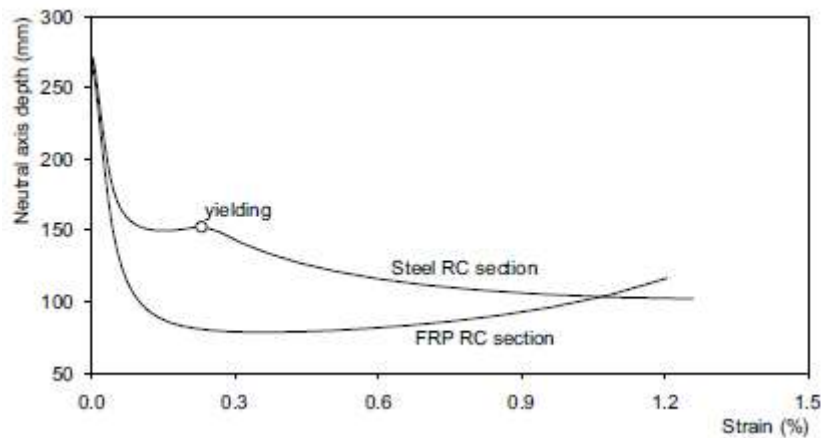
Smykové chování vyztužených prvků je složitý jev, který závisí na velikosti a způsobu příspěvku jednotlivých vnitřních mechanismů pro přenos smykového napětí. Smyková odolnost vyztuženého průřezu je ovlivněna tlačnou částí betonu, hmoždinkovým účinkem kameniva, hmoždinkovým účinkem podélné výztuže, případně smykovou výztuží, je-li navržena. Příspěvek všech těchto mechanismů, které se podílejí na smykové odolnosti prvku, závisí nejen na vlastnostech betonu, ale také na mechanických vlastnostech výztuže a spolupůsobení betonu s výztuží.

Mechanické vlastnosti FRP výztuže ovlivňují mechanismus přenosu smykového namáhání po průřezu. Absence plastického chování FRP výztuže vždy vede ke křehkému selhání a nelze ve výpočtu uvažovat s přerozdělením napětí v průřezu. Z důvodu anizotropního chování FRP výztuže je nutno zohlednit odlišné chování výztuže při působení podélných a příčných sil [4].

### 11.2.1 Mechanismy pro přenos smykového napětí v průřezu vyztuženého FRP výztuží

V prvcích, které jsou vyztuženy tradiční betonářskou výztuží, má na stanovení smykové únosnosti vliv především výška tlačené části průřezu. Tato výška je velmi závislá na vlastnostech podélné výztuže. Proto se očekává, že smyková odolnost průřezu s FRP výztuží bude jiná, než kdyby stejný průřez byl vyztužen tradiční betonářskou výztuží. Závislost tlačené výšky v průřezu na přetvoření podélné výztuže je na obrázku 11.2. Z obrázku vyplývá, že u prvku vyztuženého FRP výztuží je výška tlačené části průřezu po vzniku trhlin podstatně menší než u stejného průřezu vyztuženého tradiční výztuží a to i při relativně nízkých hodnotách zatížení. Při zvyšování přetvoření podélné výztuže se tlačená plocha u průřezu vyztuženém FRP výztuží nezmenšuje tak výrazně jako kdyby byl průřez vyztužen tradiční betonářskou výztuží. Naopak z důvodu nelinearity mechanických vlastností betonu v tlaku se plocha

tlačené části průřezu při tlakovém namáhání opětovně zvětšuje. Smyková únosnost prvku s podélnou FRP výztuží je po vzniku trhlin výrazně menší než při použití ocelové výztuže, s postupným nárůstem deformace tento rozdíl není tak výrazný [4].



Obrázek 11.2: závislost polohy neutrální osy na přetvoření výztuže u prvků o stejném průřezu a ploše podélné výztuže [4]

V případě působení smykového napětí rovnoběžně ve směru vzniklé trhliny je v tažené oblasti porušeného průřezu smykové napětí přenášeno pomocí hmoždinkového účinku kameniva. Účinnost přenášení pomocí hmoždinkového účinku kameniva se snižuje s rostoucí šířkou trhlin. V prvku, který je vyztužen pomocí FRP výztuže, se očekává větší průhyb a šířky trhlin než u stejného prvku vyztuženého betonářskou výztuží. Z tohoto důvodu u prvku s FRP výztuží je pomocí hmoždinkového účinku kameniva přenášeno menší smykové napětí než v případě prvku vyztuženého ocelovou výztuží [4].

Z důvodu velmi nízké příčné tuhosti FRP výztuže je hmoždinkový účinek výztuže pro přenos smykového napětí považován za zanedbatelný [4].

V okamžiku, kdy smykové namáhání od zatížení překročí pevnost betonu ve smyku, je nutno navrhnout příčnou smykovou výztuž. Smyková výztuž, většinou v podobě třmíneků, umožní přenos tahových sil přes šikmé smykové trhliny. Smyková výztuž je využita pouze pro přenos tahových sil a její příspěvek ke smykové odolnosti celého průřezu závisí na maximálním napětí, které je smyková výztuž schopna přenést. U ocelové betonářské výztuže je toto maximální napětí rovno mezi kluzu výztuže. V případě, je-li tahová únosnost FRP výztuže při kombinaci působení normálových a smykových napětí značně omezena, závisí únosnost na přetvoření výztuže. Je

předpokládáno, že k porušení dojde v místě rohů (ohybů) třmíneků, kde dochází ke snížení pevnosti. Redukce snížení závisí na poměru délky ohybu k poloměru ohybu, typu FRP výztuže, soudržnosti mezi výztuží a betonem, typu kotvení. Publikace [4] uvádí doporučení, použít pevnost rovnou o hodnotě 40 – 50 % zaručené jednoosé pevnosti FRP výztuže [4].

### 11.2.2 Způsoby smykového porušení v prvcích vyztužených FRP

Kolapsu betonového vyztuženého prvku v důsledku smykového namáhání vždy předchází vznik smykových trhlin. Smykové trhliny mění vnitřní chování prvku a k porušení může dojít vlivem vznikání nových trhlin, rozšiřováním se trhlin, zvýšením zatížení. Porušení může nastat typickým způsobem pro klasický železobetonový prvek (šikmým tahové porušení, tlakové porušení). Může dojít k selhání z důvodu přetržení smykové výztuže. Smykové porušení z hlediska rozdrčení betonových vzpěr závisí pouze na mechanických vlastnostech betonu. Pro prvky vyztužené FRP výztuží platí stejné podmínky jako u prvku s ocelovou výztuží [4].

### 11.2.3 Přístup k návrhu prvků při smykovém namáhání

Chování betonových prvků vyztužených tradiční betonářskou výztuží při smykovém zatížení lze popsat pomocí příhradové analogie, tuto metodu lze v omezené míře použít i pro prvky vyztužené FRP výztuží. Redistribuce napětí je problematická u křehkých materiálů, jako je například kompozitní výztuž. Publikace [4] uvádí, že metodu příhradové analogie lze pro betonové prvky vyztužené FRP výztuží použít za předpokladu kontrolování šířky smykových trhlin a přetvoření ve smykové výztuži. Dále je uvedeno, že smykovou odolnost betonu a FRP výztuže je možno sčítat [4]. V rámci ČSN EN 1992-1-1 [19] je při překročení únosnosti betonu ve smyku požadováno, aby veškerá smyková zatížení přenášela pouze smyková výztuž [2].

### 11.2.4 Prvky bez smykové výztuže

Smyková únosnost prvku s podélnou FRP výztuží bez smykové výztuže může být určena za pomoci postupu určeného k výpočtu smykové únosnosti železobetonového prvku dle ČSN EN 1992-1-1 [19]. Je nutno zohlednit nižší tuhost FRP výztuže, předpoklad zajištění soudržnosti mezi betonem a výztuží. Při předpokladu stejného

přetvoření v obou typech výztuže ( $\varepsilon_{fw} = \varepsilon_s$ ) lze z poměru modulu pružnosti jednotlivých typů výztuže určit náhradní plochu výztuže  $A_e$  ve tvaru [4], [2]

$$A_e = A_f \frac{E_f}{E_s}. \quad (26)$$

Pro návrh lze použít výše uvedenou náhradní plochu výztuže (předpoklad shodných přetvoření v FRP a ocelové výztuži je konzervativní), nebo lze zavést podobnou korekční podmínku, která zohledňuje různé normálové tuhosti podélné FRP výztuže při výpočtu smykové únosnosti betonu [4], [2]. Publikace [4] uvádí modifikovaný vztah na základě způsobu určení ohybové pevnosti, příspěvku betonu k smykové únosnosti průřezu, v souladu s ČSN EN 1992-1-1 [19] ve tvaru [4], [2]

$$V_{cf} = 0,12 \cdot k \cdot \left(100 \cdot \frac{A_f}{b_w \cdot d} \cdot \frac{E_f}{E_s} \cdot \varnothing_\varepsilon \cdot f_{ck}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot b_w \cdot d, \quad (27)$$

kde je  $k$  součinitel výšky průřezu

$$k = \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}}\right) \leq 2,0, \quad (28)$$

$A_f$  plocha navržené podélné tahové FRP výztuže, která je od místa posuzovaného svislého řezu protažena o délku  $d$ , výztuž musí být řádně zakotvena do podpory,  $E_f$  modul pružnosti FRP výztuže,  $E_s$  modul pružnosti ocelové výztuže,  $f_{ck}$  charakteristická válcová pevnost betonu,  $b_w$  šířka průřezu,  $d$  účinná výška průřezu,  $\varnothing_\varepsilon$  součinitel zohledňující přípustné vyšší přetvoření v FRP výztuži

$$\varnothing_\varepsilon = \frac{\varepsilon_{fw}}{\varepsilon_y}, \quad (29)$$

kde je  $\varepsilon_{fw}$  přetvoření FRP výztuže o limitní hodnotě 0,0045,  $\varepsilon_s$  přetvoření oceli na mezi kluzu.

### 11.2.5 Prvky se smykovou výztuží

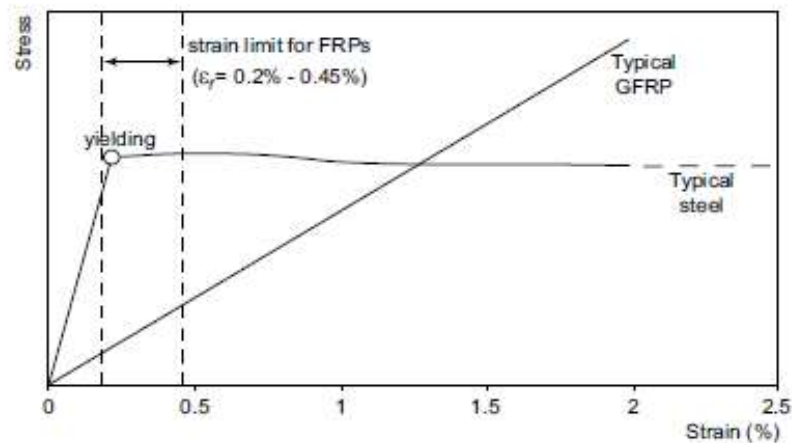
Požadované množství FRP výztuže potřebné pro přenos smykového napětí se určí z maximálního přetvoření  $\varepsilon_{fw,lim}$ . V dřívějších návrhových doporučeních bylo uváděno maximální přetvoření FRP výztuže  $\varepsilon_{fw}$  shodné s přetvořením oceli na mezi kluzu (mezi 0,002 – 0,0025) z důvodu zachování celistvosti průřezu při vytvoření smykových trhlin. V současné době se uvažují méně konzervativní přístupy, které spočívají ve vyšším přípustném poměrném přetvoření FRP výztuže (obrázek 11.3). Tento přístup více odpovídá skutečnému chování prvku vyztuženého pomocí FRP výztuží [4].

Smykovou únosnost svisle orientované smykové výztuže, bez uvažování vlivů prostředí a dlouhodobě působícího zatížení lze vyjádřit vztahem

$$V_{Rd,f} = \frac{A_{fw} \cdot f_{fl,d}^b}{s}, \quad (30)$$

kde je  $A_{fw}$  plocha jednoho FRP třmínku,  $f_{fl,d}^b$  redukovaná výpočtová tahová únosnost FRP výztuže v místě ohybu,  $s$  podélná vzdálenost třmínků,  $z$  rameno vnitřních sil. Doporučený úhel tlakové diagonály při výpočtu smykové výztuže je  $\theta = 45^\circ$  [4], [2].

Redukce tahové únosnosti FRP výztuže je zavedena z důvodu snížení únosnosti výztuže v ohybech třmínků. Tuto hodnotu je třeba limitovat mezním přípustným přetvořením z hlediska vzniku trhlin, přetvořením  $\varepsilon_{fw,lim} = 0,0045$ . Velikost omezení přetvoření způsobuje největší rozdíl v ploše potřebné smykové výztuže dle různých předpisů [2].



Obrázek 11.3: limitní přetvoření smykové FRP výztuže uvažované v současných normách [4]

---

## 12 Závěr

V rámci této bakalářské práce bylo provedeno seznámení s vnitřní kompozitní výztuží do betonu. V prvních kapitolách teoretické části je rozebrán nejběžnější způsob výroby pro vnitřní FRP výztuž (pultruze). Jsou zde rozebrány základní materiály, které se používají pro výrobu FRP výztuže. Kombinací vláken a matrice vzniká anizotropní materiál, u kterého je důležité rozlišovat vlastnosti v podélné (nosné) ose a příčné ose. Zvolená vlákna a matrice zásadně ovlivňují vlastnosti výsledného produktu. Velkou problematikou je působení zvýšených teplot na kompozitní FRP výztuž. U kompozitní výztuže je nutno rozlišovat krátkodobé a dlouhodobé účinky zatížení. Stále není stanoveno přesné chování FRP výztuže pro všechny druhy namáhání (např. tlak). Pro stanovení dlouhodobého zatížení je nutno zohlednit vliv prostředí, namáhání apod. Stávající normy (předpisy) mají rozdílné přístupy k určení krátkodobé a dlouhodobé únosnosti FRP výztuže. Některé přístupy a postupy jsou zde porovnány a zohledněny.

Praktická část této práce řeší návrh prefabrikovaného dílce s požadavkem na nemagnetickou výztuž. Posouzení bylo provedeno ve dvou variantách, a to v nerezové oceli a GFRP. Byl dodržen odlišný přístup pro posuzování prvků vyztužených kompozitní výztuží. Po provedení statických výpočtů bylo možné dojít k závěru, že kompozitní výztuž lze výhodně uplatnit v případech, kdy není možné použít klasickou betonářskou ocel. Požární odolnost prvků vyztužených FRP není tak nízká, jak je uvažováno v teoretické části této práce.

---

### 13 Seznam použitých zdrojů

- [1] ČSN EN 206+A1 (73 2403): Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda. 2018.
- [2] BENKO V., BILČÍK J., GAŽOVIČOVÁ N., GIRGLE F., JANUŠ O., HOLLÝ I., MATUŠÍKOVÁ A., PROKEŠ J., ŠTĚPÁNEK P.: Navrhování betonových konstrukcí s FRP výztuží. Brno, 2017.
- [3] ACI 440.1R-15: Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars. American Concrete Institute, 2015. ISBN: 978-1-942727-10-1.
- [4] fib Bulletin No. 40: FRP reinforcement in RC structures: technical report prepared by a working party of Task Group 9.3, FRP (Fibre Reinforced Polymer) reinforcement for concrete structures. Lausanne, International Federation for Structural Concrete, 2007.
- [5] Prefa Kompozity, a.s.: Technologie výroby [Online]. Dostupné z: <https://www.prefa-kompozity.cz/technologie-vyroby/pultruze-tazeni/>
- [6] Schöck Bauteile GmbH: Schöck Combar®, Types and Accessories [Online]. 2020. Dostupné z: <https://www.schoeck.com/en/combar-types-and-accessories>
- [7] Prefa Kompozity, a.s.: Zesilovací systémy [Online]. Dostupné z: <https://www.prefa-kompozity.cz/produkty/ostatni/zesilovaci-systemy/>
- [8] GIRGLE F., PROKEŠ J., JANUŠ O., KOSTIHA V., ŠTĚPÁNEK P.: KOMPOZITNÍ VÝZTUŽ DO BETONU – PERSPEKTIVNÍ MATERIÁL PRO ODOLNÉ A TRVANLIVÉ BETONOVÉ KONSTRUKCE. Beton TKS [online]. 2017, č. 2, s. 50-55. ISSN 1213-3116. Dostupné z: [http://www.betontks.cz/sites/default/files/2017-2-50\\_0.pdf](http://www.betontks.cz/sites/default/files/2017-2-50_0.pdf)
- [9] SAAFI M.: Effect of fire on FRP reinforced concrete members. Composite Structures. 2002, 58, 11-20. ISSN 0263-8223.
- [10] CSA S806-12: Design and construction of building structures with fibre-reinforced polymers. Canadian Standards Association, 2012. ISBN 978-1-55491-931-4.

- 
- [11] ČSN EN 1992-1-2 (73 1201): Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí - Část 1-2: Obecná pravidla - Navrhování konstrukcí na účinky požáru. 2006.
- [12] GIRGLE F.: Navrhování betonových a zděných konstrukcí na účinky požáru - CL062. Ústav betonových a zděných konstrukcí. FAST VUT Brno, únor 2019. Přednáška č. 2.
- [13] GIRGLE F., JANUŠ O., KOSTIHA V., BODNÁROVÁ L., ŠTĚPÁNEK P., ZLÁMAL M., ČAIROVIĆ Đ., MANSOUR M.: DLOUHODOBÉ VLASTNOSTI KOMPOZITNÍ VÝZTUŽE PŘI APLIKACI V BETONOVÝCH KONSTRUKCÍCH. Beton TKS. 2019, č. 2, s. 38-45. ISSN 1213-3116.
- [14] PROCHÁZKA J.: ZAVÁDĚNÍ EN 1992-1-2: „NAVRHOVÁNÍ BETONOVÝCH KONSTRUKCÍ – ČÁST 1-2: NAVRHOVÁNÍ NA ÚČINKY POŽÁRU“ DO PRAXE – ÚVOD, MATERIÁLOVÉ CHARAKTERISTIKY. Beton TKS [online]. 2005, č. 3, s. 49-54. ISSN 1213-3116. Dostupné z: [http://www.betontks.cz/sites/default/files/2005-3-49\\_0.pdf](http://www.betontks.cz/sites/default/files/2005-3-49_0.pdf)
- [15] GIRGLE F.: Navrhování betonových a zděných konstrukcí na účinky požáru - CL062. Ústav betonových a zděných konstrukcí. FAST VUT Brno, únor 2019. Přednáška č. 1.
- [16] GIRGLE F.: Navrhování betonových a zděných konstrukcí na účinky požáru - CL062. Ústav betonových a zděných konstrukcí. FAST VUT Brno, březen 2019. Přednáška č. 3.
- [17] PROCHÁZKA J., TOŽIČKOVÁ L.: ZAVÁDĚNÍ EN 1992-1-2: „NAVRHOVÁNÍ BETONOVÝCH KONSTRUKCÍ – ČÁST 1-2: NAVRHOVÁNÍ NA ÚČINKY POŽÁRU “ DO PRAXE – ZJEDNODUŠENÉ METODY NAVRHOVÁNÍ. Beton TKS [online]. 2006, č. 1, s. 49-53. ISSN 1213-3116. Dostupné z: [http://www.betontks.cz/sites/default/files/2006-1-49\\_0.pdf](http://www.betontks.cz/sites/default/files/2006-1-49_0.pdf)
- [18] ČSN EN 1990 (73 0002): Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí. 2004.
- [19] ČSN EN 1992-1-1 (73 1201): Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby. 2006.

- 
- [20] GIRGLE F., JANUŠ O., MATUŠÍKOVÁ A., ŠTĚPÁNEK P.: NAVRHOVÁNÍ BETONOVÝCH PRVKŮ VYZTUŽENÝCH KOMPOZITNÍ VÝZTUŽÍ – NÁVRH NA OHYB [online]. 2017, č. 3, s. 54-59. ISSN 1213-3116. Dostupné z: [http://www.betontks.cz/sites/default/files/2017-3-54\\_0.pdf](http://www.betontks.cz/sites/default/files/2017-3-54_0.pdf)

---

## 14 Seznam příloh

### P1. – POUŽITÉ PODKLADY

PŮDORYS BETONOVÉHO KRYTU	M_1:50	2 x A4
CAVE ON BIFROST		

### P2. – STATICKÝ VÝPOČET

P2.1. TECHNICKÁ ZPRÁVA

P2.2. STATICKÝ VÝPOČET

### P3. – VÝKRESOVÁ DOKUMENTACE

01 - SKLADBA PREFABRIKOVANÉHO STROPU	M_1:50; 1:25	4 x A4
02 - VÝKRES DÍLCE č.2, VARIANTA OCEL	M_1:20	6 x A4
03 - VÝKRES DÍLCE č.2, VARIANTA GFRP	M_1:20	6 x A4