



Využití textilních materiálů pro vyztužování stavebních konstrukcí vytvořených metodou 3D tisku

Bakalářská práce

Studijní program:

B3107 Textil

Studijní obor:

Textilní technologie, materiály a nanomateriály

Autor práce:

Ladislav Bánský

Vedoucí práce:

Ing. Ondřej Novák, Ph.D.

Katedra netkaných textilií a nanovláknenných materiálů





Zadání bakalářské práce

Využití textilních materiálů pro vyztužování stavebních konstrukcí vytvořených metodou 3D tisku

Jméno a příjmení: **Ladislav Bánský**
Osobní číslo: T17000083
Studijní program: B3107 Textil
Studijní obor: Textilní technologie, materiály a nanomateriály
Zadávající katedra: Katedra netkaných textilií a nanovláknenných materiálů
Akademický rok: 2020/2021

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte rešerši na téma vyztužování stavebních hmot textilními materiály, 3D tisk stavebních hmot a testování mechanických vlastností stavebních výrobků.
2. Na základě rešerše vyberte vhodné typy vláknenných výztuží a navrhňte způsob vyztužení a zkoušení vlastností.
3. Experimentálně ověřte funkčnost výztuže.
4. Získané výsledky diskutujte a případně navrhňte zlepšení vyztužné funkce.

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

dle potřeby dokumentace
40-60 dle potřeby
tištěná/elektronická
Čeština



Seznam odborné literatury:

- [1] PERROT, Arnaud, ed. *3D printing of concrete: state of the art and challenges of the digital construction revolution*. London: ISTE, 2019. Civil engineering and geomechanics series. ISBN 978-1-78630-341-7.
- [2] BROCKMANN, Walter, Paul Ludwig GEISS, Jürgen KLINGEN, Bernhard SCHRÖDER a Bettina MIKHAIL. *Adhesive bonding: materials, applications and processes*. Weinheim: Wiley-VCH, 2009. ISBN 978-3-527-31898-8.
- [3] RILEY, Alano, ed. *Fiber reinforced polymers – the technology applied for concrete repair*. Valley Cottage: Scitus Academics, 2017. ISBN 978-1-68117-272-9.
- [4] KRATOCHVÍL, Bohumil, Václav ŠVORČÍK a Dalibor VOJTĚCH. *Úvod do studia materiálů*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2005. ISBN 80-7080-568-4.
- [5] BAREŠ, Richard. *Kompozitní materiály*. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, N. P., 1988. ISBN 04-734-88.

Vedoucí práce:

Ing. Ondřej Novák, Ph.D.
Katedra netkaných textilií a nanovláknenných materiálů

Datum zadání práce:

1. listopadu 2020

Předpokládaný termín odevzdání:

16. května 2022

doc. Ing. Vladimír Bajzík, Ph.D.
děkan

L.S.

doc. Ing. Jiří Chvojka, Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlášení

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

Jsem si vědom toho, že na mou bakalářskou 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 bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou 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 bakalářská 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.

12. května 2022

Ladislav Bánský

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval Ing. Ondřeji Novákovi, Ph.D. za odborné vedení, přínosné rady, trpělivost a pomoc při zpracování bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat mé rodině a přátelům za jejich podporu.

Anotace

Účelem práce je vybrat vhodnou kontinuální vlákennou výztuž pro betonové stavební prvky vytvořené metodou 3D tisku. Dále navrhnout a realizovat výrobu ověřovacích vzorků a ty experimentálně ověřit. Teoretická část se zabývá stavbou budov pomocí 3D tisku s využitím betonu jako stavebního materiálu, využitím vlákenných výztuží a studiem pevnostních charakteristik stavebních prvků. V experimentální části jsou vyrobeny betonové vzorky s využitím kontinuální vlákenné výztuže. Tyto vzorky jsou na základě rešerše dále testovány a výsledky vyhodnoceny.

Klíčová slova: 3D tisk, beton, vlákenná výztuž, adheze

Annotation

The purpose of the thesis is to choose a suitable continuous fiber reinforcement for concrete building elements created by the 3D printing method. The theoretical part deals with the construction of buildings using 3D printing of concrete as a building material. It deals with the use of fiber reinforcements and with the study of strength characteristics of building elements. In the experimental part there are produced concrete samples with the use of continuous fiber reinforcement. These samples are tested on the basis of the research. The results are evaluated.

Keywords: 3D printing, concrete, fiber reinforcement, adhesion

Obsah

Seznam obrázků	9
Seznam grafů	10
Seznam použitých zkratk	11
1 Úvod.....	13
2 Teoretická část	15
2.1 Materiály pro stavební konstrukce	15
2.1.1 Beton.....	15
2.1.1.1 Složky betonu	15
2.1.1.3 Hydratace cementu	16
2.1.1.4 Samozhutnitelný beton	17
2.1.1.5 Pórovitost betonu	17
2.1.1.6 Trvanlivost betonu	18
2.2 Textilní vlákenné výztuže ve stavebnictví	19
2.2.1 Uhlíková vlákna.....	21
2.2.2 Skleněná vlákna	22
2.2.3 Čedičová vlákna.....	24
2.3 3D tisk	26
2.3.1 Úvod do 3D tisku.....	26
2.3.2 Technologie 3D tisku	27
2.3.2.1 Vytlačování materiálu (extruze)	27
2.3.2.2 Vstřikování pojiva na materiál ve formě prášku.....	29
2.3.2.3 Laminování plátů / desek	29
2.3.3 3D tisk materiálů na bázi cementu	29
2.3.4 3D tisk budov	30
2.3.5 Použití vláken v 3D tisku	35
2.4 Adheze vlákenných výztuží k betonu	36

2.4.1 Používaná adheziva	37
2.5 Testování mechanických vlastností stavebních výrobků	38
2.5.1 Testování pevnosti.....	39
3 Praktická část	43
3.1 Použité materiály.....	43
3.1.1 Materiály použité na výrobu forem	43
3.1.2 Materiály použité na výrobu zkušebních vzorků.....	43
3.2 Výroba vzorků.....	44
3.2.1 Výroba betonových trámků	44
3.2.2 Výroba betonových válečků	46
3.3 Postup měření.....	50
3.3.1 Měření betonových trámků tříbodovým ohybem	50
3.3.2 Měření betonových válečků vytahovací metodou	50
4 Vyhodnocení a diskuze	51
4.1 Vyhodnocení výsledků měření tříbodovým ohybem	51
4.2 Vyhodnocení výsledků měření vytahovací metodou	53
5 Závěr	57
Seznam použité literatury	59
Přílohy.....	63

Seznam obrázků

Obrázek 1: Komponenty a složky běžného betonu	16
Obrázek 2: Základová deska ukládaná pod vodu pro suchý dok v Terstu, Itálie	17
Obrázek 3: Rozdělení vlákněných výztuží podle jejich délky a orientace	20
Obrázek 4: Vytlačovací hlava skládající vrstvy materiálu na sebe	28
Obrázek 5: Stavba domu 3D tiskem s použitím pevného robotického ramena	30
Obrázek 6: Rodinný dům v Nantes vyrobený 3D tiskem	31
Obrázek 7: Příklad šestiosého robotického ramene	32
Obrázek 8: Mobilní robot	32
Obrázek 9: Portálový jeřáb schopný zajistit tisk vícepatrové budovy	33
Obrázek 10: Jeřáb nesoucí tiskovou hlavu s gyroskopem	34
Obrázek 11: Klenutá budova vytvořená procesem 3D tisku	35
Obrázek 12: Mezifázové rozhraní	37
Obrázek 13: Schéma tříbodového a čtyřbodového ohybu	41
Obrázek 14: Uhlíkový roving	43
Obrázek 15: Čedičový roving	43
Obrázek 16: Polyesterová prskyřice	44
Obrázek 17: Chemická kotva Quikfix	44
Obrázek 18: Rozdělení vzorků do kategorií	45
Obrázek 19: Obrázek formy bednění.....	46
Obrázek 20: Rozdělení zkoušených válečků do kategorií, včetně zkratk.....	47
Obrázek 21: Pásová pila Femi	48
Obrázek 22: Výrobek těsně po odlití betonu	49
Obrázek 23: Měřicí přípravek.....	49
Obrázek 24: Neostrý přetrh testovaného svazku vláken.....	56
Obrázek 25: Přerušení na hranici matrice a vnějšího prostředí	56
Obrázek 26: Vytažený svazek vláken z matrice	56

Seznam grafů

Graf 1: Porovnání síly potřebné k přerušení různých typů trámů tříbodovým ohybem	52
Graf 2: Porovnání síly potřebné k vytažení nebo přerušení výztuže v betonovém válečku	53
Graf 3: Porovnání síly potřebné k vytažení nebo přerušení uhlíkové výztuže z betonového válečku	54
Graf 4: Porovnání síly potřebné k vytažení nebo přerušení čedičové výztuže z betonového válečku	55

Seznam použitých zkratek

2D	dvoudimenzionální
3D	třídimenzionální
BF	čedičové vlákno (basalt fiber)
BF_33%	čedičové vlákno s kotevní délkou 33 % celkové délky
BF_66%	čedičové vlákno s kotevní délkou 66 % celkové délky
BF_100%	čedičové vlákno s kotevní délkou 100 % celkové délky
BF_CH_33%	čedičové vlákno s chemickou kotvou s kotevní délkou 33 % celkové délky
BF_CH_66%	čedičové vlákno s chemickou kotvou s kotevní délkou 66 % celkové délky
BF_CH_100%	čedičové vlákno s chemickou kotvou s kotevní délkou 100 % celkové délky
BF_PES_33%	čedičové vlákno s polyesterovou pryskyřicí s kotevní délkou 33 % celkové délky
BF_PES_66%	čedičové vlákno s polyesterovou pryskyřicí s kotevní délkou 66 % celkové délky
BF_PES_100%	čedičové vlákno s polyesterovou pryskyřicí s kotevní délkou 100 % celkové délky
CF	uhlíkové vlákno (carbon fiber)
CF_33%	uhlíkové vlákno s kotevní délkou 33 % celkové délky
CF_66%	uhlíkové vlákno s kotevní délkou 33 % celkové délky
CF_100%	uhlíkové vlákno s kotevní délkou 33 % celkové délky
CF_CH_33%	uhlíkové vlákno s chemickou kotvou s kotevní délkou 33 % celkové délky
CF_CH_66%	uhlíkové vlákno s chemickou kotvou s kotevní délkou 66 % celkové délky

CF_CH_100%	uhlíkové vlákno s chemickou kotvou s kotevní délkou 100 % celkové délky
CF_PES_33%	uhlíkové vlákno s polyesterovou pryskyřicí s kotevní délkou 33 % celkové délky
CF_PES_66%	uhlíkové vlákno s polyesterovou pryskyřicí s kotevní délkou 66 % celkové délky
CF_PES_100%	uhlíkové vlákno s polyesterovou pryskyřicí s kotevní délkou 100 % celkové délky
CH	chemická kotva
PES	polyesterová pryskyřice
UV	ultrafialové
WR	bez výztuže (without reinforcement)

1 Úvod

3D tisk je poměrně mladým odvětvím výroby prototypů i hotových výrobků. Byl představen v 80. letech 20. století, ale do povědomí společnosti se dostává až v posledním desetiletí. Technologie 3D tisku je považována za průmyslovou revoluci, 3D tisk už není spojován jen s výrobou prototypů, ale je pokládán za aditivní výrobu. Tato technologie může zrychlit individuální výstavbu a zlepšit cenovou dostupnost takto vytvořených stavebních objektů.

V teoretické části práce jsou uvedeny materiály používané pro stavební konstrukce, pozornost je zaměřena hlavně na beton, který je základním materiálem pro stavby. Dále je pozornost věnována textilním materiálům používaným k vyztužování stavebních hmot. 3D tiskem se zabývá třetí kapitola, ve které jsou popsány technologie, kterými je možné beton tisknout a jsou zde uvedeny příklady robotů, které jsou schopny tyto výrobky realizovat. Následuje krátká kapitola věnovaná adhezi, ve které jsou uvedena vybraná adheziva, jež jsou nezbytná pro zajištění mechanických vlastností konstrukčních prvků. Další kapitola shrnuje testování mechanických vlastností stavebních výrobků.

V experimentální části je úkolem vytvořit betonové zkušební vzorky vyztužené kontinuálními vlákny a testovat jejich mechanické vlastnosti, hlavně pak odolnost proti tahovému namáhání. Dalším předmětem studia je vliv adheziv na přilnavost výztuží k matici. Testování zkušebních vzorků je provedeno metodou tříbodového ohybu a vytahovací metodou.

V této práci je pozornost věnována betonu, z důvodu možnosti jej tisknout pomocí 3D tisku v jeho čerstvé podobě. Je známo, že beton má velmi vysokou odolnost vůči působení tlaku, avšak odolnost v tahu je velmi nízká. Jelikož jsou betonové konstrukce podrobovány namáhání na kombinaci různých mechanismů (tah, tlak, tah a tlak za ohybu), nabízí se otázka, jak a čím tyto tištěné konstrukce vyztužit, aby účinně odolávaly zejména tahovému napětí. Vzhledem k výborným mechanickým vlastnostem oceli se k vyztužování betonu tento materiál nabízí, a také je pro většinu betonových konstrukcí používán. Ocel je však v té podobě, jak je využívána nyní pro vyztužování betonu, pro 3D tisk nevhodná, neboť není poddajná a nelze její požadovaný tvar formovat současně s tiskovou stopou. Proto je tato práce zaměřena na textilní výztuže, které se již s výhodou využívají pro výrobu kompozitních materiálů a poskytují potřebnou tvarovou

formovatelnost. Další předností využití textilních vláken je, že mají na rozdíl od oceli výrazně menší objemovou hmotnost, z tohoto důvodu vznikají lehčí konstrukce.

Spojení betonu s výztužemi je velmi důležité pro výslednou kvalitu vyztužení. Cílem práce je určit efekt vyztužení cementové kaše vláknými výztužemi a také zjišťováním vlivu adheziv na přilnavost vlákných svazků k cementové matrici a jejich vlivu na mechanické vlastnosti.

2 Teoretická část

2.1 Materiály pro stavební konstrukce

Pro stavební konstrukce může být použito několik různých stavebních materiálů: stavební kámen, dřevo, hlína, jíl, konstrukční ocel, asphalt, plasty, beton, atd. Tato práce je zaměřena právě na beton [1].

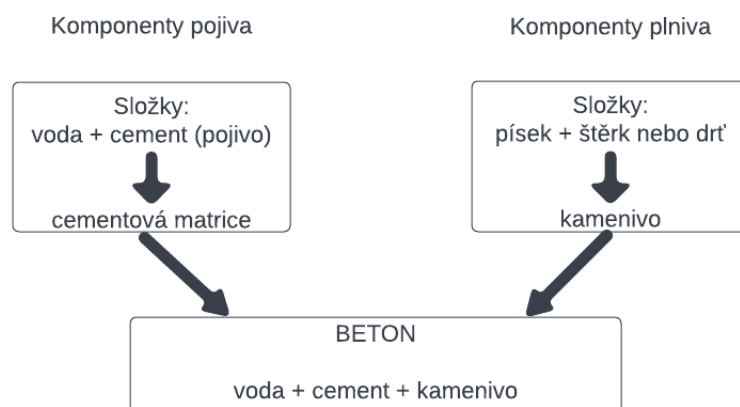
2.1.1 Beton

Beton je nejpoužívanějším materiálem pro stavbu budov, ať už k tvorbě základů nebo svislých a vodorovných konstrukčních prvků. K výrobě optimálního betonu je zapotřebí věnovat péči každé jednotlivé fázi betonáže: volbě složek a jejich poměrů, míchání, dopravě betonu, jeho ukládání, zhutňování, odformování a ošetřování. Od vyrobeného betonu požadujeme především dobré mechanické vlastnosti, nízkou pórovitost a dlouhou trvanlivost [2].

2.1.1.1 Složky betonu

Běžný beton se skládá ze dvou hlavních složek (viz obr. 1): drobných a hrubých kamenů a pojiva (nejčastěji cementové matrice, která je složena z cementu a vody), které obaluje a spojuje jednotlivá zrna kameniva. Kamenivo se skládá alespoň ze dvou složek: písku a šterku nebo drti. Podle typu pojiva vznikají různé druhy betonu, např. cementový beton, vápenatý beton, sádrový beton, asphaltový beton a další. K těmto hlavním složkám jsou za účelem zlepšení vlastností betonu (získání speciálního betonu) přidávány další složky, tekuté chemické přísady, práškové minerální příměsi a kovová nebo polymerní vlákna. Do čerstvého betonu jsou přidávány urychlovače a superplastifikátory, jež zajišťují ztužení betonu, který má krátce po promíchání nízkou viskozitu. Jakmile se přestane míchat, směs se zpevní [3].

Ačkoliv je důležité volit pro beton správné složky, rozdíl mezi kvalitním a nekvalitním betonem nespočívá ani tolik ve volbě složek, ale spíše v poměru, v jakém jsou složky smíchány a v pečlivosti věnované ukládání betonu, jeho zhutňování a ošetřování. Ošetřování následuje poté, co je beton zbaven bednění nebo formy [3].



Obrázek 1: Komponenty a složky běžného betonu [3]

2.1.1.2 Tuhnutí a tvrdnutí betonu

Po promíchání všech potřebných složek se získaná směs dopravuje na místo uložení (např. do pevných forem nebo do bednění) a ve většině případů je prováděno zhutnění, které zajišťuje kvalitní vyplnění formy či bednění. Po zatuhnutí vznikne výrobek požadovaného tvaru. Během následujícího procesu tvrdnutí nabývá výrobek požadované pevnosti a dalších vlastností. V případě použití silikátových cementů jako pojiva, tj. v případě hydraulicky vytvrzovaných pojiv, je nedílnou složkou betonu záměšová voda, která je nutná pro nastartování a průběh procesu tuhnutí a tvrdnutí [4].

2.1.1.3 Hydratace cementu

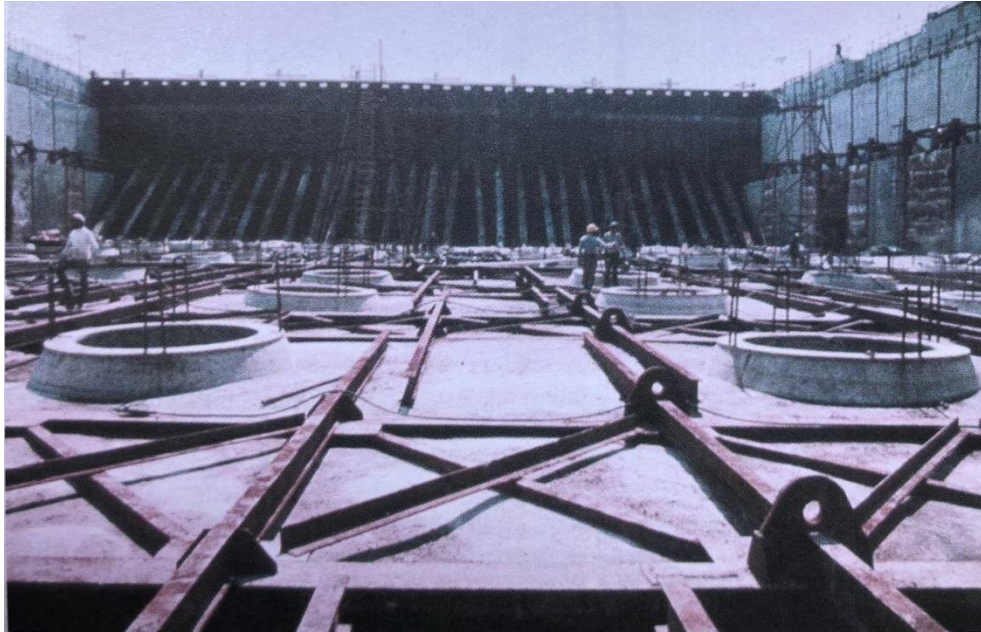
Při hydrataci cementu dochází k navázání molekul vody na ionty nebo molekuly sloučeniny. Díky hydrataci cementu dochází k vytvrzování betonu, který může být následně použit jako konstrukční materiál. Při hydrataci přechází beton z plastického stavu do pevného stavu podobného hornině, který je mechanicky odolný. Hydratací molekul vody s cementem vzniká hydroxid vápenatý, také nazývaný jako hašené vápno [3].

Během chemických reakcí mezi cementem a vodou dochází ke dvěma změnám:

- k postupnému poklesu zpracovatelnosti čerstvého betonu až do úplné ztráty schopnosti být tvarován (tuhnutí),
- k postupnému nárůstu pevnosti (tvrdnutí) [3].

2.1.1.4 Samozhutnitelný beton

Běžný beton musí být při ukládání zhutňován (většinou vibracemi), zatímco samozhutnitelný beton je odolný proti segregaci, tím pádem je možno ho ukládat bez použití zhutňování. Tento speciální typ betonu může být díky své vysoké kohezi ukládán i pod vodou. Příkladem použití tohoto typu betonu je stavba suchého doku v Terstu v Itálii [2], viz obr. 2.



Obrázek 2: Základová deska ukládaná pod vodu pro suchý dok v Terstu, Itálie [3]

2.1.1.5 Pórovitost betonu

Kapaliny mohou pórovitým materiálem procházet jen tehdy, pokud jsou spolu póry propojeny. Beton může mít nespojitou pórovitost, díky které může odolávat průsaku, pokud kapilární pórovitost nepřesáhne určitou mez. Ke snížení množství pórů je doporučeno použít plastifikátory. Snížení množství pórů v betonu má za výsledek vyšší pevnost [3].

Pórovitost betonu zásadně ovlivňuje jeho vlastnosti, jako je pevnost, modul pružnosti, permeabilita a trvanlivost. Je definována jako poměr objemu dutin k objemu materiálu.

$$n = \frac{V_p}{V_c} \quad (1)$$

n – pórovitost [%], V_p – objem pórů [m^3], V_c – celkový objem materiálu [m^3]

Póry vznikající nedokonalým zhutněním betonové směsi

Nedokonalé zhutnění betonu má za následek tvorbu nepravidelných dutin, které jsou v nedokonale zhutněném betonu hojně zastoupeny.

Póry přítomné v zrnech kameniva

Důsledkem je růst tepelně-izolačních vlastností betonu, ale také pokles jeho mechanických vlastností.

Pórovitost ve formě provzdušnění

Jedná se o výskyt uzavřených pórů (bublin) o velikosti 100–300 μm . Tyto póry mohou být pozorovány optickým mikroskopem. Jsou důsledkem použití provzdušňovacích přísad, které jsou přidávány do betonové směsi za účelem zvýšení mrazuvzdornosti ztvrdlého betonu.

Kapilární póry

Kapilární póry vznikají mezi zrny hydratovaného cementu. Mají nepravidelný tvar a velikost od 0,1 do 10 μm . Tudíž mohou být pozorovány jen elektronovým mikroskopem. Výskyt těchto pórů je závislý na vodním součiniteli a na způsobu ošetřování betonu.

Gelové póry

Tyto póry se vyskytují uvnitř pevných hydrátů. Jejich velikost se pohybuje od 1–10 nm. Tyto póry se nedají pozorovat ani elektronovým mikroskopem, ale jsou zjišťovány prostřednictvím adsorpce plynů: dusíku, hélia nebo vodní páry [3].

2.1.1.6 Trvanlivost betonu

Trvanlivost betonu je jeho odolnost vůči vnějším vlivům po dobu jeho životnosti. Beton s výztuží vzájemně doplňují své vlastnosti, výztuž zlepšuje mechanické vlastnosti betonových konstrukcí, které podléhají tahovému nebo smykovému namáhání a beton chrání výztuž před vlivem okolního prostředí. Degradaci betonu a jeho výztuže mohou způsobit následující vlivy [3].

Chemické vlivy

Jedná se především o vystavení agresivním činidlům (oxid uhličitý, chloridy a sulfáty) s podporou okolního prostředí (kyslík a voda), vůči těmto vlivům je velmi zranitelná betonářská ocel.

Koroze kovů a jiných materiálů obsažených v betonu

K degradaci výztuže dochází zejména, když má beton nízkou kvalitu a jeho krycí vrstva je příliš tenká. Pokud je betonové krytí tenké a navíc porézní, tak je výztuž vystavena působení chemických vlivů a dochází k její oxidaci (rezivění). Rez má výrazně menší hustotu než ocel, což způsobí odlupování a odpadávání krycí vrstvy. Korozi oceli se dá zamezit nebo ji zpomalit přidáním chemických přísad proti korozi, nebo použitím kovu odolného proti korozi (např. pozinkováním, použití nerezové oceli).

Změny teplot (rozmrazování a zmrazování)

Pokud kamenivo není mrazuvzdorné, nelze ho použít pro výrobu betonu vystaveného střídavému zmrazování a rozmrazování. Porušení kameniva mrazem je většinou spojeno s přítomností vody v pórech kameniva. Při mrznutí vody se vyvíjí hydraulický tlak, protože při přeměně vody v led se zvýší jeho objem. Je možné použít provzdušňující přísady, které jsou schopny chránit před působením ledu cementovou maticí. Tyto přísady ovšem nejsou schopny chránit kamenivo.

Alkalicko-křemičitá reakce

Beton je náchylný k alkalicko-křemičitým reakcím, pokud obsahuje alkalický cement a alkalicky reaktivní kamenivo. Poškození lze předejít použitím vhodného množství pucolánu nebo strusky.

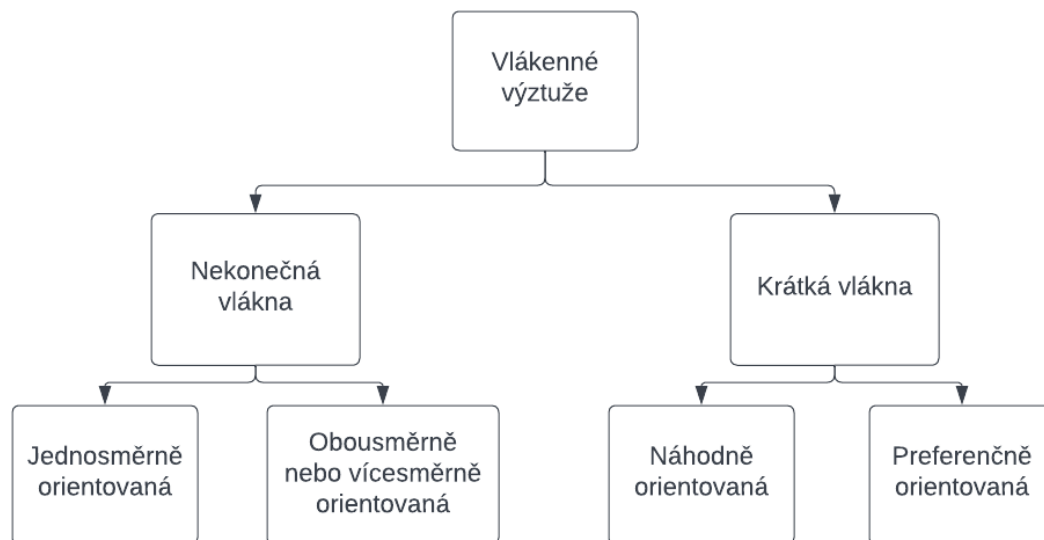
Oděr

Uvažujeme o něm hlavně u podlah či vozovek. Oděru lze předcházet volbou vhodného otěruvzdorného kameniva [3].

2.2 Textilní vláknenné výztuže ve stavebnictví

Vláknenné výztuže poskytují výrobku zlepšené mechanické vlastnosti, zejména pevnost a tuhost. Vláknna nejsou přímo použitelná jako konstrukční materiály, a proto jsou zabudována do materiálu matrice, aby spolu vytvořily vláknitý kompozit.

Vláknenné výztuže můžeme dělit podle délky použitých vláken (krátká a nekonečná) a podle orientace ve výrobku, viz obr. 3. V následujících podkapitolách jsou vláknenné výztuže rozděleny podle délky. Vláknenné výztuže se dělí na jednovrstvé a vícevrstvé. Příkladem jednovrstvé výztuže je roving. Příkladem výrobku z vícevrstvých výztuží je laminát [5].



Obrázek 3: Rozdělení vláknenných výztuží podle jejich délky a orientace [5]

Krátká vlákna

Výztuže z krátkých vláken mohou být v kompozitu orientována buď nahodile, nebo preferenčně. Vlákna orientovaná náhodně obsahují např. netkané rohože. Nasekaná vlákna mohou být stříkána současně s kapalnou pryskyřicí do formy pro vytvoření struktury s krátkými vlákny. Při procesu tvarování kompozitu může dojít k preferenční orientaci vláken ve směru toku materiálu. Tento jev je zvláště využíván v technologii vstřikování. Je tak možné pomocí změny směru vstřikování zajistit odlišnou orientaci vláken v jednotlivých vrstvách [4].

Nekonečná vlákna

Výztuže z nekonečných vláken mohou být jednosměrně nebo vícesměrně orientovány.

1) Jednosměrně orientovaná vlákna

Výsledné výrobky s jednosměrně orientovanými vlákny jsou velmi pevné ve směru osy vláken, ale v kolmém směru jsou obecně slabé. Např. lepicí pásy ze skleněných vláken, které mají v podstatě jednosměrnou výztuž, jsou široce používány pro vysoce namáhané těsnící aplikace. Jednosměrně orientovaná vlákna jsou vhodnými výztužemi pro dlouhé tyčovitě struktury. Příkladem jednosměrně orientované výztuže je roving – svazek několika stovek nezakroucených vláken [4].

2) Obousměrně nebo vícesměrně orientovaná vlákna

Jednosměrné vlákenné útvary se spojují pro dosažení obousměrné nebo vícesměrné orientace vláken. Roviny mohou být tkány pro získání obousměrných nebo vícesměrných výztuh, které se používají k výrobě kompozitů s vysokou pevností a tuhostí ve více než jednom směru. Směrové vlastnosti výztužné tkaniny se řídí tkací vazbou. Dalším příkladem takto orientovaných výztuží jsou geomříže, které se používají pro vyztužování infrastruktury, zpevnění svahů, atd. [4].

2.2.1 Uhlíková vlákna

Existence uhlíkových vláken byla objevena v roce 1879, kdy Edison začal používat uhlíková vlákna vhodná pro použití v elektrických lampách [6].

Rozdělení uhlíkových vláken

Na základě modulu, pevnosti a konečné teploty tepelného zpracování lze uhlíková vlákna rozdělit do následujících kategorií.

Rozdělení podle modulu uhlíkového vlákna:

- ultra-vysoký modul, typ UHM (modul > 450 GPa),
- vysoký modul, typ HM (modul mezi 350 – 450 GPa),
- mezilehlý modul, typ IM (modul mezi 200 – 350 GPa),
- nízký modul a vysokou pevnost v tahu, typ HT (modul < 1000 GPa, pevnost v tahu > 3,0 GPa),
- super vysokou pevnost v tahu, typ SHT (pevnost v tahu > 4,5 GPa).

Na základě prekurzorových vláknitých materiálů se uhlíková vlákna dělí na:

- uhlíková vlákna na bázi PAN,
- uhlíková vlákna na bázi smoly,
- mezifázové smoly na bázi uhlíku,
- izotropní uhlíková vlákna na bázi smoly,
- uhlíková vlákna na bázi umělého hedvábí.

Na základě konečné teploty tepelného zpracování jsou uhlíková vlákna rozdělena následovně:

- uhlíková vlákna typu I – vysoce tepelně zpracovaná (HTT) s konečnou teplotou tepelného zpracování vyšší než 2000 °C,

- uhlíková vlákna typu II – se středním tepelným zpracováním (IHT) s konečnou teplotou tepelného zpracování kolem nebo nad 1 500 °C,
- uhlíková vlákna typu III – uhlíková vlákna s nízkým tepelným zpracováním (LHT) s konečnou teplotou tepelného zpracování 1000 °C [7].

Výroba uhlíkových vláken

Uhlíková vlákna se vyrábí procesem karbonizace (oxidací a tepelnou pyrolýzou) polyakrylonitrilových vláken (PAN), smol nebo pryskyřic při vysokých teplotách. Prostřednictvím dalších procesů grafitizování nebo protahování lze zvýšit pevnost nebo pružnost vláken. Uhlíková vlákna jsou vyráběna v průměrech od 9 do 17 μm. Tato vlákna jsou vinuta do větších svazků pro transport a další výrobní procesy [7].

Vlastnosti uhlíkových vláken

Uhlíková vlákna jsou druhem vysoce pevných materiálů. Obecně platí, že čím vyšší je pevnost v tahu prekurzoru, tím vyšší je houževnatost uhlíkového vlákna. Pevnost v tahu a modul jsou oproti prekurzoru výrazně zlepšeny. Celková pevnost uhlíkového vlákna závisí na typu prekurzoru, podmínkách zpracování, teplotě tepelného zpracování a přítomnosti vad a defektů. Uhlíková vlákna jsou velmi křehká. Vrstvy ve vláknech jsou tvořeny silnými kovalentními vazbami. Plošné shluky umožňují snadné šíření trhlin [7].

Použití uhlíkových vláken

Uhlíková vlákna se používají k vyztužení betonových konstrukcí, které je důležité v oblastech náchylných k zemětřesení. Ačkoli ocel je primárním materiálem používaným k vyztužení a opravě betonových konstrukcí, je náchylná ke korozi. Vysoká pevnost a modul činí uhlíková vlákna vhodnými pro ochranu konstrukcí náchylných k seismické aktivitě [7].

2.2.2 Skleněná vlákna

Skleněná vlákna lze rozdělit do dvou hlavních skupin podle jejich geometrie: vlákna nekonečná používaná jako délkové textilie a vlákna krátká používaná pro izolaci a filtraci, pro svou pevnost a chemickou odolnost jsou také využívána jako výztuže do stavebních konstrukcí. Sklo se většinou skládá z: 50 % křemíku, oxidu boritého, hliníku a několika dalších minerálů. Soda a vápenec pomáhají především snižovat teplotu tání. Jiné přísady se používají ke zlepšení určitých vlastností, jako je borax pro chemickou odolnost. Jako surovina se také používá odpadní sklo, nazývané také střepy. Suroviny

musí být pečlivě zváženy v přesných množstvích a důkladně smíchány dohromady (tzv. dávkování) před roztavením do skla [8].

Rozdělení skla

E-sklo obsahuje 55 % SiO₂, 8 % Al₂O₃, 18 % CaO, 4,6 % MgO. E-sklo je používáno pro výrobu skleněných vláken. Má izotropní strukturu.

C-sklo obsahuje 65 % SiO₂, 14 % CaO, 5 % Li₂O, 8,5 % Na₂O. Dobře odolávají chemické korozi.

S-sklo obsahuje 65 % SiO₂, 25 % Al₂O₃, 10 % MgO. Je odolné vůči vysokým teplotám.

AR-sklo (alkalicky odolné sklo) obsahuje 53–63 % SiO₂, 21–23 % ZrO₂, 10–21 % Na₂O. AR sklo je používáno pro výrobu skleněných vláken odolných proti alkáliím [4; 8].

Výroba skleněných vláken

Skleněná vlákna se vyrábějí tavením v peci, která má 3 sekce. Navážené komponenty jsou vloženy do zásobníku, kde jsou promíchány. Směs proudí do první sekce pece, kde dochází k zahřátí materiálu až na teplotu 1370 °C a k odvodu vzniklých plynů a k homogenizaci. V druhé sekci pece se sníží teplota ohřevu taveniny na 1260 °C a jsou přidány příměsi, které zajišťují zvětšení objemu vzniklých bublin v tavenině a jejich vzestup. Ve třetí sekci dochází k přeměně taveniny na nekonečná skleněná vlákna, tavenina prochází přes vyhřívanou trysku s několika stovkami otvorů. Vlákna jsou chlazená, jakmile dojde k odtažení z trysky. Následuje preparační fáze, ve které dojde k nánosu tenké vrstvy impregnace na skleněná vlákna [8].

Ochranné nátěry

Kromě pojiv jsou pro výrobky ze skelných vláken vyžadovány další povlaky. Lubrikanty se používají ke snížení otěru vláken a jsou buď přímo nastříkány na vlákno, nebo přidány do pojiva [8].

Vlastnosti skleněných vláken

Skleněná vlákna mají nízkou odolnost v ohybu, tím pádem je jejich textilní zpracování ztíženo. Mají odolnost proti kyselinám. Z hlediska modulu jsou izotropní. Skleněná vlákna odolávají teplotám nad 450 °C. Zvýšené odolnosti je dosaženo použitím solí hliníku. Tímto způsobem je zvýšena teplota tání z 1000 °C na 1500 °C. Tkaniny ze skleněných vláken mají nízkou tepelnou vodivost 0,6 Wm⁻¹K⁻¹. Mají nízkou měrnou

hmotnost, vysokou pevnost a nízký modul. Odolávají ohni a řadě chemikálií. Nevýhodou je snížená odolnost vůči dlouhodobému statickému zatěžování [9].

Použití

Skleněná vlákna nacházejí využití v oblasti vyztužování kompozitů díky jejich vysoké pevnosti. Nejčastěji se s nimi vyztužují plasty v oblasti automobilového, lodního, leteckého průmyslu. Kompozity se skleněnými vlákny se používají například pro plavecké bazény, tobogány, kanoe, potrubí, zásobní nádrže, žebříky a zábradlí. Dále se používají jako materiály pro izolace, filtrační textilie, textilie odolávající ohni [8].

2.2.3 Čedičová vlákna

Čedič je vulkanická hornina (ztuhlá láva), která se taví přibližně při 1400 °C. Čedičová vlákna jsou hladká vlákna s plným kruhovým průřezem a sklovitou strukturou. Vlákna, u kterých nastala krystalizace, jsou vysoce křehká a lámavá. Barevný vzhled čedičových vláken je dán použitím surovin při výrobě. Mohou být hnědá, žlutá, hnědozelená, žlutohnědá atd. Délka vláken je dána výrobním postupem. Čedičová vlákna našla uplatnění jako náhrada za azbestová vlákna [9].

Rozdělení čedičů

Čediče se dělí do 3 skupin podle obsahu SiO_2 v chemickém složení:

- alkalické čediče s obsahem SiO_2 do 42 %,
- slabě kyselé čediče s obsahem SiO_2 od 43 do 46 %,
- kyselé čediče s obsahem SiO_2 nad 46 % (využívané pro výrobu vláken) [9].

Výroba čedičových vláken

Výrobu čedičových vláken můžeme obecně rozdělit podle principu tvarování do dvou skupin:

- tažení nekonečného vlákna z taveniny,
- přerušení proudu taveniny spojené s tažením krátkých vláken (o délce 1–500 mm).

Dále můžeme výrobní způsoby rozčlenit do tří skupin:

- pneumatické způsoby,
- odstředivé způsoby,
- kombinované způsoby.

Výroba čedičových vláken je podobná výrobě skelných vláken, výroba čedičových vláken je ale jednodušší, jelikož nevyžaduje žádnou sekundární surovinu. Čedičová hornina je rozdrvena, očištěna a pak je dávkována do zásobníku. Poté je dopravena do tavicí vany, která je uložena v peci vyhřívané na 1450 °C. V další sekci je teplota taveniny ještě více kontrolována, a je míchána kvůli homogenizaci taveniny a zajištění stejnoměrné viskozity. Následně proudí tavenina k tryskám, ze kterých jsou taženy nekonečné čedičové filamenty buď pneumatickým, nebo odstředivým způsobem. Počet a průměr děr v tryskách je dán požadavky na použití filamentů. Vytažená vlákna jsou impregnována tenkou vrstvou. Filamenty mohou být druženy nebo zakrouceny a navíjeny anebo nařezány na krátká vlákna [9].

Vlastnosti čedičových vláken

Čedičová vlákna jsou ekologická, netoxická, dobře dostupná, vykazují vysokou stabilitu, dobré tepelně-izolační i zvukově izolační vlastnosti. Jsou nehořlavá, silně tlumí pronikající oheň a plameny. Lze je dlouhodobě používat při teplotách do 700 °C. Jejich tepelná vodivost se pohybuje v rozmezí 0,03 až 0,04 Wm⁻¹K⁻¹ při teplotě 20 °C. Čedičová vlákna mají trojnásobně lepší tepelně-izolační vlastnosti než vlákna vyrobená z azbestu. Čedičová vlákna jsou vysoce odolná vůči vlhkosti a vodě (teplé i studené), protože obsahují málo OH-skupin. Čedičová vlákna výborně odolávají alkáliím (i koncentrovaným). Ve srovnání se skleněnými vlákny jsou však méně odolná vůči kyselinám. Nezanedbatelná je pevnost a tažnost vláken. V textilním průmyslu jsou vlákna využívána pro svou nehořlavost, chemickou odolnost a odolnost proti vlhkosti [9; 10].

Použití čedičových vláken

Čedičová vlákna mohou být používána pro protipožární aplikace. Pro svou nehořlavost, výbornou chemickou a tepelnou odolnost se mohou čedičové materiály použít na výrobu ochranného oblečení. Z ekonomického hlediska nalézají čedičová vlákna své uplatnění v aplikacích, kde jsou používána i skleněná a uhlíková vlákna [10].

Vlastnosti čedičových vláken mají důležitý význam ve stavebnictví. K jejich charakteru patří nízká měrná hmotnost při vysokých hodnotách mechanického namáhání, dále korozní odolnost, výborné dielektrické vlastnosti, nízká tepelná vodivost, vysoká rozměrová stálost a minimální požadavky na dlouhodobou údržbu. Čedičová vlákna se také používají jako výztužné složky do kompozitů. Budovy obsahující kompozity z čedičových vláken, které jsou postaveny blízko silnic, železnic či metra, vstřebávají více

vibrací než kompozity ze skleněných vláken. Novým trendem je využití výrobků z čedičových vláken do vláknobetonů. Zde nahrazují ocel nebo skleněná vlákna.

V současné době se čedič používá ve stavebnictví převážně k výrobě čedičové dlažby. Dále se z čedičových vláken vyrábějí perlinkové tkaniny. Ty slouží pro vyztužování fasádních zateplovacích systémů a do omítkových systémů. Jako další se z čedičových vláken vyrábí čedičová vata. Ta je vhodná pro nezátížené zvukové, tepelné a protipožární izolace [9].

Čedičová vlákna se také využívají k výrobě geotextilií, které slouží převážně v silničním a železničním stavitelství. Další využití těchto vláken je na výrobu tepelně-izolačních směsí pro žáruvzdorné stavební hmoty, jako plniva do tmelů apod. [10].

Přehled použití čedičových vláken:

- vnější a vnitřní tepelné a zvukové izolace,
- výplň prasklin poškozených budov, mostů a stavebních konstrukcí,
- filtry pro pěstování rostlin v živných roztocích,
- vyztuž betonových a asfaltových chodníků a silnic,
- zvukové tlumení silnic,
- potrubí pro ohřev teplé vody,
- potrubí pro transport chemicky agresivních médií,
- čerpadla pro agresivní kapaliny a plyny,
- nehořlavé tepelné a zvukové izolace pro kabiny, motory aut, plavidel a letadel,
- drenážní potrubí [10].

2.3 3D tisk

2.3.1 Úvod do 3D tisku

3D tisk je proces sestavování materiálu, obvykle vrstvu po vrstvě, za účelem výroby objektů nebo struktur. Výchozím bodem pro jakýkoli proces 3D tisku je 3D digitální model, který lze vytvořit v různých 3D softwarových programech. 3D model je následně rozložen na jednotlivé vrstvy, čímž se z návrhu stane soubor čitelný pro 3D tiskárnu. Materiál, se kterým tiskárna pracuje, se poté začíná vrstvit podle připraveného návrhu [11].

První myšlenka 3D tisku se zrodila již v roce 1984, kdy Charles W. Hull přišel s nápadem zpevnit stolní nátěry UV světlem. Tato myšlenka ho přivedla k vynálezu stereolitografie. Stereolitografie využívá fotochemických procesů, při nichž z monomerů a oligomerů působením světla o určité vlnové délce (100 – 400nm) vznikají vytvrzené polymery. Technologie 3D tisku, jež zvládá rychlou výrobu objektů s vysokou přesností i u extrémně komplikovaných geometrií za podpory počítačového softwaru. Během posledních desetiletí se 3D tisk stal jednou z nejrychleji rostoucích technologií. Zpočátku to byla velmi složitá a navíc drahá technologie. Během posledních let se ale 3D tisk začal prosazovat v každodenním životě a tiskárny se staly běžně používanými ve všech druzích průmyslu [10].

3D tisk je rychle se rozvíjející technologie, která je považována za průmyslovou revoluci. Proto je důležité seznámit se s některými základními pojmy o 3D tisku, s procesy, které využívá, se způsobem, jakým funguje, a jeho omezením. Metody navrhování využívající 3D tisk umožňují zkrátit dobu navrhování a vývoje, zlepšit spolupráci a pomoci řešit problémy, které vznikají mezi světem inženýrství a designu. Přestože se termín „3D tisk“ používá již dlouhou dobu, zejména pro výrobu prototypů, dnes se obecně používá k popisu metody aditivní výroby, bez ohledu na konkrétní technologii, materiál nebo aplikaci [7].

2.3.2 Technologie 3D tisku

Následující podkapitoly popisují technologie 3D tisku využívané pro 3D tisk stavebních hmot.

2.3.2.1 Vytlačování materiálu (extruze)

Metoda extruze pro tisk materiálů na bázi cementu je první metodou vyvinutou v oblasti betonových konstrukcí. Principem metody je vytlačování vrstev materiálu na bázi cementu za účelem vytvoření struktury podle digitálního modelu vytvořeného pomocí softwaru. Princip tisku vytlačováním je založen na metodě 3D tisku prostřednictvím nanášení roztavených polymerů. Na rozdíl od polymerů je chování betonu velmi málo citlivé na teplotu a je nutné přizpůsobit rychlost tisku a geometrii rychlosti tuhnutí cementového materiálu, které jsou řízené hydratací cementu [10].

Míchání materiálů se provádí relativně konvenčním způsobem, smícháním prášků a granulátů do homogenní směsi a následným přidáváním kapalných fází, dokud

se nedosáhne požadované reologie (chování čerstvého betonu – vztahy mezi napětím, třením, viskozitou a deformací). Během vytlačování lze přidávat superplastifikátory a urychlovače.

Při tisku betonových nebo cementových materiálů je nejprve nutné, aby bylo možné beton dopravit přes kontejner, domíchávač nebo i automatický domíchávač betonu k tiskové hlavě. Pro dopravu materiálu do vytlačovací hlavy (viz obr. 4) lze použít čerpadlo nebo extrudér. V případě použití čerpadla bude třeba vybrat jeho pohon a technologii, která bude používána. Ty se volí na základě viskozity betonu a délky pružných hadic potřebných pro jeho dodávku. Tento krok čerpání je závislý na konzistenci materiálu, který má být tisknut (v podstatě čím je beton tekutější, tím snáze se čerpá) [10].



Obrázek 4: Vytlačovací hlava skládající vrstvy materiálu na sebe [10]

Dalším řešením je přidání nádrže na beton, od které vede extrudér přímo k tiskové hlavě. V tomto případě je však množství dostupného materiálu omezené. Proto je nutné zahrnout systém opětovného dodávání materiálu pro velkoobjemové tiskové úlohy.

Tyto dva způsoby mohou být kombinovány a do tiskové hlavy může být začleněn vytlačovací šnek. Dojde tak k částečnému odlehčení čerpadlu, ale šnek také poskytne dodatečnou energii, která umožní zmenšení průměru trysky tiskové hlavy.

Na úrovni tiskové hlavy lze přidat hned několik úprav a nástrojů pro zlepšení procesu tisku. Ty mohou zahrnovat systémy přidávající urychlovače nebo superplastifikátory. Tyto příměsi umožňují rychlý nárůst odolnosti tisknutých vrstev. Materiál je v čerpacích

hadicích tekutý, což usnadňuje fázi čerpání, ale po nanesení rychle ztuhne, což zajišťuje stabilitu struktury během tisku.

Ostatní příslušenství pro trysku bylo testováno nebo je ve vývoji. Tato příslušenství zahrnují systém pro odstranění nepravidelností v tisknuté struktuře a omezení drsnosti vrstev. Dále úplný nebo částečný těsnicí systém pro zmenšení průměru a kontrolu materiálu opouštějícího extrudér.

Nakonec je důležité poznamenat, že průřez nanášeného materiálu může mít několik podob. Průřez obdélníkového nebo válcového tvaru, podle požadovaného tvaru tisknuté struktury [11].

2.3.2.2 Vstřikování pojiva na materiál ve formě prášku

Metoda funguje na principu nanášení kapalných pojiv na vrstvy práškového zrnitého materiálu. Pojiva mohou být organická i anorganická. Trojrozměrný tisk používá tento proces, který kombinuje granuláty a spojuje je do pevné látky přidáním pojiva pomocí tiskové hlavy. Tento proces se používá k výrobě mnoha součástí vyrobených z kovů, keramiky a polymerů [11].

2.3.2.3 Laminování plátů / desek

Jedná se o metodu stříhání a vrstvení. Výroba laminátu se provádí pomocí systému, ve kterém je každá část sestavena postupně. Tento proces spočívá v tepelném spojování řady dílů s rovnoměrnou tloušťkou, řezaných pomocí laseru. Součástí systému je 2D tiskárna umístěná na pracovním stole, který se pohybuje po svislé ose. Tiskárna vytváří vrstvy materiálu, následně jsou tyto vrstvy vzájemně spojeny pomocí termolepidla za působení síly a tepla na každou z vrstev [11].

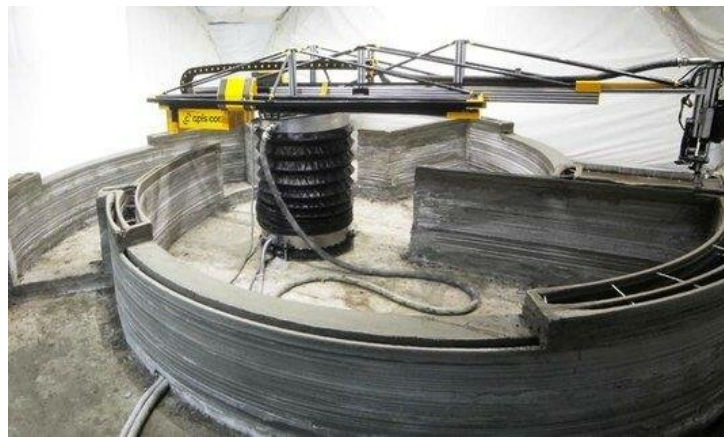
2.3.3 3D tisk materiálů na bázi cementu

Je důležité si ujasnit, že proces 3D tisku vyžaduje rychlé, dokonce téměř okamžité ztuhnutí materiálů, aby bylo dosaženo vysoké rychlosti tisku. To znamená, že jde o tepelně závislý charakter mechanického chování materiálů, jako jsou pryskyřice, polymery nebo dokonce kovy. V tradičních procesech 3D tisku je pro fázovou změnu nebo změkčení materiálu nezbytné použití externích zdrojů energie (laser, UV paprsky atd.). Tyto techniky ale nelze použít na materiály na bázi cementu. Tuhost materiálu nelze zvýšit pouhým spoléháním se na hydrataci cementu. Doporučuje se, aby cementový

materiál měl určitou zrnitost a aby rychlost narůstání struktury byla v souladu se zatížením a hmotností tisknuté struktury [11].

2.3.4 3D tisk budov

3D tisk je řešením, které nabízí rychlý a ekonomicky výhodný prostředek pro výrobu rodinného bydlení. S ohledem na tento cíl bylo vyvinuto několik technologických přístupů pro stavbu malých domů na místě. Většina z nich je založena na rozšiřování technologií vyvinutých pro výrobu malých stavebních prvků. Například použití pevných robotických ramen, které bylo navrženo společností Apis Cor, s jejichž pomocí je možné vytisknout zakřivené stěny a svislé nosné prvky rodinných domů. Toto řešení nabídla společnost Apis Cor (viz obr. 5).



Obrázek 5: Stavba domu 3D tiskem s použitím pevného robotického ramena [11]

Kromě nich španělský startup Be More 3D ve spolupráci s Univerzitou ve Valencii vyvinul 3D tiskárnu schopnou vytisknout domy o ploše 24 m² za 12 hodin. Tuto dobu lze zkrátit na 8 hodin při tisku maximální rychlostí. Nakonec byly provedeny i testy na použití robotického ramene, v tomto případě však mobilního, tedy takového, které je namontováno na mobilním vozidle. Projekt Yhnova v Nantes umožnil tisk ztraceného bednění z polyuretanové pěny, která funguje jako tepelně-izolační materiál vyplněný samozhutnitelným betonem. Tyto stěny se používají pro stavbu rodinných domů v Nantes (viz obr. 6). Tento projekt představuje globální prvenství v možnosti obývat dům při splnění bezpečnostních standardů [11].



Obrázek 6: Rodinný dům v Nantes vyrobený 3D tiskem [12]

Typy robotů pro účel 3D tisku budov

Technologie extruzního tisku byly a nadále jsou vyvíjeny pro tisk prvků a struktur různých velikostí a za různých podmínek. V závislosti na velikosti prvků, které se mají tisknout (prvky budovy, drobné konstrukce – rodinné domy nebo vícepatrové budovy), bude k pohybu tiskové hlavy použita různá robotická technologie.

Pro tisk konstrukčních prvků je k dispozici několik robotických technologií. Nejčastěji používanou technologií je šestiosé robotické rameno (viz obr. 7), které umožňuje provádět práce o objemu od 1 do několika metrů krychlových. Jsou přidány poměrně složité systémy, které přizpůsobují rychlost postupu robotu výstupnímu průtoku materiálu [11].



Obrázek 7: Příklad šestiosého robotického ramene [13]

Firma Cazza Construction (US) také vyvinula mobilní robot tohoto typu, viz obr. 8. Můžeme si proto představit implementaci týmu více robotů pro zvýšení a optimalizaci výrobních rychlostí.



Obrázek 8: Mobilní robot [14]

Tisk vícepatrových budov

Technologie založená na ovládní mostových jeřábů je také běžným řešením pro tisk objektů a konstrukčních prvků z materiálů na bázi cementu. Tuto techniku používá například tým vedený Dr. Buswellem na univerzitě v Loughborough, a také tým z univerzity v Eindhoven. Základní myšlenka, na které je tato technika založena, je

podobná provozu konvenčních papírových tiskáren, ale s použitím jeřábu, který lze umístit nad povrch mostu. K tomu se přidává výškové ovládání jeřábu vzhledem k úrovni objektu, který je již vytisknut. V současné době se připravuje rozšíření na výstavbu vícepodlažních budov, což vyžaduje vývoj přizpůsobení zvedacího a měřicího zařízení pro programování trajektorií v blocích o rozpětí přibližně deset metrů. V současné době se vyvíjí několik řešení, jako je použití portálových jeřábů (viz obr. 9), jeřábů (viz obr. 10) nebo robotů [8].



Obrázek 9: Portálový jeřáb schopný zajistit tisk vícepatrové budovy [15]

Slibným řešením se jeví i použití jeřábů a autojeřábů, které jsou při přeměně betonu schopné vykonávat větší objem práce v prostoru, který zabírá vícepatrová budova. Tato řešení jsou v současné době ve fázi konceptu nebo ve fázi vývoje, například projekt Conprin3D vyvinutý Technickou univerzitou v Drážďanech [11].

Přechod na tento rozsah tisku vyžaduje značné množství práce s ovládáním polohování a se zohledněním podmínek prostředí (vítr, déšť). K tomu je nezbytné k tiskové hlavě nainstalovat gyroskopy a kompenzační techniku, viz obr. 10. To je předmětem patentu vyvinutého týmem Amziane, Godiho a Phelipého z univerzity Clermont Auvergne, který instaloval gyroskopické systémy pro stabilizaci tiskárny připojené k jeřábu. Tento design je schopen vytisknout vícepatrovou budovu, protože jeřáb pokrývá celou oblast půdorysu budovy [11].



Obrázek 10: Jeřáb nesoucí tiskovou hlavu s gyroskopem [11]

Omezení 3D tisku

Aby bylo možné skutečně dosáhnout použití 3D tisku vytlačováním/depozicí přímo na staveništi (*in-situ*), je třeba překonat několik obtíží. Vrstvený povrch nemusí být pro konečné uživatele příliš estetický. Další problém, který by měl být dostatečně zkoumán, je mechanika spojů na rozhraní mezi vrstvami. Kromě toho je nutno zajistit, že toto rozhraní neposkytne cestu pro vstup látek, které jsou agresivní vůči materiálům na bázi cementu.

Navíc v případě konvenčních betonových konstrukcí bude nutné najít způsoby, jak zpevnit beton pomocí výztužných konstrukcí, které mohou poskytnout požadované mechanické vlastnosti tisknutých materiálů při tahovém namáhání. Pevnost betonu v tlaku bývá až 15krát vyšší než pevnost v tahu. Jedním z předběžných řešení může být výroba tvarů, které mohou omezit tahové napětí, jako jsou klenuté stavební prvky a konstrukce, viz obr. 11.



Obrázek 11: Klenutá budova vytvořená procesem 3D tisku [16]

Kromě toho, řešení pro tisk materiálů na bázi cementu vytlačováním omezují svobodu architektů. Přechod ze svislé konstrukce na vodorovnou může efektivně probíhat pouze velmi pozvolna, protože materiály na bázi cementu v čerstvém stavu nelze ukládat s příliš velkým převýšením, aniž by se deformovaly. Toto omezení je možno řešit použitím podpěr nebo dočasných podpěr [11].

2.3.5 Použití vláken v 3D tisku

Aby bylo zajištěno vyvinutí co nejmenších tahových sil na materiály na bázi cementu, mnoho studií navrhlo přidání vláken do směsi pro tisk. Testovaná vlákna jsou vyrobena z několika různých materiálů: sklo, čedič, uhlík, polypropylen a ocel.

Souhrnně tyto studie prokazují zvýšení tažnosti materiálu s výrazným zvýšením pevnosti v tahu při zatížení v ohybu. Nicméně, proces vytlačování činí materiál na bázi cementu vysoce anizotropním. Proto musíme vzít v úvahu orientaci vláken a dokonce i vliv, který mají během vytlačování a ukládání pomocí teorií založených na reologii vláknobetonu [8].

Nicméně v rešeršní části o vyztužení tisknutých betonových konstrukcí Asprone et al. [17] naznačují, že přidání vláken nemusí být dostatečné při vysokém namáhání v tahu.

Navíc musí být rozhraní mezi vrstvami upraveno tak, aby vlákna pronikala mezi vrstvy. Jinak by se spoje mezi vrstvami příliš mechanicky napínaly.

Ocelová lanka umístěna ve vytlačovaném materiálu

Alternativní řešení navrhli výzkumníci z Technické univerzity v Eindhovenu. Spočívá v uložení ocelového lanka v materiálu na bázi cementu. Ocelová lanka jsou obsažena ve vrstvě uloženého betonu a zajišťují pevnost v ohybu tisknutého cementového materiálu [18].

Účinek výztuže je však omezen na směry kolmé na nanesenou vrstvu materiálu. Průměr lanka je zmenšen tak, aby byl při tisku pružný. Proto je účinnost této techniky vyztužení omezena. Tyto studie použily vysoce výkonná (high-performance) ocelová lanka o průměrech 0,63 – 1,2 mm, která se liší od standardních průměrů používaných v oblasti železobetonu.

Tato metoda musí být spolehlivější, aby bylo možné úspěšně navrhnout konstrukční součásti, jako jsou vnitřní výztužné svazky. Proto musí být návrh kotevních bodů a kvalita rozhraní výztuž/matrice jasně definována, aby se dosáhlo spolehlivého a optimálního konstrukčního návrhu pomocí této techniky vyztužení [11].

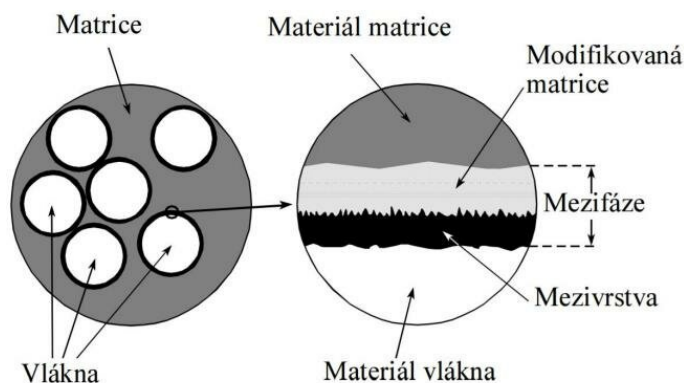
2.4 Adheze vláknenných výztuží k betonu

Aby bylo dosaženo vysokých užitných vlastností vláknobetonu, je třeba zajistit dostatečně pevné spojení v mezifázovém rozhraní, tzv. mezifázi, kde se vláknenná výztuž s betonem stýkají. Beton přenáší aplikovanou zátěž na vlákna a chrání je před nepříznivými vlivy prostředí. Soudržnost výztuží s betonem může být zlepšena použitím adheziv.

Adheze neboli přilnavost je schopnost spojit povrchy dvou podobných nebo různých typů materiálu. Pro zlepšení adheze vláknenných výztuží k betonu se používají tekuté chemické přísady (adheziva) [19].

Mezifázové rozhraní

Mezifázové rozhraní neboli mezifáze (viz obr. 12) je oblastí kompozitu na hranici mezi matricí a výztuží. Hlavním úkolem mezifáze je přenos napětí z matrice na výztuž. Matrice zároveň chrání výztuž před vlivem vnějšího prostředí [19].



Obrázek 12: Mezifázové rozhraní [20]

2.4.1 Používaná adheziva

Polyesterová pryskyřice

Jednou její složkou je nenasycená karbová kyselina a další složkou je alkohol. Pryskyřice je rozpuštěna v monomerním rozpouštědle (často ve styrenu), se kterým je kopolymerizovatelná. S pomocí tvrdidel, tj. iniciátorů, urychlovačů, katalyzátorů, atd., mohou být polyesterové pryskyřice vytvrzeny polyadiční reakcí. Polyesterová pryskyřice se používá k opravám laminátových předmětů, ale také k výrobě laminátů kontaktní technologií, navíjením a injekčním laminováním, dále k výrobě deskových konglomerátů z přírodního kamene. S polyesterovou pryskyřicí se doporučuje pracovat rychle a velmi opatrně. Polyesterová pryskyřice po vmíchání iniciátoru velmi rychle tvrdne (do 15 minut). Může způsobit alergickou kožní reakci, vážné podráždění očí, může způsobit podráždění dýchacích cest, dále je hořlavá a po požití a vniknutí do dýchacích cest může způsobit smrt [19].

Epoxidová pryskyřice

Adheziva z epoxidové pryskyřice jsou nízkomolekulární látky. Reakce epoxidových pryskyřic je reakce mezi epoxidy a polárními látkami. Může probíhat dvěma způsoby.

a) Polymerace adicí (polyadice) při výrobě lepidel

Nejdůležitějším krokem je přidání vysoce polární sloučeniny (tvrdidla). Jako tvrdidla se často používají aminy, čímž vzniká produkt, který obsahuje dvě skupiny s vysokou polaritou – tedy aminoskupinu a hydroxylovou skupinu, které obě podporují adhezivní vlastnosti pryskyřice. Při polyadici dochází k řetězové reakci a nevzniká zde žádný vedlejší produkt.

b) Polymerace s otevřením kruhu

Jakmile je reakce iniciována, otevře se epoxy-ethylenový kruhu pomocí adiční reakce. Reakce otevírání kruhu může být katalyzována buď kyselé, nebo katalyzována nenukleofilními bázemi. Počáteční otevření kruhu spustí řetězovou reakci, tato polymerace vyžaduje pouze malé přidání iniciátoru. Nevýhodou polymerační reakce s otevřením kruhu je, že po přidání iniciátoru probíhá reakce velmi rychle a na zpracování zbývá jen krátká doba [19].

Chemická kotva

Chemická kotva je dvousložkové lepidlo, první složka je na bázi pryskyřice (polyesterové nebo vinylesterové) a druhou složkou je cement. Může být použita jak v plných, tak i v dutých materiálech pro kotvení betonu, cihel, kamene, betonových tvárnic, pórovitého betonu, děrovaných cihel, ocelových konstrukcí, fasád [19].

2.5 Testování mechanických vlastností stavebních výrobků

Každá stavební konstrukce či konstrukční nosný prvek je ovlivněn působením okolního prostředí. Důsledkem tohoto působení mohou být fyzikální nebo mechanické změny konstrukcí či konstrukčních prvků. Testování mechanických vlastností můžeme rozdělit na zkoušky destruktivní, semidestruktivní a nedestruktivní.

Před uvedením do jednotlivých zkoušek mechanických vlastností je potřeba si říci něco k deformacím. Deformace těles jsou dělené na:

- deformace pružné (elastické) – po odstranění napětí deformace vymizí (těleso se vrací do původního tvaru),
- deformace nepružné (plastické) – po odstranění napětí deformace zůstává (těleso se do původního stavu nevrací).

Pružná deformace je složena ze dvou částí – z okamžitého pružného přetvoření a z dopružování. Pružné přetvoření nastává okamžitě s přírůstkem (změnou) hladiny napětí. Dopružování neboli dotvarování nastává opožděně a s odstraněním napětí postupně vymizí.

Nepružná část deformace je deformací, která neustále roste s časem při konstantní hladině napětí. Tato deformace se projevuje hlavně u složených hmot, jako je např. beton. Nepružná deformace po odlehčení průběhem času nevymizí.

Měření velikosti deformací se provádí za účelem stanovení průběhu napětí konstrukcí. Pro měření deformací při známém napětí je zapotřebí znát modul pružnosti a Poissonovo číslo použitého materiálu [21].

2.5.1 Testování pevnosti

Pevnost je mechanická vlastnost, kterou můžeme dělit na více druhů. Rozlišujeme pevnost v tahu, pevnost v tlaku, pevnost v ohybu, torzní pevnost (v krutu), rázová pevnost.

Zkouška pevnosti betonu v tlaku

Zkouška pevnosti betonu v tlaku je popsána v normě ČSN EN 12390-3. Zkoušku pevnosti v tlaku můžeme dělit na zkoušku v prostém tahu a v příčném tahu. Provádí se na vzorcích tvaru:

- a) krychle (150×150×150 mm),
- b) válce (h = 300, Ø 150 mm),
- c) jádrového vývrtnu.

Zkouška se provádí v lisu s celoplošným zatěžováním, dokud se na vzorku nevytvoří charakteristický kužel od příčných tahů.

$$\sigma_c = \frac{F_{max}}{A_c} \quad (2)$$

σ_c – pevnost v tlaku [MPa], F_{max} – maximální síla při zatěžování [N], A_c – plocha průřezu [mm²] [22]

Zkouška pevnosti betonu v prostém tahu

Zkouška pevnosti v prostém tahu se provádí jen výjimečně, běžnějšími zkouškami pro beton jsou zkoušky v příčném tahu nebo v tahu za ohybu. Tato zkouška se provádí na trámci, výjimečně pak na válci nebo na jádrových vývrtech. Komplikaci přináší nutnost přilepení ocelových destiček ke vzorku. Přilepení musí mít vyšší pevnost než je pevnost zkoušeného vzorku. Výsledná pevnost v prostém tahu se určí podle následujícího vzorce.

$$\sigma_p = \frac{F_{max}}{A_c} \quad (3)$$

σ_p – pevnost v prostém tahu [MPa], F_{max} – maximální zatížení [N], A_c – plocha průřezu v místě přerušení [mm²]

Zkouška pevnosti betonu v příčném tahu

Nejrozšířenější způsob testování pevnosti v tahu betonu je zkouška v příčném tahu. Je popsána v normě ČSN EN 12390-6. Používané vzorky pro tuto zkoušku jsou ve tvaru válce nebo krychle. Výsledná pevnost v příčném tahu se určí podle následujícího vzorce. [23]

$$\sigma_t = \frac{2 \cdot F_{max}}{\pi \cdot l \cdot d} \quad (4)$$

σ_c – pevnost v příčném tahu [MPa], F_{max} – maximální zatížení [N], l – délkový rozměr tělesa [mm], d – příčný rozměr tělesa [mm] [24]

Zkouška pevnosti betonu tříbodovým ohybem

Tříbodový ohyb je popsán v normě ČSN EN 12390-5. Vzorek se zatěžuje jednou silou uprostřed nosníku a v tomto místě vzniká kombinace extrému ohybového momentu a posouvající síly. Pevnost v tříbodovém ohybu pro vzorky 40×40×160 mm se vypočítá podle následujícího vzorce [25].

$$\sigma_c = \frac{3 F \cdot l}{2 h^3} \quad (5)$$

F – ohybová lomová síla [N], l – vzdálenost mezi podpěrami [mm], h – výška průřezu hranolu [mm]

Konečným výsledkem je průměr získaný z minimálně 3 měřených vzorků [26].

Zkouška pevnosti betonu čtyřbodovým ohybem

Vzorek se zatěžuje dvěma silami a v oblasti mezi těmito silami dochází k maximálnímu namáhání vzorku. Rozdílem oproti tříbodovému ohybu je, že v oblasti mezi dvěma zatěžovacími silami nevznikají žádné smykové síly (viz obr. 13). Pevnost

ve čtyřbodovém ohybu pro vzorky 40×40×160 mm, kde je vzdálenost působících sil 1/3 vzdálenosti podpěr, se vypočítá podle následujícího vzorce.

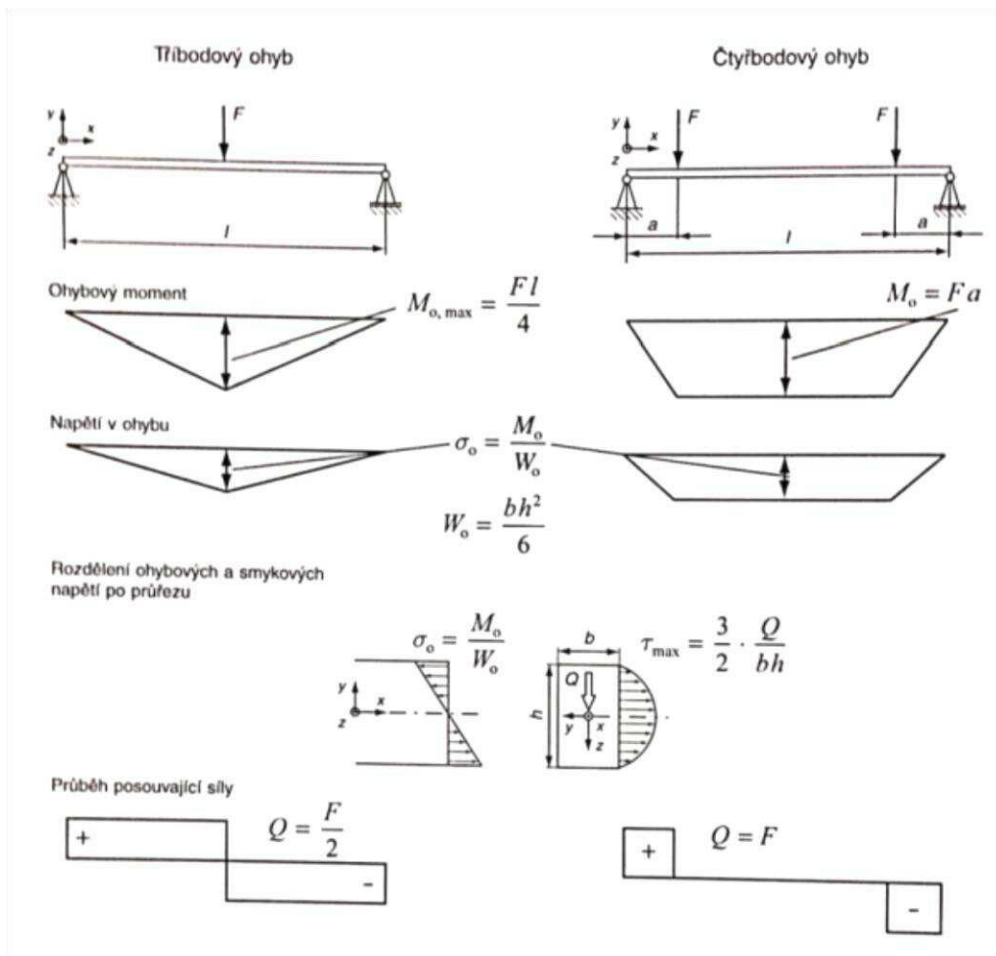
$$\sigma_c = \frac{3 F \cdot l}{4 h^3} \quad (6)$$

F – ohybová lomová síla [N], l – vzdálenost mezi podpěrami [mm], h – výška průřezu hranolu [mm]

Pevnost ve čtyřbodovém ohybu pro vzorky 40×40×160 mm, kde je vzdálenost působících sil 1/2 vzdálenosti podpěr, se vypočítá podle následujícího vzorce.

$$\sigma_c = \frac{F \cdot l}{h^3} \quad (7)$$

F – ohybová lomová síla [N], l – vzdálenost mezi podpěrami [mm], h – výška průřezu hranolu [mm]



Obrázek 13: Schéma třibodového a čtyřbodového ohybu [25]

Zkouška pevnosti (houževnatosti) betonu v rázu

Rázová zkouška houževnatosti je většinou prováděna na Charpyho kladivě, na kterém se zjišťuje vrubová houževnatost materiálu. Obvykle jsou testovány vzorky obdélníkového průřezu. Pevnost v rázu se počítá podle následujícího vzorce.

$$a_N = \frac{E_c}{A} \quad (8)$$

a_N – rázová houževnatost (pevnost v rázu) [$\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$], E_c – energie spotřebovaná při přeražení vzorku [J], A – plocha průřezu v místě přeražení vzorku [m^2]

Testování soudržnosti výztuže s betonem vytahovací metodou

Vytahovací zkouška je typická metoda používaná k pochopení jevu soudržnosti souvisejícího s vyztuženým betonem. Tato metoda spočívá v provedení zkoušky tahem vláken spojených ukotvených v betonové matrici. Soudržnost vlákenné výztuže s betonem τ_m se vypočítá z následujícího vzorce.

$$\tau_m = \frac{F_m}{a \cdot o} \quad (9)$$

F_m – síla na mezi porušení soudržnosti vlákenné výztuže s betonem [N], a – kotevní délka [mm], o – obvod průřezu [mm]

Pro tuto zkoušku je nutné připravit kvalitně prosycené vzorky vybraným adhezivem. Je také důležité, aby byla pevnost vláken v tahu větší než pevnost spojení výztuže s betonem. Kompozitní vzorek je namáhán postupně narůstající tahovou silou až do vytažení výztuže. Jediné síly zaznamenané od okamžiku přerušení spojení jsou třecí síly mezi vláknem a matricí [7; 27].

3 Praktická část

Tento experiment je rozdělen na dvě části. První část se zabývá výrobou zkušebních betonových trámek vyztužených uhlíkovými anebo čedičovými rovingy, na které jsou aplikovány 2 druhy adheziv (polyesterová pryskyřice nebo chemická kotva). Tyto vzorky jsou testovány třibodovým ohybem. Ve druhé části jsou vyrobeny zkušební betonové válečky vyztužené taktéž uhlíkovými nebo čedičovými rovingy, na které jsou, stejně jako v případě prvního experimentu, aplikovány 2 druhy adheziv, polyesterová pryskyřice nebo chemická kotva). Tyto vzorky jsou testovány na soudržnost vytahovací metodou.

3.1 Použité materiály

V následujících podkapitolách jsou blíže specifikovány materiály, které byly použity na výrobu forem pro odlévání betonových zkušebních vzorků a materiály na výrobu zkušebních vzorků.

3.1.1 Materiály použité na výrobu forem

Pro betonové vzorky bylo zapotřebí zhotovit formy, do kterých byla odlita betonová směs. Při výrobě forem byly použity tyto materiály: dřevěná lať, závrtné šrouby do dřeva, odpadní potrubí z polypropylenu.

3.1.2 Materiály použité na výrobu zkušebních vzorků

Pro výrobu betonové směsi byly použity tyto materiály: portlandský cement, voda, plastifikátor. Pro vyztužení betonu byly použity vlákenné výztuže – rovingy. Uhlíkový roving s jemností 1600 tex, počtem filamentů 24000 a jemností jednoho filamentu 0,67 dtex, viz obr. 14. Čedičový roving s jemností 1600tex, počtem filamentů 12000 a jemností jednoho filamentu 1,3 dtex, viz obr. 15.



Obrázek 14: Uhlíkový roving [28]



Obrázek 15: Čedičový roving [29]

Použitá adheziva: polyesterová pryskyřice (viz obr. 16), chemická kotva (viz obr. 17).



Obrázek 16: Polyesterová pryskyřice



Obrázek 17: Chemická kotva Quikfix

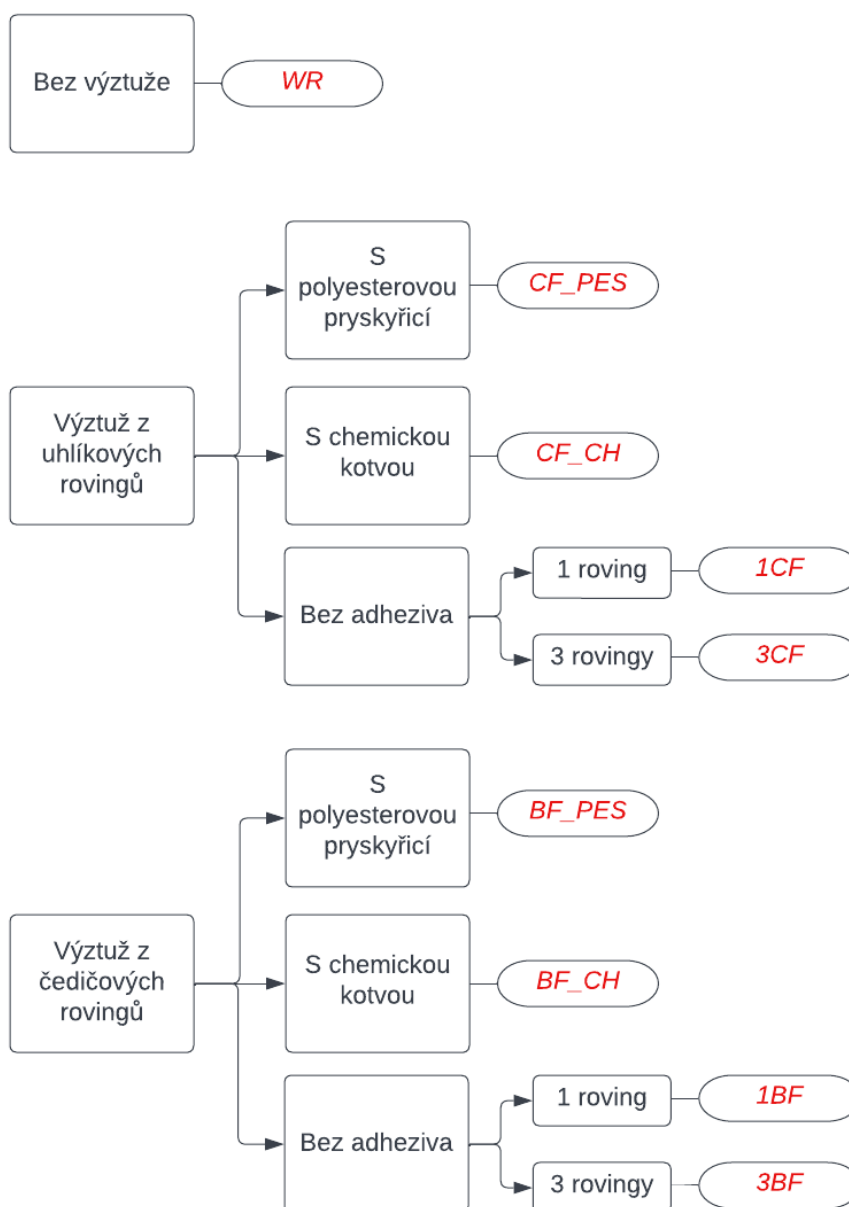
3.2 Výroba vzorků

V následujících podkapitolách jsou blíže specifikovány vyrobené vzorky a jejich výrobní postupy.

3.2.1 Výroba betonových trámeků

Experiment se zabíral výrobou a následným zkoušením betonových trámeků tříbodovým ohybem. Výsledný vzorek byl navrhnut jako kompozitní materiál tvaru hranolu o rozměrech 40×40×160 mm sestávající se z betonové směsi, výztuže v podobě svazků vláken (rovingů) a adheziva pro zvýšení přilnavosti mezi vlákny a betonovou maticí.

Trámky byly rozříděny do kategorií, viz obr. 18. Společně s kategoriemi byly uvedeny zkratky (označeny červenou barvou), které jsou dále používány v práci. Byly vyrobeny vzorky bez výztuže a vzorky s výztuží uhlíkového rovingu a čedičového rovingu, které byly rozděleny do dalších 3 podkategorií, co se použitého adheziva týče: s polyesterovou pryskyřicí, s chemickou kotvou, bez adheziva. Vzorky bez adheziva byly rozděleny do dvou skupin: s jedním výztužným svazkem a se třemi výztužnými svazky vláken.



Obrázek 18: Rozdělení vzorků do kategorií

Nejprve bylo zapotřebí vyrobit formu pro odlití betonových trámek (viz obr. 19), jejíž technický výkres je uveden v příloze C. Forma byla zhotovena z dřevěných latí o šířce 18 mm. Latě byly ohoblovány na požadovanou výšku 40 mm. Poté byly latě

nařezány na 15 kusů o dvou různých délkách (13 kusů s délkou 160 mm a 2 kusy s délkou 714 mm). Forma byla zhotovena pro 12 kusů trámků.



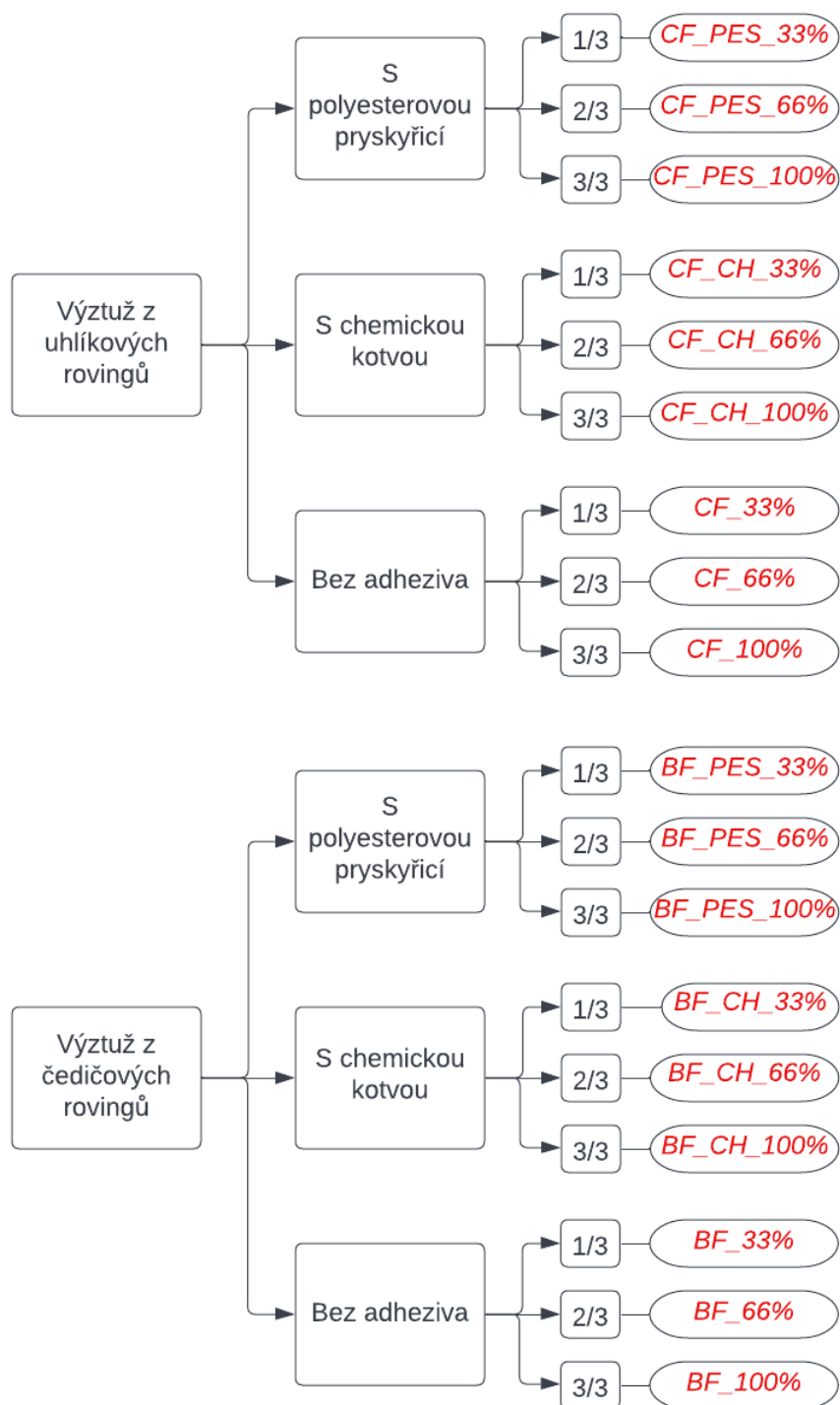
Obrázek 19: Obrázek formy bednění

Každý zkušební betonový trámek měl rozměry 40×40×160 mm (ČSN EN 196-1). Do delších latí byly vyvrtány otvory o průměru 20 mm pro závrtné šrouby a otvory o průměru 10 mm, které sloužily pro zavedení vlákenné výztuže. Poté co byla forma sestavena a připravena, byl namíchán beton pomocí ruční míchačky podle následujícího poměru cement/plastifikátor:H₂O 87,5:1:9,23. Po rozmíchání betonové směsi byla na svazky vláken aplikována chemická kotva či polyesterová pryskyřice. Svazky vláken byly zavedeny do formy a následně byla forma s vlákny zalita betonovou směsí. Vzorky byly vytvrzovány v průběhu následujících 28 dní.

3.2.2 Výroba betonových válečků

Tento experiment byl soustředěn na výrobu betonových zkušebních válečků s výztuží a jejich následné zkoušení vytahovací metodou na trhacím přístroji. Betonové zkušební válečky byly rozříděny do kategorií (viz obr. 20) podobných těm v prvním experimentu. Tyto kategorie byly rozříděny do dalších 3 podkategorií, co se hloubky zanesení do betonového válečku týče. Hloubka zanesení svazku vláken byla do 1/3, do 2/3 a do celé hloubky výsledného betonového válečku (3/3). Vzorky bez výztuže

nebyly u tohoto experimentu vyrobeny, jelikož na vzorcích byla zkoušena soudržnost svazku vláken s matricí.



Obrázek 20: Rozdělení zkoušených válečků do kategorií, včetně zkratk

Postup výroby formy pro zkušební válečky

Forma pro odlití betonových zkušebních válečků byla zhotovena z polypropylenového odpadního potrubí o vnitřním průměru 40 mm, které bylo nařezáno na pásové pile Femi (obr. 21) na délku 160 mm.



Obrázek 21: Pásová pila Femi

Postup výroby zkušebních válečků

Betonová směs byla namíchána v poměru cement:plastifikátor:H₂O 87,5:1:9,23. Výztužné svazky vláken byly nastříhány na délku 500 mm. Svazky vláken byly opatřeny štítky, které sloužily k označení hloubky zanesení do formy. Dále byla připravena adheziva – chemická kotva a polyesterová pryskyřice. Dvousložková chemická kotva byla rozmíchána na podložce. Do roztoku polyesterové pryskyřice ve styrenu byl za stálého míchání přidán iniciátor v poměru 2 hm. díly iniciátoru na 100 hm. dílů polyesterové pryskyřice. Iniciátor zajistil nastartování procesu a konečné spojení částí výrobku. Adheziva byla aplikována v tenké vrstvě na svazky vláken a ty byly zaneseny do formy do požadovaných hloubek. Forma byla poté zalita betonovou směsí (viz obr. 22). Zanášení svazků vláken do 1/3 a 2/3 hloubky formy bylo spojeno s obtížemi, jež se týkaly přesného zanesení svazku vláken do osy formy. Tento problém byl řešen odléváním stejných dávek betonové směsi do formy z více stran. K vytvrzení vzorků

došlo po 28 dnech. Součástí tohoto experimentu byla výroba měřicího přípravku, který zajistil uchycení vzorku (viz obr. 23).



Obrázek 22: Výrobek těsně po odlití betonu



Obrázek 23: Měřicí přípravek

3.3 Postup měření

3.3.1 Měření betonových trámek třibodovým ohybem

K plnému vytvrzení vyrobených zkušebních betonových trámek došlo po 28 dnech ode dne výroby. Betonové tráčky byly vyjmuty z bednění a postupně měřeny na přístroji Labtest 4.050 třibodovým ohybem. Z každé kategorie byly měřeny 3 tráčky. Tráčky byly podrobeny ohybovému napětí až do jejich porušení.

3.3.2 Měření betonových válečků vytahovací metodou

Po uplynutí 28 dnů od výroby betonových válečků došlo k jejich plnému vytvrzení. Betonové válečky s výztuží byly měřeny na trhacím přístroji, byla měřena soudržnost výztuže s matricí tzv. vytahovací zkouškou.

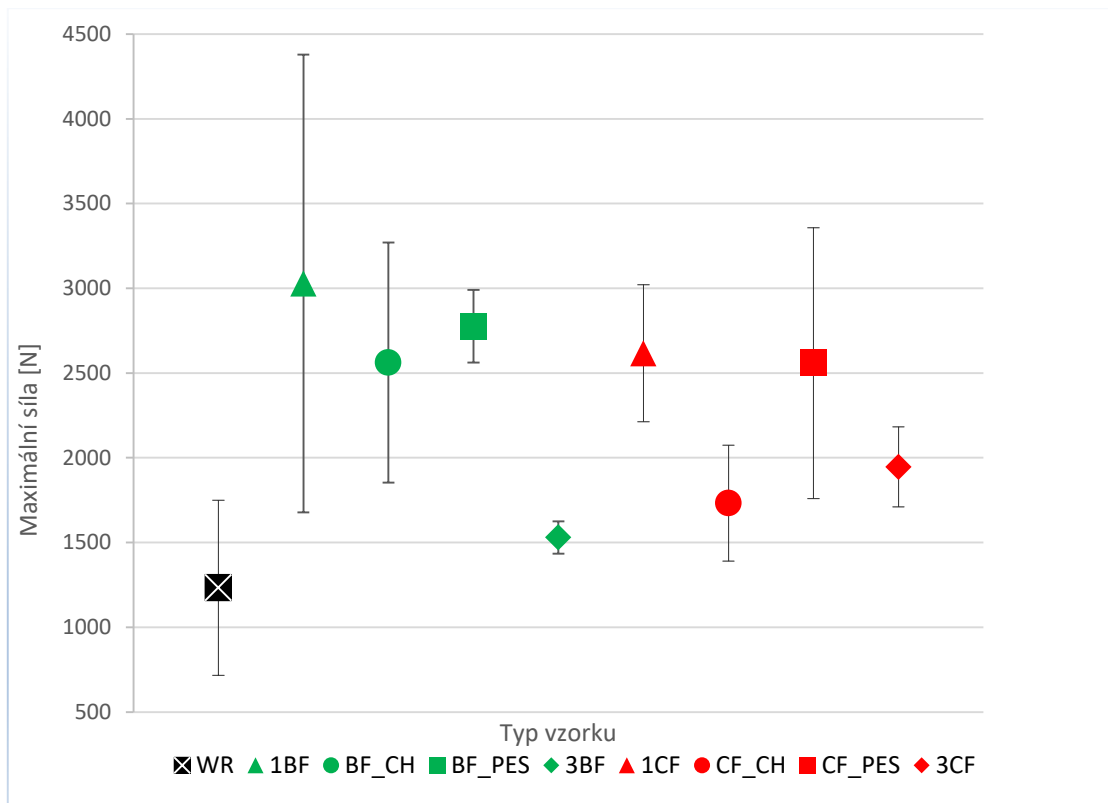
Vzorky byly do trhacího zařízení upevněny pomocí zkonstruovaného měřícího přípravku. Skrz kruhovou upínku byl veden vyčnívající svazek vláken, který byl upnut do horní čelisti.

Rychlost posuvu horní čelisti byla nastavena na 20 mm za minutu až do jeho přerušení nebo vytažení z betonového válečku.

4 Vyhodnocení a diskuze

4.1 Vyhodnocení výsledků měření tříbodovým ohybem

Na grafu 1 můžeme vidět maximální sílu potřebnou k přerušení vzorku tříbodovým ohybem v závislosti na typu vzorku. Když neuvažujeme 95% interval spolehlivosti střední hodnoty, můžeme konstatovat, že vyztužení čedičovými i uhlíkovými svazky vláken má vliv na nárůst maximální síly potřebné k přerušení vzorku. Průměrná hodnota maximální síly u nevyztuženého vzorku je přibližně 1200 N (WR). Nejvyšší průměrná hodnota vyztuženého vzorku je přibližně 3000 N. Průměrná hodnota maximální síly u vyztužených vzorků čedičovými i uhlíkovými svazky vláken bez použití adheziva nesplňuje předpoklady autora. Předpokladem bylo, že vzorky bez použití adheziva budou vykazovat nižší hodnoty maximální síly. Čedičová výztuž se jeví jako odolnější vůči ohybu než uhlíková výztuž. Výztuže s PES pryskyřicí vykazují lehce lepší odolnost vůči namáhání ohybem než výztuže s chemickou kotvou. Trámky se třemi svazky vláken byly oproti trámkům s jedním svazkem výrazně méně odolné vůči namáhání ohybem. Mohlo to být způsobeno menším poměrem betonu vůči vláknům. Tyto typy vzorků neobsahovaly žádný pomocný prostředek, který by zajistil přilnavost svazků vláken a betonu. Z tohoto důvodu jsou výsledky namáhání vzorku s jedním svazkem výztuže výrazně lepší než výsledky namáhání vzorku se třemi svazky výztuže. Při uvažování statistického vyhodnocení by se dalo říci, že s 95% pravděpodobností vzorky betonových trámků s čedičovou výztuží s chemickou kotvou (BF_CH) i PES pryskyřicí (BF_PES) vykazují lepší odolnost proti namáhání ohybem než vzorek betonového trámku bez výztuže (WR). Stejně tomu tak je v případě betonového trámku s výztuží jedním svazkem uhlíkového vlákna bez adheziva (1CF) a s výztuží uhlíkového vlákna s PES pryskyřicí (CF_PES).

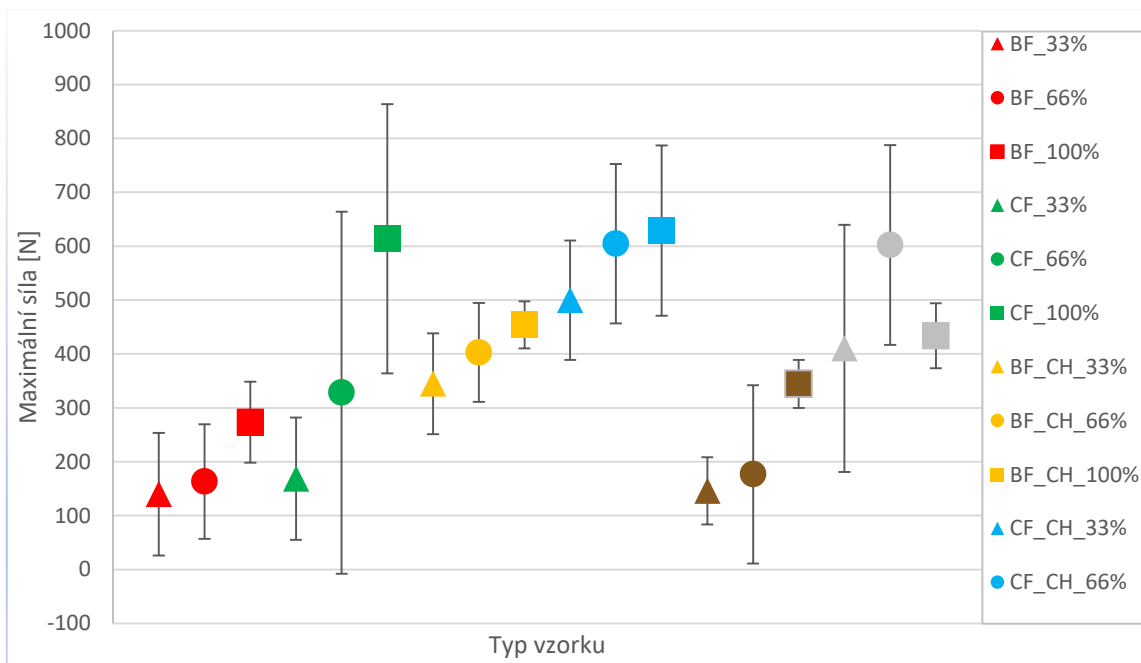


Graf 1: Porovnání síly potřebné k přerušení různých typů trámků třibodovým ohybem

4.2 Vyhodnocení výsledků měření vytahovací metodou

Na souhrnném grafu 2 lze pozorovat maximální sílu k vytažení nebo přerušení vzorku v závislosti na typu vzorku. Když neuvažujeme 95% interval spolehlivosti, můžeme vidět převážně rostoucí trend maximální síly v závislosti na hloubce zavedení výztuže do betonového vzorku. Závislost na hloubce zavedení výztuže má největší vliv u vzorků s uhlíkovou výztuží bez použitého adheziva (v grafu znázorněno zelenou barvou). Vzorky s uhlíkovou výztuží bez použitého adheziva vykazují vyšší maximální sílu potřebnou k vytažení nebo přerušení výztuže než shodné vzorky s čedičovou výztuží. Stejný trend lze pozorovat i v případě použití adheziv - chemické kotvy a PES pryskyřice.

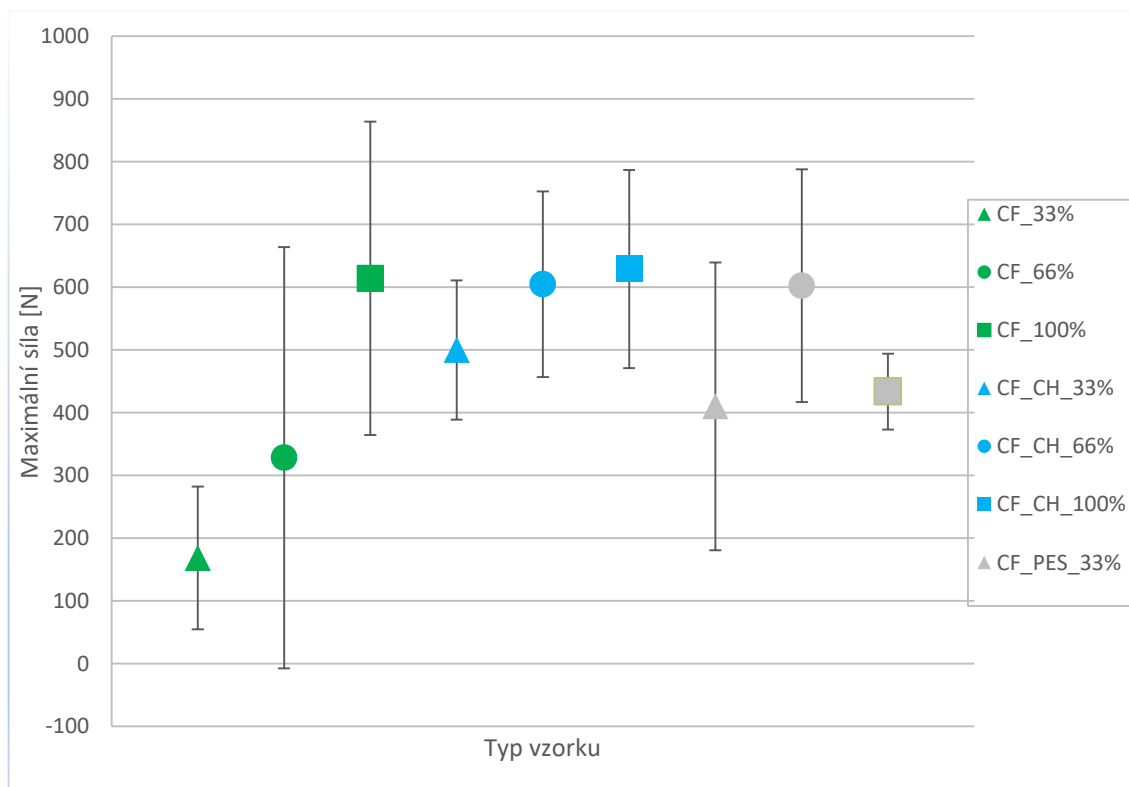
V případě zohlednění chybových úseček lze prohlásit, že u výsledků vzorků s čedičovou výztuží plně zapuštěnou do betonového válečku (BF_100%) a vzorků s uhlíkovou výztuží plně zapuštěnou do betonového válečku (CF_100%) je statisticky významný rozdíl v hodnotách maximální síly. Totéž můžeme pozorovat u vzorků s čedičovou výztuží zapuštěnou do 2/3 hloubky betonového válečku s použitím PES pryskyřice (BF_PES_66%) a u vzorků s uhlíkovou výztuží s použitím PES pryskyřice zapuštěnou do 2/3 hloubky betonového válečku (CF_PES_66%).



Graf 2: Porovnání síly potřebné k vytažení nebo přerušení výztuže v betonovém válečku

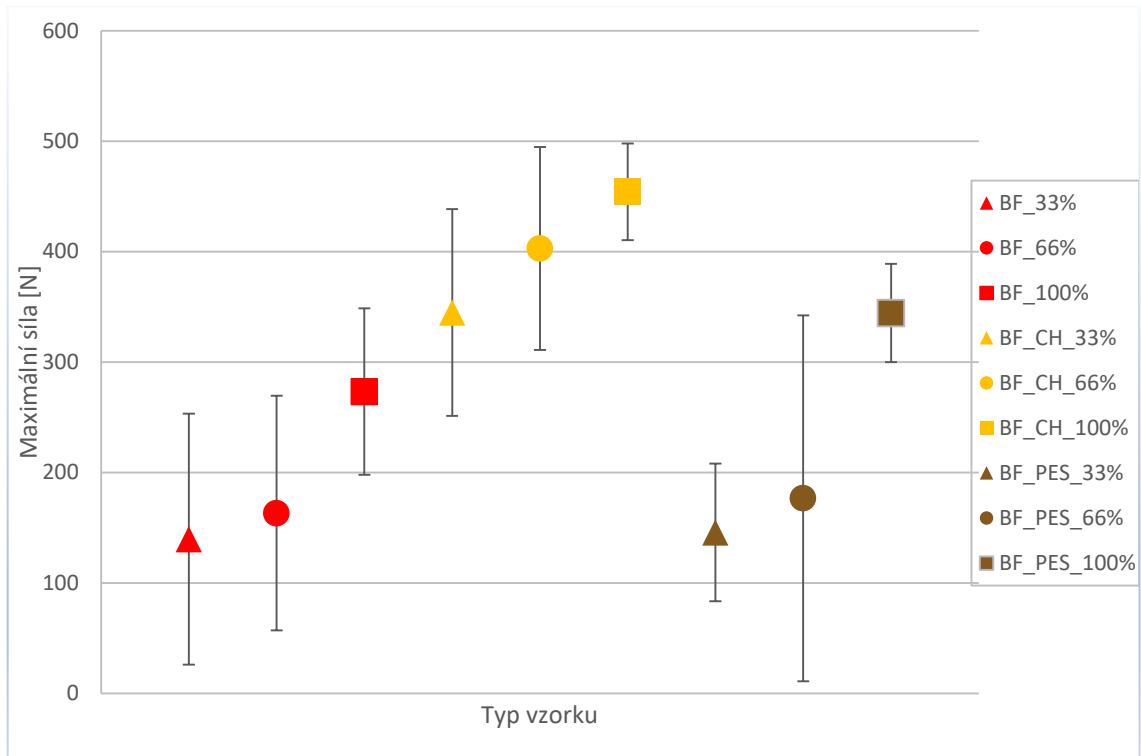
Na grafu 3 lze vidět maximální sílu potřebnou k vytažení nebo přerušení uhlíkové výztuže z betonového válečku v závislosti na typu vzorku. V případě, že nebudeme brát v úvahu 95% interval spolehlivosti, mají vyztužené vzorky bez použití adheziv nižší hodnotu maximální síly než vzorky s chemickou kotvou. Toto tvrzení nelze zcela prohlásit o vzorcích s plně zapuštěnou výztuží. Při použití polyesterové pryskyřice na výztuž plně zapuštěnou do betonového vzorku (CF_PES_100%) jsou výsledné hodnoty nižší než u použití chemické kotvy (CF_CH_100%) a dokonce i bez použití adheziva (CF_100%). Je pravděpodobné, že tento typ vzorku (CF_PES_100%) byl chybně připraven.

V případě, že budeme uvažovat chybové úsečky, je zřetelný nárůst maximální síly v případě výztuže zapuštěné do 1/3 hloubky betonového válečku s použitím chemické kotvy (CF_CH_33%) v porovnání se vzorkem bez adheziva (CF_33%).



Graf 3: Porovnání síly potřebné k vytažení nebo přerušení uhlíkové výztuže z betonového válečku

Na grafu 4 můžeme pozorovat maximální sílu potřebnou k vytažení nebo přerušení čedičové výztuže z betonového válečku v závislosti na typu vzorku. V případě, že nebudeme brát v úvahu 95% interval spolehlivosti, vyztužené vzorky bez použití adheziv mají nejnížší hodnotu maximální síly. Dále můžeme tvrdit, že při použití chemické kotvy došlo k vyššímu nárůstu maximální síly než při použití PES pryskyřice.



Graf 4: Porovnání síly potřebné k vytažení nebo přerušení čedičové výztuže z betonového válečku

Způsoby porušení vzorku

V průběhu vytahovací zkoušky došlo u vzorků k následujícím jevům:

a) neostrý přetrh svazku vláken, viz obr 24,



Obrázek 24: Neostrý přetrh testovaného svazku vláken

b) vytažení svazku vláken, viz obr. 25,

c) přetrhnutí svazku vláken na hranici matrice a vnějšího prostředí, viz obr 26.



Obrázek 26: Přerušení na hranici matrice a vnějšího prostředí



Obrázek 25: Vytažený svazek vláken z matrice

5 Závěr

Tato bakalářská práce byla zaměřena na vyztužení stavebních hmot textilními materiály. Hlavním cílem práce bylo ověřit vyztužování cementové kaše určené k 3D tisku použitím kontinuální flexibilní výztuže. Dalším cílem bylo nalezení provedení vhodného testovacího postupu a také zjistit vliv adheze a popř. vybrat vhodný adhezivní prostředek. V teoretické části byly uvedeny používané materiály pro stavební konstrukce a textilní materiály používané pro vyztužování těchto konstrukcí. U využívaných vláken pro účely vyztužování bylo uvedeno jejich rozdělení, výroba, vlastnosti a další použití. Dále byla věnována pozornost 3D tisku, technologiím tisku a možnosti tisknout budovy menšího i většího rozsahu. Byly také uvedeny metody pro stanovení mechanických vlastností stavebních prvků. Na základě studie těchto metod byly vybrány vhodné postupy pro testování mechanických vlastností experimentálně vyrobených vzorků.

Experimentální část byla zaměřena na výrobu konstrukčních prvků s vlákennou výztuží a jejich testování vybranými metodami. Byly zhotoveny 2 typy zkušebních vzorků, betonové trámky a betonové válečky. Tyto vzorky byly vyztuženy vlákennými útvary z čediče a uhlíku a jejich přilnavost byla dále upravena zvolenými adhezivy - chemickou kotvou a polyesterovou pryskyřicí. Trámky byly testovány třibodovým ohybem a byly porovnávány vlastnosti vyztužených a nevyztužených trámků. Dále byly mezi sebou porovnávány použité typy vláken a adheziv. Vzorky vyztužených betonových váleček byly testovány na soudržnost výztuže s matricí a ta byla porovnána mezi osmnácti kategoriemi vytvořených vzorků. Soudržnost výztuže s matricí byla testována na trhacím přístroji katedry netkaných textilií a nanovláknenných materiálů Fakulty textilní Technické univerzity v Liberci. Pro tento přístroj byl vytvořen speciální měřicí přípravek, který zajistil uchycení betonového vzorku na místě spodní čelisti přístroje a umožnil horní čelisti uchopit svazek vláken vyčnívající ze zkoušeného vzorku.

V experimentu zabývajícím se testováním ohybem bylo zjištěno, že čedičová výztuž má pozitivnější vliv na zvýšení maximální síly než uhlíková výztuž. Oba typy výztuží byly ověřeny jako funkční pro zvýšení odolnosti vůči ohybu betonových výrobků. Výsledky namáhání vzorku s jedním svazkem výztuže byly vyhodnoceny jako výrazně lepší, než tomu bylo u typu vzorku se třemi svazky. V rámci tohoto porovnání nebylo použito žádné adhezivum a vyšší počet vláknenných svazků tak měl spíše negativní vliv na přírůstek maximální síly. Mohlo to být způsobeno nejen nízkou přilnavostí vláken k betonu, ale také nízkou vzájemnou vzdáleností a krytím vláken cementovou kaší.

To pak může vést spíše k delaminaci vrstev než efektu vyztužení. Experimentálně bylo tedy ověřeno, že polyesterová pryskyřice i chemická kotva zvyšují přílnavost výztuže k betonu a tím zvyšují i odolnost vůči zatížení ohybem.

Druhý experiment se zabýval testováním soudržnosti výztuže s matricí. Byly vytvořeny vzorky se dvěma typy adheziv a dvěma typy výztužných vláken (uhlíková a čedičová). Cílem tohoto provedení vzorků bylo stanovit adhezi vláken k cementové kaši v závislosti na hloubce uložení výztužných vláken. Na základě získaných dat z experimentu lze konstatovat, že se zde projevuje převážně rostoucí trend maximální vytažovací síly v závislosti na hloubce zavedení výztuže do betonového vzorku. Při porovnání vlivu čedičových a uhlíkových svazků vláken se projevily uhlíkové svazky vláken jako ty s lepší odolností proti vytažení z matrice. Na soudržnost měla větší vliv chemická kotva. V rámci testování soudržnosti se u vzorku s uhlíkovou výztuží s použitím polyesterové pryskyřice jako adheziva tato skutečnost nepotvrdila. Bylo zjištěno, že tento typ adheziva vykazoval nižší odolnost proti vytažení výztuže, než typ vzorku bez použitého adheziva.

Tato práce je úvodem do problematiky týkající se vyztužování stavebních konstrukcí vytvořených metodou 3D tisku. Předmětem dalšího zkoumání by mohlo být využití dlouhovlákných výztuží a jejich možné zakomponování do 3D tisku budov přímo na staveništi. Pravděpodobně vhodným vylepšením by bylo ponoření vlákných svazků v lázni s adhezivem, namísto potírání svazků, za účelem lepšího nasycení v celém objemu svazku.

V současné době již není problém postavit budovy, jako jsou rodinné domy, pomocí 3D tisku, avšak hlavním problémem je, že v České republice tomu brání legislativa. Po vyřešení problému s legislativou 3D tisk umožní rychlou a levnou výstavbu nových domů. Metodou 3D tisku je možné postavit obytnou budovu v řádu několika desítek hodin. Ekonomická nenáročnost souvisí s cenou materiálu a potřebou pouze několika málo pracovníků při stavbě.

Seznam použité literatury

- [1] DUGGAL, S.K. *Building materials*. 3. New Delhi: New age international publishers, 2008. ISBN 9789054107644.
- [2] BAREŠ, Richard. *Kompozitní materiály*. Vydání první. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, N. P., 1988.
- [3] COLLEPARDI, Mario. *Moderní beton*. 1. vyd. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) vydalo Informační centrum ČKAIT, 2009. Betonové stavitelství. ISBN 978-80-87093-75-7.
- [4] KRATOCHVÍL, Bohumil, Václav ŠVORČÍK a Dalibor VOJTĚCH. *Úvod do studia materiálů*. Vyd. 1. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2005. ISBN 80-7080-568-4.
- [5] AGARWAL, Bhagwan, Lawrence BROUTMAN a K. CHANDRASHEKHARA. *Analysis and performance of fiber composites*. Fourth edition. Hoboken, NJ: Wiley, 2018. ISBN 978-1-119-38998-9.
- [6] EDISON, Thomas A. *Manufacture of carbon filaments for electric lamps*. 1886. United states. 490954. Uděleno 31/1 1893. Zapsáno 6/11 1886.
- [7] RILEY, Alano. *Fiber Reinforced Polymers: The Technology Applied for Concrete Repair*. Scitus Academics, 2017. ISBN 978-1-68117-272-9.
- [8] MOHRI, Yoshio. *Alkali-resistant glass composition*. 1976. United states. 4066465. Uděleno 3/1 1978. Zapsáno 4/10 1976.
- [9] KIZILKANAT, Ahmet, Nihat KABAY, Veysel AKYÜNCÜ, Swaptik CHOWDHURY a Abdullah AKÇA. Mechanical properties and fracture behavior of basalt and glass fiber reinforced concrete: An experimental study. *Construction and Building Materials* [online]. 2015, **100**, 218-224 [cit. 2022-05-16]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.10.006

- [10] HIGH, Cory, Hatem SELIEM, Adel EL-SAFY a Sami RIZKALLA. Use of basalt fibers for concrete structures. *Construction and Building Materials* [online]. 2015, **96**, 37-46 [cit. 2022-05-15]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.07.138
- [11] PERROT, Arnaud, ed. *3D printing of concrete: state of the art and challenges of the digital construction revolution*. First published. London: ISTE, 2019. Civil engineering and geomechanics series. ISBN 978-1-78630-341-7.
- [12] VIALVA, Tia. A french family is the first to move into a 3D printed house. In: *3D Printing Industry* [online]. 2018 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/news/a-french-family-is-the-first-to-move-into-a-3d-printed-house-135881/>
- [13] Digital structures ready. In: *Ice* [online]. [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://www.ice.cz/cs/ice-coral/?fbclid=IwAR0ve3IKH9cYJMEBesUHDWEMQzuVuTw72yDtsk8EpHiB0RvexAWTLy1WzIM>
- [14] SAUNDERS, Sarah. Cazza Construction Technologies Introduces 3D Printing Construction Robots and Sees High Demand. In: *3D print* [online]. [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: https://3dprint.com/189228/cazza-3d-print-construction-robots/?fbclid=IwAR2CknYbxQqd8RS2l_hPNSSM73vqcZ5aJ1GLnhvB9x_udUKxR-jfo10eryA
- [15] ORSI, Gyöngy. Europe's largest 3D printer prints a two-story house. In: *Hype & Hyper* [online]. [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: https://hypeandhyper.com/en/europes-largest-3d-printer-prints-a-two-story-house/?fbclid=IwAR1ivIBlfJ2gQ_SsANShXNAjh2AH6xLnc7ZPjGFn3PTpuqI-xA39LvJSM0
- [16] 3d Printing Architecture. In: *Wasp* [online]. [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://www.3dwasp.com/en/3d-printing-architecture/>
- [17] ASPRONE, Domenico, Ferdinando AURICCHIO, Costantino MENNA a Valentina MERCURI. 3D printing of reinforced concrete elements: Technology and design

- approach. *Construction and Building Materials* [online]. 2018, **165**, 218-231 [cit. 2022-05-15]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.01.018
- [18] BOS, Freek, Zeeshan AHMED, Rob WOLFS a Theo SALET. 3D Printing Concrete with Reinforcement. HORDIJK, D.A. a M. LUKOVIĆ, ed., D.A. HORDIJK, M. LUKOVIĆ. *High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet* [online]. Cham: Springer International Publishing, 2018, s. 2484-2493 [cit. 2022-05-15]. ISBN 978-3-319-59470-5. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-319-59471-2_283
- [19] Adhesion. BROCKMANN, W., P.L GEIß, J. KLINGEN a B. SCHRÖDER. *Adhesive Bonding*. WILEY-VCH, 2009, s. 15-25. ISBN 978-3-527-32014-1.
- [20] CECH, Vladimír. NEW PROGRESS IN COMPOSITE INTERPHASES: A USE OF PLASMA TECHNOLOGIES. *FRC 2000–Composites for the Millennium* [online]. Elsevier, 2000, s. 246-252 [cit. 2022-05-15]. ISBN 9781855735507. Dostupné z: doi:10.1533/9780857093134.246
- [21] SCHMID, Pavel. *Základy zkušebnictví*. Vyd. 2. opr. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2584-9.
- [22] ČSN EN 12390-3. *Zkoušení ztvrdlého betonu: Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*. 2020.
- [23] *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 6: Pevnost v příčném tahu těles*.
- [24] ČSN EN 12390-6. *Zkoušení ztvrdlého betonu: Část 6: Pevnost v příčném tahu zkušebních těles*. 2010.
- [25] EHRENSTEIN, Gottfried W., Karel DOLEČEK a Jaroslav PADOVEC, Josef KABELKA. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [26] ČSN EN 12390-5. *Zkoušení ztvrdlého betonu: Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles*. 2020.
- [27] TEKLAL, Fatiha, Arezki DJEBBAR, Samir ALLAOUI, Gilles HIVET, Yoann JOLIFF a Bachir KACIMI. A review of analytical models to describe pull-out behavior – Fiber/matrix adhesion. *Composite Structures* [online]. 2018, **201**, 791-

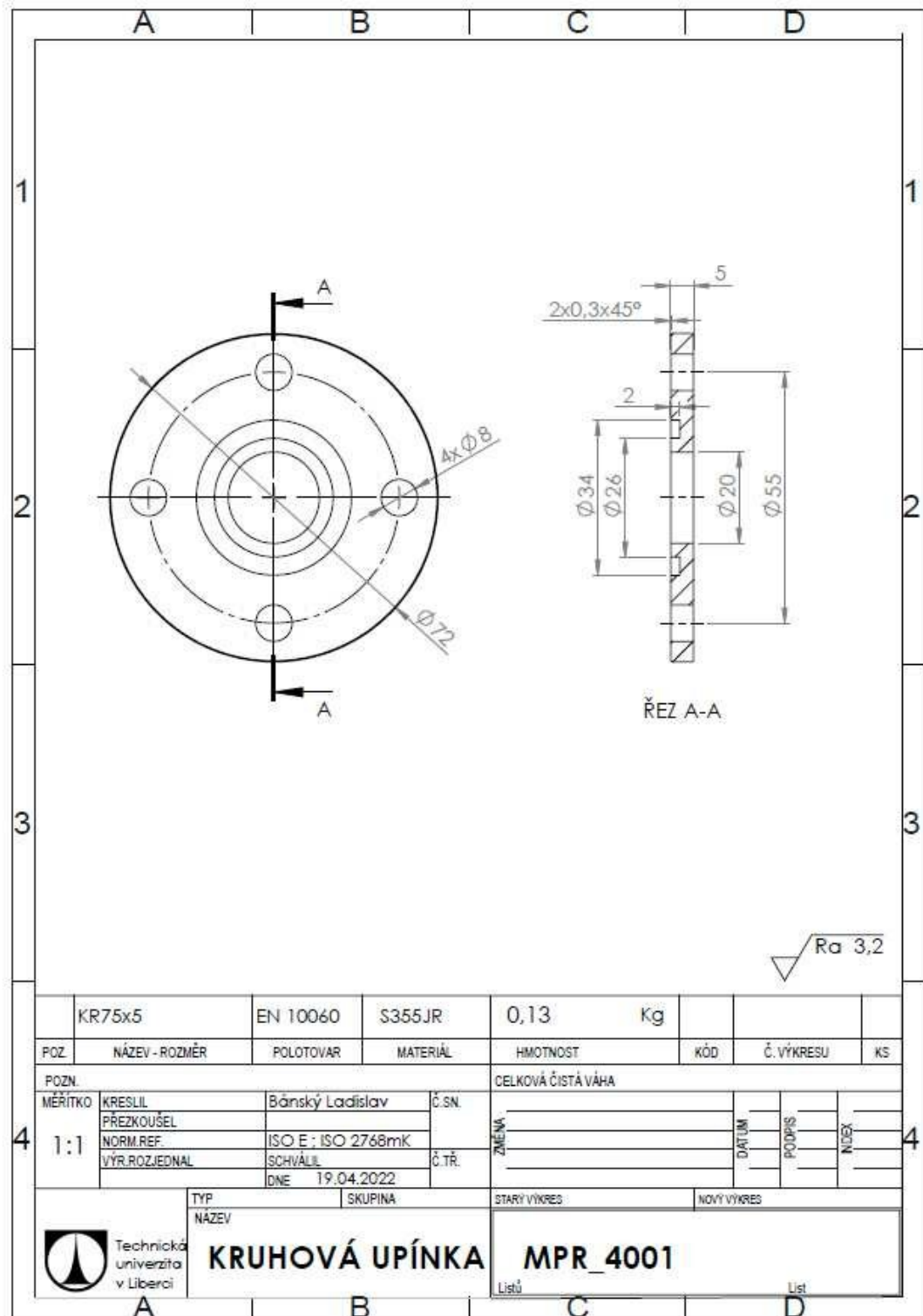
815 [cit. 2022-05-15]. ISSN 02638223. Dostupné z:
doi:10.1016/j.compstruct.2018.06.091

[28] Teijin Carbon Fiber Business. In: *Teijin* [online]. [cit. 2022-05-15]. Dostupné z:
<https://www.tejincarbon.com/?r=1>

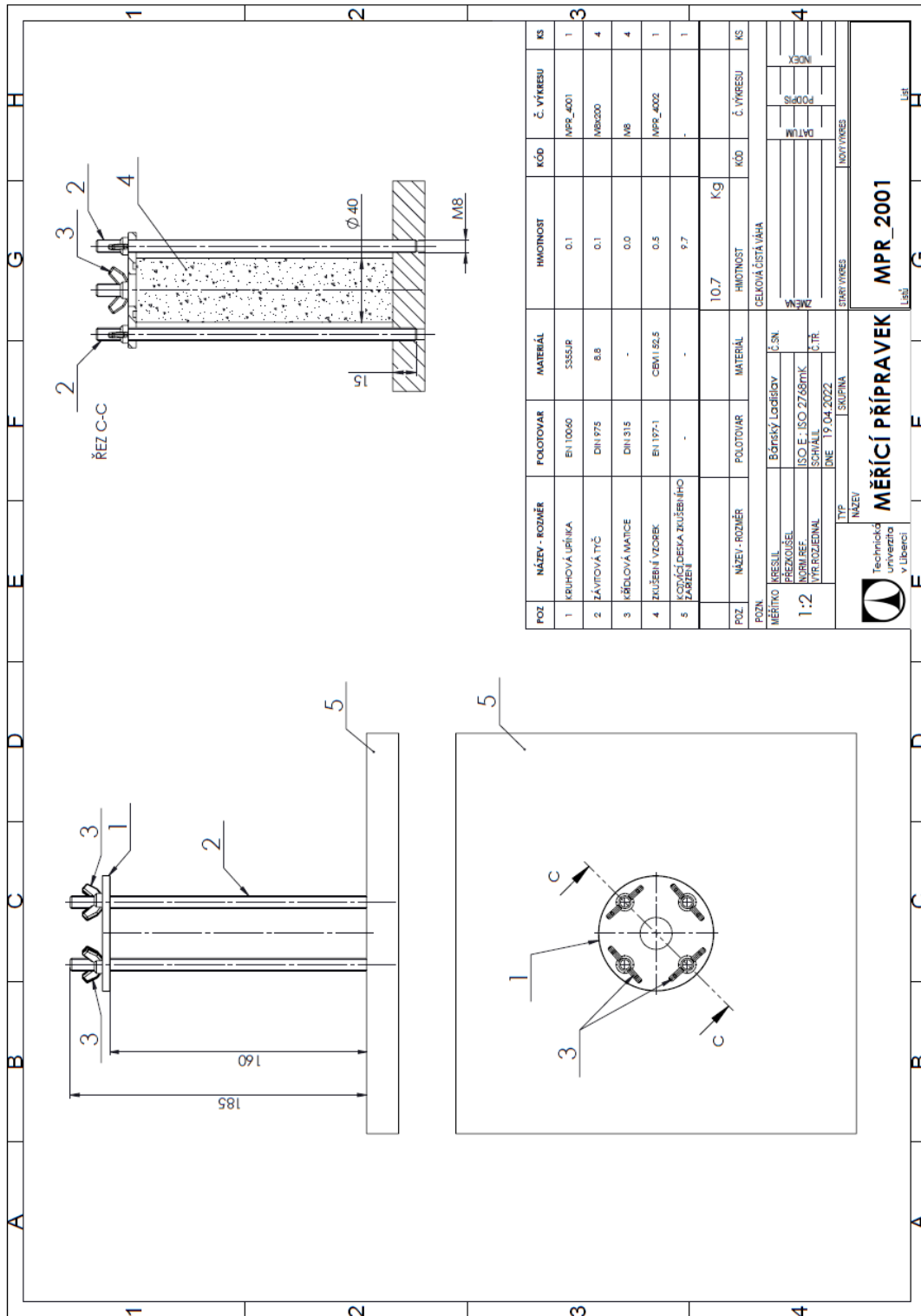
[29] Assembled roving. In: *Basaltex* [online]. [cit. 2022-05-15]. Dostupné z:
<https://www.basaltex.com/products/fibers-and-rovings/assembled-roving>

Přílohy

Příloha A: Technický výkres kruhové upínky

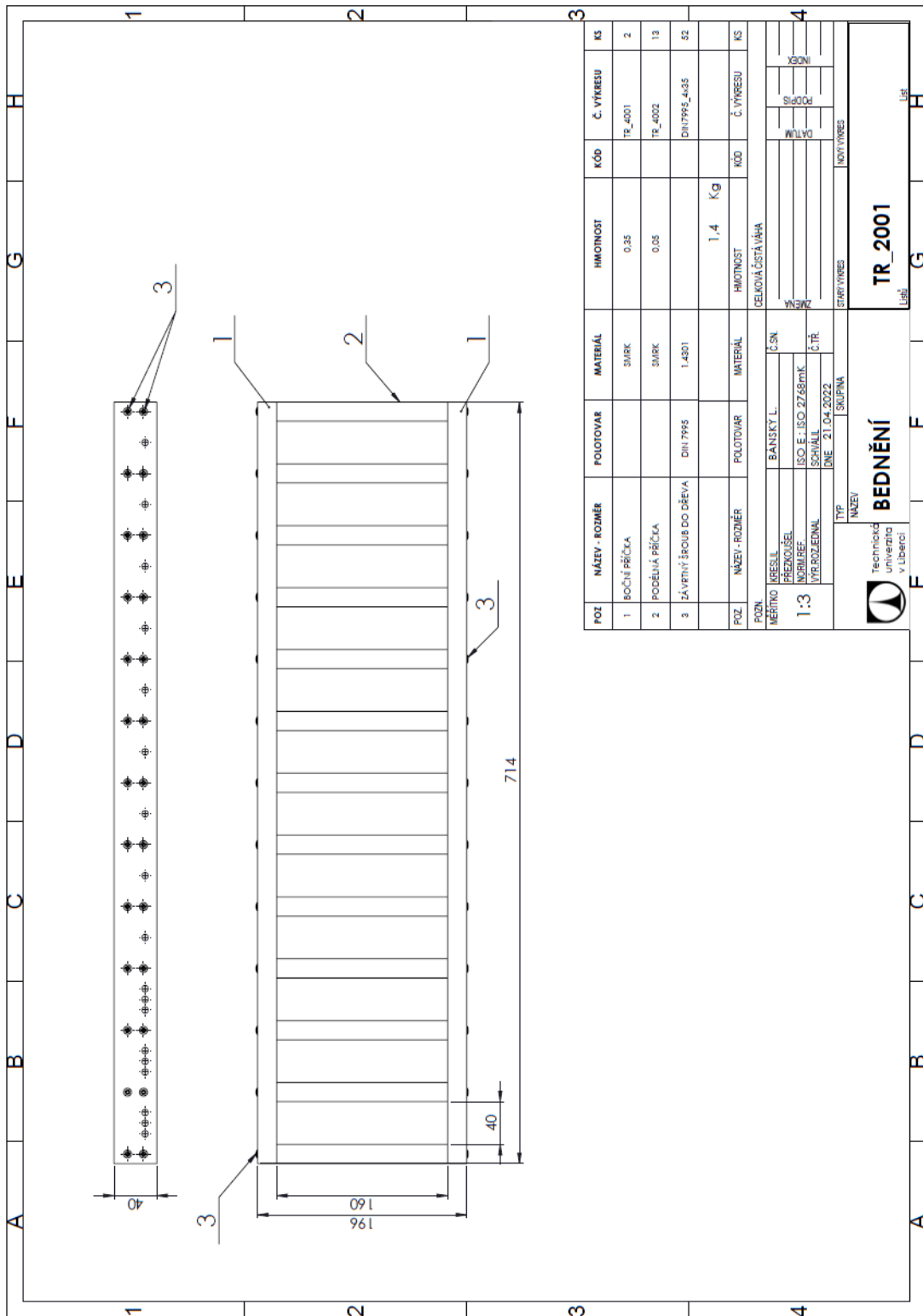


Příloha B: Technický výkres měřícího přípravku



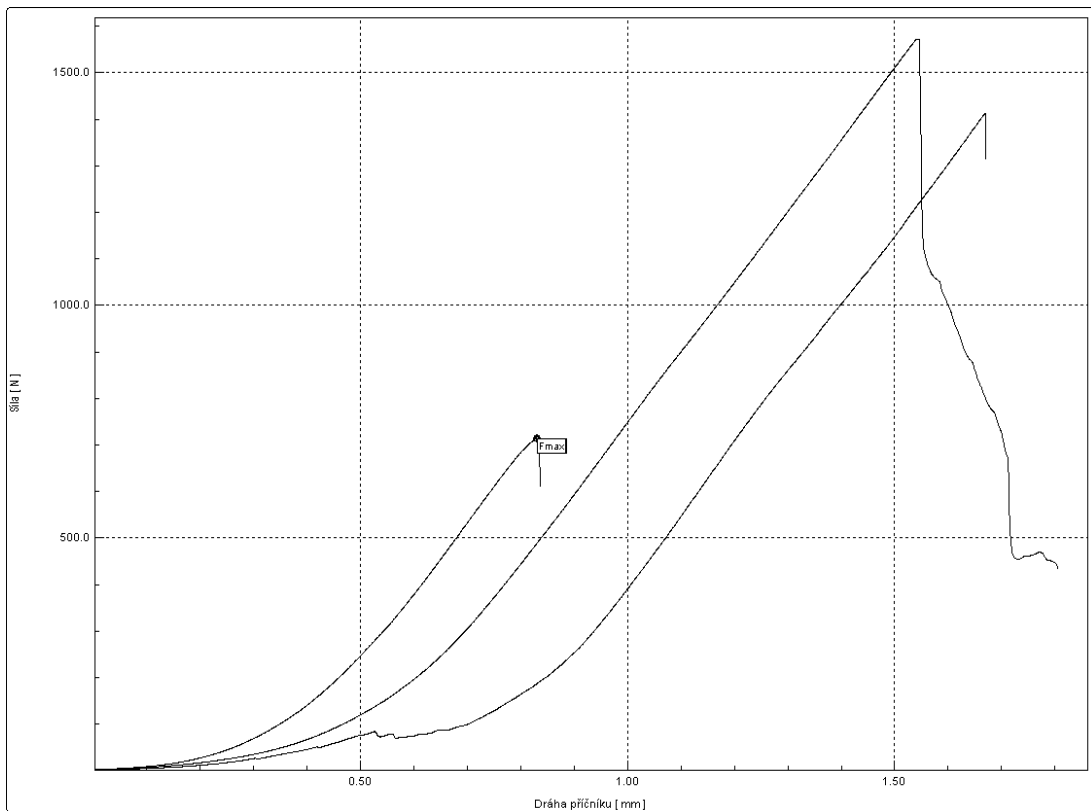
POZ	NÁZEV - ROZMĚR	POLOTOVAR	MATERIÁL	HMOTNOST	KÓD	Č. VÝKRESU	KS	
1	KRUHOVÁ UPÍNKA	EN 10040	S355JR	0.1		MPR_2001	1	
2	ZÁVITOVÁ TYČ	DIN 975	8.8	0.1		MB200	4	
3	KŘÍDOVÁ MATICE	DIN 1315	-	0.0		MB	4	
4	ZÁJĚBNÍ VZOREK	EN 197-1	CBM1 50,5	0.5		MPR_2002	1	
5	KOTVÍCÍ DĚVIA ZÁJĚBNÍHO ZARŘENÍ	-	-	9.7		-	1	
POZ	NÁZEV - ROZMĚR	POLOTOVAR	MATERIÁL	HMOTNOST	KÓD <td>Č. VÝKRESU</td> <td>KS</td>	Č. VÝKRESU	KS	
				10.7				
POZN	CELKOVÁ ČISTÁ VÁHA							
MĚŘÍTKO	MĚŘÍTKO	Č. SN						
1:2	BŘEŠŤOVÝ							
	NORM. REF.	ISO E - ISO 2768MK						
	TVR. ROZJEZD	SCHWALL	Č. TR.					
		DNE 19.04.2022						
TYP		SKUPINA						
NÁZEV		SKUPINA						
MĚŘÍCÍ PŘÍPRAVEK		SKUPINA						
MPR_2001		SKUPINA						
Technická univerzita v Liberci		SKUPINA						
Libeň		SKUPINA						
Lst		SKUPINA						

Příloha C: Technický výkres bednění

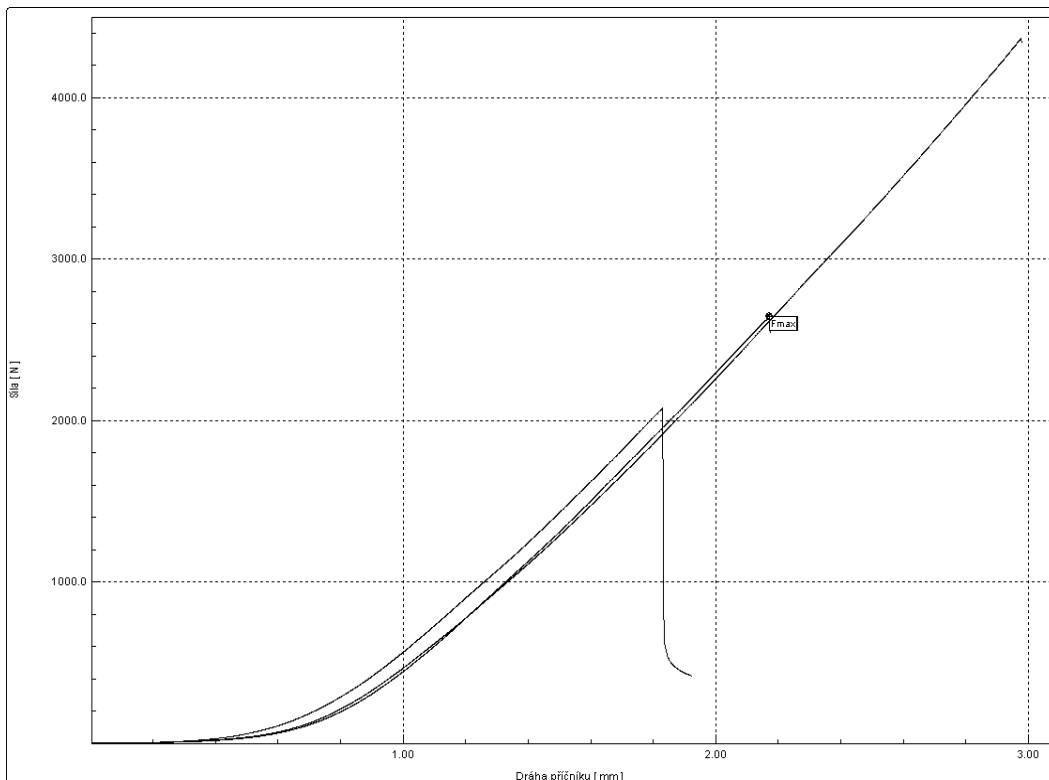


Příloha D: Betonové trávky testované třibodovým ohybem

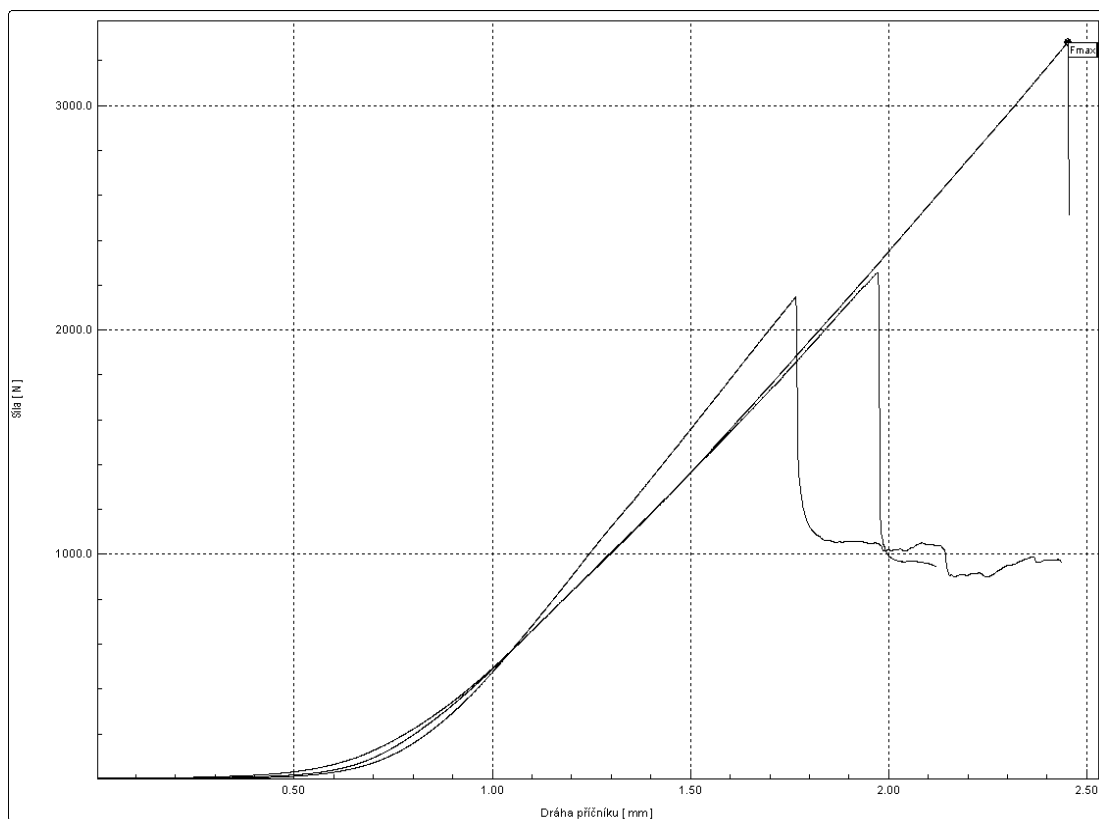
Betonové trávky bez výztuže testované třibodovým ohybem



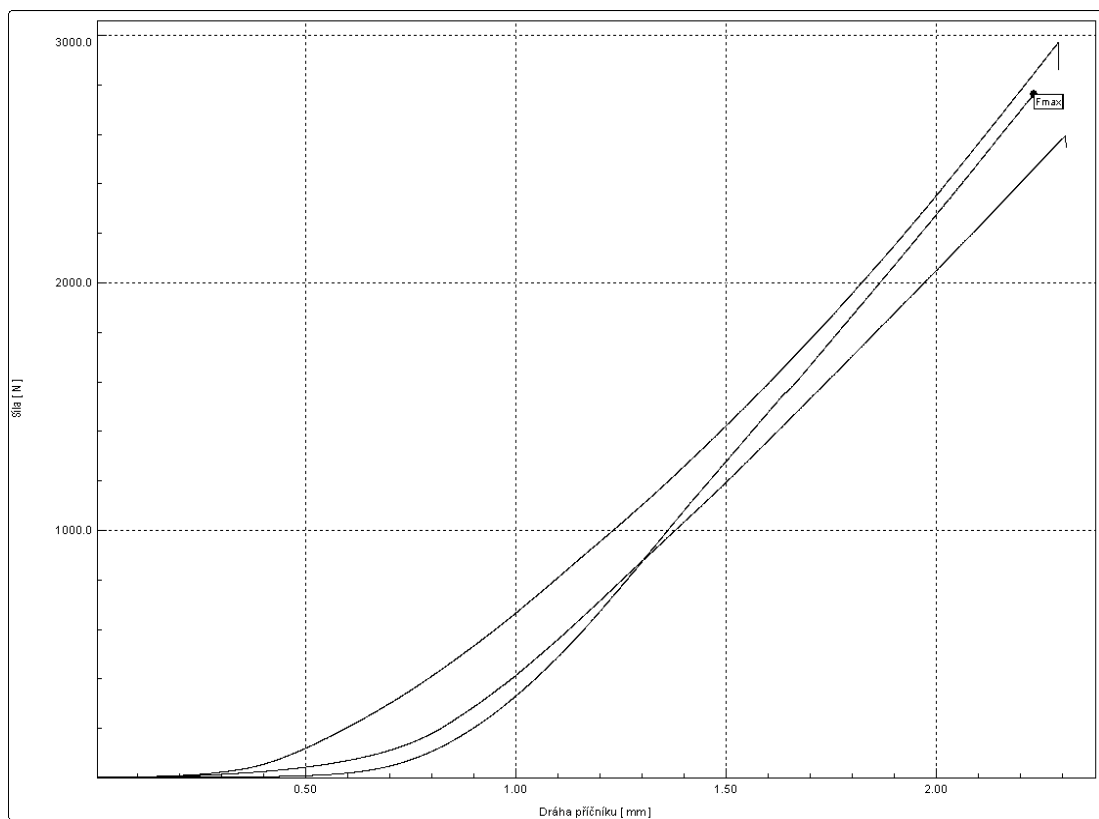
Betonové trávky s čedičovou výztuží bez adheziva testované třibodovým ohybem



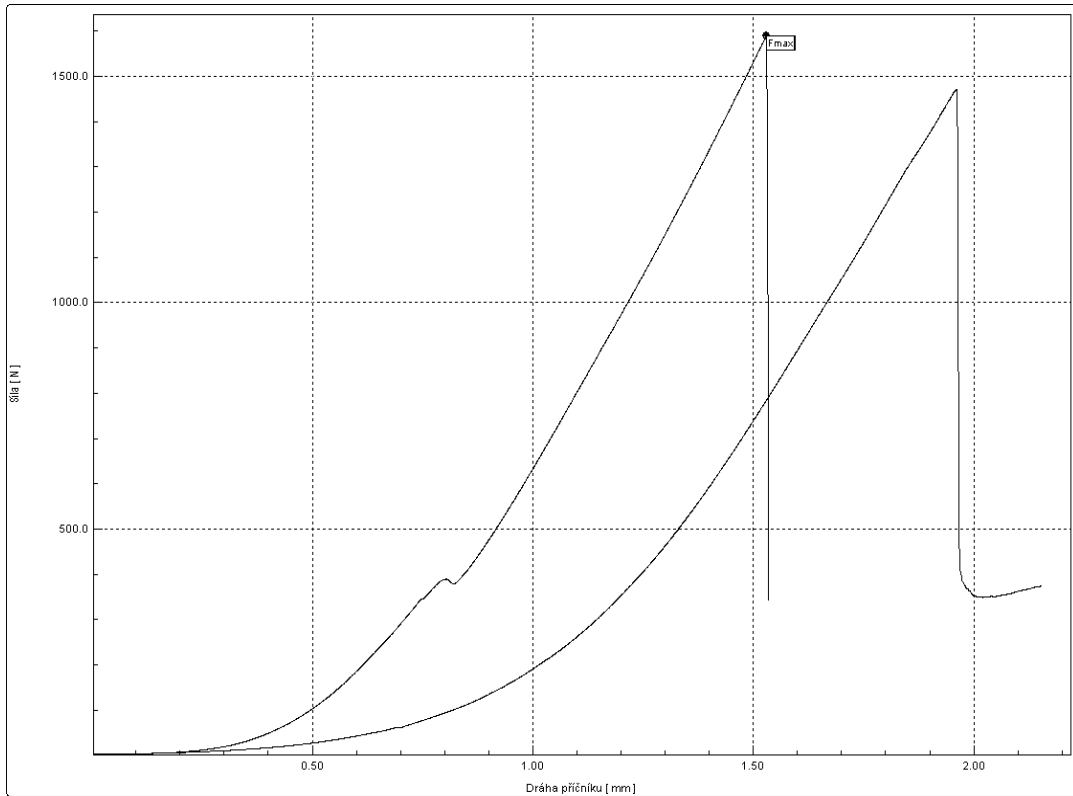
Betonové trávky s řediřovou vřztuřĩ s chemickou kotvou testované třĩbodovřm ohybem



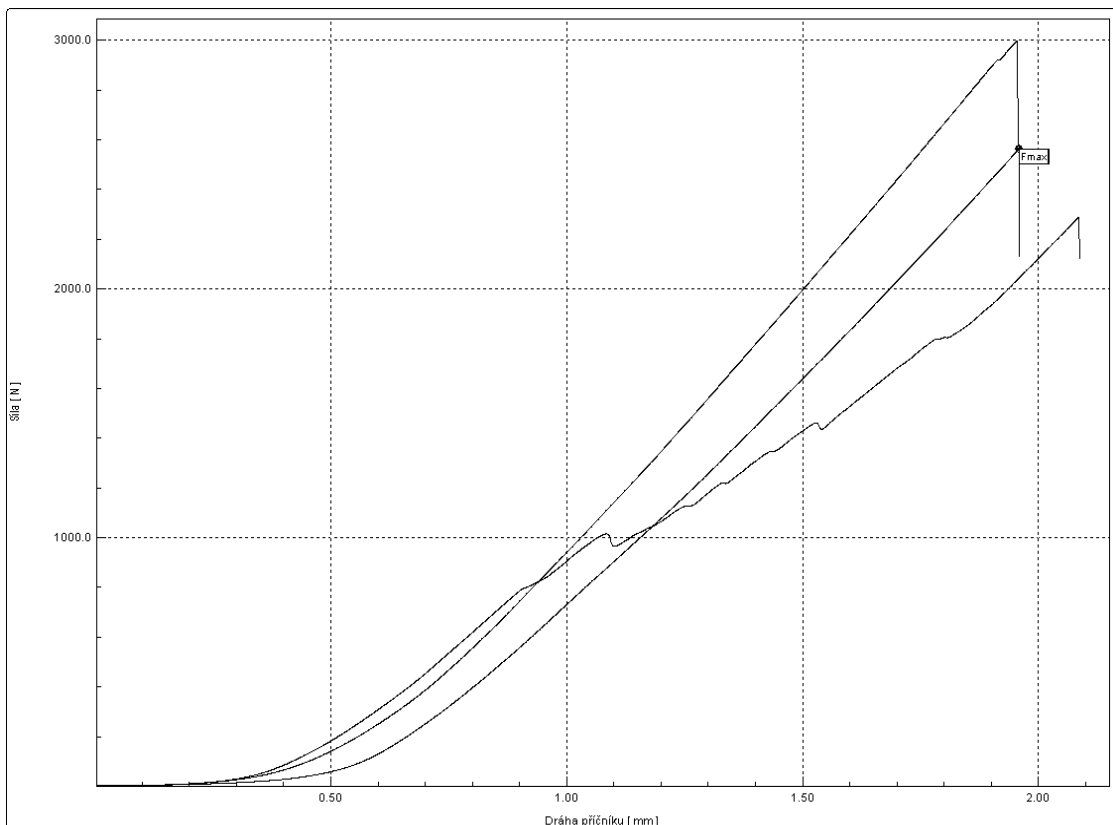
Betonové trávky s řediřovou vřztuřĩ s polyesterovou pryskyřĩcí testované třĩbodovřm ohybem



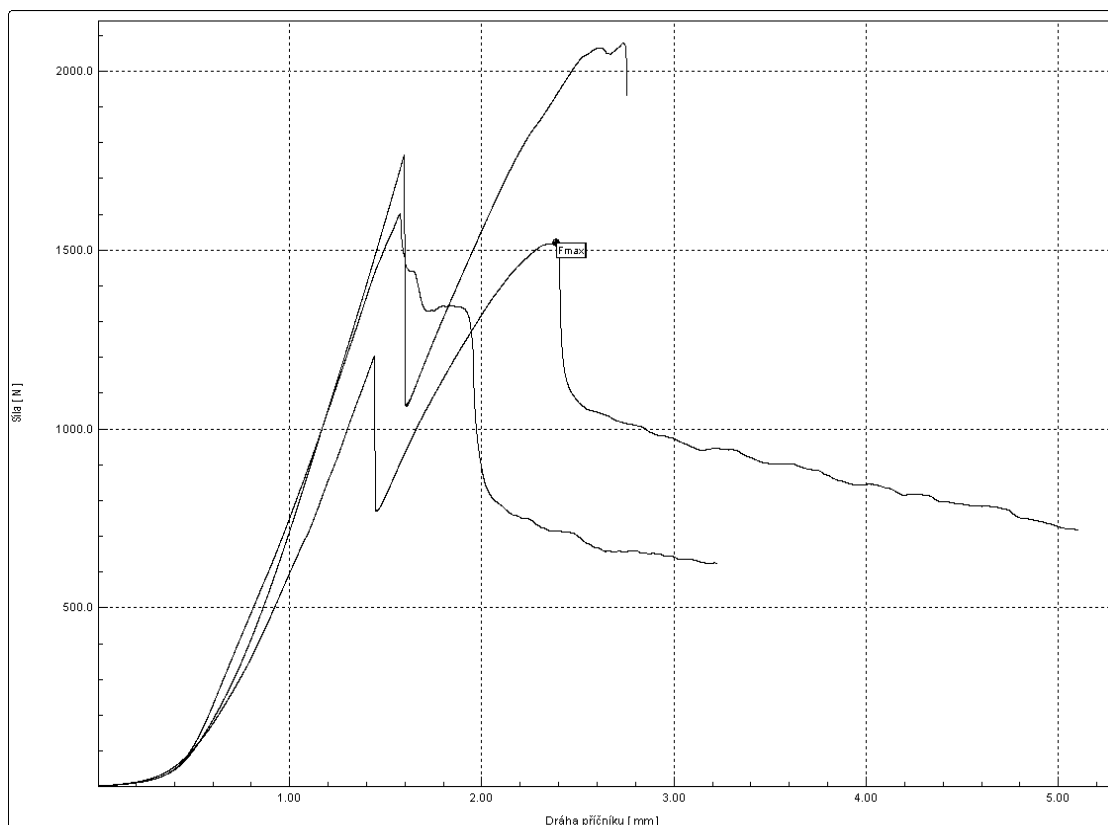
Betonové trávky se třemi svazky čedičové výztuže bez adheziv testované třibodovým ohybem



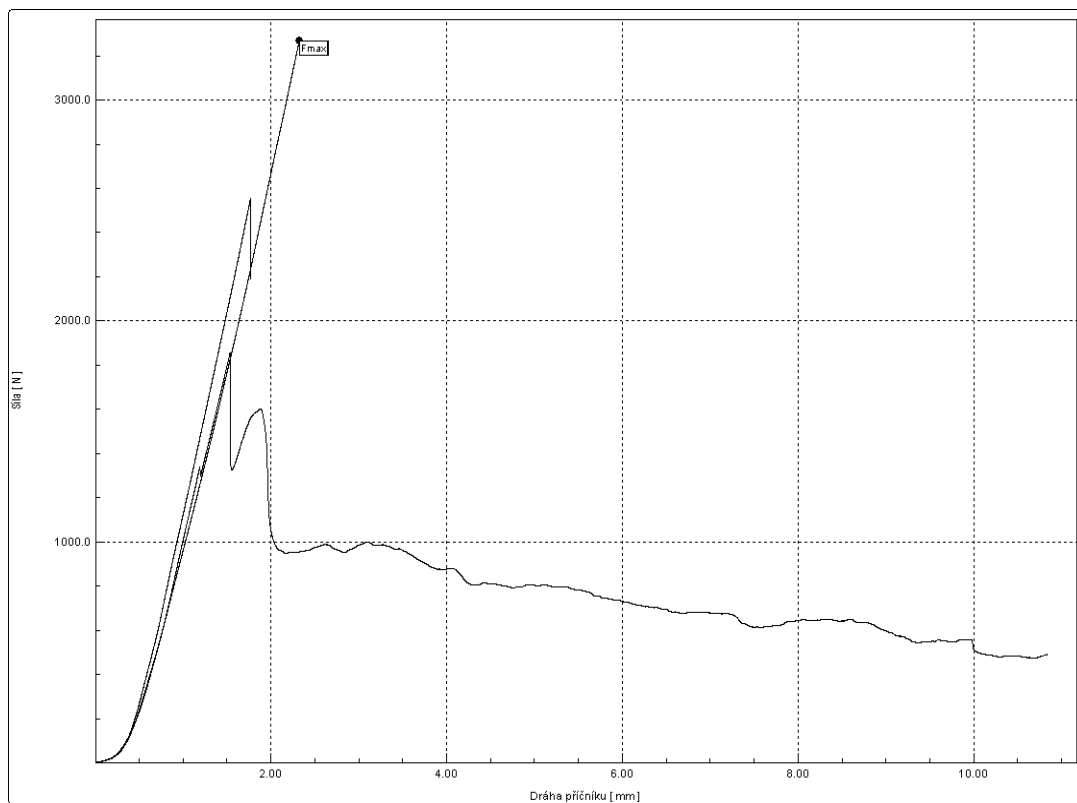
Betonové trávky s uhlíkovou výztuží bez použití adheziva testované třibodovým ohybem



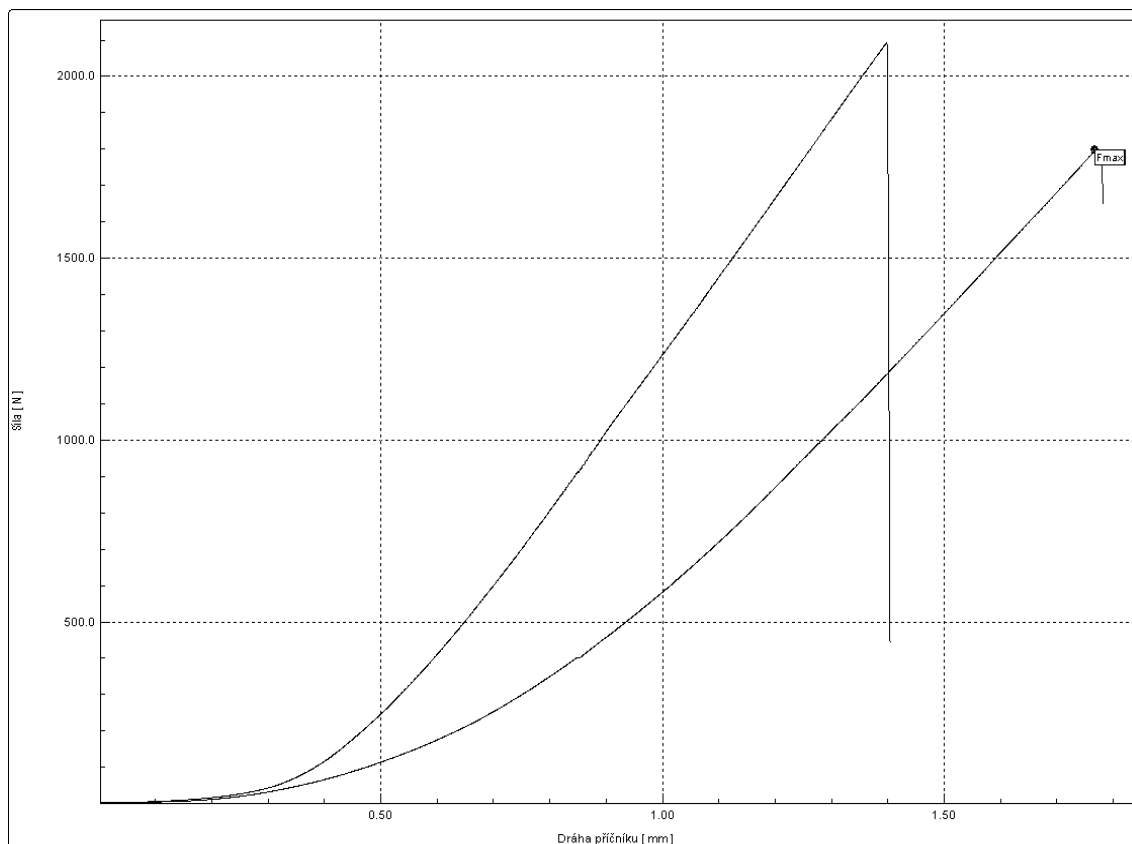
Betonové trávky s uhlíkovou výztuží s chemickou kotvou testované tříbodovým ohybem



Betonové trávky s uhlíkovou výztuží s polyesterovou pryskyřicí testované tříbodovým ohybem

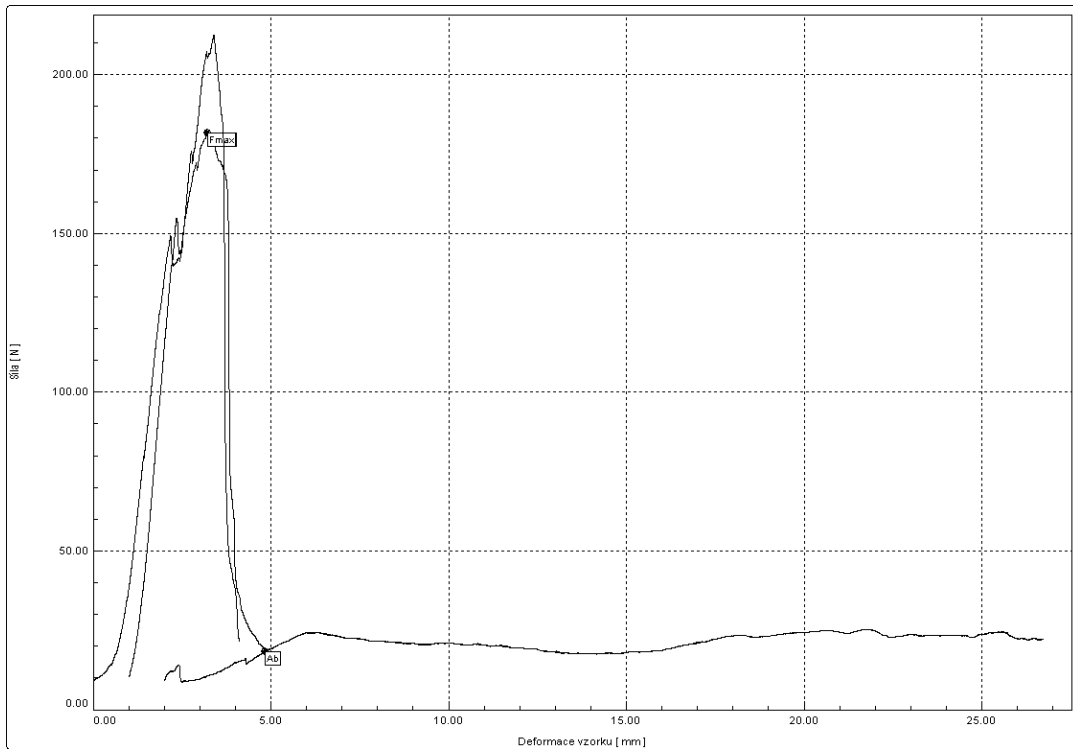


Betonové trávky se třemi svazky uhlíkové výztuže bez adheziv testované třibodovým ohybem

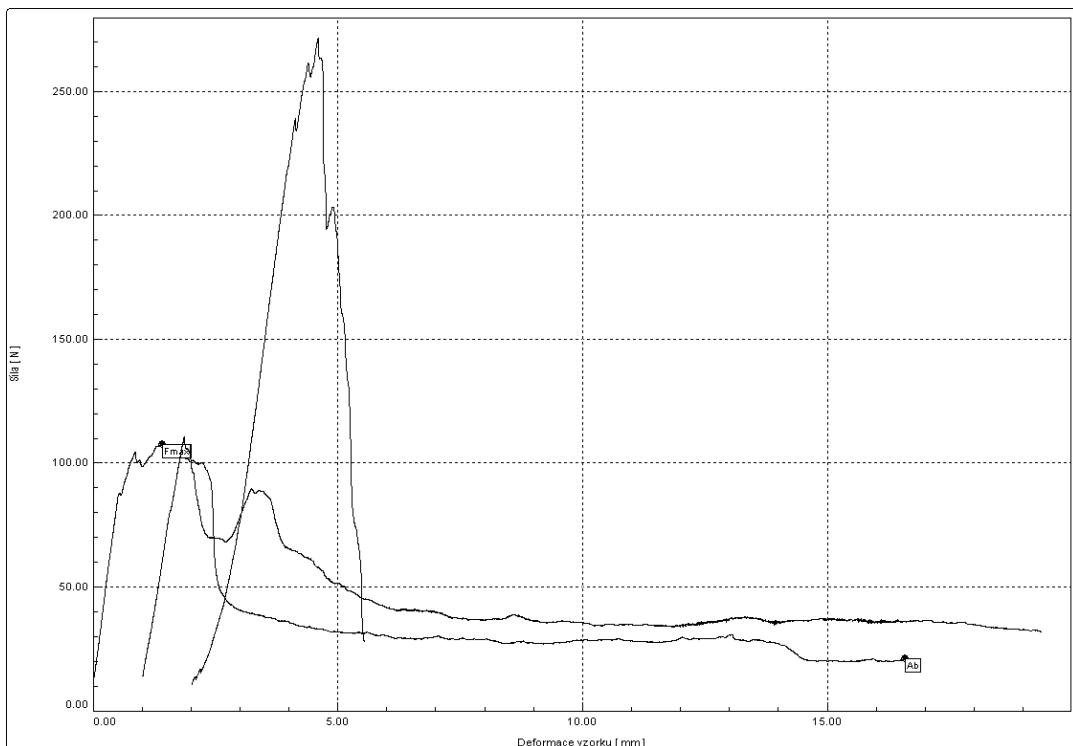


Příloha E: Betonové válečky s vláknennou výztuží testované vytahovací zkouškou

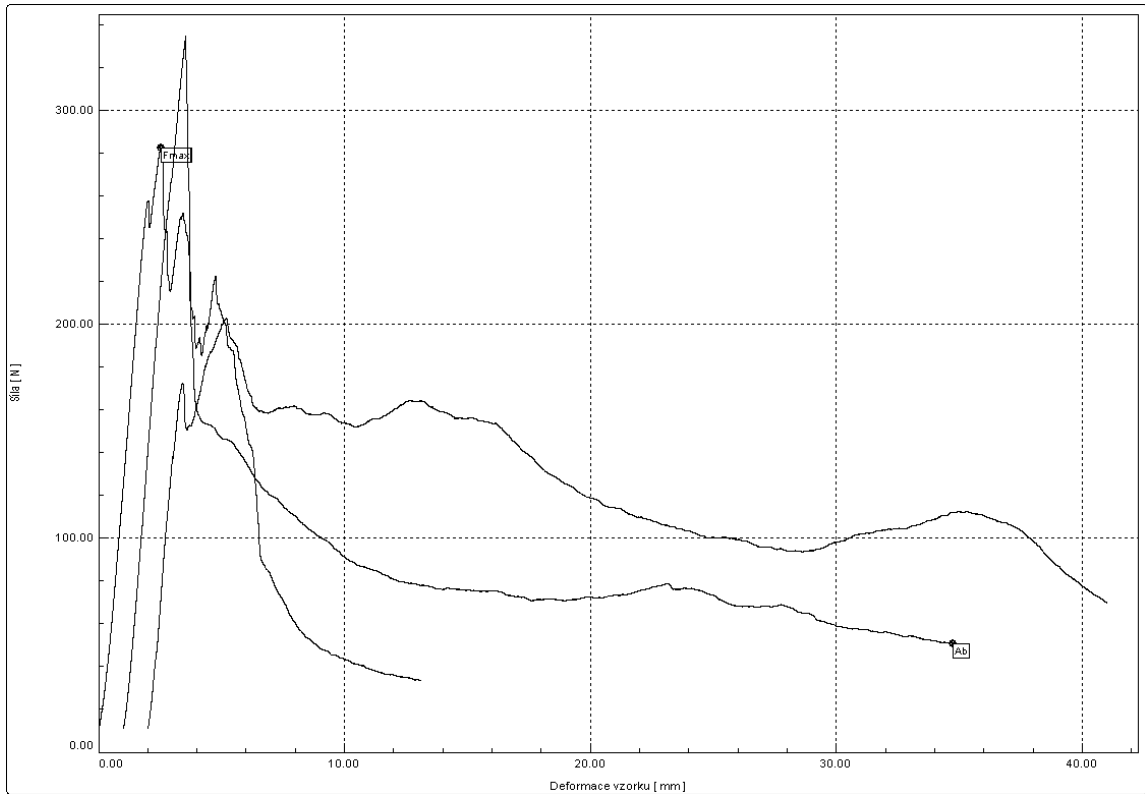
Betonové válečky s čedičovou výztuží zavedenou do 1/3 hloubky bez adheziva testované na soudržnost



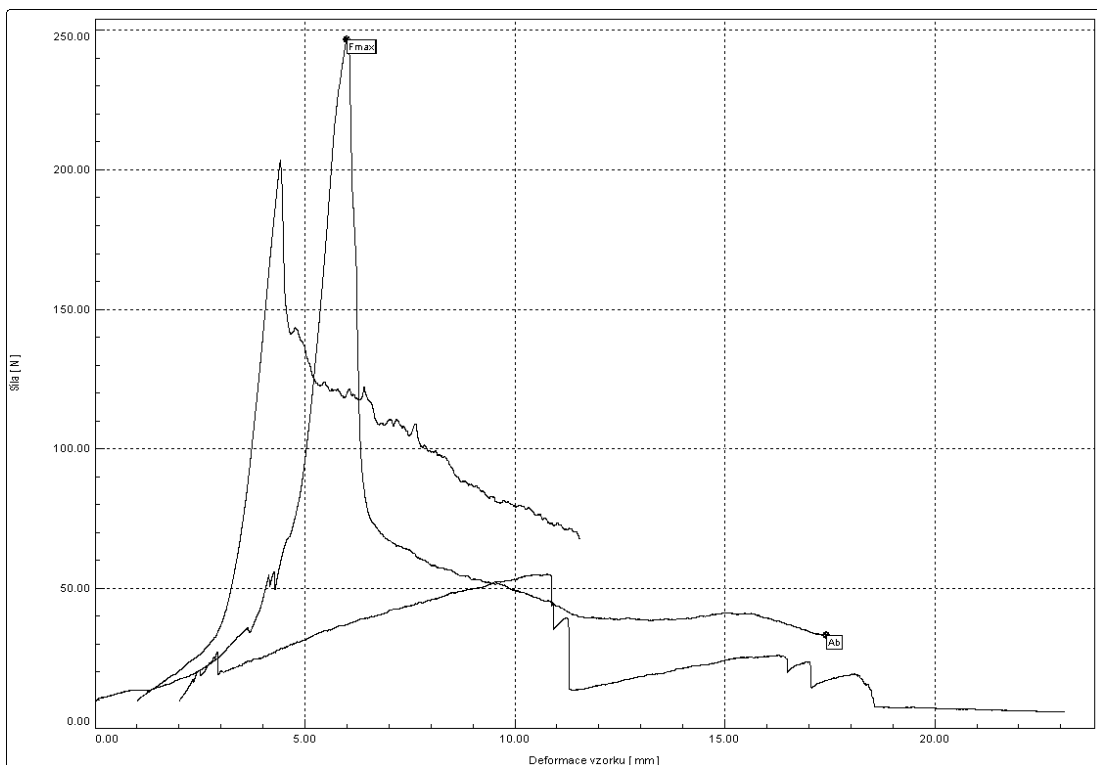
Betonové válečky s čedičovou výztuží zavedenou do 2/3 hloubky bez adheziva testované na soudržnost



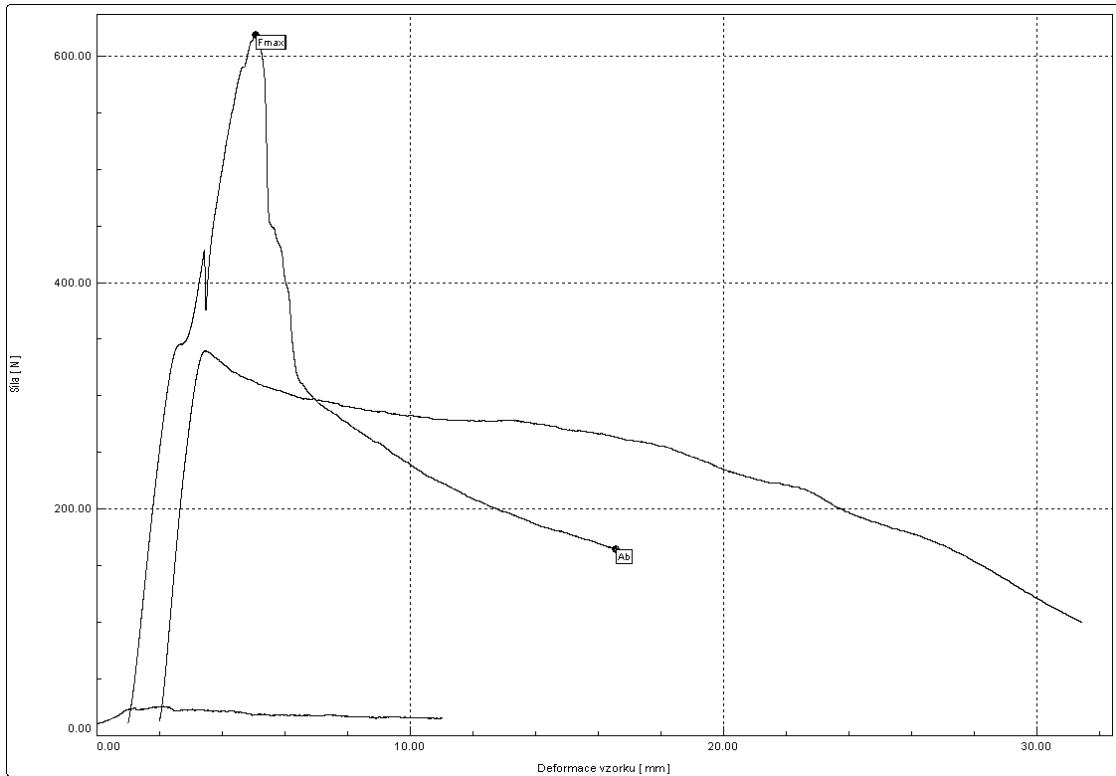
Betonové válečky s čedičovou výztuží zavedenou do 3/3 hloubky bez adheziva testované na soudržnost



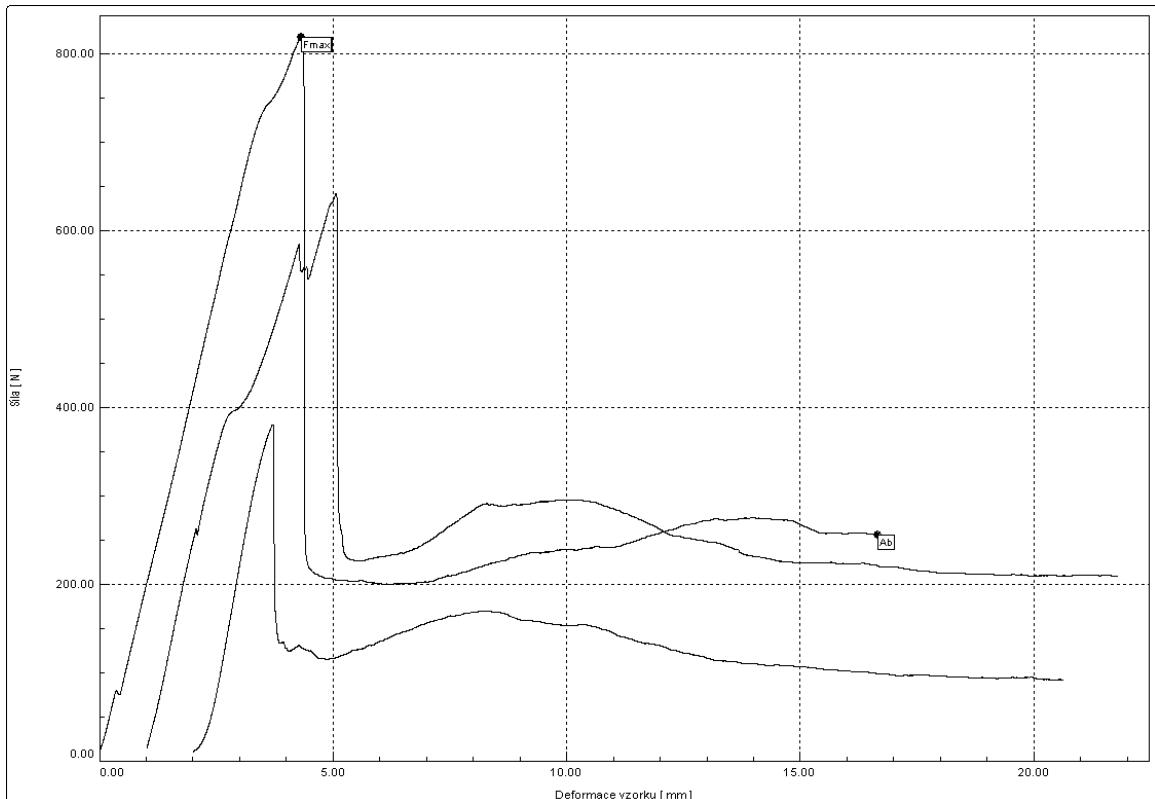
Betonové válečky s uhlíkovou výztuží zavedenou do 1/3 hloubky bez adheziva testované na soudržnost



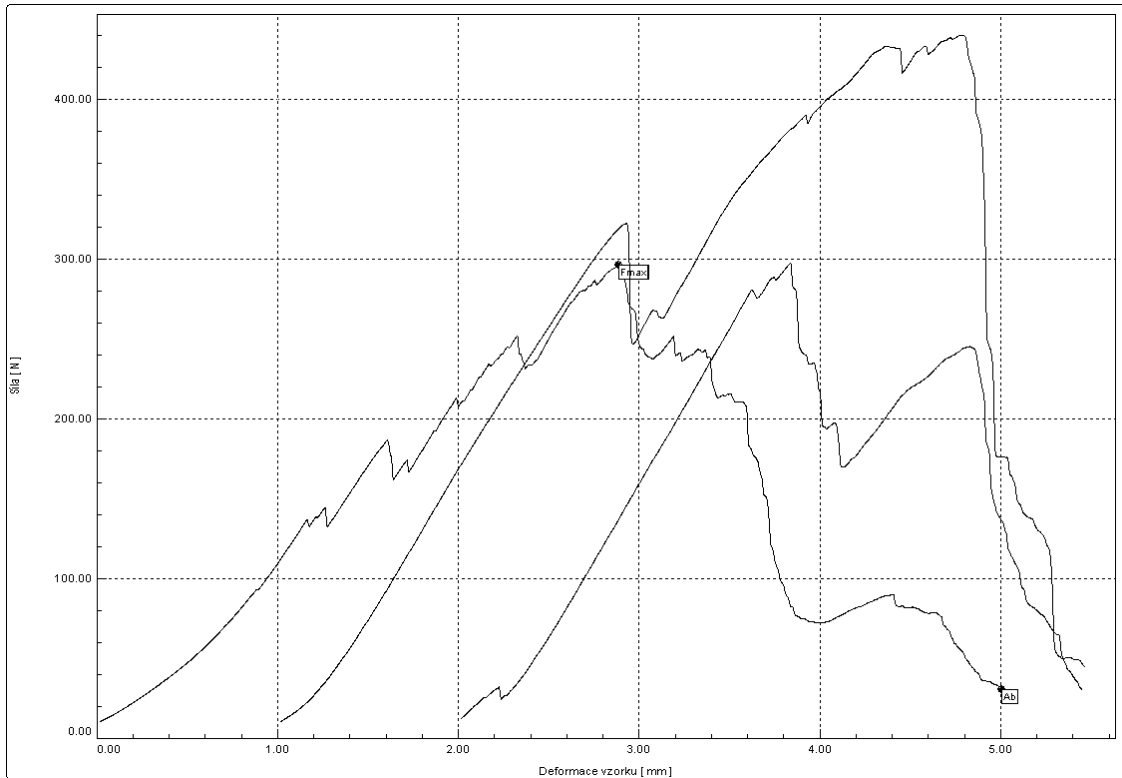
Betonové válečky s uhlíkovou výztuží zavedenou do 2/3 hloubky bez adheziva testované na soudržnost



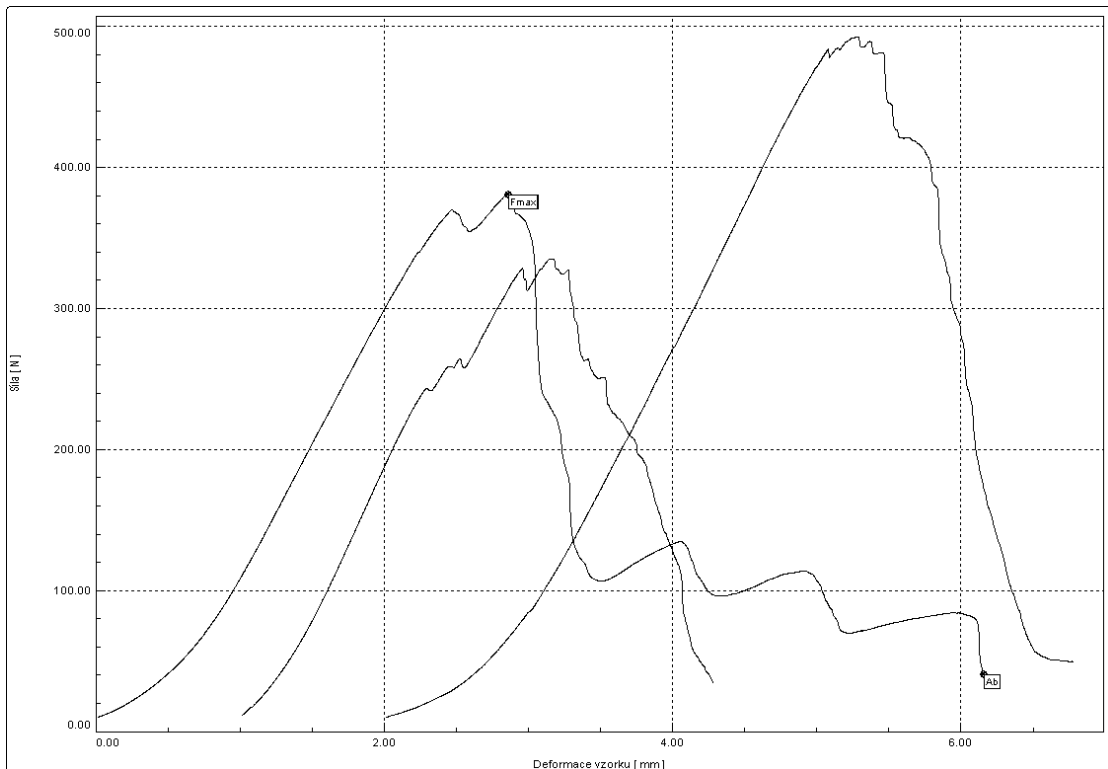
Betonové válečky s uhlíkovou výztuží zavedenou do 3/3 hloubky bez adheziva testované na soudržnost



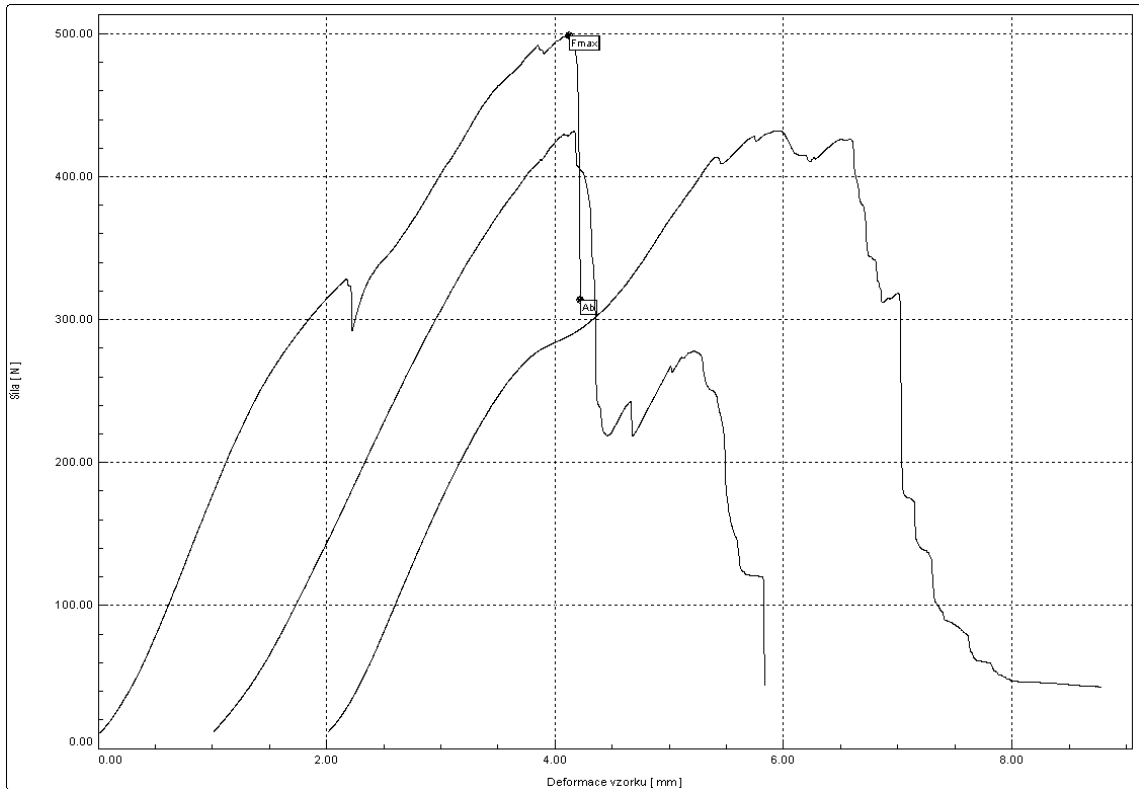
Betonové válečky s čedičovou výztuží zavedenou do 1/3 hloubky s chemickou kotvou testované na soudržnost



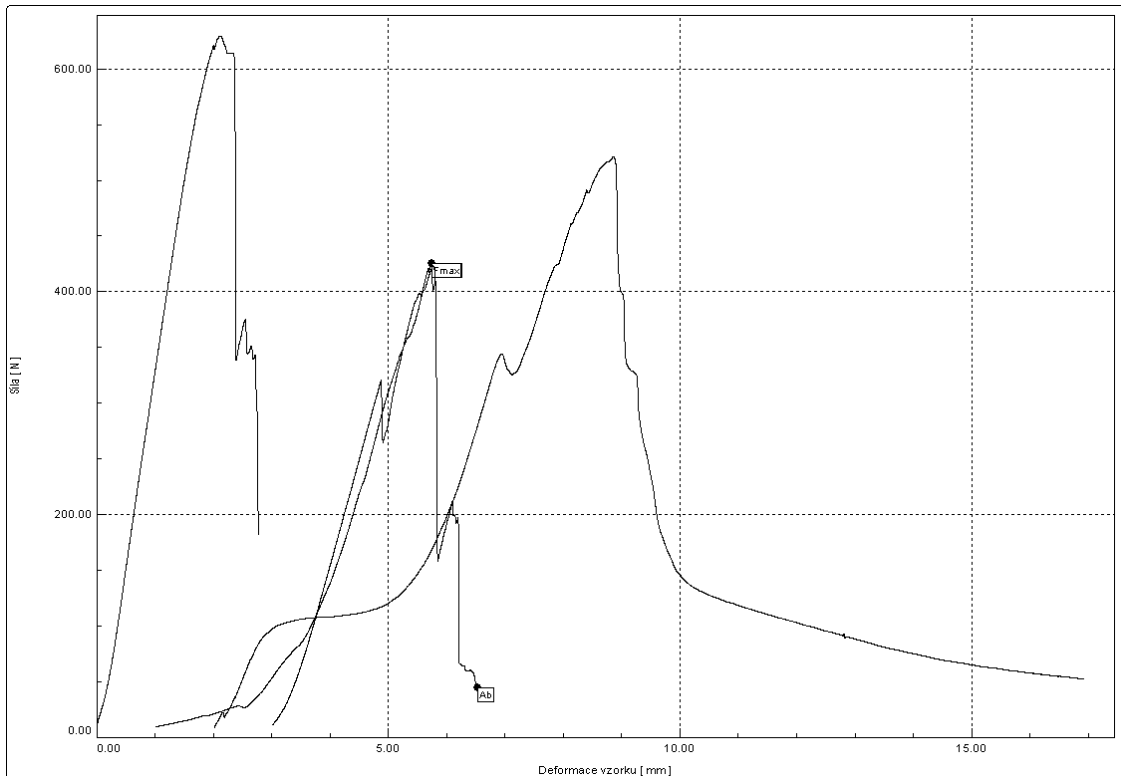
Betonové válečky s čedičovou výztuží zavedenou do 2/3 hloubky s chemickou kotvou testované na soudržnost



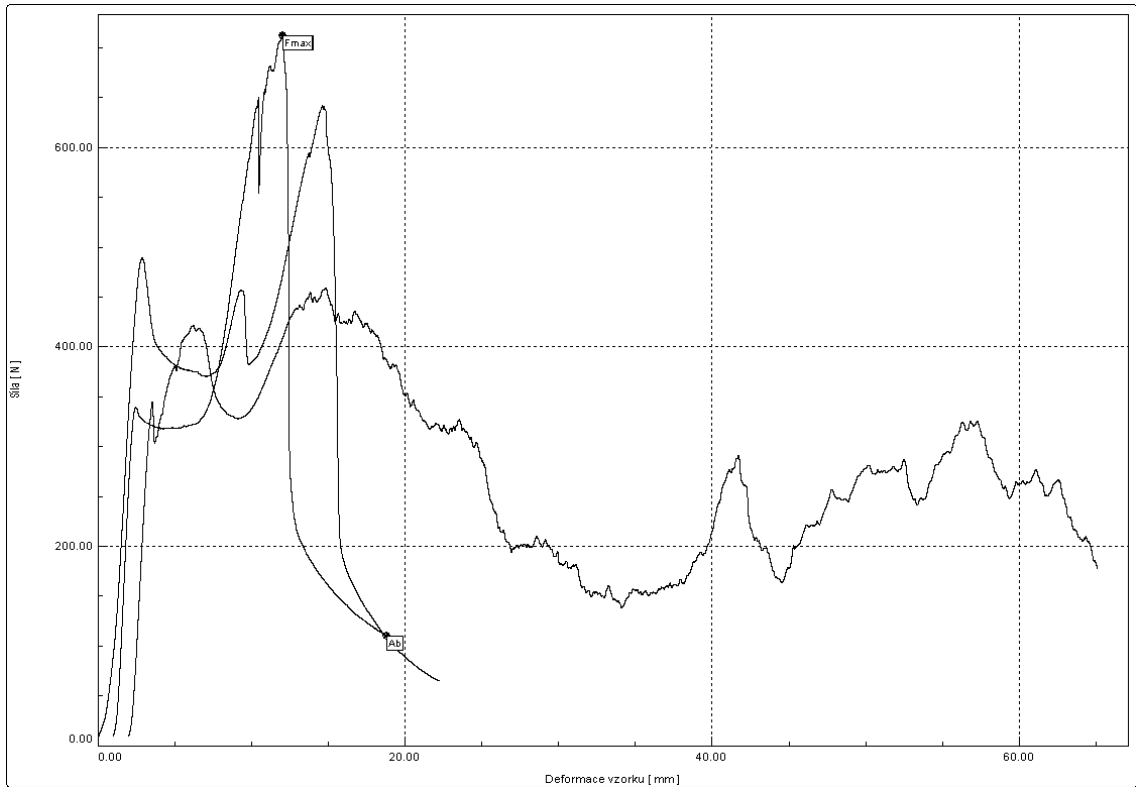
Betonové válečky s čedičovou výztuží zavedenou do 3/3 hloubky s chemickou kotvou testované na soudržnost



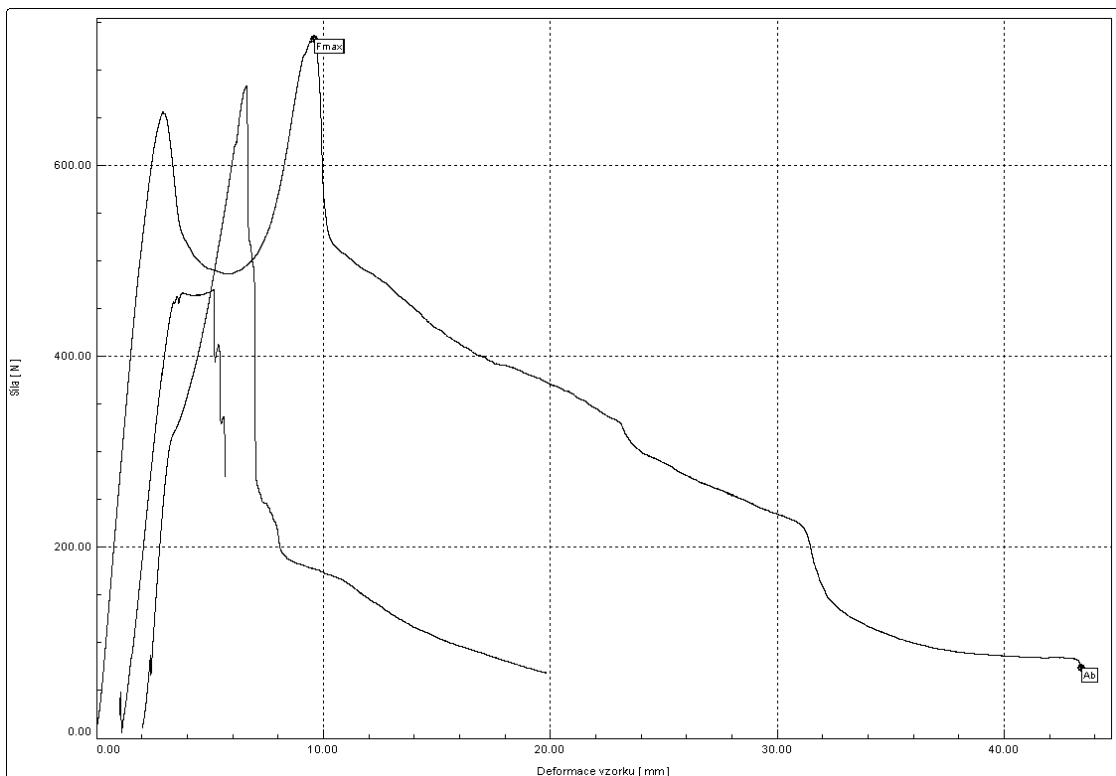
Betonové válečky s uhlíkovou výztuží zavedenou do 1/3 hloubky s chemickou kotvou testované na soudržnost



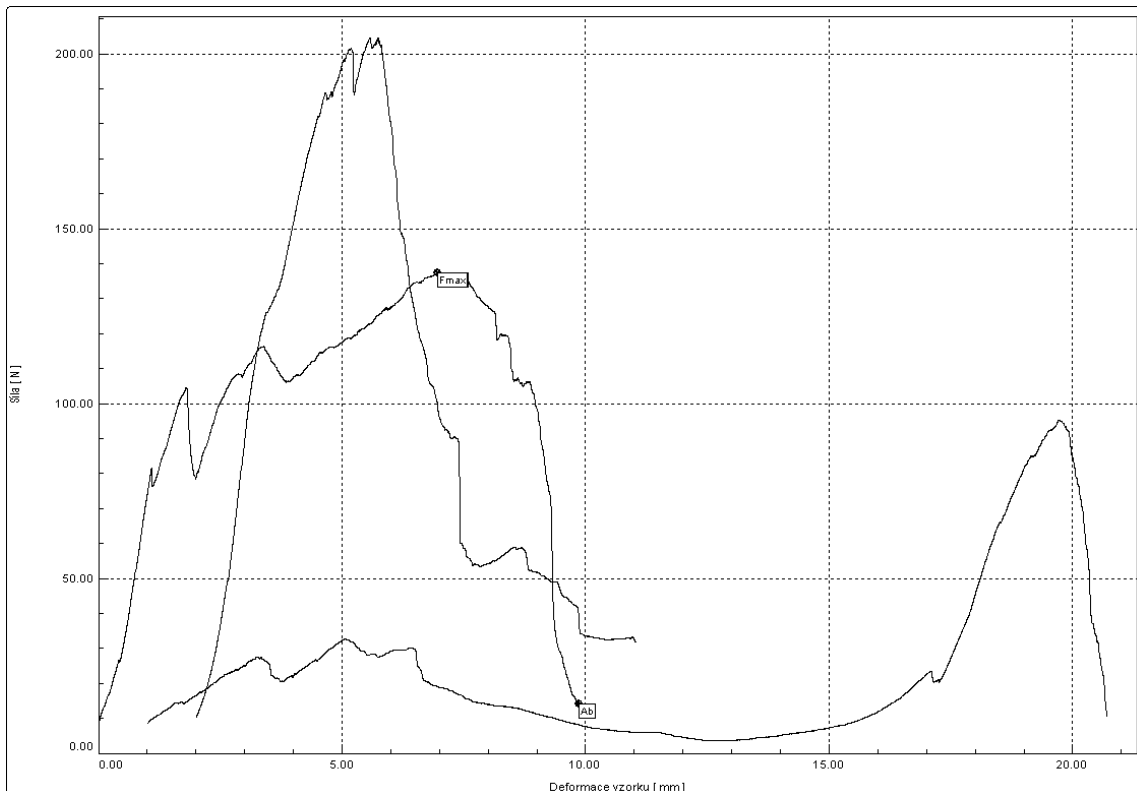
Betonové válečky s uhlíkovou výztuží zavedenou do 2/3 hloubky s chemickou kotvou
testované na soudržnost



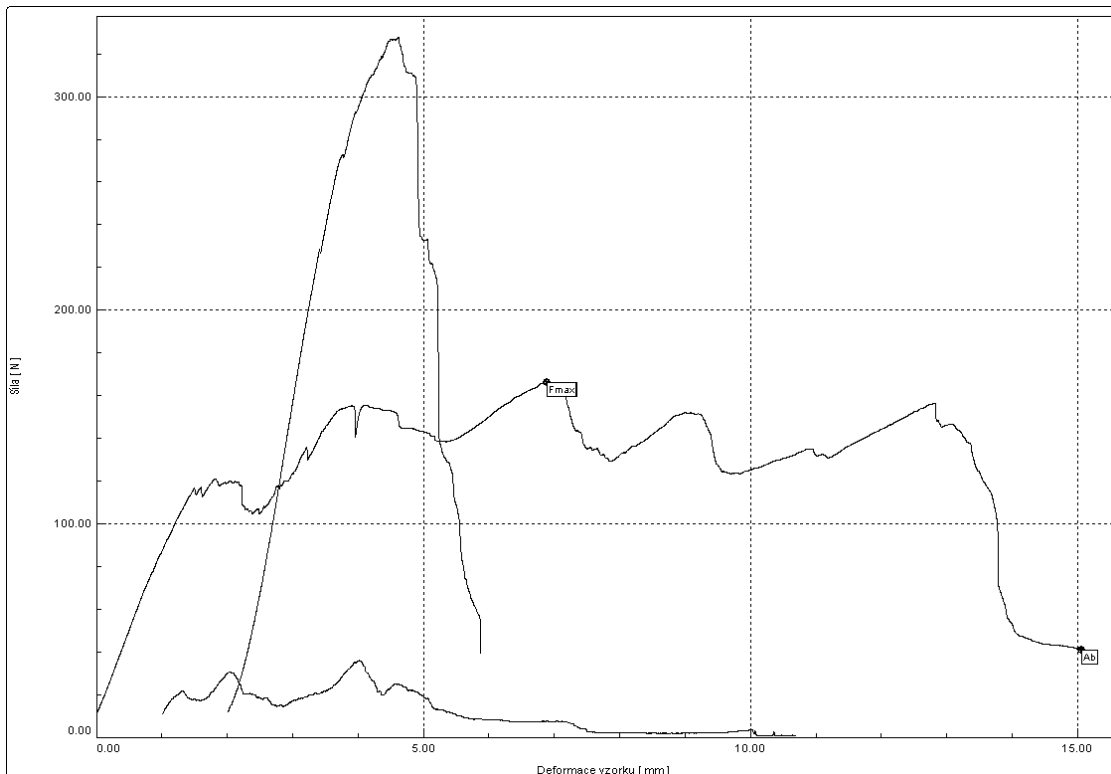
Betonové válečky s uhlíkovou výztuží zavedenou do 3/3 hloubky s chemickou kotvou
testované na soudržnost



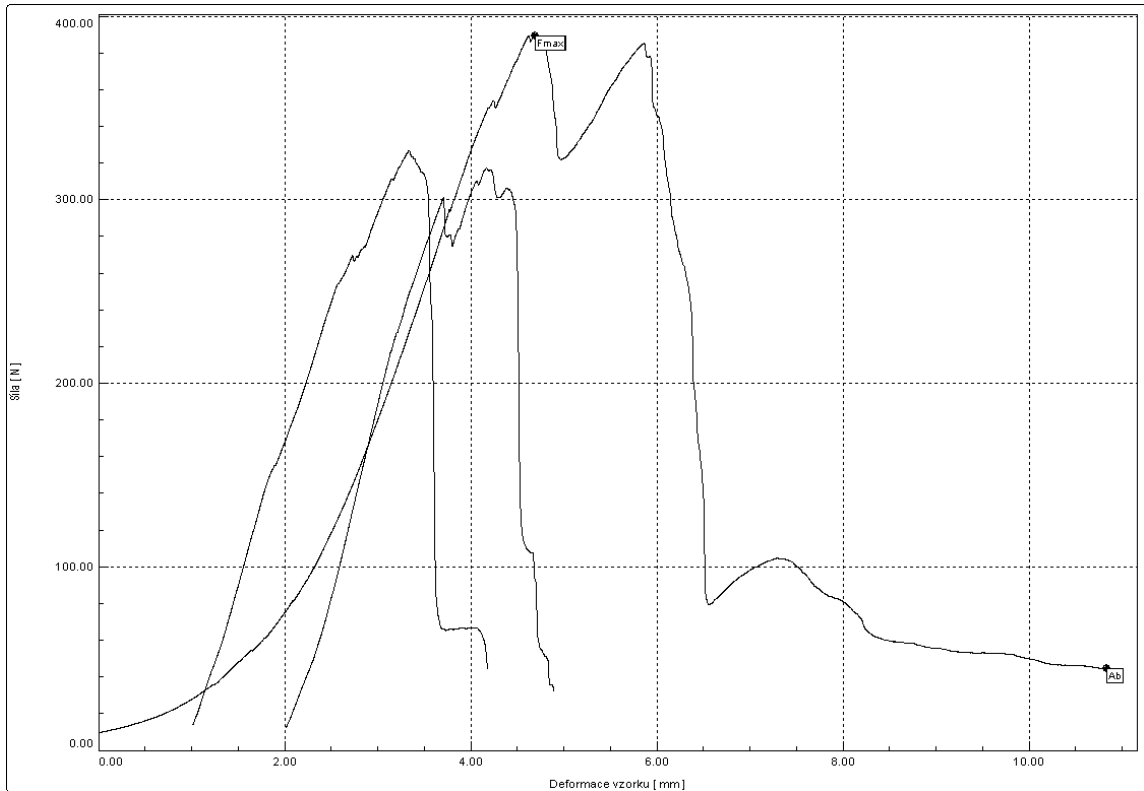
Betonové válečky s čedičovou výztuží zavedenou do 1/3 hloubky s polyesterovou pryskyřicí testované na soudržnost



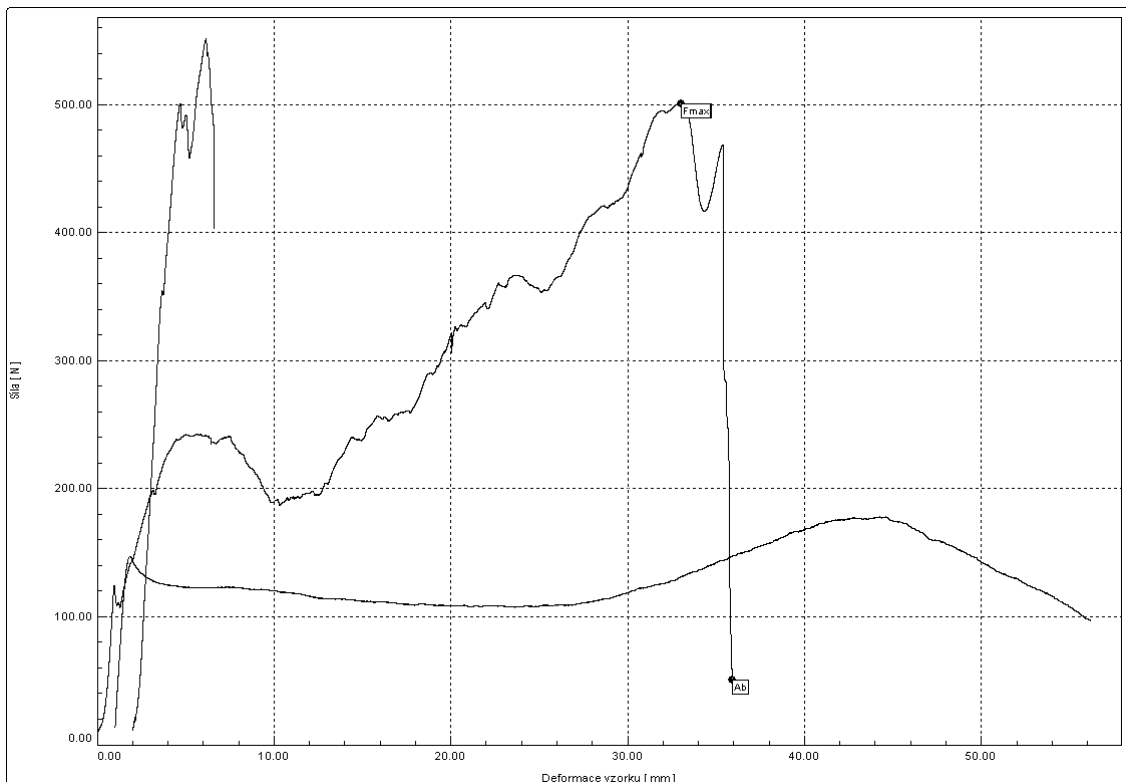
Betonové válečky s čedičovou výztuží zavedenou do 2/3 hloubky s polyesterovou pryskyřicí testované na soudržnost



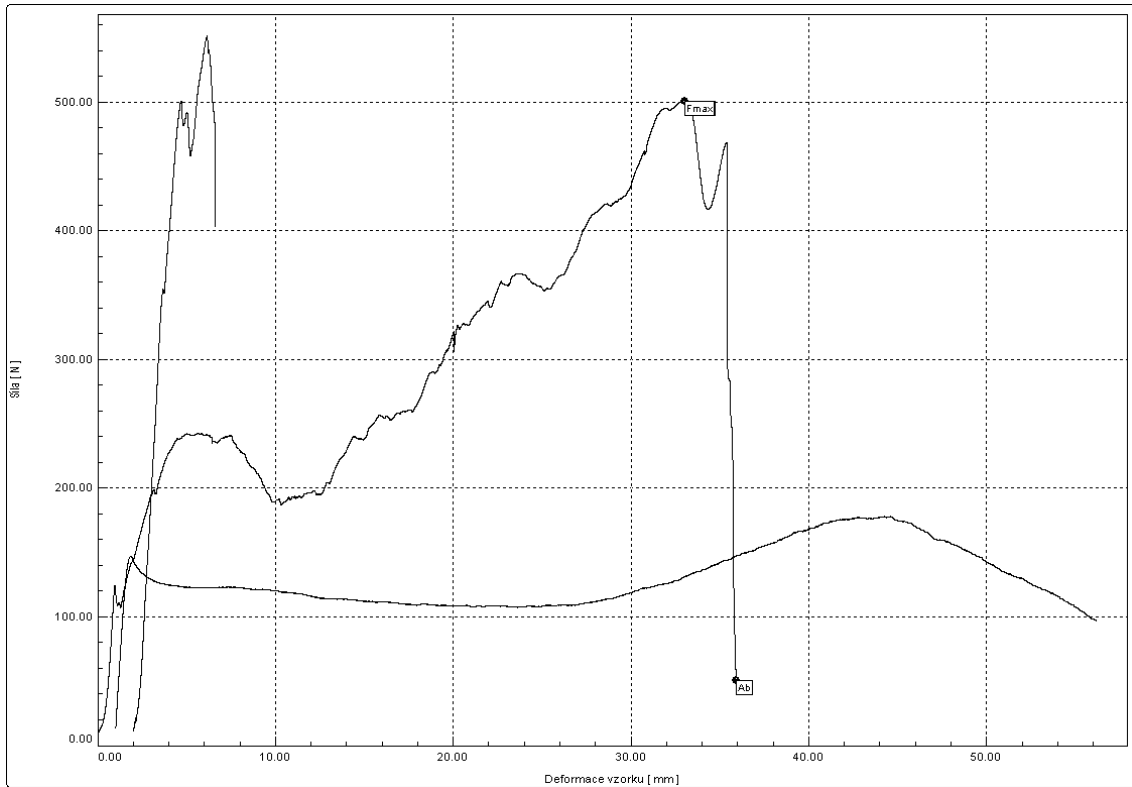
Betonové válečky s čedičovou výztuží zavedenou do 3/3 hloubky s polyesterovou pryskyřicí testované na soudržnost



Betonové válečky s uhlíkovou výztuží zavedenou do 1/3 hloubky s polyesterovou pryskyřicí testované na soudržnost



Betonové válečky s uhlíkovou výztuží zavedenou do 2/3 hloubky s polyesterovou pryskyřicí testované na soudržnost



Betonové válečky s uhlíkovou výztuží zavedenou do 3/3 hloubky s polyesterovou pryskyřicí testované na soudržnost

