



**TECHNICKÁ UNIVERZITA  
V LIBERCI**

---

**Protokol z měření vysokopevnostních  
mikrovláken a kompozitů**

---

**Petr LOUDA**

**V Liberci 10.05.17**

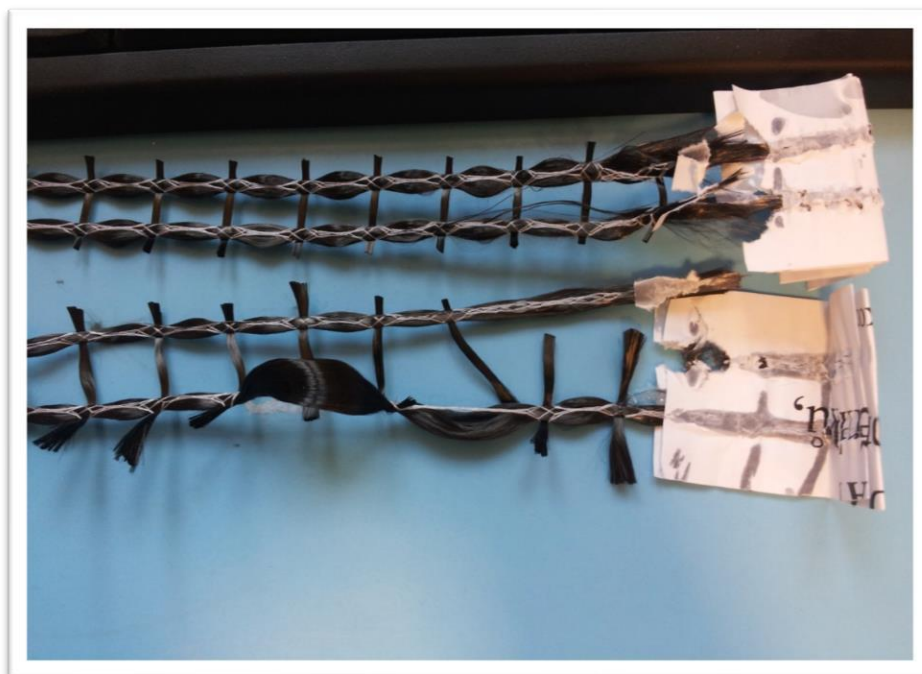
Studentská 1402/2, 461 17 Liberec

E-mail: [petr.louda@tul.cz](mailto:petr.louda@tul.cz)

# Pevnost vláken v tahu

V první části výzkumu byl hodnocen vstupní materiál ve formě vláken. Průřez vláken je přepočten z počtu jednotlivých fibril vynásobeným jejich průřezem. Touto metodou bylo dosaženo nejpřesnější hodnoty průřezu hodnocených vláken. Vlákná byla hodnocena na univerzálním stroji pro zkoušení mechanických vlastností s označením FP 100 – LabTestII o rozsahu 0 - 100 kN.

## 1. Čistá uhlíková vlákna o průřezu 3 mm<sup>2</sup>

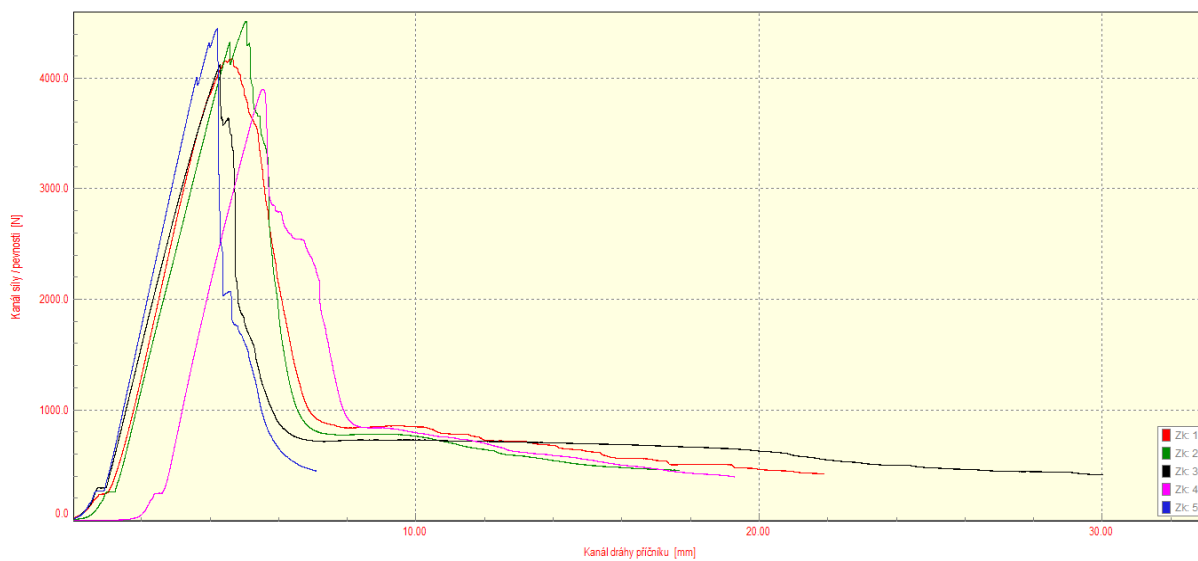


Obr. 1 Vzorek uhlíkových vláken o průřezu 3 mm<sup>2</sup> po zkoušce tahem.

### Tabulka naměřených hodnot

Zkouška	Fmax	Smax	Amax	E	Emin	Emax	S1	σ
	N	mm	%e	MPa	%Fmax	%Fmax	mm2	MPa
↑↓ 1	4177,2998	3,7420597	1,2473532	7655,6963		90	3	1392,4333
↑↓ 2	4512,5000	3,9465210	1,3155071	8173,2295		90	3	1504,1667
↑↓ 3	4121,2002	3,2055299	1,0685101	8380,3848		90	3	1373,7334
↑↓ 4	3901,8000	3,0799763	1,0266588	8150,9570		90	3	1300,6000
↑↓ 5	4449,2998	3,4505904	1,1501968	8478,3584		90	3	1483,0999

**Průměrná pevnost v tahu čistých uhlíkových vláken o průřezu 3 mm<sup>2</sup> je 1410,8 MPa.**



*Obr. 2 Výstupní graf zkoušky tahem, závislost síly na deformaci.*

## 2. Čistá uhlíková vlákna o průřezu 3,4 mm<sup>2</sup>

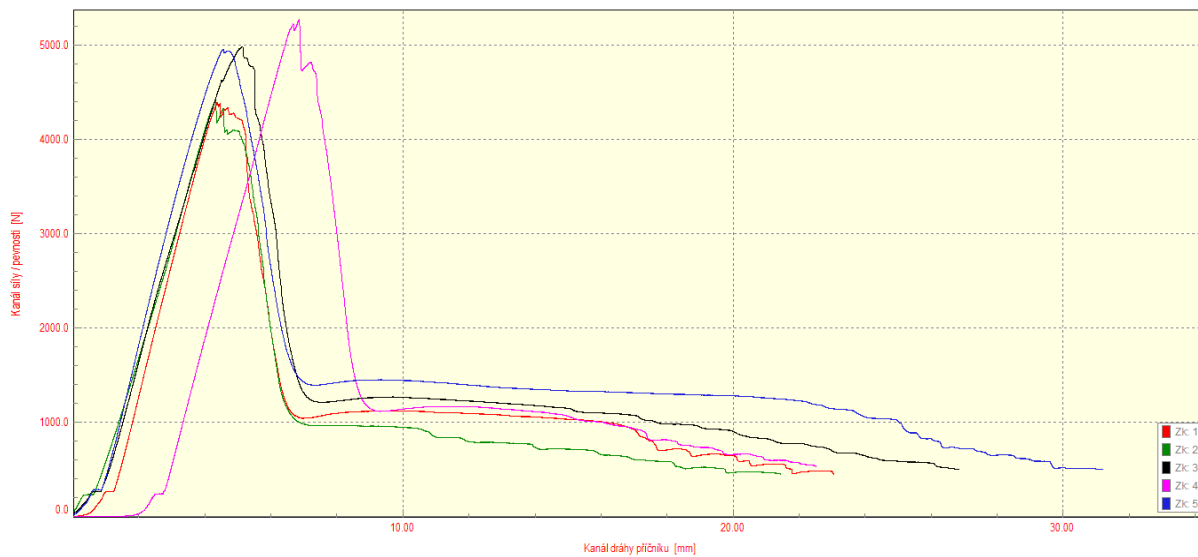


Obr. 3 Vzorek uhlíkových vláken o průřezu 3,4 mm<sup>2</sup> po zkoušce tahem.

### Tabulka naměřených hodnot

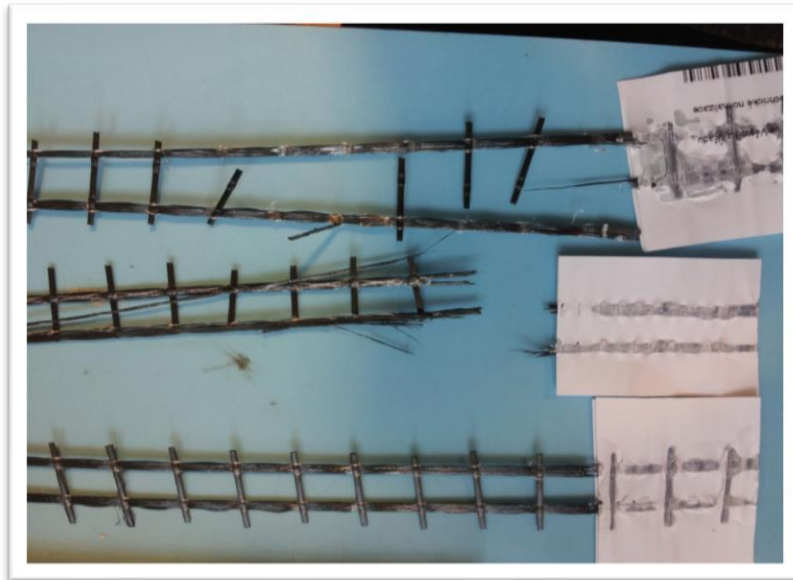
Zkouška	Fmax	Smax	Amax	E	S1	σ
	N	mm	%e	MPa	mm <sup>2</sup>	MPa
↑↓ 1	4388,3999	3,2843096	1,0947698	8406,8945	3,4	1290,7059
↑↓ 2	4408,5000	3,8071389	1,2690463	7041,5049	3,4	1296,6176
↑↓ 3	4982,0010	4,4689574	1,4896525	7017,8672	3,4	1465,2941
↑↓ 4	5272,2002	4,2669668	1,4223223	7835,4263	3,4	1550,6471
↑↓ 5	4957,1001	3,8410919	1,2803639	8390,5098	3,4	1457,9706

**Průměrná pevnost v tahu čistých uhlíkových vláken o průřezu 3,4 mm<sup>2</sup> je 1412,2 MPa.**



Obr. 4 Výstupní graf zkoušky tahem, závislost síly na deformaci.

### 3. Uhlíková vlákna zalitá pryskyřicí o průřezu 3 mm<sup>2</sup>

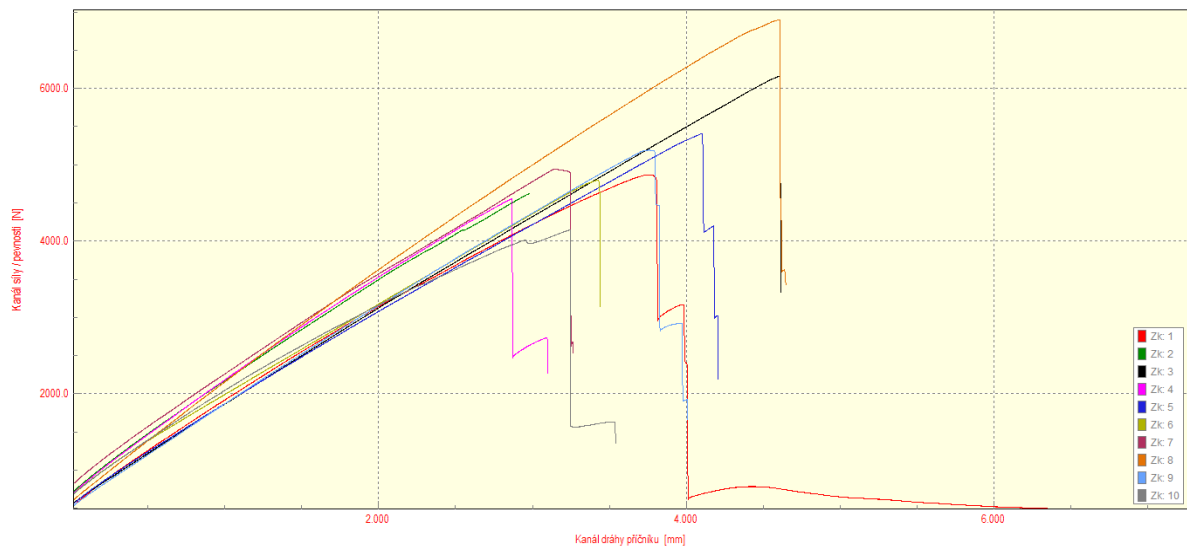


Obr. 5 Vzorek uhlíkových vláken o průřezu 3 mm<sup>2</sup> po zkoušce tahem.

#### Tabulka naměřených hodnot

Zkouška	Fmax	Smax	Amax	E	Emin	Emax	S1	σ
	N	mm	%e	MPa	%Fmax	%Fmax	mm2	MPa
↑↓ 1	4869	4,1247287	1,3749095	8711,8164		90	3	1623
↑↓ 2	4620,7002	3,4469531	1,1489844	9172,4629		90	3	1540,2334
↑↓ 3	6153,1001	5,0366039	1,6788681	7804,7661		90	3	2051,0334
↑↓ 4	4554,5	3,3422225	1,1140741	8959,0811		90	3	1518,1667
↑↓ 5	5407	4,9090414	1,6363472	5838,3125		90	3	1802,3333
↑↓ 6	4801,1001	3,9983892	1,3327965	7618,9497		90	3	1600,3667
↑↓ 7	4944,7002	3,6960545	1,2320181	8934,7363		90	3	1648,2334
↑↓ 8	6896,2998	5,2908177	1,7636058	7431,2163		90	3	2298,7666
↑↓ 9	5196	4,9945111	1,6648371	4448,5928		90	3	1732
↑↓ 10	4146,6001	4,1695633	1,3898544	5750,4312		90	3	1382,2

**Průměrná pevnost v tahu uhlíkových vláken zalitých pryskyřicí o průřezu 3 mm<sup>2</sup> je 1719,6 MPa.**



Obr. 6 Výstupní graf zkoušky tahem, závislost síly na deformaci.

#### 4. Uhlíková vlákna zalitá pryskyřicí o průřezu 3,4 mm<sup>2</sup>



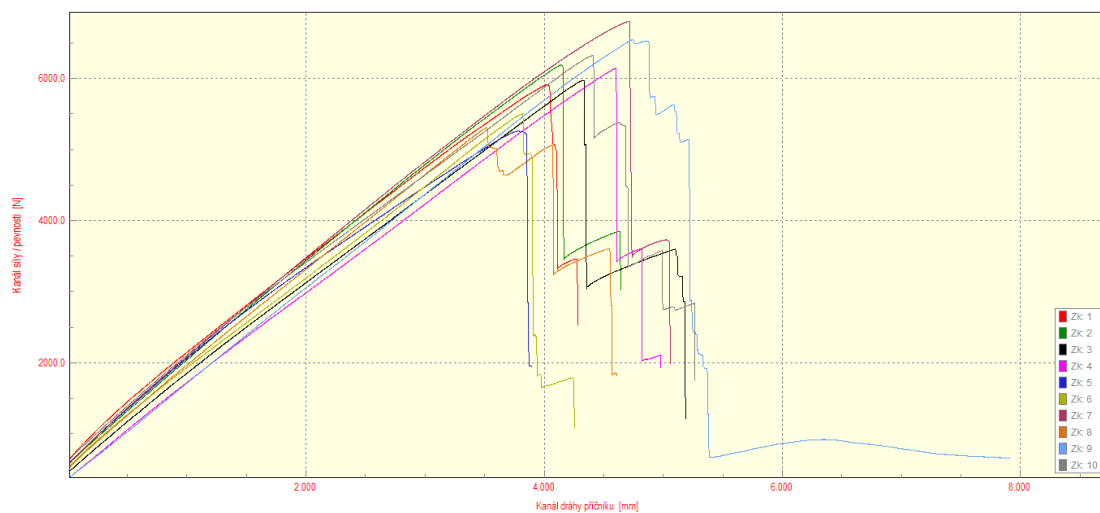
Obr. 7 Vzorek uhlíkových vláken o průřezu 3,4 mm<sup>2</sup> po zkoušce tahem.

#### Tabulka naměřených hodnot

Zkouška	Fmax	Smax	Amax	E	Emin	Emax	S1	σ
	N	mm	%e	MPa	%Fmax	%Fmax	mm <sup>2</sup>	MPa
↑↓ 1	5916,7002	4,4305544	1,4768515	9505,5342		90	3,4	1740,2059
↑↓ 2	6190,3999	4,5282445	1,5094148	8953,6338		90	3,4	1820,7059
↑↓ 3	5972,7998	4,6489072	1,5496358	8485,2949		90	3,4	1756,7058
↑↓ 4	6146,0000	4,8676052	1,6225351	8227,5439		90	3,4	1807,6471
↑↓ 5	5258,6001	4,1521149	1,3840383	9245,3584		90	3,4	1546,6471
↑↓ 6	5500,3999	4,1856618	1,3952206	8788,4756		90	3,4	1617,7647
↑↓ 7	6802,2998	5,0769658	1,6923219	9460,3926		90	3,4	2000,6764
↑↓ 8	5310,1001	3,8683689	1,2894562	8902,2266		90	3,4	1561,7941
↑↓ 9	6548,1001	5,0205154	1,6735051	7945,3115		90	3,4	1925,9118
↑↓ 10	6322,2002	4,8138223	1,6046075	9201,7588		90	3,4	1859,4706

**Průměrná pevnost v tahu uhlíkových vláken zalitých pryskyřicí o průřezu 3,4 mm<sup>2</sup> je 1763,8 MPa.**





Obr. 8 Výstupní graf zkoušky tahem, závislost síly na deformaci.

## 5. Čedičová vlákna o průřezu 2,46 mm<sup>2</sup>



Obr. 9 Vzorek čedičových vláken po zkoušce tahem.

### Tabulka naměřených hodnot

Zkouška	Fmax	Smax	Amax	E	Emin	Emax	S1	σ
	N	mm	%e	MPa	%Fmax	%Fmax	mm <sup>2</sup>	MPa
↑↓ 1	7189,7998	5,7401323	5,7401323	44224,082		90	8,61	835,0522
↑↓ 2	8206,7998	5,3330898	5,3330898	48871,762		90	8,61	953,1707
↑↓ 3	7673,7998	4,6634793	4,6634793	51387,898		90	8,61	891,2659
↑↓ 4	7887,7002	4,8286610	4,8286610	49644,559		90	8,61	916,1092
↑↓ 5	6907,2998	4,2351770	4,2351770	48678,625		90	8,61	802,2416
↑↓ 6	6625,3999	4,1849699	4,1849699	52207,141		90	8,61	769,5006
↑↓ 7	7451,0000	4,6238031	4,6238031	50348,531		90	8,61	865,3891
↑↓ 8	9476,2998	5,8385239	5,8385239	51103,359		90	8,61	1100,6155
↑↓ 9	7806,1001	5,0323982	5,0323982	49611,844		90	8,61	906,6318
↑↓ 10	8235,7998	5,9004149	5,9004149	46131,172		90	8,61	956,5389

**Průměrná pevnost v tahu čedičových vláken o průřezu 2,46 mm<sup>2</sup> je 899,7 MPa.**



Obr. 10 Výstupní graf zkoušky tahem, závislost síly na deformaci.

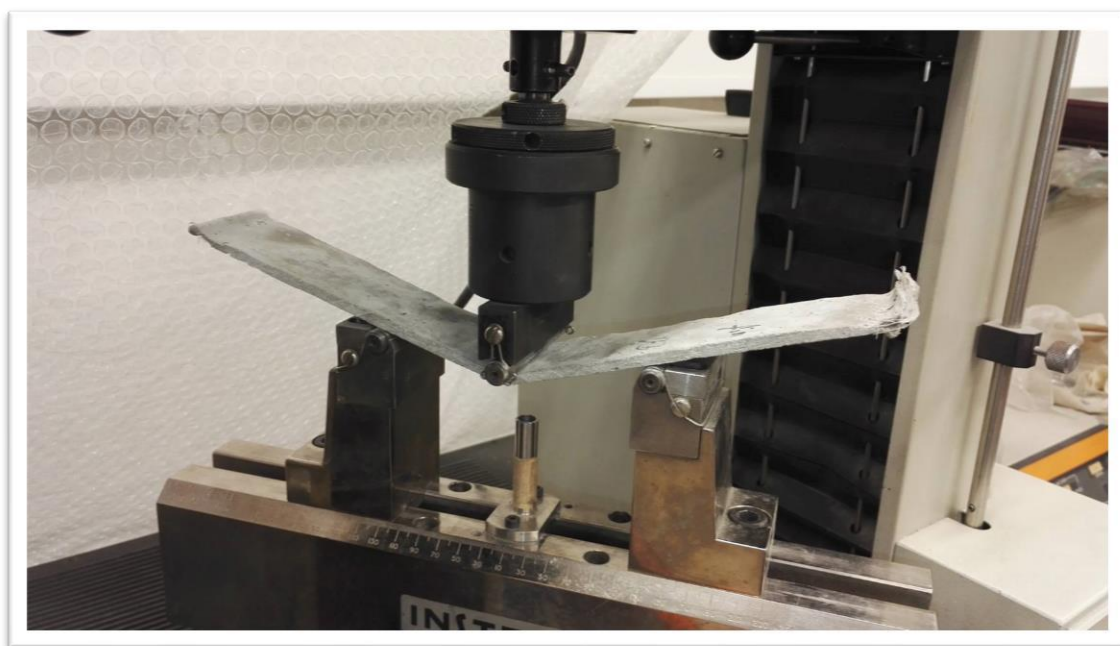
## 6. Závěrečné shrnutí výsledků

Typ materiálu	Průměrná pevnost v tahu [MPa]
Čistá uhlíková vlákna o průřezu 3 mm <sup>2</sup>	1410,8
Čistá uhlíková vlákna o průřezu 3,4 mm <sup>2</sup>	1412,2
Uhlíková vlákna zalitá pryskyřicí o průřezu 3 mm <sup>2</sup>	1719,6
Uhlíková vlákna zalitá pryskyřicí o průřezu 3,4 mm <sup>2</sup>	1763,8
Čedičová vlákna o průřezu 2,46 mm <sup>2</sup>	899,7

Na základě dosažených výsledků je možno konstatovat, že fixace vláken pryskyřicí zvyšuje i tak vynikající pevnost uhlíkových vláken o 20% na hodnotu 1,7 GPa.

## Pevnost kompozitních materiálů založených na zkoumaných vláknech v ohybu

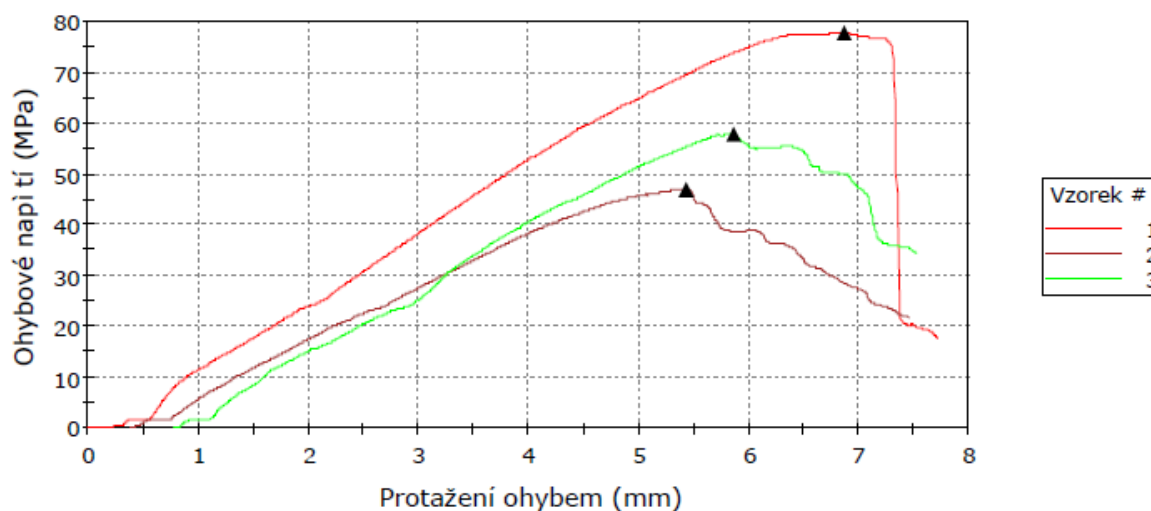
V druhé části výzkumu byly hodnoceny kompozity založené na zkoumaných vláknech. Byly připraveny ploché vzorky s obdélníkovým průřezem a to s matricí z dvou různých materiálů – geopolymery a portlandského cementu. Všechny vzorky, ať už z geopolymery nebo z portlandského cementu byly vždy doplněny plnivem – pískem v poměru 1:1,5. Vlákenná výztuž byla použita v jedné, dvou nebo třech vrstvách v daných vzorcích. Po uzrání materiálu matrice byly vzorky hodnoceny zkouškou v ohybu na stroji Instron 4202 s rozsahem 0 až 10



kN.

*Obr. 11 Probíhající zkouška ohybem na jednom z připravených vzorků.*

*Obr. 12 Příklad výstupního grafu z ohybové zkoušky. Data odpovídají kompozitu geopolymery a tří vrstev čistých uhlíkových vláken.*



## 1. Naměřené hodnoty

PORTLANDSKÝ CEMENT			GEOPOLYMER		
Typ vláken- počet vrstev- číslo vzorku	$F_{max}$ [N]	$\sigma_{max}$ [MPa]	Typ vláken- počet vrstev- číslo vzorku	$F_{max}$ [N]	$\sigma_{max}$ [MPa]
Čedič-1-1	357,05	49,22545	Čedič-1-1	117,32	48,20489
Čedič-1-2	238,93	32,94059	Čedič-1-2	120,54	49,52794
Čedič-1-3	266,58	36,75262	Čedič-1-3	104,43	42,90860
Čedič-2-1	184,70	5,917764	Čedič-2-1	170,21	32,68224
Čedič-2-2	231,41	7,414347	Čedič-2-2	136,38	26,18650
Čedič-2-3	230,07	7,371413	Čedič-2-3	122,15	23,45418
Čedič-3-1	851,82	20,94496	Čedič-3-1	705,51	44,55657
Čedič-3-2	907,39	22,31134	Čedič-3-2	681,88	43,06422
Čedič-3-3	876,78	21,55869	Čedič-3-3	599,74	37,87665
Čistý uhlík-1-1	217,99	25,94261	Čistý uhlík-1-1	148,19	48,98843
Čistý uhlík-1-2	214,23	25,49514	Čistý uhlík-1-2	166,98	55,20000
Čistý uhlík-1-3	290,74	34,60046	Čistý uhlík-1-3	140,41	46,41653
Čistý uhlík-2-1	230,07	12,56176	Čistý uhlík-2-1	336,92	50,51695
Čistý uhlík-2-2	143,63	7,842158	Čistý uhlík-2-2	162,96	24,43382
Čistý uhlík-2-3	458,26	25,02087	Čistý uhlík-2-3	414,50	62,14910
Čistý uhlík-3-1	678,39	16,14253	Čistý uhlík-3-1	778,26	68,40176
Čistý uhlík-3-2	937,19	22,30077	Čistý uhlík-3-2	468,46	41,17324
Čistý uhlík-3-3	1437,32	34,20155	Čistý uhlík-3-3	578,80	50,87109
Uhlík s pr.-1-1	172,35	35,34156	Uhlík s pr.-1-1	55,04	14,47363
Uhlík s pr.-1-2	203,76	41,7824	Uhlík s pr.-1-2	25,78	6,779255
Uhlík s pr.-1-3	193,56	39,69082	Uhlík s pr.-1-3	40,00	10,51863
Uhlík s pr.-2-1	204,57	23,31695	Uhlík s pr.-2-1	48,33	12,37248
Uhlík s pr.-2-2	157,86	17,99293	Uhlík s pr.-2-2	91,82	23,50592
Uhlík s pr.-2-3	196,78	22,42905	Uhlík s pr.-2-3	35,44	9,07264
Uhlík s pr.-3-1	620,14	36,69467	Uhlík s pr.-3-1	330,21	40,76667
Uhlík s pr.-3-2	526,18	31,13491	Uhlík s pr.-3-2	176,38	21,77531
Uhlík s pr.-3-3	536,65	31,75444	Uhlík s pr.-3-3	223,90	27,64198

## 2. Průměrné hodnoty pro dané kompozity

PORTLANDSKÝ CEMENT			GEOPOLYMER		
Typ vláken- počet vrstev	$F_{max}$ [N]	$\sigma_{max}$ [MPa]	Typ vláken- počet vrstev	$F_{max}$ [N]	$\sigma_{max}$ [MPa]
Čedič-1	287,52	39,63955	Čedič-1	114,1	46,88185
Čedič-2	215,39	6,901068	Čedič-2	142,91	27,44033
Čedič-3	878,66	21,60492	Čedič-3	662,38	41,83269
Čistý uhlík-1	240,99	28,6798	Čistý uhlík-1	151,86	50,20165
Čistý uhlík-2	277,32	15,1416	Čistý uhlík-2	304,79	45,69946
Čistý uhlík-3	1017,63	24,21487	Čistý uhlík-3	608,51	53,48232
Uhlík s pr.-1	189,89	38,93826	Uhlík s pr.-1	40,27	10,58963
Uhlík s pr.-2	186,4	21,24593	Uhlík s pr.-2	58,53	14,98368
Uhlík s pr.-3	560,99	33,19467	Uhlík s pr.-3	243,5	30,06173

Na základě dosažených výsledků je možno konstatovat, že geopolymerní kompozit s čedičovým nemodifikovaným uhlíkovým plnivem má vyšší hodnoty meze pevnosti v ohybu (MPa), oproti tomu u pryskyřici modifikovaného uhlíku jsou vyšší hodnoty pevnosti u portlandského cementu.