

Vlastnosti betonů vyztužených textiliemi z anorganických vláken

Diplomová práce

Studijní program:

N3106 Textilní inženýrství

Studijní obor:

Oděvní a textilní technologie

Autor práce:

Bc. Filip Prodanovič

Vedoucí práce:

Ing. Miroslava Pechočiaková, Ph.D.

Katedra materiálového inženýrství



Zadání diplomové práce

Vlastnosti betonů vyztužených textiliemi z anorganických vláken

Jméno a příjmení: **Bc. Filip Prodanovič**
Osobní číslo: T18000039
Studijní program: N3106 Textilní inženýrství
Studijní obor: Oděvní a textilní technologie
Zadávací katedra: Katedra technologií a struktur
Akademický rok: **2018/2019**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte literární rešerši na téma kompozitní materiály, zaměřte se na použití betonů s výztuží z anorganických vláken. Podrobněji se věnujte čedičovým vláknům, jejich výrobě, vlastnostem a použití. Dále se zaměřte na: teorii průhybu nosníku (průhybová čára); ekvivalentní průřez vícesložkového materiálu.
2. Navrhněte a vyrobte sadu vzorků s čedičovou vláknovou výztuží. Navrhněte 3 různá množství vláknové výztuže.
3. U vyrobených kompozitních vzorků otestujte vhodné mechanické vlastnosti, používané pro testování betonů.
4. Naměřené hodnoty statisticky vyhodnoťte a interpretejte. Získaná data použijte pro odhad mechanických vlastností vytvořených vzorků.

Rozsah grafických prací:
Rozsah pracovní zprávy:
Forma zpracování práce:
Jazyk práce:

dle potřeby
cca 50 stran
tištěná/elektronická
Čeština



Seznam odborné literatury:

- [1] DAŘOUREK, Karel. *Kompozitní materialy – druhy a jejich užití*. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007, 114 s. ISBN 978-80-7372-279-1.
- [2] ZBONČÁK, Radek. *Metody odhadu mechanických vlastností dlouhovlákněného kompozitu: kompozitní materiály*. Liberec: VÚTS, 2017. ISBN 978-80-87184-71-4.
- [3] LAŠ, Vladislav. *Mechanika kompozitních materiálů. 2., přeprac. vyd.* V Plzni: Západočeská univerzita, 2008. ISBN 978-80-7043-689-9.

Vedoucí práce:

Ing. Miroslava Pechočiaková, Ph.D.
Katedra materiálového inženýrství

Datum zadání práce:

15. dubna 2019

Předpokládaný termín odevzdání:

10. srpna 2020

Ing. Jana Drašarová, Ph.D.
děkanka

L.S.

Ing. Brigita Kolčavová Sirková, Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má diplomová práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

4. srpna 2020

Bc. Filip Prodanovič

Poděkování

Rád bych poděkoval především Ing. Miroslavě Pechočiakové, Ph.D. za cenné rady při konzultacích, věnovaný čas a důvěru při psaní diplomové práce. Dále bych rád také velmi poděkoval Ing. Rudolfu Martonkovi, Ph.D. za věcné poznámky a konzultace.

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá mechanickými vlastnostmi betonových kompozitů vyztužených čedičovými vlákny. Rešeršní část práce se věnuje dílčím materiálům sestávající vláknobeton: čedičové vlákno a beton. Dále jsou uvedeny způsoby modelování a odhadů mechanických vlastností kompozitu.

Praktickou část tvoří dvě části, popis výroby vzorků a představení experimentálních dat, ze kterých byly spočteny další mechanické vlastnosti. Ke každým sadám experimentálních dat jsou popisy postupů jejich měření.

V diskuzi k výsledkům jsou podrobněji ukázány výsledky měření spolu s jejich komentáři a grafy. V druhé části diskuze jsou provedeny odhady a modelování vybraných mechanických vlastností a srovnány s naměřenými daty.

Klíčová slova: Kompozit, Beton vyztužený vlákny, Čedičová vlákna, Mechanické vlastnosti

Abstract

The diploma thesis deals with the mechanical properties of basalt fibers reinforced concrete. The research part of the work is devoted to partial materials consisting of fiber concrete: basalt fiber and concrete. Methods for modeling and estimating the mechanical properties of composites are presented in following chapter.

The practical part consists two parts, a description of the production of samples and a presentation of experimental data from which other mechanical properties were calculated. Each set of experimental data has description of their measurements..

In the discussion of the results, the measurement results are shown in more detail together with their comments and graphs. In the second part of the discussion, estimates and modeling of selected mechanical properties are performed and compared with the measured data.

Keywords: Composite, Fiber reinforced concrete, Basalt fibers, Mechanical properties

Obsah

Seznam symbolů a zkratek	9
Úvod	13
1 Literární řešerše	14
1.1 Kompozity	14
1.1.1 Voightův model	15
1.1.2 Reussův model.....	16
1.1.3 Kontinuální vlákenná výztuž.....	16
1.1.4 Diskrétní vlákenná výztuž	17
1.2 Beton.....	18
1.2.1 Složení	19
1.2.1.1 Portlandský cement	19
1.2.2 Vlastnosti betonu	20
1.2.3 Zkoušení betonu	20
1.3 Čedičové vlákno	24
1.3.1 Složení čediče	24
1.3.2 Výroba čedičových vláken	26
1.3.3 Výroba krátkých čedičových vláken	27
1.3.3.1 Odstředivý způsob výroby	27
1.3.3.2 Pneumatický způsob výroby	30
1.3.4 Výroba kontinuálních vláken.....	30
1.3.5 Vlastnosti čedičových vláken	32
1.4 Vláknobeton.....	33
1.4.1 Aplikace.....	34
1.5 Diferenciální rovnice průhybové čáry	34
1.6 Charakteristika průřezu.....	37
1.6.1 Ekvivalentní průřez.....	37
1.6.2 Ideální průřez.....	39
2 Praktická část.....	40
2.1 Použitý materiál	40
2.1.1 Beton.....	40
2.1.2 Vlákná.....	41

2.2	Výroba vzorků	42
2.3	Postup zkoušek a naměřená data	47
2.3.1	Postup tahové zkoušky rovingů a naměřená data	47
2.3.2	Postup obrazové analýzy a naměřená data	49
2.3.3	Postup zkoušky 4 bodovým ohybem a naměřená data	50
2.4	Spočtené hodnoty	60
2.4.1	Moment setrvačnosti	60
2.4.2	Napětí	62
2.4.3	Modul pružnosti	63
2.4.4	Deformační práce	65
3	Diskuze k výsledkům	66
3.1.1	Rozbor grafu	66
3.1.2	Pevnost	69
3.1.3	Modul pružnosti v tahu	72
3.1.4	Průhyb	73
3.1.5	Deformační práce	75
3.1.6	Odhad modulu pružnosti v tahu	76
3.1.7	Odhad průhybu	85
4	Závěr	91
	Použitá literatura	94
	Seznam obrázků	97
	Seznam tabulek	99

Seznam symbolů a zkratek

Al_2O_3	oxid hlinitý	
b	šířka vzorku	[mm]
b_{iR}	redukovaná šířka i -té vrstvy	[mm]
$CaCO_3$	uhličitan vápenatý	
CaO	oxid vápenatý	
C_I	integrační konstanty	
COV	kovariance	
dA	diferenciál plochy	[mm]
D_{MIN}	minimální průměr plochy rovingů v řezu	[mm]
dM_O	diferenciál ohybového momentu	[N.mm]
E	modul pružnosti	[MPa]
$E_{P,N1}$	průměrná hodnota modulu pružnosti sady $N1$	[MPa]
$E_{P,N2}$	průměrná hodnota modulu pružnosti sady $N2$	[MPa]
$E_{P,R19}$	průměrná hodnota modulu pružnosti sady $R19$	[MPa]
$E_{P,R7}$	průměrná hodnota modulu pružnosti sady $R7$	[MPa]
E_B	modul pružnosti betonu	[MPa]
E_C	modul pružnosti betonu	[MPa]
E_i	modul pružnosti i -té vrstvy	[MPa]
E_j	modul pružnosti j -té vrstvy	[MPa]
E_k	modul pružnosti kompozitu	[MPa]
E_m	modul pružnosti matrice	[MPa]
E_O	odhadnutý modul pružnosti	[MPa]
$E_{O,R15}$	odhad modulu pružnosti sady $R15$	[MPa]
$E_{O,R19}$	odhad modulu pružnosti sady $R19$	[MPa]
$E_{O,R7}$	odhad modulu pružnosti sady $R7$	[MPa]
$E_{P,R0}$	průměrná hodnota modulu pružnosti sady $R0$	[MPa]
$E_{P,R15}$	průměrná hodnota modulu pružnosti sady $R15$	[MPa]
$E_{P,R15}$	průměrná hodnota modulu pružnosti sady $R15$	[MPa]
$E_{P,R19}$	průměrná hodnota modulu pružnosti sady $R19$	[MPa]
$E_{P,R7}$	průměrná hodnota modulu pružnosti sady $R7$	[MPa]
E_R	modulu pružnosti rovingů	[MPa]
E_S	modul pružnosti výztuže	[MPa]
E_T	modulu pružnosti v tahu	[MPa]
E_{vl}	modul pružnosti vláken	[MPa]
E_Z	základní modul pružnosti	[MPa]
FeO	oxid železnatý	

F_{MAX}	maximální síla měřena na posuvném rameni	[N]
F_{NAM}	síla naměřená na posuvném rameni	[N]
F_T	tahová síla	[N]
F_{V1}	maximální síla na válci umístěného na posuvném rameni při 1. poklesu síly	[N]
$F_{V1,N1}$	maximální síla na válci umístěného na posuvném rameni při 1. poklesu síly sady <i>N1</i>	[N]
$F_{V1,N2}$	maximální síla na válci umístěného na posuvném rameni při 1. poklesu síly sady <i>N2</i>	[N]
$F_{V1,R0}$	maximální síla na válci umístěného na posuvném rameni při 1. poklesu síly sady <i>R0</i>	[N]
$F_{V1,R15}$	maximální síla na válci umístěného na posuvném rameni při 1. poklesu síly sady <i>R15</i>	[N]
$F_{V1,R19}$	maximální síla na válci umístěného na posuvném rameni při 1. poklesu síly sady <i>R19</i>	[N]
$F_{V1,R7}$	maximální síla na válci umístěného na posuvném rameni při 1. poklesu síly sady <i>R7</i>	[N]
F_{VIP}	průměrná hodnota síly F_{V1}	[N]
F_{V2}	maximální síla na válci umístěného na posuvném rameni při 2. poklesu síly	[N]
$F_{V2, R15}$	maximální síla na válci umístěného na posuvném rameni při 2. poklesu síly sady <i>R15</i>	[N]
$F_{V2, R19}$	maximální síla na válci umístěného na posuvném rameni při 2. poklesu síly sady <i>R19</i>	[N]
F_{V3}	maximální síla na válci umístěného na posuvném rameni při 3. poklesu síly	[N]
$F_{V3, R15}$	maximální síla na válci umístěného na posuvném rameni při 3. poklesu síly sady <i>R15</i>	[N]
$F_{V3, R19}$	maximální síla na válci umístěného na posuvném rameni při 3. poklesu síly sady <i>R19</i>	[N]
<i>GRC</i>	glass reinforced concrete	
<i>h</i>	výška vzorku	[mm]
<i>I</i>	kvadratický moment setrvačnosti	[mm ⁴]
<i>I_E</i>	ekvivalentní moment setrvačnosti	[mm ⁴]
<i>I_{ER15}</i>	ekvivalentní moment setrvačnosti sady <i>R15</i>	[mm ⁴]
<i>I_{ER19}</i>	ekvivalentní moment setrvačnosti sady <i>R19</i>	[mm ⁴]
<i>I_{ER7}</i>	ekvivalentní moment setrvačnosti sady <i>R7</i>	[mm ⁴]
<i>I_R</i>	redukovaný moment setrvačnosti	[mm ⁴]
<i>IS 95%</i>	95% Interval spolehlivosti střední hodnoty	
<i>k</i>	konstanta	
<i>K₂O</i>	oxid draselný	
<i>L</i>	vzdálenost podpěrných válců	[mm]
<i>l_k</i>	délka kompozitu	[mm]
<i>MgO</i>	oxid hořečnatý	

M_i	hmotnostní podíl <i>i-té</i> složky	[-]
m_i	hmotnost <i>i-té</i> složky	[kg]
m_k	hmotnost kompozitu	[kg]
M_m	hmotnostní podíl matrice	[-]
M_O	ohybový moment	[N.mm]
M_{vl}	hmotnostní podíl vláken	[-]
$N1$	sada zkušebních těles s neorientovanou výztuží o hmotnostním podílu 0,815 %	
$N2$	sada zkušebních těles s neorientovanou výztuží o hmotnostním podílu 1,63 %	
Na_2O	oxid sodný	
P_2O_5	oxid fosforečný	
q	liniové zatížení	[N/mm]
$R0$	Sada zkušebních těles z prostého betonu	
$R15$	sada zkušebních těles s orientovanou výztuží z 15 rovingů	
$R19$	sada zkušebních těles s orientovanou výztuží z 19 rovingů	
$R7$	sada zkušebních těles s orientovanou výztuží ze 7 rovingů	
s	dráha čelistí	[mm]
$s_{1,N1}$	dráha při F_{V1} u sady $N1$	[mm]
$s_{1,N2}$	dráha při F_{V1} u sady $N2$	[mm]
$s_{1,R0}$	dráha při F_{V1} u sady $R0$	[mm]
$s_{1,R15}$	dráha při F_{V1} u sady $R15$	[mm]
$s_{1,R19}$	dráha při F_{V1} u sady $R19$	[mm]
$s_{1,R7}$	dráha při F_{V1} u sady $R7$	[mm]
$s_{2,R15}$	dráha při F_{V2} u sady $R15$	[mm]
$s_{2,R19}$	dráha při F_{V2} u sady $R19$	[mm]
$s_{3,R15}$	dráha při F_{V3} u sady $R15$	[mm]
$s_{3,R19}$	dráha při F_{V3} u sady $R19$	[mm]
S_C	plocha betonu	[mm ²]
S_i	plocha <i>i-té</i> vrstvy	[mm ²]
s_i^2	rozptyl <i>i-té</i> složky	
S_{ideal}	plocha ideálního průřezu	[mm ²]
SiO_2	oxid křemičitý	
S_k	plocha kompozitu	[mm ²]
s_o^2	rozptyl odhadu	
S_S	plocha výztuže	[mm ²]
S_{vl}	plocha vláken	[mm ²]
TiO_2	oxid titaničitý	
v_k	objem kompozitu	[mm ³]

V_m	objemový podíl matrice	[-]
V_{PB}	objemový podíl betonu	[-]
V_{Pvl}	objemový podíl vláken	[-]
v_{vl}	objem vláken	[mm ³]
V_{vl}	objemový podíl vláken	[-]
V_{vl}	objemový podíl vláken	[-]
W	modul průřezu	[mm ³]
w	průhyb	[mm]
W/C	poměr vody a cementu	[-]
w'	derivace průhybu	[mm]
w_{IP}	průměrná hodnota průhybu při F_{VI}	[mm]
$w_{IP,R15}$	průměrná hodnota průhybu při F_{VI} sady $R15$	[mm]
$w_{IP,R19}$	průměrná hodnota průhybu při F_{VI} sady $R19$	[mm]
$w_{IP,R7}$	průměrná hodnota průhybu při F_{VI} sady $R7$	[mm]
W_{Def}	deformační práce	[J.10 ⁻³]
$W_{DEF, P}$	průměrná hodnota W_{DEF}	[J.10 ⁻³]
W_i	průřezový module i -té vrstvy	[mm ³]
$w_{O,R15}$	odhadovaný průhyb pro sadu $R15$	[mm]
$w_{O,R19}$	odhadovaný průhyb pro sadu $R19$	[mm]
$w_{O,R7}$	odhadovaný průhyb pro sadu $R7$	[mm]
y_i	vzdálenost krajního vlákna i -té vrstvy od neutrální osy	[mm]
γ_i	vzdálenost těžiště i -té vrstvy od neutrální osy	[mm]
ε	poměrná deformace	[-]
ρ	poloměr křivosti	[mm]
σ	napětí	[MPa]
σ_k	tahové napětí kompozitu	[MPa]
σ_m	tahové napětí ve směru výztuže v matrici	[MPa]
σ_{MAX}	maximální napětí	[MPa]
σ_T	tahové napětí	[MPa]
σ_{vl}	tahové napětí ve směru výztuže ve vlákně	[MPa]
φ	úhel natočení	[rad]

Úvod

První zmínky použití principu plniva s pojivem se datují do období starověku. Už z této doby jsou známy první snahy vylepšit mechanické vlastnosti křehkých stavebních materiálů a to přidáním slámy, koňské žíně, srsti, peří.... Z historického hlediska tedy není vláknobeton materiálem neznámým.

Vláknobeton je kompozitem v současné době studovaným kvůli svému potenciálu nahradit jiný betonový kompozit, železobeton. Důvodem zaměření se na vláknobeton není nalezení pevnějšího kompozita, ale kompozita se snadnější aplikací, díky které by došlo k urychlení a zlevnění staveb. Vláknobeton je v současné době využíván ve stavebnictví spíše jako doplňkový materiál, své uplatnění zatím nachází ve výrobě interiérových doplňků, nebo při specifických stavebních řešeních.

Železobetonové konstrukce jsou vždy opatřeny krycí vrstvou betonu, která nesouvisí s pevností, ale slouží pouze jako ochrana oceli před vlhkostí. Dalším důvodem zaměření se na vláknobeton tedy je, že při případné aplikaci vláken jako vyztužujícího materiálu místo oceli, není následně nutné spotřebovávat další betonový materiál na krycí vrstvu. Jedná se o další zlevňující bod. Dalšími plynoucími výhodami jsou možnosti tvorby subtilnějších konstrukcí a šetření s velmi špatně recyklovatelným betonovým materiálem.

Cílem práce je porovnání mechanických vlastností betonu vyztuženého orientovanou výztuží s betonem vyztuženým neorientovanou rozptýlenou výztuží, který se konvenčně již v některých výrobcích používá. Dále se práce věnuje odhadu mechanických vlastností na základě modelů používaných ve vláknových kompozitech s plastovými maticemi.

1 Literární rešerše

1.1 Kompozity

Kompozit lze charakterizovat jako spojení dvou a více oddělených fází, respektive materiálů. Kombinování dvou materiálů o různých mechanických vlastnostech není ničím novým, již středověcí mongolové hledali způsob jak zkrátit délku luku při zachování stejného natažení. Kratší dřevěný luk poskytoval snazší pohyb při střelbě na koni, ale nedovoloval dlouhý nátaž, čímž se snižovala rychlost vystřeleného šípu. Mongolové tedy využili dřevo buvolími rohy z tlačené strany a zvířecími šlachami z tažené strany luku, výsledný kompozit pak vydržel vyšší průhyb než dřevo samotné. [24]

Důležitým aspektem posuzování je měřítko s jakým se na kompozit nahlíží, při posuzování na atomární úrovni by se dalo konstatovat, že jakákoli molekula složená z různých prvků je kompozitem. Častokrát se jedná o materiály rozdílných vlastností a účelem spojení je vytvoření materiálu kombinující jejich dílčí vlastnosti. Z makroskopického světa je ve stavebnictví velmi populárním kompozitem například železobeton, kdy je betonová matrice vyztužena ocelí a výsledný kompozit se vyznačuje kombinací pevnosti v tlaku i za ohybu, obecně by se u kompozitu měla zlepšit alespoň jedna vlastnost vzhledem k dílčím komponentám. Kompozitní materiály jsou tvořeny maticí a výztuží v klasických plastových kompozitech matrice zajišťuje rozklad napětí do výztuže a zajišťuje kompozitu tuhost

a tvarovou stálost. V dnešní době si kompozity našly své místo v mnoha odvětvích průmyslu (automobilový, letecký, stavební...) díky své pevnosti a relativně malé hmotnosti oproti konvenčním materiálům, mechanické vlastnosti nejsou jedinou zlepšovanou vlastností, kombinují se materiály různorodých chemických a fyzikálních vlastností a tím lze zlepšovat i například tepelnou nebo elektrickou vodivost. Při objevení nového materiálu se následně vědecká sféra snaží najít uplatnění na poli kompozitů, před několika lety nově vyrobená jednoatomová vrstva grafitu – grafen, byla ihned zkoumaná jako potenciální možná vyztužující složka. [13] S nově objevovanými materiály se tedy rozšiřuje paleta možností nových kombinací.

Kompozity jsou složeny z dvou a více fází pro základní odhad mechanických vlastností se užívá podílů hmotnostních, hustotních, objemových, dle několika modelů.

1.1.1 Voightův model

$$M_i = \frac{m_i}{m_k} \quad (1)$$

$$\sum_i^n M_i = 1 \quad (2)$$

Kde M_i [-] je hmotnostní podíl i -té složky, m_i [kg] je hmotnost i -té složky a m_k je celková hmotnost kompozitu. Analogicky lze vyjádřit podíl objemový, hustotní:

$$V_{vl} = \frac{v_{vl}}{v_k} = \frac{S_{vl}l_k}{S_k l_k} = \frac{S_{vl}}{S_k} \quad (3)$$

Kde V_{vl} [-] objemový podíl vláken, v_{vl} objem vláken [mm³], v_k objem kompozitu [mm³], S_{vl} [mm²] plocha vláken, S_k [mm²] plocha kompozitu, l_k [mm] délka kompozitu. Analogicky lze zjistit objemový podíl matrice V_m [-]. Pomocí podílů lze vyjádřit celkový modul pružnosti kompozitu E_k [MPa]:

$$E_k = E_{vl}M_{vl} + E_mM_m \quad (4)$$

Kde M_{vl} [-] hmotnostní podíl vláken, M_m [-] hmotnostní podíl matrice.

Tahové napětí ve směru výztuže ve vlákně σ_{vl} [MPa] a napětí v matrici σ_m [MPa]:

$$\sigma_{vl} = E_{vl}\varepsilon_k \quad (5)$$

$$\sigma_m = E_m\varepsilon_k \quad (6)$$

Kde E_{vl} [MPa] modul pružnosti vláken, E_m [MPa] modul pružnosti matrice, ε_k [-] poměrná deformace kompozitu. Jelikož se předpokládá ideální spojení matrice spolu s vlákny tak: $\varepsilon_k = \varepsilon_m = \varepsilon_{vl}$. Ze znalosti (5), (6) lze vyjádřit celkovou tahovou sílu F_t [N]:

$$F_t = S_{vl}\sigma_{vl} + S_m\sigma_m \quad (7)$$

Poté tahové napětí kompozitu σ_k [MPa] při znalosti (3), (5), (6), (7):

$$\sigma_k = \frac{F_t}{S_k} = \frac{S_{vl}\sigma_{vl} + S_m\sigma_m}{\frac{S_{vl}}{V_{vl}}} = V_{vl}\sigma_{vl} + V_m\sigma_m = (V_{vl}E_{vl} + V_mE_m)\varepsilon_k \quad (8)$$

Informace z [3].

1.1.2 Reussův model

Reussův model je někdy označován, jako inverzní směšovací pravidlo u tohoto modelu se předpokládá shodná napětí ve výztuži i v matrici. [3]

$$\sigma_k = \sigma_m = \sigma_{vl} \quad (9)$$

Reussův model odhadu modulu pružnosti:

$$E_k = \frac{E_mE_{vl}}{E_{vl}(1 - V_{vl}) + E_mV_{vl}} \quad (10)$$

Kde V_{vl} [-] objemový podíl vláken. [3]

Tyto vztahy jsou vzhledem k realitě velice zjednodušující, předpokládá se dokonalé spojení matrice a vláknenné výztuže, kde nedochází k prokluzům. Vztah platí pouze ve směru kontinuální výztuže. Modely nerespektují vliv synergického efektu, kdy výsledný kompozit se vyznačuje lepšími vlastnostmi, než je jejich pouhý součet. Nespornou výhodou modelů je jejich jednoduchost.

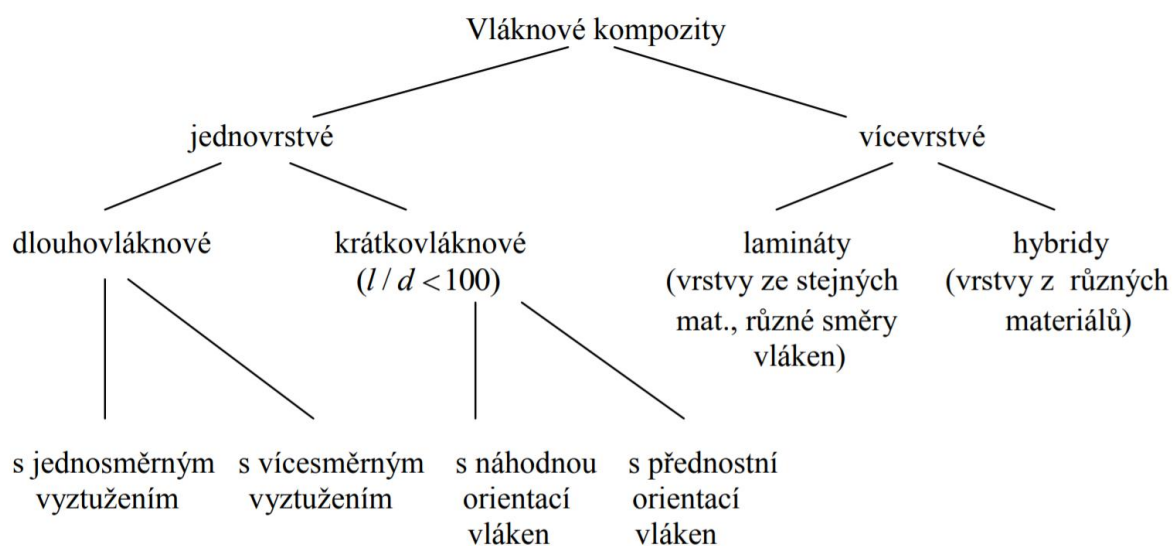
1.1.3 Kontinuální vláknenná výztuž

Kompozity lze klasifikovat několika způsoby s ohledem na jejich chemické složení, typu výztuže nebo matrice. Byla vybrána klasifikace dle délky vláknenné výztuže.

Kontinuální vlákna začínají s matricí a končí s matricí, vlákno nemá žádný konec uvnitř matrice. V matrici může být jedna vrstva vláken nebo více vrstev nad sebou, kdy se dá pak kompozit klasifikovat jako laminát. Orientace vláken je častokrát předem determinována

z důvodu technologie aplikace a vlákna mohou být orientována jedním směrem a to nejčastěji ve směru zatěžování, nebo ve více směrech při použití více vrstev.

Při aplikaci kontinuální vláknenné výztuže se lze setkat s anizotropním materiálem, a to při vyztužování vlákny, které jsou pokládány určitým směrem či více směry. Materiál se poté vyznačuje rozdílnými mechanickými vlastnostmi, dle směru zatěžování, konkrétním příkladem může být již zmíněný přírodní kompozit dřevo. Při specifické aplikaci lze dosáhnout kontinuálním vyztužováním kvazizotropního materiálu, a to pokládáním kontinuální vláknenné výztuže ve více vrstvách pod odlišnými úhly, výsledný kompozit má téměř stejné mechanické vlastnosti ve všech směrech a předpoklad izotropie je do určité míry splněn. Pokud jsou všechny vrstvy ze stejného materiálu lze hovořit o laminátu, pokud jsou vrstvy z různých materiálů, jedná se o hybrid. [4]



Obr. 1.1: Rozdělení vláknových kompozitů [4]

1.1.4 Diskrétní vláknenná výztuž

Využití krátkých vláken jako výztuže má přednost především svou jednoduchou aplikací a tím pádem je kompozit poté i levnějším produktem. Krátká vlákna jsou přimíchávána do tekuté matrice a poté nalita do formy, kdy následně dojde k vytvrzení, odpadá zde komplikovanější aplikace kontinuálních vláken nebo tkanin. I vzhledem k ceně krátkých vláken a například k tkané textilií je někdy výhodnější využití právě krátkých vláken.

Velkou nevýhodou je nižší pevnost, proto se v praxi vždy porovnává kvalita kompozitního materiálu a jeho cena. Náhodná rozptýlenost v celém objemu matrice snižuje využití pevnosti vláken, vlákna kolmá ke směru zatěžování nepřenášejí žádné napětí, při ideálním promíchání tak lze získat materiál izotropních mechanických vlastností. Naproti tomu lze určitou technologií zajistit alespoň, aby určitý směr vláken převládal, toto lze zajistit například při aplikaci vláknobetonu stříkáním.

1.2 Beton

Pojivo, hydraulický cement, který tvrdne po reakci s vodou, jak jej známe dnes se poprvé v historii objevuje kolem roku 200 př.n.l. ve starověkém Římě, kde byl použit například na stavbu Pantheonu nebo akvaduktů, které byly vrcholem inženýrského stavitelství své doby. Samotné slovo „beton“ bylo zavedeno roku 1753 francouzským inženýrem Belidorem pro směs pojiva a kameniva. Dalším důležitým jménem na poli betonu také pocházel z Francie, Joseph Monier, zahradník, kterému praskaly betonové květináče při růstu kořenů stromů z důvodu vzniklého vysokého tahového namáhání. Problém vyřešil zalitím ocelových tyčí do betonu, čímž dal za vznik železobetonu [26]. Beton je v současné době nejpoužívanější stavební materiál kvůli své pevnosti, relativně snadné aplikaci a variabilitě tvarovatelnosti. Ve své podstatě se jedná o kompozitní materiál složený ze tří hlavních složek: cementu, kameniva a vody. Dále se používají přísady, příměsi pro zlepšení vlastností, nebo pro snazší zpracovatelnost. Díky tomu je beton materiálem se širokou paletou možností použití, vlastností, zpracování... V dnešní době se betony dají klasifikovat dle několika kritérií, jak je uvedeno v tabulce 1.1.

Tabulka 1.1: Přehled způsobu klasifikace betonů

Rozdělení dle	Příklad
Hustoty	Lehký, těžký, prostý
Pevnosti	Prostý, vysokopevnostní
Výztuže	Železobeton, předpjatý beton, vláknobeton,
Vzhledu	Pohledový, surový, barvený, grafický
Způsobu aplikace	Stříkaný, vakuovaný, zhutněný, válcovaný

1.2.1 Složení

Jak již bylo zmíněno v úvodu kapitoly, beton je složen ze tří hlavních složek: plnivo, pojivo a voda, z dnešního pohledu technologických možností může být toto tvrzení relativizováno a v některých případech i milné. V konvenční podobě je nejčastějším pojivem cement, i přestože většinu objemu výsledného betonu zaujímá plnivo aktivní složkou je právě cementová pasta a většina mechanický vlastností je jím determinována. Většina příměsí ať už se jedná o retardéry tvrdnutí, urychlovače, provzdušňovače, plastifikátory... fungují v návaznosti na cement.

1.2.1.1 Portlandský cement

V konvenční podobě je nejčastějším pojivem cement, konkrétně se jedná o hydraulické pojivo. Charakteristická složka betonu se vyrábí vypalováním vápence a jílu čímž vznikne slínek. Zdroj surového materiálu pro výrobu je pečlivě hlídán a vybírán jelikož se jedná o relativně komplikovanou operaci, zdrojem vápna jsou horniny jako vápenec, oxid křemičitý (SiO_2) a oxid hlinitý se získávají z břidlice a jílu. Počáteční fází výroby slínku je vyčištění, rozdrčení, namletí a homogenizování všech potřebných hornin. Následuje vkládání rozemletého materiálu do rotující pece o rychlosti cca 0,5 - 5 ot/min a délce někdy až 200 m a průměru 5 m, kde se namletá hornina nahřívá na teplotu v rozsahu 300 °C - 1450 °C. V první fázi ohřívání dochází k odpařování vody, poté při teplotách 750 °C - 1000 °C dochází k disociaci uhličitanu vápenatého (CaCO_3). V další fázi za zvyšující se teploty 1000 °C - 1450 °C vznikají oxidické látky. Takto spečené vstupní složky po vychlazení vychází z pece v podobě slínku, který je následně rozmělněn do finální podoby, cementu. [6][7]

Dle složení se dají rozdělit do pěti skupin podle normy ČSN EN 197-1:

- CEM I - portlandský cement
- CEM II - portlandský cement směsný
- CEM III - vysokopecní cement
- CEM IV - pucolánový cement
- CEM V - směsný cement [8]

Po přidání vody do betonu započne chemicko-fyzikální reakce, kdy začíná k postupnému tuhnutí betonu v čase. Proces tuhnutí je doprovázen exotermickou reakcí, kdy dochází k uvolňování tepla se současným vysycháním vody a postupné krystalizaci. Rychlost tvrdnutí je právě závislá na okolní teplotě, vlhkosti a na povrchovém ošetřování vysychajícího betonu, kdy je dle potřeby doba tvrdnutí urychlována nebo opačně zpomalována. Při rychlém vysychání může docházet k praskání materiálu doprovázeného vznikem vzduchových bublin ve struktuře a tím pádem dochází k poklesu mechanických vlastností. Pomocí plastifikátorů lze množství vody snížit a tím i omezit vznik bublin v materiálu.

1.2.2 Vlastnosti betonu

Beton se vyznačuje vysokou pevností v tlaku, ale oproti tomu nízkou pevností za ohybu, proto bývá beton vyztužován, jak již bylo zmíněno v kapitole 1.1. Beton je alkalické prostředí s pH v rozmezí 12 - 13,5, proto ne všechny typy vláken jsou vhodné pro použití v betonových kompozitech. Čedičová vlákna vykazují odolnost vůči chemikáliím a alkáliím, tudíž jsou vhodné pro použití v betonovém kompozitu.

1.2.3 Zkoušení betonu

Zkoušení betonu je neodmyslitelnou součástí použití tohoto materiálu. Jak již bylo zmíněno, beton je velmi variabilním materiálem a to způsobem aplikace, ošetřením či složením, proto lze docílit různých kombinací s těžko predikovatelnými vlastnostmi. Je několik způsobů jakými lze nahlížet na beton potažmo na druhy norem jej upravující, dle normy ČSN EN 206-1 lze beton klasifikovat podle: [9]

- Stupně vlivu prostředí
- Stupně konzistence
- Pevnosti v tlaku
- Velikosti zrna
- Objemové hmotnosti [9]

Klasifikace dle stupně vlivu prostředí a stupně konzistence jsou důležité především pro způsob aplikace a pro určení správného druhu betonu pro určité vlivy počasí. Klasifikace na základě objemové hmotnosti je důležitá u lehkých betonů a pórobetonů, případně pro stanovování hmotnosti konstrukce a její únosnosti. Pro mechanické vlastnosti je důležitá klasifikace především podle pevnosti v tlaku. Tabulka pro obyčejný beton a těžký beton na obrázku 1.2. A také samostatná tabulka pro lehký beton, která zde není uvedena.

Pro stanovení mechanických vlastností betonů se využívají destrukční zkoušky na zkušebních tělesech. Zkušební tělesa jsou buď vyrobena stejnou technologií a použita stejná směs jako by byla použita při stavbě, nebo vyjmuta již z hotové konstrukce. [9]

Pevnost v tlaku

Beton je charakteristický svou pevností v tlaku, na základě které je betonová směs zařazena do pevnostní třídy. Pevnostní třída je kombinací písmena „C“ (concrete) a dvou čísel oddělených lomítkem, první je označena válcová pevnost v tlaku v MPa, druhé číslo je krychelná pevnost v MPa, z pravidla je krychelná pevnost v tlaku vyšší. Beton se zkouší po 28 dnech tvrdnutí, geometrii upravuje norma ČSN EN 206-1 konkrétně na válci o průměru 150 mm a výšce 300 mm a na krychli o straně 150 mm. [9]

třída pevnosti v tlaku	Minimální charakteristická válcová pevnost $f_{ck,cyl}$ [N/mm ²]	Minimální charakteristická krychelná pevnost $f_{ck,cube}$ [N/mm ²]
C -/5		5
C -/7,5		7,5
C 8/10	8	10
C 12/15	12	15
C 16/20	16	20
C 20/25	20	25
C 25/30	25	30
C 30/37	30	37
C 35/45	35	45
C 40/50	40	50
C 45/55	45	55
C 50/60	50	60
C 55/67 ^{a)}	55	67
C 60/75 ^{a)}	60	75
C 70/85 ^{a)}	70	85
C 80/95 ^{a)}	80	95
C 90/105 ^{a)}	90	105
C 100/115 ^{a)}	100	115

Obr. 1.2: Třídy pevnosti v tlaku obyčejného a těžkého betonu podle ČSN EN 206-1 [10]

Pevnost v tahu

Pevnost v tahu je stanovována přímou zkouškou v prostém tahu, nebo stanovena přepočtem ze zkoušky ohybové. Nevýhodou zkoušky v prostém tahu je vysoká náročnost výroby zkušebního tělesa, jež musí být ve tvaru „dog bone“ (obr. 2.1) a opatřena ocelovými deskami, které jsou připevněny na oba konce, za které je zkušební těleso uloženo do zkušebního zařízení. Zkouška je velmi citlivá na jakoukoli změnu geometrie zkušebního tělesa, spoj mezi betonem a ocelí musí být silnější než samotná pevnost betonu v tahu.



Obr. 1.3: Zkušební těleso ve tvaru dogbone pro zkoušku v prostém tahu [11]

Pevnost v tahu za ohybu je podstatně jednodušší zkouškou, kdy je trámec na svých koncích podepřen dvěma válci a zatěžován osamělou silou nebo dvojicí sil, jedná se o zkoušky tříbodovým a čtyřbodovým ohybem. Geometrii zkušebních vzorků a zatěžovacího zařízení upravuje norma ČSN EN 12390. Ze známého vzorce pro napětí při ohybu(11):

$$\sigma_{MAX} = \frac{M_o}{W} \quad (11)$$

Kde M_o [MPa] je ohybový moment, σ_{MAX} [MPa] maximální napětí a W [mm³] modul průřezu.

Konkrétně pro čtyřbodové uložení lze (11) upravit:

$$\sigma_{MAX} = \frac{\frac{F_{MAX} L}{2} \frac{2}{3}}{\frac{1}{12} b h^3 \frac{2}{h}} \quad (12)$$

$$\sigma_{MAX} = \frac{F_{MAX} L}{b h^2} \quad (13)$$

Kde F_{MAX} [N] maximální síla měřena čelistmi, každý z dvojice umístěných válců tedy vyvíjí sílu $F_{MAX}/2$ [N], L [mm] vzdálenost podpěrných válců, b [mm] šířka vzorku a h [mm] výška vzorku.

Modul pružnosti

Moduly pružnosti E [MPa] lze chápat jako odpor materiálu vůči deformaci. Jedná se o konstantu úměrnosti v Hookově zákoně (14) mezi poměrnou deformací ε [-] a napětím σ [MPa] a je charakteristická pro daný materiál.

$$\sigma = E\varepsilon \quad (14)$$

Graficky se jedná o tangentu úhlu mezi osou x a lineární částí pracovního diagramu, kdy je na ose x poměrná deformace a na ose y napětí. Ze vztahu mezi derivací a tangentou úhlu lze modul pružnosti též chápat jako derivaci pracovního diagramu v počátku. Pokud bychom na (14) pohlíželi parametricky, jedná se o rovnici přímky, proto lze odečítat modul pružnosti pouze v lineární části pracovního diagramu, kde se materiál chová vratně elasticky, v praxi je oblast použití do meze kluzu u většiny materiálů.

Modul pružnosti lze dělit dle způsobu namáhání tělesa, a to tahový, tlakový, ohybový, smykový. Dále dle způsobu vyčtení z grafu na tečnový nebo sečnový.

1.3 Čedičové vlákno

Nejstarším producentem horninových vláken je sama příroda, při sopečných erupcích někdy dochází k vyvrhování lávy o takové viskozitě, že dochází vlivem větru k tvorbě vláken. Ovšem první myšlenky výroby vláken z roztavených hornin člověkem sahají do počátku 20. století do Francie, kde se začínalo s prvními pokusy. Roku 1920 Francouzská firma Générale získává první patent v oblasti výroby čedičového vlákna. Rozmach výzkumu umělé výroby vlákna z horniny následuje v druhé polovině minulého století, kdy během studené války mezi východem a západem panovaly napjaté vztahy. Spojené státy americké a především Sovětský svaz spolu souběžně vyvíjeli výrobu čedičového vlákna jako materiál, který by byl schopen odolávat balistickým střelám, proto byly na vlákna kladeny požadavky výborných mechanických vlastností. Na území bývalého Československa byla rozšířená produkce především zplstnatělé čedičové vaty v Duchcově a v závodě Nová Baňa. [12][2]

1.3.1 Složení čediče

Čedič někdy též nazýván bazalt je hornina výlevného vyvřelého typu, jedná se o nejčastější magmatickou horninu na Zemi. V přírodě se čedič vyskytuje v typické sloupcovité, blokové a struskové formě a nebo v pplštářovité formě při vyvěrání sopky pod hladinou moře. Povrch horniny bývá pórovitě struktury zapříčiněné rychlým tuhnutím lávy na zemském povrchu. Čedičová hornina je složena z několika druhů minerálů: pyroxanů, plagioklasů a olivínů, po chemické stránce se jedná o oxidy hliníku, vápníku, hořčíku a oxidy křemičité, přičemž ten je nejzastoupenější složkou čediče. Celkové chemické složení čediče je zobrazena v tabulce 1.2. [14] [15]

Tabulka 1.2: Složení čediče [15]

Složka	%
SiO ₂	42 – 52,5
Al ₂ O ₃	15 – 19,5
CaO	6 – 11,3
MgO	2,6 – 5,2
FeO	6,5 – 11,5
Na ₂ O	3,8 – 20,3
K ₂ O, TiO ₂	2 – 4
P ₂ O ₅	0,4 – 0,8

Dle míry obsahu oxidu křemičitého lze čediče klasifikovat do tří skupin: [15]

Tabulka 1.3: Klasifikace čediče dle obsahu SiO₂

	SiO ₂
Alkalické čediče	< 42 %
Slabě kyselé čediče	43 % – 46 %
Kyselé čediče	> 46 %

K produkci čedičových vláken je žádoucí vstupní materiál, který ideálně obsahuje minimálně 46 % oxidu křemičitého, tedy kyselé čediče, aby mohla být vyrobena vlákna s kvalitními mechanickými vlastnostmi a adekvátní chemickou odolností. [15]

1.3.2 Výroba čedičových vláken

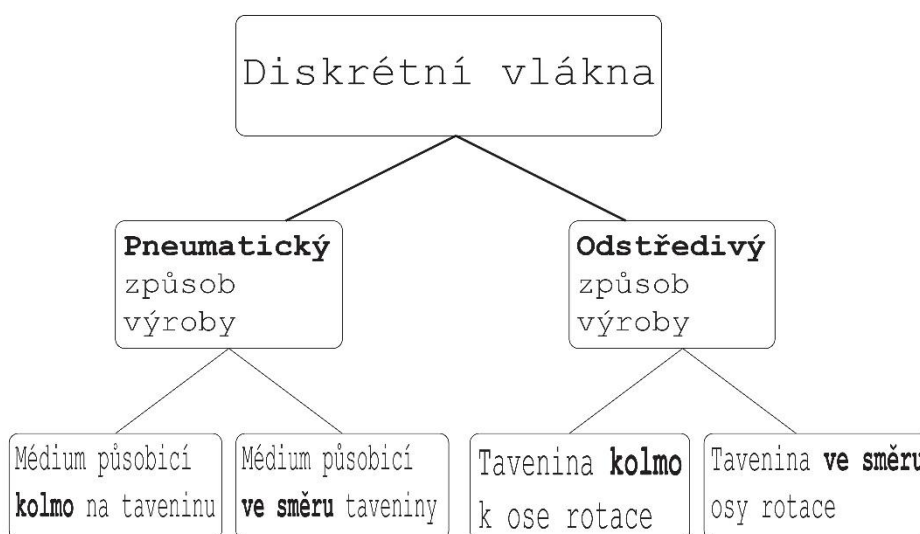
V praxi se vyrábí dva druhy čedičových vláken dle délky a to krátká, staplová vlákna, a nekonečná kontinuální vlákna. Zda budou vlákna krátké délky nebo kontinuální podmínuje způsob výroby, obecně výroba kratších vláken je levnější, ale na druhou stranu nevykazují tak kvalitní mechanické vlastnosti jako vlákna kontinuální. Krátká čedičová vlákna je možné vyrábět rovnou z rozdrčených čedičových kamenů, což jejich produkci zjednodušuje a zrychluje, čímž se snižuje jejich cena, ovšem postup, který snižuje cenu současně snižuje jejich mechanické vlastnosti z důvodu vzniku vad nedokonalým vstupním materiálem do výroby. [16] Obecně se při výrobě čedičových vláken používají tři technologické principy:

- odstředivý způsob zvlákňování
- pneumatický způsob zvlákňování
- tavné zvlákňování [2]

Ne všechny druhy čedičové horniny lze použít na výrobu vláken, z tabulky 1.2 je patrný rozptyl v obsahu jednotlivých složek. Hornina by měla obsahovat vhodný podíl oxidu křemičitého (SiO_2) a do výroby by měla být vkládána hornina se stejným chemickým složením, tj. složení horniny by mělo být homogenní. Primární podstatou výroby čedičových vláken je zvlákňování z taveniny, je tedy nutné, aby hornina byla tavitelná a nevytvářela netavitelné hrudky, které by nemohly projít zvlákňující tryskou nebo které by narušovaly strukturu a během výroby by docházelo k přetrhům. Dalším faktorem při výrobě vláken z taveniny je její viskozita a neměla by tuhnout s výraznější krystalizací, což lze ovlivnit právě stupněm viskozity, který je závislý na teplotě a na chemickém složení vstupujícího materiálu. [15]

1.3.3 Výroba krátkých čedičových vláken

Technologie zvlákňování odstředivým nebo pneumatickým způsobem lze získat pouze krátká vlákna. Zvlákňování odstředivým způsobem lze dále dělit dle úhlu mezi stékající taveninou dopadající na zvlákňující válec a jeho osou rotace. Výrobu odstředivým způsobem lze též dělit dle úhlu mezi stékajícím proudem taveniny a působícím pneumatickým médiem na taveninu, shrnutí rozdělení výroby krátkých, diskretních, vláken je uvedeno na obr. 1.4.



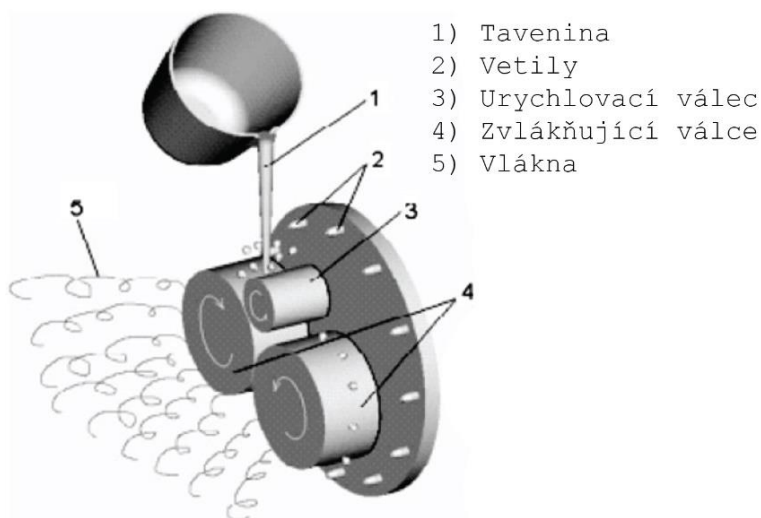
Obr. 1.4: Způsoby výroby diskretních vláken

1.3.3.1 Odstředivý způsob výroby

Tento druh výroby čedičových vláken je charakterizována zvlákňujícím médiem, které k tvorbě vláken využívá odstředivých sil za pomoci rychle rotujících válců. Skupinu lze dále dělit dle směru vstupujícího materiálu do vláknotvorného ústrojí, tavenina může být přiváděna kolmo k ose rotace válce, či ke skupině válců, nebo ve stejném směru jako je osa rotace.

Odstředivé foukání (centrifugal blowing; kolmo)

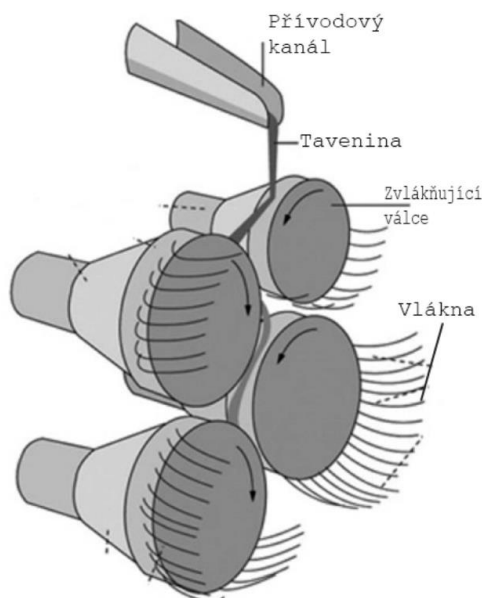
Podstatou výroby je postup kdy je tavenina přiváděna kolmo k ose rotace vláknovorného ústrojí (fiber spinning machine), které je tvořeno třemi válci, jedním hnacím válcem a dvěma zvláknujícími válci. Přiváděná viskózní tavenina, je vlivem odstředivé síly vyvolané vysokou rychlostí odmrštěna z povrchu válce za vzniku 60 – 100 mm dlouhých vláken o průměru přibližně 6 - 10 μm . Takto vzniklá vlákna nachází uplatnění převážně ve výrobě termoizolačních desek ve stavebnictví a v automobilovém průmyslu. [16]



Obr. 1.5: Schéma výroby odstředivého foukání [16]

Víceválcové foukání (centrifugal-multiroll; kolmo)

Principem podobná technologie jako výše zmíněné odstředivé foukání, technologie se liší v rozšířeném vláknovném ústrojí. Tavenina čedičové horniny je přiváděna k systému válců, které svou vysokou rychlostí vyvolávají odstředivou sílu na taveninu držící se na povrchu válců adhezní silou. Při překonání adhezní síly silou odstředivou dochází k odmrštění taveniny z povrchu válce za vzniku vláken o průměru 10 μm . [16].



Obr. 1.6: Schéma výroby víceválcového foukání [16]

Výroba pomocí odstředivého válce (ve směru)

Technologie výroby čedičových vláken za pomoci odstředivého válce se liší od předešlých způsobů úhlem svírající proud taveniny a osa rotace zvlákňujícího ústrojí. Zatímco u předešlých způsobů tavenina dopadala kolmo na povrch válce, zde je proud taveniny přiváděn ve směru osy rotace do středu kotouče. Kotouč je tvořen kruhem s hladkým povrchem ležícím ve středu podstavy a mezikružím jehož povrch je radiálně drážkovaný. Proud taveniny dopadá do hladkého středu, kde se vlivem rotace roztéká po povrchu směrem k radiálním drážkám, při dosažení drážkovaného mezikruží se tavenina rozdělí do drážek, ze kterých se při dosažení obvodu válce odmršťuje ve formě malých kapiček, které se za letu formují do vláken. Vlákna jsou následně dopravována vzduchem do sběrné nádoby. [2]

1.3.3.2 Pneumatický způsob výroby

Skupina pneumatických způsobů výroby je charakterizována zvlákněním za použití proudícího média. Médium může být tlakový vzduch nebo přehřátá pára. Skupinu lze opět rozdělit do dvou, proudící médium ve směru vstupujícího materiálu, nebo kolmo na něj. Dále se ve výrobě vyskytují další dva rozdílné principy a to rozfukování přímo taveniny, nebo rozfukování filamentu. Stejně jako u hydraulického způsobu výroby dochází k produkci diskretních vláken.

Taveninové rozfukování filamentů (duplex) (melt blowing)

Tato technologie je zjednodušeně upravená technologie výroby vláken kontinuálních, vlákna místo toho aby byla odtahovými válci dále navijena, jsou po odtahu rozfukována na jemné fibrily. [17]

Taveninové rozfukování taveniny

Vstupním materiálem je tavenina přiváděna ve směru proudícího média nebo kolmo na něj. Tavenina může být přiváděna v jednotném souvislém proudu, nebo rozdělena do několika dílčích proudů kdy dochází ke zvláknění ve více místech. Proud taveniny je při kontaktu s proudícím médiem rozfoukán na malé kapičky, které jsou v letu formovány ve vlákna. Vlákna jsou dále dopravována vzduchovým kanálem, kde jsou přerozdělována na hrubší a jemnější. Ve vzduchovém dopravníkovém kanále jsou též postříkována pojivem a ukládaná na dopravníkovém páse, kde vzniká buď „zplstnatělá“ vrstva vláken, která se používá na výrobu rohoží, či izolačních desek, nebo pavučina, kterou lze dále upravit na pramenec. [2]

1.3.4 Výroba kontinuálních vláken

Tam, kde jsou kladeny vyšší nároky na mechanické vlastnosti vláken, nachází uplatnění kontinuální čedičová vlákna, která se oproti vláknům vyrobeným výše zmíněnými způsoby vyznačují menší nestejnou měrností a lepší homogenitou materiálu jako samotného, což je dáno technologií výroby. V dnešní době je mnoho různých způsobů výroby čedičových vláken, které se od sebe liší variabilitou použitých součástek, ať již různými tvary pecí,

způsobem dopravy, nebo tvarem zvlákňujících válců či jejich umístěním. Jedná se o tavné zvlákňování a ve své podstatě se shodují v několika bodech.

V první řadě je nutná příprava surového materiálu, čediče, na výrobu kontinuálních vláken, která je náročnější oproti technologické přípravě při výrobě krátkých vláken, kde bylo postačující vložení nahrubo rozdrčené horniny, zde je již nutné rozemletí kamenů na malé kusy o velikosti cca 5 - 40 mm, následné mytí a odstranění nečistot jako je prach, písek...

Mokrý materiál je dále nutné vysušit a dopravit do tavné pece, kde je hornina roztavena při teplotě kolem 1300 °C – 1700 °C. Teplota při výrobě je jednou z klíčových parametrů, které mohou změnit finální mechanické vlastnosti vlákna. Tavenina je následně kontinuálně protlačována zvlákňovací tryskou skrz stovky malých otvorů, které má na svém povrchu, za vzniku vláken. Průměr zvlákňujících se vláken je dán průměrem těchto otvorů, rychlostí vytékání taveniny, odtahovou rychlostí a mírou viskozity protlačované taveniny. Dále je možné vlákna dloužit kolem teploty 1300 °C, kdy dochází vlivem tahové síly k podélné deformaci, čímž se řetězce orientují ve směru vlákna, zvyšuje se tedy pevnost. Teplota při výrobě čedičového vlákna je důležitým součinitelem určující mechanické vlastnosti, změnou teploty ať už taveniny nebo změnou teploty a doby působení tepla při dloužení vláken může vzniknout produkt s rozdílnou pevností i za předpokladu stejného složení. Před finální operací přichází případné nanesení sizingu, aby se jemné monofily čediče při manipulaci nerozpadaly a posledním krokem je navíjení na požadované cívky [15] [16] [18] [19].

Při porovnání technologie výroby se skelnými vlákny, tak výroba čedičových vláken je v určitých aspektech jednodušší. Už na počátku výroby dochází k jednoduššímu dopravování materiálu do tavné pece, jelikož sklo je složeno z 50 % siliky, oxidu boritého, hliníku a několika různých minerálů, je tedy nutné veškeré zmíněné složky dopravovat do stroje odděleně, čedičová hornina veškeré složky potřebné k výrobě již obsahuje, jeden dopravníkový kanál je tedy pro dopravu surového horniny postačující. Dále jsou při výrobě skelných vláken přidávány do taveniny další potřebné přípravky, čedičové vlákno vzniká pouze ze vstupní suroviny bez přísad. Tyto komplikace při výrobě skla, ale na druhou stranu umožňují lepší kontrolu materiálu ve výrobě, při použití čedičové horniny je komplikované zajistit homogenitu vstupujícího materiálu, který se může lišit svým

původem nebo i mírou hloubky nálezů čediče. Z těchto důvodů je stále snazší výroba skelných vláken v masivnějším měřítku. [16] [20]

1.3.5 Vlastnosti čedičových vláken

Čedičová vlákna mají hnědozelené někdy až zelené zbarvení dle výrobní technologie a podle složení minerálu. Povrch bývá hladký s kruhovým průřezem daným způsobem výroby. Podle tvaru vlákna lze odhadnout způsob výroby, vlákna stejnoměrná po celé délce jsou nejčastěji produktem tavného mechanického zvláknování, kdy vzniká nekonečné vlákno, které je dále nasekáno na diskrétní vlákna do formy stříže. Čedičová vlákna vyrobená pneumatickým způsobem mívají různě velké průřezy po své délce a to zejména na svých koncích, svým tvarem připomínají protáhlou kapku. Hydraulický způsob výroby produkuje vlákna, která bývají zvlněná po své délce. [13]

Čedičová vlákna zřejmě zaujmou pozici kompromisního řešení mezi cenou a mechanickými vlastnostmi mezi skelnými a uhlíkovými nebo aramidovými vlákny, které sice nabízejí kvalitní mechanické vlastnosti, ale svou cenou jsou v některých odvětvích průmyslu prakticky nepoužitelná. Čedičová vlákna se vyznačují vysokou pevností v tahu s malou tažností, s přihlédnutím k hodnotě Youngova modulu v tahu je lze zařadit do skupiny vláken s vysokým modulem vedle právě zmíněná vlákna, jako jsou uhlíková, skelná, aramidová... Čedičové vlákno může být vystaveno korozním vlivům, vodě a soli bez značné ztráty pevnosti, proto jsou vhodné při konstrukci vodohospodářských staveb, nebo při stavbě silnic. Dobře odolávají chemickým vlivům, v porovnání se skelnými vlákny lépe odolává alkalickému prostředí, naopak hůře v prostředí kyselém. Obecně na degradaci vlákna resp. na snížení jeho mechanických vlastností chemické vlivy nehrají zásadní roli ve srovnání s vlivem teploty. Rozmezí teplotní použitelnosti se pohybuje od -20 °C do 700 °C, avšak už při teplotě 300 °C dochází ke vzniku krystalů ve struktuře, což zapříčiňuje pokles pevnosti. Se svojí nízkou tepelnou vodivostí se řadí mezi dobré tepelné izolátory i proto jsou vhodné jako stavební izolace, mimo to že jsou i nehořlavá. Při porušení se lámou křehkým lomem s patrnou nehomogenitou materiálu na průřezu, úlomky se mohou štěpit do „vdechnutelných“ rozměrů, proto je potřeba při manipulaci použití ochrany dýchacích cest. Uvádí se, že vdechnuté úlomky nejsou karcinogenní. Svým

složením jsou čedičová vlákna šetrná k životnímu prostředí, závadnosti výroby se však příliš studií nevěnovalo. [15][18]

1.4 Vláknobeton

Počátkem minulého století byla přidávána do betonu azbestová vlákna a tím vznikl azbestobeton, ten si roku 1903 Ludwig Hatshek nechal patentovat pod obchodním názvem Eternit z latinského výrazu aeternus pro věčný, trvalý [22]. V 50. letech byla produkce pozastavena kvůli zákazu azbestu kvůli své karcinogenitě a tak se rozmohlo hledání náhradních vláken. [21] V 60. letech byl vmyšlen glass reinforced concrete (GRC), jedná se o beton vyztužený skelnými vlákny, které dokáží odolávat alkalickému prostředí. V současné době je GRC používán především malými či specializovanými firmami, společnostmi, které ale nedisponují finančními prostředky pro výzkum, proto ještě není celkový potenciál betonu vyztužený vlákny zcela využit. Naproti tomu drátkobeton, příbuzný materiál, disponuje rozsáhlými podklady vědeckých prací. I přesto si již vláknobeton našel své uplatnění ve stavební praxi, kde se využívá v komplikovanějších architektonických prvcích, podlahách nebo jako doplněk v nosných konstrukcích. [23] K širšímu rozmachu aplikace vláknobetonů brání zatím stále malá informovanost stavitelů potažmo investorů.

Vláknobeton lze rozdělit do dvou skupin, a to vláknobeton a drátkobeton, drátkobeton je vlastně vláknobetem s použitím ocelových drátků, svou relativně vysokou ohybovou tuhostí vzhledem ke klasickým textilním vláknům se od vláknobetonu ale velmi odlišuje. Už při míchání betonu s drátky dochází ke změně struktury drátkobetonu oproti prostému betonu, drátky svou ohybovou tuhostí ovlivňují rozložení plniva, tím pádem mění vnitřní strukturu betonu. Dále zatím pouze drátkobeton dokáže spolehlivě zvyšovat tahovou pevnost kompozitu. U drátkobetonu lze také lépe zajistit mechanické ukotvení výztuže díky svým rozsáhlým možnostem tvarových variant. Dále lze také polemizovat, kdy se ještě vůbec jedná o vlákno nebo o kus plechu. Text bude dále věnován pouze vláknobetonům vyrobených z vláken s vyloučením ocelových vláken, případně drátků.

1.4.1 Aplikace

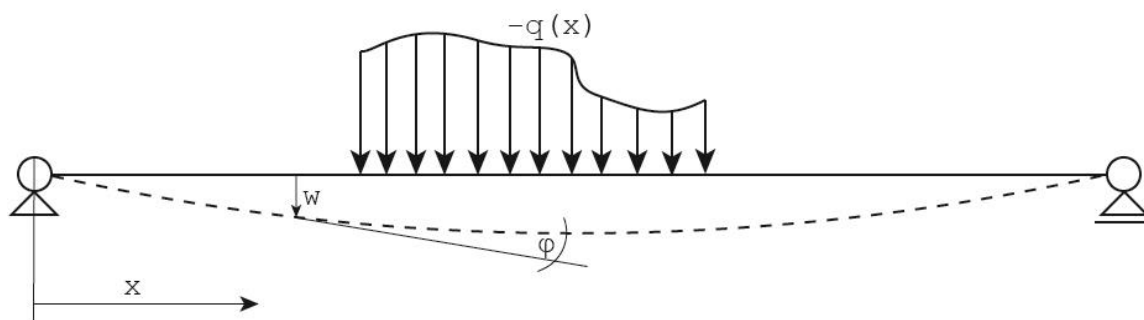
Nespornou výhodou a také důvodem výzkumu je možnost výroby vláknobetonu stejnými prostředky a technologickými postupy jako jsou užívány při výrobě prostého betonu. Samozřejmě některé postupy a prostředky by bylo vhodné upravit, ale není to nezbytně nutnou záležitostí, tudíž vyšší finanční náročnost není z důvodu aplikace, ale je pouze zapříčiněna pořizovací cenou vláken. Ovšem ne všechna vlákna a podíly vláken zajišťují snadnost aplikace. Vyšší ohybová tuhost vláken nebo vyšší koncentrace vláken mohou výrobu komplikovat a pak jsou nutné určité zásahy do technologie výroby, jedná se však o speciální případy. Jelikož postupy aplikace vláknobetonů se častokrát shodují s aplikací prostého betonu lze je snadno kombinovat s klasickým či předpjatým železobetonem nebo použít spolu s armovacími sítěmi. V praxi se lze setkat s dávkováním dle hmotnostního nebo objemového podílu, a to od 0,5 % do 3 %. [1] [25]



Obr. 1.7: GRC desky na centru Hejdara Alijeva [28]

1.5 Diferenciální rovnice průhybové čáry

Existuje několik možností jak vyšetřovat průhyby nosníků. Výhodou diferenciální průhybové čáry je snadné vypočítání průhybu ve zvoleném bodě při znalosti jejího předpisu, naproti tomu nevýhodou je, že v některých případech, je pracné zjištění jejího tvaru pro konkrétní uložení a lze ji použít pouze v oblastech malých deformací s platností Hookova zákona. Diferenciální rovnice průhybové čáry nezahrnuje vliv posouvající síly, která namáhá těleso smykem, proto nelze aplikovat diferenciální rovnici průhybové čáry na tělesa silných průřezů při uložení u kterého nelze smykové zatěžování zanedbat.



Obr. 1.8: Nosník zatížený obecným liniovým zatížením

Je dán nosník homogenního materiálu splňující prutové předpoklady zatížený liniovým zatížením $q(x)$ [N/mm]. Zatížení vyvolává deformaci nosníku, kdy se přímá osa zdeformuje do tvaru ohybové čáry $w(x)$ [mm] za předpokladu Bernoulliho-Navierovy hypotézy. Jelikož se jedná o malé deformace lze psát [1]:

$$\varphi = \tan \varphi \quad (15)$$

$$\tan \varphi = \frac{dw}{dx} \quad (16)$$

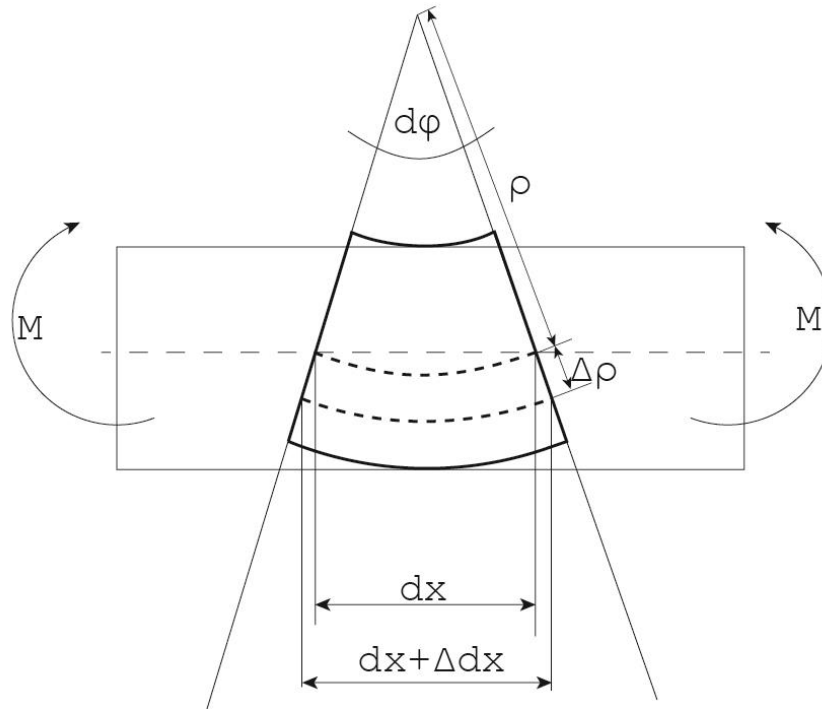
Kde φ [rad] úhel natočení, w [mm] velikost průhybu.

Při dosazení w [mm] do explicitního vyjádření křivosti křivky:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{w''}{(1 + (w')^2)^{3/2}} \quad (17)$$

Jak již bylo míněno, jde o malé deformace, proto výraz $(w')^2$ je velmi malý a lze ho s dostatečnou přesností zanedbat. Poté rovnice (17) přechází do tvaru:

$$\frac{1}{\rho} = w'' \quad (18)$$



Obr. 1.9: Ohyb infinitezimálního prvku

Z geometrie ohnutého prvku lze vyjádřit poloměr křivosti ρ [mm] a poměrnou deformaci ε [-]:

$$dx = \rho d\varphi \quad (19)$$

$$\overline{dx} = dx + \Delta dx = (\rho + \Delta\rho)d\varphi \quad (20)$$

$$\Delta dx = \overline{dx} - dx = \Delta\rho d\varphi \quad (21)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta dx}{dx} = \frac{\Delta\rho}{\rho} \quad (22)$$

Při dosazení (22) do Hookova zákona (14)

$$\sigma = \frac{E}{\rho} \Delta\rho \quad (23)$$

Vyjádření diferenciálu ohybového momentu dM_o :

$$dM_o = \sigma \Delta \rho dA \quad (24)$$

Kde dA je diferenciál plochy, dosazením (23) do (24) a integrací (24) dostáváme M_o [MPa]:

$$M_o = \frac{E}{\rho} \int (\Delta \rho)^2 dA = \frac{E}{\rho} I \quad (25)$$

Kde I [mm⁴] je kvadratický moment průřezu. Po dosazení (25) do (18) získáváme výsledný tvar diferenciální průhybové čáry:

$$w'' = -\frac{M_o(x)}{EI} \quad (26)$$

V této kapitole byly použity informace z [1].

1.6 Charakteristika průřezu

Většina deformačních vztahů je postavena na předpokladu homogenního průřezu, resp. průřezu složeného z pouze jednoho materiálu. Problémy vznikají při vyšetřování mechanických vlastností nehomogenních průřezů, běžným stavem této problematiky jsou například výpočty železobetonových konstrukcí, nebo laminátových struktur, kdy lze předpokládat lineární deformaci po průřezu, ale rozložení normálových napětí je přímkové pouze v průřezu každé vrstvy, průběh napětí přes průřez jako celek, tedy probíhá skokově. Pro stanovení průřezových charakteristik jako jsou momenty setrvačnosti, od kterých se dále odvíjí další vlastnosti, se využívá nahrazení reálného průřezu průřezem náhradním.

1.6.1 Ekvivalentní průřez

Průřez nosníku složeného z více vrstev různých materiálů je převeden na izotropní redukci šířek každé vrstvy poměrně dle hodnot modulů pružnosti každé vrstvy. Šířky jednotlivých vrstev jsou poměrně zúženy na základě součinitele E_i/E_j . Nejprve je zaveden základní

modul pružnosti E_Z [MPa] podle kterého jsou zbylé vrstvy redukovány. [5] Redukovaná šířka b_{iR} [mm] i -té vrstvy tedy:

$$b_{iR} = \frac{E_i}{E_Z} b_i \quad (27)$$

Jak základní modul E_Z [MPa] je nejčastěji volen největší modul pružnosti všech vrstev, šířky jsou tedy poměrně zmenšovány. Výšky vrstev se nijak neupravují. [5]

Po redukcii šířek vznikl nový průřez s modulem pružnosti v tahu E_Z [MPa], jestliže původní průřez byl obdélníkového tvaru, vznikl průřez jiného tvaru, dochází tedy ke změně těžiště celkového průřezu a tedy i k posunu neutrální osy, pokud neutrální osa procházela těžištěm. Změna polohy těžiště x_T :

$$x_T = \frac{\sum_i^n E_i S_i x_i}{\sum_i^n E_i S_i} \quad (28)$$

Kde S_i je plocha i -té vrstvy. Celkový moment setrvačnosti po redukcii I_R [mm⁴] je již pak součtem momentů setrvačnosti jednotlivých vrstev k těžišťové ose redukováného průřezu, při použití Steinerových vět lze zapsat pro obdélníkový průřez:

$$I_R = \sum_{i=1}^n \left(\frac{b_{iR} h_i^3}{12} + S_{iR} \gamma_i^2 \right) \quad (29)$$

Kde γ_i je vzdálenost těžiště i -té vrstvy od neutrální osy. Jak bylo uvedeno v úvodu kapitoly 1.6 napětí neprobíhá lineárně přes celý průřez, proto maximální napětí nemusí nastat v nejkrajnějším vlákne, proto je nezbytné kontrolovat napětí pro každou vrstvu [5]:

$$W_i = \frac{I_R E_Z}{E_i y_i} \quad (30)$$

Kde W_i [mm³] je průřezovým modulem i -té vrstvy a y_i vzdálenost krajního vlákna i -té vrstvy od neutrální osy.[5]

1.6.2 Ideální průřez

Ve stavební praxi se podobným způsobem vyšetřují železobetonové nosníky, kdy průřez s vyztužením je převeden na ideální průřez součtem plochy betonu a E_S/E_C násobkem plochy výztuže. Rozdíl ve způsobu použití je že se v předešlém případě redukuje šířky, plocha se zmenšuje u ideálního průřezu se zpravidla plochy přidávají jelikož $E_S > E_C$ [1] [5].

$$S_{ideální} = S_C + S_S \frac{E_S}{E_C} \quad (31)$$

Kde S_{ideal} [mm²] je plocha ideálního průřezu, S_C [mm²] plocha betonu, S_S [mm²] plocha výztuže, E_S [MPa] modul pružnosti výztuže, E_C [MPa] modul pružnosti betonu. [1] [5]

2 Praktická část

Veškeré následující mechanické vlastnosti zkušebních těles s orientovanou výztuží platí pouze při uložení tak aby vlákna při ohýbání byla v tažené části průřezu, dále mechanické platí pouze v podélném směru tedy ve směru vláken. Zkušební tělesa s orientovanou výztuží jsou ortotropními materiály, jejich mechanické vlastnosti závisí na volbě směru. U zkušebních těles s neorientovanou výztuží byla předpokládána izotropie. Veškeré moduly pružnosti dále použity jsou moduly pružnosti v tahu.

2.1 Použitý materiál

2.1.1 Beton

Pro výrobu vzorků byl použit beton výrobce Trinic LLC. o složení:

Tabulka 2.1: Složení betonové směsi

Složka	Hmotnostní podíl [%]	Obchodní označení
Cement	45 %	Portland Cement
Písek	48,5 %	Silico
Silika	5 %	Silica Fume D-1000
Admix	1,5 %	Tec-10 GFRC Admix
Plastifikátor	0,5% hmotnosti cementu	Trinic Plasticizer
W/C	0,26	

Kde W/C je poměr vody a cementu. Písek byl použit od výrobce Sandsystem s velikostí zrna 0,1 – 0,5 mm.

2.1.2 Vlákna

Pro výrobu zkušebních těles byl použit vlákněný útvar v práci nazvaný „roving“. Roving = svazek nekonečných fibril opatřený sizingem bez zákrutu. Byly použity čedičové rovingy, vyrobené firmou Kamenny vek (<https://basfiber.com/production>), o následujících vlastnostech:

Tabulka 2.2: Materiálové parametry čedičového rovingu

Materiál	Čedič
Hustota	2900 kg.m^{-3}
Počet fibril	3 000
Jemnost	412 tex
Zákrut	0 m^{-1}



Obr. 2.1: Čedičový roving

2.2 Výroba vzorků

Pro zjištění mechanických vlastností kompozitu bylo vyrobeno 6 sad zkušebních těles s rozdílným stupněm a způsobem vyztužení, konkrétně byly vyrobeny 3 sady s orientovanou výztuží, 2 sady s neorientovanou výztuží a 1 sada zkušebních těles prostého nevyztuženého betonu. Každá sada obsahovala 5 zkušebních těles.

Možnosti laboratoře na podrobení zkušebních těles 4 bodovému ohybu dovolovaly rozpětí podpěrných válců maximálně 300 mm, délka vzorku byla tedy zvolena 350 mm. Délka podpěrných válců je 50 mm, šířka zkušebních těles byla tedy zvolena 40 mm. Cílem byla aplikace pouze jedné vrstvy vlákenné výztuže, za účelem snížení počtu vstupních parametrů, technologické možnosti dovolovaly aplikaci maximálně 20 rovingů skládaných vedle sebe do šířky 40 mm, vyšší počet by už zřejmě nedovoloval prostoupení betonu skrz vlákennou vrstvu. V praxi se uvádí aplikace vláken do betonu od 0,5 % - 3 % hmotnosti, výška zkušebního tělesa byla zvolena tak, aby hmotnost 19 rovingů odpovídala alespoň 0,5 % hmotnosti betonu. Výška zkušebních těles byla tedy zvolena 10 mm. Umístění vlákenné výztuže bylo zvoleno do spodní části zkušebního tělesa, která je namáhaná tahem od ohybového momentu, konkrétně 3 mm nad místem maximálního kladného napětí.

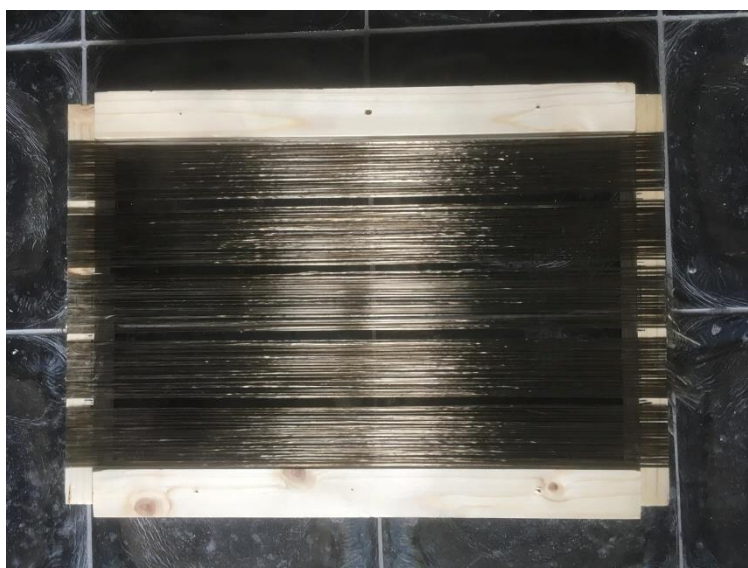
Zkušební tělesa s orientovanou výztuží

Každá sada, tedy 5 zkušebních těles, byla odlévána jako jednolitá deska, ze které byly následně nařezány zkušební tělesa požadované šířky 40 mm. Přípravek pro výrobu zkušebních těles (desky) s orientovanou výztuží byl složen ze dvou částí, a to z bednění a rámu. Dno bednění bylo vyrobeno z dřevotřískové desky s povrchovou úpravou laminy. Strany a rámy bednění byly vyrobeny z prostých broušených latí. Vnitřní strany bednění měly tedy následující geometrii: délka 350 mm, šířka 212 mm a výška 7 mm. Rozměr šířky byl navýšen o 3 mm na každý řez deskou na základě šířky řezacího kotouče. Bednění před samotným litím betonu bylo ošetřeno krémem, aby nedocházelo k přilnutí betonu.



Obr. 2.2: Bednění

Požadavky na geometrii rámu: délka 350 mm, 212 mm a výška rámu měla být vyšší než 3 mm. Na rám následně byly zakresleny úseky o délce 40 mm s rozestupem 3 mm, do kterých byl sponkovací pistolí připevněn požadovaný počet rovingů s jednotným předpětím pomocí závaží o hmotnosti 210 g. Dle míry vyztužení ve výšce 3 mm byl do každého úseku 40 mm upnut počet rovingů: 7, 15, 19.



Obr. 2.3: Rám s 19 nataženými rovingy

Tabulka 2.3: Označení sad těles s orientovanou výztuží dle míry vyztužení

Označení sady	Počet rovingů	Délka [mm]	Šířka [mm]	Výška [mm]
R7	7	350	40	10
R15	15			
R19	19			

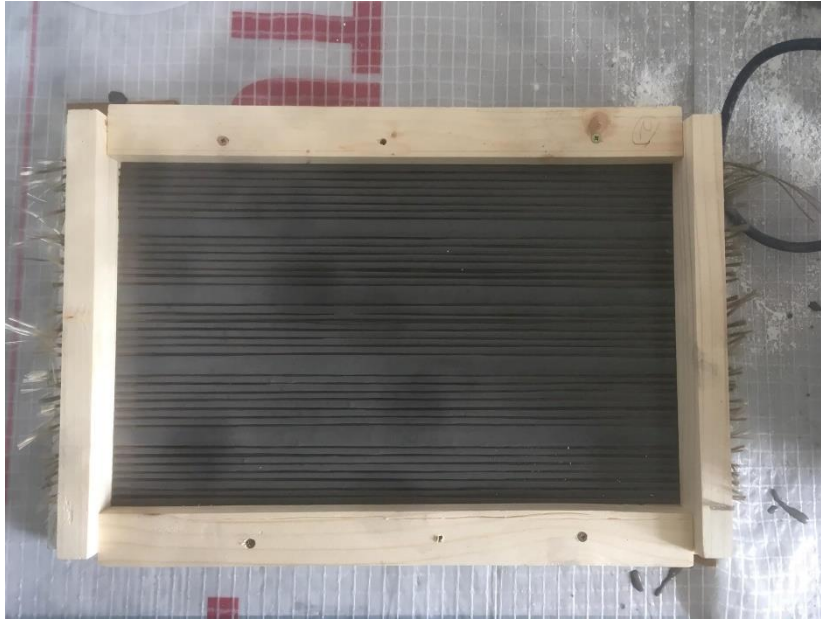
Přípravu betonu pro orientovanou výztuž lze shrnout ve 3 krocích:

- smíchání sypkých částí betonu vyjma plastifikátoru
- přidání vody s opětovným smícháním
- přidání plastifikátoru s následným mícháním



Obr. 2.4: Beton po přidání plastifikátoru

Část připraveného betonu byla vylita do maxima výšky bednění, aby bednění bylo zcela plné betonu, následně byl na bednění přiložen rám s nataženými rovingy směrem k betonu, který byl poté přivrtán k bednění. V poslední řadě byl vylit zbytek betonu do výšky rámu 3 mm.



Obr. 2.5: Průběh betonování zkušebních těles s orientovanou výztuží

Po samotném vylití betonu byl celý přípravek zakryt deskou a přikryt textilií, aby z desky neunikalo teplo a voda a nedocházelo tak k příliš rychlému vysychání, které zapříčinilo popraskání prvotních vzorků. Použité složení betonu obsahuje poměrně málo vody, což vysychání urychluje. Všechny zkušební tělesa byla podrobena destruktivní zkoušce čtyřbodovým ohybem po 28 dnech zrání při teplotě 21 °C a relativní vlhkosti vzduchu 58 %.

Po vytvrdnutí betonu byl povrch zbroušen do požadovaných rozměrů, aby byla zajištěna rovinnost.

Zkušební tělesa s neorientovanou výztuží

Vlákna určena k výrobě betonového zkušebního tělesa s neorientovanou výztuží byla použita stejná jako u orientované výztuže. Rovinky však musely být nastříhány na samostatná vlákna, aby bylo možné jejich vmíchání do tekuté směsi betonu. Délka vláken byla zvolena 15 mm. Byly vyrobeny 2 sady vzorků lišící se hmotnostním podílem, první sada (N1) obsahovala stejný hmotnostní podíl jako sada orientované výztuže R19. Hmotnostní podíl druhé sady zkušebních těles s neorientovanou výztuží (N2) byl zvolen jako dvojnásobek hmotnostního podílu vláken sady první (N1).

Na přípravek na výrobu zkušebních těles s neorientovanou výztuží nebylo zapotřebí výroby rámu. Bylo vyrobeno bednění ze stejného materiálu jako v případě výroby zkušebních těles s orientovanou výztuží, ale s upravenou výškou bednění, která již byla větší než 10 mm, jelikož neorientovaná výztuž již byla v betonu obsažena.

Příprava betonu byla upravena pouze tak že, po celkové přípravě betonu byly do tekuté směsi přidána vlákna, která byla následně promíchána. Tato směs betonu s vlákny byla následně vylita do připraveného vymazaného bednění.

Tabulka 2.4: Označení sad těles s neorientovanou výztuží dle hmotnostního podílu

Označení sady	Hmotnostní podíl vláken	Délka [mm]	Šířka[mm]	Výška[mm]
N1	0,815 %	350	40	10
N2	1,63 %			

Zkušební tělesa z prostého betonu

Bednění pro zkušební tělesa byla vyhotovena stejně jako bednění na výrobu zkušebních těles s neorientovanou výztuží.

Příprava prostého betonu byla shodná s přípravou betonu pro výrobu zkušebních těles s orientovanou výztuží.

Sada zkušebních těles z prostého betonu je označena *R0*.

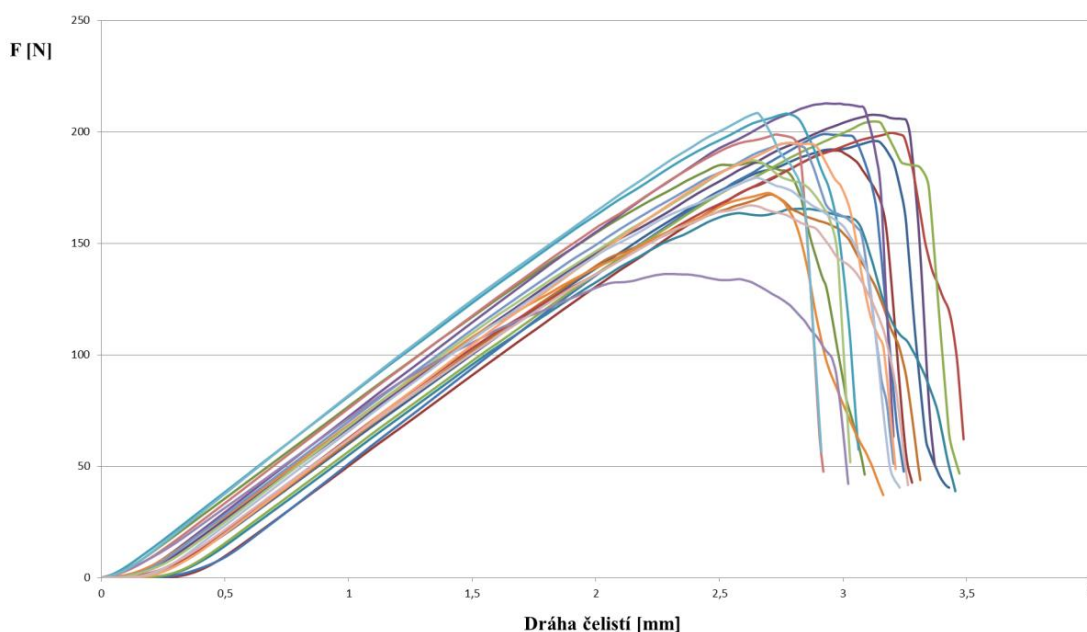
Tabulka 2.5: Označení a geometrie sady z prostého betonu

Označení sady	Vyztužení	Délka [mm]	Šířka[mm]	Výška[mm]
R0	Prostý beton	350	40	10

2.3 Postup zkoušek a naměřená data

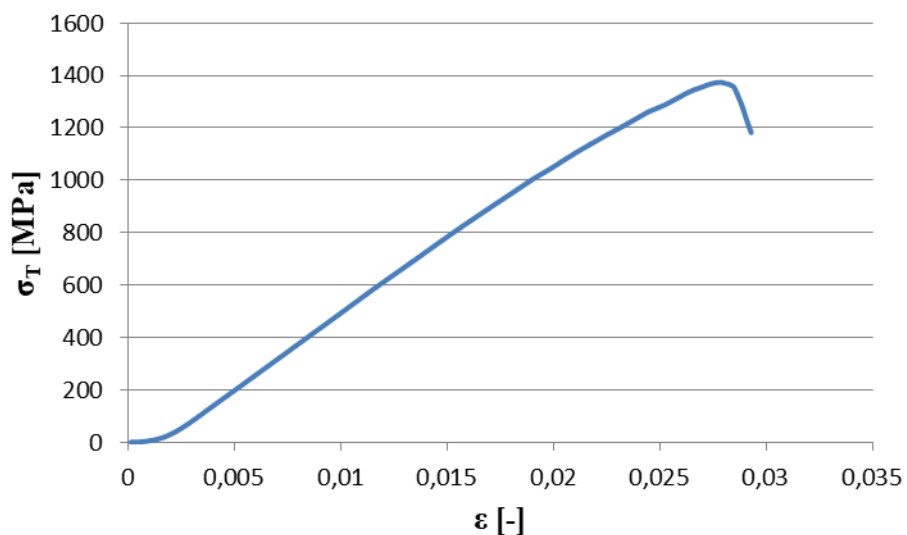
2.3.1 Postup tahové zkoušky rovingů a naměřená data

Tahová zkouška rovingů byla provedena na stroji TIRA test 2300. Byl nastaven konstantní rychlost posuvu čelistí 10 mm/min s upínací délkou 100 mm. Bylo potřeba zajistit, aby rovingy byly upnuty do čelistí kolmo na čelisti a nezvlněné, z tohoto důvodu byly vyrobeny přípravky z tvrdého papíru, do kterých byly rovingy přilepeny s mírným zatížením. Následně byl celý přípravek upnut do trhacího stroje a rozstříhnut, poté mohla začít samotná zkouška. Byla zaznamenána tahová síla F_T [N] a posuv čelistí s [mm], zkouška byla ukončena poklesem síly o 80 %. Bylo provedeno 20 měření.



Obr. 2.6: Průběh trhacích zkoušek

Závislost tahové síly F_T [N] a posuvu čelistí trhacího stroje s byla přepočítána na závislost tahového napětí σ_T [MPa] a poměrné deformace ε [-]. Následně nejdelší lineární část grafu závislosti σ_T [MPa] a ε proložena přímkou s předpisem $y=kx+q$ kde konstanta k je rovna modulu pružnosti v tahu rovingů E_{VL} [MPa].



Obr. 2.7: Tahová křivka rovingu

Tabulka 2.6: Naměřené hodnoty tahové zkoušky rovingů

	E_{vl} [Mpa]	F_T [N]	σ_T [Mpa]	ε [-]
Průměr	57438,5	189,26	1332,15	0,0287
Směrodatná odchylka	1899,83	18,48	130,05	0,0021
Variační koeficient [%]	3,31	9,76	9,76	7,19

2.3.2 Postup obrazové analýzy a naměřená data

Pro obrazovou analýzu byly vyrobeny řezy kolmo na podélnou osu vzorku. Obrazová analýza byla provedena na stereomakroskopu s kamerou Nikon Fi3 s objektivem Makro Navita. Obraz z důvodu nízkého kontrastu mezi plochou vláken a betonovou maticí nemohl být převeden na binárn, prahování bylo nastaveno manuálně pro každou plochu rovingů v řezu. Bylo proměřeno 100 příčných řezů, kde byly sledovány následující charakteristiky: plocha rovingů S_{VL} [mm²] a minimální průmět plochy příčného řezu D_{MIN} [mm]. Následný export dat byl proveden v softwaru NIS Elements.

Tabulka 2.7: Naměřené hodnoty ploch příčných řezů rovingů u zkušebních těles s orientovanou výztuží

	Plocha S_{VL} [mm ²]	Min. průmět D_{MIN} [mm]
průměr	0,322	0,567
Směr.odch.	0,073	0,096
Var.koef. [%]	22,7	17,0
IS 95%	< 0,307; 0,336 >	< 0,54; 0,58 >



Obr. 2.8: Snímek rovingu v betonu z obrazové analýzy

2.3.3 Postup zkoušky 4 bodovým ohybem a naměřená data

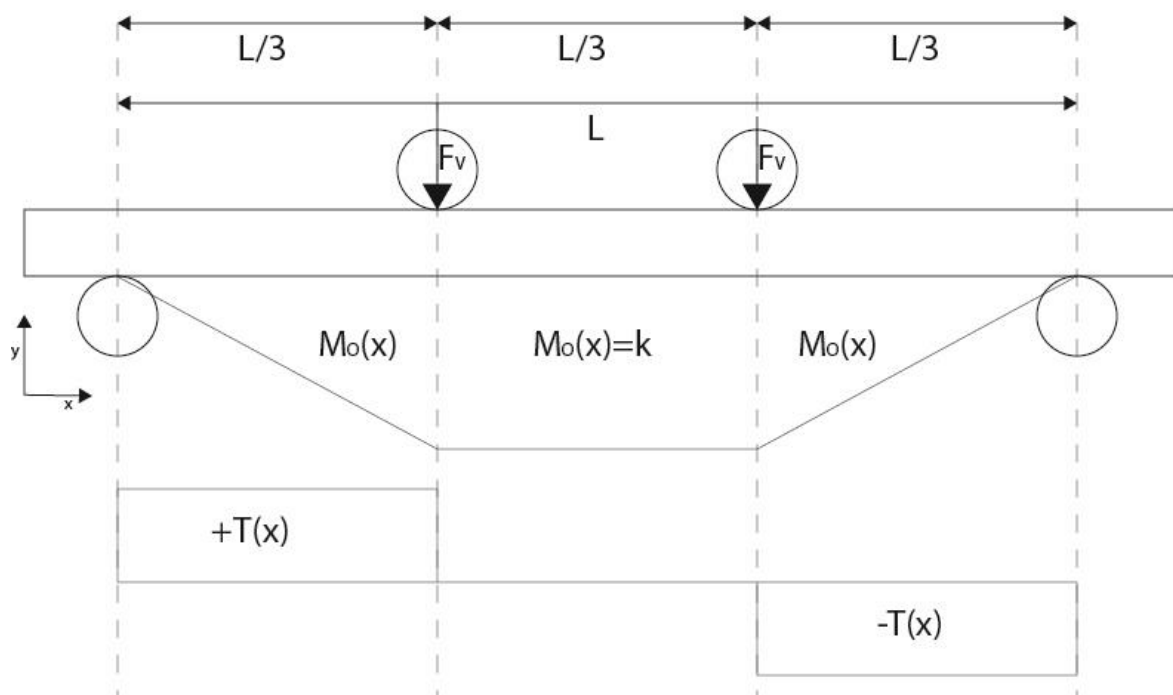
Všechny zkušební tělesa byly podrobeny zkoušce 4 ohybem. Zkouška 4 bodovým ohybem byla zvolena pro lepší stanovení modulu pružnosti, protože v úseku mezi posuvnými válci vyvolávající sílu působí pouze ohybový moment, který je v daném úseku maximální a konstantní, těleso je namáháno prostým ohybem. Krajní úseky jsou namáhány smykovou silou v kombinaci s ohybovým momentem. V porovnání s 3 bodovým uložením je 4 bodová zkouška vhodnější pro stanovení modulu pružnosti, protože lze snadno určit, zda bylo zkušební těleso porušeno při maximálním ohybovém momentu, tj. k porušení dochází mezi dvojicí středních posuvných válců. Při 3 bodovém uložení je síla resp. maximální ohybový moment koncentrován do jednoho bodu, kdy je vyšší pravděpodobnost porušení vzorku v jiném místě, než v tom, které je právě v místě maximálního ohybového momentu. U tak variabilního materiálu jako je vláknobeton, kde téměř každý myšlený řez má jinou koncentraci vláken, je tato zkouška nevhodná, pravděpodobnost slabého průřezu je vysoká.

Geometrii zatěžování upravuje norma ČSN P 732450 pro vláknobetonu, která vychází z normy ČSN EN 12390 zkoušení ztvrdlého betonu. Zkouška nebyla provedena dle stanovených rozměrů normy, rozměry zkušební tělesa a způsob zatěžování byly upraveny možnostem laboratoře

Geometrie zkoušky byla určena podmínkami laboratoře:

-rozpětí podpěrných válců L 300 mm

-rozpětí posuvných válců $L/3$



Obr. 2.9: Geometrie zatěžování a průběh ohybového momentu a posuvné síly

Zkouška byla provedena na zkušební zařízení TIRA test 2300, které bylo upraveno podmínkám pro čtyřbodový ohyb. Zkušební tělesa byla uložena na podpěrné válce s přečnívajícími konci na každé straně o 250 mm. Následně byly nastaveny čelisti tak aby posuvné válce doléhaly na zkušební těleso. Poté mohla být spuštěna zkouška. Konstantní rychlost posuvu čelistí s posuvnými válci byla nastavena na 0,15 mm/min. Zkouška byla ukončena zlomením zkušebního tělesa, nebo dosažením dráhy čelistí 6 mm.



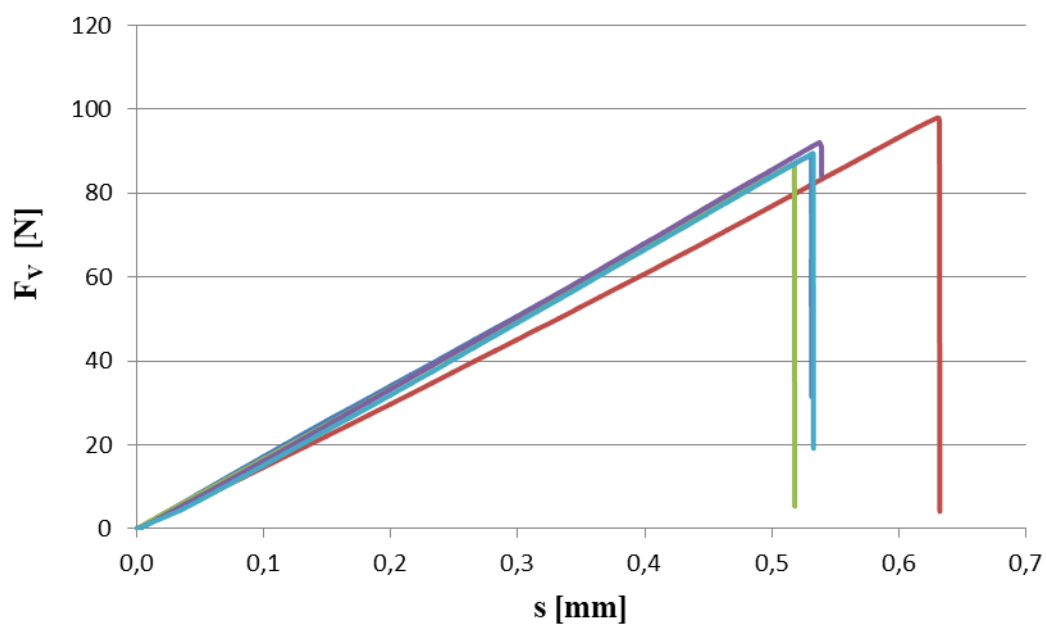
Obr. 2.10: Průběh zatěžování

Naměřená data

Z ohybových zkoušek byla zaznamenána data síly vyvíjející posuvné rameno F_{NAM} [N] a posuvu čelistí s [mm]. Symbol s_l [mm] odpovídá hodnotě dráhy posuvného ramena při síle F_{VI} . V tabulkách níže je uvedena síla F_{VI} [N], což je maximální hodnota síly vyvíjející válec umístěn na posuvném rameni do poklesu síly, tedy $F_V = F_{NAM}/2$.

Tabulka 2.8: Naměřená data pro prostý beton R0

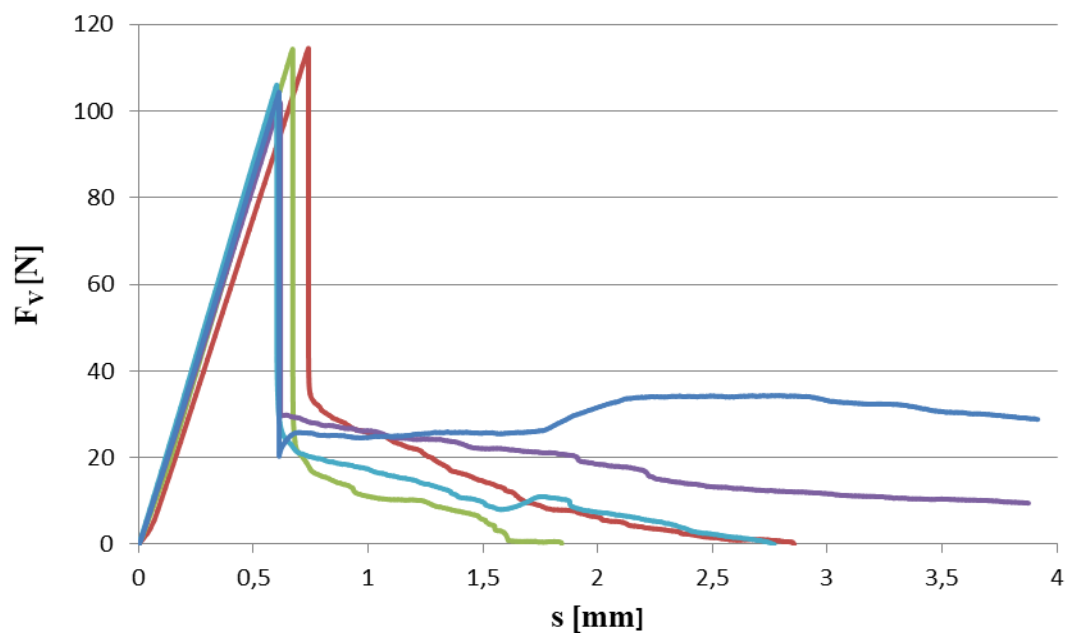
R0	1	2	3	4	5
$F_{VI,R0}$ [N]	97,93	86,86	92,07	89,5	88,89
$s_{l,R0}$ [mm]	0,63	0,52	0,54	0,53	0,53



Obr. 2.11: Průběh ohybových zkoušek zkušebních těles z prostého betonu R0

Tabulka 2.9: Naměřená data zkušebních těles s orientovanou výztuží ze 7 rovingů *R7*

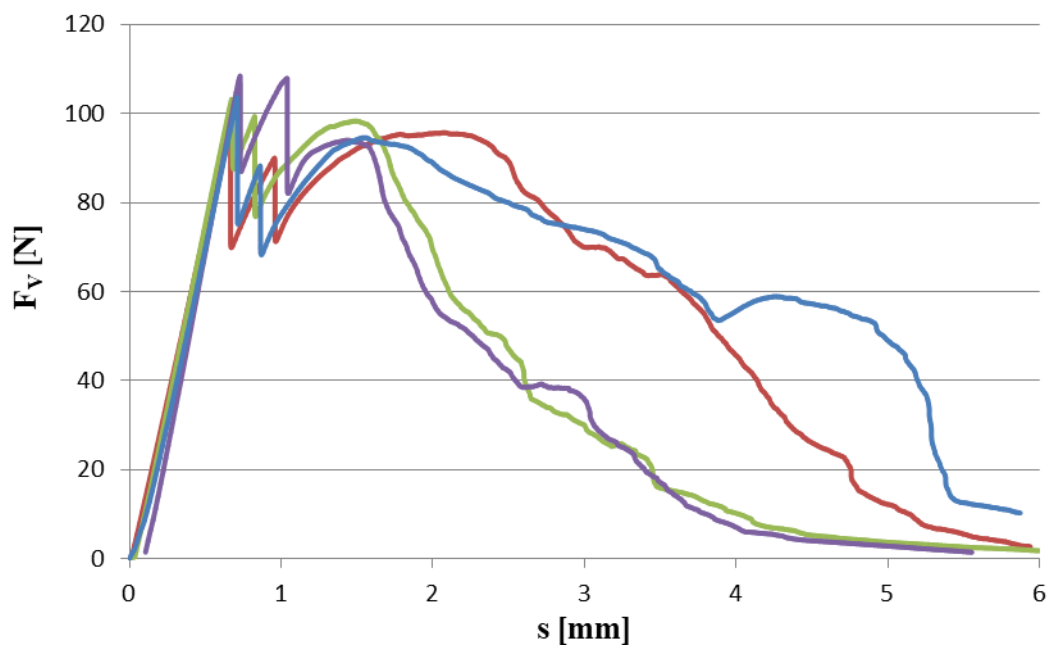
R7	1	2	3	4	5
$F_{V1,R7}$ [N]	114,49	114,29	101,97	106,01	104,35
$s_{1,R7}$ [mm]	0,74	0,67	0,62	0,6	0,61



Obr. 2.12: Průběh ohybových zkoušek zkušebních těles *R7*

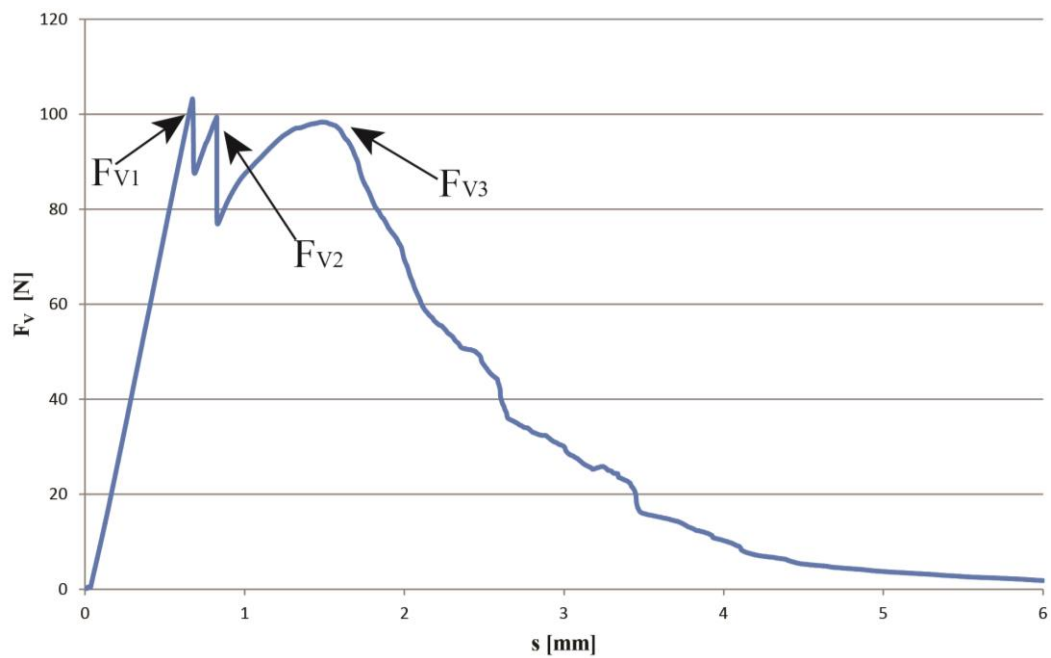
Tabulka 2.10: Naměřená data zkušebních těles s orientovanou výztuží z 15 rovingů R15

R15	1	2	3	4
$F_{V1,R15}$ [N]	97,02	103,22	106,99	103,68
$F_{V2, R15}$ [N]	90,06	98,22	106,46	88,3
$F_{V3, ,R15}$ [N]	95,71	97,14	92,54	94,6
$s_{1,R15}$ [mm]	0,652	0,673	0,628	0,714
$s_{2,R15}$ [mm]	0,958	0,835	0,935	0,867
$s_{3,R15}$ [mm]	2,064	1,482	1,343	1,543



Obr. 2.13: Průběh ohybových zkoušek zkušebních těles R15

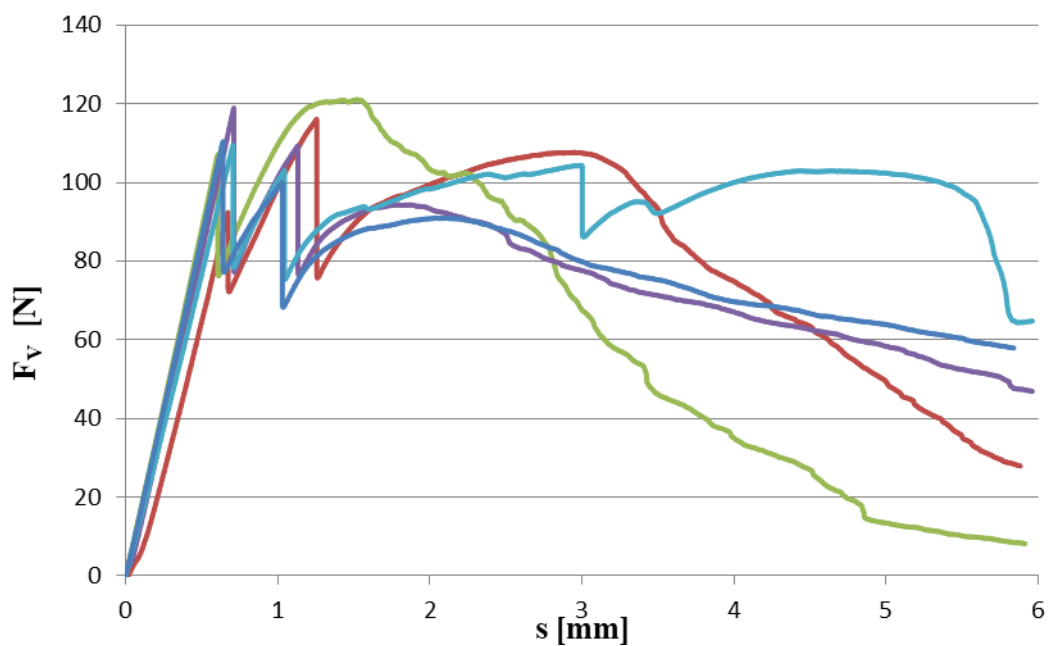
Kde F_{V1} [N] značí maximální sílu dosaženou před poklesem síly, F_{V2} [N] maximální síla před poklesem síly, F_{V3} [N] maximální síla před poklesem síly. s_1 [mm] dráha čelistí při F_{V1} [N], s_2 [mm] dráha čelistí při F_{V2} [N], s_3 [mm] dráha čelistí při F_{V3} [N].



Obr. 2.14: Označení sil F_{V1} , F_{V2} , F_{V3}

Tabulka 2.11: Naměřená data zkušebních těles s orientovanou výztuží z 19 rovingů *R19*

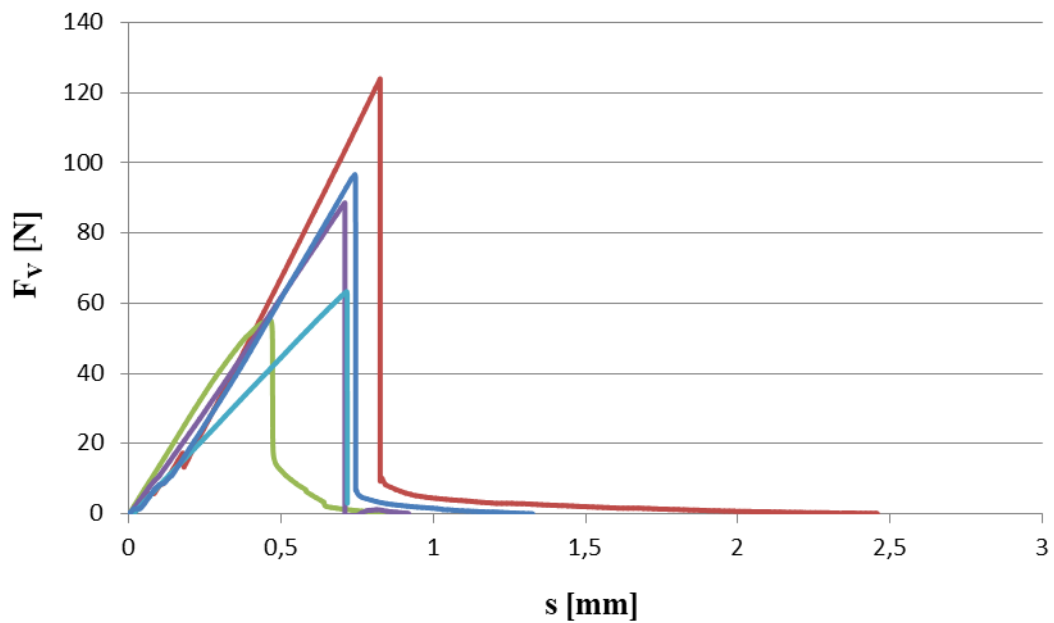
R19	1	2	3	4	5
$F_{V1,R19}$ [N]	92,45	106,99	119,01	109,57	110,45
$F_{V2, R19}$ [N]	116,15	121,02	109,41	103,07	99,86
$F_{V3, ,R19}$ [N]	107,6	-	94,32	104,31	90,64
$s_{1,R19}$ [mm]	0,672	0,604	0,711	0,705806	0,639
$s_{2,R19}$ [mm]	1,255	1,427	1,132	1,044399	1,029
$s_{3,R19}$ [mm]	2,905	-	1,883	2,959	2,211



Obr. 2.15: Průběh ohybových zkoušek zkušebních těles sady *R19*

Tabulka 2.12: Naměřená data zkušebních těles s neorientovanou výztuží s 0,815 %
hmotnostním podílem vláken *NI*

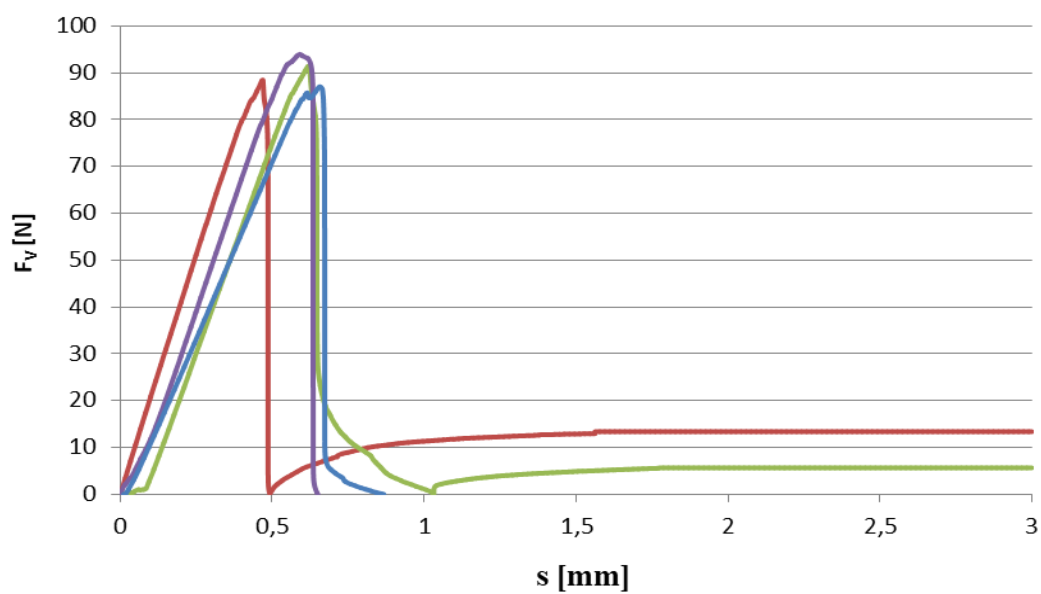
N1	1	2	3	4	5
$F_{V1,NI}$ [N]	123,99	55,29	89,54	63,3	97,71
$s_{1,NI}$ [mm]	0,825	0,461	0,767	0,715	0,853



Obr. 2.16: Průběh ohybových zkoušek zkušebních těles sady *NI*

Tabulka 2.13: Naměřená data zkušebních těles s neorientovanou výztuží s 1,63 %
hmotnostním podílem vláken N2

N2	1	2	3	4
$F_{V1,N2}$ [N]	88,49	91,47	103,98	93,13
$s_{1,N2}$ [mm]	0,469	0,619	0,928	0,748



Obr. 2.17: Průběh ohybových zkoušek zkušebních těles sady N2

2.4 Spočtené hodnoty

Pro každou sadu byly spočteny mechanické vlastnosti:

- modul pružnosti v tahu
- ohybové napětí
- deformační práce

2.4.1 Moment setrvačnosti

Pro sadu vzorků $N1$, $N2$ bylo možné předpokládat homogenní průřez, tudíž průřezové charakteristiky bylo možné počítat jako pro obdélníkový homogenní průřez. Sada vzorků prostého betonu $R0$ byla taktéž počítána jako obdélníkový průřez s rozdílem, že se homogenita nemusela pouze předpokládat.

Pro sadu vzorků s orientovanou výztuží $R7$, $R15$, $R19$ bylo zapotřebí průřez před výpočtem ohybového napětí homogenizovat. Před samotnou homogenizací průřezu jeho redukcí šířek, bylo zapotřebí stanovit:

- plochu rovingů v betonu a výšku vrstvy τ_2
- modul pružnosti čedičových rovingů
- odhad modulu pružnosti vrstvy obsahující vlákna

Průřez byl nejprve rozdělen na 3 oblasti číslováno od tlačené horní vrstvy τ_1 , τ_2 , τ_3 . Vrstva τ_2 tedy obsahuje jako jediná vlákna

Plocha rovingů a výška vrstvy τ_2 byla stanovena obrazovou analýzou (kapitola 2.3.2)

Modul pružnosti čedičových rovingů byl stanoven na základě tahové zkoušky (kapitola 2.3.1)

Do vztahu na redukci šířek průřezu vstupují tahové moduly jednotlivých vrstev, proto bylo nezbytné určit odhad modulu pružnosti vrstvy s vlákny. Odhad modulu pružnosti E_O [MPa] vrstvy τ_2 byl určen na základě Voightova modelu (4) za předpokladu stejných deformací výztuže a matrice.

Tabulka 2.14: Objemové podíly vláken a betonu dílčích sad

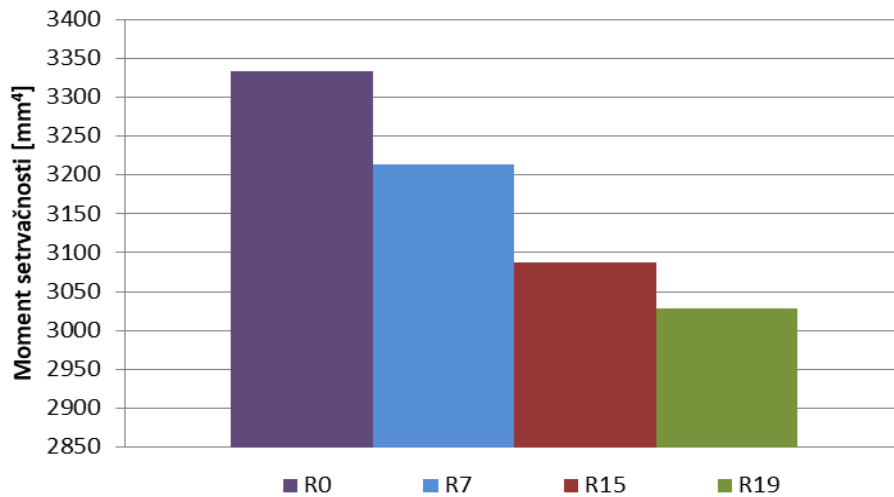
	V_{Pvl}	V_{PB}
R7	0,1	0,9
R15	0,22	0,78
R19	0,27	0,73

Z vypočtených objemových podílů vláken V_{Pvl} [-] a objemových podílů betonu V_{PB} [-] ve vrstvě τ_2 a změřených modulů pružnosti betonu E_{R0} [MPa] a modulu pružnosti vláken E_{vl} [MPa], byl odhadnut modul pružnosti vrstvy τ_2 E_O [MPa]. Šířky vrstev τ_1 , τ_3 byly redukovány poměrem E_{R0}/E_{vl} . Po redukci byl moment setrvačnosti redukovaného ekvivalentního průřezu I_E [mm⁴] počítán jako moment setrvačnosti složeného průřezu. Hodnoty jednotlivých momentů setrvačnosti pro sady R7, R15, R19 jsou momenty setrvačnosti ekvivalentních průřezů I_E [mm⁴], moment setrvačnosti sady R0 je pro homogenní betonový materiál. Na obr. 2.18 je vidět snižující se trend hodnot I_E [mm⁴] se zvyšujícím se počtem rovingů.

Jelikož po redukci došlo ke změně šířek průřezu, došlo k posunu těžiště a tedy i neutrální osy, posun byl však zanedbatelně malý.

Tabulka 2.15: I_E [mm⁴] dílčích sad a posunutí těžiště

	I_E [mm ⁴]	Posunutí těžiště [%]
R7	3213,7	0,087
R15	3087,3	0,185
R19	3027,9	0,235



Obr. 2.18: Hodnoty ekvivalentních modulů pružnosti pro sady *R7*, *R15*, *R19* a moment setrvačnosti prostého betonu *R0*

2.4.2 Napětí

Pro sady vzorků *N1*, *N2*, *R0* bylo maximální tahové napětí za ohybu při čtyřbodovém uložení počítáno dle vztahu (13) s momentem setrvačnosti pro obdélníkový průřez.

Pro sady vzorků *R7*, *R15*, *R19* bylo maximální napětí za ohybu σ_{OMAX} počítáno s příslušnými ekvivalentními průřezy I_{ER7} [mm⁴], I_{ER15} [mm⁴], I_{ER19} [mm⁴] dle (11). Napětí bylo počítáno do spolupůsobení výztuže s matricí, tedy do bodu spolupracujícího celého průřezu, resp. do dosažení síly F_{VI} [N].

Tabulka 2.16: Maximální napětí za ohybu při síle F_{VI} dílčích sad zkušebních těles

σ_{OMAX} [MPa]	Průměr [MPa]	Sm. Odch. [MPa]	Var. koef. [%]	IS 95%
R0	13,66	0,57	4,2	<13,15; 14,23>
R7	16,84	0,81	4,8	<16,12; 17,64>
R15	16,64	0,58	3,5	<16,06; 17,22>
R19	17,78	1,42	8,1	<16,53; 19,2>
N1	13,75	3,68	26,8	<10,13; 17,42>
N2	14,14	0,88	6,2	<13,28; 15,01>

Kde IS 95% je 95%-ní interval spolehlivosti průměrné hodnoty.

2.4.3 Modul pružnosti

Modul pružnosti v tahu E_T [MPa] byl vypočítán podle diferenciální rovnice průhybové čáry (26). Ve vzorci vystupuje modul pružnosti v tahu po úpravě:

$$E_T = \frac{F_V C_I}{w I} \quad (32)$$

Kde w [mm] průhyb, I [mm⁴] moment setrvačnosti a C_I hodnota integračních konstant. Lineární částí grafu závislosti F_V [N] a s [mm] byla proložena přímka s předpisem:

$$y = kx + q \quad (33)$$

Při vyjádření směrnice k a zanedbání koeficientu q , protože záleží pouze na k :

$$k = \frac{y}{x} \quad (34)$$

Jelikož dráha s [mm] je rovna průhybu w [mm] v místě $L/3$ tak:

$$k = \frac{y}{x} = \frac{F_V}{w} \quad (35)$$

$$E_T = k \frac{C_I}{I} \quad (36)$$

Výsledky měření uvedeny v tabulce. Pro zkušební tělesa sad *R7*, *R15*, *R19* byl modul pružnosti počítán s příslušnými momenty setrvačnosti ekvivalentních průřezů I_{ER7} [mm⁴], I_{ER15} [mm⁴], I_{ER19} [mm⁴].

Tabulka 2.17: Průměrné hodnoty modulů pružnosti v tahu

E_T [MPa]	Průměr [MPa]	Sm. Odch. [MPa]	Var. koef. [%]	IS 95%
$E_{P,R0}$	41818,5	1520,96	3,6	<40485,3; 43339,5>
$E_{P,R7}$	43375,5	1577,59	3,6	<41992,7; 44953,1>
$E_{P,R15}$	43599,8	2630,85	6,1	<41021,6; 46230,7>
$E_{P,R19}$	46087,1	2468,2	5,4	<43923,7; 48555,3>
$E_{P,N1}$	36165,6	4216,6	11,7	<32033,5; 40382,2>
$E_{P,N2}$	44525,6	4737,4	10,6	<39883,1; 49263,0>

Kde E_P [MPa] je průměrná hodnota modulu pružnosti, příslušné indexy označují, pro kterou sadu zkušebních těles byly počítány.

2.4.4 Deformační práce

Deformační práce je jedna z mála charakteristik, kterými lze objektivně zachytit chování vláknobetonu po vzniku trhliny. Deformační práce W_{Def} [$J \cdot 10^{-3}$] byla v práci spočtena jako plocha pod křivkou grafu závislosti F_V [N] a posuvu čelistí s [mm]. Výpočet obsahu pod křivkou byl proveden numerickou integrací podle lichoběžníkového pravidla:

$$W_{Def} = \int_0^s F ds \approx \sum_i^n \frac{s_{i+1} - s_i}{2} (F_{Vi} + F_{Vi+1}) \quad (37)$$

Deformační práce byla vypočtena do zlomení zkušebního tělesa, nebo do dosažení dráhy čelistí 6 mm.

Tabulka 2.18: Deformační práce

W_{DEF} [$J \cdot 10^{-3}$]	Průměr [$J \cdot 10^{-3}$]	Sm. Odch. [$J \cdot 10^{-3}$]	Var. koef. [%]	IS 95%
$W_{DEF,R0}$	25,04	2,84	11,4	<22,54; 27,53>
$W_{DEF,R7}$	76,79	29,87	38,9	<50,62; 102,97>
$W_{DEF,R15}$	374,81	180,20	48,1	<198,22; 551,40>
$W_{DEF,R19}$	434,09	46,10	10,6	<393,63; 474,54>
$W_{DEF,N1}$	33,7	11,12	32,9	<22,80; 44,59>
$W_{DEF,N2}$	46,67	4,68	10,0	<42,08; 51,25>

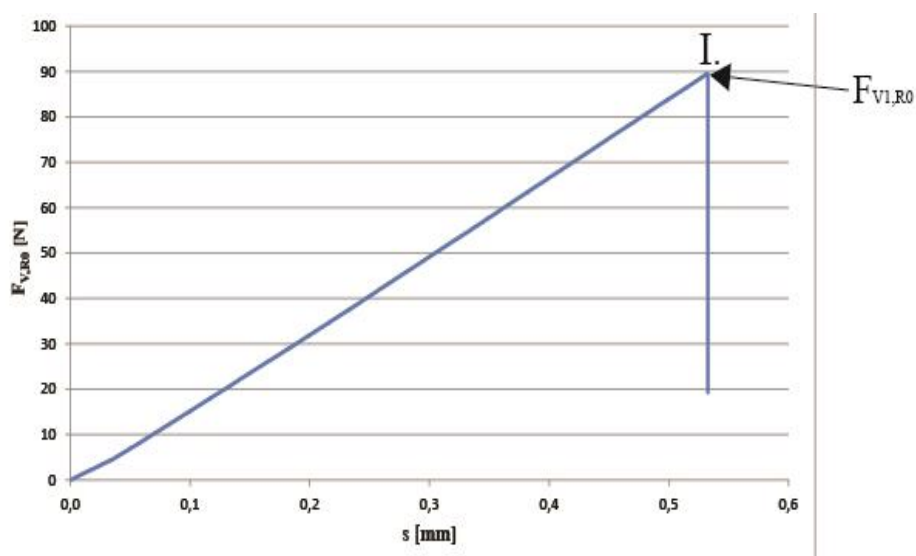
3 Diskuze k výsledkům

3.1.1 Rozbor grafu

Rozbory grafů byly provedeny ze závislosti F_V [N] a s [mm].

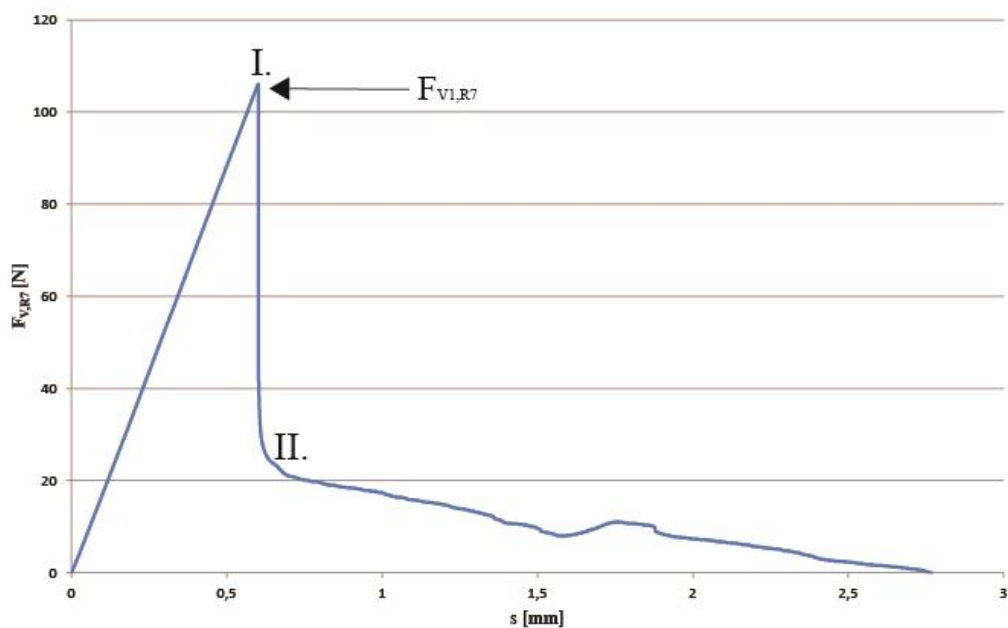
Průběh sady R0

Průběh zatěžování je do I. bodu lineární se spolupůsobením celého průřezu. Beton je materiálem s vysokým modulem pružnosti jedná se tedy o křehký materiál, kdy dosažením meze pevnosti dochází ke křehkému lomu (I. bod, při síle $F_{VI,R0}$ [N]). Při síle $F_{VI,R0}$ [N] dochází k vzniku trhliny v tažené části průřezu s jejím nekontrolovatelným a především rychlým šířením směrem k neutrální ose až k tlačené části průřezu. Dochází k okamžitému lomu zkušebního tělesa.



Obr. 3.1: Průběh zatěžování zkušebního tělesa sady z prostého betonu sady R0

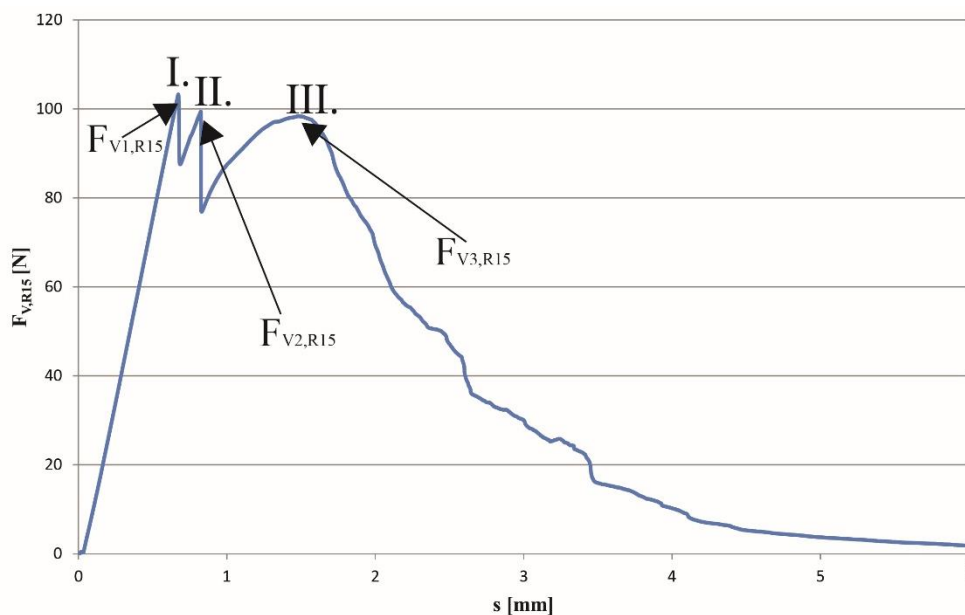
Charakteristický průběh sady R7



Obr. 3.2: Průběh zatěžování zkušebního tělesa sady R7

Stejně jako v předchozím případě u sady R0 jde zpočátku o lineární průběh zatěžování se spolupůsobením celého průřezu, které je ukončeno vznikem trhliny při síle $F_{VI,R7}$ [N] při které dochází k lomu matrice, trhlina se však vlivem vláken nerozšířila po celé výšce zkušebního tělesa a nedošlo ke křehkému lomu celého tělesa. Šíření trhliny bylo zastaveno ve výšce za vyztužujícími vlákny, II. bod. Následně zkušební trámec dokázal dále přenášet určitou míru zatížení i při relativně velkém přetvoření. Za II. bodem dochází již k přenášení síly v tažené části průřezu pouze vlákny.

Charakteristický průběh sady R15



Obr. 3.3: Průběh zatěžování zkušebního tělesa sady R15

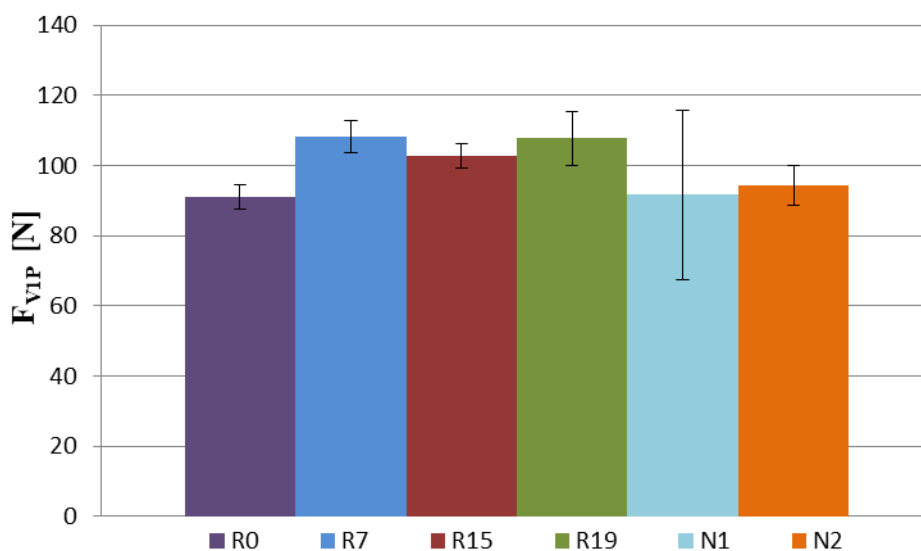
Počátek grafu do I. bodu je stejný jako v případech R0, R7. V I. bodě při síle $F_{V1,R15}$ [N] dochází ke vzniku trhliny pouze v tažené podstavě zkušebního tělesa, trhlina se vlivem vyššího počtu vláken oproti sadě R7 nerozšířila po stěnách zkušebních trámce. Vznik trhliny je doprovázen poklesem síly. Pokles síly je následován opětovným nárůstem, kdy se začínají namáhat vlákna. II. bod je charakterizován rozšířením trhliny po stěnách zkušebního trámce směrem k neutrální ose, trhlina je zastavena v místě vláken. Mezi II. a III. bodem dochází k postupnému rozevírání a rozšiřování trhliny po stěnách směrem k tlačené části tělesa. V oblasti mezi II. a III. již dochází k přenášení síly v tažené části průřezu pouze vlákny. V bodě III. dochází k postupnému trhání vláken doprovázeného pozvolným poklesem síly.

Vliv vyššího počtu vláken u zkušebních těles sady R15 ve srovnání s R7 je patrný postupnější destrukcí. První trhlina u R15 vzniká pouze v podstavě, první trhlina u R7 byla rozšířena až za vyztužující vlákna do tohoto stádia se R15 dostává až za III. bodem s rozdílem schopnosti přenášet vyšší zátěž, což je zapříčiněno právě postupnější destrukcí, resp. rozšiřování trhliny ve třech fázích kdy na vlákna působila menší rázová síla.

Průběh grafu zkušebních těles sady *R19* byl podobný jako sady *R15*. Průběh sad *N1*, *N2* byl podobný jako u *R7*.

3.1.2 Pevnost

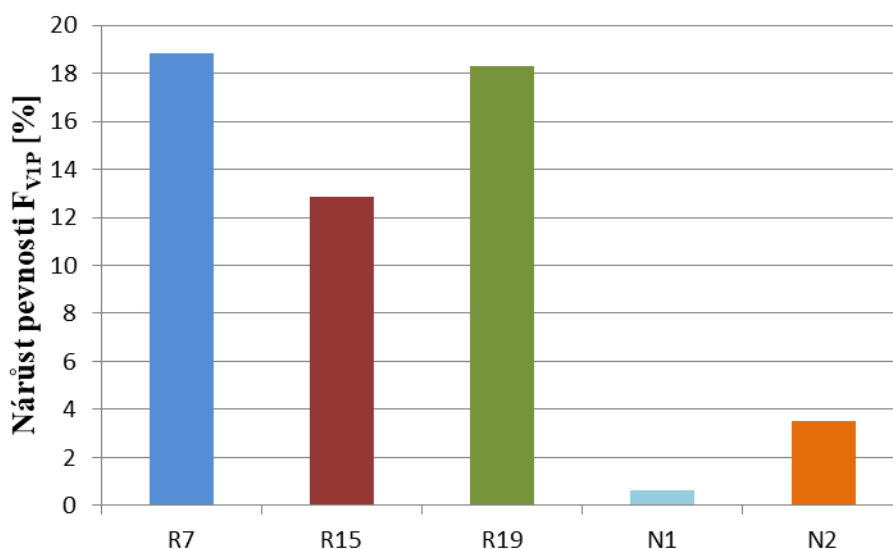
Přidáním vláken ve všech formách použitých v práci zamezily křehkému lomu, který bývá nebezpečnou vlastností betonu, kdy už při relativně malém přetvoření dochází k rychlému šíření trhliny. Na obr. 3.4 je vidět porovnání průměrné maximální síly F_{VIP} [N] sad vzorků do vzniku první trhliny, tedy do poklesu síly. (dále v textu bude uváděna pevnost ve smyslu síla do vzniku první trhliny, tedy do F_{VI} , [N] resp. napětí do vzniku první trhliny).



Obr. 3.4: Průměrné hodnoty F_{VIP} s vyznačenými 95% IS

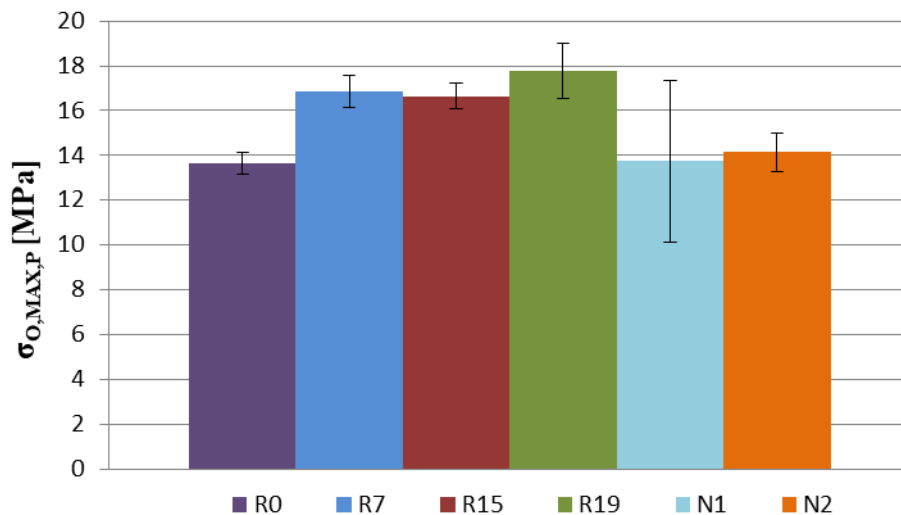
U sad vzorků s orientovanou výztuží *R7*, *R15*, *R19* je patrný nárůst průměrných hodnot pevností F_{VIP} [N] s porovnáním s prostým betonem (*R0*). Naopak zde není patrná korelace mezi vyšším počtem rovingů a nárůstem průměrné pevnosti F_{VIP} [N]. Nižší průměrná pevnost u sady *R15* je zapříčiněna pravděpodobně vyšším oslabením průřezu betonu přítomností rovingů a zároveň jejich nedostatečný počet nedokázal ztrátu pevnosti betonové průřezu nahradit. Dále zde došlo pravděpodobně k prokluzům vláken vlivem nedostatečného přilnutí vláken k betonu. Při srovnání procentuálního nárůstu F_{VIP} [N] zkušebních těles s orientovanou a neorientovanou výztuží oproti prostému betonu je patrný pozitivní vliv orientované výztuže. Zkušební tělesa s neorientovanou výztuží *N1* při

stejném hmotnostním podílu jako zkušební tělesa sady *R15* zdaleka nedosahovaly takového procentuální nárůstu průměrných pevností oproti prostému betonu. Neorientovaná výztuž se vyznačuje velikou variabilitou, což pro praktické účely není vhodné, naopak sada *R19* variabilitou menší, což přináší vyšší spolehlivost. Ani přidání dvojnásobku vláken u sady *N2* nevedlo ke srovnatelné pevnosti vzorků s orientovanou výztuží *R19*. U některých zkušebních těles s rozptýlenou výztuží (*N1*, *N2*) došlo k poklesu pevnosti vlivem nedostatečného využití pevnosti vláken vlivem jejich délky a orientace a vlákna kritickou část průřezu spíše oslabila.



Obr. 3.5: Procentuální nárůst F_{VIP} oproti prostému betonu

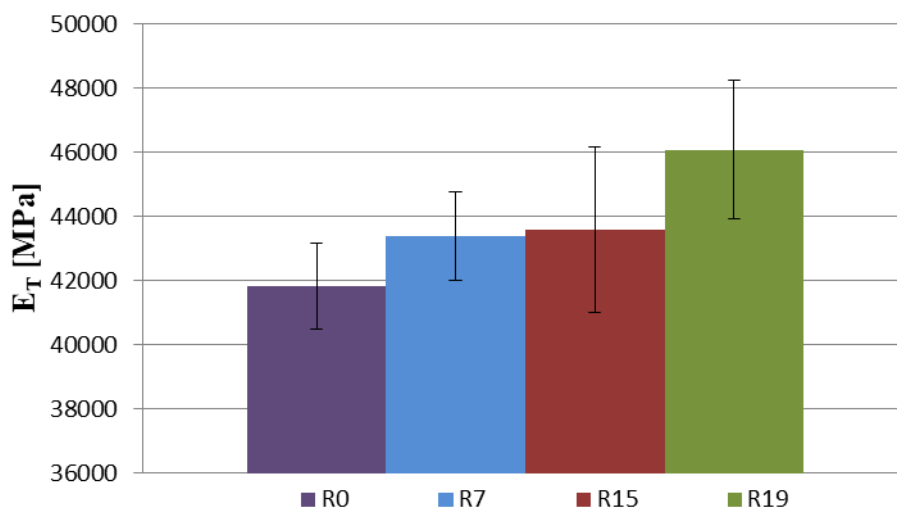
U vzorků vyztužených neorientovanými vlákny *N1*, *N2* je patrná velká variabilita kolem střední hodnoty, která klesá s vyšším počtem vláken. Je patrný mírný nárůst pevnosti při použití dvojnásobku hmotnostního podílu vláken. U některých vzorků s neorientovanou výztuží sad *N1*, *N2* dokonce dochází k poklesu pevnosti ve srovnání s prostým betonem.



Obr. 3.6: Průměrné hodnoty $\sigma_{O,MAX}$ s vyznačenými 95% IS

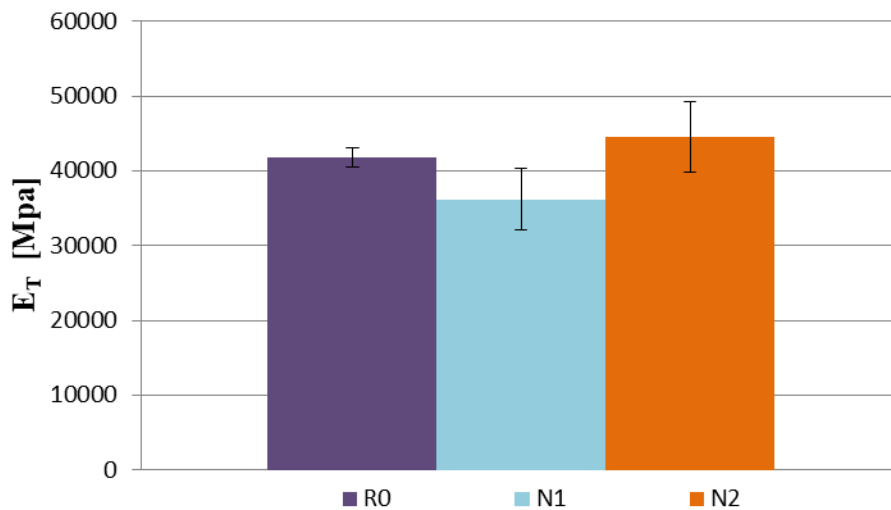
Při srovnání hodnot F_{VIP} [N] a průměrného maximálního ohybového napětí $\sigma_{O,MAX,P}$ [MPa] jsou výsledky podobné - zvýšení pevnosti do vzniku trhliny u orientované výztuže, podobná průměrná pevnost výztuže neorientované doprovázena vysokou variabilitou. Také zde u neorientované výztuže může dojít v krajních případech k poklesu pevnosti oproti prostému betonu. Zkušební tělesa sady *R15* dosahovala nižší průměrné pevnosti ve srovnání se zkušebními tělesy sad *R7*, *R19*, pravděpodobně z důvodu nesprávného poměru mezi počtem rovingů a betonem, kdy nedostatečný počet rovingů nedokázal kompenzovat napětí v oslabené části průřezu a vlivem prokluzů vláken v betonu.

3.1.3 Modul pružnosti v tahu



Obr. 3.7: Průměrné hodnoty E_T zkušebních těles s orientovanou výztuží s vyznačenými 95% IS

Při pohledu na vývoj modulu pružnosti jednotlivých sad s orientovanou výztuží *R7*, *R15*, *R19* je patrný rostoucí trend průměrných hodnot modulu pružnosti v tahu s vyšším počtem vyztužujících rovingů. Všechny sady s orientovanou výztuží dosahovaly vyšších průměrných hodnot než prostý beton. Obecně ale růst není průkazný pro sady *R7*, *R15* kvůli variabilitě výsledků, zvýšení modulu pružnosti ve srovnání s prostým betonem lze objektivně potvrdit u sady *R19*.

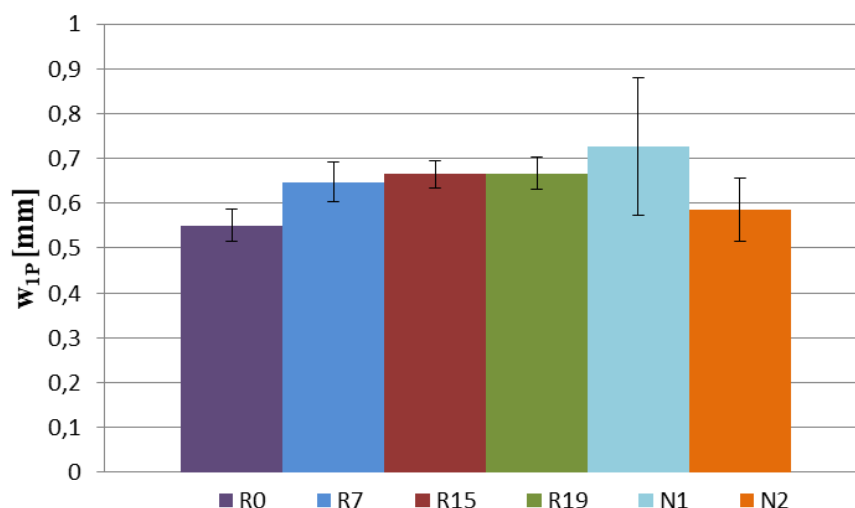


Obr. 3.8: Průměrné hodnoty E_T zkušebních těles s neorientovanou výztuží s vyznačenými 95% IS

Hodnoty průměrných modulů pružnosti vyznačených na obr. 2.26 zkušebních těles s neorientovanou výztuží ve srovnání s prostým betonem *R0* nesledují vzrůstající trend jako je tomu u sad zkušebních těles s orientovanou výztuží. Sada *N1* dosáhla poklesu průměrné hodnoty modulu pružnosti v tahu E_T [MPa], což pravděpodobně zapříčinila příliš nízká koncentrace vláken v kritickém průřezu, kdy nedostatečný počet vláken nedokázal vykompenzovat napětí. Vlákná matici tedy spíše kompozit oslabila, než vyztužila.

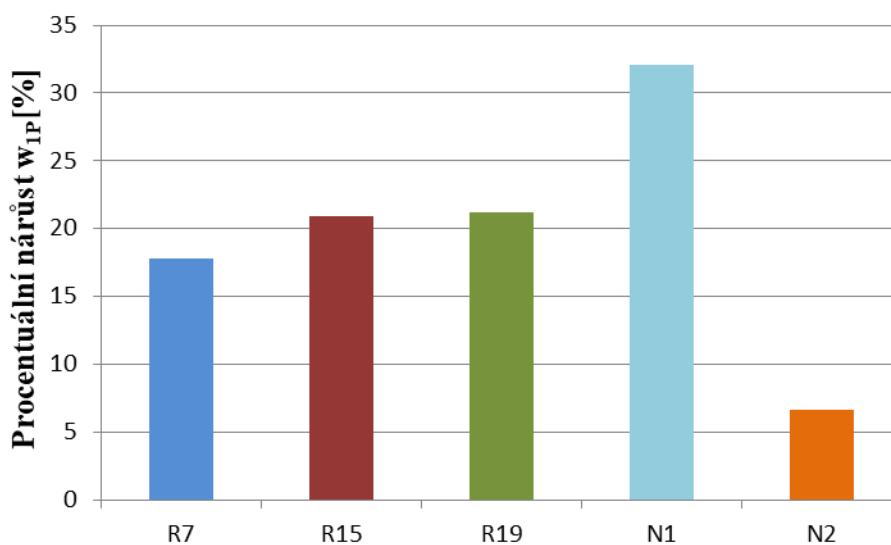
3.1.4 Průhyb

Průhyb byl naměřen v místě pod posuvnými válci, tedy ve vzdálenosti $L/3$, v místě $L/3$ se dráha čelistí s [mm] rovná průhybu w [mm]. Průhyb při síle F_{V1} [N] je označen w_1 [mm], analogicky pro síly F_{V2} [N], F_{V3} [N]. Průměrná hodnota je označena indexem „*P*“ tedy w_P .



Obr. 3.9: Průměrné hodnoty průhybu w_{IP} s vyznačenými 95% IS

Z obr. 3.9 je patrný nárůst schopnosti snést větší průhyb do dosažení síly F_{VI} [N] s vyšším počtem rovingů u orientované výztuže rostla schopnost vydržet vyšší průhyb. Vysoký průměrný průhyb w_{IP} [mm] u sady *N1* je zapříčiněn velkým rozptylem dat, korelace mezi vyšším hmotnostním podílem vláken a vyšším w_{IP} [mm] sad s neorientovanou výztuží nebyla zaznamenána. Srovnáním orientované a neorientované výztuže je patrný nárůst rozptylu dat, zkušební tělesa s orientovanou výztuží poskytují spolehlivější výsledky. Rozdíly w_{IP} [mm] s vyšším počtem rovingů u zkušebních těles s orientovanou výztuží však není statisticky významný.

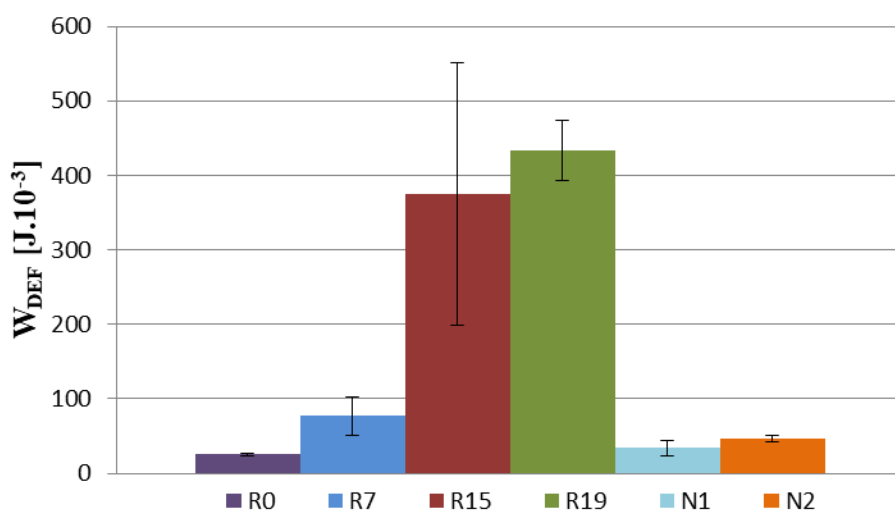


Obr. 3.10: Procentuální nárůst w_{IP} relativně k prostému betonu

Z obr. 3.10 je vidět procentuální nárůst w_{IP} [mm] relativně k betonu, lze tedy předpokládat, že přítomnost rovingů v betonu dokázala kompenzovat určité namáhání betonu a díky tomu kompozit dokázal snést vyšší průhyb do vzniku trhliny.

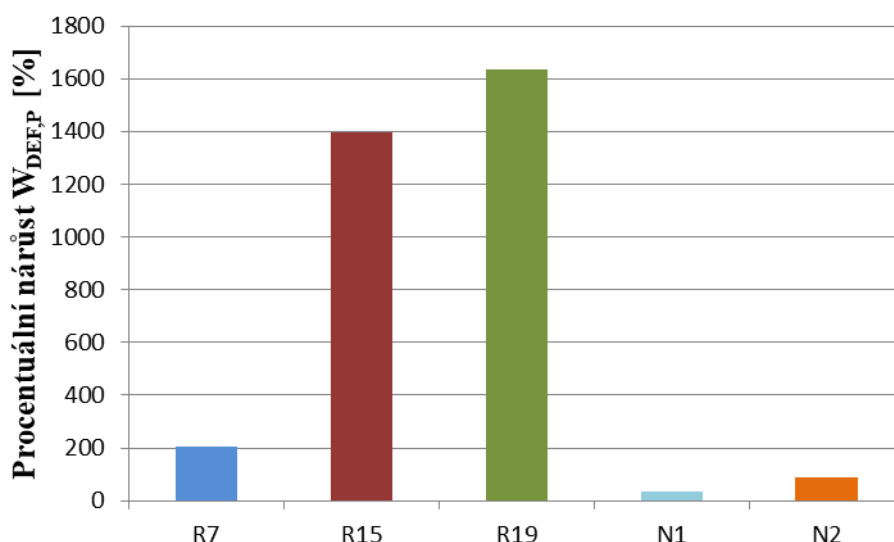
3.1.5 Deformační práce

Deformační práce je jedna z mála charakteristik, kterými lze popsat chování betonového kompozitu po vzniku trhliny. Z obr. 3.11 je patrný vzrůstající trend deformační práce s vyšším počtem vláken. S vyšší houževnatostí materiálu resp. mírou schopnosti přenášet namáhání po přetvoření se zvyšuje i potřebná práce ke zlomení zkušební tělesa.



Obr. 3.11: Hodnoty deformační práce W_{DEF}

Z obr. 3.12 je patrný nárůst W_{DEF} [J.10⁻³] po přidání vláken do betonu. Při srovnání hodnot sad s orientovanou výztuží a neorientovanou výztuží je vidět vliv orientace a délka vláken na W_{DEF} [J.10⁻³], zkušební tělesa s neorientovanou výztuží nedosahovaly shodných hodnot jako výztuž orientovaná. Je patrný vliv množství orientované výztuže na W_{DEF} [J.10⁻³] kdy s vyšším počtem orientovaných rovingů roste i průměrná hodnota $W_{DEF,P}$ [J.10⁻³]. U R15 je velký rozptyl hodnot z důvodu uvedeného v kapitole 3.1.2.



Obr. 3.12: Procentuální nárůst $W_{DEF,P}$ relativně k prostému betonu

3.1.6 Odhad modulu pružnosti v tahu

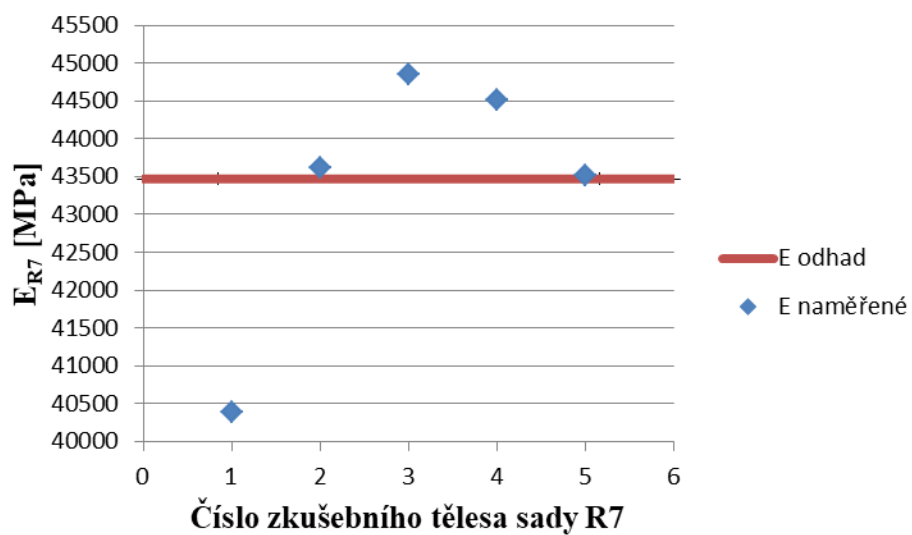
Naměřený modul pružnosti v tahu zkušebních trámců byl počítán za pomoci ekvivalentního průřezu, kdy při redukcí šířek získáváme redukovaný průřez s momentem setrvačnosti E_Z [MPa] (kap. 1.6.1), v práci byl E_Z [MPa] stanoven Voightovým modelem (kapitola 2.4.1), čímž byly získány pro každou sadu $R7$, $R15$, $R19$ odhady modulů pružnosti v tahu $E_{O,R7}$ [MPa], $E_{O,R15}$ [MPa], $E_{O,R19}$ [MPa]. Porovnáním průměrných hodnot modulů pružnosti v tahu příslušných sad $E_{P,R7}$ [MPa], $E_{P,R15}$ [MPa], $E_{P,R19}$ [MPa] z naměřených modulů pružnosti (kapitola 2.4.3) lze zjistit do jaké míry je odhad přesný. Rozdíl v tabulkách 3.2, 3.3, 3.4 byl počítán jako rozdíl naměřeného E [MPa] a odhadovaného E_O [MPa], vztaženo na naměřený E [MPa].

Tabulka 3.1: Odhadované a průměrné moduly pružnosti

Sada	Odhad E_O [MPa]	Průměr E_P [MPa]	Rozdíl [%]
R7	43471,39	43375,49	0,22
R15	45304,97	43599,8	3,76
R19	46221,76	46087,11	0,29

Tabulka 3.2: Procentuální rozdíly naměřených modulů pružnosti E_{R7} sady $R7$ ve srovnání s odhadem $E_{O,R15}$

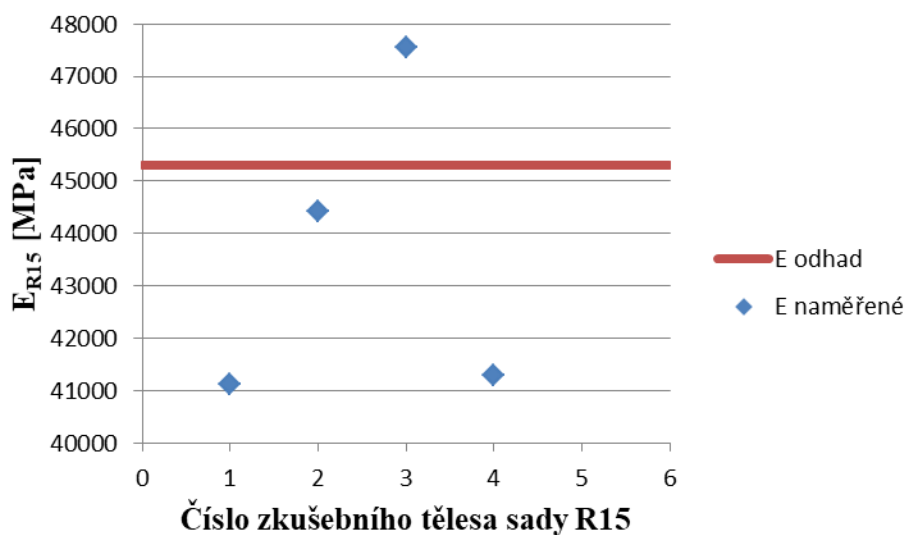
E_{R7} [MPa]	40389,81	43618,2	44844,73	44512,81	43511,89
Rozdíl [%]	7,63	0,34	3,06	2,34	0,09



Obr. 3.13: : Hodnoty modulů pružnosti E_{R7} sady $R7$ ve srovnání s odhadovaným $E_{O,R7}$

Tabulka 3.3: Procentuální rozdíly naměřených modulů pružnosti E_{R15} sady $R15$ ve srovnání s odhadem $E_{O,R15}$

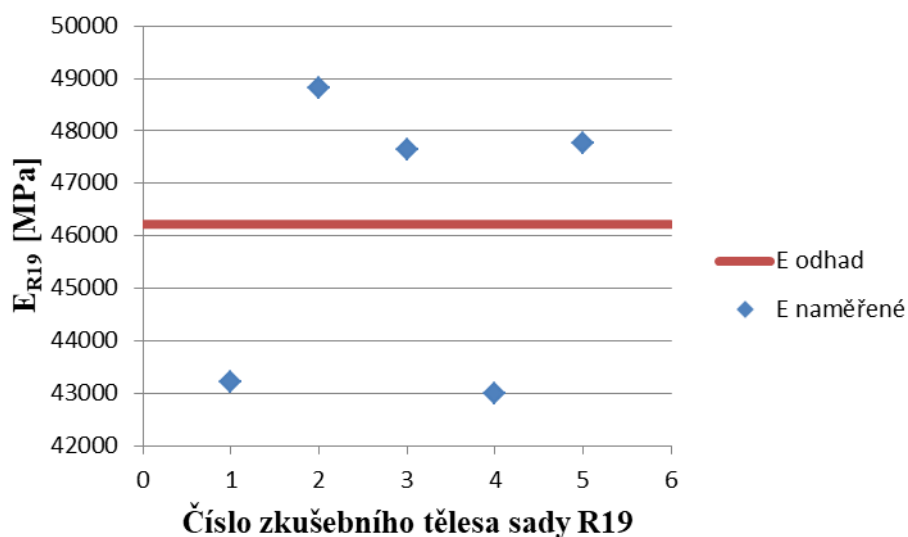
E_{R15} [MPa]	41130,69	44418,34	47552,13	41298,04	41130,69
Rozdíl [%]	10,15	1,99	4,73	9,7	10,15



Obr. 3.14: Hodnoty modulů pružnosti E_{R15} sady $R15$ ve srovnání s odhadovaným $E_{O,R15}$

Tabulka 3.4: Procentuální rozdíly naměřených modulů pružnosti E_{R19} sady $R19$ ve srovnání s odhadem $E_{O,R19}$

E_{R15} [MPa]	43214,93	48821,14	47640,45	43000,25	47758,79
Rozdíl [%]	6,96	5,32	2,98	7,49	3,22



Obr. 3.15: Hodnoty modulů pružnosti E_{R19} sady $R19$ ve srovnání s odhadovaným $E_{O,R19}$

Odhad modulu pružnosti dokázal spolehlivě vystihnout nárůst modulů pružnosti u zkušebních těles s orientovanou výztuží ve srovnání s prostým betonem ($E_{BETON}=41867$ MPa). S malým rozdílem byly odhadnuty průměrné hodnoty zkušebních sad $R7$, $R19$ $E_{P,R7}$ [MPa], $E_{P,R19}$ [MPa]. Průměrná hodnota modulu pružnosti sady $R15$ $E_{P,R15}$ [MPa] se od odhadu odlišuje více, což je pravděpodobně zapříčiněno prokluzem vláken, nedostatečným přilnutím matrice ke vláknům a nevhodným poměrem počtu vláken a množstvím betonu. Při pohledu na konkrétní jednotlivá měření již odhad nedosahuje tak malé chybovosti, je to zapříčiněno rozptylem naměřených hodnot kolem odhadu, hodnoty nabývají vyšších i menších hodnot. Výsledná průměrná hodnota se tedy přibližuje odhadu více, resp. chyba se zmenšuje, model tedy odhaduje průměrnou hodnotu modulu pružnosti. U modelu je nutné předpokládat stejné deformace matrice i výztuže, jde však o zjednodušující předpoklad, v matrici dochází k prokluzům vláken, což odhad vzdaluje od reality. Do odhadu též vstupují nepřesnosti při stanovení základních mechanických vlastností vstupních hodnot. Spočtené hodnoty $E_{O,R7}$ [MPa], $E_{O,R15}$ [MPa], $E_{O,R19}$ [MPa] byly počítány

z průměrných naměřených hodnot, což s sebou přináší do odhadu nepřesnosti samotných měření.

Odhad modulu pružnosti E_O [MPa] je závislí na vstupních parametrech:

- Modul pružnosti vláken E_{VL} [MPa]
- Modul pružnosti betonu E_{RO} [MPa]
- Plocha S_{VL} [mm²] rovingů v řezu
- Nejmenší průmět D_{MIN} [mm] rovingů v řezu

Odhad modulu pružnosti E_O [MPa] je tedy funkcí vstupních parametrů:

$$E_O = f(E_{VL}; E_{RO}; S_{VL}; D_{MIN}) \quad (38)$$

Do odhadu modulu pružnosti E_O [MPa] vstupují rozptyly dílčích vstupních parametrů, odhad rozptylu odhadu $s_o^2 E_O$ [MPa] byl stanoven pomocí aproximace Taylorovým rozvojem vztah je též někdy označován jako zákon o přenosu chyb [27]:

$$s_o^2 = \sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 s_i^2 + 2 \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=i+1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \left(\frac{\partial f}{\partial x_j} \right)^2 cov(x_i, x_j) \quad (39)$$

Kde $\frac{\partial f}{\partial x_i}$ je parciální derivace funkce f podle i -té složky a s_i^2 je rozptyl i -té složky, cov je kovariance. Jelikož vstupní parametry jsou nekorelované $cov(x_i, x_j)$ je rovna nule a tudíž celý druhý člen (39) je roven nule. [27]

Tabulka 3.5: Odhad rozptylu, směrodatná odchylka, variační koeficient odhadovaných modulů pružnosti jednotlivých sad

	s_o^2 [MPa ²]	Sm. Odch. [MPa]	Variační koeficient [%]
$E_{O,R7}$ [MPa]	2269885,25	1506,61	3,47
$E_{O,R15}$ [MPa]	2226437,59	1492,13	3,29
$E_{O,R19}$ [MPa]	2214080,37	1487,98	3,22

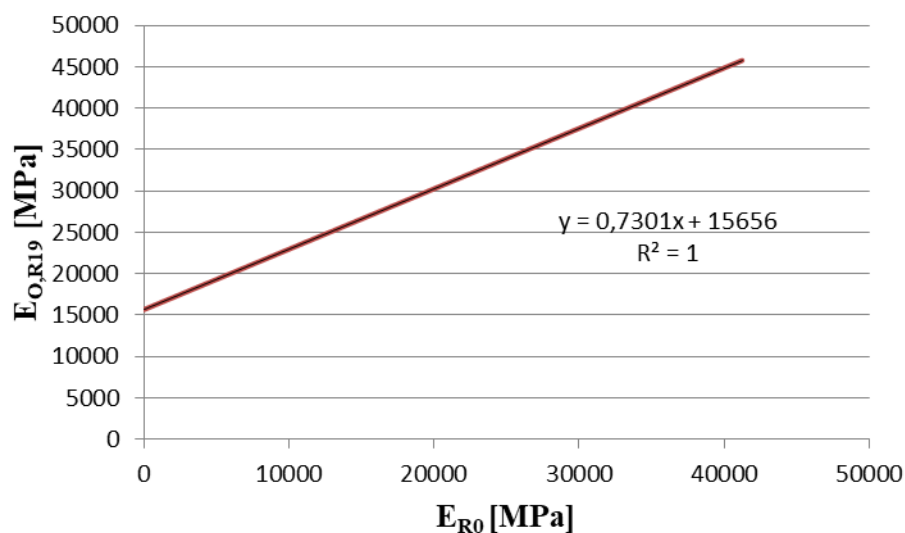
Pro zjištění, který rozptyl dílčích vstupních parametrů nejvíce ovlivňuje odhad rozptylu odhadu s_o^2 byla celá rovnice (39) vydělena s_o^2 ,

$$1 = \frac{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)^2 s_1^2}{s_o^2} + \frac{\left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\right)^2 s_2^2}{s_o^2} + \dots + \frac{\left(\frac{\partial f}{\partial x_m}\right)^2 s_m^2}{s_o^2} \quad (40)$$

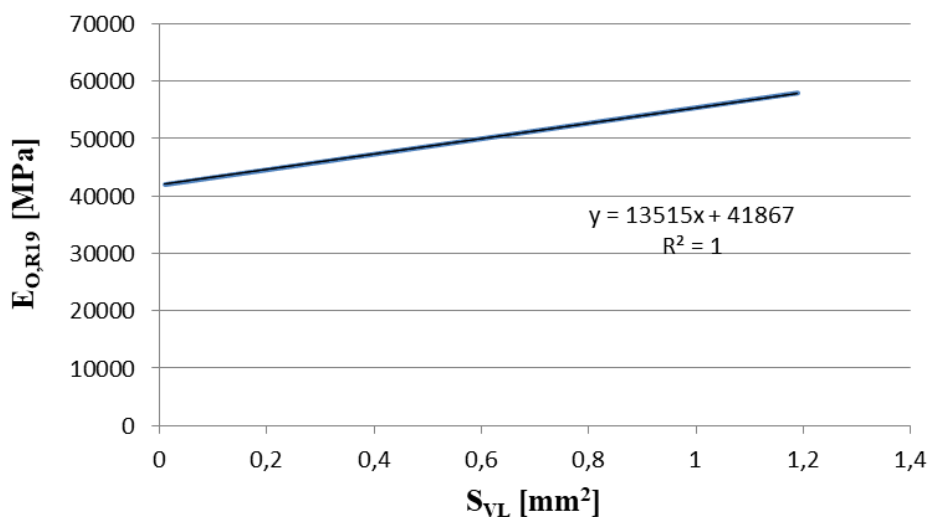
A jednotlivé sčítance byly vyjádřeny v procentech. Jelikož každá sada zkušebních těles s orientovanou výztuží obsahuje jiný podíl vláken, tak (39) byla počítána pro každou sadu *R7*, *R15*, *R19* zvlášť. Hodnoty jsou uvedeny v tabulce 3.6.

Tabulka 3.6: Procentuální zastoupení dílčích rozptylů na odhadu rozptylu odhadu s_o^2

Parametr	R7 [%]	R15 [%]	R19 [%]
S_{VL} [mm ²]	0,05	0,26	0,72
D_{MIN} [mm]	0,03	0,14	0,23
E_{VL} [MPa]	0,02	0,07	0,12
E_{R0} [MPa]	99,9	99,53	98,93

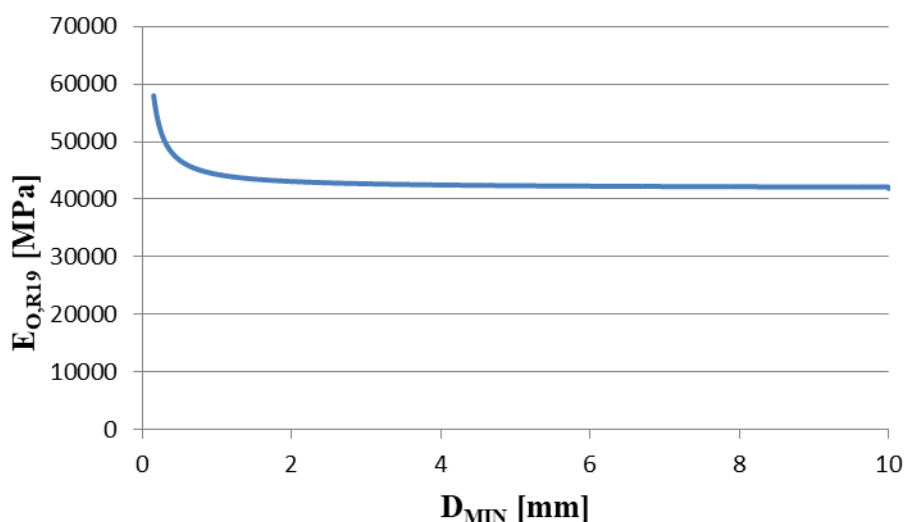


Obr. 3.16: Závislost odhadovaného modulu pružnosti $E_{O,R19}$ na modulu pružnosti prostého betonu E_{R0}



Obr. 3.17: Závislost odhadovaného modulu pružnosti $E_{O,R19}$ na ploše rovingů v řezu S_{VL}

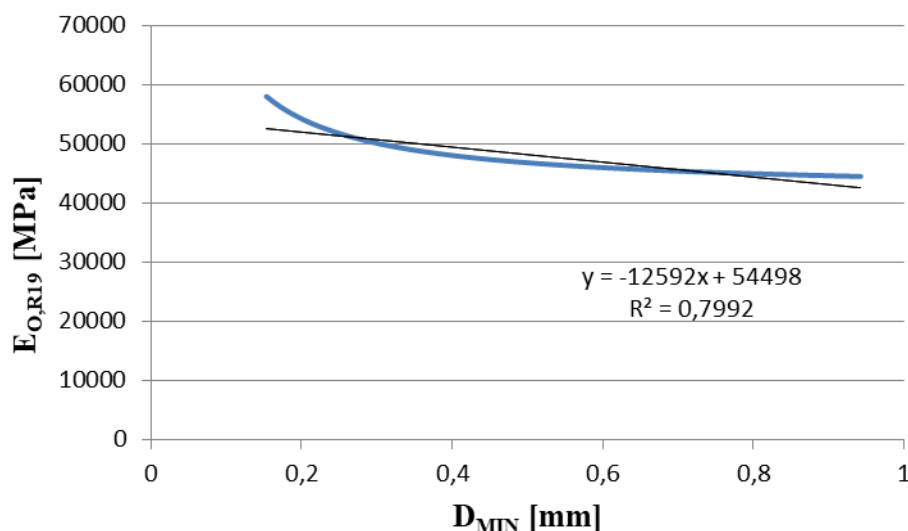
Z obr. 3.16 a obr. 3.17 je vidět lineární závislost mezi vstupními parametry S_{VL} [mm²] a $E_{O,R0}$ [MPa] pro další vstupní parametr E_{VL} [MPa] je závislost též lineární (analogicky závislost $E_{O,R19}$ [MPa] a E_{R0} [MPa] na obr. 3.16).



Obr. 3.18: Závislost odhadovaného modulu pružnosti $E_{O,R19}$ na minimálním průmětu plochy rovingů v řezu D_{MIN}

Ze závislosti $E_{O,R19}$ [MPa] na D_{MIN} [mm] na obr. 3.18 je vidět nelineární závislost, jelikož po derivaci (39) podle D_{MIN} vystupuje D_{MIN} ve jmenovateli na druhou. Hodnoty D_{MIN} [mm] končí v hodnotě 10 což je výška vzorku, tato limitní hodnota je ovšem z praktického

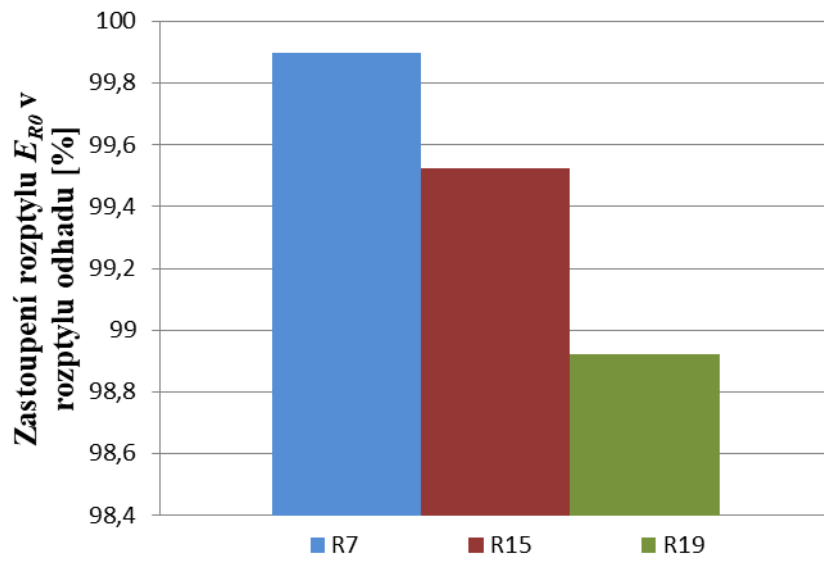
hlediska nereálná, proto pro lepší aproximaci byly hodnoty D_{MIN} [mm] redukovány do užšího intervalu (obr 3.19).



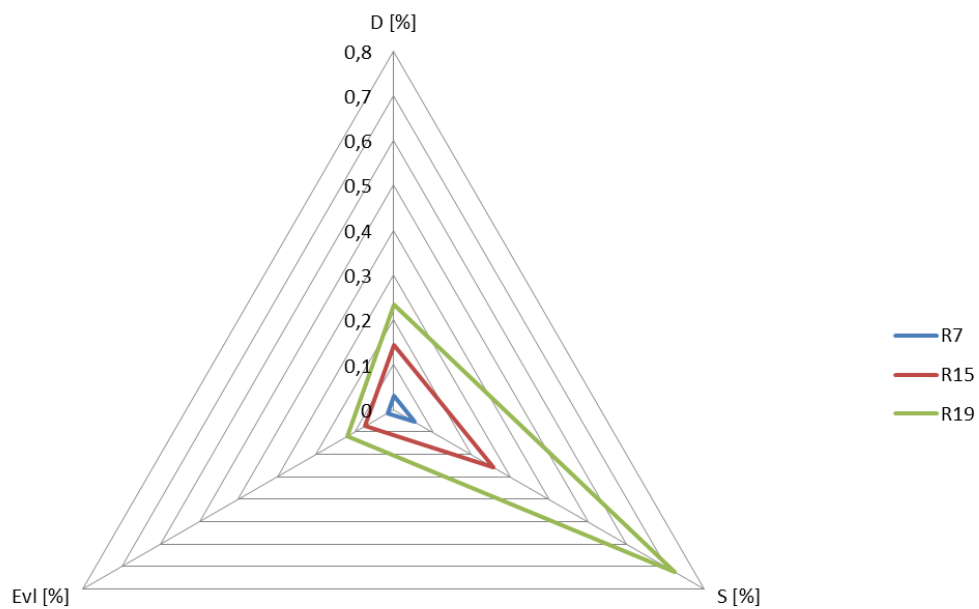
Obr. 3.19: Závislost $E_{O,R19}$ na D_{MIN} pro $D_{MIN} \in < 0,153; 1 >$

Dolní hranice intervalu byla spočtena jako $(19 \cdot S_{VL})/40$ pro $R19$.

I přestože závislost $E_{O,R19}$ [MPa] na E_{R0} [MPa] je funkcí nejpomaleji rostoucí (obr. 3.16) tak vliv rozptylu E_{R0} [MPa] na rozptyl odhadu s_o^2 je největší (tabulka 3.6). Největší vliv na s_o^2 má rozptyl E_{R0} [MPa] jelikož je složkou s největším objemovým podílem (tabulka 2.14). Z tabulky 3.6 je vidět pokles vlivu rozptylu E_{R0} [MPa] se zvyšujícím se počtem vláken (obr. 3.20), naopak růst vlivu rozptylů zbylých dílčích parametrů S_{VL} [mm²], D_{MIN} [mm], E_{VL} [MPa] roste (obr. 3.21, tabulka 3.6).



Obr. 3.20: Procentuální zastoupení rozptylu E_{R0} na E_O



Obr. 3.21: Procentuální zastoupení rozptylů D_{MIN} , S_{VL} , E_{VL} na E_O

3.1.7 Odhad průhybu

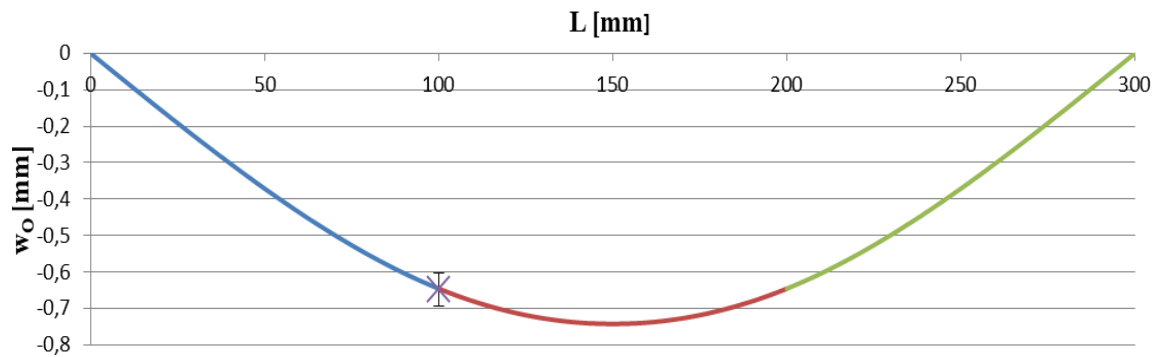
Na základě modulu pružnosti v tahu vrstvy τ_2 (kapitola 2.4.1) lze odhadnout hodnotu průhybu a vykreslit průhybovou čáru pro celé zkušební těleso mezi podpěrnými válci. Pro odhad průhybu w_O [mm] je třeba odhadnout modul pružnosti. Po redukci průřezu (kap. 2.4.1) získáváme ekvivalentní průřez s ekvivalentním momentem setrvačnosti I_E [mm⁴] a s modulem pružnosti vrstvy mající modul pružnosti E_Z [MPa] (kapitola 1.6.1) v našem případě jde o odhadovaný modul pružnosti vrstvy obsahující vlákna τ_2 E_O [MPa]. Při vyjádření w [mm] z rovnice (32) a dosazením:

$$w_O = \frac{F_{VIP} C_I}{E_O I_E} \quad (41)$$

Kde w_O [mm] je odhadovaný průhyb. Při dosazení F_{VIP} [N] lze vykreslit průhyb při průměrné síle F_{VI} [N]. Byly vykresleny 3 průhybové čáry pro sady zkušebních těles s orientovanou výztuží $R7$, $R15$, $R19$ při jejich příslušných průměrných silách při vzniku trhliny $F_{VIP,R7}$ [N], $F_{VIP,R15}$ [N], $F_{VIP,R19}$ [N], Černé body označují hodnotu průměrného průhybu při F_{VI} : $w_{IP,R7}$ [mm], $w_{IP,R15}$ [mm], $w_{IP,R19}$ [mm], úsečky označují 95% interval spolehlivosti střední hodnoty w_{IP} . [mm] Odhady průhybů pro sady $N1$, $N2$ z důvodu vysoké variability výsledků nebyly provedeny. Na obr. 3.23, 3.25, 3.27 jsou graficky porovnány odhadované průhyby w_O [mm] s naměřenými w [mm]. Dílčí odhadnuté w_O byly počítány podle (41) kdy místo průměrné F_{VIP} byly dosazeny konkrétní naměřené hodnoty F_{VI} .

Pro sadu R7

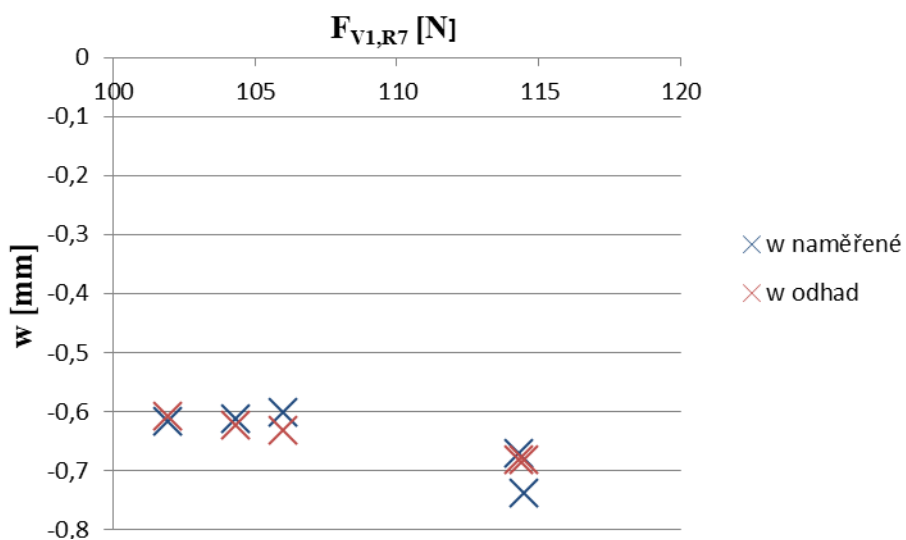
Průhyb zkušebního tělesa mezi podpěrnými válci při průměrné síle $F_{VIP,R7}$ [N] (obr. 3.22)



Obr. 3.22: Průhyb při průměrné síle $F_{VIP,R7}$

Tabulka 3.7: Porovnání naměřeného a odhadnutého průhybu pro konkrétní hodnoty sil $F_{VI,R7}$

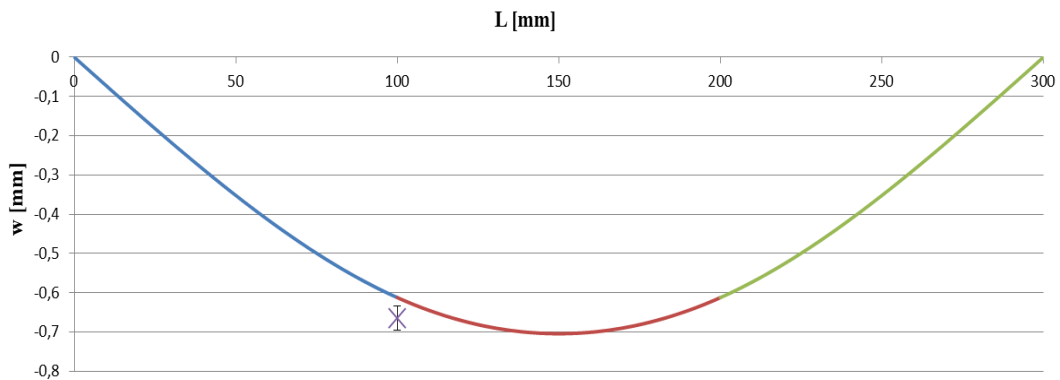
$F_{VI,R7}$ [N]	114,48	114,29	101,97	106,00
w_{R7} [mm]	-0,739	-0,671	-0,616	-0,601
$w_{O,R7}$ [mm]	-0,683	-0,682	-0,608	-0,632
Rozdíl [%]	7,60	1,65	1,27	5,19



Obr. 3.23: Porovnání odhadů $w_{O,R7}$ a naměřených w_{R7} při naměřených silách $F_{VI,R7}$

Pro sadu R15

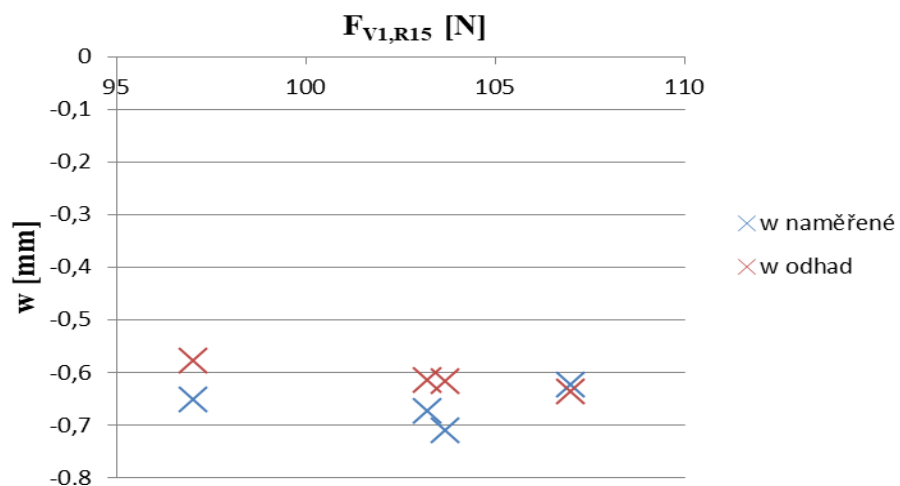
Průhyb zkušebního tělesa mezi podpěrnými válci při průměrné síle $F_{VIP,R15}$ [N] (obr. 3.24)



Obr. 3.24: Průhyb při průměrné síle $F_{VIP,R15}$

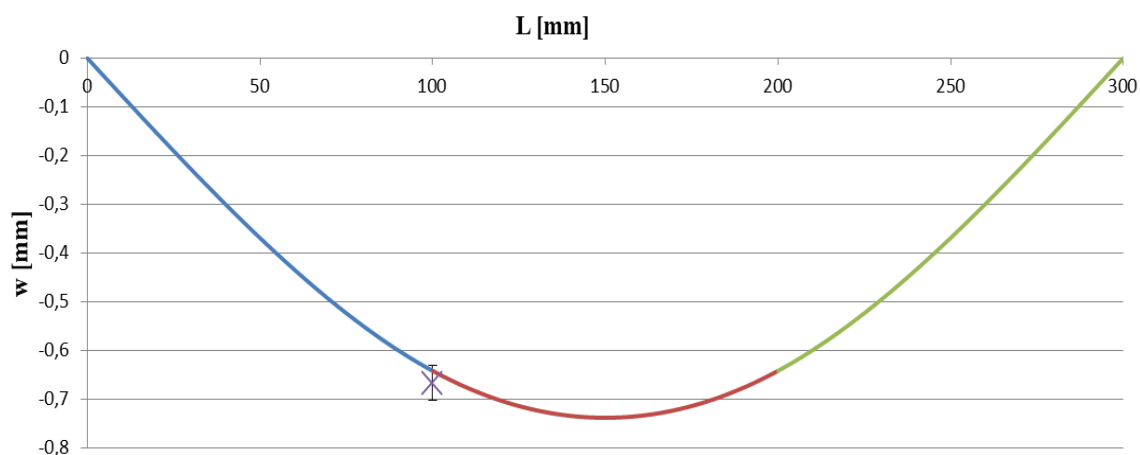
Tabulka 3.8: Porovnání naměřeného a odhadnutého průhybu pro konkrétní hodnoty sil $F_{VI,R15}$

$F_{VI,R15}$ [N]	97,0215	103,221	106,995	103,6815
w_{R15} [mm]	-0,652	-0,673	-0,624	-0,712
$w_{O,R15}$ [mm]	-0,578	-0,615	-0,637	-0,618
Rozdíl [%]	11,32	8,59	2,21	13,12



Obr. 3.25: Porovnání odhadů $w_{O,R7}$ a naměřených w_{R7} při naměřených silách $F_{VI,R15}$

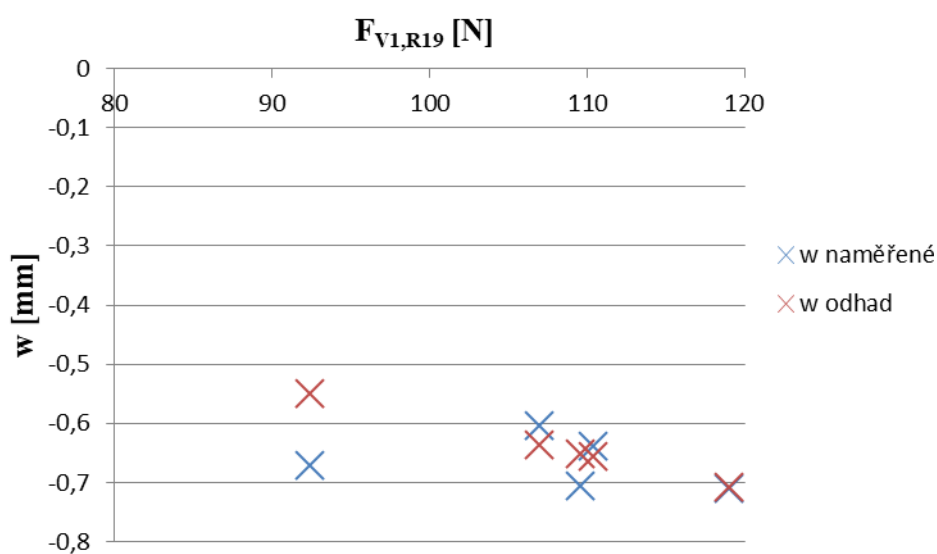
Pro sadu R19



Obr. 3.26: Průhyb při průměrné síle $F_{VI,R19}$

Tabulka 3.9: Porovnání naměřeného a odhadnutého průhybu pro konkrétní hodnoty sil $F_{VI,R19}$

$F_{VI,R19}$ [N]	92,45	106,99	119,016	109,57
w_{R19} [mm]	-0,672	-0,604	-0,711	-0,706
$w_{O,R19}$ [mm]	-0,551	-0,637	-0,709	-0,652
Rozdíl [%]	18,06	5,53	0,31	7,56



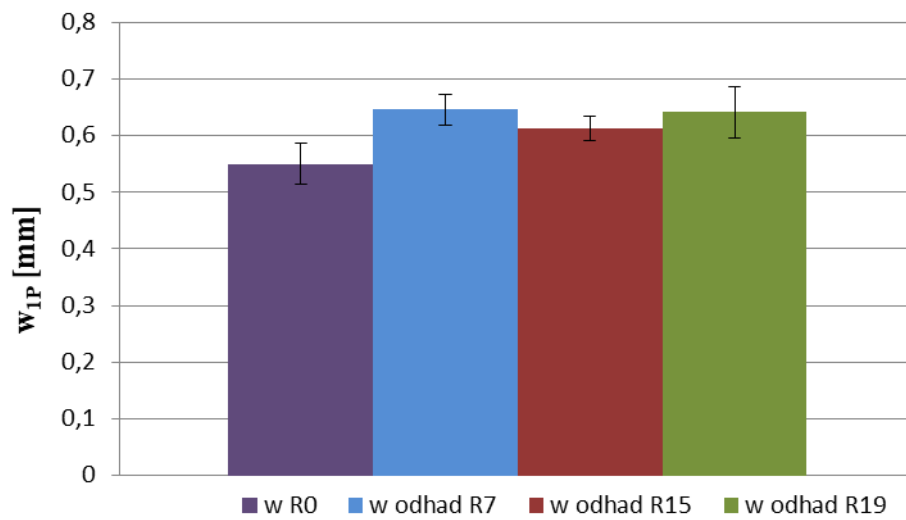
Obr. 3.27: Porovnání odhadů $w_{O,R19}$ a naměřených w_{R19} při naměřených silách $F_{VI,R19}$

Z naměřených hodnot průhybů w a příslušných odhadovaných průhybů w_0 [mm] (tabulky 3.7, 3.8, 3.9) byly spočteny statistické charakteristiky, které jsou porovnávány v tabulce 3.10. Rozdíl byl spočten jako procentuální rozdíl průměrných hodnot odhadovaného a naměřeného průhybu relativně k naměřenému.

Tabulka 3.10: Porovnání statistických údajů naměřených a odhadnutých průhybů

Sada		Průměr [mm]	Sm.Odch. [mm ²]	Var.Koef. [%]	Rozdíl [%]
R7	w_{R7} [mm]	-0,65	0,05	7,98	0,33
	$w_{O,R7}$ [mm]	-0,65	0,03	4,80	
R15	w_{R15} [mm]	-0,66	0,03	4,79	7,93
	$w_{O,R15}$ [mm]	-0,61	0,02	3,51	
R19	w_{R19} [mm]	-0,67	0,04	6,09	3,75
	$w_{O,R19}$ [mm]	-0,64	0,05	8,01	

Z tabulky 3.10 je vidět, že největší rozdíl odhadu a naměřených průměrných hodnot vykazuje sada *R15*, je to opět zapříčiněno pravděpodobně špatným prostoupením betonu do vláken, tedy špatným spojením výztuže a matrice, tím se chování kompozitu vzdaluje od předpokladů a dochází k většímu odchýlení modelu od reality. Modelem lze odhadnout nárůst průměrných hodnot průhybu do vzniku trhliny ve srovnání s prostým betonem (obr. 3.28) a průměrné hodnoty průhybů zkušebních těles sad *R7* a *R19* (tabulka 3.10). Odchýlení dílčích odhadů w_0 od naměřených průhybů w (obr. 3.23, 3.25, 3.27) je pravděpodobně zapříčiněno chybami v měření a také vlivem spolupůsobení betonu a vláken, kdy v každém dílčím zkušebním tělesa mohlo nastat různý stupeň adheze na rozhraní vlákno, matrice.



Obr. 3.28: Porovnání průměrného naměřeného průhybu betonu a průměrných hodnot odhadů průhybů

4 Závěr

Práce byla zaměřena na zjištění a odhad některých mechanických vlastností jednosměrně a jednostranně vyztuženého betonu orientovanými nekonečnými čedičovými vlákny. Pro porovnání byly vyrobeny i zkušební tělesa konvenčně používaného vláknobetonu s rozptýlenou výztuží z diskretních vláken.

V práci bylo zjištěno, že zkušební tělesa s orientovanou výztuží poskytují spolehlivější výsledky (méně variabilní) v každé sledované mechanické vlastnosti (pevnost, modul pružnosti v tahu, deformační práce, maximální průhyb do vzniku trhliny) ve srovnání s rozptýlenou výztuží což je zapříčiněno právě orientací a délkou vláken. Beton vyztužený rozptýlenými vlákny poskytoval velmi variabilní výsledky mechanických vlastností (velké hodnoty variačních koeficientů, široké 95% intervaly spolehlivosti) jelikož počet a orientace vláken v betonu je náhodná a s každým zkušebním tělesem je jiná. S vyšším počtem resp. hmotnostním podílem vláken u neorientované výztuže lze snížit variabilitu výsledků mechanických vlastností, protože dochází ke snížení pravděpodobnosti nepřítomnosti vláken v kritickém místě vzniku trhliny. U některých zkušebních těles s neorientovanou výztuží dokonce docházelo k poklesu mechanických vlastností ve srovnání s prostým betonem, toto zřejmě zatím stále zpomaluje nebo dokonce zamezuje aplikaci kompozita ve stavebnictví ve vyšší míře, zejména použití v nosných prvcích jako náhrada železobetonu. Vláknobeton s orientovanou kontinuální výztuží taky zřejmě není řešením nahrazení železobetonu, protože potenciál vláknobetonu tkví ve snadné technologii aplikace, která je snadná pouze při použití diskretních neorientovaných vláken, orientovaná kontinuální vlákenná výztuž je náročnější na technologii, a tím už zmíněný potenciál odpadá a je snazší, ekonomičtější a spolehlivější použití konvenčních postupů aplikace železobetonu. Aplikaci vláknobetonu také nenahrává fakt, že při použití ve větších konstrukcích se zvyšuje pravděpodobnost výskytu nejslabšího místa, s přihlédnutím možnostem prostorové orientace vláken v betonu není tento vliv zanedbatelný.

Betonový kompozit vyztužený orientovanými vlákny poskytoval lepší mechanické vlastnosti v porovnání s neorientovanou výztuží. Je to zapříčiněno opět orientací výztuže ve směru namáhání a její délkou. Orientovaná vlákenná výztuž prokazatelně navýšila pevnost kompozitu (síla do vzniku trhliny) a průhyb do vzniku trhliny ve srovnání

s prostým betonem. Navýšení pevnosti a průhybu do vzniku trhliny u neorientované výztuže není průkazné ve srovnání s prostým betonem z důvodu velké variability výsledků.

Přidáním vláken do betonu v jakékoli formě pozitivně ovlivnilo schopnost přenášení zatížení i po vzniku trhliny, přidáním vláken byl zamezen křehký lom betonu, který je velmi nebezpečný v betonových konstrukcích. Schopnost přenášet zatížení po přetvoření však nachází uplatnění v úzké šíři aplikací, protože při použití v nosných prvcích je přetvoření, kdy vlákna fungují, již nepřijatelné. Orientovaná výztuž nejvíce ovlivnila schopnost přenášení zatížení po přetvoření, tato vlastnost byla charakterizována deformační prací.

Vyztužení betonu orientovanou výztuží zvýšilo průměrné hodnoty modulu pružnosti v tahu, což bylo také predikováno modelem. Modelem lze predikovat průměrnou hodnotu modulu pružnosti u konkrétních hodnot se výsledky s modelem rozchází více, protože dochází k prokluzům vláken v matrici. Zlepšení mechanických vlastností kompozita závisí právě na rozhraní výztuže a vláken resp. na jejich adhezi, propojení. Proto další výzkum by se mohl věnovat tomuto problému, kdyby došlo ke zlepšení kontaktu vláken a betonu tak by pravděpodobně došlo k nárůstu mechanických vlastností se současným snížením variability výsledků. Jedním z řešení by bylo použití vláken s nekruhovým průřezem, který by zvýšil povrch, kde by docházelo k adhezi vláken a matrice, analogicky se tento způsob využívá u železobetonu, kdy vyztužující tyče mají určitou strukturu na povrchu. Dalším způsobem zlepšení adheze by mohla být aplikace vlákněných útvarů se záporným poissonovým číslem, zde však vyvstává problém malých deformací do první trhliny betonové matrice. Beton je materiálem s vysokým modulem pružnosti tedy materiálem křehkým, deformace do vzniku trhliny jsou tedy malé a auxetický útvar by se měl roztahovat již při malé deformaci. K navýšení modulu pružnosti u orientované výztuže došlo prokazatelně u sady zkušebních těles s nejvyšší mírou vyztužení, u zbylých došlo k navýšení průměrných hodnot, ale rozdíly nejsou statisticky významné. Při vyztužení betonu neorientovanými vlákny může dojít k poklesu modulu pružnosti výsledného kompozita ve srovnání s prostým betonem.

Při navrhování produktů a konstrukcí z vláknobetonu je důležitou součástí navrhování vlastní zkouška navrženého kompozita. Nevhodně navržený kompozit může v krajních situacích snižovat mechanické vlastnosti, což by mělo být zjištěno právě destruktivní

zkouškou. Vždy je důležité mít na paměti, za jakým účelem jsou vlákna do betonu přidávána a zda je to výhodné, vláknobeton je v dnešní době používán především v místech, kde je zapotřebí zvýšení houževnatosti materiálu, z důvodu větších variabilit mechanických vlastností není materiálem tak spolehlivým ve srovnání s železobetonem a tudíž zatím nikterak masivně populárním.

Použitá literatura

- [1] KADLČÁK, Jaroslav a KYTÝR, Jiří. *Statika stavebních konstrukcí*. V Brně: VUTIUM, 2004. ISBN 978-80-214-3428-8.
- [2] LEHNER, Jan. *Skleněná, horninová a strusková vlákna*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1960.
- [3] ZBONČÁK, Radek. *Metody odhadu mechanických vlastností dlouhovlákněného kompozitu: kompozitní materiály*. Liberec: VÚTS, 2017. ISBN 978-80-87184-71-4.
- [4] LAŠ, Vladislav. *Mechanika kompozitních materiálů*. 2., přeprac. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2008. ISBN 978-80-7043-689-9.
- [5] HUGO, Jiří. *Konstrukční plastické hmoty: jejich vlastnosti a využití ve strojírenství*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1965. Řada strojírenské literatury.
- [6] RAMACHANDRAN, V. S. *Concrete admixtures handbook: properties, science, and technology*. 2nd ed. Park Ridge, N.J., U.S.A.: Noyes Publications, c1995. ISBN 0-8155-1373-9.
- [7] WICHTERLE, Kamil. *Chemické technologie*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2012. ISBN 978-80-248-2579-3.
- [8] *eBeton - Specialista na beton* [online]. [cit. 18. 6. 2020]. Dostupné z: <http://www.ebeton.cz/encyklopedie/druhy-cementu>
- [9] KLEČKA, Tomáš. *Příručka technologa BETON- suroviny, výroba, vlastnosti*. [online]. 2013 [cit. 29.7.2020]. Dostupné z: <http://www.transportbeton.cz/stahnout-soubor?id=3203>
- [10] Druhy betonů tabulka | ABS Stavební firma Bílina. *Stavební firmy Chomutov, Teplice, Ústí | ABS Bílina* [online]. Copyright © ABS Bílina [cit. 22. 07. 2020]. Dostupné z: <http://www.absbilina.cz/cs/sluzby/vyroba-betonu/druhy-betonu/>
- [11] TIPKA, Martin a VODIČKA, Jan. *Optimalizace zkoušky cementových kompozit v osovém tahu*. In: <https://stavba.tzb-info.cz/> [online] 2016 [cit. 29. 7. 2020]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/beton-malty-omitky/15060-optimalizace-zkousky-cementovych-kompozit-v-osovem-tahu>

- [12] What is Basalt Fiber - Basalt Fiber Tech - Main Section . *Welcome to Basalt Fiber Tech - Main Section* [online]. Copyright © Basalt Fiber Tech 2015. All rights reserved. [cit. 29.07.2020]. Dostupné z: <http://www.basaltft.com/hist.htm>
- [13] *Grafen: zázračná forma uhlíku překvapuje*. [online] VTM.cz. [cit. 7. 5. 2020]. Dostupné z: <http://vtm.e15.cz/grafen-zazracna-forma-uhliku-prekvapuje>
- [14] *Geology.cz*. [online]. [cit. 6. 4. 2020] Dostupné z: <http://www.geology.cz/aplikace/encyklopedie/term.pl?bazalt>
- [15] MILITKÝ, Jiří. *Textilní vlákna: klasická a speciální*. V Liberci: Technická univerzita, 2012. ISBN 978-80-7372-844-1.
- [16] JAMSHAD, Hafsa a Rajesh MISHRA. A green material from rock: basalt fiber – a review. *The Journal of The Textile Institute* [online]. 2015. [cit. 6. 4. 2020]. DOI: 10.1080/00405000.2015.1071940. ISSN 0040-5000. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00405000.2015.1071940>
- [17] NOVITSKII, A. G. a M. V. EFREMOV. A study of the fiber blowing process in the production of mineral wool. *Refractories and Industrial Ceramics* [online]. 2006, **47**(2), 121-124 [cit. 29. 7. 2020]. DOI: 10.1007/s11148-006-0069-y. ISSN 1083-4877. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11148-006-0069-y>
- [18] ALAGIRUSAMY, R. a DAS, A. *Technical textile yarns: industrial and medical applications*. Cambridge: Woodhead publishing Ltd., 2010. ISBN 978-1-84569-549-1.
- [19] NOVITSKII, A. G. a V. V. SUDAKOV. An Unwoven Basalt-Fiber Material for the Encasing of Fibrous Insulation: an Alternative to Glass Cloth. *Refractories and Industrial Ceramics* [online]. 2004 [cit. 6. 4. 2020] DOI: 10.1023/B:REFR.0000046504.53798.af. ISSN 1083-4877. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1023/B:REFR.0000046504.53798.af>
- [20] NOVITSKII, A. G. a M. V. EFREMOV. A study of the fiber blowing process in the production of mineral wool. *Refractories and Industrial Ceramics* [online]. 2006 [cit. 6. 4. 2020]. DOI: 10.1007/s11148-006-0069-y. ISSN 1083-4877. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11148-006-0069-y>

- [21] KOHOUTKOVÁ, Alena. Vláknotbetony – blýská se na lepší časy? *BETON – technologie, konstrukce, sanace*. [online]. 2010. [cit. 15. 5. 2020] Dostupné z: http://www.betontks.cz/sites/default/files/2010-2-03_0.pdf
- [22] VAŠKOVÁ, Jitka. Experimentální ověřování vláknotbetonových prvků. *BETON – technologie, konstrukce, sanace*. [online] 2010 [cit. 15. 5. 2020]. Dostupné z: http://www.betontks.cz/sites/default/files/2010-2-74_0.pdf
- [23] BARTOŠ, Petr. Sklovláknotbeton pro 21. století – pozvánka na workshop. *BETON – technologie, konstrukce, sanace*. [online] 2019 [cit. 15. 5. 2020]. Dostupné z: <http://www.betontks.cz/sites/default/files/2019-2-62st.pdf>
- [24] BAUER, Jan. *Převratné události v dějinách lidstva*. Frýdek-Místek: Alpress, 2016. ISBN 978-80-7543-074-8.
- [25] *Konference Speciální betony: vlastnosti, technologie, aplikace: sborník příspěvků...* Praha: Sekurkon, 2002-. ISBN 80-86604-00-4.
- [26] *eBeton - Specialista na beton* [online]. [cit. 14. 6. 2020]. Dostupné z: <http://www.ebeton.cz/pojmy/beton>
- [27] MELOUN, Milan a Jiří MILITKÝ. *Statistická analýza experimentálních dat*. Vyd. 2., upr. a rozš. Praha: Academia, 2004. ISBN 80-200-1254-0
- [28] Heydar Aliyev Center / Zaha Hadid Architects. *ArchDaily. ArchDaily / Broadcasting Architecture Worldwide* [online]. Copyright © All rights reserved. ArchDaily 2008 [cit. 2. 8. 2020]. Dostupné z: <https://www.archdaily.com/448774/heydar-aliyev-center-zaha-hadid-architects>

Seznam obrázků

Obr. 1.1: Rozdělení vláknových kompozitů [4]	17
Obr. 1.2: Třídy pevnosti v tlaku obyčejného a těžkého betonu podle ČSN EN 206-1 [10]	21
Obr. 1.3: Zkušební těleso ve tvaru dogbone pro zkoušku v prostém tahu [11].....	22
Obr. 1.4: Způsoby výroby diskretních vláken	27
Obr. 1.5: Schéma výroby odstředivého foukání [16]	28
Obr. 1.6: Schéma výroby víceválcového foukání [16].....	29
Obr. 1.7: GRC desky na centru Hejdara Alijeva [28]	34
Obr. 1.8: Nosník zatížený obecným liniovým zatížením	35
Obr. 1.9: Ohyb infinitezimálního prvku	36
Obr. 2.1: Čedičový roving	41
Obr. 2.2: Bednění	43
Obr. 2.3: Rám s 19 nataženými rovingy	43
Obr. 2.4: Beton po přidání plastifikátoru.....	44
Obr. 2.5: Průběh betonování zkušebních těles s orientovanou výztuží	45
Obr. 2.6: Průběh trhacích zkoušek	47
Obr. 2.7: Tahová křivka rovingu	48
Obr. 2.8: Snímek rovingu v betonu z obrazové analýzy	49
Obr. 2.9: Geometrie zatěžování a průběh ohybového momentu a posuvné síly	51
Obr. 2.10: Průběh zatěžování	52
Obr. 2.11: Průběh ohybových zkoušek zkušebních těles z prostého betonu $R0$	53
Obr. 2.12: Průběh ohybových zkoušek zkušebních těles $R7$	54
Obr. 2.13: Průběh ohybových zkoušek zkušebních těles $R15$	55
Obr. 2.14: Označení sil F_{V1} , F_{V2} , F_{V3}	56
Obr. 2.15: Průběh ohybových zkoušek zkušebních těles sady $R19$	57
Obr. 2.16: Průběh ohybových zkoušek zkušebních těles sady $N1$	58
Obr. 2.17: Průběh ohybových zkoušek zkušebních těles sady $N2$	59
Obr. 2.18: Hodnoty ekvivalentních modulů pružnosti pro sady $R7$, $R15$, $R19$ a moment setrvačnosti prostého betonu $R0$	62
Obr. 3.1: Průběh zatěžování zkušebního tělesa sady z prostého betonu sady $R0$	66
Obr. 3.2: Průběh zatěžování zkušebního tělesa sady $R7$	67
Obr. 3.3: Průběh zatěžování zkušebního tělesa sady $R15$	68

Obr. 3.4: Průměrné hodnoty F_{VI} s vyznačenými 95% IS	69
Obr. 3.5: Procentuální nárůst F_{VIP} oproti prostému betonu	70
Obr. 3.6: Průměrné hodnoty σ_{OMAX} s vyznačenými 95% IS	71
Obr. 3.7: Průměrné hodnoty E_T zkušebních těles s orientovanou výztuží s vyznačenými 95% IS	72
Obr. 3.8: Průměrné hodnoty E_T zkušebních těles s neorientovanou výztuží s vyznačenými 95% IS	73
Obr. 3.9: Průměrné hodnoty průhybu w_{IP} s vyznačenými 95% IS	74
Obr. 3.10: Procentuální nárůst w_{IP} relativně k prostému betonu	74
Obr. 3.11: Hodnoty deformační práce W_{DEF}	75
Obr. 3.12: Procentuální nárůst $W_{DEF,P}$ relativně k prostému betonu.....	76
Obr. 3.13: : Hodnoty modulů pružnosti E_{R7} sady R7 ve srovnání s odhadovaným $E_{O,R7}$	77
Obr. 3.14: Hodnoty modulů pružnosti E_{R15} sady R15 ve srovnání s odhadovaným $E_{O,R15}$.	78
Obr. 3.15: Hodnoty modulů pružnosti E_{R19} sady R19 ve srovnání s odhadovaným $E_{O,R19}$	79
Obr. 3.16: Závislost odhadovaného modulu pružnosti $E_{O,R19}$ na modulu pružnosti prostého betonu E_{R0}	81
Obr. 3.17: Závislost odhadovaného modulu pružnosti $E_{O,R19}$ na ploše rovingů v řezu S_{VL}	82
Obr. 3.18: Závislost odhadovaného modulu pružnosti $E_{O,R19}$ na minimálním průmětu plochy rovingů v řezu D_{MIN}	82
Obr. 3.19: Závislost $E_{O,R19}$ na D_{MIN} pro $D_{MIN} \in < 0,153; 1 >$	83
Obr. 3.20: Procentuální zastoupení rozptylu E_{R0} na E_O	84
Obr. 3.21: Procentuální zastoupení rozptylů D_{MIN} , S_{VL} , E_{VL} na E_O	84
Obr. 3.22: Průhyb při průměrné síle $F_{VIP,R7}$	86
Obr. 3.23: Porovnání odhadů $w_{O,R7}$ a naměřených w_{R7} při naměřených silách $F_{VI,R7}$	86
Obr. 3.24: Průhyb při průměrné síle $F_{VIP,R15}$	87
Obr. 3.25: Porovnání odhadů $w_{O,R7}$ a naměřených w_{R7} při naměřených silách $F_{VI,R15}$	87
Obr. 3.26: Průhyb při průměrné síle $F_{VIP,R19}$	88
Obr. 3.27: Porovnání odhadů $w_{O,R19}$ a naměřených w_{R19} při naměřených silách $F_{VI,R19}$	88
Obr. 3.28: Porovnání průměrného naměřeného průhybu betonu a průměrných hodnot odhadů průhybů	90

Seznam tabulek

Tabulka 1.1: Přehled způsobu klasifikace betonů	18
Tabulka 1.2: Složení čediče [15]	25
Tabulka 1.3: Klasifikace čediče dle obsahu SiO ₂	25
Tabulka 2.1: Složení betonové směsi	40
Tabulka 2.2: Materiálové parametry čedičového rovingu.....	41
Tabulka 2.3: Označení sad těles s orientovanou výztuží dle míry vyztužení.....	44
Tabulka 2.4: Označení sad těles s neorientovanou výztuží dle hmotnostního podílu.....	46
Tabulka 2.5: Označení a geometrie sady z prostého betonu	46
Tabulka 2.6: Naměřené hodnoty tahové zkoušky rovingů	48
Tabulka 2.7: Naměřené hodnoty ploch příčných řezů rovingů u zkušebních těles s orientovanou výztuží.....	49
Tabulka 2.8: Naměřená data pro prostý beton <i>R0</i>	53
Tabulka 2.9: Naměřená data zkušebních těles s orientovanou výztuží ze 7 rovingů <i>R7</i>	54
Tabulka 2.10: Naměřená data zkušebních těles s orientovanou výztuží z 15 rovingů <i>R15</i>	55
Tabulka 2.11: Naměřená data zkušebních těles s orientovanou výztuží z 19 rovingů <i>R19</i>	57
Tabulka 2.12: Naměřená data zkušebních těles s neorientovanou výztuží s 0,815 % hmotnostním podílem vláken <i>N1</i>	58
Tabulka 2.13: Naměřená data zkušebních těles s neorientovanou výztuží s 1,63 % hmotnostním podílem vláken <i>N2</i>	59
Tabulka 2.14: Objemové podíly vláken a betonu dílčích sad	61
Tabulka 2.15: I_E [mm ⁴] dílčích sad a posunutí těžiště.....	61
Tabulka 2.16: Maximální napětí za ohybu při síle F_{VI} dílčích sad zkušebních těles	63
Tabulka 2.17: Průměrné hodnoty modulů pružnosti v tahu	64
Tabulka 2.18: Deformační práce	65
Tabulka 3.1: Odhadované a průměrné moduly pružnosti.....	76
Tabulka 3.2: Procentuální rozdíly naměřených modulů pružnosti E_{R7} sady <i>R7</i> ve srovnání s odhadem $E_{O,R15}$	77
Tabulka 3.3: Procentuální rozdíly naměřených modulů pružnosti E_{R15} sady <i>R15</i> ve srovnání s odhadem $E_{O,R15}$	78
Tabulka 3.4: Procentuální rozdíly naměřených modulů pružnosti E_{R19} sady <i>R19</i> ve srovnání s odhadem $E_{O,R19}$	79

Tabulka 3.5: Odhad rozptylu, směrodatná odchylka, variační koeficient odhadovaných modulů pružnosti jednotlivých sad.....	80
Tabulka 3.6: Procentuální zastoupení dílčích rozptylů na odhadu rozptylu odhadu s_o^2	81
Tabulka 3.7: Porovnání naměřeného a odhadnutého průhybu pro konkrétní hodnoty sil $F_{VI,R7}$	86
Tabulka 3.8: Porovnání naměřeného a odhadnutého průhybu pro konkrétní hodnoty sil $F_{VI,R15}$	87
Tabulka 3.9: Porovnání naměřeného a odhadnutého průhybu pro konkrétní hodnoty sil $F_{VI,R19}$	88
Tabulka 3.10: Porovnání statistických údajů naměřených a odhadnutých průhybů	89