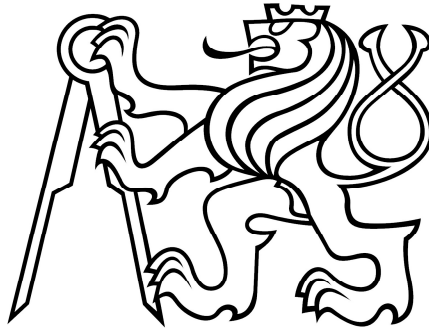


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE



Kloknerův ústav

Oddělení experimentálních a měřicích metod

**EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘOVÁNÍ PRVKŮ Z TEXTILNÍHO
BETONU**

EXPERIMENTAL VERIFICATION OF TEXTILE REINFORCED
CONCRETE (TRC) ELEMENTS

**DISERTAČNÍ PRÁCE K ZÍSKÁNÍ AKADEMICKÉHO TITULU
Ph.D.**

Ing. Tomáš Bittner

Doktorský studijní program: P 3607 Stavební inženýrství

Studijní obor: Nauka o nekovových materiálech a stavebních hmotách

Školitel: Ing. Miroslav Vokáč, Ph.D.

Praha, leden 2019

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou disertační práci vypracoval samostatně a obsah práce nebyl předložen k jiným akademickým nebo profesním řízením. Potvrzuji, že tato disertační práce byla vytvořena v souladu se všemi závaznými pravidly. Prohlašuji, že práce vznikla jako součást doktorského studia, do kterého jsem řádně zapsán.

V Praze, leden 2019

Ing. Tomáš Bittner

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval svému školiteli Ing. Miroslavu Vokáčovi, Ph.D., školiteli specialistovi Ing. Petru Tejovi, Ph.D. a Doc. Ing. Petru Bouškovi, CSc. za cenné rady poskytnuté v průběhu vypracování této disertační práce. Dále bych rád poděkoval všem svým kolegům pod vedením Doc. Ing. Jiřího Kolíška, Ph.D. především Ing. Petru Pokornému, Ph.D. a Ing. Michaele Kostecké, Ph.D. za podporu a vytvoření příjemné pracovní atmosféry a v neposlední řadě své rodině a manželce Ing. arch. Lindě Bittner.

Anotace

Textilní beton (TRC = Textile Reinforced Concrete) se v posledním desetiletí objevil jako nový, vysoce atraktivní a únosný kompozitní materiál na bázi cementu. Skládá se ze dvou hlavních částí. Především se jedná o již zmiňovaný cementový kompozit velmi často na bázi vysokohodnotného betonu (vždy se však musí jednat o beton jemnozrný s $D_{\max} \leq 4$ mm) a textilní výztuže (skleněné, uhlíkové, čedičové aj.), někdy se také užívá výraz nekonvenční výztuže. Výsledkem spojení těchto dvou komponent je materiál, který poskytuje vysokou pevnost v tlaku a ohybu, houževnatost, tažnost, absorbuje velké množství energie a je nesmírně odolný proti agresivním a degradačním vlivům prostředí, a to dokonce i při výrobě velmi tenkých a subtilních konstrukcí. Vzhledem k možnostem výroby textilií, které umožňují utkat i geometricky složité tkaniny (2D či 3D), a vlastnostem betonové matrice, lze vyrobit širokou škálu prvků, a to i neobvyklých či složitých tvarů. V současné době však stále neexistuje soubor normativních předpisů, kterými by se produkce prvků či konstrukcí TRC řídila.

Disertační práce popisuje TRC kompozit z pohledu jeho dílčích složek, tj. vlastností jako je pevnost v tlaku, tahu, tahu za ohybu, modulu pružnosti, odolnosti vůči agresivnímu prostředí, ale také z hledisek technologických, výrobních a užitných.

Klíčová slova

Textilní beton, textilní výztuž, pevnost, odolnost, jemnozrná matrice, tkanina, vlákna, roving.

Abstract

Textile Reinforced Concrete is a relative new, very attractive and especially highly load-bearing cement-based composite material revealed in the last decade. It is consisted of two main components. The components are mainly the previous mentioned cement composite often of the kind of ultra-high performance concrete (always fine-grained concrete with $D_{\max} \leq 4$ mm) and a textile reinforcement (glass, carbon, basalt etc.) that is sometimes also called a non-conventional reinforcement. The result of the joining of these two components is a material that provides high compressive and bending strength, ductility, tensile strength, absorbs a big amount of energy and is enormously resistant to aggressive and degradation impacts of the environment even in the case of very thin and subtile products. With regard to the possibilities of the production of textiles that enables to wave also geometrically complicated woven fabrics (2D or 3D) and the properties of the concrete matrix, it is possible to manufacture various elements, even of unusual or complex shapes. However, there is no set of standards managing the production of elements or structures made from TRC in these days.

The dissertation thesis describes a TRC composite from the point of view of its partial components, it means properties such as compressive strength, tensile strength, tensile strength in bending, modulus of elasticity, resistance to aggressive environment but also from the point of view of technological, manufactural and utility properties.

Keywords:

Textile Reinforced Concrete, Textile Reinforcement, Strengths, Durability, Fine-grained Matrix, Woven Fabric, Fibres, Roving.

Obsah:

1. Cíle disertační práce	8
2. Úvod do problematiky TRC (definice, použití, účel aj.).....	9
2.1. Betonová matrice (základní požadavky, úvod)	10
2.1.1. Srovnání matrice UHPC, TRC, běžného betonu	10
2.1.2. Zkoušky pro ověření kvality a vlastností použité matrice	14
2.2. Textilní výztuž (názvosloví, druhy textilií, vlastnosti)	15
2.2.1. Čedičová (bazaltová) vlákna.....	19
2.2.2. Uhlíková vlákna.....	21
2.2.3. Skleněná vlákna	25
2.2.4. Ostatní druhy vláken	28
2.3. Povrchová úprava (povlakování) textilií.....	30
2.3.1. Druhy povlaků pro textilní výztuže	32
2.4. Technologie zhotovení TRC prvků.....	36
2.5. TRC se soustřednou výztuží (ohybová zkouška).....	38
2.6. TRC s přidáním krátkých vláken (ohybová zkouška).....	41
2.7. Realizace konstrukcí a prvků z TRC ve světě a u nás.....	43
3. Experimentální část – TRC matrice	53
3.1. Složení matrice – návrh receptury.....	53
3.2. Zkoušky čerstvé betonové směsi.....	55
3.3. Zkoušky vybraných mechanických vlastností	56
3.4. Ověření smrštění (voda, vzduch, 95% vlhkost)	58
3.5. Shrnutí zkoušek matrice – volba receptury	60
3.6. Rozměrový efekt vybrané matrice	63
4. Experimentální část – textilní výztuž	65
4.1. Základní informace o zkušebních vzorcích.....	65
4.2. Pilotní zkoušky výztuží.....	66

4.3.	Příprava vzorků pro tahové zkoušky	66
4.4.	Příprava měřicího řetězce.....	67
4.5.	Průběh zkoušek a vyhodnocení	68
4.6.	Shrnutí zkoušek textilních výztuží	72
5.	Koroze skelných vláken v prostředí betonu	75
5.1.	Popis zkoušky korozního napadení skelné výztuže	75
5.2.	Průběh zkoušky korozního napadení skelné výztuže.....	76
5.3.	Tahová zkouška exponovaných skelných vláken	88
5.4.	Shrnutí korozních zkoušek skelné výztuže	89
6.	Experimentální zkoušky TRC konstrukčních prvků	90
6.1.	Výroba vzorků pro zkoušky ve čtyřbodovém ohybu	90
6.1.1.	Pilotní betonáž vzorků desek - 1	90
6.1.2.	Pilotní betonáž vzorků desek - 2.....	90
6.1.3.	Pilotní betonáž vzorků desek - 3.....	91
6.1.4.	Specifikace výrobního postupu pro desky z TRC	92
6.2.	Zkouška TRC desek se soustřednou výztuží (4 bodový ohyb)	93
6.2.1.	Postup zkoušky ve čtyřbodovém ohybu	93
6.2.2.	Shrnutí zkoušek a vyhodnocení	96
6.3.	Zkouška bílých TRC desek s rozptýlenou výztuží (4 bodový ohyb).....	99
6.3.1.	Složení směsi a příprava zkoušky	99
6.3.2.	Průběh zkoušky ve čtyřbodovém ohybu.....	100
6.3.3.	MKP analýza zkoušky čtyřbodovým ohybem	101
6.3.4.	Shrnutí výsledků experimentu a porovnání s analýzou MKP.....	103
6.4.	Zkouška TRC nosníku profilu I	105
6.4.1.	Příprava formy a zkušebních vzorků	105
6.4.2.	Průběh zkoušky ve čtyřbodovém ohybu.....	107
6.4.3.	Shrnutí zkoušek a vyhodnocení	109

6.5.	Zkouška dlouhodobého zatížení TRC desek.....	111
6.5.1.	Průběh zkoušky dlouhodobého zatížení	111
6.5.2.	Shrnutí poznatků z dlouhodobých zkoušek desek TRC	113
6.5.3.	Shrnutí zatěžovací zkoušky desek TRC.....	114
6.6.	Zkouška TRC desek v tepelné komoře	115
6.6.1.	Příprava zkoušky a průběh experimentu.....	115
6.6.2.	Shrnutí poznatků ze zkoušky v tepelné komoře	116
6.6.3.	Vyhodnocení zkoušky v tepelné komoře.....	117
6.6.4.	Ověření experimentu v tepelné komoře pomocí výpočtu MKP	121
7.	Konfokální mikroskopie rozhraní textilní výztuže a matrice	123
7.1.	Princip konfokálního mikroskopu LEXT OLS3000	123
7.2.	Průběh konfokální mikroskopie TRC	124
7.3.	Vyhodnocení konfokální mikroskopie TRC	128
8.	Závěr.....	129
9.	Reference.....	133
10.	Seznam dosavadních publikací autora	145

1. Cíle disertační práce

- Rešeršní shrnutí stavu problematiky TRC (Textile Reinforced Concrete) na základě dostupné literatury. Reference realizovaných staveb a stavebních prvků ve světě i v ČR.
- Stanovení základních materiálových charakteristik navržené betonové matrice pro TRC, kterými jsou pevnost v tlaku, tahu za ohybu, modul pružnosti, smrštění aj. Výběr optimální receptury.
- Experimentální ověření fyzikálních a chemických vlastností textilních výztuží zaměřené na pevnost v tahu, modul pružnosti a chemickou odolnost v prostředí betonové matrice.
- Ověření způsobu technologie pro zhotovení prvků TRC. Specifikace doporučeného výrobního postupu s ohledem na ukládání nekonvenční výztuže do forem.
- Experimentální ověření TRC desek a nosníků se soustřednou a rozptýlenou výztuží. Predikce vzniku trhlin s ohledem na MSP. Porovnání těchto zkoušek s numerickou analýzou MKP.
- Zhodnocení vlivu zvýšené teploty s ohledem na deformační chování zatížených desek TRC (ztráta smykového spolupůsobení mezi maticí a textilní výztuží). Porovnání experimentálně naměřených dat s analýzou MKP.

2. Úvod do problematiky TRC (definice, použití, účel aj.)

Řešením problematiky TRC (Textile Reinforced Concrete = textilní beton), tj. výrobou a použitím tenkých a ultratenkých kompozitních prvků z vysokohodnotného nebo vysokopevnostního betonu v kombinaci s nekonvenční výztuží, existuje reálná šance na redukci primárních materiálů, tj. oceli a betonu (kamenivo, cement, přísady a příměsi). V přeneseném slova smyslu se jedná o účelné programování mechanických, tj. fyzikálních a chemických vlastností a parametrů prvků konstrukce. Tímto lze dosáhnout zejména konstrukcí štíhlých, které tyto primární zdroje šetří a zároveň snižují dopady na životní prostředí. Již několik příkladů ze zahraničí ukazuje, že i aplikací prvků tenčích než 30 mm mohou být realizovány běžné konstrukce [1][2][3][57][62].

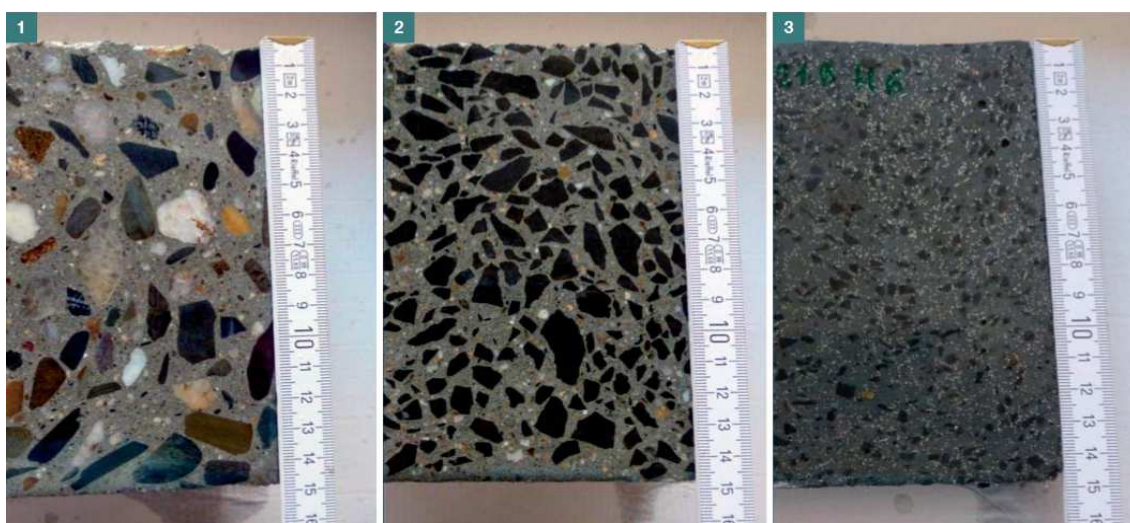
Textilní beton lze definovat jako konstrukční kompozit umožňující zhotovení tenkých, lehkých, ale přitom únosných konstrukcí, které poskytují široké tvarové možnosti pro návrh. Obecně řečeno by se měl skládat z jemnozrnné betonové matrice a nekonvenční (nekorodující) výztuže. Díky nekorodujícím vlastnostem výztuže lze výrazně snížit hmotnost prvků až o 70 – 80 %, především minimalizací krytí výztuže a zlepšením pevnostním parametrům. Menší množství použitého betonu snižuje tzv. uhlíkovou stopu konstrukce, tj. redukuje se množství CO₂, které je nutné vypustit do atmosféry, při produkci cementu a oceli. Použití vláken rovněž zmírňuje rozvoj mikrotrhlin v betonových konstrukcích, které vznikají v místech lokálních namáhání či v době zrání betonu. Ze všech výše zmíněných důvodů se nekonvenční výztuž stále více objevuje u různých realizací, ať už jsou to drobné mostní objekty (lávky aj.) či fasádní obkladní panely. Nebezpečím pro vnitřní strukturu tkaniny však zůstává velmi vysoké alkalické prostředí v betonu, které může některé typy vláken nevratně poškodit. Proto se běžně používají vlákna alkalicky rezistentní jako je například AR sklo, E sklo, čedičová vlákna, uhlíková vlákna nebo polymery jako je polyvinylalkohol (PVA), polypropylen (PP) a aromatický polyamid (aramid) [4]. Rozhodujícím faktorem pro volbu matrice je dobrá a kvalitní vazba mezi textilní výztuží a samotnou jemnou betonovou maticí, která musí být navržena tak, aby pronikla do rovingů, případně do 2D a 3D sítí (běžně se jedná o matrice se zrny do 2 mm).

2.1. Betonová matrice (základní požadavky, úvod)

Základní požadavky na betonovou matici jsou dány mnoha faktory. Za ty nejvýznamnější lze jmenovat požadavek na maximální velikost zrna kameniva, který je rozhodujícím kritériem pro zajištění dobrého probetonování mnohdy složité textilní výztuže. Zároveň musí být zajištěno dobré smykové spolupůsobení mezi maticí a textilní výztuží. Přidanou hodnotou pak může být vysoká pevnost v tlaku, případně v tahu za ohybu a modul pružnosti. Faktor pevnosti není pro TRC prvky zcela rozhodující. Jak totiž praxe ukazuje, většina referenčních aplikací [2][3][58] je provedena z betonů, které však leží na samotné dolní hranici betonů vysokopevnostních. Za vysokopevnostní beton je obecně považován beton třídy C 55/67 a vyšší (dle ČSN EN 1992-2).

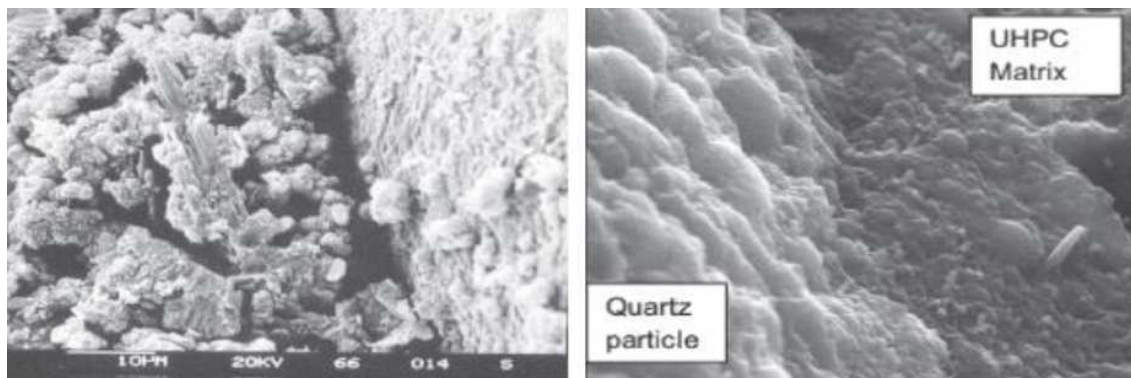
2.1.1. Srovnání matrice UHPC, TRC, běžného betonu

Pro TRC prvky nemusí být pevnost výsledného cementového kompozitu zcela rozhodující, převažuje spíše požadavek na tekutost čerstvě zamíchané směsi. Je však výhodné kombinovat vysoce únosnou textilní výztuž s maticí vysokohodnotného betonu. V případě užití vysokohodnotného betonu je totiž zajištěno lepší vzájemné spolupůsobení textilie a cementového kompozitu. Zcela rozhodující však je velikost použité frakce kameniva. Běžně vyráběné betony obsahují kamenivo hrubé a drobné, matrice na bázi UHPC jen kamenivo jemnozrné s $D_{\max} \leq 4$ mm. Dobře lze beton vizuálně porovnat například na příčném řezu zkušebním vzorkem (Obr. 1).

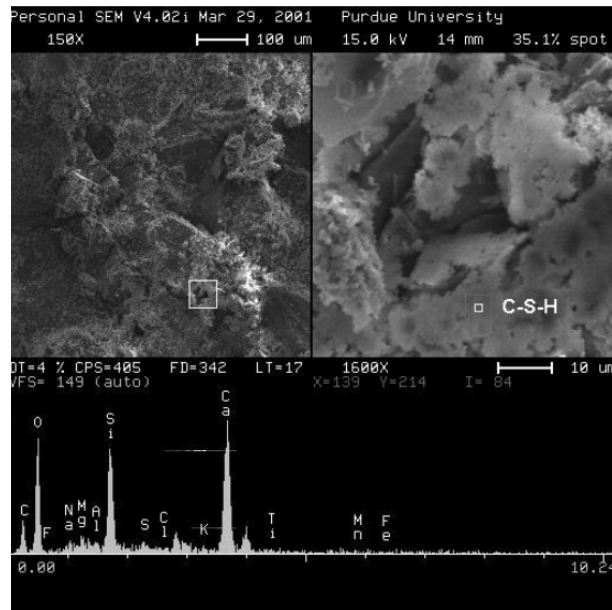


Obr. 1 Srovnání jednotlivých druhů betonů na řezu, zleva: běžný beton, vysokopevnostní beton, vysokohodnotný beton [5]

UHPC beton se od betonu obvyčejného výrazně liší a není to pouze výslednými vlastnostmi. Především se jedná o složení betonové směsi, které je na rozdíl od běžného betonu značně odlišné. Dle [6] lze obecně říci, že UHPC je jemnozrnná směs s vysokou dávkou cementu, mikrosiliky a ocelových vláken, která má vysokou hutnost bez kapilární porozity. Je to tedy kombinace portlandského cementu, jemného písku, křemičitého úletu, vysoce účinné superplastifikační přísady a vody. Mechanické vlastnosti UHPC jsou dány především kvalitou přechodové zóny mezi kamenivem a cementovým tmelem. Tato zóna se také jinak nazývá tranzitní (Interfacial Transition Zone - ITZ). Jde o slabou zónu (tloušťka vrstvy je 10–50 μm) v mikrostruktuře betonu, která se nachází na rozhraní kameniva a cementového tmelu. Tranzitní zóna se může snadno stát nejslabším článkem betonů. UHPC se vyznačují vyšším objemem C-S-H gelů než u běžných betonů. Je to způsobeno pucolánovou reakcí mezi hydroxidem vápenatým $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a příměsí. Výsledkem je tedy vysoce homogenní mikrostruktura, díky které dosahuje zlepšených vlastností. Na Obr. 2 lze vidět rozdíl tranzitní zóny u obvyčejných a UHPC betonů. V případě UHPC lze vidět plynulý přechod mezi kamenivem a cementovou pastou, naopak u obvyčejného betonu je tranzitní zóna velmi pórovitá. Obsah vody je dalším důležitým parametrem. Vodní součinitel je nejčastěji udáván jako poměr vody a cementu a poměr vody a pojiva (cement + mikrosilika) a pohybuje se okolo hodnoty 0,2, nejčastěji 0,22 až 0,28, což není dostatečné množství vody na úplnou hydrataci cementu. Pojivý součinitel se pohybuje nejčastěji v rozmezí 0,18 až 0,22. Cement jako pojivo pak částečně funguje jako plnivo, které pouze napomáhá splnit požadovanou hutnost materiálu, která vede k pevnostním vlastnostem betonu. Kvůli vysokým dávkám superplastifikační přísady se do součinitelů započítává i voda v něm obsažená [7][8][9]. Vztah pevnosti betonu na vodním součiniteli v závislosti na druhu betonu je znázorněn na Obr. 4.

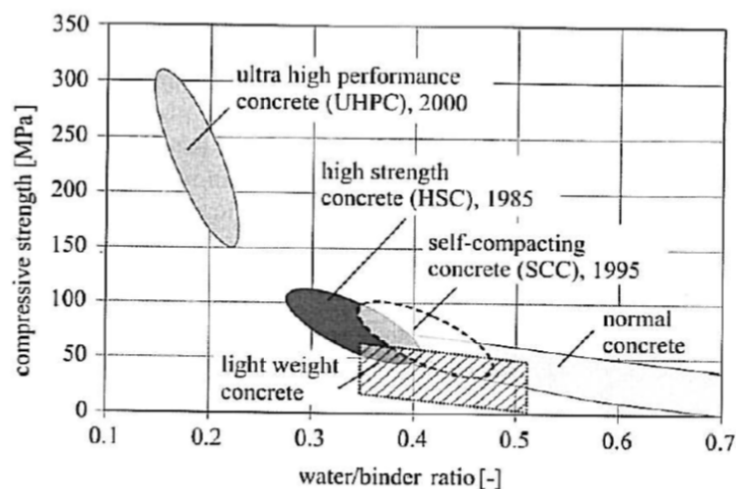


Obr. 2 Tranzitní zóna obvyčejného betonu vlevo a UHPC vpravo [10]



Obr. 3 Snímky C-S-H gelu ze SEM mikroskopu [10]

Vzniklá velmi hutná struktura, kde je přítomno jen minimální množství pórů, má zásadní vliv na trvanlivost a odolnost UHPC. Betony s označením UHPC se vyznačují rovněž křehkým porušením, což je jedním z důvodů přidávání ocelových drátků. Vlákna mohou být však nahrazena soustřednou výztuží ve formě textilních vláken. Složení betonové matrice pro TRC je tím pádem velmi obdobné složení samotného UHPC. Ocelové drátky jsou však nahrazeny jinou formou výztuže (skleněná, uhlíková či čedičová vlákna) soustředné, rozptýlené či jejich kombinací. Pro porovnání složení betonů UHPC, TRC a běžného betonu jsou předloženy tři srovnávací tabulky (Tab. 1, Tab. 2 a Tab. 3).



Obr. 4 Závislost pevnosti na vodním součiniteli dle uvažovaného druhu betonu [11]

Tab. 1 Obvyklé složení UHPC [86]

Složky	Hmotnostní dávka [kg.m ⁻³]
Cement CEM I 42,5 nebo 52,5 R	693-893
Křemičitý úlet	116-273
Drcený křemen	0-208
Písek	733-1390
Vlákna	79-234
Superplastifikátor	14-40
Voda	140-240

Tab. 2 Obvyklé složení TRC [116]

Složky	Hmotnostní dávka [kg.m ⁻³]
Cement CEM II 42,5 R	680
Mikrosilika	129
Křemičitý písek 0,1/0,6	326
Křemičitý písek 0,3/0,8	340
Křemičitý písek 0,6/1,2	258
Křemenná moučka	326
Superplastifikátor	38
Voda	238

Tab. 3 Obvyklé složení běžného betonu

Složky	Hmotnostní dávka [kg.m ⁻³]
Cement CEM I 42,5 R	350-400
Bratčice 0/4	760
Tovačov 4/8	228
Olbramovice 8/16	912
Voda	136

Výsledné materiálové vlastnosti zatvrdlého UHPC jsou dle literární rešerše velmi různorodé. Rozhoduje mnoho faktorů, jedním z nich je například velikost zkušebních těles, případně rychlost zatěžování. Lze však konstatovat, že běžně uváděná pevnost v tlaku leží v rozmezí 100–200 MPa, pevnost v tahu za ohybu 8–25 MPa, modul pružnosti 35–50 GPa, smrštění 0,2–0,8 mm/m, odolnost proti mrazu 400 až 1000 cyklů. Pro matrice do TRC betonů si lze tyto vlastnosti v zásadě ztotožnit. Liší se však zásadně hodnota pevnosti v tahu za ohybu, kde při absenci kovových drátků bývá pevnost přibližně poloviční [4].

2.1.2. Zkoušky pro ověření kvality a vlastností použité matrice

Ověření vlastností použité betonové matrice lze zohlednit dvěma různými pohledy. Jedním z nich jsou vlastnosti čerstvé betonové směsi a druhým vlastnosti výsledného produktu po dokončení tuhnutí a tvrdnutí, tj. běžně udávaný parametr pevností po 28 dnech.

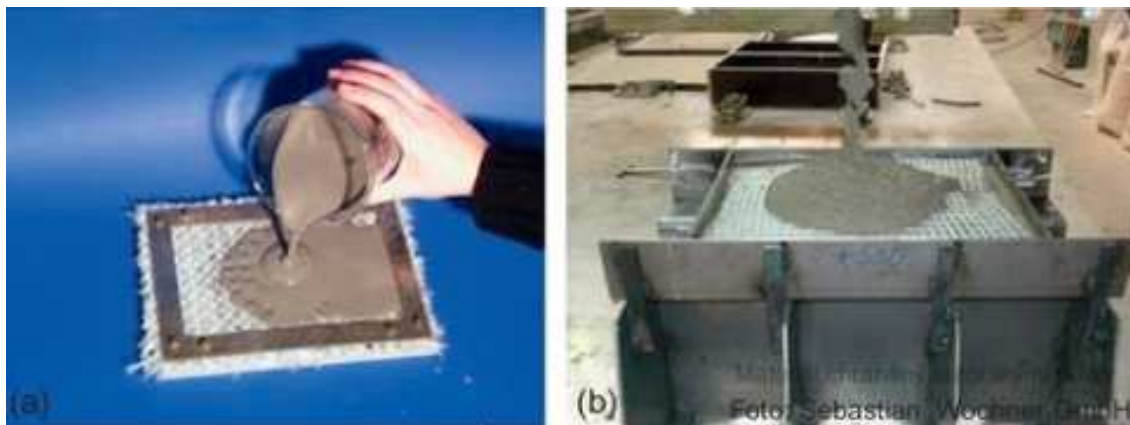
Většina vlastností čerstvé betonové směsi je uzpůsobena jednomu základnímu faktoru. Čerstvý beton musí dobře protéci textilní síťovanou strukturou prvku a dostat se do všech míst připravené formy. Toto musí být ošetřeno už při samotném návrhu složení směsi a především velikostí použitého kameniva. Jedním z rozhodujících parametrů je tedy rozměr zrn. Obvykle navrhované matrice pro prvky TRC mají zrna o maximální velikosti 1 až 2 mm, nejsou však výjimkou i zrna výrazně menší. V závislosti na konzistenci matrice se tedy používají především zkoušky pro výrazně tekoucí betony, tj. betony s podobnou konzistencí jako SCC. Pro hodnocení konzistence TRC betonu není dostupná normativa. Pro vyhodnocení konzistence lze využít ČSN EN 206 [12] a pro testy zpracovatelnosti klasické metody popsané v ČSN EN 12350-8 [13], např. metoda sednutí-rozlitím Abramsovým kuželem, lze užít i metodu L-box a V-nálevka. Lze užít však i metod pro zkoušení malt (Obr. 5) dle EN 1015-3 [14].



Obr. 5 Zkouška zpracovatelnosti čerstvého UHPC s využitím zkušební metody pro malty dle EN 1015-3 [15]

Zpracovatelnost matic pro TRC musí být uzpůsobena druhu a množství textilní výztuže i výrobnímu procesu. Běžně používaná metoda výroby spočívá v uložení textilní výztuže do formy a následném zalití betonovou matricí. Pro tento postup je rozhodující

právě zpracovatelnost směsi a její schopnost se rozlít. Při výrobě složitých geometrických tvarů a při použití husté výztuže, se proto vždy doporučuje provést test betonáže, kdy je do zmenšené formy, případně detailu, nalita betonová směs a sleduje se její rozlítí, resp. její penetrační chování při procházení skrze textilní výztuž (Obr. 6).



Obr. 6 Testování penetračního chování čerstvé betonové směsi nalité do zkušebního vzorku s textilní výztuží [16]

Zkoušky zatvrdlého betonu se používají ve stejné podobě jako u betonů konvenčních. Především se jedná o zkoušky pro stanovení pevnosti v tlaku (na krychlích či válcích), v prostém tahu, pevnosti v příčném tahu, pevnosti v tahu za ohybu (3 bodovém či 4 bodovém), stanovení modulu pružnosti [86]. Důležité pro zatvrdlý beton jsou rovněž zkoušky fyzikálních vlastností jako je mrazuvzdornost dle ČSN 73 1322 [17], odolnost proti působení CH.R.L. dle ČSN 73 1326 [18] metoda A nebo C, smršťování, dotvarování a jiné.

2.2. Textilní výztuž (názvosloví, druhy textilií, vlastnosti)

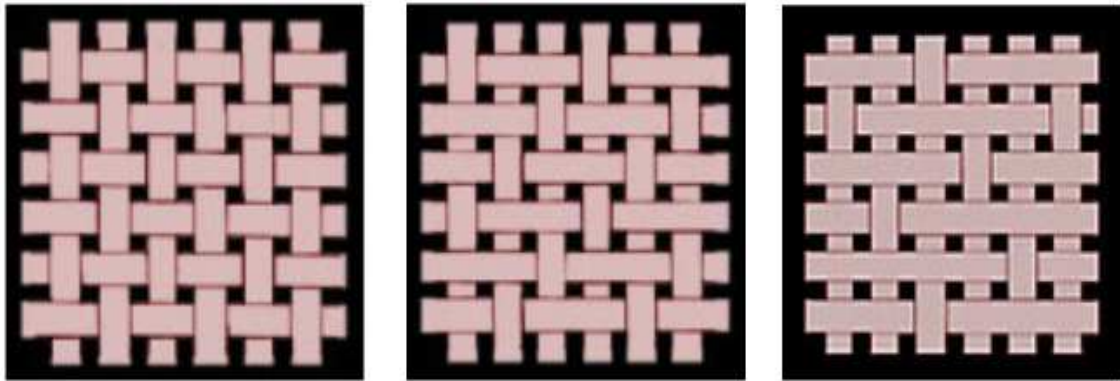
Vzhledem k tomu, že textilní výztuž není běžně používána a existuje v mnoha různých variantách, od vláken, přes roving až k různým typům tkanin ve formě 2D či 3D sítí, je na začátek nutné vysvětlit některá názvosloví, které se v této souvislosti používají [39].

Textilie (textile) je souhrnný název pro textilní vlákno a výrobky, které obsahují nejméně 80 % váhového množství textilních vláken.

Vlákno (fibre) přírodní nebo umělá (vyrobená), vlákna tvoří základní prvek tkaniny i jiných textilních struktur, vlákno by mělo mít 100 x větší délku než průměr.

Filament je umělé textilní vlákno neomezené délky.

Tkanina (fabric) je plošná (rovinná) textilie či textilní struktura, která vzniká provázáním osnovy a útku, vzniká například pletením či tkaním. Rozlišují se 3 základní typy vazeb tkaniny, tj. plátnová, kepr a atlas (Obr. 7).



Obr. 7 Základní typy vazeb tkaniny (zleva vazba plátnová, keprová a atlasová) [39]

Příze (yarn) je délková textilie z jednoho nebo více vláken (vždy se jedná o výrobky z přírodních vláken), jedna příze se skládá ze stovek až tisíců vláken.

Vlákno (strand) je jedno vlákno neboli monofilament.

Provazec či pramen (roving) je svazek vláken (například skleněných či jiných), který je zhotoven z filamentů, často je také opatřen povlakem.

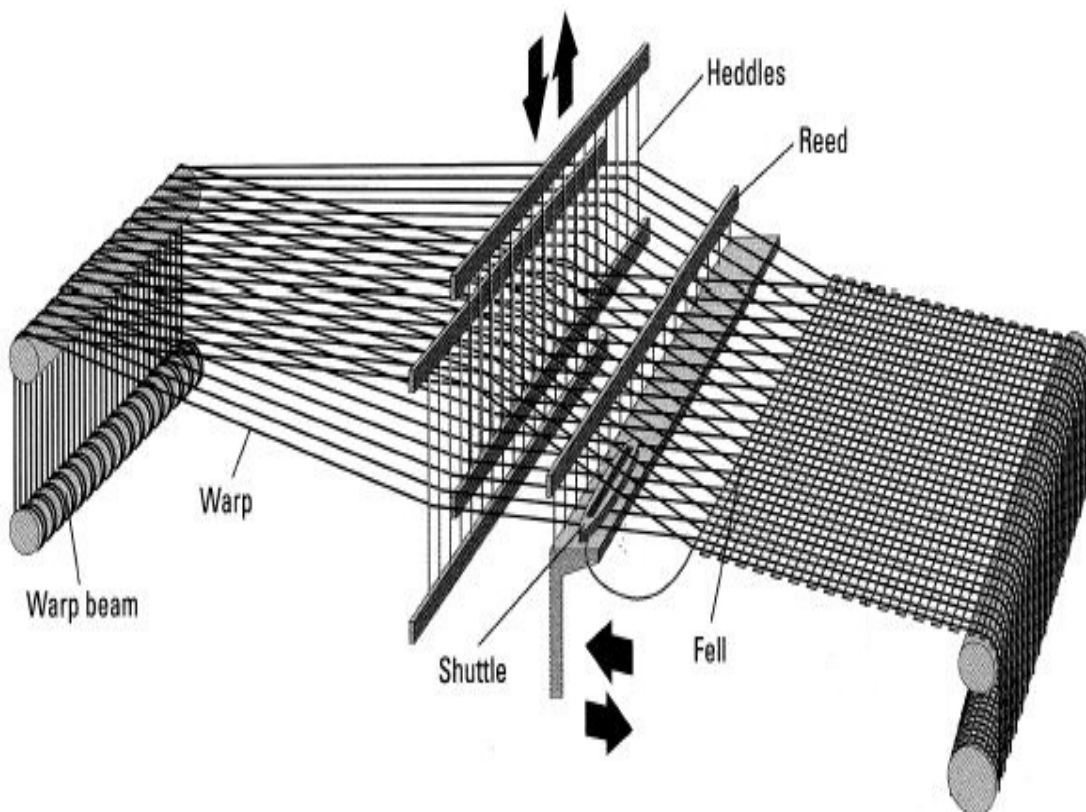
TEX je jednotka jemnosti vláken (délková hustota, tj. hmotnost vlákna délky 1 km v gramech), případně se uvádí i dtex = TEX/1000.

Povlak (coating) je povlaková hmota nanášená na povrch textilie, tkanin, či rovingů, často se jedná o epoxydové pryskyřice, účelem povlaku je vlákna spojit v celek.

Podélný (osnovní) roving (warp) je roving v podélném směru tkaniny (většinou hlavní nosný směr).

Příčný (útkový) roving (weft) je roving v příčném směru tkaniny (směr kolmý na hlavní směr).

Tkaní (weaving) je způsob spojení textilií, případně rovingů (Obr. 8).



Obr. 8 Proces tkaní a výroba plošné textilie [40]

Netkaná textilie (non-woven fabric) je sestavení textilních vláken držných společně mechanickým spojením, tj. natavením či nalepením.

Tkaná textilie (woven fabric) je způsob proložení dvou sad nití (osnovy a útku) za pomoci pevné vazby (keprové, saténové, běžné, ...).

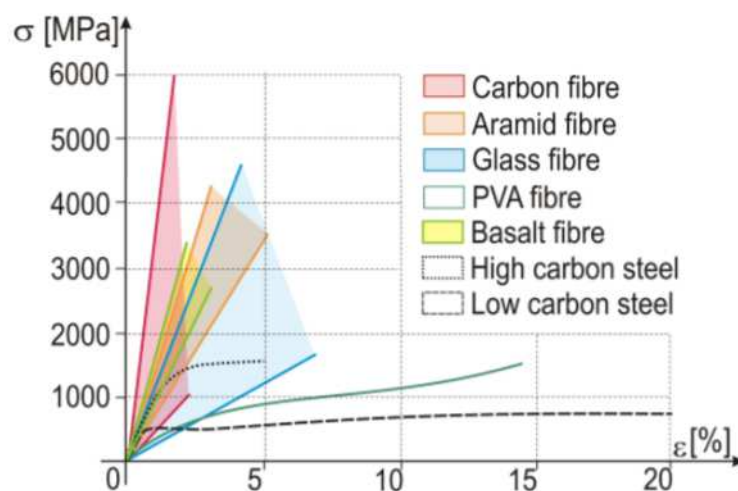
Pletení (knitting) je speciální způsob konstrukce (spojení) tkaniny, tj. pletení osnovy a útku.

Jak bylo již zmíněno výše, existuje mnoho druhů textilních vláken přírodních či umělých (syntetických). Tato vlákna se výrazně liší svými vlastnostmi. Přehled základních mechanických vlastností textilních vláken je uveden v Tab. 4. Nejčteněji využívané druhy textilních vláken do kompozitních cementových matic jsou vlákna skleněná, uhlíková, čedičová, PVA vlákna, případně vlákna z aromatického polyamidu. Podrobněji se jednotlivých vlastnostem, způsobu výroby, vstupním složkám aj. budu zabývat v části věnované konkrétním druhům výztuží (kap. 1.3.1, 1.3.2, 1.3.3 a 1.3.4).

Tab. 4 Souhrn mechanických vlastností různých druhů vláken [19]

Type of fibre (filament)	Density [g/cm ³]	Tensile strength [MPa]	Modulus of elasticity [GPa]	Strain at rupture [%]	Thermal coefficient [10 ⁻⁶ /°C]	Poisson's ratio	Max. temperature /melting/ [°C]
E-glass	2.54÷ 2.82	1750-3800	72.4	2.4-5.0	5.0	0.22	380 /1725/
S-glass		2550-4500	85.5	2.9-5.5	2.9		450 /1725/
AR-glass		1800-3500	70-76	2.0-3.0	7.5		400 /1725/
High modulus Carbon	1.70÷1.90	2800	370	0.5-0.9	(-1.2)÷(-0.1)	0.20	750 /3700/
Ultra-high modulus Carbon		1000-1300	530-650	0.2-0.4			
High strength Carbon		2450-4800	215-240	1.1-2.0	(-0.6)÷(-0.2)		
Ultra-high strength Carbon		3500-6000	215-235	1.5-2.3			
Low modulus Aramid	1.20÷ 1.44	3500-4100	70-80	4.3-5.0	-2.0 (axial) 60 (radial)	0.35	250 /500/
High modulus Aramid		3500-4000	115-200	1.8-3.5			
PVA	1.26	1620-1900	31.0-43.0	6.0-15.0	-	-	230 /500/
PAN	1.2÷2.0	850-1000	17.0-18.0	10.0-20.0	163-270	-	200
Basalt	2.67	2800-3200	85-90	3.1	3.5-8.0	-	650

Rozhodujícím faktorem pro použití ve stavebních konstrukcích je chování vláken při tahovém namáhání. Ověření tahové pevnosti je standardně prováděno pomocí tahové zkoušky. O výsledku zkoušky rozhoduje mnoho faktorů. Jedná se především o aplikaci povlaku a jeho druhu, případně velikosti (tloušťce) vrstvy, rychlosti zatěžování, způsobu výroby, způsobu upnutí vzorku do zkušebního stroje aj. Tahová zkouška běžně užívaných vláken je znázorněna pomocí pracovního diagramu (Obr. 9) se závislostí vnesené síly (svislá osa), případně přepočtené na jednotku plochy (napětí) a poměrného přetvoření.

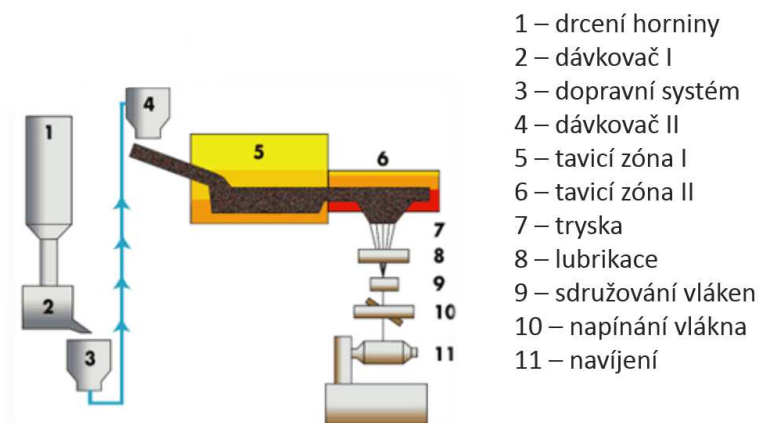


Obr. 9 Pracovní diagramy tahové zkoušky jednotlivých druhů vláken [19]

2.2.1. Čedičová (bazaltová) vlákna

Čedičová neboli bazaltová vlákna patří obecně k těm méně využívaným vláknům pro aplikace ve stavebních konstrukcích. Výjimkou jsou však výrobky na bázi tepelně izolačních materiálů. Čedičová vlákna jsou anorganická vlákna vyráběná z roztavené čedičové horniny. Čedič je velice čtbná, tmavá, výlečná, vyvřelá hornina s charakteristickou porfyrickou nebo sklovitou strukturou, někdy s vyrostlicemi jednotlivých minerálů. Vyskytuje se však i ve formě škváry, bez viditelných krystalů. Obvykle má šedou či černou barvu. Pro čedič je charakteristická jemnozrná stavba vzniklá rychlým utužením lávy na zemském povrchu. Dle oficiální definice, vycházející z pozice čediče v diagramu QAPF [20], je tato hornina jemnozrná vyvřelá hornina, která má méně než 20 objemových procent křemene a méně než 10 % foidů a minimálně 65 % živců ve formě plagioklasu.

Jejich výroba je poměrně ekologická, díky menší energetické náročnosti a možnosti 100% recyklace. První pokusy se zvláknováním čediče byly prováděny na začátku 20. století, k rozvoji výroby však došlo až po konci 2. světové války. Technologie výroby je jednoduchá, nejdříve dojde k zvláknování samotné horniny při teplotě 1500–1700 °C, čímž vznikne potřebná sklovitá hmota. Následná hmota z pece vytéká přes platinové trysky na rotující válec a pomocí odstředivé síly se tavenina, momentálně v kapičkách a v proudu ofukovacího vzduchu, změní na jemné vlákno. Pro některé účely (například příprava rovingu) je možné vlákna také dloužit. Dobře navržená výrobní linka dokáže vyprodukovat až 35 kg vláken za hodinu (v závislosti na jemnosti a jiných parametrech). Celosvětová produkce čedičových vláken je asi 10 000 tun. V ČR se i přes skutečnost, že existují naleziště (v naprosté většině se jedná o chráněné přírodní památky), čedičová vlákna nevyrábějí, již hotová se dováží především z Ruska a Ukrajiny. Následně jsou pak zpracovávána do technických tkanin, délkových textilií (rovingů) aj. Základní výrobní průměr vláken je 9, 13 a 17 μm. Postup výroby je znázorněn na Obr. 10.



Obr. 10 Výrobní proces čedičových vláken [21]

Čedičová vlákna díky svým vynikajícím vlastnostem (mechanickým, fyzikálním, chemickým) předčí mnoho ostatních druhů vláken. Jsou především velice pevná, mají vysokou teplotní odolnost, nízkou navlhavost, jsou nehořlavá, mají dobrou chemickou odolnost proti vodě, alkáliím a většině organických i anorganických kyselin, mají také vysoký elektrický odpor a odolnost proti UV záření. Výroba je energeticky méně náročná než v případě skleněných vláken a k velmi vysoké úspoře dochází při srovnání s uhlíkovými vlákny. Srovnání čedičových a skleněných vláken je shrnuto v Tab. 5. Z příložené tabulky vyplývá, že čedičová vlákna mají v mnohém lepší vlastnosti než vlákna skleněná.

Tab. 5 Porovnání vlastností čedičových a skleněných vláken [22]

Vlastnosti fyzikální	Čedič	Sklo
Hustota (při 20°C) /kg.m ⁻³ /	2 900	2 600
Navlhavost / % /	0,5	0,1
Modul pružnosti v tahu /GPa/	až 100 GPa	70 až 80 GPa
Pevnost v tahu /MPa/	2 500 až 3 950	1 850 až 2 250
Vlastnosti tepelné	Čedič	Sklo
Pracovní teplota / °C /	-200 až +700	-60 až +460
Měrná tepelná vodivost /W.m ⁻¹ .K ⁻¹ /	0,027 až 0,033	0,029 až 0,035
Vlastnosti elektrické	Čedič	Sklo
Specifický odpor /W.m/	10 ¹²	10 ¹¹

Možností využití čedičových vláken je nespočet, nejčastěji se však současně používají na tepelně izolační desky. Dále do geotextilií, různých filtrů, jako žáruvzdorná ochrana, ve stavební praxi mohou sloužit jako plnohodnotná náhrada vláken skleněných.

Jejich hlavní výhodou je, že čedič je přírodní materiál, který lze na vlákna zpracovávat bez dalších přísad, a v přírodě se vyskytuje hojně. Bohužel hlavní nevýhodou je dostupnost těchto vláken. Vzhledem k současné geopolitické situaci jsou dodávky čedičových vláken problematické, i přes to je v současnosti největším dodavatelem čedičových vláken Rusko, Ukrajina a Čína, přestože na dovoz tohoto materiálu jsou aktuálně uvalena embarga, případně vyšší cla. Největším dodavatelem a světově nejvýznamnější společností pro výrobu čedičových vláken je společnost Kamenny Vek (Rusko), v ČR se pak výrobky z čedičových vláken zabývá například firma Basaltex, která má obchodní zastoupení v Šumperku (jejím dodavatelem je právě Kamenny Vek).



Obr. 11 Čedičový roving navinutý na špulkách

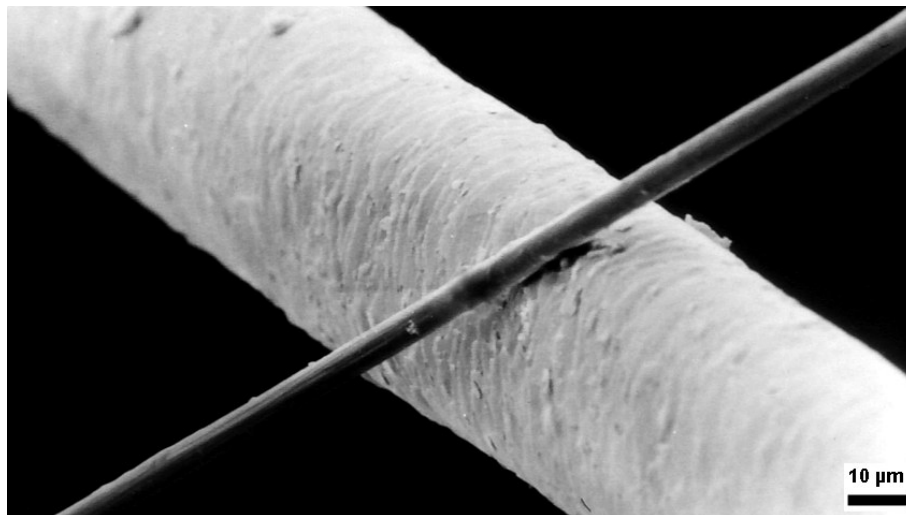
2.2.2. Uhlíková vlákna

Vývoj uhlíkových vláken, neboli též karbonových vláken, probíhá již řadu let. Uhlíkové vlákno je název pro vlákno obsahující uhlík v různých modifikacích. Jedná se o dlouhý, tenký pramen materiálu o velmi malém průměru (cca 10 x tenčí než lidský vlas, Obr. 12) složený převážně z atomů uhlíku. Atomy uhlíku jsou spojeny dohromady v mikroskopické krystaly, které jsou více méně orientovány paralelně k dlouhé ose vlákna. Krystalové uspořádání způsobuje, že vlákno je na svou tloušťku velmi pevné.

První uhlíkové vlákno zhotovil z bambusové dřeviny už Thomas Alva Edison okolo roku 1880, průmyslově byla však první uhlíková vlákna vyrobena v roce 1957

z viskózy. Tato surovina má však výtěžek jen asi 25 %. V posledních letech se tímto způsobem vyrábí jen v Bělorusku a Rusku [23]. Se současnou průmyslovou výrobou uhlíkových vláken z polyakrylnitrilu se začalo v Japonsku v roce 1971. V roce 2015 pocházelo z této suroviny cca 98 % uhlíkových vláken, celosvětová výrobní kapacita se odhadovala na 130 tisíc tun ročně [24].

Vlastnosti uhlíkových vláken lze shrnout následně [24]. Vlákná mají průměrnou hustotu 1750 kg/m^3 a průměr 5–10 μm . Od jiných textilních vláken se odlišují zejména výrazně menším modulem pružnosti v kolmém směru k ose vlákna, křehkostí (tažnost je menší než např. u skleněných vláken), při ohřevu se vlákno zkracuje, má vyšší koeficient tepelné roztažnosti než sklo, v podélném směru mají uhlíková vlákna malý elektrický odpor (jen $1,9 \cdot 10^{-6} \Omega/\text{m}$).



Obr. 12 Srovnání uhlíkového vlákna v pozadí s lidským vlasem [24]

Uhlíková vlákna se používají výhradně pro technické účely a naprostá většina z nich se uplatňuje jako výztuž kompozitů. Podíl výztuže obnáší maximálně 80 % váhy kompozitu, uhlík se přidává ve formě mletých vláken, sekaných pramenů ("chopped strands"), filamentů, rovingů (Obr. 13), rohoží, tkanin, pletenin nebo splétaných textilií.



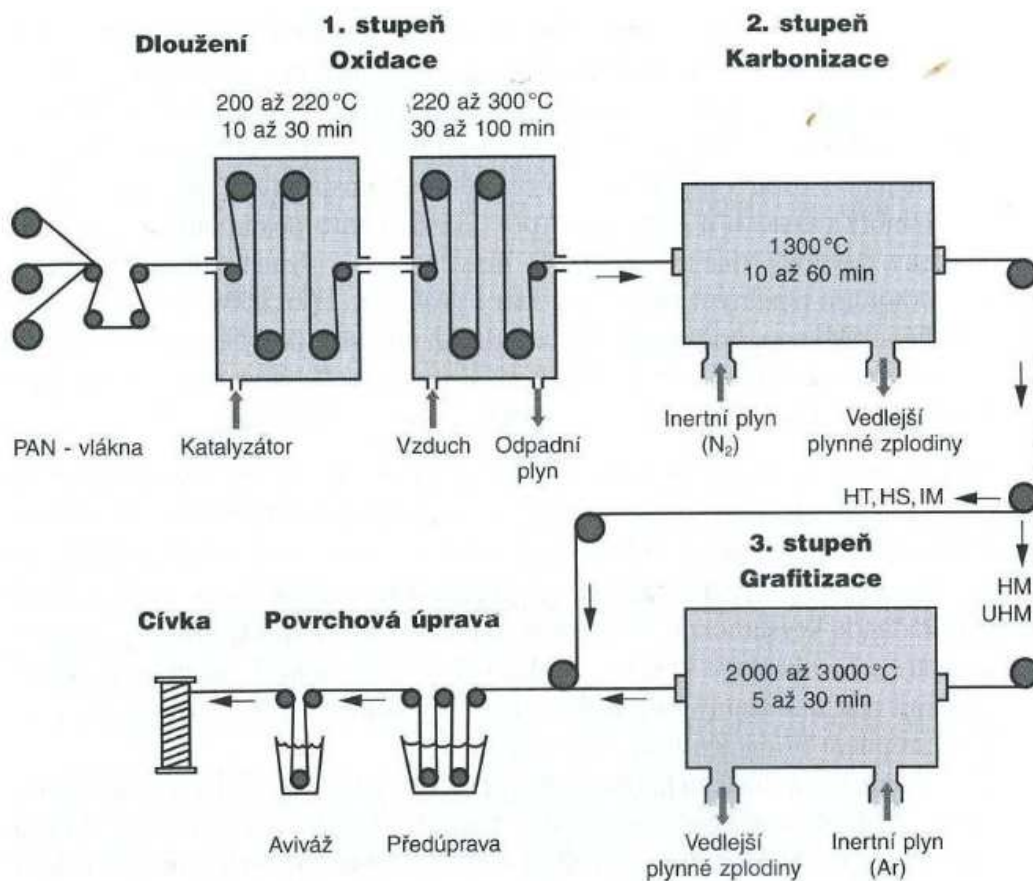
Obr. 13 Roving z uhlíkového vlákna

Hlavní druhy běžně vyráběných vláken jsou standardní karbonizovaná vlákna AS (average strength) - s průměrnou pevností, HS (high strength) - s vysokou pevností, HT (high tenacity) - s vysokým modulem pružnosti, vysokomodulová grafitizovaná vlákna (HM – “High Modulus”), vlákna vysoce pevná, se středním modulem pružnosti (IM – “Intermediate Modulus”), dutá uhlíková vlákna, vlákna s vysokým modulem pružnosti (VHM “Very High Modulus”, UHM “Ultra High Modulus”), mletá uhlíková vlákna a recyklovaná uhlíková vlákna.

V dnešní době je většina uhlíkových vláken vyrobena v prekurzorech [29]. Výroba probíhá v jednotlivých bodech, viz níže, a na jejím konci je hotové vlákno například ve formě rovingu i s povrchovou úpravou. Postup je následující [25]:

- Příprava prekurzoru a úprava výchozího materiálu buď tavným zvlákňováním, nebo zvlákňováním z roztoku. Struktura prekurzoru ovlivní strukturu a pevnost uhlíkových vláken. Vlákno je pak dluženo na požadovanou jemnost.
- Stabilizace před karbonizací. Z dlouhých uhlíkových vláken vznikla teplotně stabilní zesítená struktura. Stabilizace se provádí na vzduchu zahřátím na poměrně nízké teploty 200–450 °C na 20–30 minut. To způsobí, že vlákno sbírá kyslíkové molekuly ze vzduchu a dojde tak k přerovnání atomové struktury vlákna. Při stabilizaci vzniká ve vláknech také vlastní teplo, které musí být kontrolováno, aby se zabránilo přehřívání vlákna. V praxi se někdy používá tažení vlákna skrze řadu zahřívacích komor nebo vlákno prochází přes rozeřáté válce a sypké materiály, které odebírají přebytečné teplo.
- Dále následuje karbonizace. To je převod prekurzoru na uhlíková vlákna. Provádí se v inertní atmosféře (obvykle dusíkové), při teplotách mezi 1 000 °C–2 000 °C. Bez přístupu kyslíku vlákno nemůže hořet. Místo toho vysoká teplota způsobí rozkmitání atomů ve vláknech tak, že většina neuhlíkových atomů je odstraněna. Výsledné vlákno obsahuje 85–95 % uhlíku.
- Grafitizace se nemusí provádět. Pokud se však provede, vznikají tzv. grafitová vlákna. Provádí se v inertní atmosféře, při teplotách mezi 2 400 °C–3 000 °C. Dochází ke zvýšení obsahu uhlíku na cca 99 % a více. Vzniká také uspořádaná vrstevnatá struktura.
- Na závěr se provede povrchová úprava. Povrch vlákna dobře neváže epoxidy a další látky používané v kompozitních materiálech. Proto se povrch vlákna mírně oxiduje. Přidání kyslíkových atomů na povrch umožňuje lepší přilnavost dalších

látek a zhrubnutí povrchu pro lepší mechanické spojení s těmito látkami. Okysličení může být dosaženo přístupem plynů, jako je vzduch, oxid uhličitý, ozon nebo ponořením do různých kapalin jako chlornanu sodného nebo kyseliny dusičné. Vláknno může být také pokryto ochrannou vrstvou proti poškození při dalším zpracování.

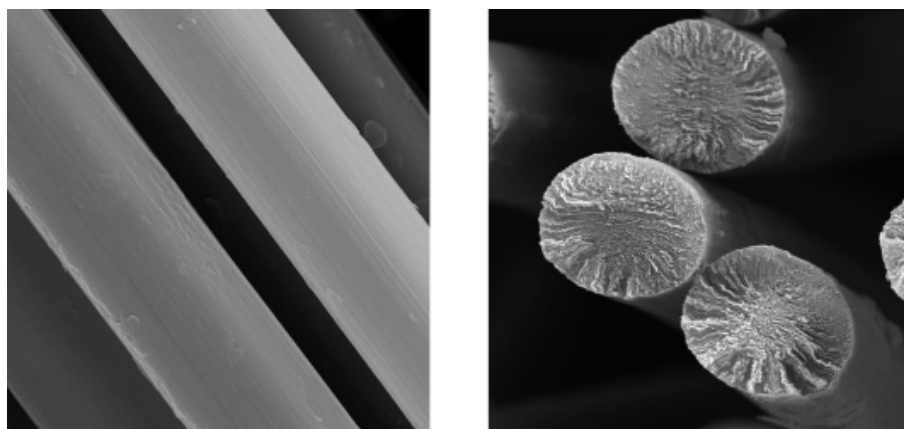


Obr. 14 Postup výroby uhlíkových vláken v prekurzoru [29]

Tab. 6 Vybrané vlastnosti různých typů uhlíkových vláken [24]

Vláknno/prekurzor	Pevnost v tahu GPa	E-modul GPa	Tažnost %	Výrobce (příklad)
karbonizované z PAN (95 % uhlíku)	5,5	250	1,9	Toray, Japonsko (1997)
grafitované z PAN (99 % uhlíku)	4,4	377	1,2	Toray, Japonsko
mezofázová smola (99% uhlíku)	3,8	900	0,4	Mitsubishi, Japonsko
viskóza (99% uhlíku)	1,2	100	0,5	Sohim, Bělorusko
nanovláknno 0,2 μm	7,0	600	0,5	Applied Science, USA
S-sklo	4,5	85	5,7	agy, USA

Největší nevýhodou uhlíkových vláken zůstává však jejich cena [26]. Přibližná cena 1 m² 2D textilie s danou roztečí ok je asi 4 x vyšší než cena skleněné 2D textilie o stejném rozměru. Mírnou nevýhodou rovněž může být, že velmi pevná a tuhá uhlíková vlákna vykazují křehký lom (Obr. 15).



Obr. 15 Uhlíkové vlákno – křehký lom vlákna [27][28]

2.2.3. Skleněná vlákna

Výroba skla byla známá již Egypťanům okolo roku 1800 př. n. l. a s jistotou lze tvrdit, že první výrobci skla znali i skleněná vlákna, která dokázali snadno vytáhnout z roztavené skloviny. Byla používána především jako ozdoba na vázy apod. Vlákna byla však daleko tlustší a složením se podobala dnešnímu E-sklu [30]. Průmyslové výroby se skleněná vlákna dočkala až po roce 1934, a to jako forma tepelné izolace.

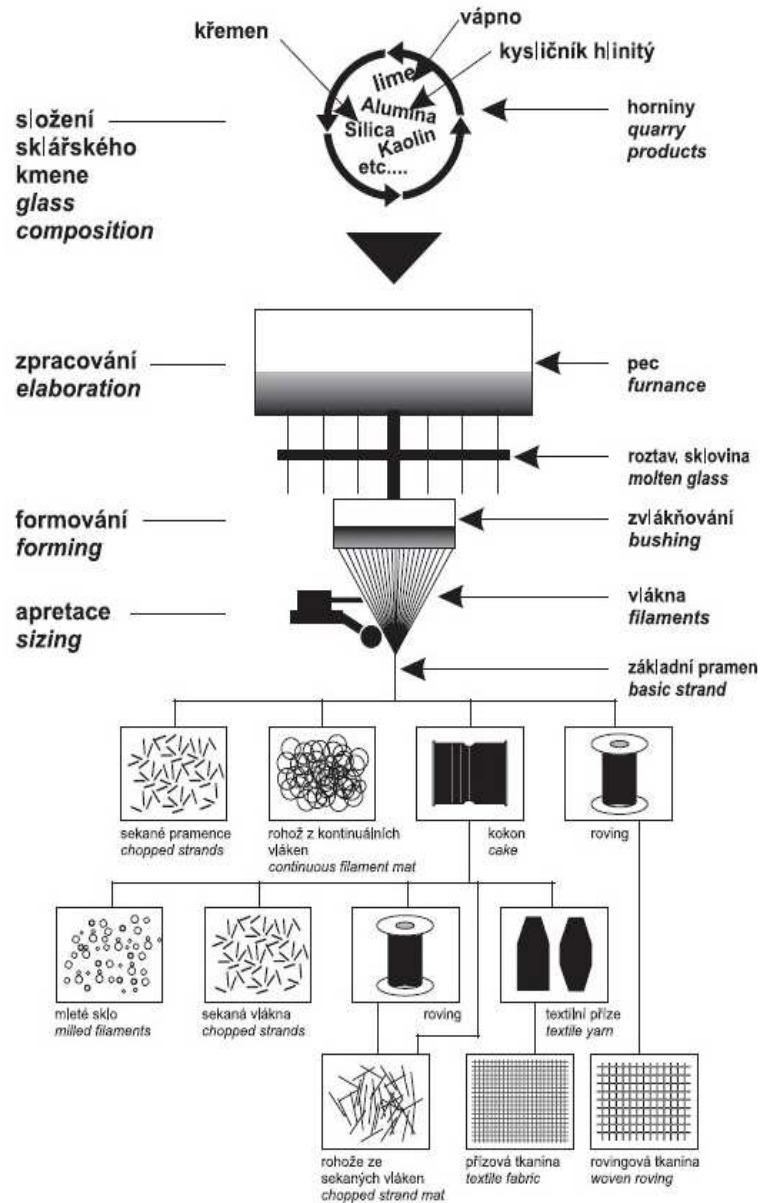
V dnešních kompozitech jsou používána především vlákna typu E, S tedy vlákna s velkým modulem pružnosti, typu C s odolností proti kyselinám a tzv. AR skleněná vlákna, tj. vlákna odolná proti alkáliím. Vlákna E (elektrická) bezalkalické skloviny jsou používána jako vynikající elektrický izolant. Vlákna S mají vyšší obsah SiO₂, MgO a Al₂O₃ a především se vyznačují až cca o 50 % vyšší pevností v tahu a vyšším modulem pružnosti. Právě tato vlákna se používají nejvíce v dnešních kompozitech v kombinaci s epoxidovou matricí. Vlákna C mají vysokou odolnost proti kyselinám a chemicky agresivním látkám [29]. Obsahují více alkálií, mají však nižší teplotu měknutí a především jsou méně pevná. Posledním, avšak důležitým typem vláken jsou AR vlákna, tj. vlákna do alkalického prostředí. Tato vlákna se tedy nejvíce hodí do prostředí kompozitních materiálů na bázi cementu [31].

Výroba skleněných vláken probíhá tzv. tažením z trysek. Ve sklářské peci se přibližně při teplotě 1400 °C roztaví křemičitý písek (SiO_2), vápenec (CaCO_3), kaolin ($\text{Al}_4[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_8$), dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), kyselina boritá $\text{B}(\text{OH})_3$ a kazivec (CaF_2) na tzv. E-sklovinu. Následně se několik dní číří a poté se vede v tekutém stavu kanálky předpecí do spřádacích trysek. Tyto trysky vyrobeny z platinové slitiny jsou zahřáté na takovou teplotu, aby z nich sklovina pomalu vytékala a rychle tuhla do tvaru vláken. Vlákna jsou na výstupu z trysky asi 2 mm tlustá. Teprve dloužením vysoce viskózních vláken na velmi rychle rotujícím navíjecím zařízení se vlákna kalibrují na zvolený průměr např. 10 nebo 14 μm a současně prodlužují až na 40 000 násobnou délku. Odtahová rychlost vláken je až 50 m/s. Běžná složení skleněných vláken jsou uvedena v Tab. 7.

Tab. 7 Přibližný (rozsah) složení jednotlivých typů skleněných vláken [32]

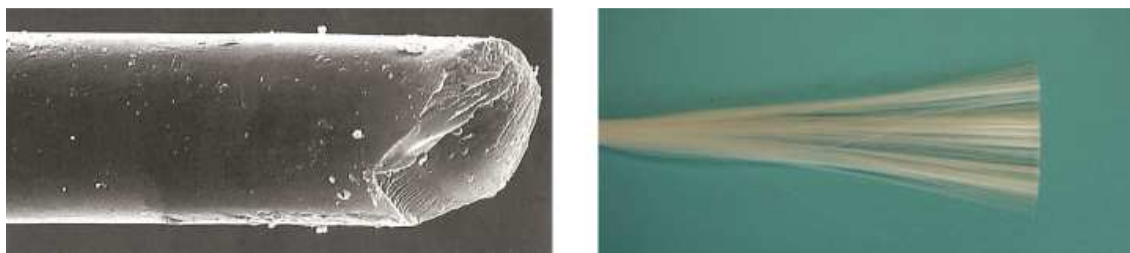
Oxid	A-sklo (%)	C-sklo (%)	D-sklo (%)	E-sklo (%)	ECR-sklo (%)	AR-sklo (%)	R-sklo (%)	S-2-sklo (%)	Bez boru E-sklo (%)
SiO_2	63–72	64–68	72–75	52–56	54–62	55–75	55–65	64–66	52–62
Al_2O_3	0–6	3–5	0–1	12–16	9–15	0–5	15–30	24–25	12–16
B_2O_3	0–6	4–6	21–24	5–10		0–8			
CaO	6–10	11–15	0–1	16–25	17–25	1–10	9–25	0–0,1	16–25
MgO	0–4	2–4		0–5	0–4		3–8	9,5–10	0–5
ZnO					2–5				
BaO		0–1							
Li_2O						0–1,5			
$\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$	14–16	7–10	0–4	0–2	0–2	11–21	0–1	0–0,2	0–2
TiO_2	0–0,6			0–1,5	0–4	0–12			0–1,5
ZrO_2						1–18			
Fe_2O_3	0–0,5	0–0,8	0–0,3	0–0,8	0–0,8	0–5		0–0,1	0–0,8
F_2	0–0,4			0–1		0–5	0–0,3		0–1,0

Sdružením těchto téměř neviditelných elementárních vláken vzniká ohebné spřádací vlákno. Na vlákna se v průběhu tažení nanáší lubrikace ve formě vodní emulze, jejím úkolem je spojit vlákna do manipulovatelného svazku a přizpůsobit je dalšímu zpracovatelskému procesu. Celý proces výroby včetně možných výsledných produktů je zachycen na Obr. 16.

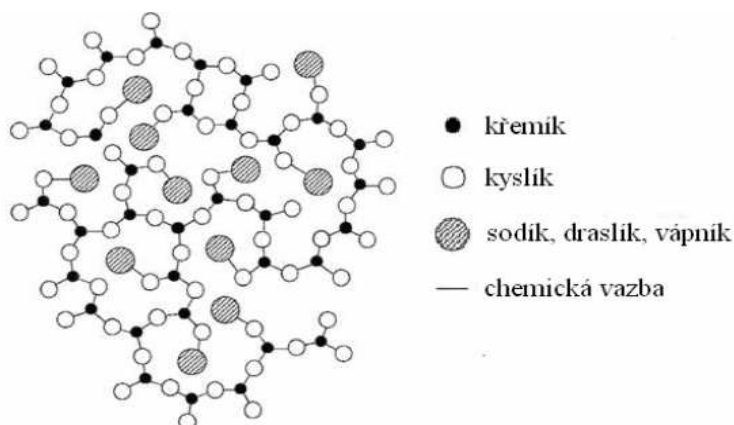


Obr. 16 Výroba skleněných vláken včetně výsledných produktů [34]

Skleněná vlákna se používají při šití oděvů, především těch ochranných. Dále pro tepelné izolace a v poslední době především právě jako nosná textilní výztuž v cementových kompozitech. Celosvětová výroba je asi 4,7 milionu tun, z toho cca 80 % jako roving [35]. Jejich pevnost v tahu je závislá na typu použitých vláken, běžně je uváděno rozpětí hodnot. Pro skleněná vlákna typu E 1700–3500 MPa, typu S pak 2000–4500 MPa, typu C 1700–2800 MPa a typu AR Glass 2000–3000 MPa [33][36][37].



Obr. 17 Vlevo skleněné vlákno, křehký lom (REM – rastrovací elektronová mikroskopie), vpravo roving skleněných vláken bez aplikace povrchové úpravy [34]



Obr. 18 Chemická struktura skla [32]

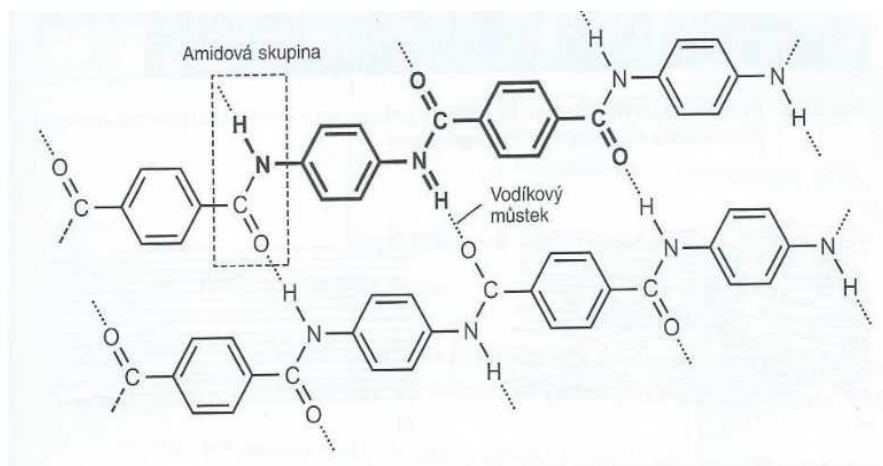
2.2.4. Ostatní druhy vláken

Syntetická vlákna (neboli vlákna polymerová) jsou textilní suroviny získané syntézou uhlíku, vodíku, dusíku, síry, fluoru a chloru. Při chemických reakcích se spojením jednotlivých molekul (monomerů) vytváří makromolekuly (polymery) [38]. Tato vlákna se dělí na vlákna vzniklá polymerací, polykondenzací a polyadící. Počátek průmyslového zpracování syntetických vláken nastal v průběhu druhé světové války. Srovnání vlastností části druhů syntetických vláken s vlákny přírodními je uvedeno v Tab. 8. Ve stavební praxi jsou velmi často používána vlákna PVA (polyvinylalkoholová vlákna). Základní surovinou pro jejich výrobu je polyvinylacetát rozpuštěný v metanolu. PVA vlákno se běžně vyrábí mokřím zvlákněním. Z jedné trysky může vycházet až 200 000 jednotlivých filamentů nízkou rychlostí 10–120 m/min. Tyto vlákna se vedou do srážecí lázně s různým složením, kde toto složení ovlivňuje jejich vlastnosti (například z lázně s obsahem aldehydů vzejdou vlákna voděnepropustná). Běžná délka vláken dosahuje hodnot 2 až 65 mm. Vlákna se dodávají v malých jemnostech (2–3 dtex) jako rozptýlená výztuž.

Tab. 8 Srovnání syntetických a přírodních vláken [39]

Druh vlákna	Fyzikální vlastnosti		
	Pevnost cN/tex	Tažnost %	Polymerační stupeň ¹⁾
Polyester (PES)	40-65	15-40	100-150
Polypropylen (PP)	25-60	15-30	12 000
Polyamid (PA)	40-60	30-60-	50-200
Polyakrylnitril (PAC)	20-35	16-36	500-1 500
Polyuretan (PU)	5-12	100-700	--
Bavlna (CO)	cca 30	6-10	2 500-3 000
Vlna (WO)	9-18	25-35	-

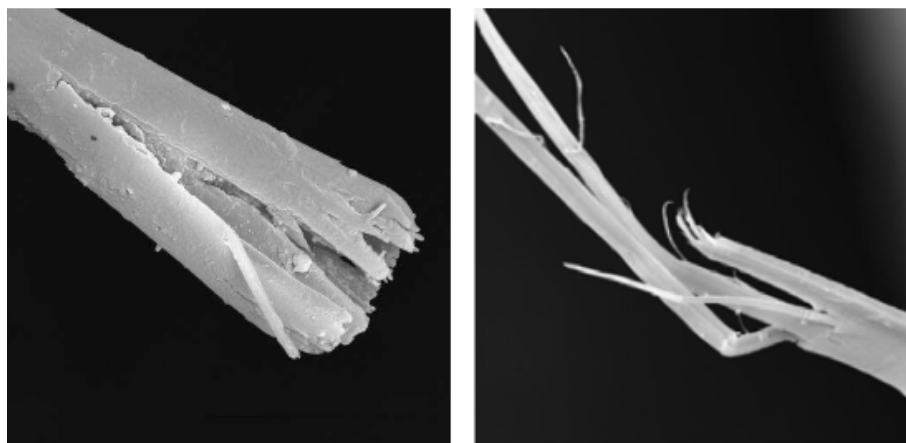
Aramidová vlákna jsou *textilní vlákna z aromatických polyamidů s dlouhým uhlovodíkovým řetězcem* (Obr. 19). Z jeho *peptidických vazeb* nejméně 85 % musí být spojeno se dvěma aromatickými jádry. Označení *aramid* vzniklo ze spojení slov *aromatický polyamid* [40]. Zpravidla se rozeznávají dvě skupiny aramidových vláken. *Meta-aramidy* tj. *metafenylen-izoftalamidy*, zkráceně také *MPIA* (vynikající svou termickou odolností a elektroizolačními schopnostmi) a *para-aramidy* tj. *p-fenylen-tereftalamidy*, zkráceně *PPTA* (s podstatně vyšší pevností v tahu a vyšším modulem pružnosti)[41].



Obr. 19 Struktura aromatického polyamidu [29]

Technologie výroby aramidů není veřejně zcela známá. V odborné literatuře se uvádějí jen pravděpodobné výrobní postupy. *Výchozí roztok se získává polykondenzací aromatického chloridu kyseliny dikarboxylové s aromatickým diaminem*. *Meta-aramidy se průmyslově vyrábějí tak, že se do roztoku zchlazeného pod 0 °C přidává izoftaloyl*

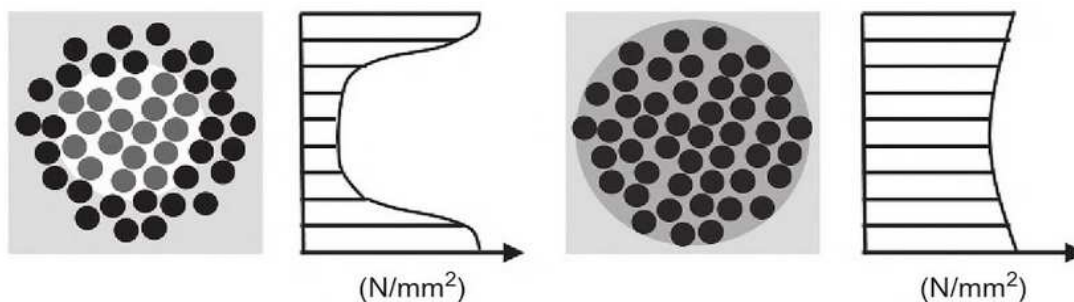
chloridu, mísí se s kalciumhydroxidem, 17% koncentrace se pak zahřívá na cca 150 °C, filtruje a zpracovává suchým zvlákněním. Pro para-aramidy se k rozpouštění používá dimethylfosfát, dimethylacetát a jiné amidy. Polykondenzace probíhá při teplotě cca 20 °C, zvláknění se provádí na sucho, na mokro nebo kombinací obou způsobů. K textilnímu zpracování se dodává filament v jemnostech 22–167 tex, stříž v jemnosti 1,7 dtex v délkách 38–85 mm či sekaná vlákna v délkách 1–12 mm [42]. Pro aramidová vlákna je typické houževnaté (axiální) porušení (Obr. 20). Obchodním označením p-aramidu je dobře známý Kevlar. U m-aramidu pak méně známý Nomex (výrazně levnější). Hlavní vlastnosti kevlarové textilie jsou vysoká pevnost v tahu při nízké hmotnosti (důvod pro použití v neprůstřelných vestách), vynikající rozměrová stabilita, nízká tažnost, vysoký modul a houževnatost, je ohnivzdorný a samozhášivý, dále má vysokou chemickou odolnost, degraduje však pod UV světlem. Pevnost v tahu je až 4000 MPa a modul pružnosti až 180 GPa.



Obr. 20 Axiální štěpení aromatických polyamidů, vlevo Kevlar, vpravo Nomex [43]

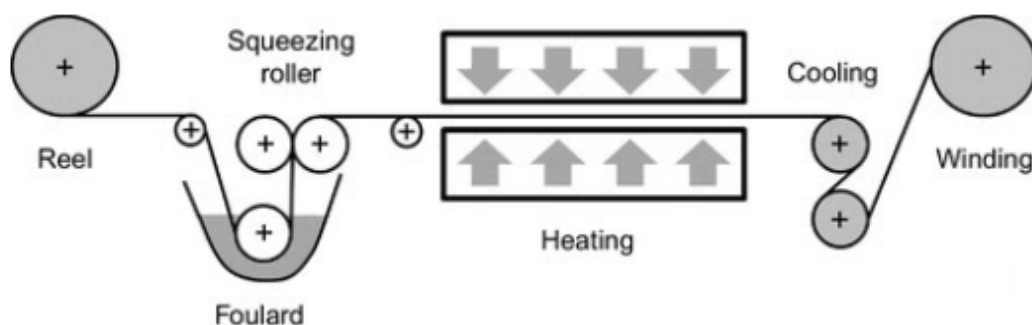
2.3. Povrchová úprava (povlakování) textilií

Natírání (povlakování), tj. povrchová úprava textilií, má za cíl stabilizovat vnitřní strukturu a tvarovat a upevňovat tvar textilie. Pevnost textilie v tahu se zvyšuje aktivací vnitřních vláken provazce. Obvykle se povlak nanáší impregnací celého rovingu (provazce). Bez impregnace beton proniká pouze částí rovingu a pouze tou částí vláken, které jsou v přímém kontaktu s betonem. To může způsobit předčasné selhání výztuže ještě před dosažením teoretické únosnosti, kdy jsou krajní vlákna vytažena a oddělena od nezatížené části. Při aplikaci impregnace však lze napětí přenášet rovnoměrněji (Obr. 21) mezi vlákna. To vede k vyšší únosnosti a plynulejší odezvě komponentu na zatížení.



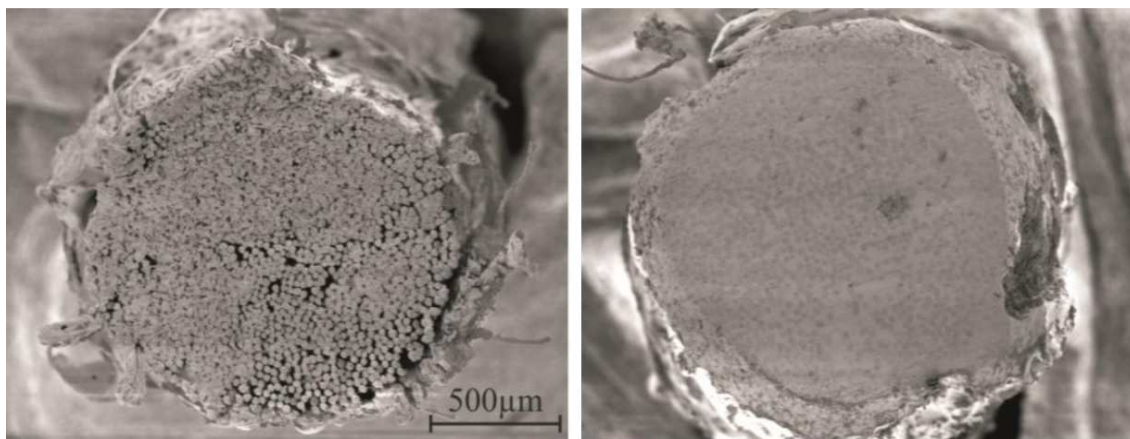
Obr. 21 Vliv povlaku na rozložení napětí v rovingu (vlevo bez povlaku, vpravo s povlakem) [44]

Impregnační linka se obvykle skládá ze skladu surovin, místa kde dochází k samotné impregnaci (místa kde suchá tkanina prochází přes lázeň z pryskyřice), oblasti kde dochází k vysušení a vytvrzování povlaku, tvarování, chlazení a končí skladem výsledného polotovaru, který je navíjen do rolí v podobě rovingu. Proces povlakování (impregnační linka) je zachycen na Obr. 22.

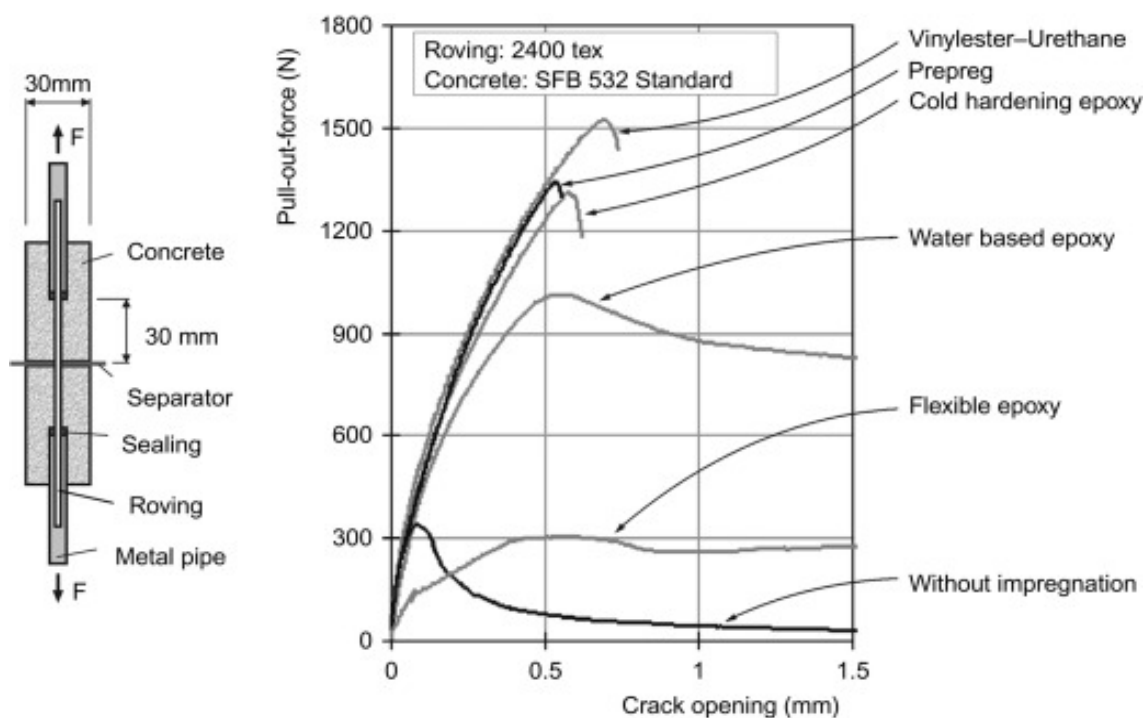


Obr. 22 Výrobní (impregnační) linka pro proces povlakování, zleva cívka se surovinou, dále impregnační lázeň, sušárna a lisovna, oblast dochlazení a následné navíjení do rolí [57]

Chování výsledné tkaniny silně závisí na druhu použitého povlaku. Obecně však platí, že polymerní nátěry s vysokým Youngovým modulem pružnosti zvyšují maximální pevnost tkaniny společně se snižováním její tažnosti. Jednotlivé filamenty pramenců bez povlaku se při zatížení oddělují a jejich celková únosnost je relativně nízká [45]. Účinky různých povlakových systémů byly zkoumány v několika pracích [46][47][48], především pomocí jednoduché tahové zkoušky (Obr. 24). Na jejich základě bylo prokázáno, že u vysokomodulových polymerů, jakými jsou například různé epoxidové pryskyřice, je dosaženo téměř 100% aktivace pramence, tj. všech vláken působících ve směru zatížení, tedy napětí je roznášeno rovnoměrně na všechna vlákna (Obr. 21).



Obr. 23 Snímky z REM mikroskopu, vlevo vlákna se špatnou impregnací (na vodní bázi), vpravo vlákna dobře spojená (impregnovaná) pomocí melamin-formaldehydové pryskyřice [34]



Obr. 24 Tahová zkouška textilní výztuže s různým druhem povlaku ve standartním betonu [45]

2.3.1. Druhy povlaků pro textilní výztuž

Pro povlakování textilních výztuží nezávisle na jejich druhu je používána celá řada materiálů. Obecně vzato se však skoro vždy jedná o nějakou formu polymerů. Polymery jsou makromolekulární látky vyráběné polymerizací sloučenin, při které

dochází k mnohonásobnému propojení monomerů do makromolekulárního řetězce. Polymery mají nejčastěji kovalentní vazbu. Základní druhy polymerů jsou termoplasty, reaktoplasty (dříve pryskyřice) a elastomery. Přehled nejčastěji užívaných polymerů ve stavebnictví je uveden v Tab. 9.

Tab. 9 Souhrn polymerů užívaných ve stavebnictví [138]

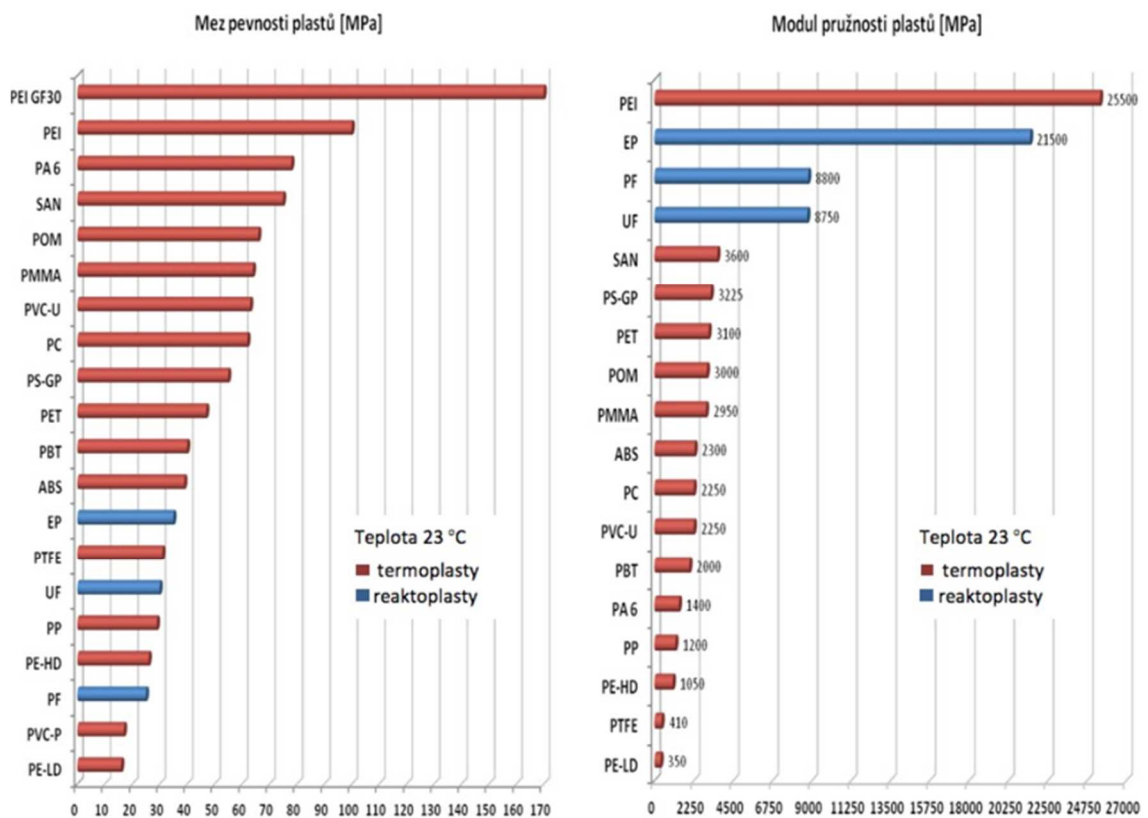
ABS	Acrylonitril-butadien-styren	PF	Fenol formaldehyd
CA	Acetát celulozy	PI	Polyimid
EP	Epoxydová pryskyřice	PMMA	Polymetyl metakrylát
EPDM	Ethylenpropylenový dienový kaučuk	PIB	Polyisobutylem
EVA	Etylen-vinyl-acetát	PP	Polypropylen
MF	Melaminformaldehydová pryskyřice	PS	Polystyren
PA	Polyamid	PS-HI	Polystyren, vysokopevnostní
PB	Polybutylen	PTFE	Polytetrafluoroetylen
PBTP	Polybutylen tereftalát	PUR (dříve PU)	Polyuretan
PC	Polykarbonát	PVAC	Polyvinylacetát
PCTFE	Polychlorotrifluoretylen	PVAL (dříve PVA)	Polyvinylalkohol
PE	Polyetylen	PVC	Polyvinylchlorid
PE-HD	Polyetylen, vysokohustotní	SI	Silikony
PE-LD	Polyetylen, nízkohustotní	UF	Močovinoformaldehydová pryskyřice
PES	Polyethersulfon	UP	Nenasycený polyester
PETP (dříve PET)	Polyetylen tereftalát		

Termoplasty mají výrazné viskoelastické chování a jsou zcela rozpustné za vysokých teplot, umožňují tak výraznou měrou jejich recyklaci a jsou snadno zpracovatelné. Používají se především při výrobě spotřebních předmětů, v potravinářském průmyslu, strojírenství, okrajově také ve stavebnictví.

Makromolekuly reaktoplastů, mezi které se řadí epoxidové, polyesterové, fenol-formaldehydové a melaninové pryskyřice, jsou ve srovnání s termoplasty mnohem složitější, jejich uspořádání je ataktické a z tohoto důvodu nekystalizují. Vyznačují se síťovou strukturou makromolekul a nemají výrazné viskoelastické chování. Díky zesílené struktuře vykazují vyšší modul pružnosti než termoplasty. Velmi často se reaktoplasty, konkrétně epoxidové nebo formaldehydové pryskyřice používají v kombinaci s výztužným skelným vláknem (výroba bakelitu).

Elastomery mají především vysokou hodnotu mezních elastických deformací, amorfni nebo slabě krystalickou strukturu. Pro napětově deformační chování elastomerů je příznačné, že i poměrně nízká napětí vyvolávají vysoké hodnoty elastických deformací (v některých případech 500 až 700 %).

Pevnost většiny polymerů je velmi často omezena hodnotou 10 až 40 MPa, modul pružnosti jen zřídka kdy přesahuje 10 GPa. Vzájemné porovnání mechanických vlastností běžně užívaných reaktoplastů a termoplastů je uvedeno na Obr. 25.



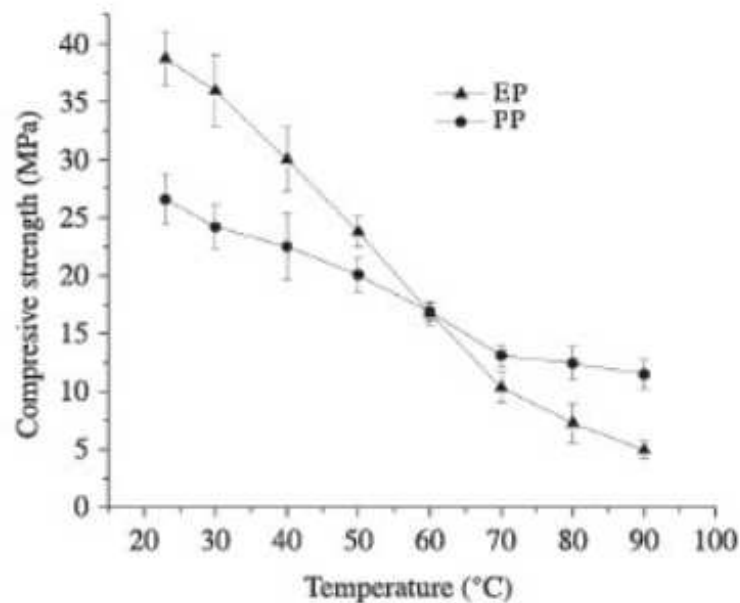
Obr. 25 Mechanické vlastnosti reaktoplastů a termoplastů [138]

V odborné literatuře se jako možné uvažované povlaky pro textilní výztuže uvádí různé druhy aminopryskyřic, tj. podskupina reaktoplastů. Do skupiny aminopryskyřic patří například epoxidová pryskyřice (EP), fenolformaldehydová pryskyřice (PF), močovinoformaldehydová pryskyřice (UF), či melaminformaldehydová pryskyřice (MF). Melaminformaldehydová pryskyřice je však řádově dražší a to především z důvodu její zdravotní nezávadnosti. Použití výše zmíněných pryskyřic má však svá úskalí. Jedná se o několik vlastností, které svým charakterem zhoršují mechanické parametry výsledného kompozitu (výztuž + povlak). Je to především odolnost vůči zvýšeným teplotám. Mezní teplota použití je uváděna jako teplota, kdy si plast zachová asi 50 %

svých typických vlastností. Pro aminopryskyřice je běžně uváděná mezní teplota v rozpětí 50 až 80 °C [143]. Při překročení této teploty může již docházet k samovolné deformaci bez účinku vnějších sil. Výrazně negativním faktorem je také teplotní roztažnost, která se pohybuje okolo hodnot 5 až $6 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$. Změna pevnosti epoxidové pryskyřice (EP) ve srovnání s polypropylenem (PP) v závislosti na teplotě je zobrazena v Tab. 10 a Obr. 26.

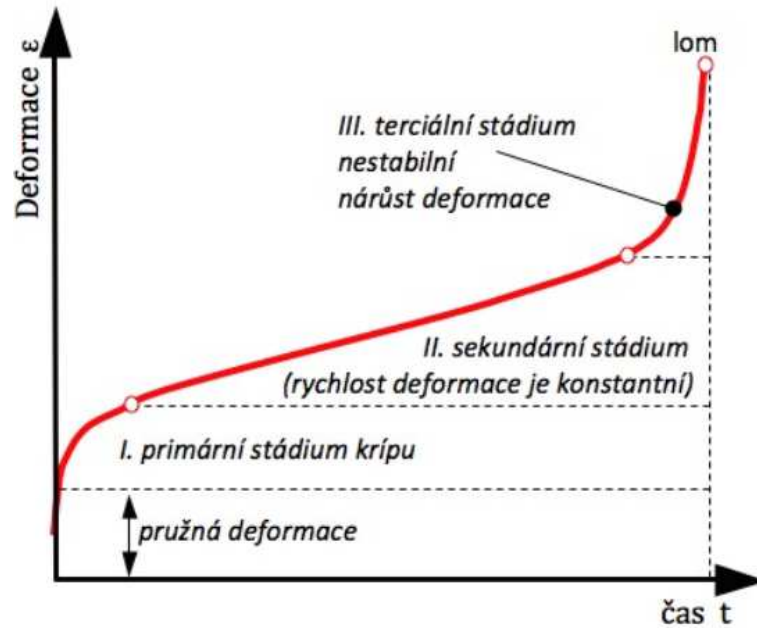
Tab. 10 Změna pevnosti EP a PP v závislosti na teplotě [137]

Test temperature (°C)	EP (MPa)	PP (MPa)
23 (Room temperature)	38.73 ± 2.32	26.60 ± 2.21
30	35.94 ± 3.10	24.20 ± 1.93
40	30.02 ± 2.77	22.51 ± 2.87
50	23.80 ± 1.30	20.06 ± 1.45
60	16.77 ± 0.93	16.91 ± 0.77
70	10.36 ± 1.34	13.12 ± 0.94
80	7.28 ± 1.69	12.46 ± 1.45
90	4.96 ± 0.74	11.50 ± 1.23



Obr. 26 Změna mechanických vlastností EP a PP v závislosti na teplotě [137]

Většina polymerů je rovněž náchylná ke ztrátám mechanických vlastností při vystavení dlouhodobému zatížení a při krátkodobých namáháních vykazují vyšší pevnost a modul pružnosti. Z tohoto důvodu je často uváděn také dlouhodobý modul pružnosti (tzv. krípový). Růst deformací v čase při konstantní úrovni zatížení je uveden na Obr. 27.



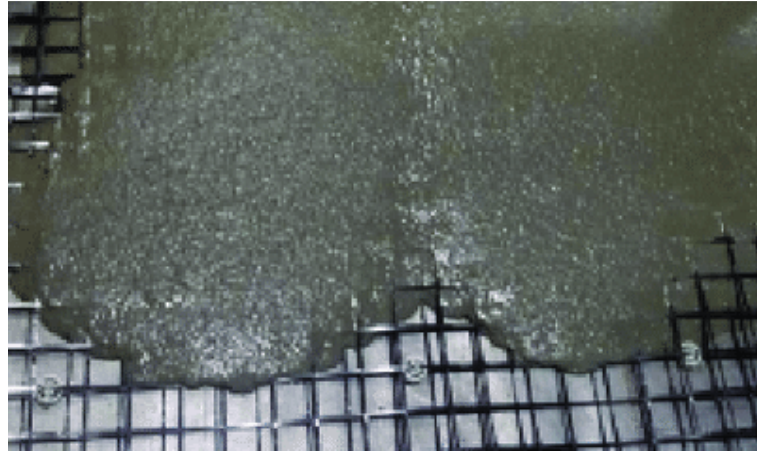
Obr. 27 Deformace namáhaných polymerů (aminopryskyřic) v čase, kríповá křivka
[138]

2.4. Technologie zhotovení TRC prvků

V odborné literatuře je popsáno několik možných variant postupů výroby prvků TRC [4]. Vždy je využíváno tekuté konzistence čerstvé směsi, která je nezbytnou podmínkou pro úspěšnou betonáž. Nejvýznamnějším způsobem je zřejmě lití do forem, případně v kombinaci s tzv. laminováním [87][88]. Tato metoda se však hodí především pro plošné prvky a není příliš vhodná pro prostorové konstrukce složitých tvarů. Metoda nástřikem je zase použitelná spíše pro zesilování konstrukcí a dále se jí věnovat nebudu. Metoda nazvaná spinning je vhodná zejména pro potrubí či piloty, zatímco tzv. pultruze [89] v kombinaci s vytlačováním umožňuje kvalitní výrobu dvou a hlavně tří rozměrných prvků. Výše zmíněné výrobní postupy jsou popsány v následujícím textu.

Při lití (odlévání) se výztuž vkládá do formy na předem připravené podkladky například z již dříve zhotovených prvků či zbytků těžce matrice. Následuje odlití prvku v jednom kroku, nebo odlití části a vložení další vrstvy výztužné tkaniny. Tato metoda je problematická především s ohledem na dodržení polohy výztuže uvnitř formy, respektive ve výsledném produktu (Obr. 28). Metoda odlévání naráží na problém spojený s nízkou tuhostí a objemovou hmotností výztužných tkanin. Odlitím může dojít k deformaci výztužné struktury do nevhodného tvaru, případně k posunutí (vyplavání) do nevhodné

polohy. Proto může být v některých případech přistoupeno k fixaci výztuže pomocí samotné formy. Metoda odlévání se hodí pro výrobu 2D prvků a případně pro jednoduché 3D prvky.



Obr. 28 Metoda odlévání prvku TRC [90]

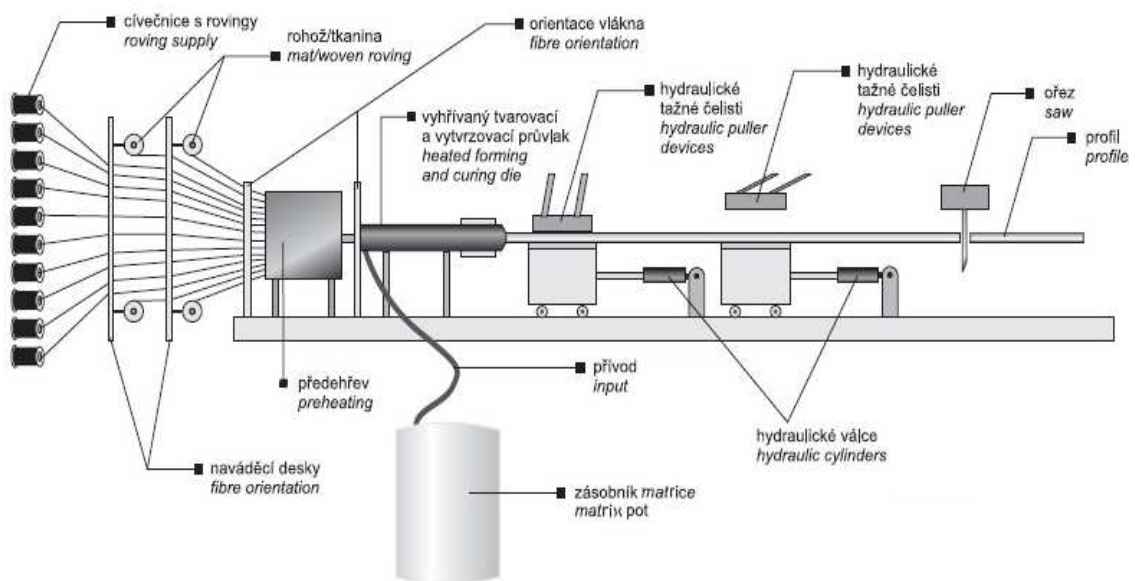
Dalším způsobem výroby TRC je laminování. Proces je podobný samotnému odlévání. Velmi často dojde k odlití celkové tloušťky prvku, kdy je výztuž na závěr položena na povrch. Postupným zatlačáním pomocí válečku je výztuž ponořena do čerstvé betonové směsi. Tento postup lze opakovat v několika krocích. Nevýhodou, podobně jako u odlévání, je malá kontrola nad polohou textilní výztuže, kdy u výztuže není zajištěna pevná a stabilní poloha. Výhodou metody je, že zatlačáním válečku vzniká mezi výztuží a matricí velmi pevná vazba. Proces laminování je zachycen na Obr. 29. Laminování se hodí výhradně pro výrobu 2D prvků v podobě desek. Velkou výhodou této metody je možnost vyrábět i velké desky až do rozměru 6 m [91]. Obě metody, tj. odlévání a laminování se často kombinují.



Obr. 29 Laminování velkoformátové desky z TRC [92]

Spinning neboli metoda odstředivého lití se používá výhradně u kruhových průřezů, především trubek. Betonová směs se vhání do kruhové formy s připravenou výztuží a celou formou se otáčí (k otáčení se dříve používal soustruh). Vlivem odstředivých sil dochází k hutnění betonu a zatečení směsi do všech bodů formy. Tato metoda je však velmi náročná a nenašla většího uplatnění.

Pultruze neboli vytlačování či tažení je kontinuální způsob výroby, kterým lze dosáhnout výrazných úspor během výrobního procesu v důsledku jeho automatizace. Zároveň se hodí i pro výrobu složitých 3D tvarů a umožňuje realizovat komplexní zakázky. Je to rovněž nejnovější způsob výroby prvků TRC, který je aktuálně předmětem výzkumu. Způsob vytlačování je výrobní technikou, ve které jsou viskózní vytvrditelné materiály lisovány za vysokého tlaku a teploty vytlačovací tryskou. Požadovaný průřez tak udává tvar trysky. Touto technikou je možná výroba složitých 3D tvarů, dutých profilů, tyčí, nosníků [93]. Nevýhodou však je potřeba speciálního a zatím velmi drahého zařízení. Proces pultruze (Obr. 30) je historicky dobře znám, jeho modifikace umožňující proces výroby TRC je však zcela nová. Proces pultruze je obdobný procesu 3D tisku.



Obr. 30 Schéma procesu pultruze [94]

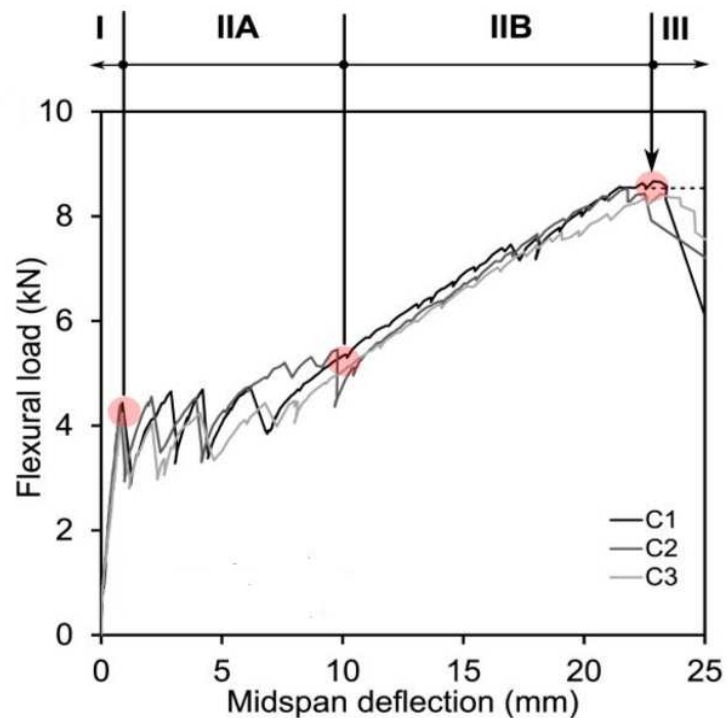
2.5. TRC se soustřednou výztuží (ohybová zkouška)

Abychom byli schopni popsat chování nekonvenčně vyztužených prvků (soustřednou výztuží) při ohybové zkoušce, musíme si uvědomit rozdíl mezi ohybovým

namáháním konvenčně vyztuženého betonu a právě TRC [4]. Pro textilní beton se soustřednou výztuží je typický následující průběh zkoušek. Stav I je definován jako oblast betonu bez narušení trhlinami, IIa je stav, kdy v betonu vznikají makroskopické trhliny, při následném stavu IIb dochází ke stabilizaci těchto trhlín a následně při stavu III dojde k selhání průřezu (Obr. 31).

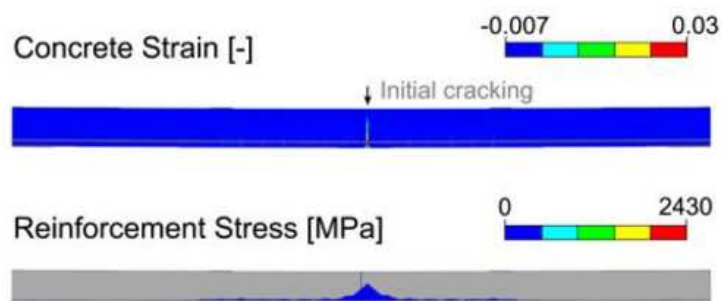
Stav I je definován jako elastický. Chování materiálu je téměř dokonale lineárně pružné. Je to doba před vznikem první trhliny, přičemž chování je primárně řízeno tuhostí cementové matrice, které je dáno jejím složením a způsobem ošetřování. Jak je vidět na Obr. 31, stav I lze také zjednodušeně definovat jako drobný nárůst deformací při vyčerpání cca 50 % celkové únosnosti, tj. hodnoty maximálního zatížení před porušením. Hned po vzniku první trhliny dochází k prudkému poklesu zatížení (přenášené síly), což je zapříčiněno pozdní reakcí textilní výztuže, které je způsobeno vinutím prefabrikované tkaniny, plochou výztuže a kvalitou soudržnosti tkaniny a cementové matrice. V případě malého množství výztuže nebo špatného spolupůsobení výztuže a matrice je zapotřebí větších deformací k aktivaci textilní výztuže. Stav IIa typicky symbolizují viditelné skoky zatížení v závislosti na deformacích s minimálním nárůstem zatížení. Stav IIb je stabilizace trhlín, v tomto stavu dochází k plnohodnotné aktivaci textilní výztuže v závislosti na jejích vlastnostech [49]. Tomu jevu se říká tzv. tahové zpevnění. Stav III symbolizuje celkový kolaps prvků, dochází k přetržení textilní výztuže při překročení její tahové únosnosti.

Pro celkové pochopení dějů před a po vzniku první trhliny a následném porušení vzorků uvádím rovněž výsledky hodnocení mechanismu vzniku trhlín pomocí numerického modelu (Obr. 32). Při pohledu na znázornění tahových napětí v betonu je patrné, že ke vzniku první trhliny dochází přibližně uprostřed desky a odpovídá mu stav, kdy je překročena tahová únosnost betonové matrice. Napětí ve výztuži v tomto místě má tvar špičky, avšak dosahuje jen malé hodnoty (cca 20 % celkové hodnoty pevnosti v tahu textilní výztuže). Následně se rozvoj trhliny projevuje výrazným růstem napětí ve výztuži, kde se maxima koncentrují kolem dalších vznikajících trhlín. Selhání nastává ve chvíli, kdy je překročena tahová pevnost výztuže. Rozhodujícím faktorem pro celkové selhání prvku je tak pevnost výztuže a její průřezová plocha [51].

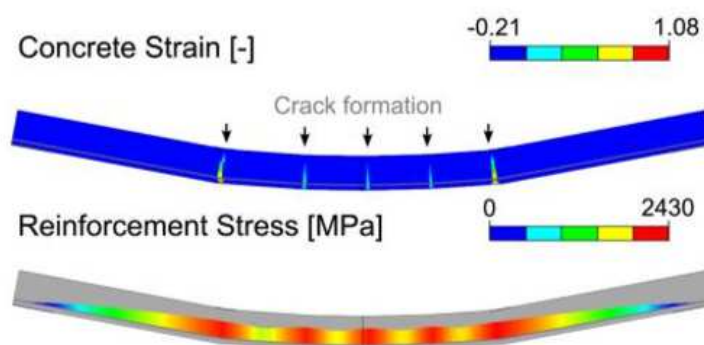


Obr. 31 Chování TRC desek při zkoušce čtyřbodovým ohybem, závislost zatížení na průhybu uprostřed rozpětí [50] (zkouška řízena deformací)

po vzniku první trhliny



při porušení

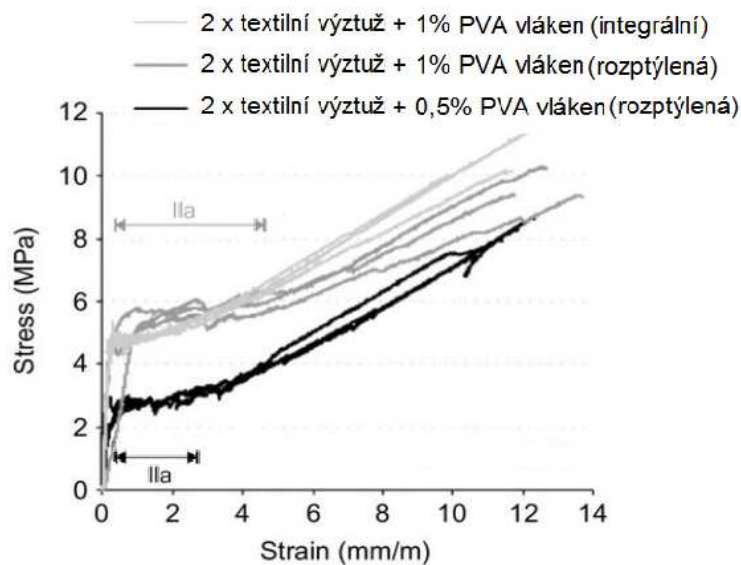


Obr. 32 FE (numerický) model selhání desky TRC se soustřednou výztuží ve formě skleněných textilních vláken [50]

2.6. TRC s přidáním krátkých vláken (ohybová zkouška)

Obecně řečeno, TRC vykazuje příznivé chování při vyvolaném namáhání a také vysokou zatížitelnost a tažnost při poměrně velkých nepružných deformacích, které jsou výsledkem vytvoření a otevření značné řady jemných trhlin [52]. Tyto výrazné deformace jsou zásadní z hlediska strukturální bezpečnosti. Existují dva zásadní problémy související s vysokým napětím dosaženým pouze při velkých deformacích. Za prvé, konstrukční únosnost při zohlednění 2. MS (MSP) je mnohem menší než před porušením (MPÚ), za druhé, při vyztužení textilní výztuží ve formě soustředných prutů, tato výztuž přispívá jen velmi málo k celkové únosnosti právě do vzniku prvních trhlin. Z těchto dvou důvodů plyne jasný závěr, že první trhliny v konstrukci jsou rozhodujícím parametrem pro návrh prvků z TRC, ať už fasádních desek či celých konstrukcí.

Tvary křivky napětí a deformace TRC při zatížení v tahu za ohybu se značně liší v závislosti na kvalitě a množství použité textilní výztuže. Se zvyšujícím se obsahem, případně se zvyšující se jemností textilní výztuže se síla přenášená celým kompozitem TRC zvyšuje, zatímco kapacita deformace (deformace při poruše) klesá [53]. Důležitou roli hraje rovněž vliv různých impregnačních materiálů aplikovaných na výztuže [54][55]. Tvar deformační křivky lze výrazně ovlivnit rovněž přidáním krátkých vláken do betonové matrice, tento vliv je prezentován na Obr. 33. Rozptýlená vlákna v matrici výrazně ovlivňují kapacitu únosnosti TRC před vznikem prvních trhlin a také následné chování kompozitu.



Obr. 33 Diagram chování TRC bez a s přidanou rozptýlenou výztuží v podobě krátkých drátků (uhlík, sklo, PVA) při zkoušce ohybem [54][55]

Přínos krátkých, jemných, dobře rozptýlených vláken v betonové matici je především v jejich neutralizaci vzniku mikrotrhlin a případně v následující fázi také v omezení jejich rozvoje. Spojování mikrotrhlin v makrotrhlinu je tedy zpožděno a je rovněž zapotřebí vyššího zatížení pro jejich otevření. Jinak řečeno, pevnost v tahu kompozitu ve fázi před prasknutím je přítomností krátkých vláken zlepšena. Úroveň zlepšení záleží na vlastnostech vláken (typ, poměr rozměrů, objemový podíl aj.). Krátká vlákna rovněž vedou k prevenci křehkého selhání betonu. Na uvedeném grafu (Obr. 33) je zobrazeno chování desek TRC vyztužených krátkými vlákny rozptýlenými i integrálními (shluky vláken se stejnou orientací) při současném vložení dvou vrstev 2D sítě z AR-Glass. Na základě provedených zkoušek a sestavených grafů platí [54][55]:

- Napětí při vzniku první trhliny se výrazně zvýšilo (o více než dvojnásobek) přidáním 1 % objemu krátkých PVA, nebo skleněných vláken či uhlíkových vláken. Při přidání nižších či vyšších objemových procent není přínos krátkých vláken již výrazný.
- Pro všechny typy krátkých rozptýlených vláken platí, že vzniká vyšší počet trhlin, ale výrazně menších, rovněž u všech typů krátkých vláken byla výrazně rozšířena deformační oblast (v grafu označena jako IIa). Bylo také zjištěno, že rozptýlená vlákna jsou lepší než vlákna integrální.
- Všechny typy krátkých vláken rovněž zlepšily vazbu mezi 2D sítí a samotnou betonovou maticí.

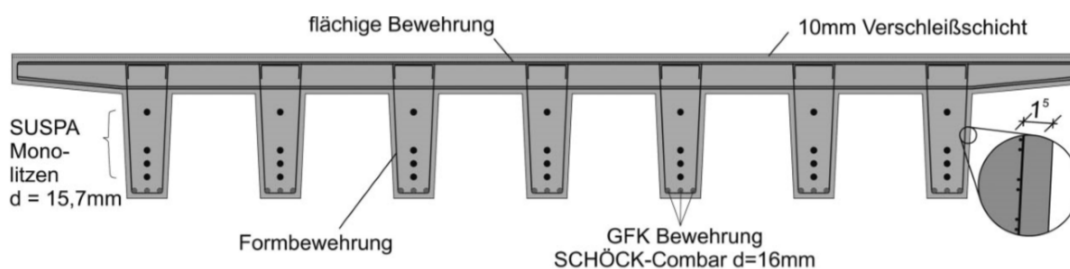
Neméně významný je i přínos krátkých vláken s ohledem na kontrolu vzniku smršťovacích trhlin. Například je uváděno, že užitím 1 % objemu polypropylenových vláken dojde k omezení plastického smrštění až o 30 % [56]. Přínos krátkých vláken spočívá i v omezení delaminace textilní výztuže z betonové matrice. Výskyt delaminace se zvyšuje s tuhostí použité textilie, velmi malým krytím textilní výztuže, vysokou úrovní deformace, aplikací příliš mnoha vrstev výztuže a následným špatným probetonováním, případně také nevhodným zatěžovacím režimem. Výraznou nevýhodou přidáním krátkých vláken všech druhů však je výrazně zhoršená zpracovatelnost směsi. Jedním z důvodů zhoršení zpracovatelnosti je i fakt, že jemná vlákna zvyšují spotřebu vody a při vyšších koncentracích brání zatečení matrice. Tento efekt nelze při návrhu matrice opomenout.

2.7. Realizace konstrukcí a prvků z TRC ve světě a u nás

Vzhledem k současné stavební situaci, rychlému rozvoji nových materiálů nelze zmínit všechny postavené nebo právě stavěné konstrukce a aplikace z TRC. Proto se zastavím jen u těch nejvýznamnějších ve světě a u nás.

Albstadt-Lautlingen – most (lávka) pro pěší

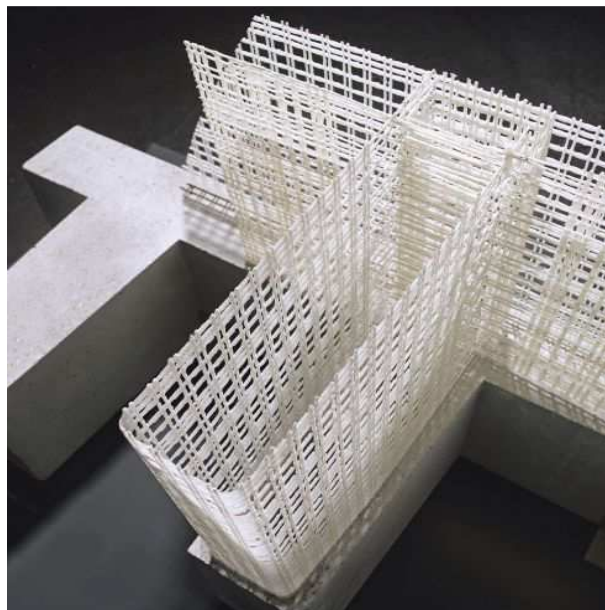
Rozhodně nejvýznamnější realizací z TRC je most (lávka) pro pěší v Albstadt-Lautlingen. Nový most byl postaven v místě původního železobetonového z 50. až 60. let 20. století, který se nacházel v havarijním stavu. Nový most byl postaven v roce 2010 (Obr. 35), studii proveditelnosti připravila RWTH Aachen (Rheinisch-Westfaelische Technische Hochschule). Most (lávka pro pěší) byl postaven firmou Groz-Beckert. Město Albstadt zaplatilo za most jen cenu standardního řešení, další náklady šly za firmou Groz-Beckert. Ta se rozhodla, místo běžného řešení (železobetonová konstrukce) zhotovit stavbu za pomoci textilní výztuže (alkalivzodrného skla) uspořádaného do mřížky o maximální velikosti ok 15/15 mm (Obr. 36, Obr. 37). Tato mřížka byla impregnována epoxidovou pryskyřicí, která zaručuje vysokou odolnost skleněných vláken, zlepšuje tvarovou stabilitu při betonáži a také zajišťuje spolupůsobení celého provazce (rovingu) při přenosu zatížení. Za účelem dosažení dobrého probetonování byla použita jemnozrnná betonová matrice typu C 55/67 s velikostí zrn do 4 mm bez drátků. Most v Albstadtu se skládá z 6 ti polí (krajní pole 17,2 m, zbylá pole 16,1 m nebo 11,8 m) a s celkovou délkou 97 m a šířkou 3,21 m je v současnosti největší realizací TRC ve světě. Konstrukční výška mostu je pouze 435 mm, kdy díky použití textilní výztuže bylo možné krytí snížit až na cca 15 mm. Textilní výztuž primárně zachycuje účinky posouvajících (smykových) sil v průřezu a je dále doplněna monostredy $d = 15,7$ mm pro podélné předpětí a klasickou betonářskou výztuží $\varnothing 16$ mm ve stojinách při dolním povrchu myšlených T průřezů (Obr. 34). Most váží přibližně polovinu než srovnatelný most postavený z železobetonu.



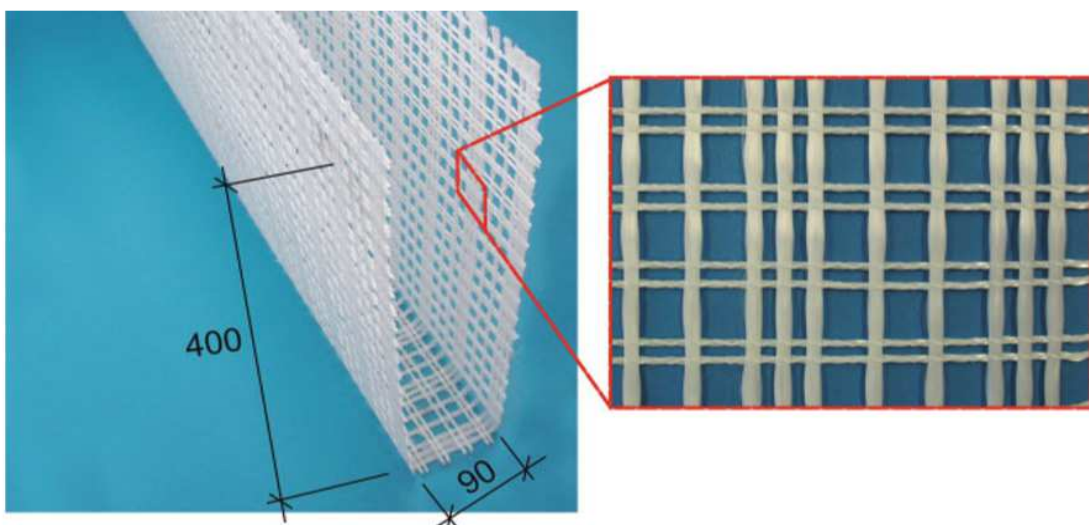
Obr. 34 Příčný řez betonovou konstrukcí lávky [2]



Obr. 35 Pohled na realizovaný most pro pěší v Albstadt-Lautlingen [2]



Obr. 36 Uspořádání 3D skleněné výztuže lávky v Albstadtu, T průřez [2]



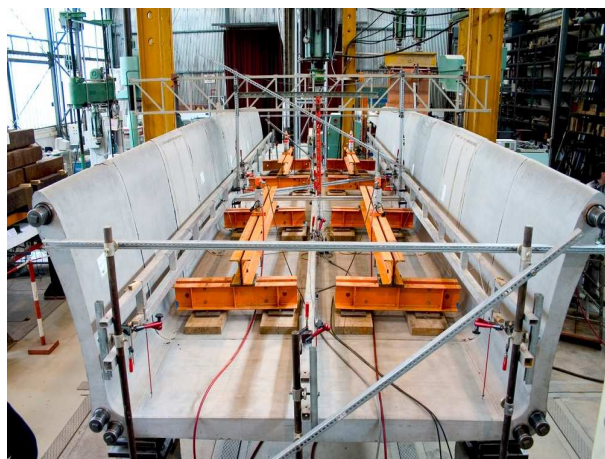
Obr. 37 Skleněná 3D výztuž potažená a impregnována epoxidovou pryskyřicí [2]

Most pro pěší v Oschatzi

Dalším příkladem konstrukce z textilního betonu je most (lávka) pro pěší v Oschatzi (Obr. 38). Tato lávka byla zhotovena v roce 2006 na základě návrhu TU Dresden, Institut für Massivbau im Rahmen (ústav betonových konstrukcí) a má tvar písmene U. Tento most je dlouhý 9 m, 2,52 m široký a má konstrukční výšku 1,24 m. Skládá se z 10ti betonových segmentů z betonu třídy C 55/67, kde každý má délku 0,9 m. Tyto segmenty byly vyrobeny jako prefabrikáty z jemnozrnné betonové matrice se zrny do velikosti 4 mm bez ocelových drátků a textilní skleněné výztuže a následně v podélném směru předpjaty (spojeny) 6ti monostrendy (Obr. 39). Tloušťka stěn a desky je pouze 6 cm a oproti uvažované konvenční variantě je cca 5 x lehčí (celá konstrukce má vlastní hmotnost pouze cca 5 tun a spolehlivě přenesne 7,5 násobně větší rovnoměrné zatížení). Jako textilní výztuž byly použity svazky skelných vláken o ploše 0,25 až 1,0 mm² s jemností 2400 TEX.



Obr. 38 Pohled na realizovaný most pro pěší v Oschatzi [2]



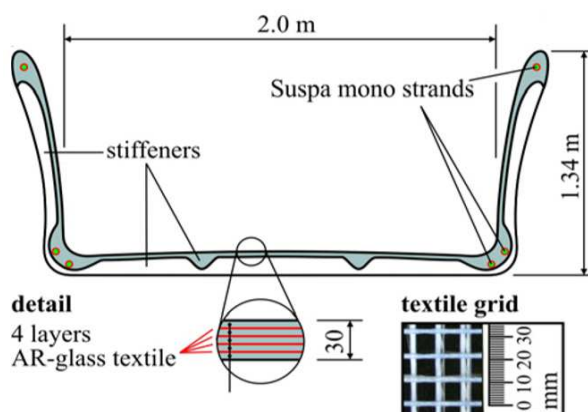
Obr. 39 Pohled na deset prefabrikovaných dílců spojených 6ti monostrendy [57]

Lávka v Kemptenu přes řeku Rottach

Tato lávka je inspirována již zmíněnou lávkou v Oschatzi, má podobný tvar, je však výrazně delší. Lávka byla dokončena v roce 2007 (Obr. 40), má rozpětí 17 m a skládá se z 18 segmentů [58]. Konstrukční výška je jen 1,34 m. Volná šířka mostu je cca 2 m. Na realizaci projektu se podílela opět TU Dresden. Dno lávky je vyztuženo 4mi vrstvami skleněné textilní výztuže a dosahuje tloušťky jen 30 mm, příčný řez lávky je na Obr. 41. Betonáž byla provedena pomocí velmi jemnozrnné betonové matrice s maximální velikostí zrn 2 mm. Navržený beton byl vzhledem k větším rozponům třídy C 60/75 bez ocelových drátků. Oka výztužné sítě jsou pouze 10/10 mm. Zhotovené dílčí segmenty jsou k sobě lepeny ve styčných spárách a následně podélně předepruty 6ti monostrendy. Celá konstrukce vyšla cenově jako by se jednalo o standartní konstrukci z železobetonu. Všechny segmenty byly zkompletovány ještě ve výrobě, následně dopraveny na místo a během několika hodin osazeny do potřebné polohy. Vzhledem k faktu, že posuzování textilního betonu podléhá individuálnímu posouzení, byl na tuto lávku kladen požadavek přenosu 3,5 násobku běžného provozního zatížení.



Obr. 40 Pohled na probíhající montáž lávky



Obr. 41 Příčný řez lávky v Kemptenu [3]

Lávka pro pěší v obci Čeperka – zábradelní výplň z UHPC/TRC

Tato konstrukce je významná hned z několika pohledů. Především se jedná o jednu z prvních realizací konstrukce z UHPC (beton 110/130, XC4, XF3) v ČR, za další pak na zábradelní výplně této lávky byl použit kompozit ve složení UHPC v kombinaci se skleněnou textilní výztuží. Tato výplň nahradila původně zamýšlenou variantu ocelového zábradlí, která byla následně přepracována ve variantě plné desky, avšak pro svoji hmotnost (cca 70 kg) bylo nutné najít odlišné řešení, a to právě tenké desky vylehčené otvory a vyztužené lehkou textilní skleněnou výztuží. Celý proces výroby zábradelních výplní byl velmi komplexní, protože vzhledem k nutnosti dodržet přesně dané barevné odstíny, bylo nutné jednotlivé složky navažovat s přesností na gramy (tj. na laboratorních vahách) a vše míchat v míchačce s nuceným oběhem M250. Promíchaná směs byla ukládána do forem s již připravenou výztužnou sítí, která byla tvořena skleněnou 2D textilií s jemností 2400 TEX a s osovou roztečí ok 20/20 mm. Vzhledem ke tvaru formy byla výztužná textilie rozepravena a zakotvena pomocí podélných úhelníků na krajích formy. Při samotné betonáži nebylo užito žádných vibrací, čerstvé UHPC se nechalo volně rozlévat na povrchu formy a pouze bylo uhlazeno ocelovým hladítkem. Postup betonáže je nejlépe zachycen na fotografii (Obr. 42). Výsledný segment zábradelní výplně po odformování je dobře patrný na přiloženém obrázku (Obr. 43). Celková tloušťka panelů je pouze 33 mm. Použitá skleněná textilní rohož zde plní hned dvě funkce, přispívá k celkové únosnosti výplně a především také zabraňuje, aby v případě destrukce zábradlí jeho části odpadávaly. Zkoušený zábradelní panel prošel statickou i dynamickou zkouškou s následujícím hodnocením: *[59] zkoušený panel dosáhl při statické zkoušce únosnosti cca 260 % požadovaného zatížení (4,50 kN) a postupné přírůstky deformací byly až do porušení víceméně lineární. Dynamická zkouška tohoto panelu dopadla také pozitivně. Byla provedena dle [61], avšak opět bylo nutné přistoupit k její drobné modifikaci, aby bylo možné její snadné provedení. Předmětem této dynamické zkoušky jsou dvě kyvadlové rázové zkoušky – náraz měkkým tělesem o hmotnosti 50 kg (pytel naplněný skleněnými kuličkami o průměru 3 mm) a tvrdým tělesem (ocelová koule o hmotnosti 3 kg). Požadavky normy byly splněny – žádná část výplňového panelu se nezlomila a ani neoddělila, ačkoliv zde byly patrné trhliny přes celou tloušťku průřezu po nárazu měkkého tělesa.*



Obr. 42 Výroba vylehčených zábradelních panelů u TRC [59][60]



Obr. 43 Vylehčený panel z TRC s výztužnou sítí po odbednění [59][60]

Fasádní panely

Velkou a významnou skupinou aplikací TRC jsou fasádní panely a desky. Tyto desky jsou dnes již běžně vyráběny a nesou různá obchodní označení. Hlavní doménou těchto desek je faktická úspora materiálu při významné redukci hmotnosti výsledného prvku, což se kladně projevuje především při dnešním pohledu na energetickou náročnost staveb a výrobě prvků, které se při stavbě používají. Je kladen důraz i na tzv. environmentální porovnání. Jeho principem je úvaha: [64] *veškerá lidská činnost určitým způsobem ovlivňuje životní prostředí, ať už negativně, či pozitivně. Z hlediska udržitelného vývoje je potřeba sledovat zejména negativní environmentální dopady. Patří sem spotřeba nerostných a neobnovitelných energetických i materiálových surovin, produkce atmosférických emisí, znečišťování vody a půdy, produkce odpadů apod. Významnou část těchto dopadů má na svědomí stavební průmysl a výstavba budov. Dle organizace UNEP-SBCI (United Nation's Environment Program's Sustainable*

Building and Climate Initiative) [65] je stavebnictví zodpovědné přibližně za 40 % celkové spotřeby energie, 25 % spotřeby vody, 40 % spotřeby zdrojů a produkuje přibližně třetinu skleníkových plynů. Významnou součástí stavebního průmyslu tvoří průmysl betonářský, jeho environmentální dopady jsou významné především z důvodu množství emisí skleníkových plynů produkovaných při výrobě cementu a nemožnost výstavby dostatečně subtilních konstrukcí (čím větší hmotnost konstrukce, tím vyšší dopady). S betonářským průmyslem úzce souvisí i průmysl ocelářský produkující betonářskou výztuž. Její výroba je velmi energeticky náročná a významně zhoršuje celkové environmentální parametry železobetonových konstrukcí. Z tohoto důvodu se ve světě již delší dobu vyvíjejí náhrady za ocelářskou výztuž. Jednou z možných náhrad jsou právě textilní výztuže. Environmentální výhody betonových prvků vyztužených textilní výztuží byly prokázány například v komparativní studii posuzování životního cyklu LCA [66] fasádních betonových desek (betoShell). Studie porovnávala environmentální vlastnosti fasády z betonových desek s běžnou výztuží (tl. 140 mm) a desek s nekonvenční textilní výztuží ze skelných vláken (tloušťky 20 mm). Výsledky ukázaly, že desky, využívající textilní výztuž, mají výrazně nižší dopady na životní prostředí. Hlavním důvodem je především nižší hmotnost desek, umožněná právě nekonvenční výztuží. Ta pak souvisí s menším množstvím spotřebovaného materiálu (tj. nižší spotřeba neobnovitelných zdrojů surovin), což je také významný znak environmentální šetrnosti.

Za všechny druhy a typy desek z TRC bych i právě proto rád uvedl hojně používané desky s obchodním názvem betoShell®CLASSIC, které se vyrábějí do rozměrů 1 200 x 600 mm, desky betoShell®BIG do rozměru 2 400 x 1 200 mm a desky betoShell®SANDWICH (dříve XXL) dokonce do rozměrů 6 000 x 3 000 mm. Žádná z těchto desek však nepřesahuje tloušťky 30 mm, u menších rozměrů se běžně jedná o pouze 20 mm. Tyto desky byly použity například na fasádě RWTH Aachen a vyrábí je firma Hering [62]. Jako výztuž je zde využíváno dvou planparalelních vrstev 2D výztuží z AR skla o jemnosti 1200 až 2400 TEX, které jsou ve vzdálenosti 10 mm a jsou spojeny pevnou strukturou. Na tyto paralelní textilie je použito epoxidového coatingu, který je ve vzájemné poloze fixuje. Firma Hering využívá především skleněných a dnes již i karbonových výztuží dodávaných firmou V. Frass s obchodním názvem SITgrid® [63]. Při použití dnešních technologií pak není problematické tvarovat textilie, potažmo výsledné komponenty do různých tvarů (Obr. 44).



Obr. 44 Betonový panel (roh) s výztuží SITgrid® ve dvou paralelních vrstvách [63]

Referenčních staveb, u kterých bylo použito fasádních desek z TRC, je více. Za ty nejznámější mohu uvést například následující [64]. Přibližně 10 000 m² fasádních desek z TRC bylo použito na konstrukci fasády budovy ROC Leiden Community College v Holandsku (Obr. 45). Přibližně 1 100 m² desek z TRC bylo použito na fasádě fakulty stavební TU Dresden (Obr. 46) a také na fasádě RWTH Aachen (Obr. 47), jakožto organizací, které se staly průkopníky v aplikacích TRC.



Obr. 45 Fasádní panely z TRC betonShell®BIG s rozměry až 2400 x 1200 mm, ROC Leiden Community College [64]



Obr. 46 Fasádní panely z TRC betonShell®BIG s rozměry až 2400 x 1200 mm, TU
Dresden [64]



Obr. 47 Fasádní panely z TRC betonShell®XXL s rozměry až 6000 x 3000 mm, RWTH
Aachen [64]

V neposlední řadě bych rád zmínil ještě jednu realizaci fasády za pomocí panelů z TRC. Jedná se o fasádu objektu Malmö Live Kontor. Při této realizaci byl naplno využit potenciál TRC. Jako betonová matrice bylo zvoleno velmi jemnozrnné UHPC (maximální velikost zrn kameniva byla jen 1,6 mm) s vysokým obsahem cementu (650 kg/m³ směsi). Fasáda objektu Malmö Live Konto je velmi členitá (Obr. 48), kdy však fasádní panely byly použity pouze jako obklad přízemí. Zde navržené panely z TRC vynikají svoji tloušťkou, která je pouze 15 mm, jsou vyztuženy rozptýlenými PVA vlákny a doplněny textilní skleněnou 2D rohoží s jemností 2400 TEX a rozměry ok 20/20 mm. Další devízou je použití bílého cementu, tzn. výsledný odstín panelů (velmi světle šedá až bílá) koresponduje se zbytkem fasády, čehož je dosaženo rovněž přidáním vápence a

132 kg TiO_2 (oxid titaničitý, titanová běloba). Při doprovodných zkouškách bylo stanoveno, že pevnost betonu v tlaku těchto desek je skoro 100 MPa, pevnost v tahu za ohybu cca 20 MPa. Projekt realizoval závod LOP (Skanska), kdy veškerá výroba panelů byla provedena v ČR, výsledný výrobek byl pak vcelku transportován do Švédska. Podrobněji se zkouškám těchto panelů i jejich matici budu věnovat v experimentální části práce, neboť Kloknerův ústav některé fragmenty této realizované fasády zkoušel, posuzoval a danou matici spolunavrhoval [67].



Obr. 48 Fasádní panely z TRC Malmö Live Kontor [64]

3. Experimentální část – TRC matrice

V rámci experimentální části dizertační práce bylo vytipováno, navrženo a ověřeno několik typů receptur vyvinutých v Kloknerově ústavu. Jejich složení stejně tak jako zkoušky samotné čerstvé směsi a následné mechanické zkoušky pevnosti v tlaku, tahu za ohybu či modulu pružnosti jsou shrnuty v následujících kapitolách. V rámci zkoušek vhodných receptur bylo rovněž ověřeno smrštění při uložení ve vodě, v 95% vlhkosti, na vzduchu a vliv rozměrového efektu na pevnosti vzorků.

3.1. Složení matrice – návrh receptury

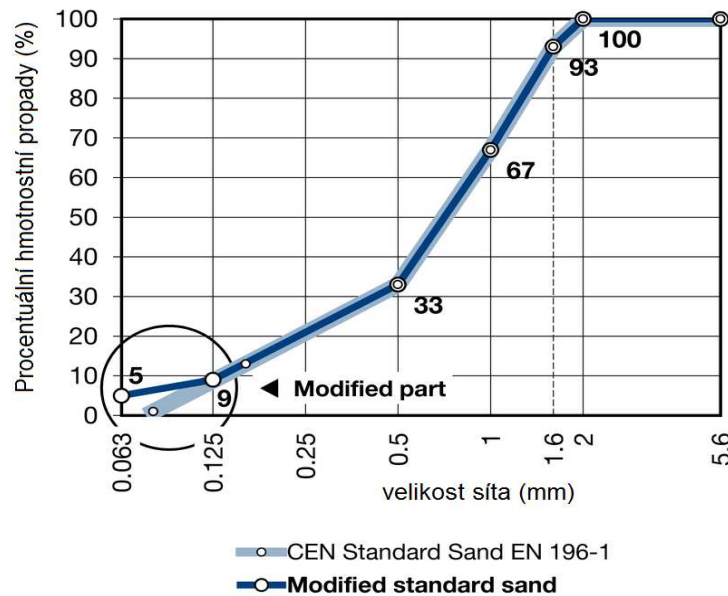
Při návrhu receptury pro TRC prvky bylo přihlédnuto k dlouholetým zkušenostem Kloknerova ústavu [15][68][86] s problematikou vysokopevnostních/vysokohodnotných (HSC/HPC), velmi vysokohodnotných (VHPC) a ultra vysokohodnotných betonů (UHPC). Pro pilotní zkoušky byly vybrány celkem tři receptury UHPC (207, 132, 321), které byly mírně modifikovány z důvodu absence ocelových drátků. Pro srovnávací testy také jedna receptura UHPC s kovovými drátky (445). Důležitými faktory při přípravě čerstvé směsi jsou technologická kázeň, přesnost dávkování, vlhkost kameniva, rychlost a doba míšení. Dílčí poměry jednotlivých složek případně konkrétní váhová množství nelze uvést. Jakožto zpracovateli dizertační práce jsou mi však známa. V Tab. 11 jsou v položkách uvedeny názvy složek bez bližší specifikace (výrobce, šarže, typu aj.).

Tab. 11 Orientační složení jednotlivých receptur uvažovaných pro prvky TRC

Číslo receptury	Kamenivo PR 30	Kamenivo PR 33	Kamenivo PR 504	Normový písek	Cem II/A-S 42,5R	Drátky	Mikro-silika	Struska	Mletý křemen	Popílek	Super-plastifikátor	Voda
207	x	x	-	-	x	-	x	x	-	-	x	x
132	-	-	x	-	x	-	x	x	x	x	x	x
321	-	-	-	x	x	-	x	x	-	-	x	x
445	x	-	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x

Při výrobě všech zkušebních receptur byl použit cement CEM II/A-S 42,5, který vyhovuje platným předpisům, tj. ČSN EN 197-1 [69]. Jeho dávka je oproti běžným betonům však řádově 2 x vyšší. Jako kamenivo bylo použito tříděných písků z pevných hornin s regulovanou křivkou zrnitosti tak, aby bylo možné dosáhnout minimální mezerovitosti. Použité kamenivo PR 30, PR 33 a PR 504 splňuje požadavky

ČSN EN 12620+A1 [70], v případě receptury 321 se jedná o normový písek dle standardu CEN EN 196-1 [71]. Křivka zrnitosti tohoto písku je zobrazena na Obr. 49.



Obr. 49 Křivka zrnitosti normalizovaného písku dle CEN EN 196-1 [72]

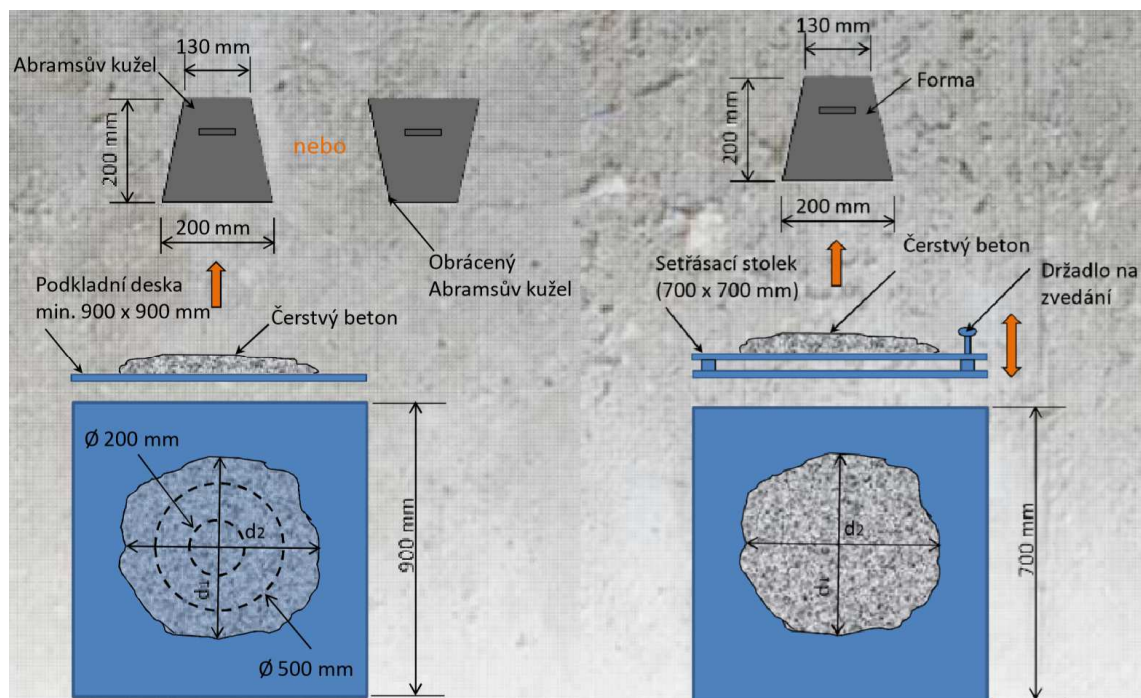
Další složkou jsou příměsi ve formě velmi jemnozrnného anorganického práškového materiálu s maximální velikostí zrn do 0,25 mm. Jejich úkolem je v rámci granulometrické skladby zajistit maximální hutnost a minimalizovat mezerovitost. Ovlivňují také reologické vlastnosti čerstvé směsi. Dle ČSN EN 206 [12] se příměsi dělí na dva typy. Typ I jsou inertní příměsi, tj. mletý křemen či kamenná moučka. Typ II jsou latentně hydraulické příměsi (popílek či křemičitý úlet), které se podílejí na procesu hydratace. Jejich dávkování plyne z návrhu a optimalizace receptury. Posledním důležitým článkem pak je samotná záměsová voda. Vzhledem k její výrazné redukci byla užita plastifikační přísada, která pomáhá nahradit část vody v procesu hydratace a výraznou měrou přispívá k vhodné zpracovatelnosti, avšak na úkor provzdušnění směsi.

V případě receptury 445 jsou přidána rovněž ocelová vlákna v řádu jednotek procent. Jedná o ocelová mikroválka dle ČSN EN 14889-1 [73] s průměrem do 0,3 mm v délce 20 mm (štíhlostní poměr 60 a více). Alternativně lze užít i vlákna na bázi PVA, avšak zde je nutné vždy ověřit jejich přínos testem. Vedlejším aspektem může totiž být snížení výsledné pevnosti či modulu pružnosti.

3.2. Zkoušky čerstvé betonové směsi

Testy zpracovatelnosti byly uvažovány dle postupů popsanych v kap. 2.1.2. Vzhledem k charakteru TRC potažmo UHPC je použití klasické zkoušky sednutím kužele zcela nevhodné. Charakter všech použitých směsí odpovídá svoji konzistencí betonu typu SCC, avšak s menší viskozitou. Pro ověření vlastností byly použity zkoušky rozlíváním, sednutí rozlíváním a pomocí Hagermanova kužele, který je primárně určen pro zkoušení zpracovatelnosti čerstvých malt dle EN 1015-3 [14].

Při zkoušce sednutí rozlíváním bylo zjištěno, že receptury 207, 132 a 321 splňují požadavek na třídu SF 2. Rozlívání měřené ve dvou na sebe kolmých směrech dosahovalo 680 až 710 mm, rovněž byl splněn doplňkový požadavek T500 v kategorii VS 1, tj. k rozlívání na hranici 500 mm došlo do 2 s. Uspořádání zkoušky sednutí rozlíváním je znázorněno na Obr. 50. Přesný popis zkoušky včetně nutných zkušebních zařízení je obsažen v ČSN EN 12350-8 [13]. Rovněž byla provedena zkouška rozlíváním (Obr. 50). Výsledek zkoušky byl následující. U receptur 207 a 321 výsledné rozlívání větší než 700 mm značí třídu F7, tj. svým charakterem se jedná o matrice samozhutnitelné a velmi tekuté. U receptury 132 bylo dosaženo třídy F6 (670 mm), jedná se o směs velmi tekutou. Menší rozlívání lze přisoudit větším zrnům obsaženým v použitém kamenivu. Zkouška rozlíváním proběhla dle normy ČSN EN 12350-5 [74].



Obr. 50 Princip zkoušky sednutí rozlíváním vlevo a zkoušky rozlíváním vpravo [75]

Pro ověření receptur byl také používán Hagermanův kužel, kdy výsledky jednotlivých receptur leží v rozmezí 250 až 350 mm. Pro tuto zkoušku však není možné provést operativní zhodnocení. Zkouška totiž není pro zkoušení betonových matric normována, jedná se tedy spíše o zkoušku orientační a její vyhodnocení záleží na zkušenostech pracovníka, který zkoušku provádí.

3.3. Zkoušky vybraných mechanických vlastností

Z receptur 321, 207, 132 a 445 byly vyrobeny zkušební trámečky o rozměrech 40/40/160 mm, na kterých byly zkoušeny mechanické vlastnosti betonu po 28 dnech od výroby. Zkouška trámečků o rozměrech 40/40/160 mm není pro beton normována, ale pro ověření dílčích vlastností je dostatečně vypovídající. Na skutečných prvcích a konstrukcích o výrazně větších rozměrech se však projevují účinky rozměrového efektu [76][77][78]. V rámci ověření vlastností vybraných receptur byly provedeny zkoušky pevnosti v tlaku, v tahu za ohybu a zkouška statického modulu pružnosti.

Postup zkoušky v tlaku odpovídal ČSN EN 12390-3 [79]. Vzorek byl změřen, zvážen a vložen do zkušebního stroje. Síla byla zvyšována rovnoměrně rychlostí 0,5 MPa/s až do porušení. Ze získané síly byla vyhodnocena pevnost dle Rov. 1.

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad \text{Rov. 1}$$

kde:

f_c	pevnost v tlaku [MPa]
F	maximální tlaková síla při porušení [N]
A_c	plocha zkoušeného betonu [mm ²]

Dalším sledovaným parametrem byla pevnost v tahu za ohybu. S ohledem na jemnozrnnost matrice byla zkouška provedena na malých trámečcích pro testování cementu dle ČSN EN 196-1 [71]. Uspořádání zkoušky odpovídalo trojbodovému ohybu se vzdáleností podpor $L = 0,1$ m a silou F působící uprostřed rozpětí. Zkouška byla řízena rovnoměrným nárůstem síly o velikosti 200 N/s a pevnost v tahu za ohybu lze vypočítat z Rov. 2. Nutno podotknout, že pevnosti na malých trámečcích mohou vykazovat 1,5 až 2 násobné hodnoty pevnosti ve srovnání s trámcí 150/150/700 mm s vrubem zkoušenými dle ČSN EN 14651+A1 [80].

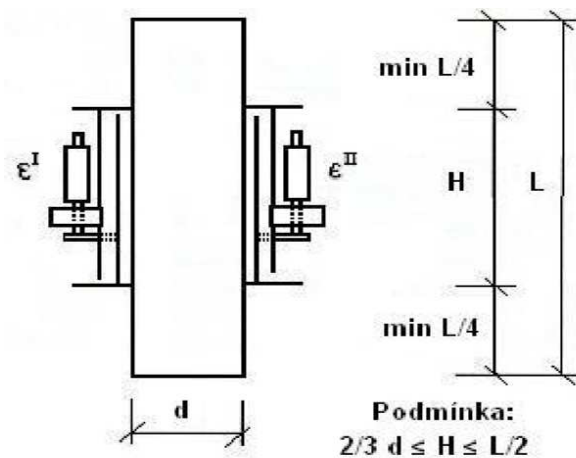
$$f_{cf} = \frac{M}{W} = \frac{3 \cdot F \cdot l}{2 \cdot b \cdot h^2}$$

Rov. 2

kde:

f_{cf}	pevnost v tahu za ohybu [kPa]
M	ohybový moment [kNm]
W	modul průřezu [m ³]
F	maximální síla při porušení [kN]
l	vzdálenost podpor [m]
b	šířka průřezu [m]
h	výška průřezu [m]

Poslední provedenou zkouškou mechanických vlastností bylo stanovení statického modulu pružnosti v tlaku. Zkouška byla provedena na hranolech s poměrem délky k průměru ($L/d = 4$). Stanovený modul pružnosti je sečnový (těživový) a vypočítá se dle Rov. 3. Zkoušky byly provedeny dle dnes již neplatné ČSN ISO 6784 [81], kterou nahradila ČSN ISO 1920-10 [82]. Na vzorek umístěný ve zkušební lisu jsou osazena měřidla, vždy na dvě protilehlé strany, ne však blíže než $\frac{1}{4}$ velikosti vzorku od jeho okraje (Obr. 51), protože v oblastech tlačných desek by mohlo dojít k ovlivnění zkoušky. Měřidlem je například mechanický tenzometr (extenzometr) nebo přesný digitální číselníkový úchylkoměr či tenzometr nalepený na vzorek.



Obr. 51 Osazení dvou protilehlých měřidel na zkušební vzorek při zkoušce statického modulu pružnosti v tlaku [83]

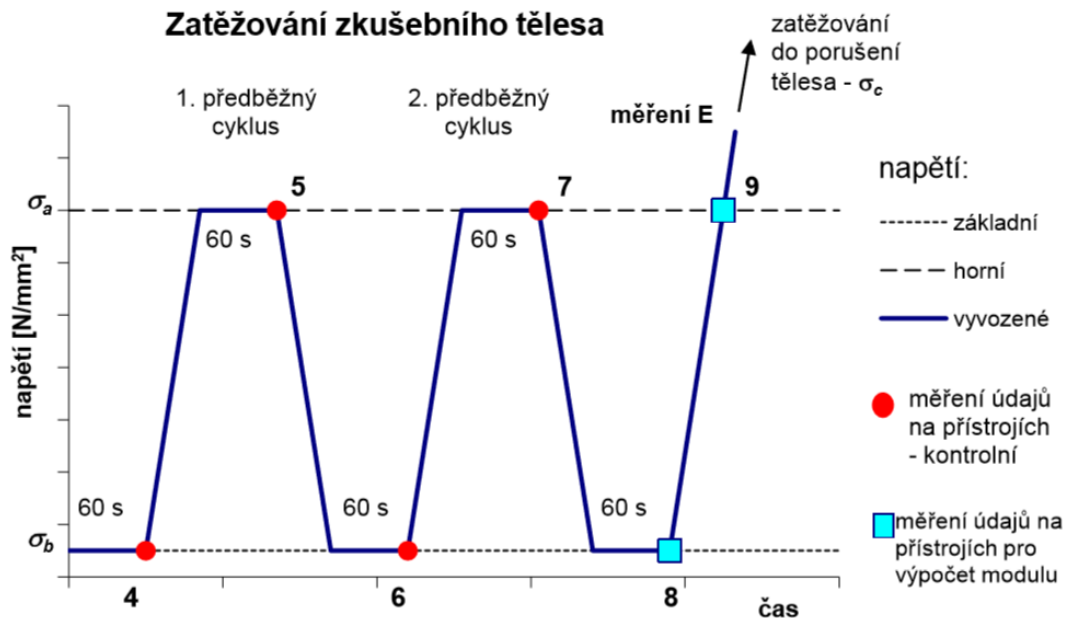
$$E_c = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_a - \sigma_b}{\varepsilon_a - \varepsilon_b}$$

Rov. 3

kde:

E_c	modul pružnosti betonu [GPa]
$\Delta\sigma$	rozdíl napětí mezi horní a dolní úrovní [MPa]
$\Delta\varepsilon$	poměrná deformace [-]
σ_a, σ_b	horní úroveň napětí, dolní úroveň napětí [MPa]
$\varepsilon_a, \varepsilon_b$	poměrná deformace při horní a dolní úrovni napětí [-]

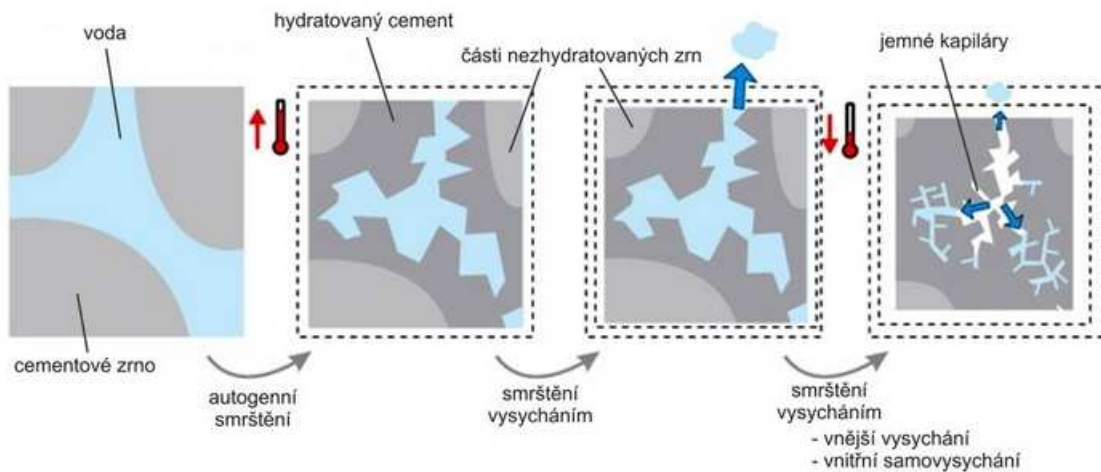
Po osazení měřidel je vzorek zatížen na hodnotu odpovídající 0,5 MPa, kde se jedná o tzv. základní napětí. Následně probíhá ověření centrování ve dvou cyklech s průběžným odečtem hodnot. Horní úroveň napětí je $\frac{1}{3}$ pevnosti betonu f_c , která byla stanovena na základě provedených zkoušek v tlaku. Rychlost zatěžování odpovídá hodnotě $0,6 \pm 0,4$ MPa. Každý úsek zkoušky trvá právě 60 s. Po druhém cyklu se ověří centraxe vzorku, tj. rozdíl deformací na dvou protilehlých měřidlech. Pokud je zjištěn rozdíl 20 % a větší, provede se odtížení a upraví se poloha vzorku. Pokud centraxe proběhla v pořádku, ve třetím stupni jsou odečteny hodnoty dolních a horních hodnot přetvoření při daném napětí a následně je možné vzorek ověřit také destruktivně. Princip zkoušky je dobře znázorněn na Obr. 52.



Obr. 52 Znázornění průběhu zkoušky statického modulu pružnosti [83]

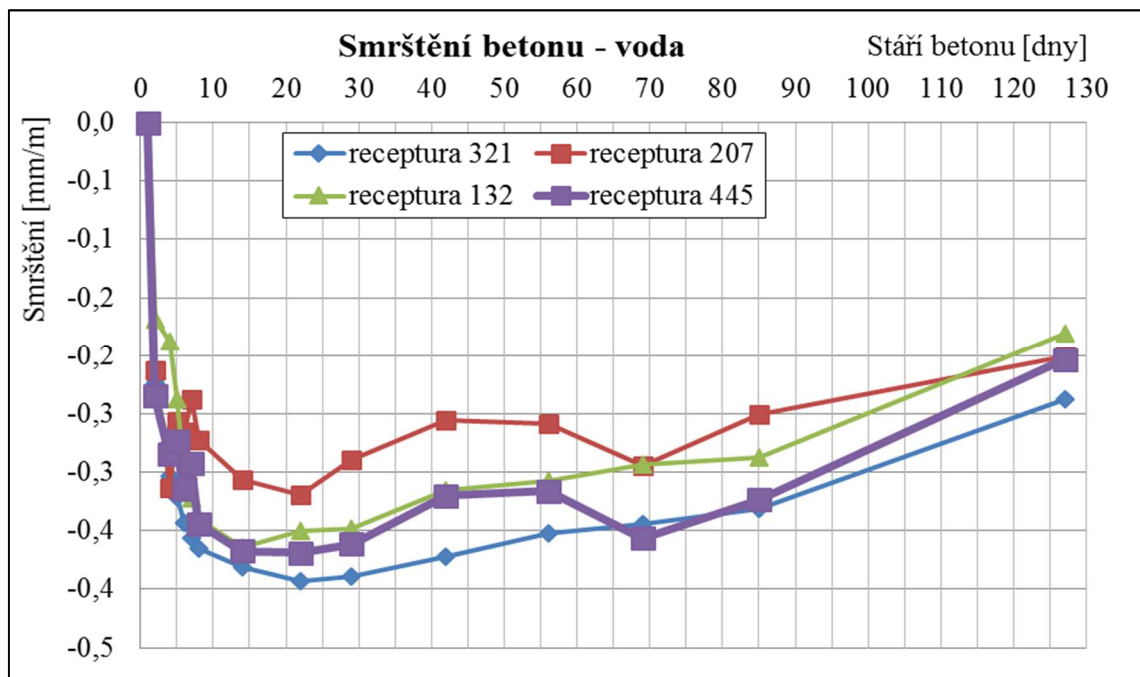
3.4. Ověření smrštění (voda, vzduch, 95% vlhkost)

Na všech recepturách byla provedena také zkouška smrštění na trámečcích 40/40/160 mm. Porovnány byly tři varianty uložení vzorků. První varianta předpokládá, že druhý den ihned po odformování jsou vzorky uloženy ve vodě. Druhá sada v 95% vlhkosti a poslední sada byla ponechána na vzduchu. Měření smrštění proběhlo ve dnech 1, 2, 4, 5, 6, 7, 8, 14, 22, 29, 42, 56, 69, 85 a 127. Změřené hodnoty byly přepočteny na 1 m délky. Měření probíhalo pomocí dilatometrické zkoušky postupem dle ČSN 73 1320 [84]. Princip smrštění a jeho procesy jsou znázorněny na Obr. 53.

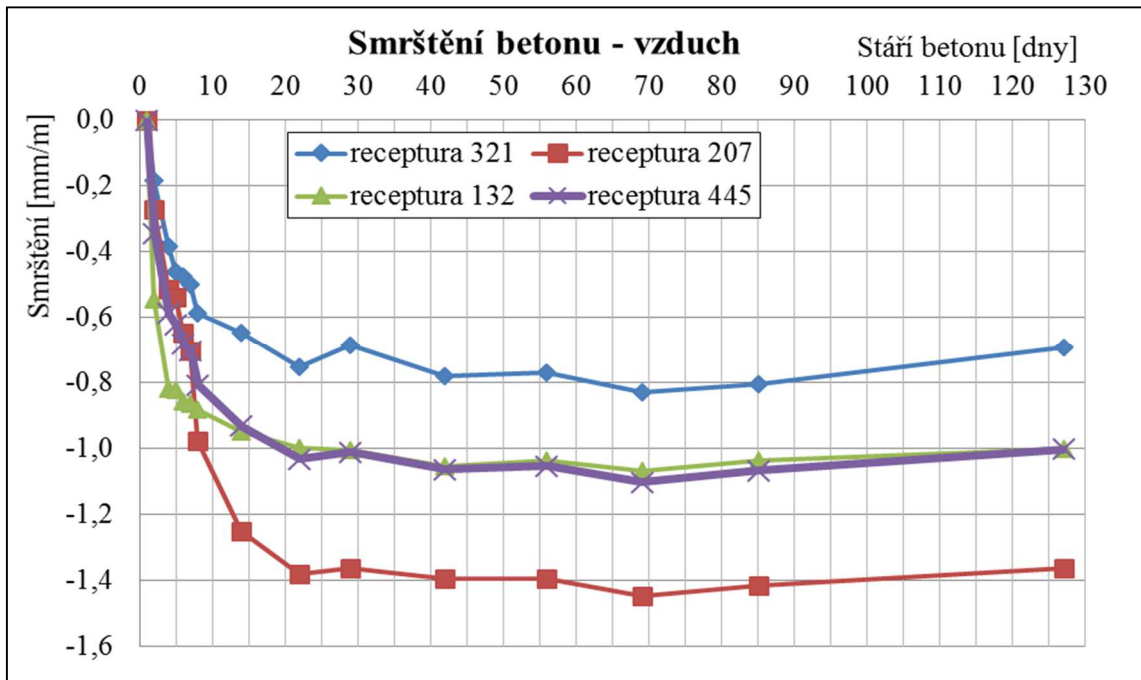


Obr. 53 Princip smršťování betonu [85]

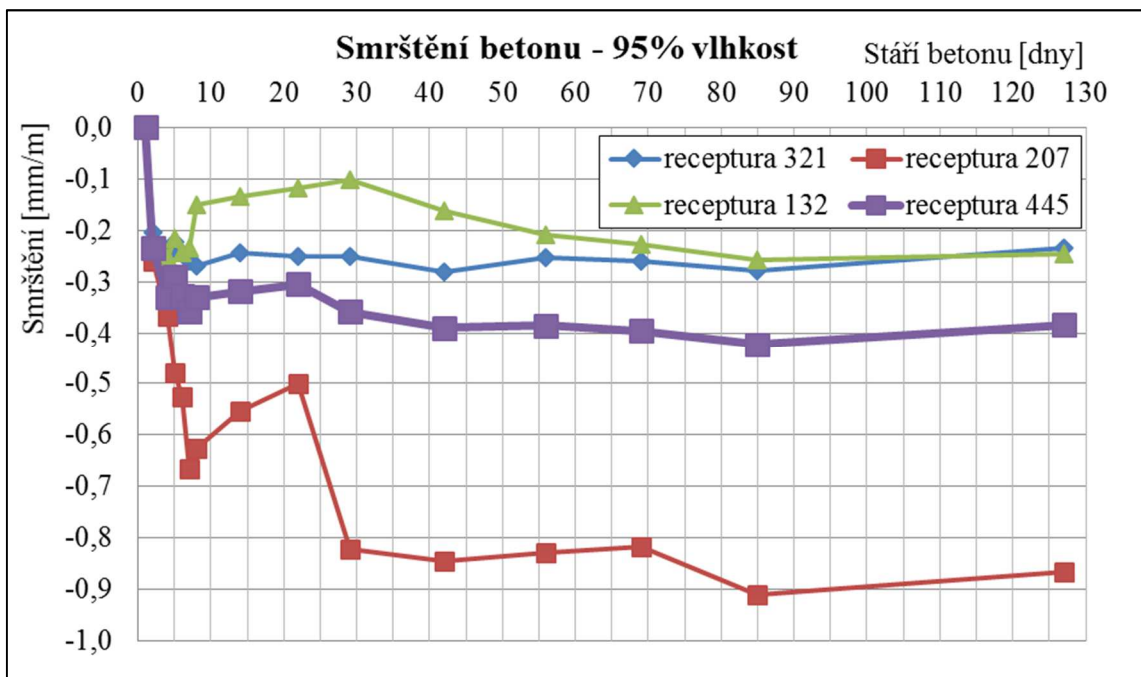
Důvody smršťování jsou v zásadě dva. Objem složek před hydratací je větší než výsledný objem zatvrdlého cementového tmelu (autogenní smrštění, někdy rovněž chemické). Druhým důvodem je únik vody z betonu do okolí. Pokud k tomuto úniku dojde před začátkem tuhnutí, jedná se o plastické smrštění. Pokud uniká voda až po začátku tuhnutí a tvrdnutí, jedná se o vysychání. Smrštění lze výrazně omezit uložením vzorků do výrazně vlhkého prostředí, a tím zamezit úniku vody do okolí, případně ihned po betonáži vzorky opatřit nátěrem proti odparu. Na základě měření byly sestaveny pro každou recepturu grafické výstupy průběhu smrštění (Obr. 54, Obr. 55 a Obr. 56).



Obr. 54 Porovnání smrštění vzorků uložených ve vodě



Obr. 55 Porovnání smrštění vzorků uložených na vzduchu



Obr. 56 Porovnání smrštění vzorků uložených v 95% vlhkosti

3.5. Shrnutí zkoušek matrice – volba receptury

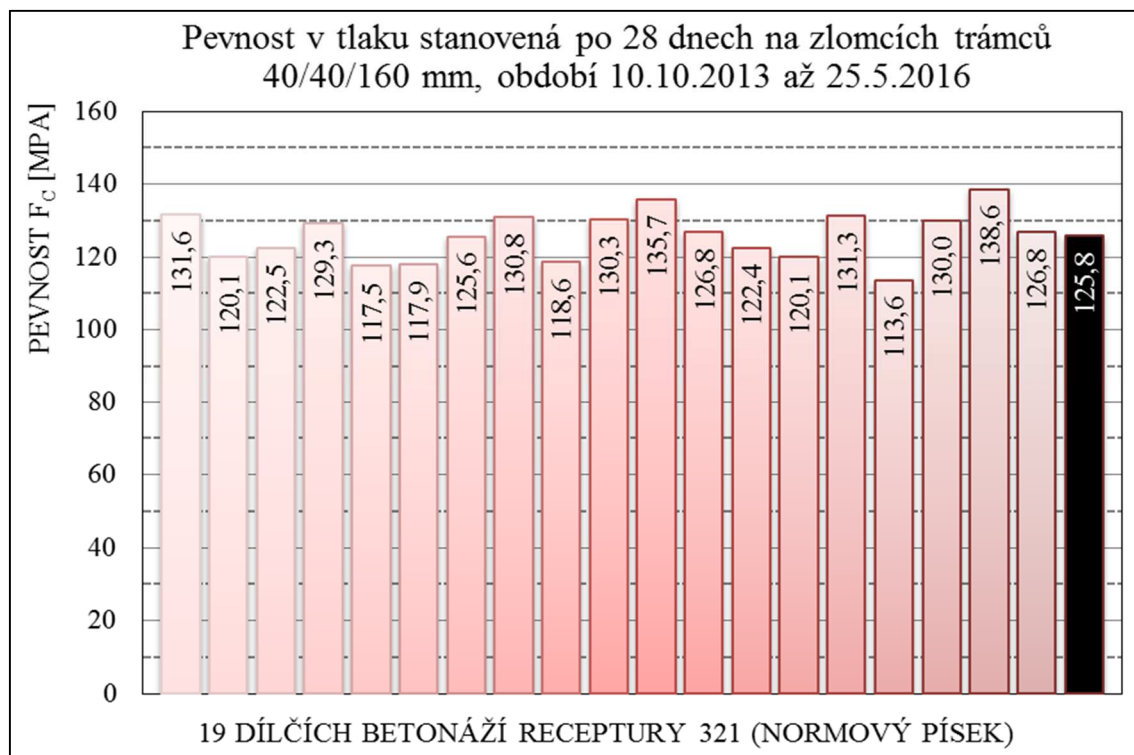
Na základě výše uvedených zkoušek došlo k volbě receptury, která byla následně použita pro výrobu všech dalších zkušebních těles neohledně na jejich rozměr. Přihlédnuto bylo k zjištěným faktorům od zkoušek čerstvé směsi přes pevnosti, modul pružnosti až

po naměření smrštění. Souhrnná tabulka (Tab. 12) všech zjištěných veličin platí pro trámečky 40/40/160 mm.

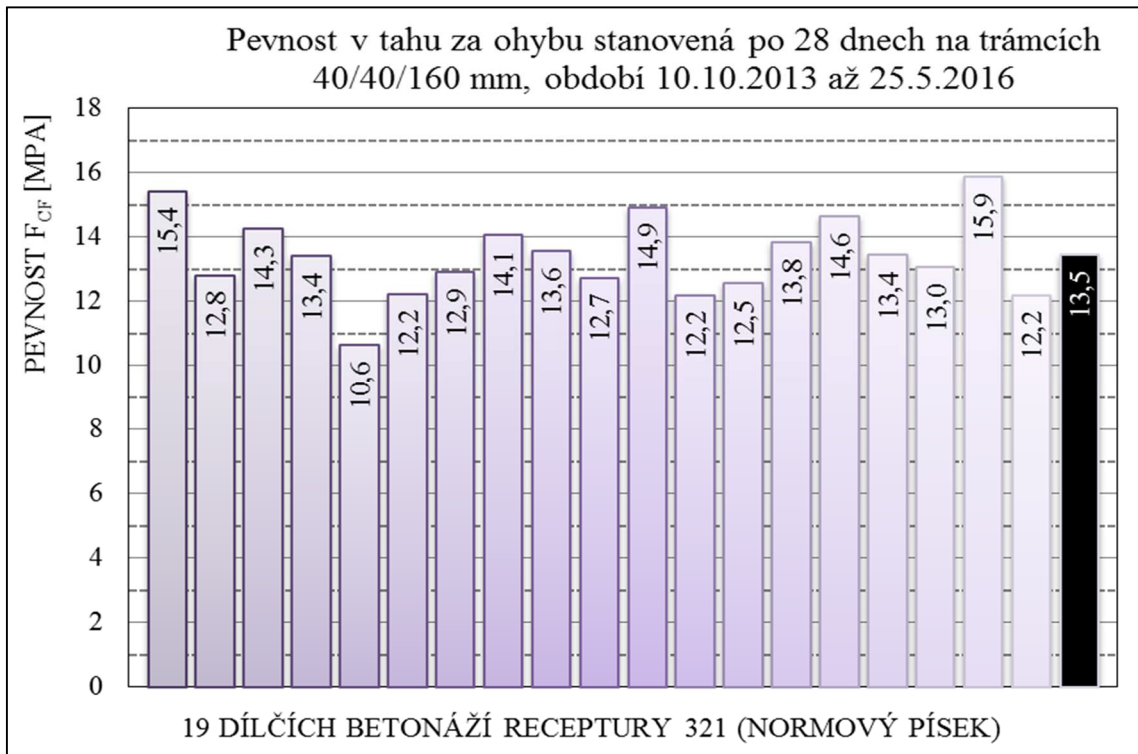
Tab. 12 Tabulka zjištěných vlastností dle jednotlivých receptur, uvedené hodnoty pevnosti v tlaku, tahu za ohybu a modulu pružnosti jsou měřeny po 28 dnech

Číslo receptury	Sednutí rozlitém/rozlité	Objemová hmotnost ρ_v [kg/m ³]	Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	Pevnost v tlaku [MPa]	Statický modul pružnosti [GPa]	Smrštění voda / vzduch / 95 % [mm/m]
321	SF 2 / F7	2343	13,5	125,8	44,3	0,39 / 0,83 / 0,28
207	SF 2 / F7	2333	12,7	121,5	41,5	0,32 / 1,45 / 0,91
132	SF 2 / F6	2334	13,7	119,6	44,1	0,36 / 1,07 / 0,26
445	-	2445	28,3	153,8	47,7	0,37 / 1,10 / 0,42

Na základě zjištěných skutečností byla pro další výrobu TRC prvků vybrána receptura 321, tj. receptura s normovým kamenivem frakce 0/2 mm. Tato receptura se vyznačuje dobrými pevnostními charakteristikami, dobrou zpracovatelností a nižšími hodnotami naměřených smrštění. V rámci všech dalších betonáží bylo zhotoveno celkem cca 100 trámečků o rozměrech 40/40/160 mm, na kterých byly průběžně ověřovány pevnostní charakteristiky (pevnost v tlaku a pevnost v tahu za ohybu). Jejich zkoušky v období 10.10.2013 až 25.5.2016 jsou uvedeny na Obr. 57 a Obr. 58. Uvedena je rovněž hodnota průměrná (černý sloupec).



Obr. 57 Pevnost v tlaku f_c receptury 321, celkem 103 vzorků z 19 ti betonáží



Obr. 58 Pevnost v tahu za ohybu receptury 321, celkem 103 vzorků z 19 ti betonáží

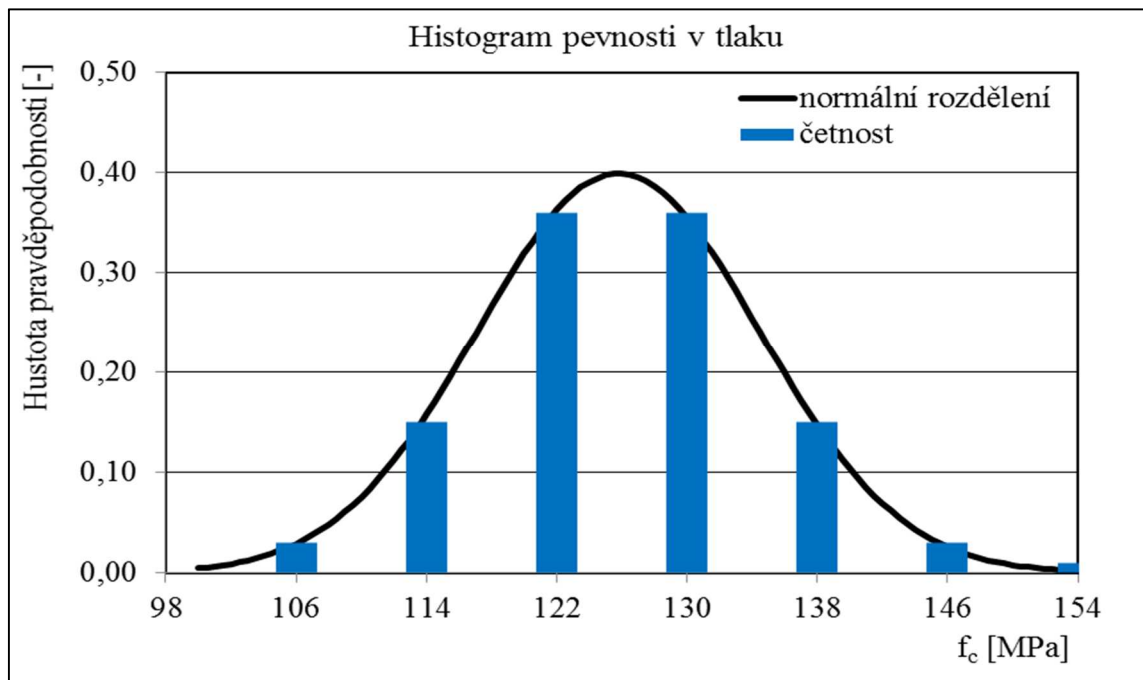
Z výsledků provedených zkoušek v tlaku a tahu za ohybu byly stanoveny základní statistické veličiny průměr (\bar{x}), směrodatná odchylka (s_x) a variační koeficient (V_x). Průměrná pevnost v tlaku $f_c=125,8$ MPa, $s_x=8,7$ MPa a $V_x=0,07$. Průměrná pevnost v tahu za ohybu $f_{ct}=13,5$ MPa, $s_x=1,8$ MPa a $V_x=0,13$. Současně byly také sestaveny histogramy hodnot (Obr. 59 a Obr. 60), které jsou proloženy křivkou normálního rozdělení [102]. Na základě zpracovaných histogramů lze konstatovat, že zkušební soubor (103 vzorků) receptury 321, svým tvarem a charakterem odpovídá normálnímu (Gaussovu) rozdělení hustoty pravděpodobnosti. Za pomoci výše uvedeného, byla vypočtena charakteristická hodnota pevnosti v tlaku $f_{ck,is}$ dle ČSN EN 1990, příloha D [100].

$$f_{ck,is} = f_{m(n),is} \cdot (1 - k_n \cdot V_x) \quad \text{Rov. 4}$$

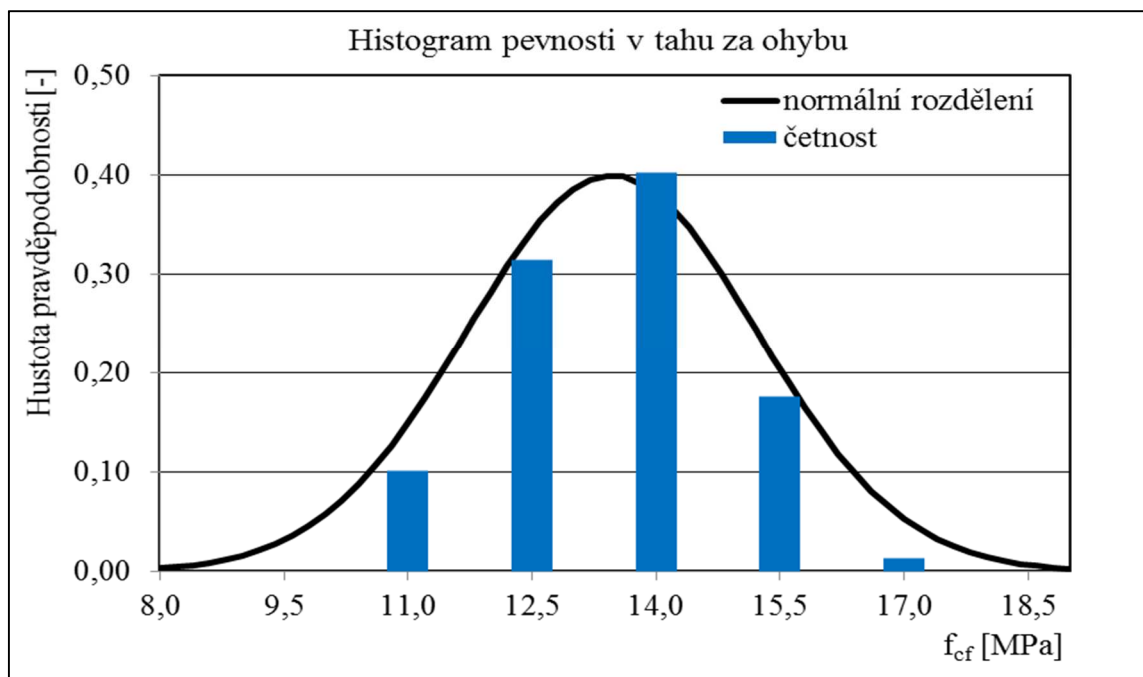
kde:

- $f_{ck,is}$ charakteristická hodnota pevnosti v tlaku [MPa]
- $f_{m(n),is}$ průměrná hodnota pevnosti v tlaku (v grafech značeno jako f_c) zjištěná zkouškami [MPa]
- k_n součinitel zohledňující počet vzorků [-]
- V_x variační koeficient [-]

Hodnota součinitele k_n byla na základě počtu vzorků stanovena dle [101] jako 1,64. Charakteristická pevnost v tlaku na zlomcích trámů 40/40/160 mm $f_{ck,is}=113,3$ MPa je stanovena jako 5% kvantil. Odpovídá tak třídě betonu C 110/130 dle TP 226.



Obr. 59 Histogram pevnosti v tlaku proložený normálním rozdělením



Obr. 60 Histogram pevnosti v tahu za ohybu proložený normálním rozdělením

3.6. Rozměrový efekt vybrané matrice

Vliv rozměrového efektu je v mechanice stavebních konstrukcí již řadu let dobře znám a je mnoha publikacemi popsán [76][77][78][126][127][128]. Zjednodušeně se jedná o fakt, že k porušení větších konstrukcí dochází při nižší hodnotě napětí a rovněž

při nižších hodnotách deformace, než tomu je u konstrukcí menších. Hlavní příčiny rozměrového efektu jsou statistické a deterministické. Statistickou příčinu lze vysvětlit tezí, že vždy praskne nejslabší článek řetězu a u rozměrné konstrukce je výrazně vyšší pravděpodobnost výskytu těchto slabých míst. Deterministická příčina spočívá ve faktu, že k šíření trhliny je třeba energie a u velkých konstrukcí je energie k dispozici více.

Největší význam rozměrového efektu se projevuje v souvislosti s pevností v tahu za ohybu, kdy vztah pro vliv velikosti vzorku na pevnost materiálu odvodil Bažant [140]. Poměr pevnosti v tahu za ohybu zkušebního trámečku 40/40/160 mm a 150/150/700 mm může dosáhnout 1,5 až 2 násobku pevnosti vzorku většího [86]. Další autoři dále prokázali, že správně určenými koeficienty lze zákon aplikovat rovněž na pevnost v tlaku [141]. Na základě publikace [142] bylo však prokázáno, že u betonů velmi vysokých pevností (okolo 140 MPa a více) jsou výsledné pevnosti v tlaku téměř nezávislé na velikosti zkušebního vzorku. V Tab. 13 jsou popsány stanovené pevnosti v tahu za ohybu, tlaku a statický modul pružnosti různě velkých vzorků z matrice 321. U zkoušených vzorků napříč rozměrovým spektrem se projevil velmi výrazný vliv rozměrového efektu na pevnost v tahu za ohybu a jen malý vliv při zkouškách pevnosti v tlaku. Tento vliv je vyjádřen jako podíl mezi průměrnou pevností vzorků největších a nejmenších.

Tab. 13 Porovnání pevností v tahu za ohybu, tlaku a modulu pružnosti matrice 321

Trámeček [mm]	Počet vzorků [ks]	Průměrná pevnost v tahu za ohybu [MPa]	Pevnost tahu za ohybu vztažená k trámci 150/150/700 mm [-]	Průměrná pevnost v tlaku na zlomcích trámečků [MPa]	Pevnost tlaku vztažená ke krychly o hraně 150 mm [-]
20/20/100	9	16,9	2,14	141,3	1,21
40/40/160	103	13,5	1,71	125,8	1,08
70/70/300	18	11,4	1,44	122,3	1,05
100/100/400	18	9,2	1,16	118,4	1,02
150/150/700	12	7,9	1,00	116,5	1,00
Typ a rozměr zkušebního vzorku			Počet vzorků [ks]	Průměrná pevnost v tlaku [MPa]	Průměrný modul pružnosti [GPa]
Hranol 40/40/160 [mm]			9	98,6	45,9
Válec 100/200 [mm]			9	102,1	44,1
Válec 100/300 [mm]			6	100,5	42,2

4. Experimentální část – textilní výztuž

Na základě provedené literární rešerše bylo zjištěno, že jako nekonvenční výztuž může sloužit celá řada textilních materiálů (kap. 2.2). Při pohledu na Tab. 4 a při porovnání s pevnostmi uváděnými i dalšími zdroji (kap. 2.2.1., 2.2.2., 2.2.3. a 2.2.4.) je patrné, že pevnost výztuže, modul pružnosti a poměné přetvoření jsou velmi často uváděné jako rozpětí hodnot. Důvodů těchto rozpětí je hned několik. Jedná se především o konkrétní chemické složení daného druhu výztuže, způsob výroby a především také druh použitého povlaku, který zásadně ovlivňuje, zda vlákna v jednom provazci (rovingu) budou či nebudou působit jako homogenní celek. Z výše zmíněných důvodů vznikla potřeba ověřit parametry získaných druhů textilních výztuží. Pro potřeby experimentálního ověření a stanovení charakteristické hodnoty pevnosti a modulu pružnosti textilních výztuží byly shromážděny vzorky popsané v následující kapitole.

4.1. Základní informace o zkušebních vzorcích

Od společnosti V. FRASS (Německo) byl komerční cestou získán vzorek textilní skleněné výztuže ve formě 2D sítě (rozměr 1,25/2 m) s roztečí ok 20/20 mm a udávanou jemností 2400 TEX. Tato síť je z výroby opatřena neznámým povlakem, který v technickém listu výrobce nespecifikuje. Dle výrobce se jedná o formu alkali-rezistentního skla s vysokou pevností v tahu (dle literární rešerše 1800–3500 MPa).

Uhlíková vlákna byla získána opět komerční cestou od společnosti Tenjin. Jejich obchodní označení je TENAX. Vzorek byl rovněž ve formě 2D sítě (1/2 m) s roztečí ok 10/10 mm v maximální jemnosti 1200 TEX. Povlak na výztuž není rovněž nijak specifikován, výrobce však nespecifikuje ani výrobní postup, pravděpodobně se však jedná o vlákna karbonizovaná vzniklá výrobou z PAN. U těchto druhů vláken je udáváno velmi široké rozpětí pevností (3500–6000 MPa v kombinaci s vysokým modulem pružnosti okolo 210–250 GPa).

Posledním vzorkem získaným pro zkoušky textilních výztuží byl povlakovaný roving tvořený bazaltovými (čedičovými) vlákny s jemností 1000 TEX. Tento vzorek byl darován společností Basaltex a.s., která byla v rámci výzkumu navštívena. Společnost Basaltex a.s. se sídlem v Šumperku je významným výrobcem a zpracovatelem čedičových vláken a výztuží pro region střední Evropy a jejím dodavatelem je Ruská společnost Kamenny Vek (kap. 2.2.1.). Na internetových stránkách společnosti

Basaltex a.s. lze vyčíst, že i pevnost v tahu čedičové výztuže je dána poměrně širokým rozpětím (2500–3950 MPa).

4.2. Pilotní zkoušky výztuží

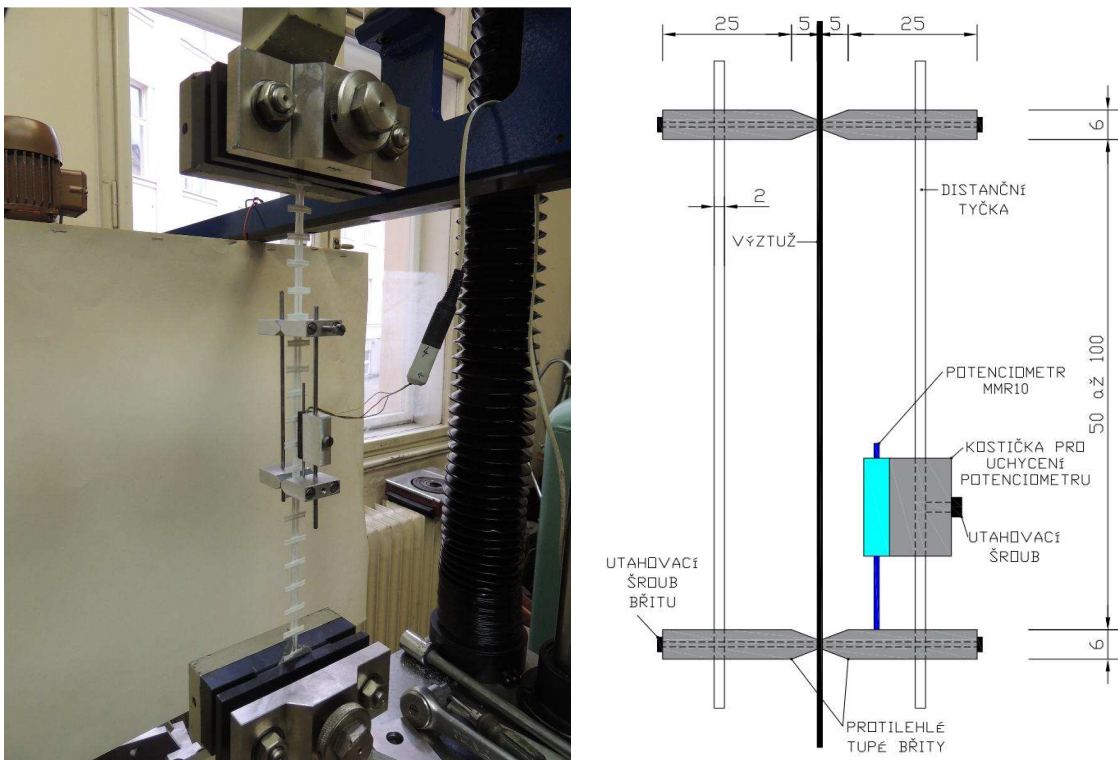
Na základě zmíněných informací bylo přistoupeno k návrhu a realizaci tahové zkoušky vzorků dodaných nekonvenčních výztuží. Hlavními hodnotícími parametry byly pevnost v tahu při porušení, modul pružnosti a poměrné prodloužení. Na základě provedení pilotních testů bylo zjištěno, že je třeba vyřešit hned několik dílčích problémů. Jedním z nich bylo upnutí vzorků do zkušebního stroje, metoda navinutí se ukázala jako problematická, protože po celou dobu zkoušky docházelo k postupnému vytahování vzorků z čelistí stroje. Druhý problém spočíval v samotném měření deformací, kde při měření z posunu příčníky jsou data zatížena výraznou chybou. Na základě těchto zkušeností byly provedeny úpravy podmínek zkoušky (uchycení vzorků, měření deformací).

4.3. Příprava vzorků pro tahové zkoušky

Vzorky všech zkoušených materiálových variant byly připraveny jednotně, tj. do podoby přímého prutu o délce cca 400 mm, který je v případě 2D sítě zhotoven vystřížením části výztuže z desky. V případě skleněné textilní výztuže byly vzorky vystříženy jak ze směru osnovního (podélného), tak pro ověření parametrů i ze směru útkového (příčného). Uhlíková výztuž byla vystřížena pouze ze směru osnovního a bazaltový roving byl pouze zkrácen na požadovanou délku. Následně byly po zkrácení oba konce výztuží upraveny a zakončovány do tvaru větší plochy pomocí dvousložkového tmelu Stado ResiFix 3E. Tato plocha následně po zatvrdnutí umožňuje upnutí do plochých čelistí zkušebního zatěžovacího stroje TiraTEST 2300. Desky čelistí zkušebního stroje byly opatřeny protiskluzovou úpravou, především z důvodu eliminace případného prokluzu vzorku při samotné tahové zkoušce. Pro porovnávací tahové zkoušky bylo připraveno celkem 30 vzorků všech druhů výztuží (18 ks vzorků ze skleněné textilní výztuže a po 6 ks z výztuže bazaltové a uhlíkové).

4.4. Příprava měřícího řetězce

Vzhledem k potřebě měřit deformace a z nich stanovit modul pružnosti, jak tomu je například u tahové zkoušky oceli [95], bylo zapotřebí umístění průtahoměru přímo na textilní výztuž. Bohužel nebylo možné použít konvenční extenzometr pro zkoušky modulu pružnosti oceli či betonu, a proto byl navržen průtahoměr umožňující uchycení na vzorek výztuže umístěný ve zkušebním stroji Obr. 61 vlevo. Hlavní výhodou tohoto průtahoměru je jeho nízká hmotnost, které bylo docíleno konstrukcí z duralu. Schéma průtahoměru je znázorněno na Obr. 61 vpravo.



Obr. 61 Vlevo fotodokumentace průtahoměru umístěného na výztuži, vpravo schématické znázornění průtahoměru

Snímač je konstruován tak, aby mohl měřit deformace na zvolené bázi (50 až 100 mm). Osazení na výztuž probíhá pomocí dvou protilehlých tupých břitů, které sevřou zkoušenou výztuž z obou stran pomocí dvojice šroubů. Následně dojde k nastavení snímače do výchozího čtení a jeho fixaci. Na závěr se uvolní aretace a snímač je připraven k zahájení zkoušky. Samotné měření je zaznamenáváno kontinuálně měřící ústřednou, která je napojena na lineární odporový potenciometrický snímač deformací Megatron MMR10 [96] s pracovním rozsahem 8 mm, rozlišovací schopností 0,001 mm a návratovou pružinou.

4.5. Průběh zkoušek a vyhodnocení

Tahové zkoušky byly provedeny ve zkušebním stroji TiraTEST 2300. Po uchycení vzorku do stroje a osazení měření byla spuštěna standardní trhací procedura, která odpovídá předpokladům [97][98] s tím rozdílem, že nebyla zkoušena plošná textilie, ale vzorek rovingu. Zatěžování bylo řízeno rovnoměrným nárůstem deformace rychlostí 0,05 mm/s. Rychlost zatěžování byla zvolena tak, aby zkouška trvala vždy přibližně 60 s. Sledovaným faktorem při zkoušce je i místo porušení. Vzorky, které by se porušily v místě uložení (v čelistech) zatěžovacího stroje musí být z výsledků vyloučeny, stejně tak vzorky, kde by k porušení došlo v oblasti pod tupým břitem průtahoměru.

Vyhodnocení pevnosti při porušení, modulu pružnosti a poměrného přetvoření je provedeno pro každý vzorek zvlášť. Je provedeno jednak formou tabulky, následně také pomocí zkušebních diagramů. U všech vzorků byly zjištěna lineární závislost vzrůstající síly (napětí) na změně délky (poměrném přetvoření). Při výpočtu napětí, však nelze počítat dle běžně uvažovaných vztahů, protože stanovení plochy výztuže je velmi složité. Měření dvou na sebe kolmých rozměrů není z důvodu tvaru rovingu (Obr. 62) reálně možné, přes to se tento postup často objevuje [99]. Jako vhodná alternativa se jeví vzorec uváděný v literatuře textilních vláken [39], které počítají s jemností TEX, dosaženou silou a objemovou hmotností dominantního materiálu tj. skla, uhlíku či bazaltu, kterého je v rovingu přítomno vždy minimálně 80 % (Rov. 5).



Obr. 62 Reálný tvar rovingu textilní skleněné výztuže získaný z 2D sítě

$$\sigma_{max} = \frac{F_{max}}{TEX} \cdot \rho_v \quad \text{Rov. 5}$$

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\Delta\varepsilon} \quad \text{Rov. 6}$$

$$\Delta\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{l_2 - l_1}{l_1} \quad \text{Rov. 7}$$

kde:

σ_{max}	maximální dosažené napětí v tahu [MPa]
F_{max}	maximální tahová síla při porušení vzorků [kN]
TEX	jemnost vláken (hmotnost vlákna délky 1 km) [g/km]
ρ_v	objemová hmotnost vláken [kg/m ³]
E	modul pružnosti výztuže [GPa]
$\Delta\sigma$	rozdíl napětí mezi 10 a 60 % pevnosti [MPa]
σ_1	základní napětí odpovídající cca 10 % pevnosti [MPa]
σ_2	napětí odpovídající cca 60 % pevnosti [MPa]
$\Delta\varepsilon$	poměrné přetvoření mezi 10 a 60 % pevnosti [-]
Δl	změna délky vzorku mezi dvěma body diagramu [m]
l	původní délka [m]
l_1	délka při napětí σ_1 [m]
l_2	délka při napětí σ_2 [m]

Tab. 14 Vyhodnocení zkoušek skleněné textilní výztuže (osnova)

OZN.	Síla F [N]	Poměrné přetvoření $\Delta\varepsilon$ [-]	Modul pružnosti E [GPa]	Pevnost σ [MPa]
1	2029,0	0,0281	78,2	2198,1
2	1951,0	0,0260	81,4	2113,6
3	2124,9	0,0311	74,1	2302,0
4	2094,2	0,0323	70,3	2268,7
5	2122,6	0,0305	75,5	2299,4
6	2055,3	0,0291	76,4	2226,6
7	2089,6	0,0314	72,1	2263,8
8	2059,4	0,0281	79,4	2231,0
9	2133,2	0,0308	74,9	2310,9
Průměr		0,0297	75,8	2246,0
Směrodatná odchylka		0,0020	3,5	62,7
Variační koeficient [%]		6,8	4,6	2,8

Tab. 15 Vyhodnocení zkoušek skleněné textilní výztuže (útek)

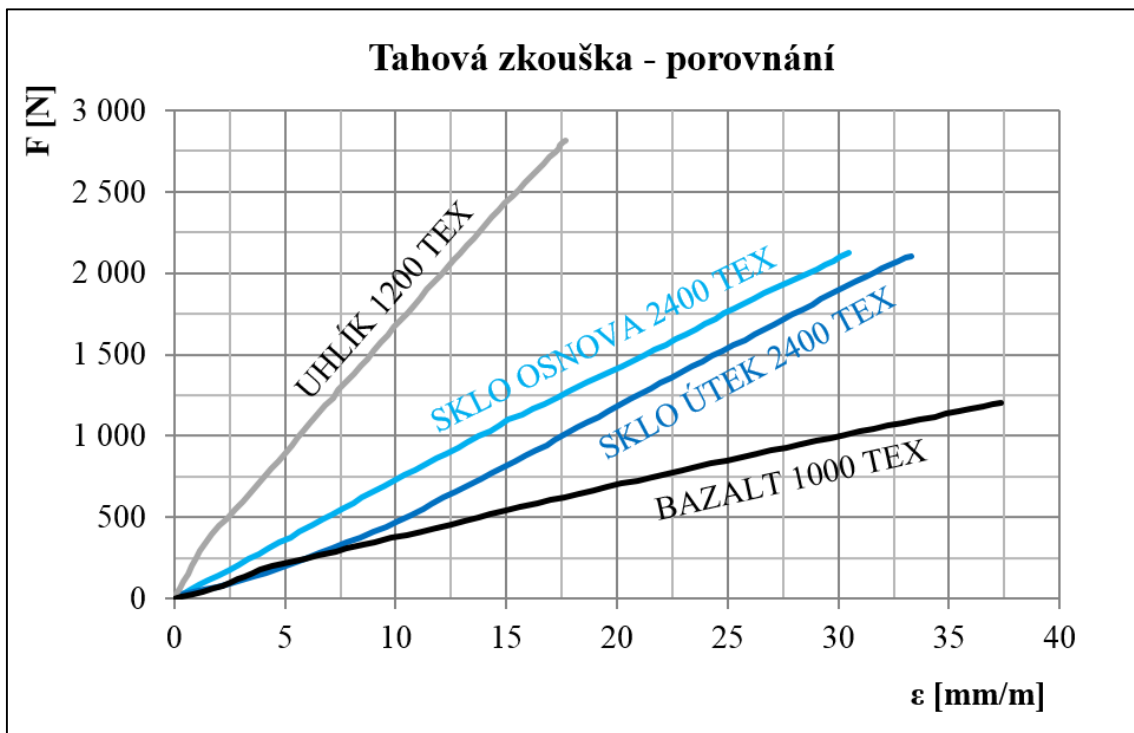
OZN.	Síla F [N]	Poměrné přetvoření $\Delta\varepsilon$ [-]	Modul pružnosti E [GPa]	Pevnost σ [MPa]
1	1903,4	0,0293	70,3	2062,0
2	1987,1	0,0309	69,7	2152,7
3	1967,4	0,0302	70,6	2131,4
4	2065,6	0,0327	68,4	2237,7
5	2101,1	0,0311	73,3	2276,2
6	1996,7	0,0335	64,6	2163,1
7	2069,0	0,0298	75,1	2241,5
8	2107,0	0,0333	68,5	2282,6
9	1922,4	0,0311	67,0	2082,6
Průměr		0,0313	69,7	2181,1
Směrodatná odchylka		0,0015	3,2	81,9
Variační koeficient [%]		4,8	4,5	3,8

Tab. 16 Vyhodnocení zkoušek uhlíkové výztuže (osnova)

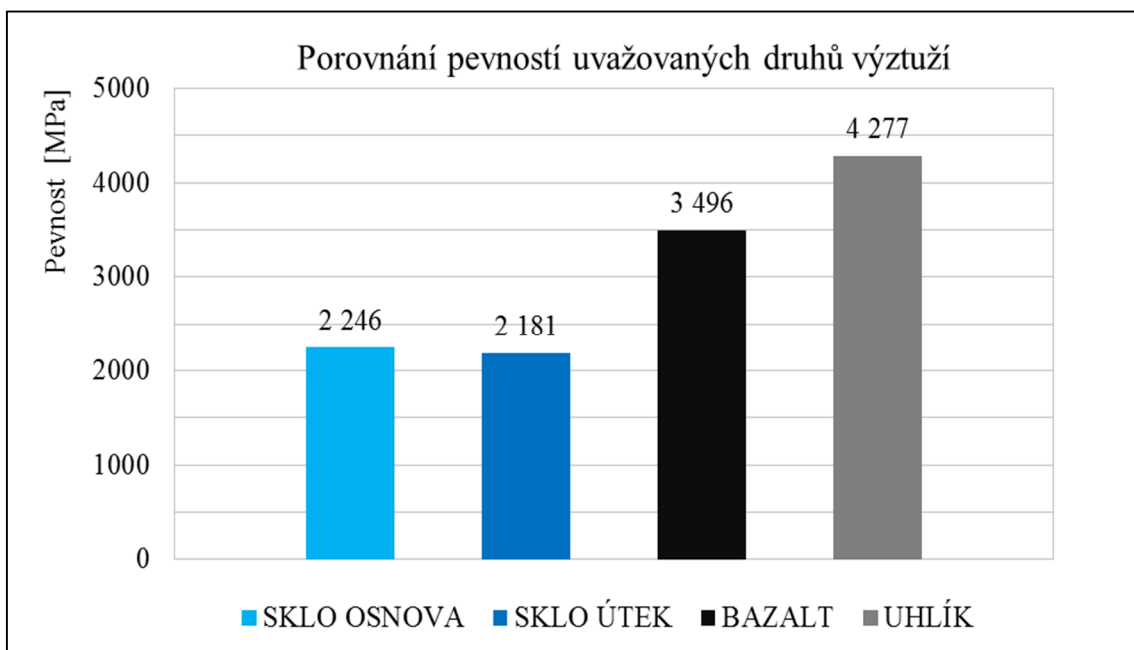
OZN.	Síla F [N]	Poměrné přetvoření $\Delta\varepsilon$ [-]	Modul pružnosti E [GPa]	Pevnost σ [MPa]
1	2901,2	0,0176	247,8	4351,7
2	2791,4	0,0181	230,8	4187,1
3	2761,8	0,0182	227,5	4142,7
4	2690,4	0,0191	210,8	4035,6
5	2814,3	0,0177	239,0	4221,5
6	3147,0	0,0185	255,2	4720,5
Průměr		0,0182	235,2	4276,5
Směrodatná odchylka		0,0006	15,8	240,7
Variační koeficient [%]		3,2	6,7	5,6

Tab. 17 Vyhodnocení zkoušek bazaltové výztuže (roving)

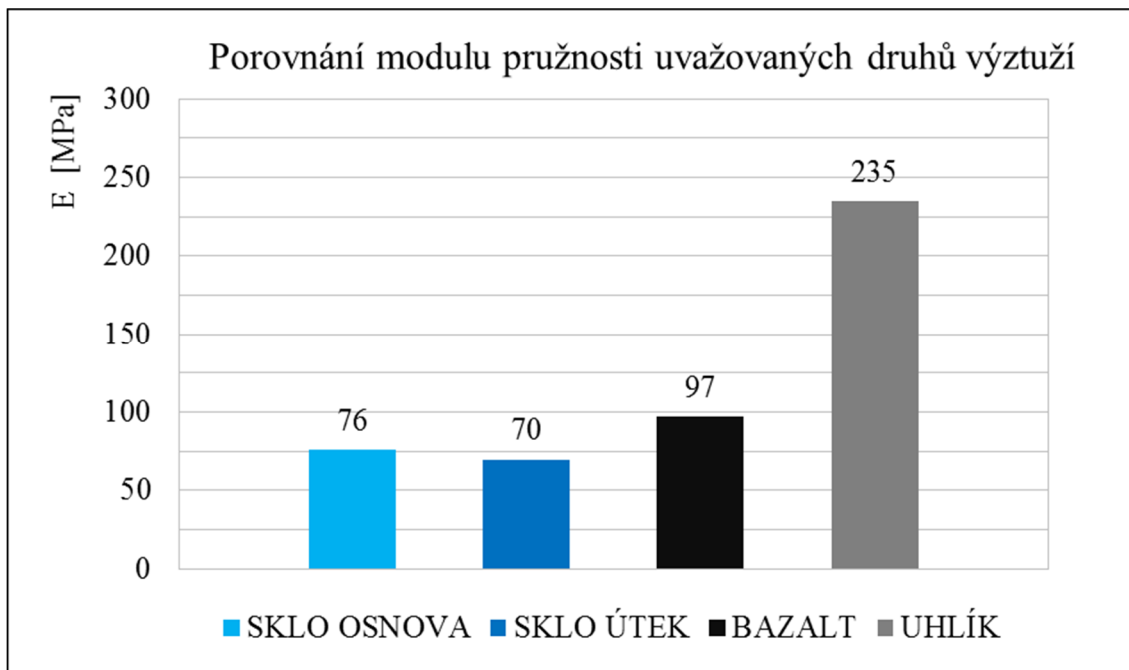
OZN.	Síla F [N]	Poměrné přetvoření $\Delta\varepsilon$ [-]	Modul pružnosti E [GPa]	Pevnost σ [MPa]
1	1166,5	0,0344	98,4	3382,7
2	1204,7	0,0374	93,5	3493,8
3	1246,5	0,0373	97,0	3615,0
4	1228,5	0,0360	98,9	3562,7
5	1130,9	0,0348	94,2	3279,5
6	1256,5	0,0356	102,3	3643,7
Průměr		0,0359	97,4	3496,2
Směrodatná odchylka		0,0012	3,2	141,5
Variační koeficient [%]		3,5	3,3	4,0



Obr. 63 Porovnání průběhů tahové zkoušky textilních výztuží reprezentativních vzorků (síla na poměrném přetvoření)



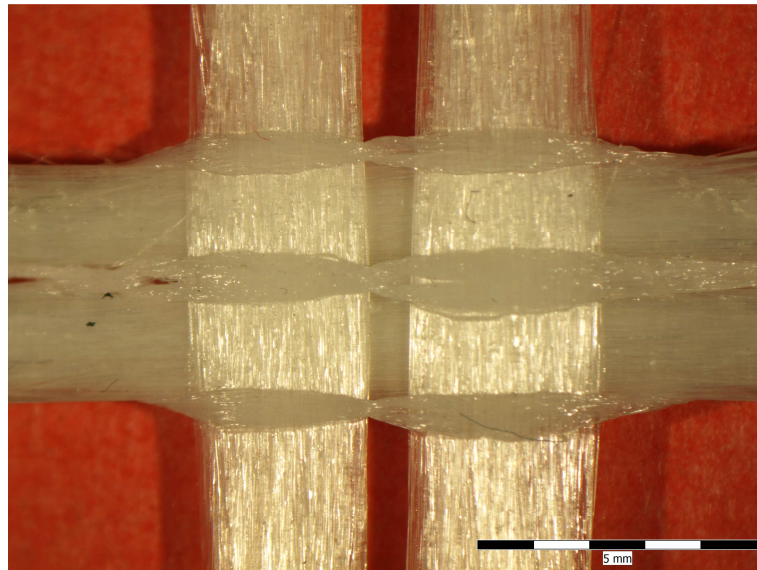
Obr. 64 Porovnání průměrných vypočtených pevností na mezi porušení uvažovaných druhů textilní výztuže



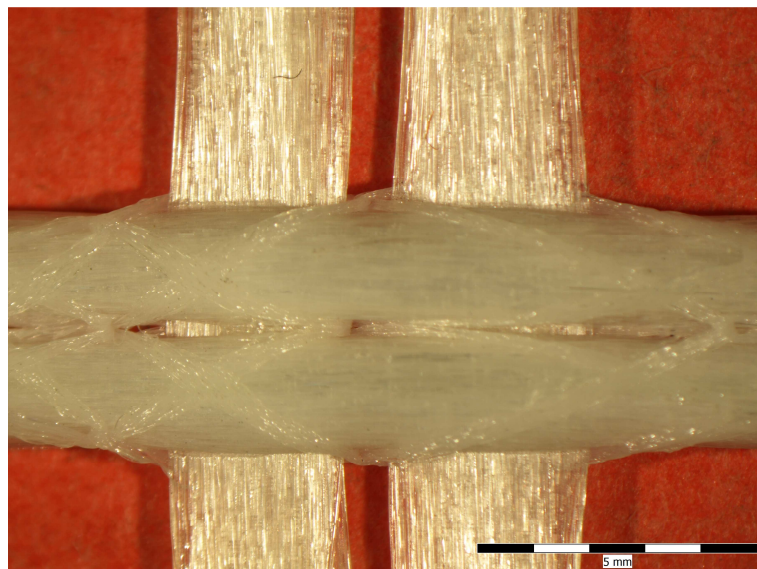
Obr. 65 Porovnání průměrných modulů pružnosti uvažovaných druhů textilních výztuží

4.6. Shrnutí zkoušek textilních výztuží

Na základě provedených zkoušek a jejich vyhodnocení lze konstatovat, že pracovní diagramy zkoušených textilních výztuží jsou v zásadě lineární. Všechny vzorky se porušují náhle bez varování, což odpovídá křehkému lomu vláken skla, uhlíku i bazaltu. Mírná odchylka od linearit je patrná na průběhu zkoušky skleněných textilních vláken v útkovém směru. Tato drobná nelinearita je však způsobena samotným výrobním postupem 2D sítě, kdy je část vláken útku zapletena kolem osnovního směru tak, aby vznikala mechanická fixace 2D sítě (Obr. 66 a Obr. 67). Dle provedených zkoušek však tento způsob tkaní nemá významný vliv na výslednou pevnost a jen mírný vliv na modul pružnosti a hodnotu poměrného přetvoření. Průměrná hodnota pevnosti skleněných textilních vláken v dodané 2D síti je cca 2200 MPa, což svědčí o velmi vysokém využití skleněných vláken a použití kvalitní povrchové ochrany, která zajišťuje dobré spolupůsobení celého zkoušeného provazce (rovingu). Průměrná pevnost bazaltových vláken je cca 3500 MPa při cca 95 GPa modulu pružnosti a pro uhlíková vlákna byla stanovena pevnost přibližně 4250 MPa a vysoký modul pružnosti 235 GPa. Všechny výše uvedené hodnoty odpovídají vneseným teoretickým předpokladům z kap. 2.2.



Obr. 66 Detailní fotografie propojení osnovy (svisle) a útku (vodorovně) - avers



Obr. 67 Detailní fotografie propojení osnovy (svisle) a útku (vodorovně) - revers

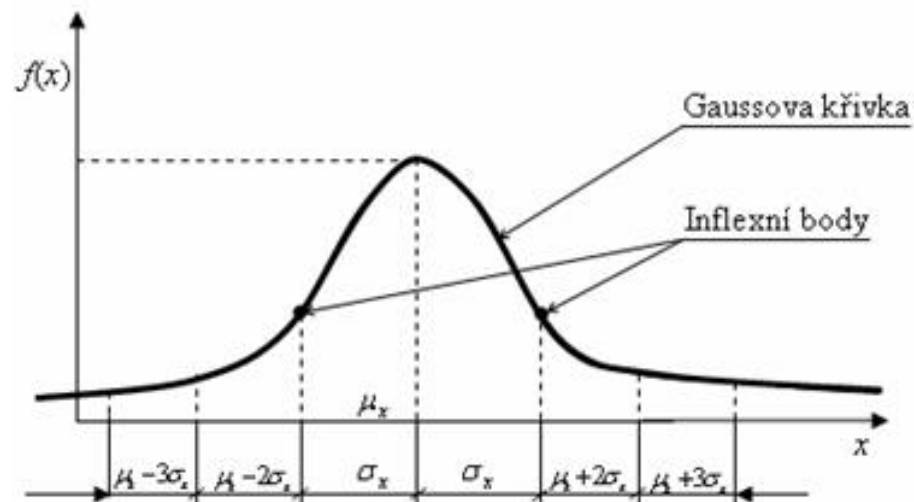
Nutno podotknout, že uvedené experimentálně stanovené pevnosti jsou průměrné hodnoty porušení vzorků. Pro výpočty a navrhování prvků TRC je nutné stanovit charakteristické hodnoty pevnosti například dle ČSN EN 1990, příloha D [100]. Pro stanovení charakteristické hodnoty pevnosti f_{tk} je nutné provést výpočet se zohledněním normálního (Rov. 8) nebo lognormálního rozdělení. Hodnota k_n je dána počtem vzorků a hodnota V je dána variačním koeficientem [100][101]. Diagram normálního rozdělení je patrný na Obr. 68.

$$f_{tk} = f_{t(m)} \cdot (1 - k_n \cdot V)$$

Rov. 8

kde:

- f_{tk} charakteristická hodnota pevnosti v tahu [MPa]
 $f_{t(m)}$ průměrná hodnota pevnosti v tahu zjištěná zkouškami [MPa]
 k_n součinitel zohledňující počet vzorků [-]
 V variační koeficient [-]



Obr. 68 Normální rozdělení hustoty pravděpodobnosti [102]

Tab. 18 Vyhodnocení charakteristické hodnoty pevnosti v tahu f_{tk} nekonvenčních druhů výztuží pomocí normálního rozdělení (5% kvantil)

Druh výztuže	Průměrná pevnost při porušení $f_{t(m)}$ [MPa]	Počet vzorků [ks]	k_n [-]	Variační koeficient [-]	f_{tk} [MPa]
SKLO	2213,5	18	1,69	0,033	2091
BAZALT	3496,2	6	1,77	0,040	3246
ČEDIČ	4276,5	6	1,77	0,056	3850

5. Koroze skelných vláken v prostředí betonu

Důvod zařazení tohoto experimentu je aktuálnost tématu koroze výztuže běžných konvenčních betonů, protože je to právě koroze výztuže, která úzce limituje životnost železobetonové konstrukce [103]. Rovněž na konvenční výztužnou ocel je možné aplikovat obvyklé způsoby protikorozní ochrany, které našly široký uplatnění při prodlužování životnosti ocelových profilů při expozici v atmosférických podmínkách, v podmínkách půdní koroze nebo specifické koroze ve vodném prostředí. Nicméně účinnost některých těchto opatření je u železobetonových konstrukcí minimální [103][104]. Otázkou však zůstává, jaký stav lze předpokládat právě u nekonvenční skleněné výztuže. Dalším důležitým faktorem je také životnost konstrukce při karbonataci betonu, případně jeho kontaminaci chloridovými ionty (rozmrazovací posypové soli). Toto je řešeno primárně zvyšováním krycích vrstev, které jsou však u skleněné výztuže zcela minimální (jen několik mm). Dle již dříve provedené rešerše je zjevné, že textilní výztuž je opatřena povlakovou vrstvou. Její vliv na životnost výztuže však není znám [105]. Dílčí výsledky a závěry výzkumu koroze textilní skelné výztuže byly již dříve prezentovány v odborných periodících a na národních či mezinárodních konferencích v kolektivu autorů [116][148][149].

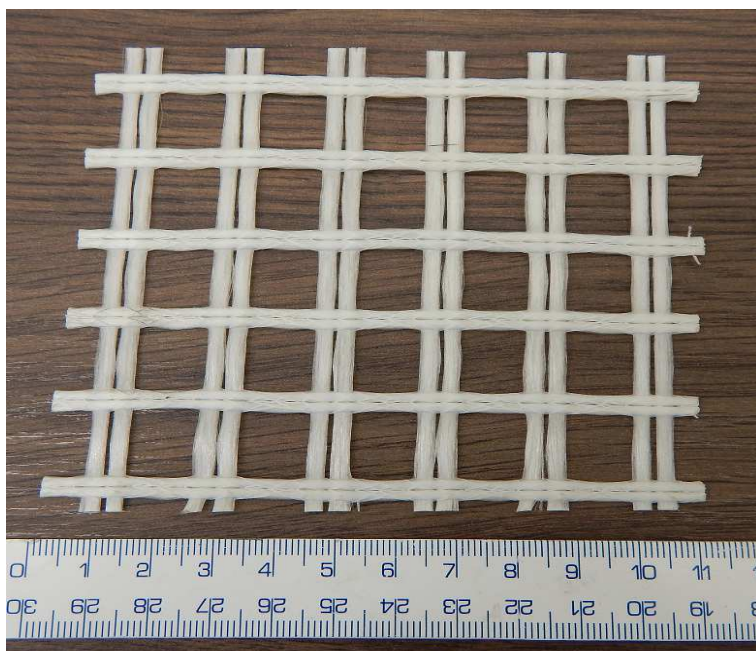
5.1. Popis zkoušky korozního napadení skelné výztuže

Pomocí tahové zkoušky již byly popsány základní mechanické vlastnosti skleněné textilní výztuže, která je dle výrobce V. FRASS tzv. alkali-rezistentní (AR-Glass). Při tahových zkouškách bylo prokázáno, že průměrná síla při porušení výztuže je asi 2100 N, což po přepočtu odpovídá pevnosti při porušení asi 2200 MPa (kap. 4.5.). Zjištěná hodnota pevnosti vypovídá o použití vhodného nátěru (povlaku), který dokáže jednotlivá vlákna dobře stmelit. Na základě tohoto stmelení je zajištěno, že se při namáhání zapojí celý průřez, nikoli jen část v přímém kontaktu s jemnozrnnou betonovou matricí (kap. 2.3.). Pouze pomocí tahové zkoušky však není možné ověřit, zda použitý povlak opravdu zaručuje ochranu skla v alkalickém prostředí a že jsou skleněná vlákna skutečně dokonale alkali-rezistentní, jak je deklarováno komerčním dodavatelem. Za tímto účelem byla provedena studie úrovně korozního poškození skelných vláken v textilní skleněné výztuži. Prostřednictvím technik FT-IR a SEM+EDS je posouzena úroveň korozního poškození textilní skelné výztuže v prostředích simulujících pórový roztok betonu (odstupňované pH: 12,6; 13,0 a 13,5) a pórové roztoky zkarbonatovaného

betonu (pH: 8,1) a zkarbonatovaného betonu kontaminovaného chloridovými anionty (pH: 8,1+Cl⁻). Pomocí FT-IR spektrometrie lze rovněž prokázat složení a druh ochranného organického povlaku na skelných vláknech.

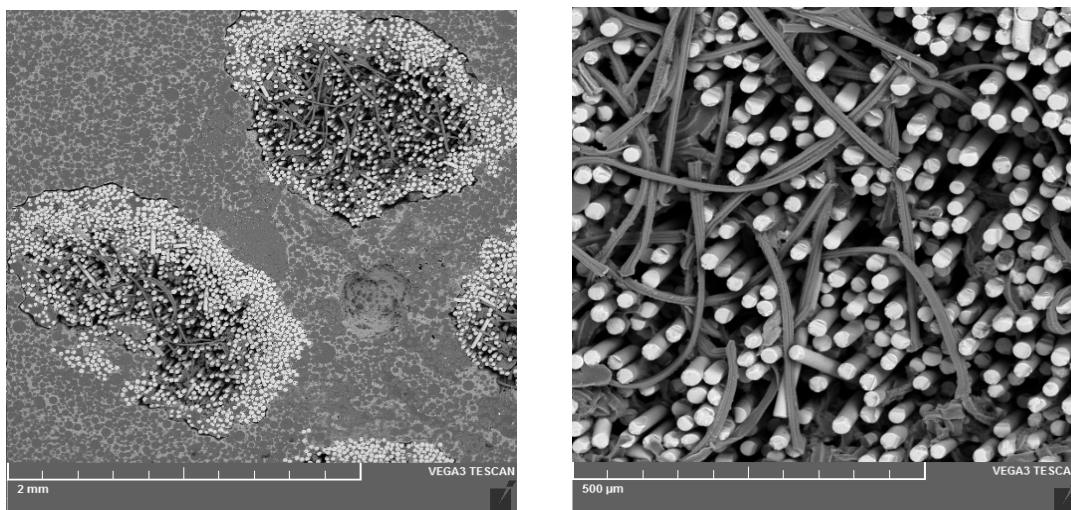
5.2. Průběh zkoušky korozního napadení skelné výztuže

Obvykle se skelná textilní výztuž vyrábí z uspořádaných propletených svazků skelných vláken. V případě alkalirezistentního skla je ve sklářském kmeni přítomno přibližně 55–75 % hm. SiO₂, 1–10 % hm. CaO, 11–21 % hm. Na₂O+K₂O, 1–18 % hm. ZrO₂, do 5 % hm. Al₂O₃, případně v menším zastoupení také B₂O₃, Li₂O, TiO₂, Fe₂O₃ a F₂ (kap. 1.3.3.). Vzorčky pro zkoušky byly zhotoveny právě z dodané komerční výztuže SITgrid [63] společnosti V. FRASS, která byla dodána v podobě 2D sítě. Její fragment je zachycen na Obr. 69.



Obr. 69 Příklad segmentu textilní skelné výztuže SITgrid, V. FRASS

Systém soustředných skleněných vláken typických vzorků textilní skelné výztuže je dobře patrný z příčného řezu při sledování SEM, tj. rastrovacím elektronovým mikroskopem (Obr. 70). Tyto svazky jsou dále povlakovány různými organickými povlaky ke zvýšení ochrany jejich skelného povrchu vůči působení alkalického pórového roztoku betonu.



Obr. 70 Obraz soustředných skleněných vláken v matrici textilní skleněné výztuže pomocí SEM, vlevo menší zvětšení (2 mm), vpravo větší zvětšení (500 μm)

Pórové roztoky betonu představují svým vysokým pH (kolem 13) značně agresivní prostředí, které může při dlouhodobé expozici účinně narušovat spojitost soustředných skelných vláken za vzniku lomů (korozní praskání skel). Provedené experimenty byly zaměřeny na stanovení míry korozního poškození skelných vláken v 2D textilní skleněné výztuži při expozicích v prostředích simulujících reálný beton, zkarbonatovaný beton a zkarbonatovaný beton kontaminovaný nadlimitním množstvím chloridových aniontů. Doba expozice byla zvolena jako kritérium zkoušky a měla zobrazovat vrcholný vliv dlouhodobě působícího korozního prostředí na fyzikální a fyzikálně-chemické vlastnosti textilní skelné výztuže jako kompozitního materiálu. V navazujících příčinných souvislostech je studována ochranná vlastnost organického povlaku v alkalických prostředích a vliv na celkovou pevnost nekonvenční výztuže.

V rámci zkoušení fyzikálních a fyzikálně-chemických vlastností 2D textilní skelné výztuže byla síťovina segmentována na celkem 2 druhy vzorků. První druh vzorku (čtvercová síťovina o rozměrech přibližně 110/110 mm, Obr. 69) byl určen pro expoziční zkoušky v modelových pórových roztocích a následnou analýzu míry degradace povlaku prostřednictvím FT-IR a rastrovací elektronové mikroskopie SEM. Druhý druh vzorků byl podélně segmentovaný provazec (přibližné délky 400 mm, vznikl dělením ve směru osy). Na tomto provazci byla po expozičních zkouškách ověřována pevnost v tahu (F_{max}) totožně jako u zkoušek popsanych v kap. 3.5. Před expozicí byly u těchto segmentů zalepeny řezné hrany provazce na každé straně epoxidem, aby se agresivní roztoky nedostávaly pod ochranný organický povlak. Všechny vzorky byly exponovány po dobu

2 až 5 týdnů v modelových pórových roztocích betonu. V každém modelovém pórovém roztoku betonu byly exponovány celkem dva vzorky síťoviny (analýza míry degradace ochranného organického povlaku a skelných vláken; doba expozice 2 a 5 týdnů) dále pak celkem 10 paralelních vzorků provazců, přičemž u každé pětičky provazců byla po expozici ověřována pevnost v tahu. Umístění provazců do čtvercových boxů (Obr. 71) bylo realizováno jejich ohybem podél stěn boxu, síťoviny byly umístěny uprostřed boxu s cílem maximalizace expoziční plochy. Teplota prostředí při expozici byla 20 ± 5 °C.



Obr. 71 Expozice textilní skelné výztuže v modelových pórových roztocích betonu o různém pH a různé kontaminaci (CO_2 ; Cl^-) v plastových boxech

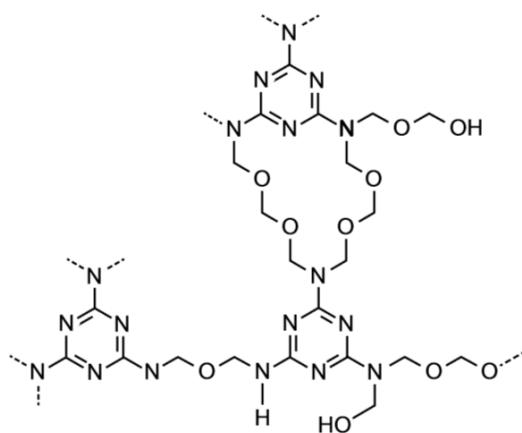
Modelové pórové roztoky čerstvého betonu byly vytvořeny s pH 12,6 (modelující teoretický beton; cement bez obsahu oxidů alkalických kovů; nasycený roztok $\text{Ca}(\text{OH})_2$), 13,0 (modelující reálný beton; cement s obvyklým obsahem oxidů alkalických kovů; nasycený roztok $\text{Ca}(\text{OH})_2$ s přídavkem KOH) a 13,5 (modelující reálný beton; cement s vyšším obsahem oxidů alkalických kovů; nasycený roztok $\text{Ca}(\text{OH})_2$ s přídavkem KOH). Modelové pórové roztoky simulující degradovaný beton zahrnovaly roztok o pH 8,1 (modelující zkarbonatovaný beton; nasycený roztok CaCO_3) a následně roztok o pH 8,1 s přídavkem Cl^- (modelující zkarbonatovaný beton; nasycený roztok CaCO_3 s přídavkem 5 hm. % Cl^- ve formě NaCl). Hodnoty pH byly pro jednotlivé roztoky zaznamenány prostřednictvím skleněné pH elektrody InoLab IDS Multi 9420:WTW.

Před a po expozicích byl ochranný organický povlak výztuže podroben analýze prostřednictvím FT-IR na přístroji NICOLET iZ10 s mikroskopem iN10 technikou ATR na krystale z Ge (knihovna spekter NIST). Snímkování probíhalo vždy ve středech

síťových segmentů vzorků. Snímání povrchu a příčného řezu vzorků před a po expozicích probíhalo na rastrovacím elektronovém mikroskopu TESCAN Vega 3-LMU.

Zkoušky v prostém tahu byly provedeny za účelem stanovení rozdílu pevností vzorků referenčních (bez expozice) a vzorků exponovaných. Zkoušky probíhaly dle postupu popsanych v kap. 3.5. Ve stejném zatěžovacím stroji (TiraTEST 2300) a se stejnou rychlostí zatěžování, tj. 0,05 mm/s.

Dle FT-IR spektrometrie jsou skelná vlákna upevněna do tvaru sítě použitím polyesterových vláken. Polyesterová vlákna jsou v textilním průmyslu již značnou dobu velmi oblíbená díky svým mechanickým vlastnostem a malé navlhavosti. Vůči působení silných kyselin jsou odolné a silné alkalické roztoky rozrušují pouze jejich povrchovou vrstvu [106]. Pomocí FT-IR spektrometrie byl každý vzorek přeměřen vždy celkem třikrát. Před měřením byly vzorky vysušeny v sušárně (24 hodin; 50 °C). Jako ochranná vrstva (povlak) na skelných vláknech je použita melamin-formaldehydová, nebo melamin-urea (močovinová)-formaldehydová pryskyřice (Obr. 72 a Obr. 73). Tuto skutečnost potvrzují charakteristické absorpční pásy v oblasti vlnočtů 3460–3100 cm^{-1} (charakteristické pro primární aminy), dále pak absorpční pásy v oblasti 2900 cm^{-1} (alifatické uhlovodíky C-H), v oblasti 1530 cm^{-1} (C=N–triazinyl) a cca 813 cm^{-1} (triazin) [107][108]. Ve spektru nestárnutých vzorků se rovněž objevují charakteristické absorpční pásy typické pro alkalirezistentní sklo. Jedná se především o pásy v oblasti vlnočtů 1200–800 cm^{-1} („silica vibration“). Specifické absorpční pásy pro alkalirezistentní sklo („AR“) jsou v oblasti vlnočtů 895–900 cm^{-1} a 950–979 cm^{-1} , tyto vlnočty charakterizují odezvu Si–O–Zr [109][110][111][112].



Obr. 72 Příklad idealizované struktury melamin-formaldehydové pryskyřice [112][115]

Melamin-formaldehydová pryskyřice patří do skupiny reaktoplastů (dříve používán termín pryskyřice) do podskupiny aminoplastů (aminopryskyřic) s nejbližší specifikací čisté aminopryskyřice nebo směsné aminopryskyřice (melamin-urea „močovinná“ formaldehydová pryskyřice). Melamin formaldehydová pryskyřice má obecně lepší chemickou odolnost než častěji používaná močovino-formaldehydová pryskyřice. Dále má nižší navlhavost a mírně nadprůměrnou teplotní odolnost. Z obecného hlediska je odolnost melamin-formaldehydových pryskyřic vůči působení silných kyselin a silných zásad omezená. Dlouhodobá stabilita je prokázána pouze pro zředěné roztoky silných kyselin a zásad [113][114].

Tloušťka povlaku aminopryskyřice na vláknech je značně nerovnoměrná, svědčí o tom různá výška píků signalizujících přítomnost SiO_2 ze sklářského kmene soustředných skelných vláken. Je nezbytné zdůraznit, že studované alkalirezistentní sklo nebude zcela přesně odpovídat FT-IR spektru krystalického SiO_2 , neboť skelný materiál je ze své podstaty amorfní a obsahuje další binární oxidy. Výška pásů je vždy hodnocena v poměru k výšce pásů pryskyřice. Lze předpokládat, že dochází k hydrolyze pryskyřice a ta se stává rozpustnou ve vodném prostředí a její vrstva na výztuži se ztenčuje či narušuje vznikajícími póry.

Na Obr. 74 je FT-IR spektrum vzorku exponovaného v modelovém pórovém roztoku s pH 12,6 (2 týdny expozice). Proběhla celkem tři paralelní měření FT-IR spekter různých míst vzorku a výsledky byly znovu porovnány s knihovnou spekter pro čisté látky SiO_2 a melamin-močovino-formaldehydové pryskyřice. Z naměřených spekter v tomto prostředí je zřejmé, že technika FT-IR neprokázala žádné změny a spektrum je obdobné jako spektrum referenčního (nestárnutého) vzorku.

Při studiu obdobně naměřeného spektra při stárnutí vzorků v prostředí s pH 13,0 (2 týdny expozice) se objevují v FT-IR spektru povlakovaného alkalirezistentního skla rozdíly oproti referenčním vzorkům (Obr. 75). V oblastech vlnočtů $3500\text{--}3100\text{ cm}^{-1}$ dochází ke snižování intenzity seskupení píků a také se toto seskupení rozšiřuje. Lze se domnívat, že tato reflexe absorpčních pásů při těchto vlnočtech signalizuje lokální hydrolyzu ochranné pryskyřice. Předpokládanou hydrolyzu pryskyřice podporují změny absorpčních pásů rovněž v oblasti 2900 cm^{-1} (pokles píku), které signalizují snížení odezvy z alifatického uhlovodíkového řetězce pryskyřice. Teorii lokální hydrolyzy podporují znatelnější změny v oblasti cca 1700 cm^{-1} , které signalizují odezvu OH

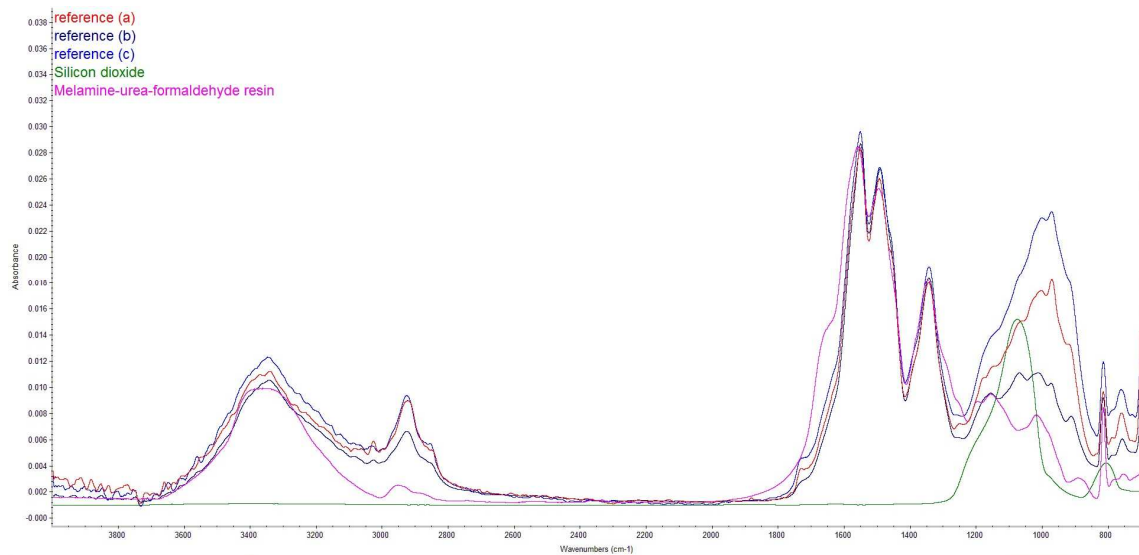
(deformační vibrace) skupiny. Spektrum naměřené u tohoto vzorku poukazuje na nerovnoměrnost vyloučeného povlaku pryskyřice v oblasti vlnočtu 1000 cm^{-1} , kde se objevuje silný pík valenční vibrace Si-O-Si (podkladové skelné vlákno). Toto znamená, že v této oblasti má pryskyřice buď výrazně nižší tloušťku, nebo tloušťka pryskyřice byla oslabena hydrolyzou v alkalickém expozičním prostředí.

Značný stupeň degradace ochranného organického povlaku je však patrný při expozici v modelovém pórovém roztoku o pH 13,5 (2 týdny expozice – Obr. 76). Patrný je další nárůst intenzity absorpčních pásů $3500\text{--}3100\text{ cm}^{-1}$, který opět signalizuje hydrolyzu organického povlaku. Obdobně jako v předešlém případě dochází rovněž ke snížení intenzity absorpce alifatického řetězce v oblasti 2900 cm^{-1} . V tomto případě se ovšem objevuje absorpční pík v oblasti $1550\text{--}1510\text{ cm}^{-1}$, který signalizuje vznik vazby CO–NH v makromolekule pryskyřice, značící její hydrolyzu. Ve spektru je rovněž výraznější posun absorpčních pásů v oblasti 1000 cm^{-1} do oblasti nižších vlnočtů. Tato skutečnost jednoznačně signalizuje vyloučení fází bohatých na Ca^{2+} na povrchu studovaného vzorku. Jedná se buďto o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ sedimentovaný na povrchu CaCO_3 , který vzniká karbonatací z $\text{Ca}(\text{OH})_2$ prostřednictvím vzdušného CO_2 , případně křemičitany vápenaté, které se vytvářejí jako korozní produkty stárnutí skla.

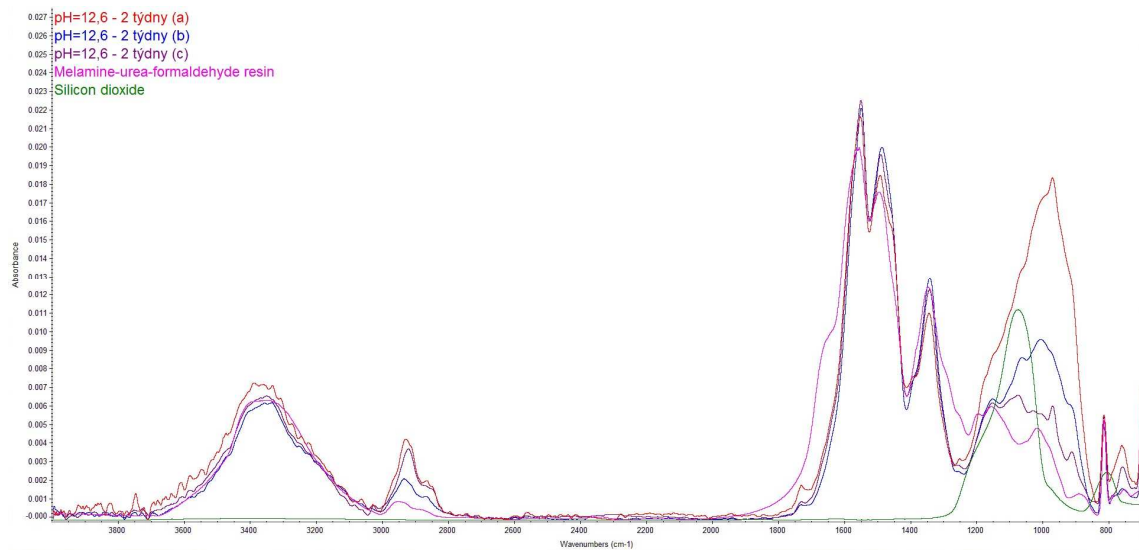
Při studiu FT-IR spekter získaných při expozici vzorků v modelovém pórovém roztoku zkarbonatovaného betonu s pH 8,1 (Obr. 77) nebyly nalezeny zaznamatelné rozdíly oproti referenčním (nestárnutým) vzorkům. Vzorky byly stejně jako ostatní exponovány po dobu 2 týdnů.

Naopak na FT-IR spektrech Obr. 78 při expozici vzorků 2 týdny za stejného pH, ale s přídavkem chloridových aniontů (simulace zkarbonatovaného betonu kontaminovaného chloridovými anionty) jsou drobné rozdíly patrné. Opět se ve spektru objevují změny signalizující hydrolyzu makromolekulárního řetězce pryskyřice. Absorpční pík v oblasti $1550\text{--}1510\text{ cm}^{-1}$ (signalizující vznik vazby CO–NH) a zvyšují se reflexe vazeb Si–O–Si při nízkých vlnočtech.

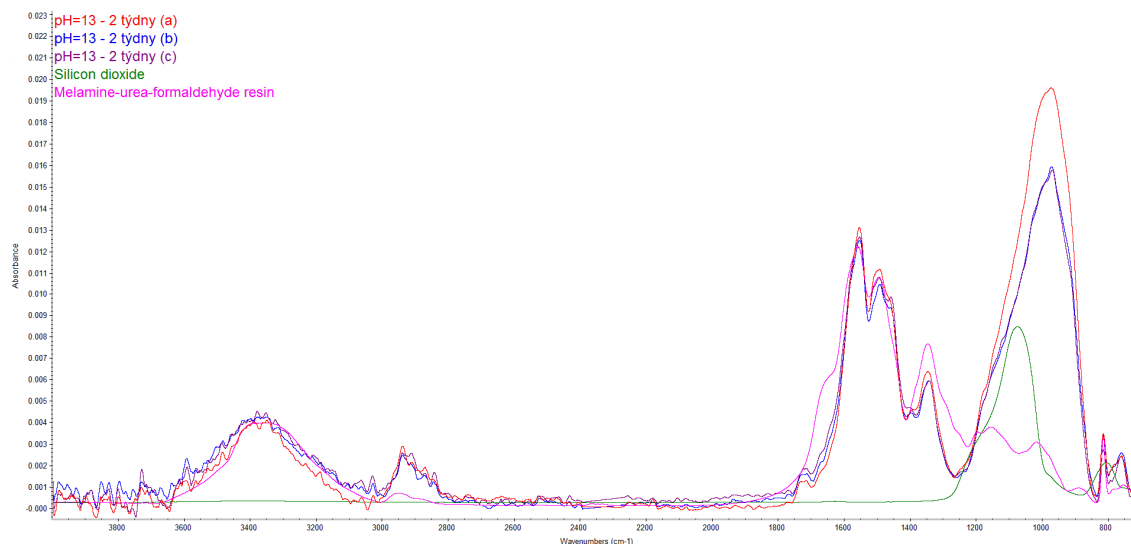
Všechny výše uvedené změny jsou umocněny při pětítýdenních expozicích, tj. v modelových pórových roztocích o pH 12,6 a pH 13,5 (Obr. 79). Především jsou zřetelnější absorpční píky korozních produktů bohatých na Ca^{2+} .



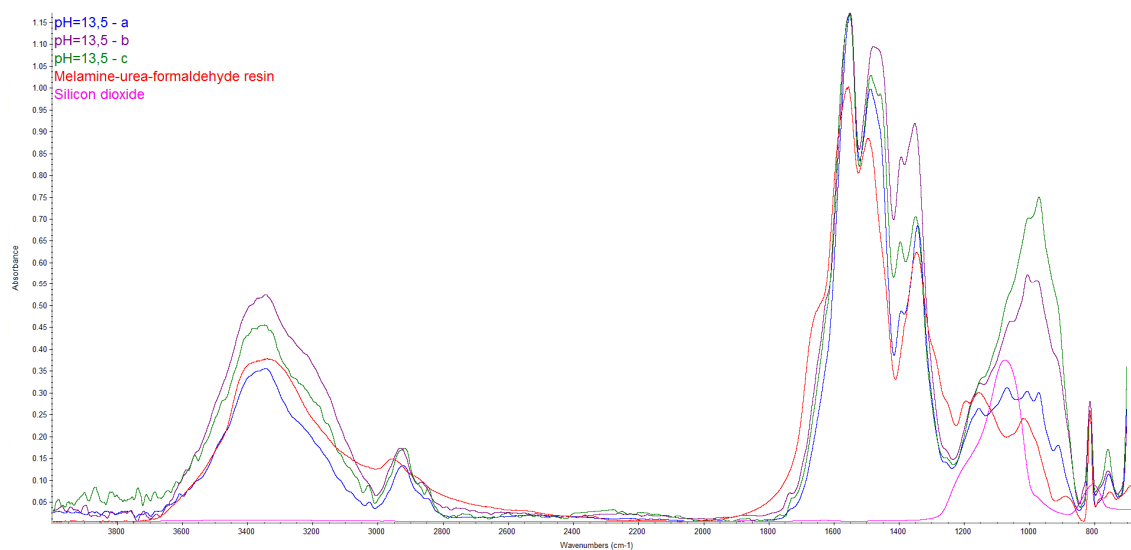
Obr. 73 5 FT-IR spektrum organického ochranného povlaku na textilní skelné výztuži dokazující přítomnost melamin-formaldehydové pryskyřice a její nerovnoměrné tloušťky, referenční (nestárnuté) vzorky



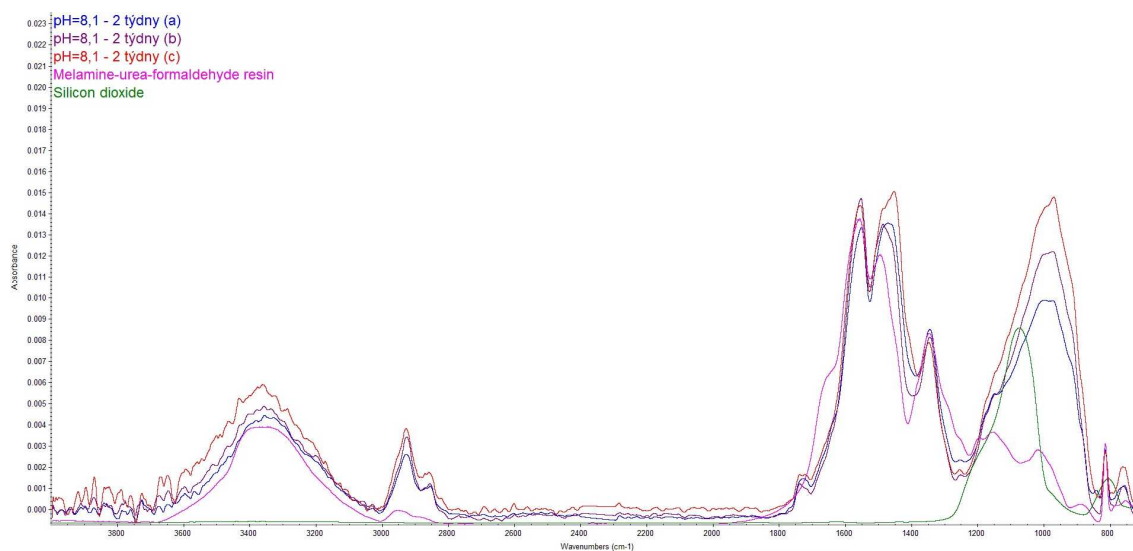
Obr. 74 FT-IR spektrum organického ochranného povlaku na textilní skelné výztuži po 2 týdnech expozice v modelovém pórovém roztoku při pH 12,6 (teoretický beton)



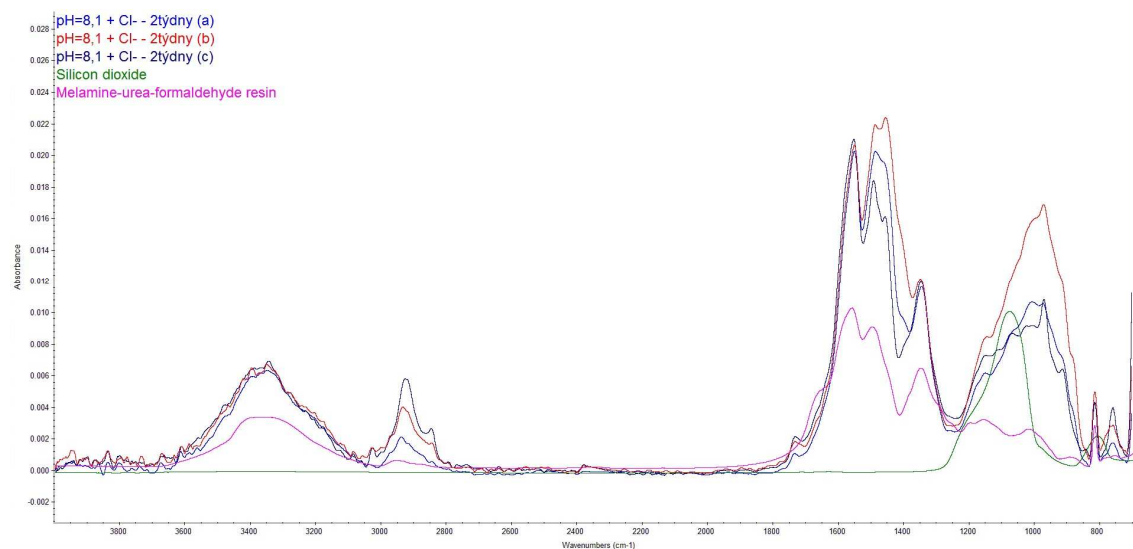
Obr. 75 FT-IR spektrum organického ochranného povlaku na textilní skelné výztuži po 2 týdnech expozice v modelovém pórovém roztoku při pH 13,0 (modelující reálný beton; cement s obvyklým obsahem oxidů alkalických kovů)



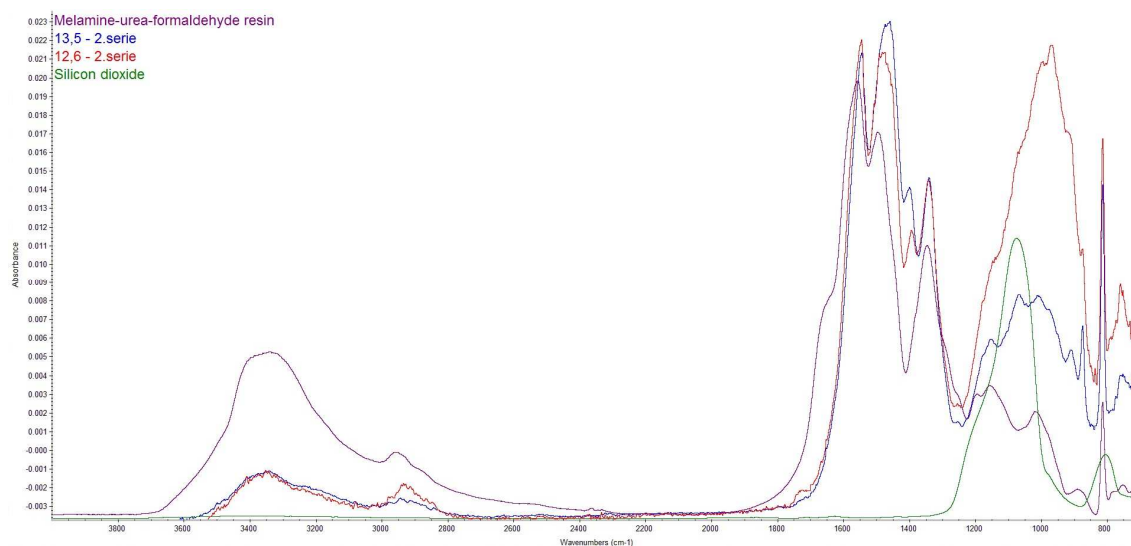
Obr. 76 FT-IR spektrum organického ochranného povlaku na textilní skelné výztuži po 2 týdnech expozice v modelovém pórovém roztoku při pH 13,5 (modelující reálný beton; cement s vyšším obsahem oxidů alkalických kovů), značení a, b, c, je pro 3 paralelní měření na celkem třech místech vzorku



Obr. 77 FT-IR spektrum organického ochranného povlaku na textilní skelné výztuži po 2 týdnech expozice v modelovém pórovém roztoku při pH 8,1 bez přidavku chloridových aniontů

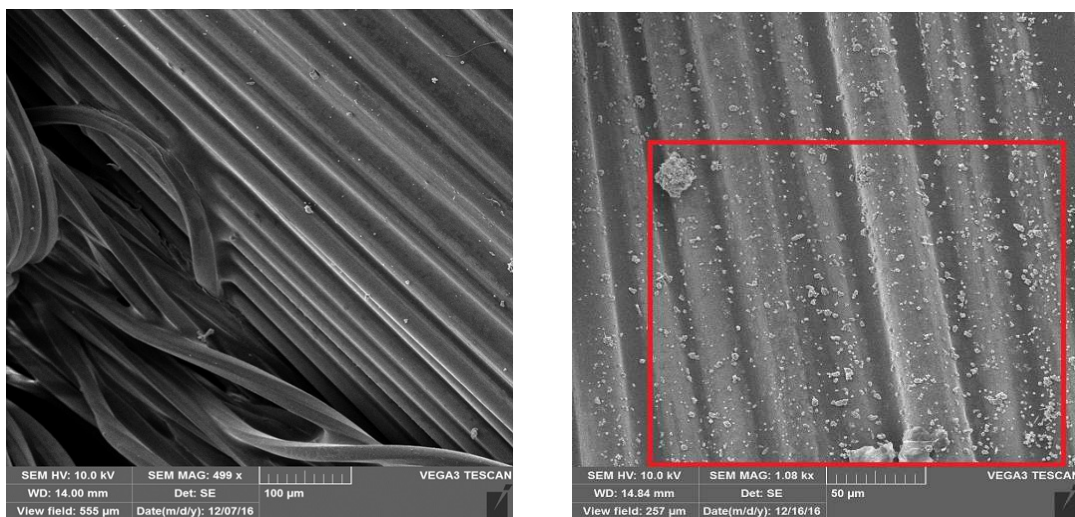


Obr. 78 FT-IR spektrum organického ochranného povlaku na textilní skelné výztuži po 2 týdnech expozice v modelovém pórovém roztoku při pH 8,1 s přidavkem chloridových aniontů



Obr. 79 FT-IR spektrum organického ochranného povlaku na textilní skelné výztuži po 5 týdnech expozice v modelovém pórovém roztoku při pH 12,6 a 13,5

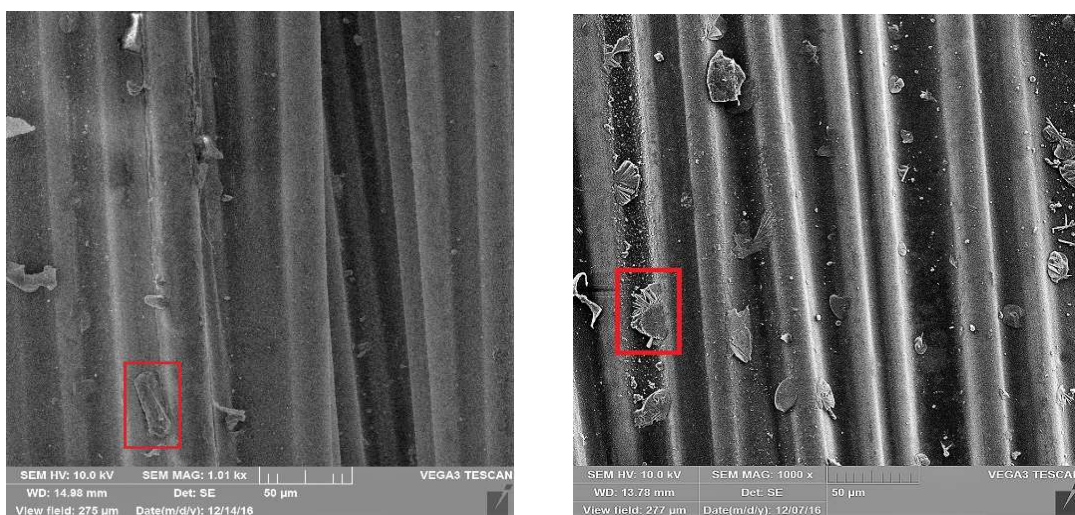
Na základě vyhodnocení výsledků SEM exponovaných vzorků (rastrovací elektronová mikroskopie s EDS prvkovou analýzou) jsou na povrchu exponovaných vzorků, především při expozicích v prostředí o pH 13,5, zřejmé krystaly fází bohatých na Ca^{2+} (případně konglomeráty s vykrystalovanými částicemi $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a KOH), ovšem zastoupeny mohou být i křemičitany vápenaté (korozní produkty stárnutí skla). Výskyt fází bohatých na Ca^{2+} na povrchu exponovaných vzorků je jednoznačně lokalizovaný. Při vzájemném porovnání tohoto zjištění s výsledky FT-IR je zřejmé, že degradace skelné tkaniny může být vyvolána jednak lokalizovanou pórovitostí ochranného povlaku z aminopryskyřice a rovněž i lokální hydrolyzou. Tabulky jednotlivých bodových analýz precipitovaných konglomerátů s obsahem křemíku (expozice při pH 13,5) jsou přiřazeny k jednotlivým snímkům (k Obr. 80 vpravo Tab. 19, k Obr. 81 vlevo Tab. 20). Alkalirezistentnost skelných vláken ve studované textilní skelné výztuži je omezená a lze konstatovat, že zvýšené lokalizované napadení je sledováno při pH 13,5.



Obr. 80 Vlevo vzhled povrchu textilní skelné sítě síťového neexponovaného segmentu, vpravo vzhled povrchu textilní skelné sítě síťového segmentu exponovaného při pH 13,5 po 2 týdnech expozice

Tab. 19 Výsledky EDS analýzy plošného prvkového zastoupení v oblasti vymezené na Obr. 12 (vpravo)

Prvek	Zastoupení [hm. %]
Si	12,8
Ca	3,7
Na	3,4
K	2,6
Cl	0,5



Obr. 81 Vlevo vzhled povrchu textilní skelné sítě síťového segmentu exponovaného při pH 13,5 po 2 týdnech expozice, vpravo vzhled povrchu textilní skelné sítě síťového segmentu exponovaného při pH 13,5 po 2 týdnech expozice

Tab. 20 Výsledky EDS analýzy plošného prvkového zastoupení v oblasti vymezené na Obr. 13 (vlevo)

Prvek	Zastoupení [hm. %]
Si	15,2
Ca	4,6
Na	4,6
K	2,8
Cl	0,7

Tab. 21 Výsledky EDS analýzy plošného prvkového zastoupení v oblasti vymezené na Obr. 13 (vpravo)

Prvek	Zastoupení [hm. %]
Si	0
Ca	11,6
Na	1,9
K	18,4
Cl	0

Z Obr. 81 (vpravo) a přiřazené Tab. 21 vyplývá, že EDS nedetekuje atomy křemíku z podkladu (skelná vlákna) ani z podpovrchu vykrystalizovaného konglomerátu (v tomto případě konglomerát na bázi $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a KOH - zbytky expoziční lázně). Pnutí expandujících krystalů konglomerátů křemičitanů v pórech rozrušuje ochranný organický povlak a usnadňuje vlastní degradační proces v blízkosti primárních nespojitostí povlaku. Významnější poškození je zobrazeno na Obr. 82.

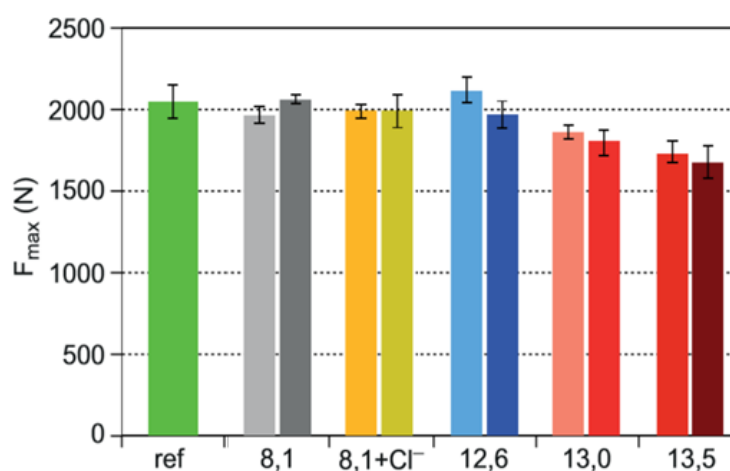


Obr. 82 Snímek zobrazující lokální popraskání ochranného organického povlaku, expozice po 2 týdnech při pH 13,5

SEM/EDS analýza exponovaných vzorků probíhala v režimu plošná prvková analýza. Přesnějších výsledků by bylo dosaženo při bodové analýze jednotlivých vyloučených krystalů. Na hydrolýzu mají evidentně vliv i chloridové anionty. Je však nutné zdůraznit, že dané výsledky nnesvědčí o fatálním poškození skelné výztuže a i v případě negativních výsledků se jedná o mírné korozní napadení.

5.3. Tahová zkouška exponovaných skelných vláken

Zkoušky v tahu byly provedeny vždy na 9ti vzorcích exponovaných ve výše zmíněných agresivních prostředích. Jejich účelem bylo stanovit vliv expozice na tahové vlastnosti skleněné textilní výztuže. Vyhodnocením se prokázal negativní vliv rostoucího pH (Obr. 83). Při pH 13,5 dochází k evidentnímu snížení pevnosti skelných vláken. Toto snížení je způsobeno korozním napadením skelné výztuže, které se externě projevuje vznikem křemičitých konglomerátů na povrchu exponované textilní skelné výztuže. Délka expozice má dle zjištění méně výrazný vliv, rozhodujícím faktorem je hodnota pH. Obdobně jako výsledky FT-IR a SEM/EDS, rovněž i zkoušky pevnosti jednoznačně prokazují, že ani dlouhodobá expozice v modelových pórových roztocích simulujících zkarbonatovaný beton (pH 8,1) a zkarbonatovaný beton kontaminovaný chloridovými anionty (pH 8,1 + Cl⁻) nemá signifikantní vliv na pevnost textilní skleněné výztuže. Vliv chloridových aniontů na poškození skelných vláken se v tomto případě tedy neprokázal.



Obr. 83 Sloupcový diagram zjištěných pevností v tahu textilní skelné výztuže (dělené ve směru osnovy) v modelových pórových roztocích betonu, levé sloupce označují 2 týdenní expozici a pravé 5 týdenní expozici, ref jsou referenční vzorky; uváděny jsou průměrné naměřené hodnoty

5.4. Shrnutí korozních zkoušek skelné výztuže

Z výsledků analýz FT-IR a SEM/EDS jednoznačně vyplývá, že ochranný organický povlak je na skelném skeletu tvořen melamin-formaldehydovou pryskyřicí (aminopryskyřice). Na míru degradace má hlavní vliv hodnota pH, pozorován byl i dopad celkové doby expozice. Při pH 13,5 a době expozice již dva týdny je porušení skelných vláken jednoznačně detekované pomocí SEM/EDS a zkouškou v tahu. Úroveň degradace ochranného organického povlaku je i za definovaných podmínek však relativně malá. Dochází však k jeho hydrolyze a postupnému zeslabení. Povlak dále vykazuje značné nerovnoměrné vyloučení a obsahuje lokální pórovitost. Z těchto důvodů dochází k lokalizovanému koroznímu poškození. Roztoky simulující zkarbonatovaný beton (pH 8,1) a zkarbonatovaný beton kontaminovaný chloridovými anionty (pH 8,1+ Cl⁻) nevyvolávají zásadní degradaci zkoumané nekonvenční výztuže ani po 5 týdnech expozice. Zkoušená skleněná textilní výztuž je velmi stabilní do alkalického prostředí čerstvých betonů s obvyklým obsahem K₂O a Na₂O. Dlouhodobá stabilita je zajištěna i ve zkarbonatovaném betonu, a to i v případě, že je beton kontaminován nadlimitním množstvím chloridových aniontů. Za těchto podmínek by konvenční ocelová výztuž korodovala zcela nepřijatelnou rychlostí. Výsledky provedených experimentů rovněž poukazují na fakt, že ochranný povlak je nanášen na povrch skelné sítě v nerovnoměrné tloušťce a technologie předúpravy povrchu nezajišťuje zhotovení zcela bezporézní struktury.

6. Experimentální zkoušky TRC konstrukčních prvků

Než bylo možné přistoupit k samotným experimentálním testům reálných prvků z TRC, bylo nutné ověřit možnosti jejich výroby. Na základě rešerše byly postupně vyzkoušeny tři varianty postupů, které jsou detailněji popsány v kap. 2.4.

6.1. Výroba vzorků pro zkoušky ve čtyřbodovém ohybu

Po provedených materiálových testech betonové matrice (kap. 3.) a testech textilní výztuže (kap. 4.) byla pro vyztužování vzorků pro ohybové zkoušky TRC vybrána skleněná textilní výztuž ve formě 2D sítě s oky 20/20 mm. Její hlavní výhodou byl poměr ceny k jejím užitným vlastnostem a rovněž možnost zajištění dodávky dostatečného množství výztuže v časově krátkém horizontu. Dodavatelem výztuže je německá firma V. FRASS. Výztuž byla dodána v deskách o rozměrech 1,25/2,0 m a jemností 2400 TEX.

6.1.1. Pilotní betonáž vzorků desek - 1

Na základě provedené rešerše možností výroby prvků TRC byla provedena výroba formy a pokusná betonáž vzorku metodou kladení a odlévání. Dno formy bylo opatřeno sadou podložek z již dříve vyrobených a zatvrdlých vzorků matrice o výšce cca 3 mm a ošetřeno separačním olejem. Na tyto podkladky byla položena 2D síť ze skleněné výztuže. Následně byla do formy lita čerstvá betonová směs až do požadované výšky v jednom pracovním kroku. Po zatvrdnutí byly pilotní vzorky odformovány a umístěny do vodního uložení na minimálně 28 dnů. Následně po 28 dnech byly vzorky zkoušeny v zatěžovacím stroji, kde při porušení vzorků bylo zjištěno, že výztuž při betonáži nezůstala v požadované poloze. 2D textilní výztuž byla místy tvarově deformována a lokálně také vyplavala po výšce v průřezu, místy až do úrovně neutrální osy průřezu.

6.1.2. Pilotní betonáž vzorků desek - 2

Na základě negativních zkušeností s betonáží pomocí kladení a odlití bylo přistoupeno k modifikaci pracovního a technologického postupu. Výroba proběhla formou laminování. Tato metoda využívá stejnou formu bez nutných úprav, výrobní postup je následující. Celý vzorek je odlit v jednom kroku bez dříve vložené výztuže. Následně po dosažení požadované výšky je na povrch uložena textilní výztuž ve formě

desky a rovnoměrným tlakem (zednickou lžící či válečkem) je vtlačena přes povrch vzorku do průřezu. Nevýhodou této metody je špatná kontrola nad rovinností ponořované výztuže a hloubkou jejího ponoření (krytím). Vzorky vyrobené formou laminování jsou zachyceny na Obr. 84.



Obr. 84 Vzorky desek o rozměru 2000/250/30 mm vyrobené laminováním na transportním vozíku, povrch je opatřen nátěrem proti odparu

Po provedení zátěžových zkoušek a zlomení desek bylo zjištěno, že ani tato metoda nepřináší příliš uspokojivé výsledky. Krytí textilní výztuže je značně nerovnoměrné, kdy se jeho hodnota pohybovala od cca 1,5 do 5 mm. Tento jev je způsoben nerovnoměrným (ručním) zatlačením výztuže do povrchu vzorku. Výztuž prvek však zůstává rovinná. V místech s malým krytím docházelo při zkouškách k delaminaci výztuže a betonu. Při zatížení se povrchová vrstva místy oddělila od výztuže. Minimální doporučená vrstva krycího betonu je stanovena hodnotou cca 3 mm [4][57][116]. Ani tato metoda tedy nepřinesla uspokojivé výsledky a muselo dojít k další modifikaci výrobního postupu.

6.1.3. Pilotní betonáž vzorků desek - 3

Další pokusná betonáž byla provedena pomocí méně zmiňované varianty, kdy je deska výztuže vypnutá nebo lehce předepnutá mezi stěny formy. Pro zhotovení desek při použití tohoto výrobního postupu bylo nutné navrhnout a vyrobit speciálně upravené formy. Stěna formy se skládá z více dílů spojených šrouby. První plochý díl má výšku cca 3 mm, následuje místo pro vložení textilní výztuže, další díl má výšku cca 2 mm, následuje místo pro případné vložení výztuže ve druhé vrstvě. Poslední díl stěny má

výšku 15 mm. Celková výška stěny formy je tak 20 mm. Případně je možné výšku modifikovat dle posledního dílu stěny formy. Po zlomení desek z pilotní betonáže metodou 3 bylo prokázáno, že výztuž je ve formě dobře fixována a tento výrobní postup je tedy vhodný. Při zkouškách bylo rovněž prokázáno, že do šířky 250 mm není nutné výztuž dále podkládat a bránit jejímu prohnutí při betonáži. Při šířkách větších by muselo dojít k výraznému silovému předeprnutí výztuže nebo musí být výztuž lokálně podpírána podkladky. Pokud toto podepření není realizováno, tak vlivem malé tuhosti 2D sítě dojde k její deformaci ve směru výšky formy. Příčný řez zlomenou deskou s dobře fixovanou polohou výztuže je na Obr. 85.



Obr. 85 Příčný řez zlomené desky 1100/120/20 mm, poloha výztuže cca 3 mm od dolního líce

6.1.4. Specifikace výrobního postupu pro desky z TRC

Po vyhodnocení pilotních betonáží bylo rozhodnuto, že všechny další zkušební vzorky budou betonovány formou vypnutí výztuže ve formě a následným litím čerstvé betonové směsi. Pokud tedy nebude zmíněno jinak, tak všechny vzorky, ač různých rozměrů, byly vyrobeny právě touto metodou. Stěny formy byly vždy vymazány separačním minerálním olejem, drobné skuliny v místech průchodu výztuže formou byly vyplněny silikonovým tmelem. Na vypnutou výztuž byla z malé výšky postupně nalévána čerstvá betonová směs. Její povrch byl následně opatřen přípravkem proti nežádoucímu odparu a vzorky byly přikryty geotextílií po dobu 24 hodin. Následně došlo k odformování vzorků a uložení do vodní lázně. Vzorky byly zkoušeny nejdříve po 28 dnech. Před zkouškou byly také odstraněny přesahující kusy výztuže. Limitem pro velikost vzorků bylo maximální množství směsi připravené v jedné záměsi (z počátku 7 l, v poslední fázi řešení pak cca 35 l). Nutno podotknout, že kromě zkušebních prvků (desek aj.) bylo vždy nutné vyrobit doprovodná zkušební tělesa ve formě trámečků

40/40/160 mm, případně krychlí o hraně 100 mm, a to z důvodu ověření materiálových charakteristik betonové matrice. Pro potřeby zkoušek spojených s dizertační prací byly vyrobeny desky o dvou základních rozměrech 1100/120/20 mm (s jednou nebo dvěma vrstvami výztuže) a 2000/250/30 mm s jednou vrstvou výztuže. Dále byla vyrobena tělesa s I profilem. Jejich rozměr a výrobní postup je specifikován v rámci popisu samotné zkoušky, stejně tak je provedeno i u zkoušek bílých TRC desek s přidanými rozptýlenými PVA vlákny.

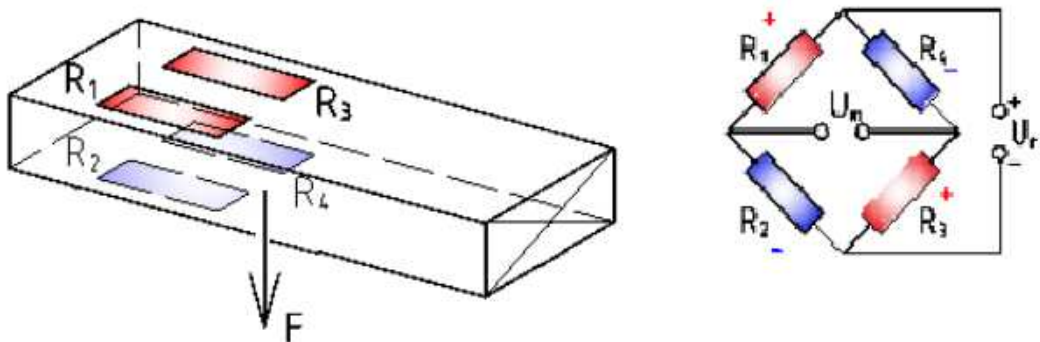
6.2. Zkouška TRC desek se soustřednou výztuží (4 bodový ohyb)

Vyrobené TRC desky vyztužené skleněnými vlákny byly až do doby zkoušky uloženy ve vodním uložení, minimálně však po dobu 28 dnů. Několik dnů před zkouškou byly vyndány a ponechány v laboratorních podmínkách při $t = 20 \pm 2$ °C a $RH = 45 \pm 5$ %. Celkem bylo takto kondicionováno 9 desek pro zkoušky ve 4 bodovém ohybu. Desky označené jako B4, B8, B9, B10, B11 a B12 měly výztuž uloženou v jedné vrstvě přibližně 3 mm od líce betonu (desky B8, B9 a B10 byly navíc osazeny tenzometry pro měření poměrných deformací při ohybové zkoušce). Dále desky B2-2x, B5-2x a B6-2x byly vyztuženy dvěma vrstvami skleněné textilní výztuže, první s krytím 3 mm, druhá s krytím 5 mm. Jak je ze značení zřejmé, desky pocházely z více betonáží, konkrétně tří. Při každé betonáži, tj. z každé připravené záměsi byla vždy vyrobena minimálně jedna deska s výztuží ve dvou vrstvách, a to z důvodu zmírnění dopadů mírných rozdílů v pevnostech mezi jednotlivými betonážemi. Tento postup pomohl částečně eliminovat dopady rozdílných pevností v tahu za ohybu při vyhodnocení zkoušek. Každá vrstva výztuže obsahovala 6 osnovních vláken výztuže (1 x osnova = 2400 TEX).

6.2.1. Postup zkoušky ve čtyřbodovém ohybu

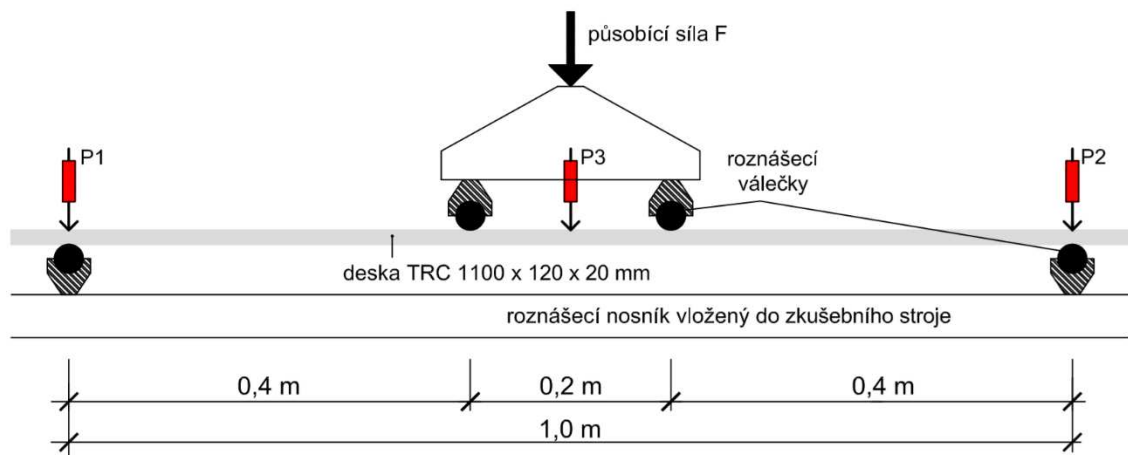
Každá deska výše zmíněná, vyrobená dle postupu specifikované v kap. 5.1.4. byla podrobena zkoušce ve čtyřbodovém ohybu. Zkoušky byly řízeny rovnoměrným nárůstem deformací až do porušení. Zkoušky byly realizovány rychlostí 0,05 mm/s, pomocí posunu horního příčnicku až do vzniku první ohybové trhliny. Následně byla rychlost zvýšena až na 0,1 mm/s. Důvodem zvýšení bylo zkrácení celkového času zkoušky, i tak však doba zkoušky jednoho vzorku byla vzhledem k vysokým průhybům 15–20 minut. V rámci zkoušek byl měřen průhyb ve středu rozpětí a také byla kontrolována poloha obou podpor.

Měření deformací bylo provedeno pomocí potenciometrických lineárních snímačů dráhy Novotechnik s pracovním rozsahem 100 (P3) a 50 (P1 a P2) mm a rozlišovací schopností 0,01 mm (Obr. 87). Jednotlivé zkoušky byly provedeny ve zkušebním zatěžovacím stroji TiraTEST 2300, který dále zaznamenával změnu síly v čase. Na deskách B8, B9 a B10 byly osazeny odporové tenzometry, měřící poměrné přetvoření v daném místě vzorku. Tyto tenzometry byly umístěny na dolním líci desek tak, aby snímaly poměrné přetvoření v nejvíce namáhaném průřezu. Při zkoušce čtyřbodovým ohybem je to oblast mezi břemeny roznášecího vahadla. Tenzometry byly zapojeny do plného mostu (Obr. 86) pomocí tzv. Wheatstonova můstku [117]. Pomocí tohoto zapojení je kompenzován vliv teploty, účinky normálové síly a také je čtyřnásobně zvýšena citlivost samotného měření poměrných deformací.

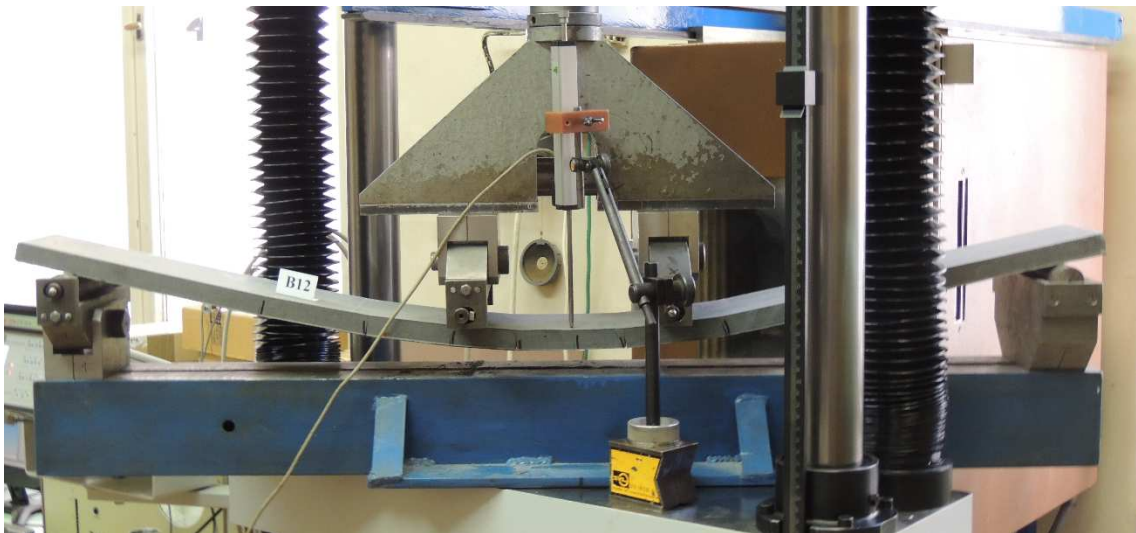


Obr. 86 Schéma nalepení a zapojení tenzometrů do plného můstku při zkoušce ve čtyřbodovém ohybu, Wheatstonův můstek [117]

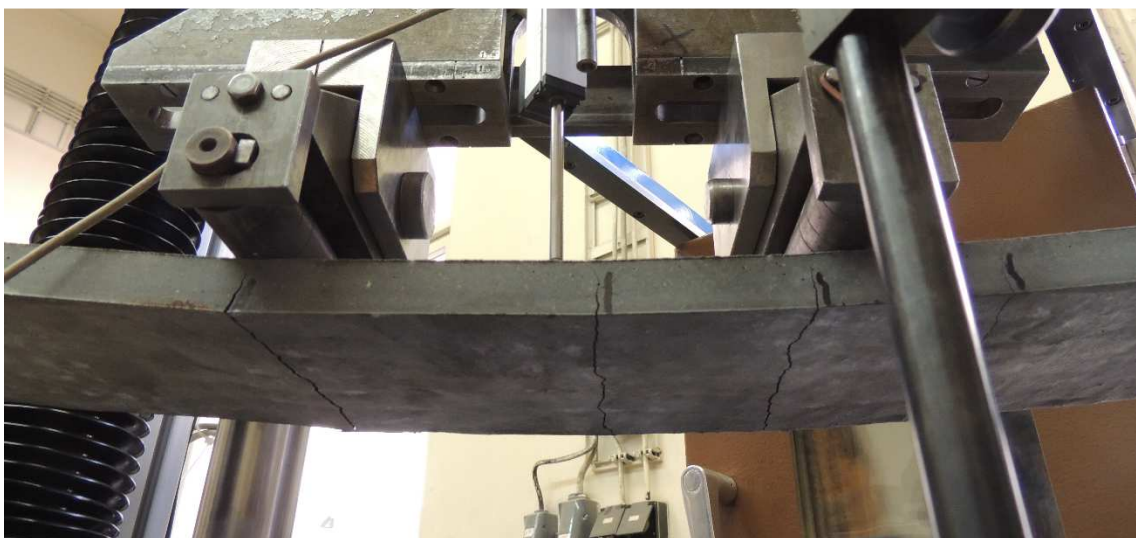
Před zahájením zkoušky byly změřeny geometrické rozměry vzorků a vzorky byly také zváženy. Takto připravené vzorky byly vloženy do zatěžovacího stroje, osazeny snímači a po zahájení měření bylo zahájeno rovněž snímání měřených veličin. Důležitým faktorem zkoušky je rychlost vzorkování záznamu, kdy při příliš pomalém vzorkování nedojde k zachycení všech jevů, které symbolizují typické chování TRC kompozitu. Na základě zkušeností z pilotních testů byla zvolena rychlost vzorkování 5 Hz, tj. (tj. 5x za sekundu). Schéma zatěžovací zkoušky je zachyceno na Obr. 87. Při samotné zkoušce byl sledován také rozvoj trhlin. První trhliny vznikaly většinou v místě maximálního průhybu (střed rozpětí) nebo v oblasti pod zatěžovacím válečkem vahadla. Na každém vzorku vzniklo během zkoušky cca 6 až 8 trhlin, které se postupně rozevíraly, až do šíře 2 či 2,5 mm. Průběh zkoušky je zachycen na Obr. 88, dolní líc desky těsně před kolapsem na Obr. 89 a způsob porušení na Obr. 90.



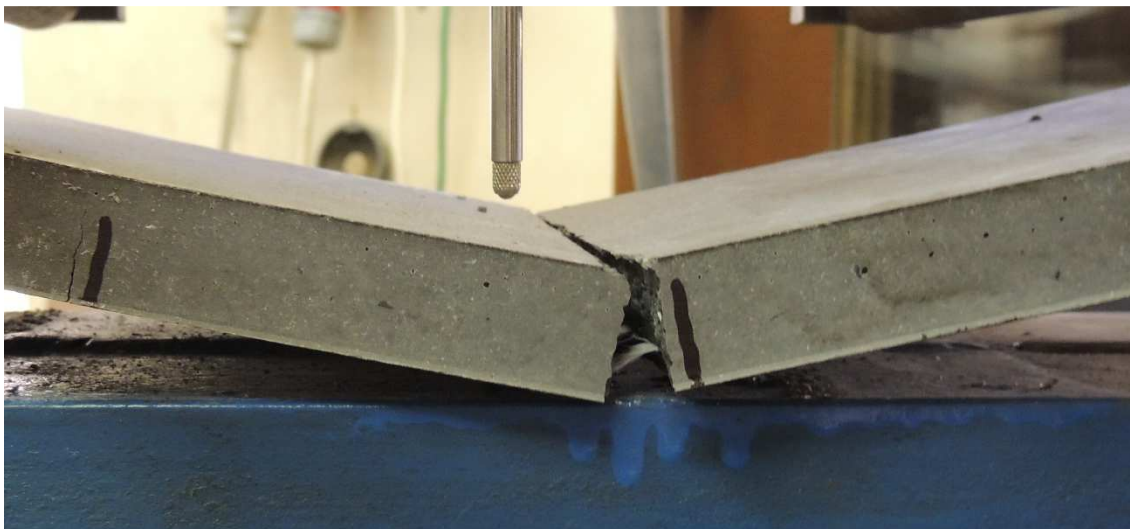
Obr. 87 Zatěžovací schéma zkoušky ve čtyřbodovém ohybu



Obr. 88 Zatěžovací zkouška desky B12, doba těsně před porušením, průhyb cca 80 mm



Obr. 89 Pohled na dolní líc TRC desky v průběhu zkoušky, aktuální průhyb cca 50 mm



Obr. 90 Deska TRC po kolapsu (přetržení výztuže cca ve středu rozpětí)

6.2.2. Shrnutí zkoušek a vyhodnocení

Z průběhu zkoušek je zřejmé, že první trhliny vznikají poměrně brzy, a to vyčerpáním tahové pevnosti betonu (tj. vyčerpáním únosnosti samotné matrice). Příspěvek nekonvenční výztuže k únosnosti kompozitu TRC do vzniku první trhliny lze jen složitě kvantifikovat, ale vzhledem k porovnáním s ohybovou zkouškou samotné matrice na totožných vzorcích lze konstatovat, že je jen velmi malý. Grafy zatížení vykazují až do vzniku první trhliny v podstatě lineární průběh. Po vzniku první trhliny dochází k prudkému poklesu přenášené síly. Postupně se stále více aktivuje skleněná výztuž a její aktivace roste až do vzniku další trhliny. S každou další trhlinou následují poklesy síly, které se však postupně zmenšují (oblast tahového pseudo zpevnění). Toto je způsobeno stále výraznější aktivací samotné výztuže. Kolaps prvku nastává ve chvíli, kdy mezní hodnota napětí ve výztuži překročí její pevnost. Výše popsáný jev je typický pro všechny TRC prvky vyztužené soustřednou výztuží.

Při zkouškách desek vyztužených dvěma vrstvami výztuže dochází k totožnému průběhu. Dochází však k oddálení vzniku první trhliny. To je způsobeno částečným zapojením i druhé vrstvy výztuže, která zvýší únosnost kompozitu do první trhliny přibližně o 15 %. Z provedených zkoušek byly zpracovány grafické výstupy (Obr. 91 a Obr. 92) a vyhodnoceny rozhodující veličiny (Tab. 22) jako jsou průhyb při vzniku první trhliny, celkový průhyb, síla a napětí při vzniku první trhliny (Rov. 9) a pomocí záznamů z tenzometrů byl vypočten (Rov. 10) také modul pružnosti (Tab. 23).

$$\sigma_1 = \frac{M_1}{W} = \frac{\frac{F_1}{2} \cdot 0,4 \cdot L}{\frac{1}{6} \cdot b \cdot h^2} \quad \text{Rov. 9}$$

$$E = \frac{\sigma_1}{\varepsilon} \quad \text{Rov. 10}$$

kde:

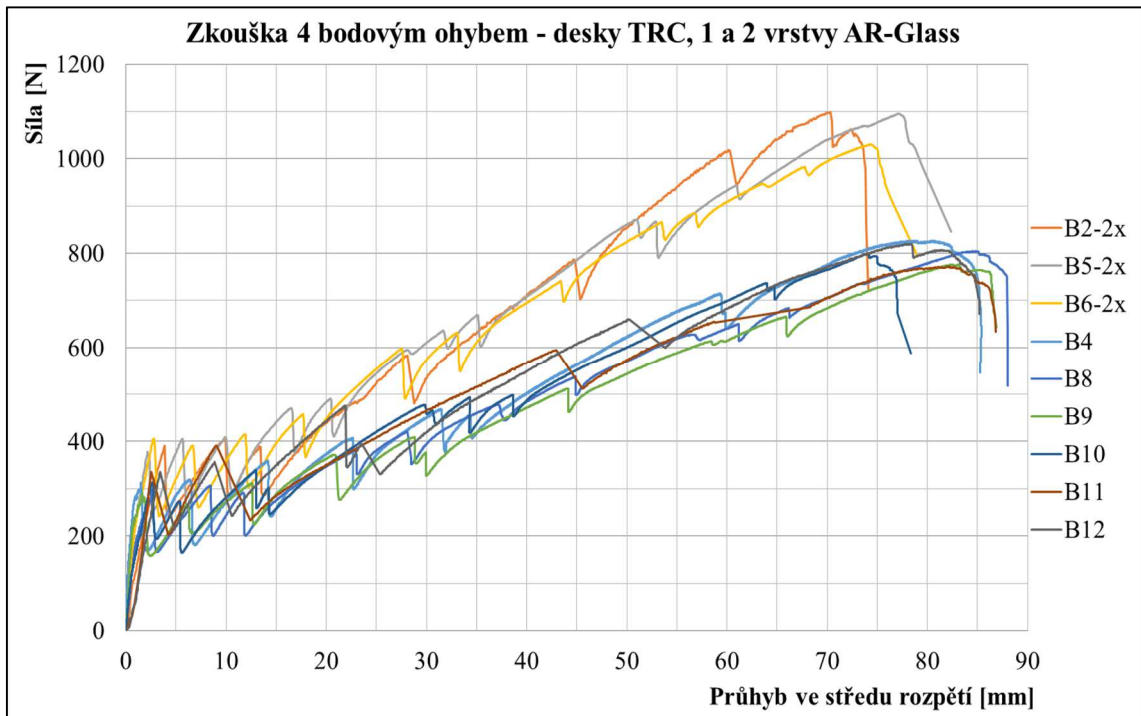
- σ_1 maximální dosažené napětí při vzniku první trhliny [MPa]
 F_1 síla při vzniku první trhliny [kN]
 L vzdálenost podpor [m]
 W modul průřezu [m³]
 b/h šířka/výška průřezu [m]
 ε poměrné přetvoření [mm/m]
 E modul pružnosti [GPa]

Tab. 22 Vyhodnocení zkoušek ve čtyřbodovém ohybu TRC desek

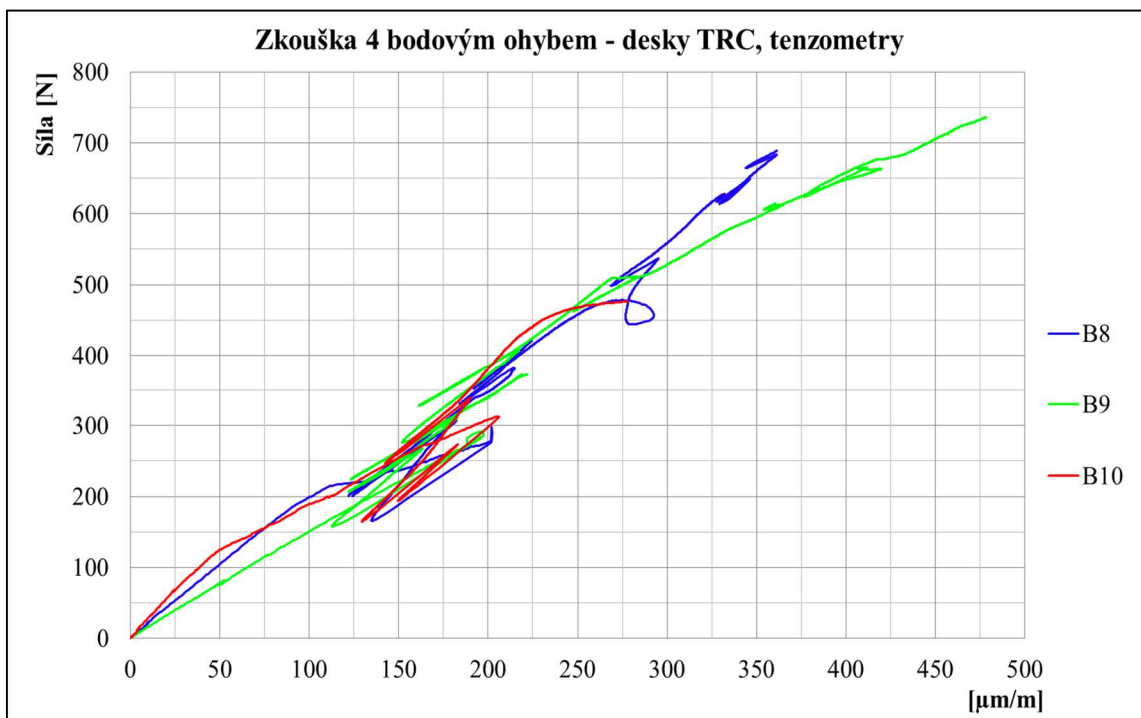
Označení vzorků	Rozměry			Hmotnost [g]	Objem. hmotnost [kg/m ³]	Průhyb při vzniku první trhliny [mm]	Celkový průhyb při max. síle [mm]	Tah za ohybu	
	l [mm]	h [mm]	b [mm]					Síla při vzniku trhliny [N]	Napětí při vzniku trhliny [MPa]
B2-2x	1101	20,47	121,1	6391	2342	3,85	72,35	391,3	9,3
B5-2x	1103	20,59	120,9	6386	2326	2,29	77,18	378,6	8,9
B6-2x	1101	20,66	121,3	6404	2321	2,81	74,44	405,3	9,4
Průměrná pevnost - 2x vrstva AR-Glass, krytí 3 a 5 mm [MPa]									9,2
B4	1102	19,87	120,8	6235	2357	1,53	77,54	312,7	7,9
B8	1102	19,79	120,0	6131	2343	2,54	84,83	298,2	7,6
B9	1103	19,73	119,9	6148	2356	1,91	84,94	291,6	7,5
B10	1101	19,95	120,0	6237	2366	2,72	74,67	312,6	7,9
B11	1104	20,52	120,4	6415	2352	2,56	82,23	336,0	8,0
B12	1103	20,63	120,3	6401	2338	3,43	80,98	335,3	7,9
Průměrná pevnost - 1x vrstva AR-Glass, krytí 3 mm [MPa]									7,8
Poměr mezi pevnostmi 1x, 2x vrstva AR-Glass [%]									15,2

Tab. 23 Vyhodnocení zjištěného modulu pružnosti při zkoušce čtyřbodovým ohybem

Označení vzorků	Poměrné přetvoření z tenzometrů [μm/m]	Napětí při vzniku trhliny [MPa]	Modul pružnosti za ohybu [GPa]
B8	202,1	7,6	37,7
B9	196,1	7,5	38,2
B10	206,0	7,9	38,1
Průměrná hodnota modulu pružnosti [GPa]			38,0



Obr. 91 Záznam ze zkoušky ve čtyřbodovém ohybu, zkouška řízena deformací



Obr. 92 Záznam z měření tenzometrů při zkoušce čtyřbodovým ohybem

Rozhodujícím kritériem vzniku prvních trhlin je pevnost betonové matrice v tahu za ohybu, protože až v této chvíli dochází k výraznější aktivaci samotné výztuže. Následně po vzniku trhlin však TRC prvky dokáží přenášet síly, které odpovídají mnohdy 2 až 3 násobku hodnot sil při vzniku první trhliny a to společně s velmi výrazným

průhybem (i několik desítek mm). Toto chování bylo popsáno pomocí grafu závislosti síly na průhybu a ze záznamů tenzometrického měření (závislost síly na poměrných přetvořeních). Záznam tenzometrického měření je až do porušení tenzometrů v zásadě lineární. Výjimkou jsou místa, kde dochází ke vzniku trhlin. Vznik trhlin se na grafu projevuje jako výrazné kolísání přetvoření, po ustálení však následuje vždy další lineární růst deformací (Obr. 92).

Průměrná hodnota zjištěného napětí při vzniku první trhliny dosáhla asi 7,8 MPa při uvažování varianty s jednou vrstvou výztuže (uvažováno je lineárně pružné chování dle Rov. 9). V případě výztuže ve dvou vrstvách je hodnota napětí při vzniku trhliny asi 9,2 MPa (rovněž dle Rov. 9). Přidáním druhé vrstvy výztuže byla zvýšena hodnota síly nutné pro porušení vzorků o cca 15 %, kde díky výraznějšímu zapojení výztuže v průřezu dochází k lepší distribuci vznikajících mikrotrhlin. Hodnota průhybu při vzniku první trhliny je poměrně rozkolísána a dosahuje 1,5 až 3,8 mm. Maximální změřený průhyb byl cca 80 mm. Vypočtená hodnota modulu pružnosti 38 GPa je asi o 5 GPa nižší (díky mikrotrhlinám) než při standartní zkoušce modulu pružnosti zjišťovaného v tlaku dle ČSN ISO 6784 [118].

6.3. Zkouška bílých TRC desek s rozptýlenou výztuží (4 bodový ohyb)

Jak bylo již nastíněno v rešeršní části dizertační práce, Kloknerův ústav se podílel na zkoušení materiálových parametrů a optimalizace matrice fasádních desek z TRC, které byly použity pro obklad objektu Malmö Live Kontor. Tyto desky vynikají hned v několika parametrech, především se jedná o jejich velmi nízkou tloušťku (jen 15 mm) a vysokou únosnost, které je docíleno kombinací několika materiálů. Tím je především kvalitní jemnozrnná UHPC matrice s bílým probarvením, dále pak přidání PVA vláken jako formu rozptýlené výztuže a v neposlední řadě umístění skleněné textilní tkaniny ve formě 2D sítě.

6.3.1. Složení směsi a příprava zkoušky

Na výrobu 1 m³ UHPC směsi bylo použito 650 kg bílého cementu CEM I 52,5 N bílý, 132 kg vápence a TiO₂ (oxid titaničitý, tj. titanová běloba), 1264 kg normového písku a mletého křemene (maximální frakce 1,6 mm), 164 kg vody, 37,6 kg superplastifikační přísady a cca 0,9 kg PVA (polyvinylalkohol) vláken délky 19 až

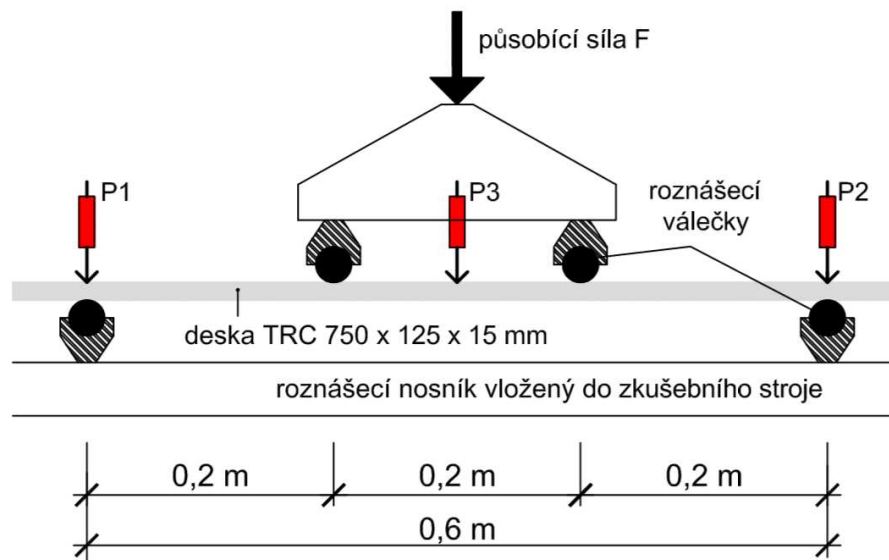
20 mm. Použitá PVA vlákna splňovala požadavky ČSN EN 14889-2 [119], jednalo se o mikrovlákna s průměrem $<0,30$ mm (jednovláknovitá, tj. monofilamentická). Do předem připravené formy byla tato směs nalévána a na závěr byla do směsi zalisována 2D textilní výztuž s oky 20/20 mm a jemností 2400 TEX. Z výše uvedeného popisu plyne, že desky byly betonovány v obrácené poloze, tj. tažená výztuž byla vkládána do formy shora a pro potřebu zkoušek a umístění v konstrukci bylo nutné vzorky otočit. Zkušební vzorky bylo nutné vzhledem k nepravidelnému tvaru a velkým rozměrům původních desek nařezat na velikost, která umožňuje umístění do zkušebního stroje. Vzniklo tak 6 vzorků TRC desek o rozměrech 750/125/15 mm, vzorky byly pracovníě označeny jako 1 až 6_PVA + 2D.

V rámci realizace experimentu byla také vyrobena doprovodná zkušební tělesa (krychle 150/150/150 mm, válce 150/300 mm a trámečky 40/40/160 mm) pro stanovení materiálových vlastností UHPC matrice jako je, objemová hmotnost, pevnost v tlaku, statický modul pružnosti, pevnost v tahu za ohybu. Průměrné naměřené hodnoty po 28 dnech jsou následující: objemová hmotnost 2370 kg/m^3 , krychelná pevnost 97,8 MPa (na krychli o hraně 150 mm), případně až 124,9 MPa (u krychlí o hraně 40 mm), válcová pevnost 89,6 MPa, statický modul pružnosti 35,8 MPa a pevnost v tahu za ohybu 21,6 MPa.

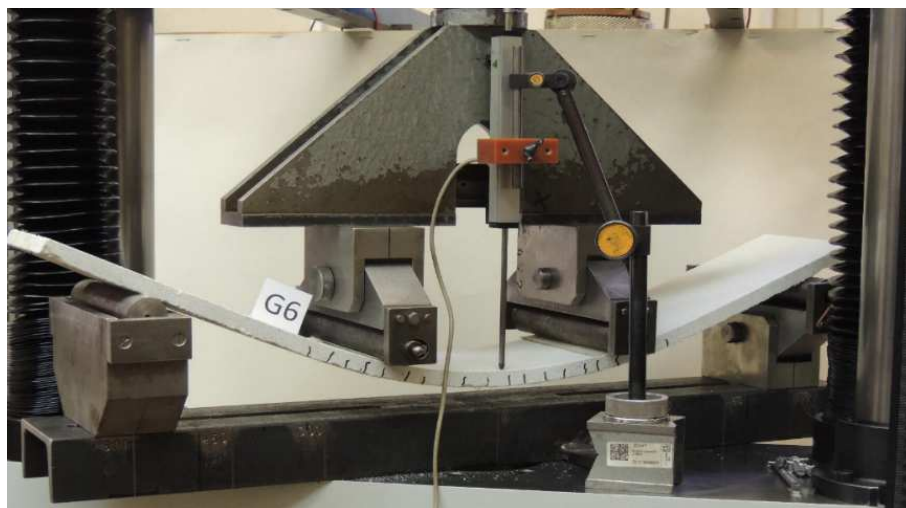
6.3.2. Průběh zkoušky ve čtyřbodovém ohybu

Zkouška byla provedena ve standartním upořádání zkoušky ve čtyřbodovém ohybu (Obr. 93), avšak s modifikací vzdálenosti podpor oproti kap. 6.2. Zkušební přípravek se vzorkem byl vložen do zatěžovacího stroje TiraTEST 2300. Průběh zkoušky byl kontinuálně zaznamenáván pomocí automatické měřící ústředny Autolog 2100, kde byla především registrována změna působící síly F v čase t , průběh deformací v podporách (P1 a P2) a průhyb ve středu rozpětí (P3). Pro účely měření průhybu a posunu podpor byly opět využity (Obr. 93) potenciometrické lineární snímače dráhy Novotechnik s pracovním rozsahem 100 (P3) a 50 (P1 a P2) mm a rozlišovací schopností 0,01 mm. Při zkoušce byl rovněž zaznamenán postupný rozvoj trhlin. Rychlost zatěžování byla 0,01 mm/s, a to až do vzniku první trhliny a následně po vzniku první trhliny byla rychlost zvýšena na 0,05 mm/s. Při zkoušce TRC se soustřednou i rozptýlenou výztuží vznikaly v elementech znatelně menší trhliny než v případě prvků pouze se soustřednou výztuží. Maximální šíře zjištěných trhlin byla 0,3 až 0,4 mm. Trhlin však vzniklo znatelně více.

Konkrétní počet trhlin záležel na dílčím vzorku, ale obecně se jednalo o 15 až 20 trhlin. Například na vzorku G6 bylo 19 trhlin. Jejich rozmístění je patrné z přiložené fotografie (Obr. 94). Rychlost vzorkování byla s ohledem na použitý měřicí systém nastavena na 1 Hz, tj. 1 x za sekundu.



Obr. 93 Uspořádání zkoušky čtyř bodovým ohybem ve zkušebním stroji TiraTEST

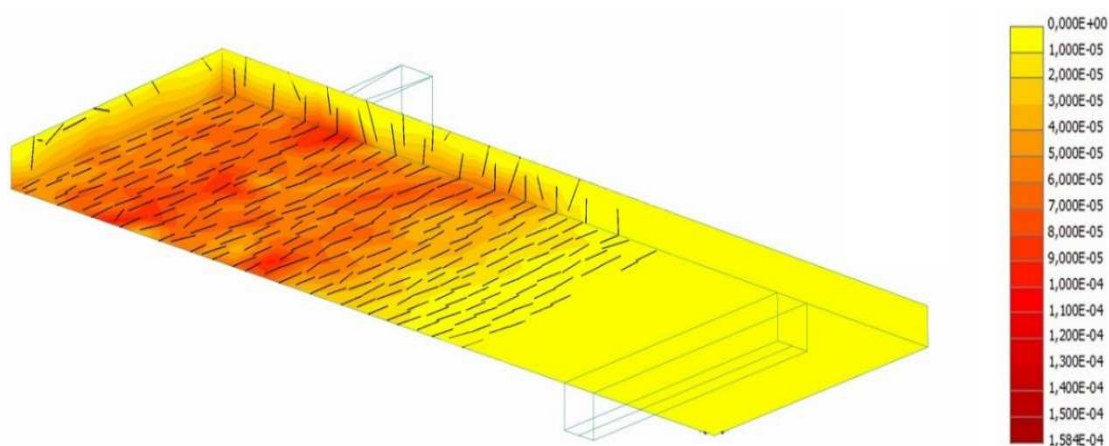


Obr. 94 Průběh experimentu desky G6 - působící síla cca 1700 N, průhyb ve středu rozpětí více než 70 mm (doba těsně před porušením po odstranění snímačů P1 a P2)

6.3.3. MKP analýza zkoušky čtyřbodovým ohybem

Vzhledem k potřebě predikce chování TRC desek [120] z bílého UHPC i jiných rozměrů a tvarů byl sestaven rovněž počítačový model a provedena porovnávací

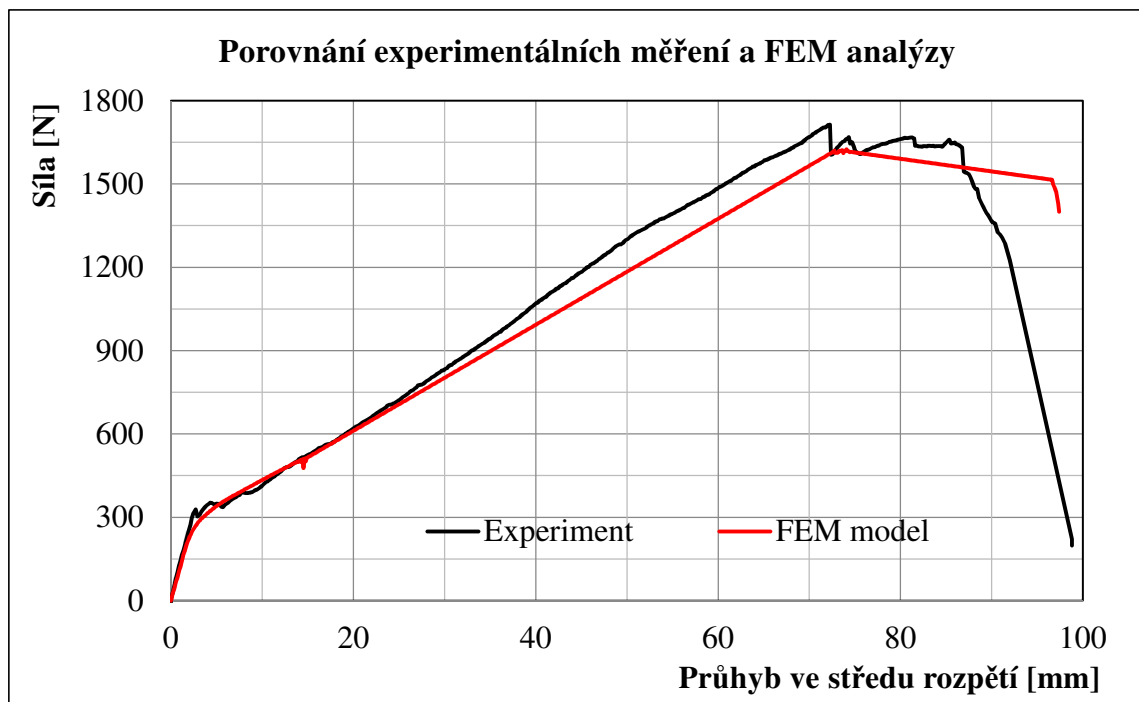
numerická analýzy zkoušky. Počítačový model pro numerickou analýzu byl vytvořen v prostředí softwaru Gid 11. Následně byl tento zhotovený model převeden do programu ATENA [121] od firmy Červenka Consulting. Software ATENA se více hodí pro výpočty nelineární metodou [122][123][124] a lze v něm modelovat i vznik a rozvoj trhlin na zkoušených prvcích. Vzorek byl vymodelován jako jeden dílčí element, který se skládá z výztuže a matrice o zadaných parametrech, které byly převzaty z materiálových zkoušek. Z důvodu ulehčení výpočtů byl vzorek modelován jako symetrická konstrukce, tj. pouze polovina zkušební tělesa. Výztuž byla do modelu vkládána pomocí přímých prutů s přiřazeným profilem 1,5 mm a s roztečí jednotlivých ok sítě 20 mm (tj. dle skutečných naměřených parametrů). Stejně jako byly vloženy do modelu parametry matrice, byly také vloženy parametry textilní výztuže, především však modul pružnosti E a pevnost v tahu (kap. 4.5). Na rovině symetrie je zabráněno otáčení kolem vodorovné osy (osa kolmo na rozpětí) a v podpoře horizontálnímu posunutí. Na modelovanou desku byly přidány ocelové roznášecí prvky, a to v místě podpor a zatěžovacích válečků, které slouží k přenosu zatížení na modelovanou konstrukci. Samotné zatížení je realizováno pomocí posunu velikosti 0,1 mm v každém zatěžovacím kroku. V rámci výpočtu je sledována především dosažená síla a posunutí (průhyb) ve středu rozpětí prvku. Zároveň s tímto je také sledován povrch betonu z důvodu vzniku a rozvoje trhlin. Izoplochy trhlin šířky 0,15 mm jsou zobrazeny na přiloženém obrázku (Obr. 95). Vzorek byl modelován hexagonálními prvky o velikosti 0,016 m, tj. jeden prvek na tloušťku [67].



Obr. 95 Počítačový model poloviny zkušební desky (trhliny šířky 0,15 mm), působící síla 520 N, průhyb ve středu rozpětí 15,23 mm [67]

6.3.4. Shrnutí výsledků experimentu a porovnání s analýzou MKP

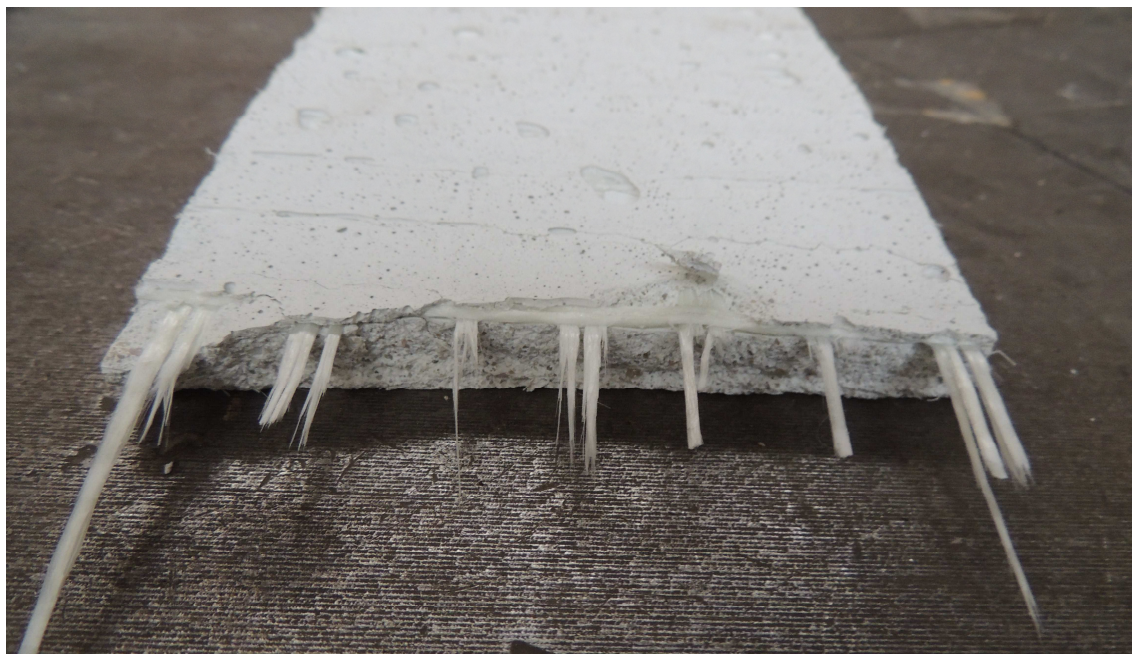
Na základě provedených zkoušek a numerické analýzy [67] lze konstatovat, že chování TRC, kde je zkombinována jemnozrná UHPC matrice se skleněnou textilní výztuží a zároveň jsou přidána PVA vlákna (obecně vlákna) [54][55], je odlišné vůči chování TRC bez přidání rozptýlených vláken (skákavý graf s poklesy síly a postupným zpevňováním) [50]. Toho je docíleno přidáním PVA vláken, která se aktivují dříve než samotná soustředná výztuž a také k její aktivaci pomáhají. Jedná se o chování, kdy dochází stejně jako v případě TRC se soustřednou výztuží k lineárnímu nárůstu síly a průhybu až do vzniku ohybové trhliny, následují pouze minimální kolísání síly a vznik mikrotrhlin při konstantní úrovni zatížení tzv. pseudo strain hardening [125]. Po něm dochází k opětovnému růstu přenášené síly tzv. strain hardening až do porušení vzorků. Porovnání experimentu a MKP analýzy je patrné na Obr. 96. Průběh obou křivek je velmi podobný, proto lze konstatovat velmi dobrou shodu mezi provedenou počítačovou simulací a realizovaným experimentem, a je tedy možné tento model aplikovat i na obdobné konstrukce jiných geometrických rozměrů.



Obr. 96 Závislost průhybu na zatížení TRC desky s rozptýlenou výztuží

Typický charakter porušení desky je zachycen na Obr. 97. Deska je tvarově deformována velkým množstvím menších trhlin. K porušení dojde přetržením skleněné textilní výztuže. Průměrná síla při porušení desek byla 1733 N při rozpětí 0,6 m. Maximální průhyb byl naměřen u desky 4_PVA+2D, a to 76 mm. Numerická analýza

provedená pro desku 6_PVA+2D prokázala velmi obdobnou sílu potřebnou k porušení, tj. konkrétně hodnotu 1610 N (odchylka cca 6 %) a mezní průhyb 73,50 mm (odchylka cca 3 %), proto lze konstatovat velmi dobrou shodu mezi provedenou počítačovou simulací a realizovaným experimentem. Kompletní výsledky zkoušek jsou obsaženy v Tab. 24. Úroveň napětí při vzniku trhliny byla vypočtena pomocí Rov. 9 po zohlednění změny velikosti rozpětí a teorie pružnosti.



Obr. 97 Pohled nad lomovou plochu desky z bílého TRC

Tab. 24 Tabulka provedených zkoušek TRC desek

Označení vzorků	Rozměry			Hmotnost [g]	Objem. hmotnost [kg/m ³]	Celkový průhyb při max. síle [mm]	Tah za ohybu		
	l [mm]	h [mm]	b [mm]				Síla při vzniku trhliny [N]	Max. přenášená síla [N]	Napětí při vzniku trhliny [MPa]
1_PVA+2D	751	14,0	125,1	3009	2296,2	69,8	329	1664	8,1
2_PVA+2D	750	13,8	125,0	2995	2313,0	74,1	364	1704	9,2
3_PVA+2D	751	13,8	124,7	2993	2319,4	75,3	372	1787	9,4
4_PVA+2D	751	13,8	124,6	2986	2322,0	76,0	381	1754	9,7
5_PVA+2D	751	13,7	124,2	2965	2318,7	73,3	357	1773	9,2
6_PVA+2D	752	13,8	124,3	2973	2308,0	72,3	341	1713	8,7
Průměrná hodnoty experimentu					2313	73,4	357	1733	9,0

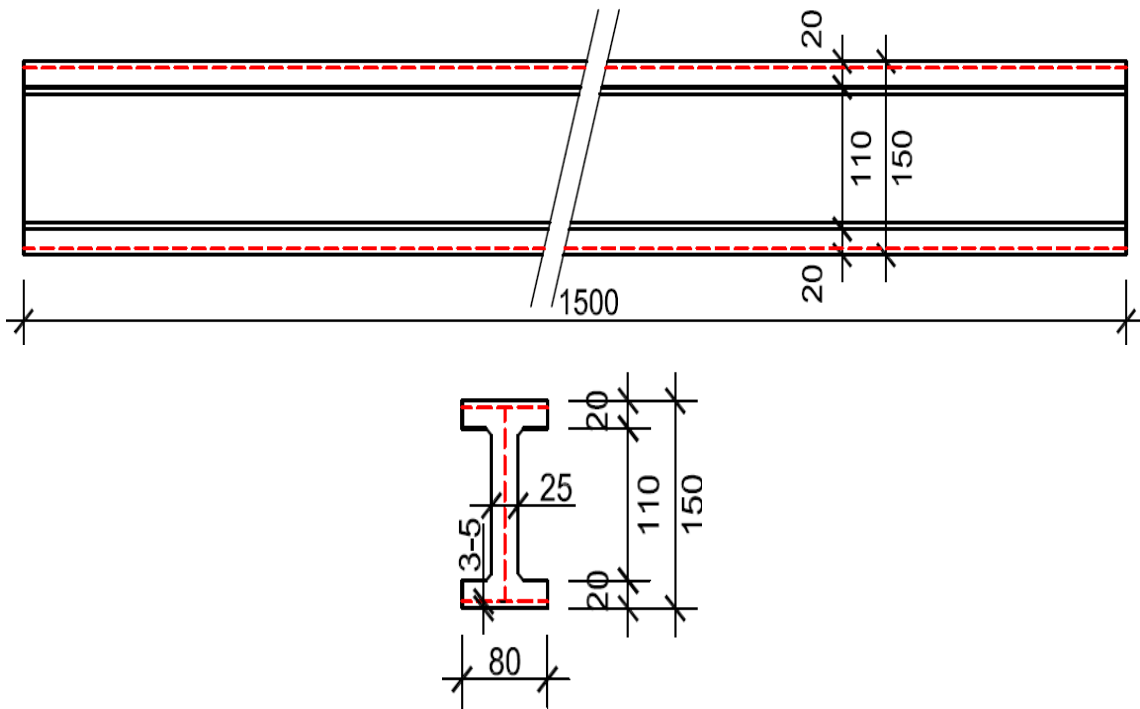
6.4. Zkouška TRC nosníku profilu I

Dalším prvkem vyrobeným pro experimentální část dizertační práce byly symetrické I nosníky o délce 1,5 m. Nosníky byly vyrobeny pro účely ověření chování trojrozměrných prvků z TRC. Byly zhotoveny ve dvou variantách. V prvním případě se jednalo o dva nosníky z vybrané receptury 321, kde je jemnozrnná matrice doplněna 2D textilní sítí ve formě AR-Glass, která byla rovněž již dříve hodnocena z hlediska pevnosti a modulu pružnosti. V druhé variantě byla použita receptura 445, tj. receptura běžného UHPC s přidáním drátky, konkrétně bylo do směsi přidáno 130 kg/m^3 drobných ocelových drátků.

6.4.1. Příprava formy a zkušebních vzorků

Před samotnou betonáží bylo nutné navrhnout, vyrobit a sestavit vhodnou formu. Ta musela umožňovat pevné uložení textilní výztuže při taženém/tlačeném okraji a výztuž v této poloze fixovat. Toho bylo dosaženo sevřením výztuže mezi částmi formy tak, že zbytky výztuže po odbednění přesahovaly. Následně bylo nutné jejich šetrné odstranění (Obr. 99). Vnitřní hrany formy (napojení stojiny a pásnice) bylo provedeno šikmým úkosem v poměru stran 1:1. Výztuž pro experimentální prvek byla dodána ve formě 2D sítě. Z tohoto důvodu bylo nutné její zkrácení a napojení do tvaru I. Vzhledem k předpokládanému namáhání byla výztuž obou pásnic provedena v jednom kuse a výztuž stojiny k nim byla napojena tavným spojem. Rozměry nosníku, potažmo formy byly upraveny tak, aby bylo možné provést betonáž z jedné záměsi. Objem čerstvého betonu byl tak limitován přibližně množstvím 35 – 40 l, kdy je nutné uvážit rovněž výrobu alespoň malé části doprovodných těles pro ověření vlastností betonu po 28 dnech. Skutečné rozměry nosníku (Obr. 98) byly tímto faktorem limitovány (především délka). Šířka nosníku v úrovni pásnice byla navržena 80 mm, celková výška 150 mm, tloušťka stojiny 25 mm a tloušťka pásnice pouze 20 mm. Délka všech zkoušených nosníků byla shodná tj. 1,5 m. Výztuž byla fixována v poloze přibližně 3 až 5 mm od tažené/tlačeného okraje prvku a v ose stojiny. Na nákresu je zobrazena jako červená přerušovaná čára.

Vzhledem k tvaru zkušebního tělesa byla betonáž provedena ve svislé poloze a to bez vibrací pouhým naléváním jemnozrnné směsi do formy. Po uplynutí 18 až 24 hodin byl nosník odformován a umístěn do vodního uložení na dobu min 28 dní. Případně až do doby samotné zkoušky. Výsledný produkt je patrný na Obr. 99.



Obr. 98 Podélný a příčný řez I profilem včetně rozměrů v mm



Obr. 99 Odformovaný vzorek I nosníku s textilní skleněnou výztuží před vložením do vodního uložení

Jak bylo již řečeno výše, souběžně s betonáží zkušebních těles byla vyrobena také doprovodná tělesa. Ta byla vyrobena pro potřebu průběžného ověření materiálových charakteristik použité matrice. Byly vyrobeny dvě rozměrové sady doprovodných těles. První sada, trámečky o rozměrech 40/40/160 mm. Druhá, rovněž trámečky, ale o rozměru 100/100/400 mm. Bylo předpokládáno, že se na doprovodných tělesech projeví rozměrový efekt (size effect) [76][77][126], stejně tak jako se projeví i na zkoušeném I

profilu samotném. Tento jev je u betonových konstrukcí dobře znám a popsán [127][128]. Průměrné zjištěné výsledky provedených zkoušek odpovídaly hodnotám stanoveným v kap. 3.5. Výsledky zkoušek rozměrového efektu jsou obsaženy v kap. 3.6.

6.4.2. Průběh zkoušky ve čtyřbodovém ohybu

Nejdříve po uplynutí 28 dnů od betonáže byly vzorky podrobeny zkoušce čtyřbodovým ohybem v zatěžovacím stroji v předem připraveném zkušebním rámu. Tento rám byl tvořen dvěma podporami (pevnou a posuvnou) ve vzdálenosti 1,4 m a dvěma zatěžovacími válečky se vzdáleností 0,4 m umístěnými v ose prvků. Vzdálenost zatěžovacích válečků byla zvolena maximální v rámci konstrukčních možností vahadla pro roznošení zatížení tak, aby ohybový moment uprostřed rozpětí byl v co největší délce konstantní, tj. docházelo k rozvoji většího počtu menších trhlin. Zatěžovací schéma je pro názornost zobrazeno na průkazné fotografii (Obr. 100). Jednotlivé vzorky byly zatěžovány rovnoměrným nárůstem deformace 0,01 mm/s, kde po zaznamenání první trhliny v případě vzorků vyztužených textilní skleněnou výztuží a po dosažení maxima pevnosti u vzorku s ocelovými drátky byla rychlost zvýšena na 0,05 mm/s. Při obou zkouškách bylo na vzorcích s textilní skleněnou výztuží zjištěno a lokalizováno 7, respektive 9 trhlin nominálních šířek do 0,5 mm. Na vzorku UHPC s ocelovými drátky došlo k vzniku pouze jedné trhliny, která se následně rozevírala až do závěrečného porušení. Nárůst síly vzhledem k průhybu uprostřed rozpětí redukovaného o změnu polohy podpor byl kontinuálně zaznamenáván pomocí automatického měřicího systému Autolog 2100 s frekvencí záznamu 1 s. Průhyb byl měřen pomocí lineárních potenciometrických snímačů dráhy Novotechnik TR 50 a TR 100 o pracovním rozsahu 50 a 100 mm s rozlišovací schopností 0,01 mm. Na základě měřených dat jsou sestaveny grafické výstupy. Schéma porušení, tj. lomové plochy vzorků jsou pro ilustraci zobrazeny na přiloženém obrázku (Obr. 101). U matrice se skleněnou výztuží je patrná její poloha ve stojině a v obou pásnicích, která se podařila dobře zafixovat. Ke kolapsu vzorků došlo porušením výztuže. U matrice s ocelovými drátky lze na základě lomové plochy konstatovat, že jednotlivá vlákna jsou v průřezu rozmístěna rovnoměrně a nedošlo k jejich segregaci po výšce průřezu, tomuto jistě napomohl i způsob betonáže.



Obr. 100 Průběh zkoušky ve čtyřbodovém ohybu vzorku TRC s textilní skleněnou výztuží včetně naznačení polohy trhlin, vzdálenost podpor 1,4 m, vzdálenost válečků vahadla 0,4 m (v ose prvku)



Obr. 101 Lomové plochy zkoušených vzorků, vlevo vzorek UHPC s ocelovými drátky, vpravo vzorek z TRC s přidáním textilní skleněné výztuže ve formě AR-Glass

6.4.3. Shrnutí zkoušek a vyhodnocení

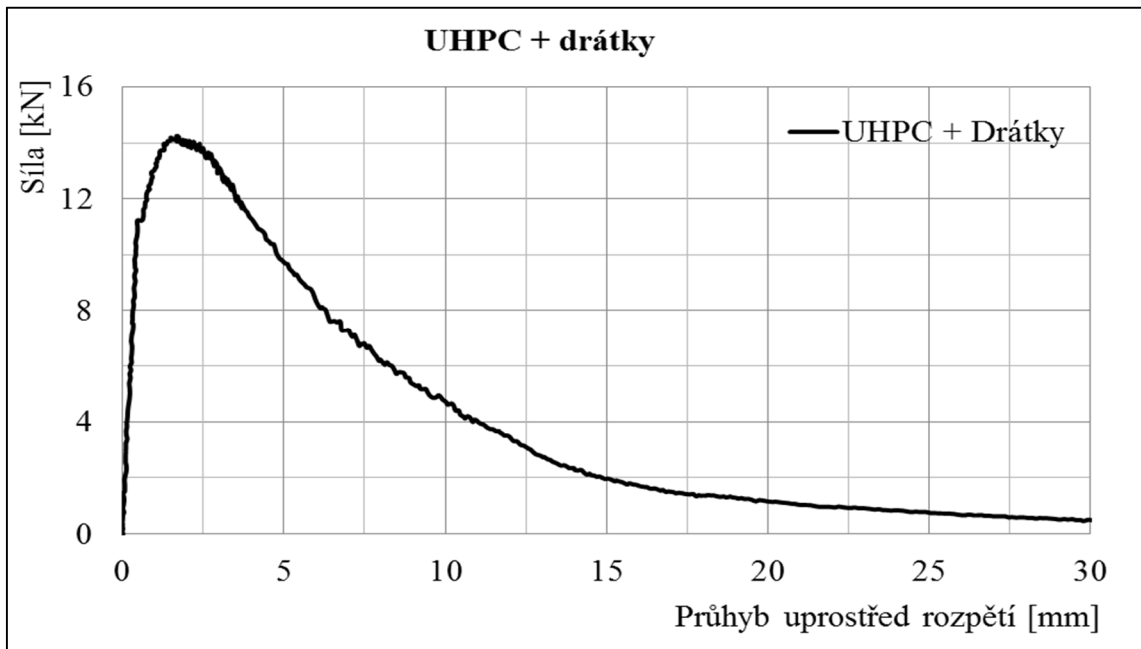
Ze zaznamenaných dat byly sestaveny závislosti jednotlivých veličin, kdy je kladen důraz především na odlišnost mezi chováním UHPC s kovovými drátky (Obr. 102) a samotnou matricí doplněnou textilní skleněnou výztuží (Obr. 103). I profil z UHPC s drátky se porušil při maximální síle cca 14,2 kN prostřednictvím jedné trhliny (přibližně uprostřed rozpětí), která se rozvinula z vlasové šířky 0,05 mm až do šíře 2,5 mm. Při přepočtu na hodnotu pevnosti v tahu za ohybu po zohlednění skutečných rozměrů se jedná o pevnost odpovídající hodnotě cca 15,5 MPa. Zaznamenaný průhyb při vzniku první trhliny dosáhl hodnoty cca 1,5 mm. V tomto okamžiku byla zaznamenána i maximální síla. Diagram v tomto bodě dosáhl vrcholu a následuje postupný úbytek únosnosti vzorku (tahové změkčení, tj. vyčerpává se zbytková únosnost průřezu). Tento jev je typickým příkladem chování UHPC s rozptýlenou výztuží [68][129][130].

Opakem z hlediska chování při účinku zatížení je nosník z matrice (receptura 321) doplněný o AR-Glass. Po vzniku trhliny následuje vždy pokles síly, který je vystřídán opětovným růstem a vznikem další trhliny, čímž dochází k postupné aktivaci výztuže v průřezu. Lze říci, že každá další trhlina vzniká při větší síle, a to až do dosažení limitní únosnosti vzorku, kde následuje porušení. V diagramu nebyla zjištěna oblast „pseudo“ tahového zpevnění. Pokud bude uvažována síla při vzniku první trhliny (6,2 kN resp. 6,4 kN) a skutečné rozměry prvků, bylo dosaženo pevnosti v tahu za ohybu cca 6,9 MPa. Tato hodnota v zásadě odpovídá pevnosti v tahu za ohybu samotné matrice při uvažování rozměrového efektu dle Tab. 13. Z výše uvedeného také plyne, že textilní výztuž není v průřezu dostatečně aktivována. Pokud budeme hodnotit zkoušky TRC profilů z hlediska mezních průhybů (MSP), je zřejmé, že rozhodujícím faktorem je vznik první trhliny. Ten však odpovídá pouze 50 % celkové únosnosti vzorků TRC. Měřený průhyb při vzniku první trhliny dosáhl 1,1 a 1,5 mm. Mezní únosnost byla dosažena při průhybu cca 25 mm.

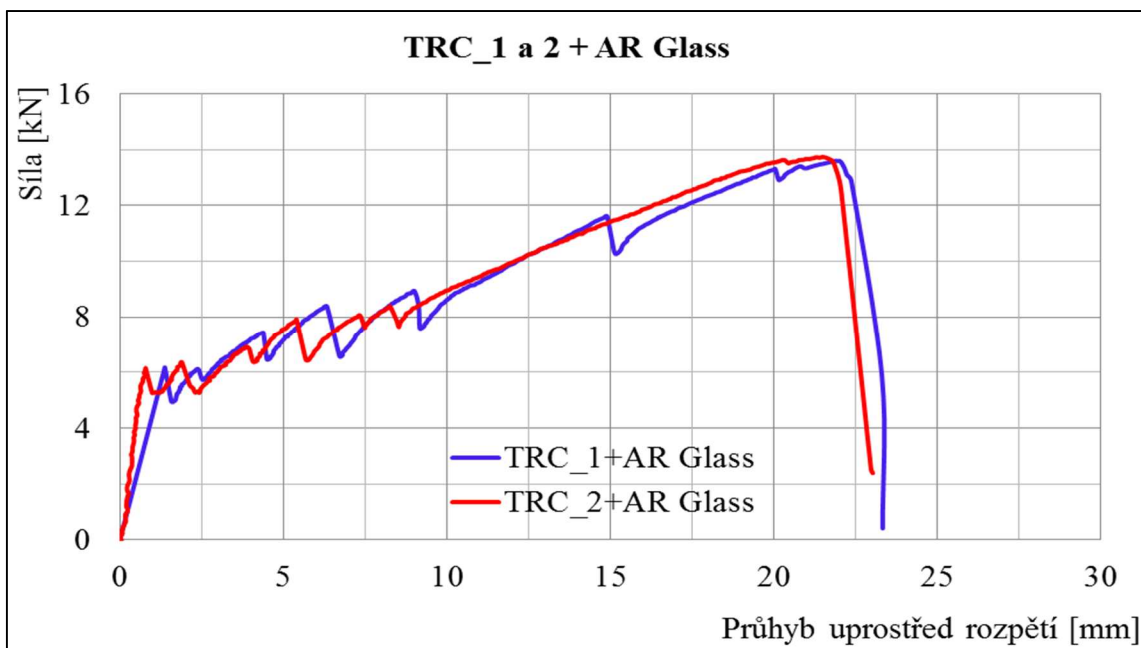
Tab. 25 Shrnutí rozměrů, momentů setrvačnosti a pevností v tahu za ohybu

Vzorek	Rozměry					Moment setrvačnosti I_y [mm ⁴]	Tah za ohybu		
	b_{celk} [mm]	h_{celk} [mm]	$h_{\text{pás}}$ [mm]	h_{stoj} [mm]	b_{stoj} [mm]		Síla při vzniku trhliny F_1 [kN]	Síla F_{max} [kN]	Napětí při vzniku trhliny [MPa]
TRC_1	80,1	150,0	20,3	110,1	30,2	16978275	6,2	13,6	6,8
TRC_2	80,1	150,1	20,2	110,1	30,1	17012239	6,4	13,7	7,0
UHPC_D	80,4	150,5	20,3	110,2	30,4	17263241	14,2	14,2	15,5

Limit únosnosti obou výztužných variant je obdobný. Liší se průběh pracovního diagramu při zkoušce ve čtyřbodovém ohybu. Varianta matrice doplněná textilní skleněnou výztuží varuje před kolapsem prostřednictvím výrazného průhybu a vznikem řady ohybových trhlin. Bylo zjištěno, že zvětšením výšky průřezu dochází k redukci šířky trhlin, redukci průhybu a k rychlejší aktivaci výztuže. Naměřené rozměry prvků, z nich vypočtené momenty setrvačnosti a hodnoty napětí v tahu za ohybu (dle Rov. 9 po zohlednění uspořádání zkoušky) při vzniku první trhliny jsou obsaženy v Tab. 25.



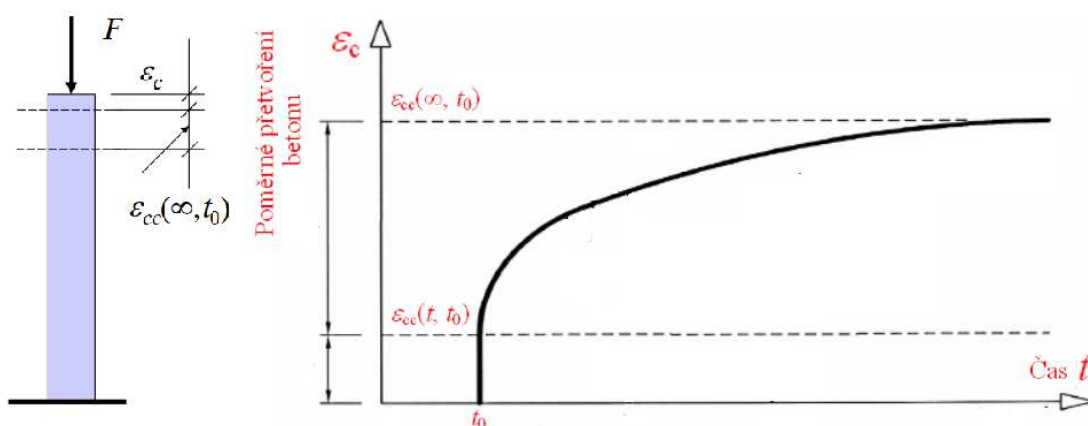
Obr. 102 Průběh zkoušky ve čtyřbodovém ohybu UHPC + ocelové drátky



Obr. 103 Průběh zkoušky ve čtyřbodovém TRC I profilů

6.5. Zkouška dlouhodobého zatížení TRC desek

Dalším realizovaným experimentem bylo ověření a popsání účinků dlouhodobých zatížení na TRC desky. Na základě znalosti pevnosti desek při krátkodobé zkoušce byl navržen experiment ověřující deformační chování desek v rámci dlouhodobého horizontu (dotvarování). Desky pro zkoušku byly vyrobeny dle postupů definovaných v kap. 6.1.4. Rozměr desek byl 2000/250/30 mm a byly vyztuženy textilní skleněnou výztuží v podobě 2D sítě definovanou v kap. 4.1. V příčném průřezu se nacházelo celkem 14 párů osnovních pramenců v jedné vrstvě. Úvodem je nutné podotknout, že dlouhodobé účinky zatížení neboli dotvarování je běžně pozorovaný jev u namáhaných betonových konstrukcí, který se u ohýbané konstrukce projevuje růstem průhybů. Velikost dotvarování závisí především na úrovni vneseného zatížení, složení betonu, rozměrech dílce, vlhkosti prostředí, ošetřování a především době expozice (dotvarování je funkcí času Obr. 104). Pro výpočet dotvarování se běžně používají modely definované např. v ČSN 73 6207 [150], ČSN EN 1992-1-1 [151], ČSN EN 1992-2 [152] a model B3 [146].



Obr. 104 Teoretický průběh dotvarování v čase - zatížená konstrukce [133]

6.5.1. Průběh zkoušky dlouhodobého zatížení

Vyrobené vzorky byly uloženy až do doby zkoušky ve vodní lázni. Následně před zahájením zkoušky byly desky uloženy jako prostý nosník na dvě ocelové podpory v podobě válečků (pevný a posuvný) a osazeny potenciometrickými snímači dráhy Novotechnik TR 25 s pracovním rozsahem 25 mm a rozlišovací schopnosti 0,01 mm. Tyto snímače byly uchyceny na nezávislou konstrukci mimo samotné desky. Snímače byly napojeny na měřící ústřednu Dlog2 společně s jedním teplotním čidlem. Následně bylo na desky vloženo závaží simulující dlouhodobé zatížení v laboratorních

podmínkách. Desky byly vystaveny relativně vysokému zatížení, dle předběžného propočtu se jednalo o cca 75 % jejich kapacity do vzniku ohybové trhliny. Zatížení bylo simulováno ocelovými tyčemi o hmotnosti 25 kg. Každá zkoušená deska byla zatížena celkem 0,75 kN v uspořádání čtyřbodového ohybu. Vzdálenost podpór byla 1,9 m, vzdálenost břemen 0,65 m (zatížení bylo umístěno symetricky ke středu vůči svislé ose prvku). Schéma zkoušky odpovídá fotografii na Obr. 105, způsob podepření je zachycen na Obr. 106.



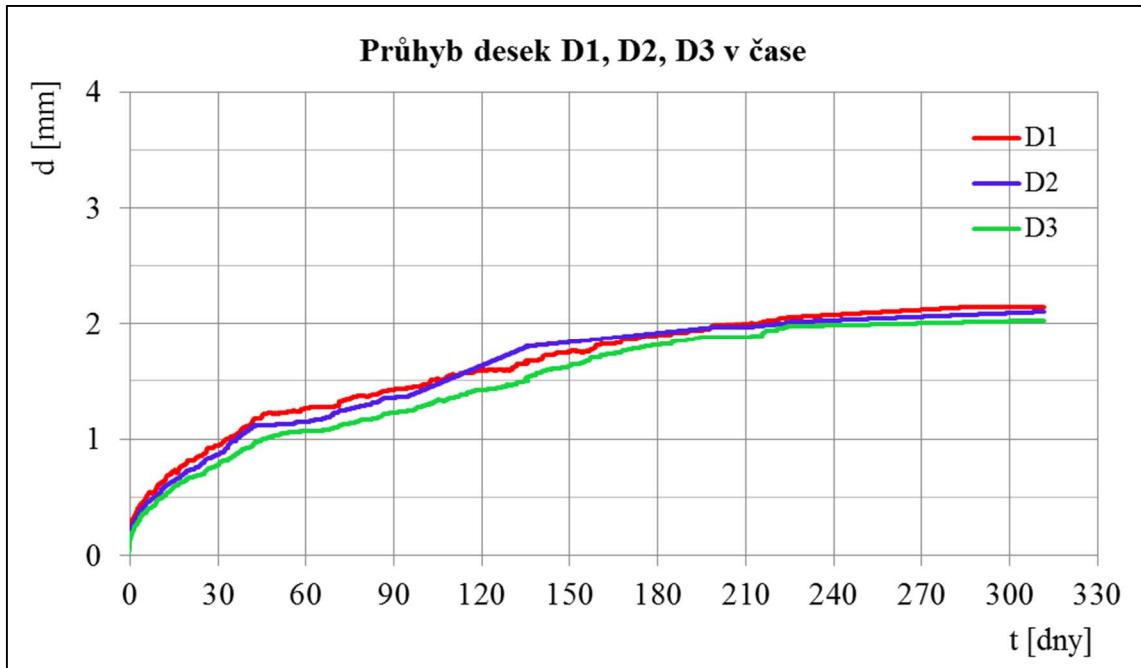
Obr. 105 Uspořádání dlouhodobé zkoušky ve čtyřbodovém ohybu, vzdálenost podpór 1,9 m, břemena vzdálena 0,65 m, umístěna symetricky v ose prvků



Obr. 106 Uložení desek na pevné (vlevo) a posuvné (vpravo) podpore

Rychlost vzorkování byla vzhledem k předpokládané délce testu nastavena na 1 hodinu. Zkouška dlouhodobým zatížením probíhala celkem 312 dnů v konstantních podmínkách laboratoře, tj. při teplotě 21 ± 2 °C a RH 43 %. Z naměřených dat je sestaven

grafický výstup, který zachycuje dotvarování desek v čase zkoušky (Obr. 107). Z diagramu je odečtena hodnota okamžitého průhybu od vneseného zatížení.



Obr. 107 Průběh zkoušky dlouhodobým zatížením ($t = 312$ dnů) po odečtu okamžitého průhybu od zatížení v čase t_0

6.5.2. Shrnutí poznatků z dlouhodobých zkoušek desek TRC

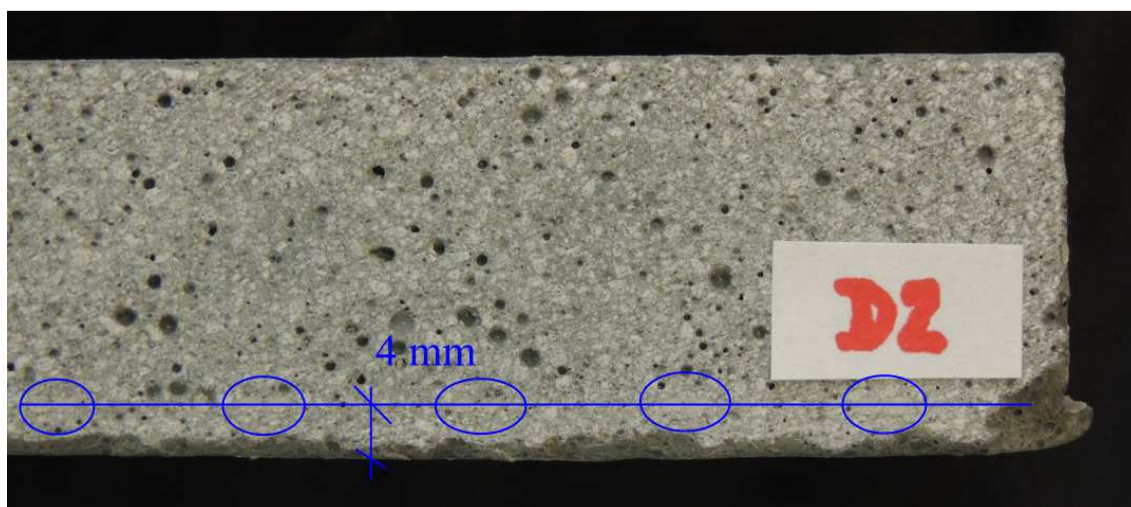
Na základě získaných poznatků lze konstatovat. Z hlediska dlouhodobého zatížení vykazují TRC desky výrazné průhyby. Tempo růstu deformací je především v počáteční fázi vysoké. Ke zpomalení dochází až po uplynutí cca 180 dnů. Měřené průhyby však rostly až do ukončení zkoušky. Průhyb od dotvarování, se u desek D1 až D3 zásadně nelišil. Osciloval někde okolo hodnoty 2 mm. Zjištěné dotvarování je způsobeno dlouhodobou reakcí matrice na zatížení. Významný vliv hraje také povlak použitý na textilní výztuži. Tento povlak je tvořen reaktoplastem, který má za úkol tmelit vlákna, avšak z dlouhodobého hlediska zatížení neodolává a postupně se poddajně deformuje [131]. Tato deformace je doprovázena snížením tuhosti průřezu a růstem průhybu [132]. Zjištěná hodnota dotvarování dosahuje cca 30 % okamžitého průhybu desek (2 mm). Tvar průhybové čáry po odečtu okamžitého průhybu od vneseného zatížení odpovídá svým charakterem diagramu dotvarování z kap. 6.5. Při porovnání experimentálně stanoveného průběhu dotvarování s běžně uvažovanými modely [145] lze konstatovat, že průběh dotvarování TRC je nejvíce podobný křivce stanovené dle ČSN 1992-1-1 [151].

6.5.3. Shrnutí zatěžovací zkoušky desek TRC

Po ukončení dlouhodobého měření byly desky vystaveny zatěžovací zkoušce. Zkouška proběhla pomocí postupného přidávání zátěže v krocích až do vzniku ohybové trhliny. Prvotní úroveň zatížení byla dána stavem po ukončení dlouhodobé zkoušky. První trhlina vznikla na základě doložení dalších cca 30 až 35 kg závaží na desku, každá deska byla tím pádem zatížena cca 1 kN. Po vzniku první trhliny již nebylo možné desky dále zatěžovat z důvodu chybějícího prostoru pro deformaci. Vyhodnocení měření je zaneseno v Tab. 26. Výpočet napětí při vzniku první trhliny proběhl dle již dříve prezentované rovnice (Rov. 9) se zohledněním aktuální vzdálenosti podpor a břemen. U desek byla rovněž na příčném řezu ověřena poloha výztuže (Obr. 108). Umístění výztuže v průřezu odpovídalo navržené poloze.

Tab. 26 Výpočet napětí při vzniku trhliny u desek D1 až D3

Ozn.	Rozměry			Hmotnost [g]	Objem. hmotnost [kg/m ³]	Okamžitý průhyb [mm]	Dotvarovní v čase $t_{312,dnů}$ [mm]	Celkový průhyb [mm]	Tah za ohybu	
	l [mm]	h [mm]	b [mm]						Síla při vzniku trhliny [kN]	Napětí při vzniku trhliny [MPa]
D1	2001	32,1	251,1	37645	2334	6,47	2,15	8,61	1,02	7,4
D2	2000	32,4	250,9	37912	2332	6,55	2,10	8,66	1,11	7,9
D3	2000	31,9	250,7	36965	2311	7,06	2,03	9,09	1,00	7,3
Průměrná hodnoty napětí v tahu při vzniku první trhliny [MPa]										7,5



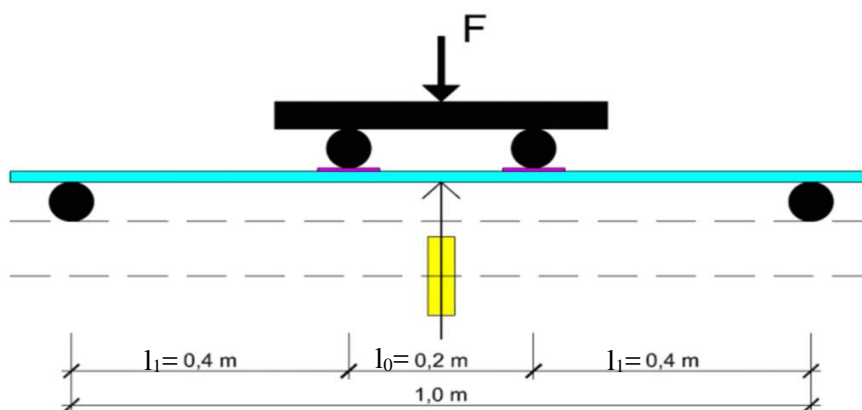
Obr. 108 Pohled na příčný řez desky D2, výztuž je v jedné výškové úrovni, krytí cca 4 mm, patrná je také pórovitost matrice, která má vliv na celkovou únosnost a zjištěnou hodnotu dotvarování

6.6. Zkouška TRC desek v tepelné komoře

Posledním realizovaným experimentem TRC desek v rámci dizertační práce byly zkoušky v tepelné komoře. Účelem zkoušek bylo stanovit vlastnosti TRC se soustřednou výztuží při účincích nesilového charakteru, v tomto případě nárůstu teploty. Jako cílová teplota byla zvolena hodnota $75 \pm 3^\circ\text{C}$. Tato hodnota byla zvolena záměrně, protože při slunečním osvětlení mohou být některé, především tmavší prvky fasády, vystaveny obdobnému teplotnímu namáhání [134][135].

6.6.1. Příprava zkoušky a průběh experimentu

Pro účely zkoušky byla sestavena tepelná komora, což je box s vnitřními rozměry 1,4/0,45/0,35 m, který má dvojitě stěny vyložené tepelným izolantem. V rámci boxu jsou osazeny dvě podpory se vzdáleností 1 m (pevná a posuvná). Ty umožňují uložení až tří vzorků desek používaných při zkoušce ve čtyřbodovém ohybu. Dno komory je opatřeno odrazivou fólií, na které jsou umístěny topné kabely. V komoře je také umístěn ventilátor zajišťující rovnoměrnou cirkulaci vzduchu uvnitř boxu. Dnem boxu prochází tři lineární potenciometrické snímače Novotechnik TR 25 s pracovním rozsahem 25 mm a rozlišovací schopností 0,01 mm. Aby vlivem teploty nedošlo k ovlivnění snímačů, jsou tyto snímače osazeny pod komorou a jejich spojení se zkoušeným vzorkem je zajištěno pomocí invarové tyčky. Po spuštění měření byly do připravené komory postupně vkládány zkušební TRC desky a následně byly tyto desky zatíženy ocelovým závažím v celkové hmotnosti cca 20 kg. Tato zatížení vyvolalo namáhání, které odpovídá přibližně 60 – 70 % únosnosti desek do vzniku první trhliny (kap. 6.2.2). Zjednodušené schéma zkoušky je zobrazeno na Obr. 109 a fotografická dokumentace na Obr. 110.



Obr. 109 Schéma uspořádání zkoušky v tepelné komoře

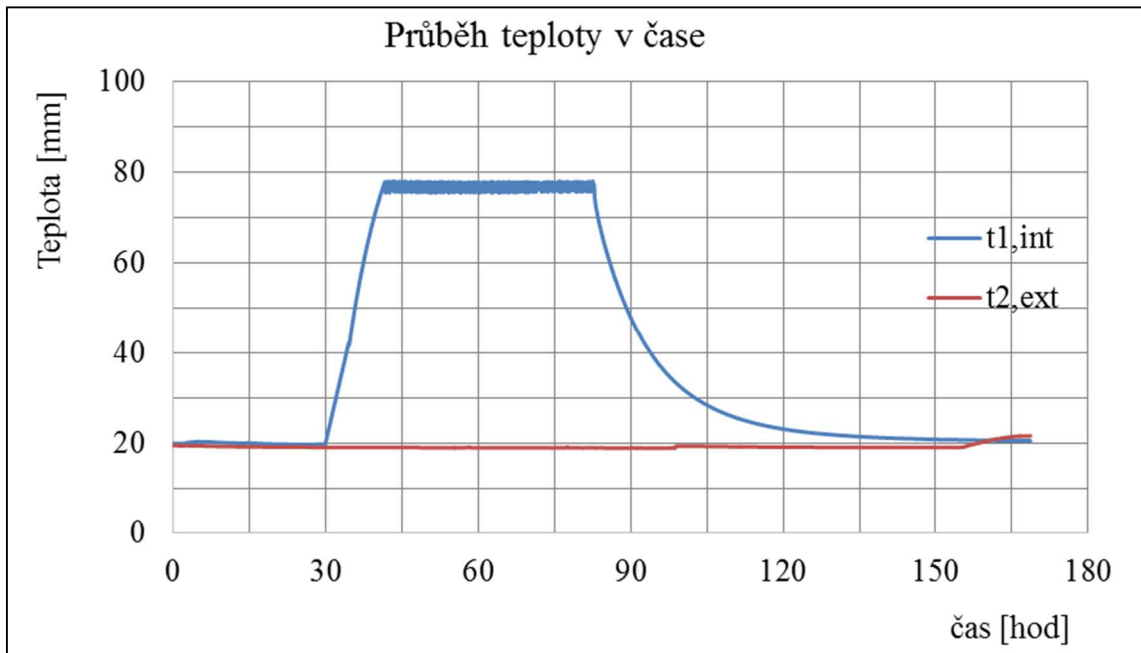


Obr. 110 Vzorky D1, D2 a D3 umístěné v tepelné komoře, zatížené silou 200 N

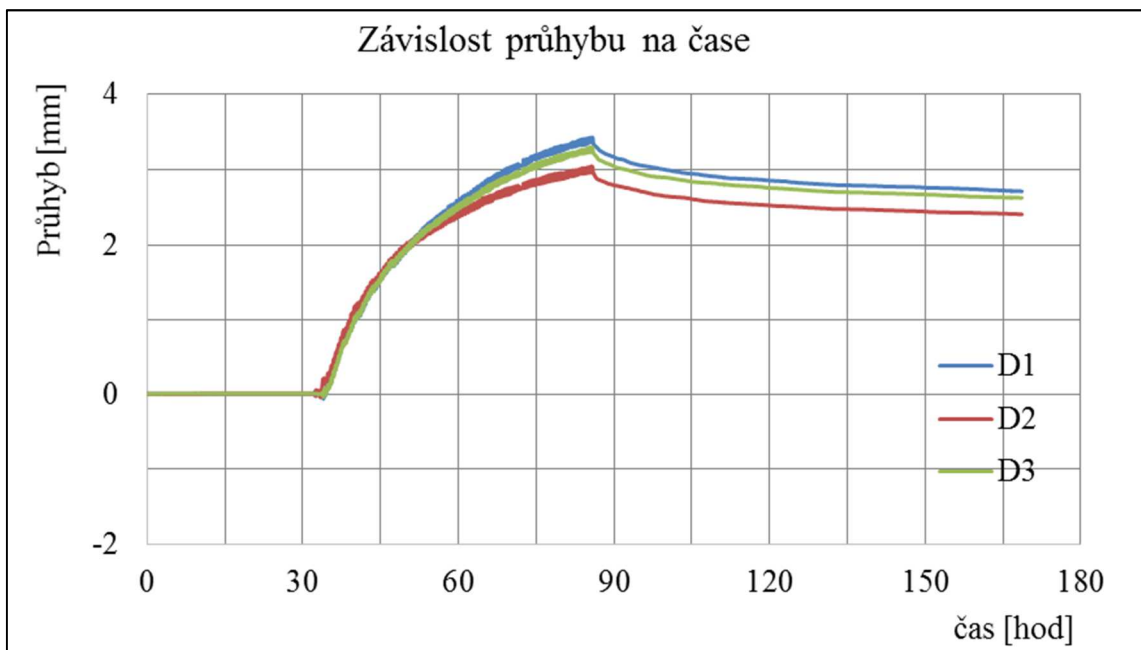
Po ustálení deformací od zatížení (cca po 24 hodinách) byla komora uzavřena a zahájen proces ohřívání. Prvním krokem byl ohřev z teploty prostředí do cca 40 °C. Poté byla zkontrolována funkčnost měřidel a pokračovalo zahřívání až na požadovanou teplotu $75 \pm 3^\circ\text{C}$. Při zkoušce byl zaznamenáván průhyb uprostřed rozpětí, teplota prostředí v komoře a mimo ni a také doba zkoušky. Po dosažení požadované teploty byla udržována po dobu cca 2 dnů. Následně byl vypnut ohřev a došlo k postupnému ochlazování. Komora byla otevřena až ve chvíli, kdy rozdíl mezi teplotou uvnitř a vně dosáhl hodnoty do 5 °C.

6.6.2. Shrnutí poznatků ze zkoušky v tepelné komoře

Na základě získaných dat byly sestaveny závislosti mezi teplotou a časem zkoušky (Obr. 111) a mezi průhybem a teplotou (Obr. 112). Na vodorovné ose je vždy čas zkoušky v hodinách. Na svislé ose je vynesena průhyb nebo teplota. V grafech je odečtena hodnota průhybu od silového zatížení a je zanedbán vliv dotvarování (po dobu expozice by činilo cca 0,05 až 0,1 mm). Na základě získaných dat lze konstatovat, že růst teploty do cca 40 °C nezpůsobuje zásadní a pozorovatelnou deformační změnu na deskách TRC. Situace se však výrazně mění při dalším růstu teploty, kde TRC desky reagují rychlým nárůstem deformací (cca 3 x větší deformace než od samotného silového zatížení) při zahřívání do úrovně $75 \pm 3^\circ\text{C}$. Deformace dále rostou i při postupném prohřívání desek a udržování dané teploty až do doby vypnutí ohřevu. Křivka nárůstu se však asymptoticky blíží vodorovné tečně. Na základě těchto zjištění bylo nutné provést detailnější analýzu problému.



Obr. 111 Průběh teploty v čase zkoušky (interiér komory, exteriér)



Obr. 112 Průběh deformace v čase zkoušky

6.6.3. Vyhodnocení zkoušky v tepelné komoře

Všechny relevantní hodnoty, včetně teoreticky stanovené hodnoty průhybu od zatížení dle teorie pružnosti, porovnání s velikostí průhybu změřeného při ohybových zkouškách dle kap. 6.2.2., zjištěná trvalá deformace a napětí po vnesení zatížení jsou uvedeny v Tab. 27, Tab. 28 a Tab. 29.

Tab. 27 Vyhodnocení zkoušek v tepelné komoře – část 1

Označení vzorků	Rozměry			Krytí výztuže [mm]	Hmotnost [g]	Objem. hmotnost [kg/m ³]	Moment setrvačnosti I _y [m ⁴]
	l [mm]	b [mm]	h [mm]				
D1	1101	120,1	20,0	3,01	6211	2353	7,9594E-08
D2	1100	120,3	20,2	2,89	6252	2346	8,1984E-08
D3	1101	120,1	20,0	3,04	6223	2350	8,0334E-08

Tab. 28 Vyhodnocení zkoušek v tepelné komoře – část 2

Průhyby					Trvalá deformace od teploty [mm]
Od vneseného zatížení (měřený) [mm]	Teoreticky stanovený průhyb (vypočtený) [mm]	Průhyb od teploty [mm]	Průhyb celkový [mm]	Průměrná a maximální hodnota průhybu z kap. 6.2.2. [mm]	
1,09	1,12	3,43	4,51	2,63 / 3,85	2,71
1,01	1,09	3,10	4,10		2,41
1,08	1,11	3,30	4,38		2,63

Tab. 29 Vyhodnocení zkoušek v tepelné komoře – část 3

Celkové vnesené zatížení silou F (čtyřbodový ohyb) [N]	Tah za ohybu		
	Napětí od vneseného zatížení [MPa]	Teoretická hodnota napětí při vzniku trhliny dle kap. 6.2.2. [MPa]	Úroveň vnesených zatížení vůči hodnotám z kap. 6.2.2. [%]
200,0	5,0	7,8	64,3
200,0	4,9		63,0
200,0	5,0		63,9

Výpočet teoretické hodnoty průhybu v pružném stavu byl proveden pomocí Mohrovy analogie [136]. Mohrova analogie vychází z Bernoulliho-Navierovi hypotézy, tj. vychází z diferenciální rovnice průhybové čáry a využívá derivačně-integrační závislost mezi zatížením, vnitřními silami a deformacemi. Principem metody je výpočet průhybu na duální konstrukci, která je zatížena ohybovým momentem z reálné konstrukce, který je redukován ohybovou tuhostí, tedy součinem momentu setrvačnosti I_y a modulu pružnosti E . Postup výpočtu je uveden pod textem. Jako modul pružnosti byla převzata průměrná hodnota 44 GPa (kap. 3.5.). Schéma uspořádání zkoušky v tepelné komoře odpovídá Obr. 109.

$$w = \frac{\frac{F}{2} \cdot l_1}{24 \cdot E \cdot I_y} \cdot (3 \cdot l^2 - 4 \cdot l_1^2) \quad \text{Rov. 11}$$

$$I_y = \frac{1}{12} \cdot b \cdot h^3 \quad \text{Rov. 12}$$

kde:

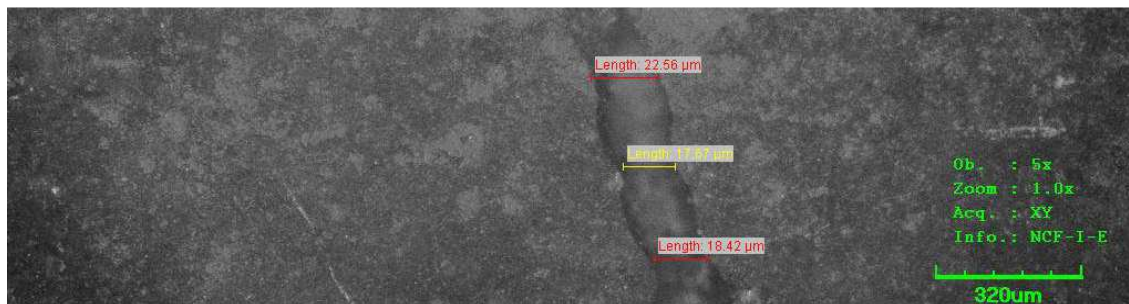
w	průhyb uprostřed rozpětí dle teorie pružnosti [m]
F/2	polovina celkového zatížení desky [kN]
l_1	vzdálenost břemena F/2 a krajní podpory [m]
l_0	vzdálenost mezi břemeny [m]
E	modul pružnosti [GPa]
I_y	moment setrvačnosti [m ⁴]
b	šířka průřezu [m]
h	výška průřezu [m]

Z důvodu zjištěných výrazných trvalých deformací TRC desek (2,71 mm, 2,41 mm a 2,63 mm), které jsou důsledkem zahřátí a následného ochlazení, nelze chování při vyvozeném zatížení považovat za lineárně pružné. Zjištěná trvalá deformace poukazuje spíše na plastické chování. To je s největší pravděpodobností způsobeno vznikem a rozvojem drobných mikrotrhlin po délce desek. Na základě výše zjištěného byla ověřena teorie vzniku mikrotrhlin distribuovaných po délce desky (především však uprostřed rozpětí), které však prochází pouze částí výšky průřezu. Bylo předpokládáno, že se jedná o trhliny velmi tenké, protože vnějším pozorováním nebyly zjištěny (tj. šířka pod cca 0,05 mm). Jejich přítomnost ovšem vysvětluje výrazný průhyb TRC desek bez viditelného porušení struktury. Tyto trhliny také umožňují lepší přístup tepla k samotné textilní výztuži. Pro potvrzení této teorie bylo provedeno snímkování mikroskopem na hraně zkoušené desky přibližně v polovině rozpětí. Tři ukázkové snímky jsou zachyceny na Obr. 113. Měření šířky trhliny je zobrazeno na Obr. 114. Doba vzniku těchto trhlin

není známa. Může se jednat o mikrotrhliny vzniklé již při procesu tuhnutí a tvrdnutí. Pravděpodobněji se však jedná o mikrotrhliny vzniklé poměrně výrazným zatížením, které bylo na desky vneseno. Toto zatížení odpovídalo asi 64 % kapacity prvku do vzniku ohybové makro trhliny.



Obr. 113 Pohled na část čelní hrany betonové desky D1 s mikrotrhlinami, šířka trhlin dosahuje 10 až 20 μm (0,01 až 0,02 mm), délka asi 2 až 3 mm



Obr. 114 Měření šířky trhliny v mikroskopu LEXT OLS3000, (17 až 22 μm)

K rozvoji těchto trhlin jistě dopomáhá i stav, kdy rostoucí teplota vyvolává v průřezu rozdílnou délkovou roztažnost mezi betonem, povlakem a samotným jádrem textilní výztuže, tj. sklem. Tyto tři materiály mají rozdílnou hodnotu teplotní a délkové roztažnosti (Tab. 30). Různým prodloužením jednotlivých komponent (Rov. 13) dochází k celkové ztrátě soudržnosti mezi maticí a výztuží a především mezi výztuží a jejím tmelícím povlakem. Tento efekt má negativní dopad na pevnost textilní výztuže, která se může snížit až o $\frac{3}{4}$ (kap. 2.3). Samotný povlak, který je tvořen melamin-formaldehydovou nebo melamin-urea-formaldehydovou pryskyřicí (obecně epoxydovou pryskyřicí), je při vyšších teplotách nestálý, a to jak z hlediska modulu pružnosti, tak z hlediska pevnosti [137][138][139]. Po zahřátí tento povlak funguje jako určitá forma separace výztuže od matrice. Výsledkem všech výše zmíněných jevů, které navíc na konstrukci probíhají současně, je výrazně rostoucí průhyb desek, konkrétně se jedná o růst z hodnoty 1,1 mm na cca 4,3 mm (3 násobný průhyb oproti stavu před zahřátím).

$$\Delta l = l \cdot \alpha \cdot \Delta t$$

Rov. 13

kde:

Δl	prodloužení prvku [m]
l	původní délka prvku [m]
α	součinitel teplotní a délkové roztažnosti [K^{-1}]
Δt	teplotní rozdíl [$^{\circ}C$]

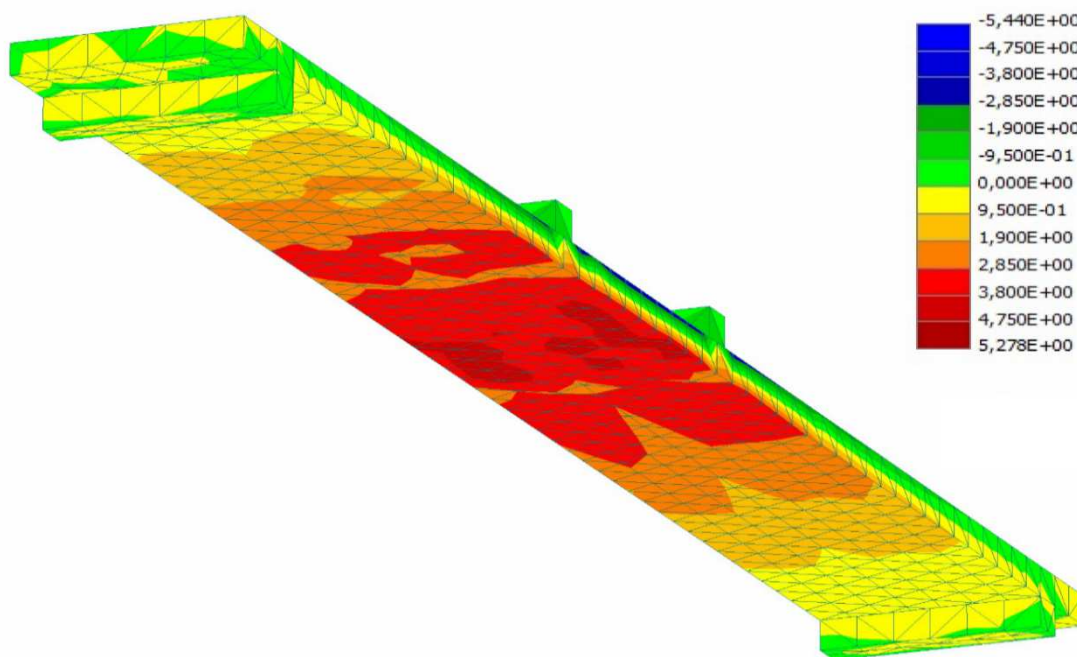
Tab. 30 Výpočet prodloužení dílčích komponentů prvku TRC

Materiál	Původní délka l [mm]	Součinitel teplotní a délkové roztažnosti α [K^{-1}]	Maximální změna teploty Δt [$^{\circ}C$]	Změna délky Δl [mm]
Beton	1101	1,2E-05	58	0,77
Sklo	1101	7,5E-06	58	0,48
Epoxidová pryskyřice	1101	5,5E-05	58	3,51

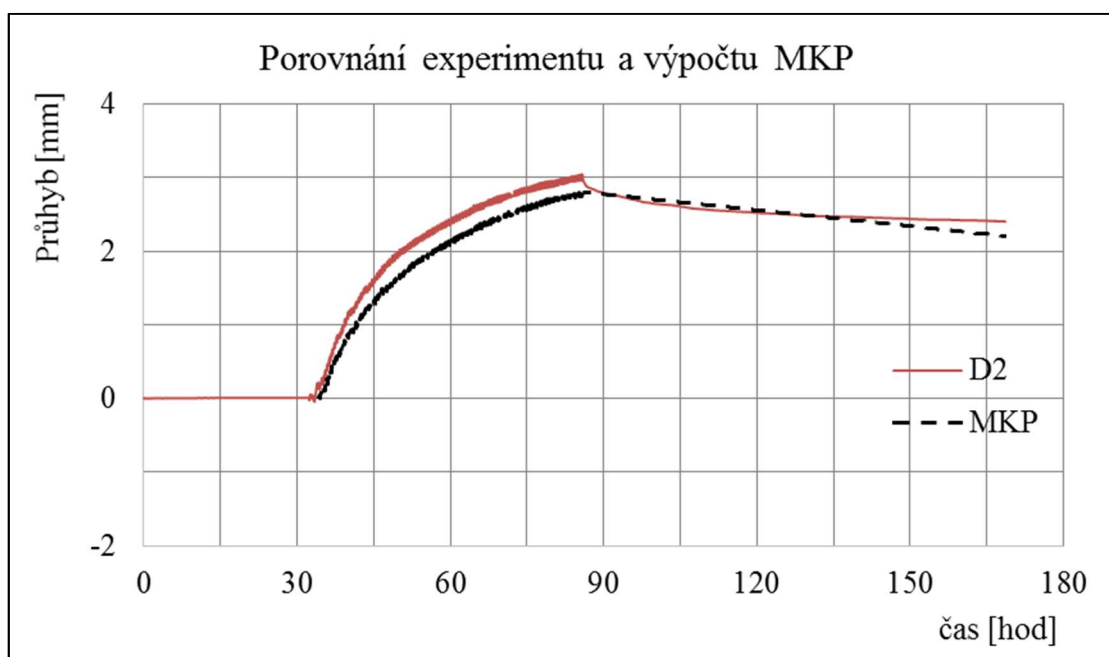
6.6.4. Ověření experimentu v tepelné komoře pomocí výpočtu MKP

Numerický model TRC desky byl vytvořen a počítán v prostředí softwaru Atena 3D Engineering [121]. Model byl vytvořen jako deskový makroprvek o reálných rozměrech [153] vyztužený pravidelnou pravoúhlou sítí, která přibližně vystihuje rastr skleněné textilní výztuže včetně profilu jednotlivých vláken. Deska byla podepřena podporujícími makroprvky a zatížena zatěžovacími makroprvky dle schématu experimentu v laboratoři. Jako materiál TRC desky byl zvolen materiálový model 3D Variable Nonlinear Cementitious 2 [121], kde byla podle pomocného výpočtu nastavena přibližná závislost modulu pružnosti na teplotě. Ostatní materiálové vlastnosti byly v tomto modelu zadány podle výsledků doprovodných zkoušek (kap. 3.5). Materiál textilní výztuže byl zadán položkou Výztuž. V této položce byl nedefinován lineární pracovní diagram s modulem pružnosti a pevností dle kap. 4.6. a jejich změna při teplotě [137]. Materiál podporujících a zatěžovacích makroprvků byl zadán položkou 3D Elastic. Zatížení sestavy bylo v prvních čtyřech krocích zadáno vlastní tíhou a vneseným zatížením. Dále byl v 56 krocích realizován rovnoměrný přírůstek teploty vždy o 1 $^{\circ}C$. Konstrukce tedy byla oteplena o 56 $^{\circ}C$. V další fázi bylo počítáno 52 kroků za konstantní teploty a ve třetí fázi bylo zadáno ochlazení konstrukce, opět v 56 krocích, tedy opět o 56 $^{\circ}C$. Čtyřbodový ohyb tvořily dvě síly o velikosti 0,1 kN. Na modelu byly zadány monitory pro sledování průhybu uprostřed rozpětí TRC desky. Deska byla nasíťována tetrahedra konečnými prvky stejně jako pomocné podporující a zatěžovací makroprvky.

Pomocí simulace metodou MKP byla ověřena deska D2, který byla náhodně vybrána. Shoda mezi průběhem experimentální zkoušky a výpočtním modelem je prezentována na Obr. 116. Na základě vložení dílčích materiálových parametrů a jejich závislostí na požadovaných veličinách bylo dosaženo vysoké shody mezi experimentem desky a výpočtem MKP [147].



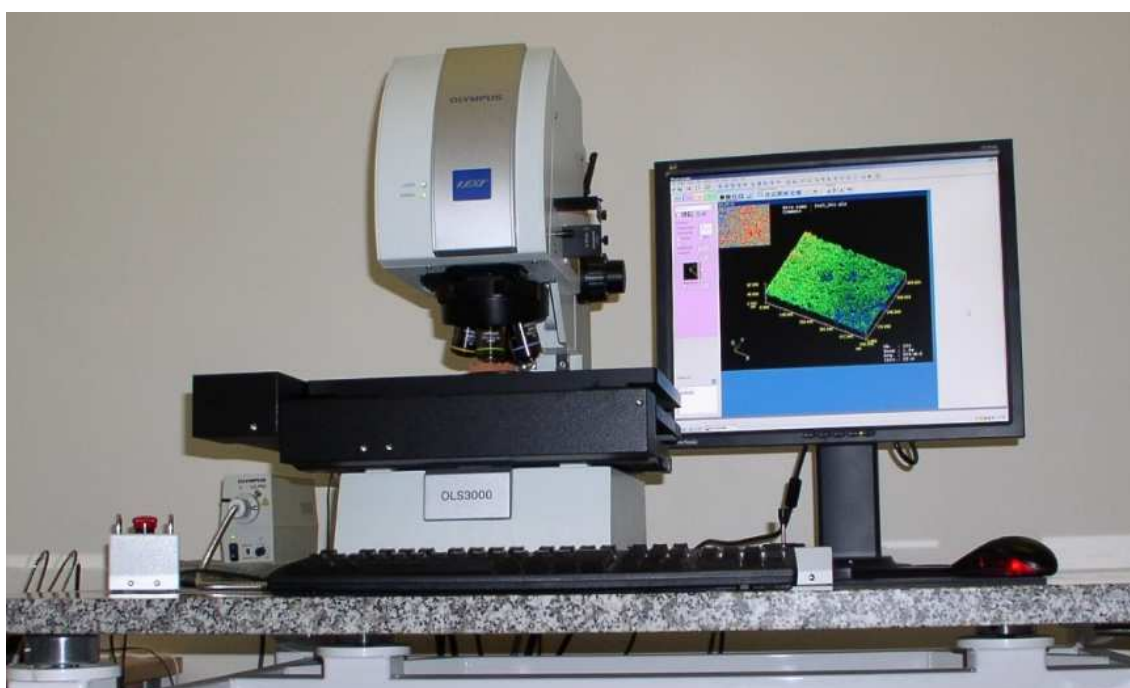
Obr. 115 Napětí na dolních vláknech (cca 5,3 MPa) od vneseného zatížení včetně vlastní tíhy [147]



Obr. 116 Porovnání experimentu TRC desky D2 a simulace MKP

7. Konfokální mikroskopie rozhraní textilní výztuže a matrice

Mikroskopická analýza rozhraní textilní výztuže a betonové matrice byla provedena pomocí laserového konfokálního mikroskopu LEXT OLS3000 [144] společnosti Olympus (Obr. 117). Mikroskop LEXT OLS3000 je optický systém s vysokou přesností 3D zobrazování a měření. Nabízí nové možnosti při vývoji a kontrole rozličných materiálů a součástí. Je zvláště vhodný pro nově vznikající aplikace v mikro a nanotechnologických odvětvích, která kladou stále vyšší nároky na nestandardní způsoby nedestruktivního bezkontaktního měření a kontrolu materiálů, velmi jemných spojů a také na kontrolu drsnosti povrchů se submikronovou přesností.



Obr. 117 Mikroskop Olympus LEXT OLS3000 v laboratoři KÚ

7.1. Princip konfokálního mikroskopu LEXT OLS3000

Základním principem konfokálního rastrovacího mikroskopu LEXT OLS3000 je to, že netvoří obraz vcelku (najednou), ale bod po bodu, řádkováním. Pomocí řádkování jsou tedy snímány optické řezy v rovině X-Y a díky přesnému definovanému posuvu objektivu v ose Z, i jednotlivé optické řezy. Umožňuje 3D pozorování i vysoce přesné 3D měření v reálném čase díky vynikajícímu rozlišení $0,12\ \mu\text{m}$ a rozsahu zvětšení $120\times$ až $14\,400\times$. Na rozdíl od situace při SEM, lze jakýkoli vzorek vložit přímo na stolek mikroskopu bez předběžné přípravy. LEXT je ideálně vhodný pro ultra-detailní

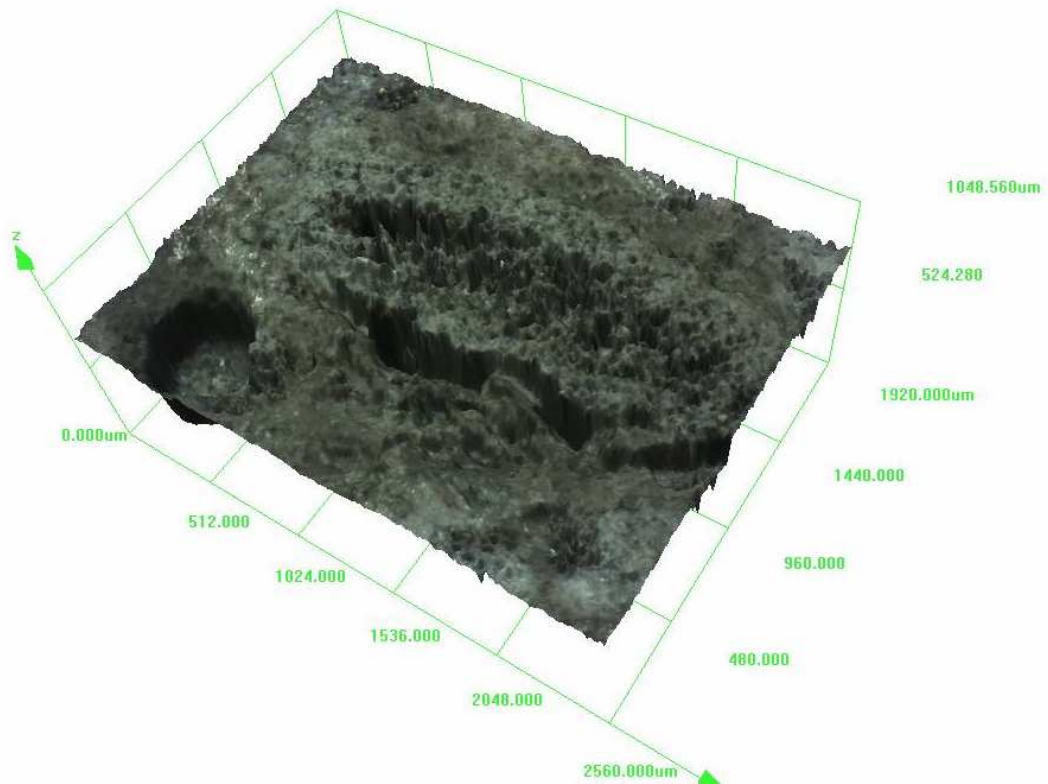
pozorování povrchů a měření nutná při výrobě mikrozařízení jako je MEMS (Micro Electro Mechanical System), při vývoji nových materiálů. Ve stavebnictví se používá na měření skutečných vzdáleností, objemů, ploch a průmětů, měření drsnosti povrchů, měření profilů, analýzu částic, kontrolu materiálů, povlaků a mnoho dalších funkcí přímo v 3D zobrazení. Schopnosti takového systému lze také velmi dobře využít při analýze vad, poruch, trhlin a pórovitosti. Navíc výrazně překračuje rámec konvenční mikroskopie také tím, že představuje velmi výkonný 3D nástroj pro měření s udávanou přesností v rovině X-Y $\pm 120 \mu\text{m}$ a v ose Z $\pm 40 \mu\text{m}$, která v tomto případě odpovídá trojnásobku standardní odchylky.

7.2. Průběh konfokální mikroskopie TRC

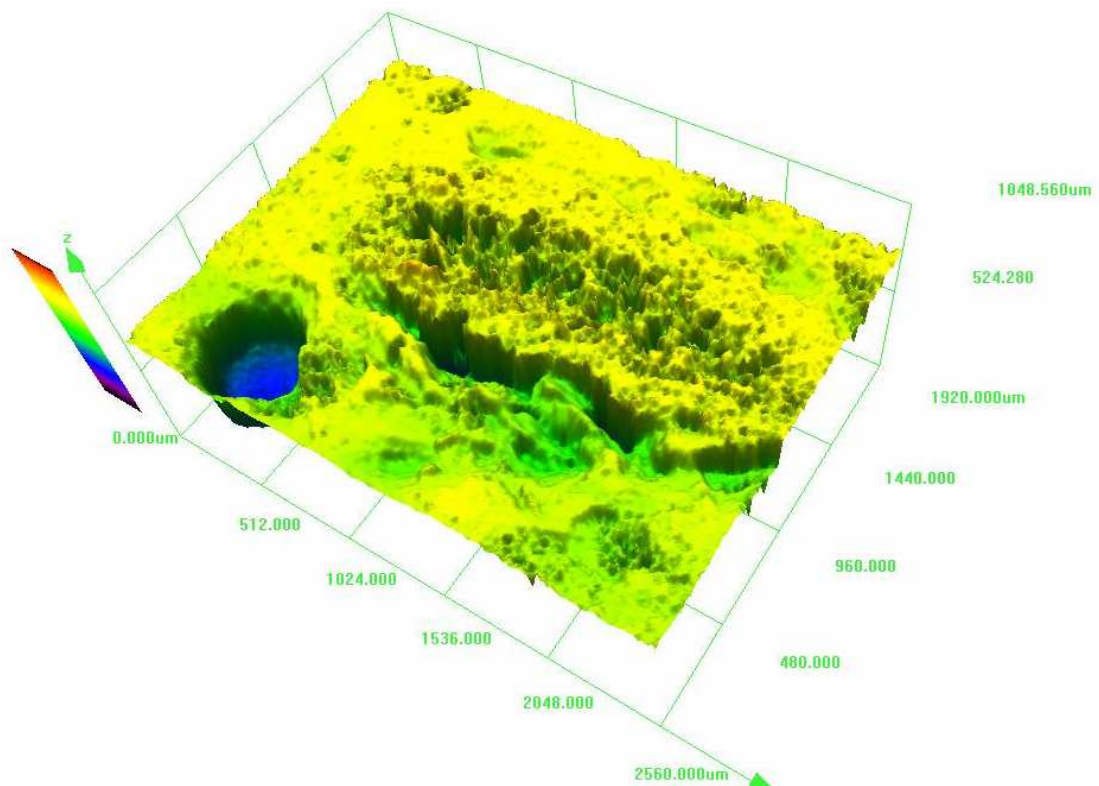
Mikroskopická analýza byla provedena na vzorcích zhotovených příčným řezem z krajní oblasti TRC desek 1100/120/20 mm. Vzorky nebyly dále nijak upravovány. Při měření byl použit objektiv 5x, tzn. zvětšení 120 x. Díky 3D zobrazení bylo možno velice přesně analyzovat rozhraní textilní výztuže a betonové matrice (Obr. 118). Ověřeno bylo celkem šest příčných řezů ze tří různých desek. Na každém řezu byla ověřena okolí tří osnovních prutů textilní výztuže. Celkem se tedy prověřilo 18 míst. Ukázka výstupů z měření je uvedena na následujících obrázcích (Obr. 119 až Obr. 124).



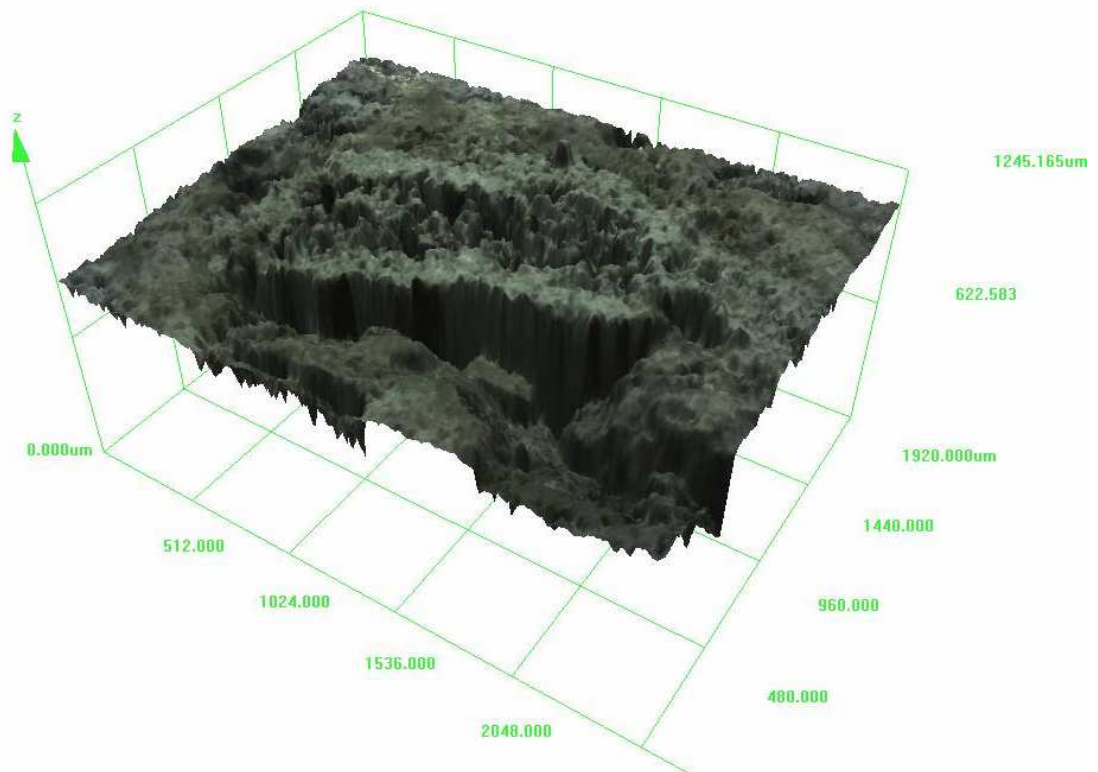
Obr. 118 Pohled na povrch řezu s rozhraním betonové matrice a skelné výztuže



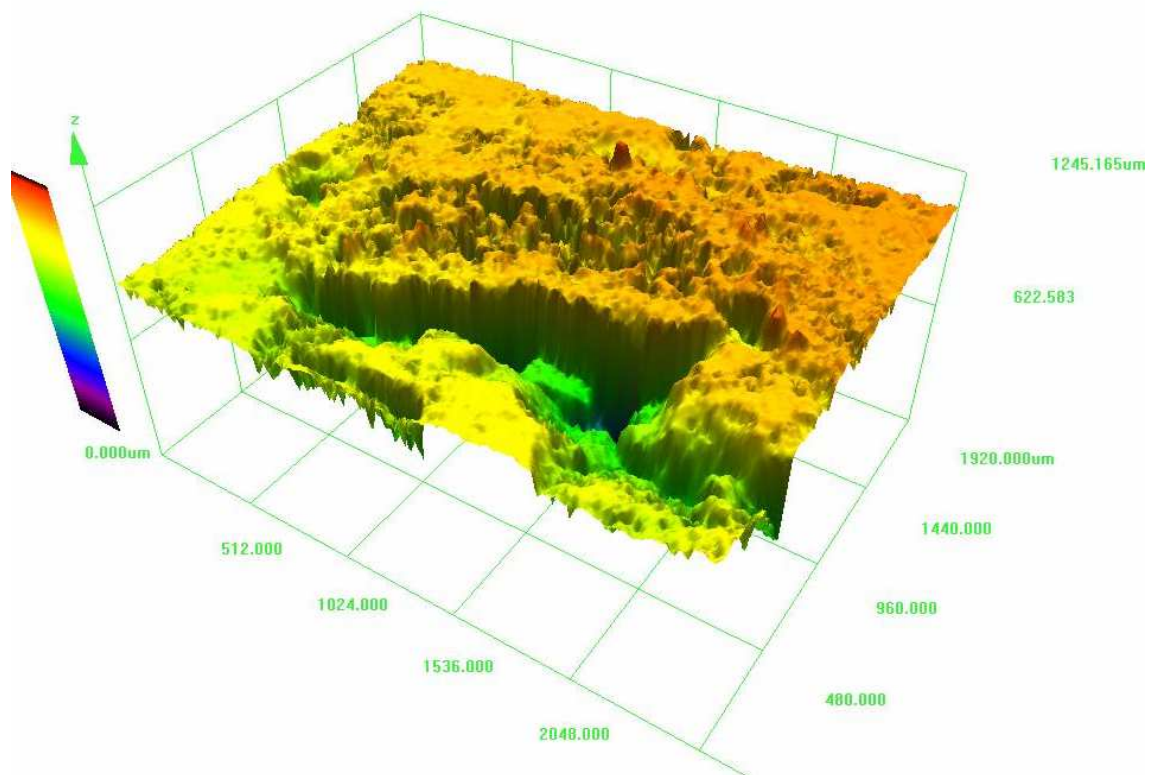
Obr. 119 3D zobrazení povrchu vzorku 1 – reálné barevné zobrazení



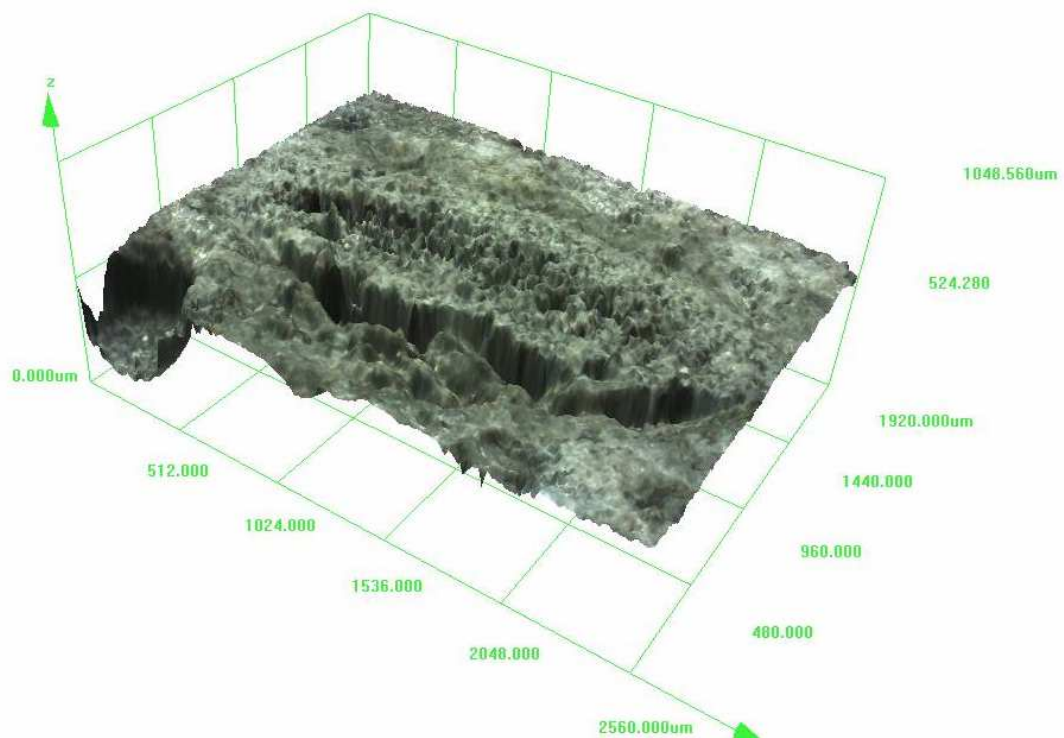
Obr. 120 3D zobrazení povrchu vzorku 1 – izoplochy souřadnice Z



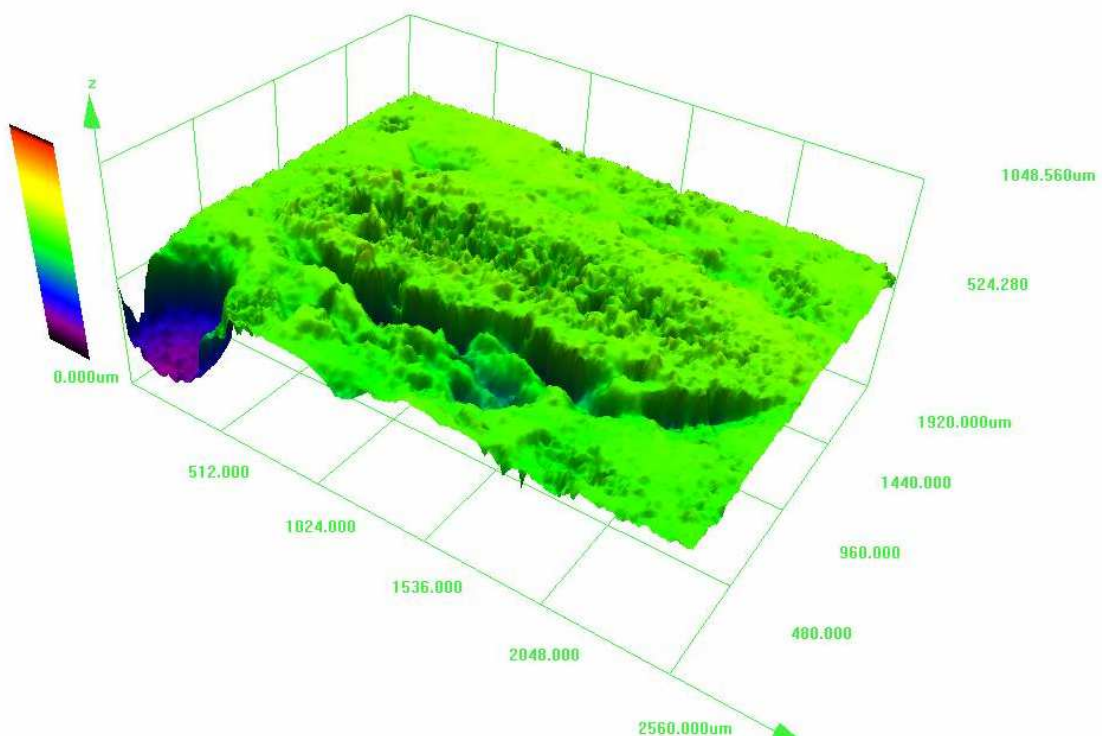
Obr. 121 3D zobrazení povrchu vzorku 4 – reálné barevné zobrazení



Obr. 122 3D zobrazení povrchu vzorku 4 – izoplochy souřadnice Z



Obr. 123 3D zobrazení povrchu vzorku 8 – reálné barevné zobrazení



Obr. 124 3D zobrazení povrchu vzorku 8 – izoplochy souřadnice Z

7.3. Vyhodnocení konfokální mikroskopie TRC

Na základě prověření 18ti oblastí na 6ti řezech TRC desek bylo zjištěno, že u každého osnovního prutu výztuže se nachází oblast či oblasti, kde matrice nedoléhá až k jeho povrchu (dolní hrana textilní výztuže). Tyto oblasti jsou různě dlouhé a mají zcela zásadní vliv na spolupůsobení textilní výztuže a matrice. Tímto jevem lze vysvětlit větší variabilitu výsledků jednotlivých zkoušek desek v ohybu, kdy dochází k různé intenzitě zapojení (soudržnosti) výztuže do funkce kompozitu a rovněž malý příspěvek textilní výztuže v rámci únosnosti prvků do vzniku první trhliny. V Tab. 31 jsou vypočteny procenta obvodu, kde je rozhraní mezi betonovou matricí a textilní skleněnou výztuží nespojeno. Šířka plochy nespojitosti dosahuje v maximech 20 až 50 μm (tj. 0,02 – 0,05 mm). Průměrná délka obvodu nespojitosti dosahuje přibližně 22 %, kdy dílčí hodnoty leží ve velmi širokém rozmezí (7 až 35 %). Vznik těchto ploch pravděpodobně souvisí se samotným procesem betonáže, kdy je díky tvaru výztuže a formy omezeno od vzdušnění betonové matrice v oblasti pod výztuží. Tento jev nastává především při betonáži desek ve vodorovné poloze.

Tab. 31 Přepočet procent obvodu, kde není zajištěn dostatečný kontakt mezi matricí a výztuží

Vzorek	Obvod [%]	Vzorek	Obvod [%]
1	30	10	15
2	22	11	19
3	15	12	27
4	35	13	23
5	11	14	11
6	24	15	29
7	31	16	31
8	34	17	7
9	12	18	18
Obvod bez kontaktu matrice a výztuže [%]			21,9
Směrodatná odchylka [%]			8,8
Variační koeficient [%]			40,1

8. Závěr

V rámci zpracované dizertační práce bylo odpovězeno především na cíle definované v úvodu. Tyto cíle shrnují rozhodující parametry ověření použitelnosti nekonvenční výztuže v jemnozrnných cementem pojených kompozitech, tj. v kompozitech TRC, kde účel matrice plní často beton specifikace UHPC. Pro naplnění cílů dizertační práce bylo provedeno a zjištěno:

- Úvodem dizertační práce byla provedena rešerše dostupné literatury, na jejímž základě byly navrženy a realizovány testy mapující problematiku prvků a ověřující vznesené hypotézy o TRC ve stěžejních oblastech. Byly dokumentovány realizované stavby a konstrukce postavené pomocí kompozitu složeného z nekonvenční výztuže a matrice na bázi vysokohodnotného nebo ultravysokohodnotného betonu. Na základě rešerše však lze konstatovat, že realizované mostní konstrukce (lávky pro pěší) nevyužívají pouze principů TRC, ale jsou vždy doplněny o nosnou ocelovou výztuž v podobě předpínacích lan, mnohdy i klasickou betonářskou výztuž. Jedinou dohledatelnou konstrukcí pouze z TRC jsou tak drobné přístřešky a především hojně realizovaný fasádní systém betoShell® společnosti Hering a jemu podobné.
- Pro pilotní testy betonové matrice byly vybrány tři receptury, původně určené pro betony parametrů UHPC. Jejich složení bylo upraveno tak, aby odpovídalo požadavkům hustě vyztužených prvků TRC a zároveň byla vyjmuta ocelová rozptýlená výztuž v podobě drátků. Receptury (207, 132, 321) byly navzájem porovnány pomocí zkoušek čerstvé směsi, pevnosti v tlaku, tahu za ohybu, modulu pružnosti a smrštění. Na základě tohoto porovnání byla jako optimální vybrána receptura 321, tj. receptura s normovým pískem se zrnitostí 0/2 mm. Stanovené vlastnosti receptury 321 charakterizuje: sednutí rozlitím třída SF 2, zkouška rozlití F7, průměrná objemová hmotnost 2343 kg/m^3 , průměrná pevnost v tahu za ohybu na trámečcích 40/40/160 mm 13,5 MPa ($s_x=1,8 \text{ MPa}$, $V_x=0,13$), průměrná pevnost v tlaku na zlomcích trámečků 125,8 MPa ($s_x=8,7 \text{ MPa}$, $V_x=0,07$), charakteristická hodnota pevnosti v tlaku $f_{ck, is}=113,3 \text{ MPa}$, statický modul pružnosti 44,3 GPa a smrštění (voda / vzduch / 95% vlhkost) 0,39 / 0,83 / 0,28 mm/m.

- Jedním z nejdůležitějších stanovených cílů bylo ověřit fyzikální a chemické vlastnosti textilií do betonu, především se zaměřením na pevnost v tahu, modul pružnosti a chemickou odolnost v silně alkalickém prostředí betonu ($\text{pH} \geq 12,5$). Za účelem zkoušek mechanických vlastností byl sestrojen speciální snímač umožňující upnutí přímo na zkoušenou textilii. Jeho pomocí lze stanovit nejen pevnost v tlaku, ale především modul pružnosti výztuže, který je významným kritériem při návrhu konstrukčních prvků. Byly vyzkoušeny tři sady vzorků s materiálovou bází (sklo, čedič, uhlík) a stanoveny jejich parametry. Pevnost skleněné textilní výztuže byla stanovena jako 2200 MPa, čedičové 3500 MPa a uhlíkové 4250 MPa, modul pružnosti u skleněné výztuže cca 75 GPa, bazaltové 95 GPa a uhlíkové 235 GPa. Z experimentálního měření pevnosti v tahu byly vypočteny rovněž charakteristické pevnosti v tahu f_{tk} pro jednotlivé materiálové varianty. Na základě provedených zkoušek a především s ohledem na dostupnost a cenu, byla pro další testy a výrobu zkušebních vzorků vybrána skleněná textilní výztuž (AR-Glass) vyráběná německou společností V. Frass v podobě 2D sítí s oky 20/20 mm v jemnosti 2400 TEX.
- Vybraná výztuž (AR-Glass) byla dále exponována v pěti prostředích simulující pórové roztoky betonu s odlišným pH (8,1; 8,1 + Cl^- ; 12,6; 13,0; 13,5) po dobu dvou a pěti týdnů. Na základě analýzy FT-IR, SEM-EDS a tahové zkoušky, byl ověřován účinek jednotlivých prostředí. Bylo prokázáno, že použitý povlak je melamin-formaldehydová nebo melamin-urea-formaldehydová pryskyřice patřící do skupiny reaktoplastů a podskupiny aminopryskyřic. Její tloušťka na povrchu vláken je značně nerovnoměrná a vykazuje rovněž lokální pórovitost. Při studiu dílčích spekter bylo zjištěno, že při pH 12,6 a 13,5 jsou na grafech a snímcích patrné krystaly Ca^{2+} , což jsou korozní produkty stárnutí skla. Na snímcích je rovněž patrné postupné narušování ochranného povlaku, především v místech lokalizované pórovitosti. Vše výše uvedené je prokázáno i pomocí tahové zkoušky, kde vzorky s pH 12,6 a 13,5 vykazují o cca 10 až 15 % menší pevnosti než nestárnuté referenční vzorky. Jednoznačně lze tedy konstatovat, že plná ochrana výztuže v alkalickém prostředí betonu není zaručena.
- Na základě zpracované rešerše byly postupně vyzkoušeny všechny laboratorně aplikovatelné způsoby výroby TRC prvků, od metody lití (odlévání), přes metodu

laminování až po nejspolehlivější metodu, která spočívá ve vypnutí výztuže mezi stěny formy, případné vypodložení a následné odlévání. Při použití prvních dvou metod bohužel nelze zajistit polohu textilní výztuže v průřezu z důvodu její nízké tuhosti a relativní lehkosti (objemová hmotnost všech druhů výztuží je maximálně rovna, většinou však menší než objemová hmotnost matrice), kdy u zkušebních vzorků bylo zjištěno velmi výrazně nerovnoměrné uložení výztuže a nerovnoměrné krytí. Metoda vypnutí výztuže ve formě umožňuje pevně stanovit hodnotu krytí a polohu výztuže, zároveň je aplikovatelná jak na prvky charakteru deskového (2D), tak pro různé profily (3D).

- Pomocí experimentálních zkoušek vybraných prvků z TRC v ohybu bylo prokázáno, že rozhodujícím faktorem pro únosnost kompozitu TRC do vzniku první trhliny je pevnost v tahu za ohybu samotné matrice. Výztuž do vzniku první trhliny působí účinkem cca 15 až 20 %. Její aktivace začne výrazněji růst až vznikem ohybové trhliny. Na dílčích diagramech byla pozorována oblast s lineárním průběhem závislosti průhybu na zatížení (do vzniku první trhliny), oblast tzv. pseudo tahového zpevnění a následně tahového zpevnění, kdy jsou většinou trhliny již stabilizované a namáhání přenáší pouze výztuž. V pozitivním duchu se textilní výztuž projevuje v oblasti bezpečnosti. Po celkovém porušení matrice (tenký prvek se trhlinou poruší většinou po celé výšce) je díky výztuži průřez i nadále schopen i přes enormní průhyby přenášet významná zatížení. Vyšší aktivace výztuže a vylepšení vlastností TRC kompozitu lze dosáhnout rovněž přidáním cca 1 % rozptýlené výztuže. Tímto vzniká v konstrukčním prvku sice větší množství trhlín distribuovaných po délce, avšak výrazně menších šířek. Vlákna také ovlivňují pracovní diagram a výrazně pomáhají s aktivací soustředné výztuže tím, že přemostují vznikající mikrotrhliny a zlepšují soudržnost mezi textilním rovingem a matricí. Únosnost průřezu do vzniku první makrotrhliny je tímto jevem navýšena. Bylo rovněž prokázáno, že pomocný výpočet MKP vykazuje vysokou shodu s provedeným experimentem.
- Pomocí zkoušky dlouhodobým zatížením bylo zjištěno, že TRC kompozity vykazují dlouhotrvající a relativně vysoká dotvarování. Hodnota dotvarování činila v čase t_{312} dnů přibližně 2,1 mm. Oproti průhybům měřeným při zatížení (asi 6,5 mm) se jedná o 30% nárůst deformací. Velikost dotvarování TRC

kompozitu je kromě běžně uváděných důvodů (tj. úroveň vneseného zatížení, složení betonu, rozměry dílce, vlhkost prostředí, ošetřování betonu a doba expozice) ovlivněno také soudržností mezi povlakovanou výztuží a matricí. Zjištěný povlakový systém (reaktoplast) vykazuje při dlouhotrvajících účincích zatížení postupné „tečení“. Toto tečení má za následek ztrátu soudržnosti textilní výztuže a matrice. Negativně však také ovlivňuje výslednou pevnost povlakovaného provazce z textilních vláken.

- Bylo zjištěno, že při růstu teploty nad cca 40 °C dochází k prudkému růstu průhybu zkušebních těles, a to bez změny úrovně zatížení. Analýzou problému bylo zjištěno, že za růstem průhybu stojí hned několik faktorů. Jedním z nich je přítomnost velmi tenkých (10 až 20 μm), okem nepostřehnutelných, mikrotrhlin v TRC deskách. Tyto trhlinky jsou způsobeny pravděpodobně vnesením zatížení. Dalším významným faktorem je zcela jasný nesoulad mezi teplotní a délkovou roztažností betonu ($\alpha_c = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$), skleněných vláken ($\alpha_s = 7,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) a použité povlakové vrstvy ($\alpha_p = 5,5 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$). Tento nesoulad při změně teploty způsobí částečné nebo úplné narušení vazby mezi betonovou matricí a povrchem soustředné výztuže (ztráta smykového spolupůsobení neboli soudržnosti), ale také, a to především, oddělení skleněných vláken ze vzájemně spolupůsobícího povlakovaného svazku. To má za následek výrazné snížení pevnosti výztuže, které je doprovázeno rovněž snížením modulu pružnosti. Bylo prokázáno, že provedená analýza MKP dokáže predikovat chování TRC s dostatečnou spolehlivostí a přesností.
- Pomocí konfokální mikroskopické analýzy bylo zjištěno, že pod dílčími pruty textilní skleněné výztuže jsou přítomny oblasti, kde je výztuž zcela oddělena od okolní matrice. Tento fakt výrazně přispívá ke snížení soudržnosti, a tím i k menšímu zapojení textilní výztuže v rámci funkce betonové matrice. Rozsah těchto oblastí je velmi variabilní, v průměru se však jedná cca o 1/5 stanoveného obvodu výztuže. Tento jev je typický pro betonáž desek ve vodorovné pozici, kdy je díky tvaru textilní výztuže omezeno odvodu vzdušného betonu v oblasti pod výztuží.

9. Reference

- [1] Schmidt M., Teichmann T. Ultra-High Performance Concrete: Basis for Sustainable Structures. In: *Proc. Central Europe towards Sustainable Building*, CESB07, Prague, 2007.
- [2] Hegger J., Goralski C., Kulas Ch. M. Schlanke Fußgängerbrücke aus Textilbeton. *Eng. Beton- und Stahlbetonbau* 2/2011, Volume106, Issue2, February 2011, Pages 64-71, doi.org/10.1002/best.201000081.
- [3] Michler H. Segmentbrücke aus textilbewehrtem Beton – Rottachsteg Kempten im Allgäu. *Beton- und Stahlbetonbau*, Volume 108, Issue 5, 2013.
- [4] Brameshuber, W. *RILEM TC 201-TRC: textile reinforced concrete. State-of-the-art report of RILEM Technical Committee 201-TRC*. Bagnaux, RILEM. Report 36, 2006, ISBN 2-912143-99-3.
- [5] Coufal, Vítek, Procházková, Praktická zkušenost s výrobou a dopravou UHPC, *BETON TKS* 2/2015, ISSN 1213-3116.
- [6] Panenková, *Současný vývoj UHPC betonů a ověření vybraných vlastností*, diplomová práce, Brno 2016.
- [7] VÍTEK Jan L., COUFAL Robert. Vysokopevnostní betony a UHPC. Betonové konstrukce 21. století, betony s přidanou hodnotou, 2012, vydáno jako samostatná příloha časopisu *BETON TKS*, str. 43.
- [8] *LAFARGE CEMENT JOURNAL* [on-line]. 2013. 10 (1) [cit. 2016-05-18], (dostupné na: http://www.lafarge.cz/2013_01.pdf).
- [9] Pagán Ortiz J. Ultra-High Performance Concrete: A State-Of-The-Art Report for The Bridge Community. In: *U.S. Department of Transportation: Federal Highway Administration*, June 2013, [on-line]. [cit. 2016-05-19].
- [10] SHI, Caijun, WU, XIAO, WANG, HUANG a Zhi FANG. A review on ultra high performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design. *Construction and Building Materials*. [Guildford, Surrey: Butterworth Scientific], 2015, (103), page 742 -749, ISSN 1879-0526.
- [11] Bøhnsdalen Eide M., Hisdal J. M. *Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC) – State of the art*. ISSN 1891–1978 [on-line] ISBN 978-82-536-1298-0 (pdf).
- [12] ČSN EN 206 (73 2403) *Beton – Specifikace, výroba, vlastnosti a shoda*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.

- [13] ČSN EN 12350-8 (73 1301) *Zkoušení čerstvého betonu - Část 8: Samozhutnitelný beton - Zkouška sednutí-rozlitím*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [14] ČSN EN 1015-3 (722400) *Zkušební metody malt pro zdivo - Část 3: Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím střešacího stolku)*.
- [15] Tichý, Kolísko, Vokáč, Čítek, Trefil, Kalný. *Metodika 3, Metodika pro výrobu prvků z UHPC a pro kontrolu jejich provedení*, verze 2015.
- [16] Brockmann T. Anforderungen und Eigenschaften zementgebundener Feinbetone. In: *Tagungsband zum 1. Fachkolloquium der Sonderforschungsbereiche*, 528 und 532, Aachen; 2001: 82-98
- [17] ČSN 73 1322 (73 1322) *Stanovení mrazuvzdornosti betonu*.
- [18] ČSN 73 1326 (73 1326) *Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek*.
- [19] Ajdukiewicz A., Kotala B., Węglorz M. *Concept and practical applications of textile reinforced concrete, Structural Analysis of Historical Constructions*. Jerzy Jasiński (ed) © 2012 DWE, Wrocław, Poland, ISSN 0860-2395, ISBN 978-83-7125-216-7.
- [20] STRECKEISEN A. To each plutonic rock its proper name. *Earth-Science Reviews*. 1976, roč. 12, čís. 1, s. 1–33.
- [21] Ocheretna L, *Vlákna anorganická. Ostatní umělá vlákna*. Dostupné [on-line] <https://slideplayer.cz/slide/2354514/>.
- [22] http://www.basaltex.cz/cedic/cedic_charakteristika_cz.htm, dostupné [on-line].
- [23] Production [on-line]. *SvetlogorskKhimvolokno OAO*, 2017 [cit. 2017-05-05].
- [24] Ghat. *Structure and Properties of High-Performance Fibers*. Woodhead Publishing, 2016 ISBN 978-00-8100-5514, str. 8 a 79-106.
- [25] Zoltek. *Carbon Fiber*. Dostupné [on-line]., 2017 [cit. 2017-05-05].
- [26] SGL GROUP, T. C. C. In: *SGL Group* [on-line], 2015 [cit. 2015-11-07]. Dostupné: <https://www.sglgroup.com/cms/international/products/products-from-a-z/index.html?locale=en>.
- [27] Hlubučková L. *Porovnání kompozitních materiálů vyrobených z uhlíkových vláken PANEX 35 SIGRAFIL C50*, diplomová práce, TU Liberec, 2016.
- [28] Grabmüllerová J. *Textilní vlákna*. Fakulta textilní. Technická univerzita v Liberci [on-line]. 2012 [cit. 2015-11-18].

- [29] Ehrenstein, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009, s. 37-61. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [30] Bareš, Richard A. *Kompozitní materiály*. SNTL Praha 1988.
- [31] Kořínek Z., *Kompozity*. 2005.
- [32] Dwight W. David. Glass Fiber Reinforcement. *Comperhensive Composite Materials*. 1.08, 1-22, 2000, Volume 1.
- [33] <http://www.havel-composites.com/clanky/4-Technologie/74-Vseobecny-a-zakladni-popis-materialu-pouzivanych-pri-vyrobe-kompozitu.html>, dostupné [on-line].
- [34] Kulas Ch. H. *Zum Tragverhalten getränkter textiler Bewehrungselemente für Betonbauteile*. RWTH Aachen, 2013.
- [35] Global glass-fibre production [on-line]. JEC, 2011-02-21 [cit. 2017-10-23].
- [36] Chokri Ch. *Textile Werkstoffe für den Leichtbau*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2011, ISBN 978-3-642-17991-4.
- [37] Solařík J. *Obrobitelnost kompozitních materiálů*, diplomová práce, dostupné z: <https://docplayer.cz/22585854-Obrobitelnost-kompozitnich-materialu-bc-jan-solarik.html>.
- [38] Textilní zkušební ústav. *Syntetické vlákno* [on-line], 2006-2008 [cit. 2017-01-10].
- [39] Pospíšil a kol.: *Příručka textilního odborníka*, SNTL Praha 1981.
- [40] Kießling/Matthes. *Textil- Fachwörterbuch*. Berlin 1993, ISBN 3-7949-0546-6, str. 20.
- [41] Zande S. *What are the didfferences*. [on-line], 2015-11-20 [cit. 2017-11-05].
- [42] Berichte L. *Herstellung und Eigenschaften von aromatischen Polyamiden*. [on-line], 1978 [cit. 2017-11-05].
- [43] Sedláček J. *Efektivní obrábění vláknově vyztužených kompozitních materiálů*. Dizertační práce, přístupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/.
- [44] Englar T. Aktuelle Entwicklungen auf dem Gebiet textiler Bewehrungen für Beton. *47. Internationale Chemiefasertagung*, Bornbird, pp. 17-19. 2008.
- [45] Schleser, M. *Einsatz polymerimprägnierter, alkalizesistenter Glastextilien zur Bewehrung zementgebundener matrices*. Dissertation, RWTH University, Aachen, 2008.
- [46] Naik N. K., Madhavan V. Twisted impregnated yarns: elastic properties. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 2000; 35:83 (91), DOI: 10.1243/0309324001514044

- [47] Glowania M., Gries T., Schoene J., Schleser M., Reisgen U. Innovative coating technology for textile reinforcements of concrete applications. *Key Eng. Mater.* 2011, 466: 167-173.
- [48] Dilthey U., Schleser M., Hanisch V., Gries T. *Yarn tensile test of polymer-impregnated textiles for the reinforcement of concrete*. RWTH Aachen, 2006.
- [49] Orosz K., Blanksvärd T., Täljsten B., Fischer G. From material level to structural use of mineral-based composites an overview. *Advances in Civil Engineering*. Volume 2010, Article ID 985843, 19 pages.
- [50] Williams Portal N., Nyholm Thrane L., Lundgren K. Flexural Behaviour of Textile Reinforced Concrete Composites: Experimental and Numerical Evaluation. *Materials and Structures* 50 (1):4, August 2016, DOI: 10.1617/s11527-016-0882-9, ISSN: 1359-5997 (Print), 1871-6873 [on-line].
- [51] Lepenies IG. *Zur hierarchischen und simultanen multi-skalen-analyse von textilbeton (On the Hierarchical and Integrated Multi Scale Analysis of Textile Reinforced Concrete)*. Dissertation, Technische Universität Dresden, (2007).
- [52] Jesse, F. *Tragverhalten von Filamentgarnen in zementgebundener Matrix*. Dissertation, Technische Universität Dresden, 2004.
- [53] Silva F.A., Butler M., Machtcherine V., Zhu D., Mobasher B. Strain rate effect on the tensile behaviour of textile-reinforced concrete under static and dynamic loading. *Mater. Sci. Eng. A.* 2011; 528:1727-1734.
- [54] Barhum R., Machtcherine V. Effect of short, dispersed glass and carbon fibres on the behaviour of textile-reinforced concrete under tensile loading. *Eng. Fract. Mech.* 2012; 92:56-71.
- [55] Barhum R., Machtcherine V. Influence of short dispersed and short integral glass fibres on the mechanical behaviour of textile-reinforced concrete. *Mater. Struct.* 2013; 46:557-572.
- [56] Boshoff W. P., Combrinck R. Modelling the severity of plastic shrinkage cracking in concrete. *Cem. Concr. Res.* 2013;48:34-39.
- [57] Triantafillou T. *Textile Fibre Composites in Civil Engineering*. Woodhead Publishing, 2/2016, ISBN 978-1-78242-469-7.
- [58] Scheerer S., Chudoba R., Garibaldi M. P., Curbach M. Shells made of textile reinforced concrete – applications in Germany. *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*, Vol. 58 (2017) No. 1 March n. 191, pp. 79-93(15).

- [59] Tichý, Komanec, Slánský, Ševčík, Kolísko. Unikátní lávka pro pěší z UHPC v obci Čeperka, *Beton TKS*, číslo 4/2016, strana 21-25, ISSN 1213-3116.
- [60] Slánský, Ševčík, Peška, Tichý, Panely mostního zábradlí z UHPC. *Časopis Materiály pro stavbu* [on-line].
- [61] CEN/TR 1316-6. *Silniční záchyťové systémy – Záchyťné systémy pro chodce – Část 6: Mostní zábradlí*. Praha: ÚNMZ, 2012. 44 s.
- [62] <https://www.heringinternational.com/en/products-services/architectural/concrete/material-concepts/textile-reinforced-concrete/>.
- [63] <https://solutions-in-textile.com/produkte/verstaerkung-und-instandsetzung>.
- [64] Novotná, Kostecká, Hodková, Vokáč. Možnosti využití textilií jako výztuže do betonu. *Časopis KONSTRUKCE* strana 12 až 15, odborná příloha Speciální betony 2013, 10. ročník, ISSN 1213-8762.
- [65] UNEP-SBCI. United Nations Environment Program – *Sustainable Buildings and Climate Initiative. Buildings and Climate Change – Summary for Decision-Makers*. s.l.: UNEP-SBCI, 2009. 987-92-807-3064-7.
- [66] LCEE. *Life Cycle Engineering Experts GmbH*. Hering Bau GmbH & Co. KG, Hochbauen, betoShell® featherlight concrete.
- [67] Tej P., Kolísko J., Bouška P., Bittner T., Mušutová V. Loading Tests of Thin Plates Made of Ultra High Performance Concrete Reinforced by PVA Fibers and 2D Textile Glass Reinforcement. *Advanced Materials Research*, ISSN: 1662-8985, Vol. 1095, pp 569-572.
- [68] Kalný M., Komanec J., Kvasnička V., Kolísko J., Tej P. *Metodika 2, Metodika pro navrhování prvků z UHPC*, verze 2015.
- [69] ČSN EN 197-1 (72 2101) *Cement – Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití*. Praha: Český normalizační institut, 2012.
- [70] ČSN EN 12620+A1 (72 1502) *Kamenivo do betonu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2008.
- [71] ČSN EN 196-1 (72 2100) *Metody zkoušení cementu – Část 1: Stanovení pevnosti*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2005.
- [72] Miljković M., Radenberg M., Fang X., Lura P. Influence of emulsifier content on cement hydration and mechanical performance of bitumen emulsion mortar. *Materials and Structures* (2017) 50:185. DOI: 10.1617/s11527-017-1052-4 DOI: 10.1617/s11527-017-1052-4.

- [73] ČSN EN 14889-1 (72 3434) *Vlákna do betonu - Část 1: Ocelová vlákna - Definice, specifikace a shoda*. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [74] ČSN EN 12350-5 (73 1301) *Zkoušení čerstvého betonu - Část 5: Zkouška rozlívání*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [75] http://ecentrum.fsv.cvut.cz/fotogalerie/2010/rp2010_2.
- [76] Bažant Z. P. Size effect in blunt fracture: Concrete, rock, metal. *J. of Engrg. Mechanics*, ASCE, 110, 1984, 518–535.
- [77] Bažant Z. P. *Scaling of structural strength*. Hermes-Penton, London 2005: Hermes Penton Science. ISBN 978-0-7506-6849-1, pages 336.
- [78] Bažant Z. P. Concrete fracture models: Testing and practice. *Engineering Fracture Mechanics* (69), 2002, 165–206.
- [79] ČSN EN 12390-3 (73 1302) *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009. EAN: 8590963843346.
- [80] ČSN EN 14651+A1 (72 3431) *Zkušební metoda betonu s kovovými vlákny – Měření pevnosti v tahu za ohybu (mez úměrnosti, zbytková pevnost)*. Praha: Český normalizační institut, 2008. EAN: 8590963811147.
- [81] ČSN ISO 6784 *Beton - Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku*
- [82] ČSN ISO 1920-10 (73 1319) *Beton – Část 10: Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 12/2014.
- [83] Anton O., kolektiv autorů. *Základy zkušebnictví*. Brno, CERM, 2002, 61 s. ISBN 80-214-2079-0.
- [84] ČSN 73 1320 (73 1320) *Stanovení objemových změn betonu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1988.
- [85] <https://www.fedbeton.be/>
- [86] Kolísko, Bouška, Čítek, Huňka, Rydval, Vokáč; *METODIKA 1, Metodika pro návrh UHPC a pro materiálové zkoušky*, verze 2015.
- [87] Brameshuber W., Mott R., Hegger J., Voss S., Gries T., Barle M., Bohm S., Hartung I. Serille von Bauteilen aus textilbewehrten Beton (Seriál Batch Production of Building Members Made of Textile Reinforced Concrete). *Beton-und Stahlbetonbau*. 2008;103(2):64-72.
- [88] Brameshuber, W., Hegger, J., Gries, T., Dilger, K., Böhm, S., Mott, R., Voss, S., Barlé, M., Hartung, I. *Serielle Einzelfertigung (Stückfertigung) von Bauteilen aus*

- textilbewehrtem Beton*. AiF-Forschungsbericht Nr. F882. Aachen, Institut für Bauforschung, Institut für Massivbau, Institut für Textiltechnik (alle RWTH Aachen), Institut für Füge- und Schweißtechnik (TU Braunschweig) 2007.
- [89] Peled A., Mobasher B. Effect of processing on mechanical properties of textile-reinforced concrete. Farmington Hills, Mich. American Concrete Institute, ACI SP-250. In: *Dubey A., ed. Textile-Reinforced Concrete*. ACI Fall 2005 Convention, Kansas City; 2008 14 Seiten.
- [90] Dalal M., Goumairi O., Maliki A. Study of the internal confinement of concrete reinforced (in civil engineering) with woven reinforcement. 2017 IOP, *Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, DOI: 10.1088/1757-899X/254/4/042008.
- [91] Hegger J. Kulas C., Horstmann M. Spatial textile reinforcement structures for ventilated and sandwich facade elements. *Adv. Struct. Eng.* 2012; 15(4):665-676.
- [92] Scholzen, A., Chudoba, R., and Hegger, J. Thin-walled shell structure made of textile Reinforced concrete: design, dimensioning and realization. *Beton-und Stahlbetonbau*, Vol. 107, No. 2, 2012, p. 767-776.[DOI: 10.1002/best.201200044].
- [93] Xiangming Z., Zongjin L. Manufacturing cement-based materials and building products via extrusion: from laboratory to factory. In: *ICE (institute of Civil Engineering)*, Volume 168, November 2015 Issue CE6, Pages 11–16 <http://dx.doi.org/10.1680/cien.14.00065>.
- [94] Chung, Deborah D. L. *Composite materials: functional materials for modern technologies*. London: Springer, 2003. 289 s. ISBN 185233665X.
- [95] ČSN EN 10002-1 *Kovové materiály – Zkouška tahem – Část 1: Zkušební metoda za okolní teploty*.
- [96] <https://www.novotechnik.com/pdfs/TRTRS.pdf>.
- [97] ČSN EN ISO 13934 - 1 - *Textilie - Tahové vlastnosti plošných textilií - část 1: Zjišťování maximální síly a tažnosti při maximální síle pomocí metody Strip*.
- [98] ČSN EN ISO 13934 - 2 - *Textilie - Tahové vlastnosti plošných textilií - část 2: Zjišťování maximální síly pomocí metody Grab*.
- [99] T. Vlach, L. Laiblova, A. Chira, M. Novotna, C. Fiala, M. Zenisek, P. Hajek. Comparison of Different Methods for Determination of Modulus of Elasticity of Composite Reinforcement Produced from Roving. *11th International Conference on Special Concrete and Composites*. Trans Tech Publications Ltd, Switzerland (2014). ISBN: 978-3-03835-317-1.
- [100] ČSN EN 1990 Eurokód *Zásady navrhování konstrukcí*.

- [101] ČSN ISO 13822 *Zásady navrhování konstrukcí - Hodnocení existujících konstrukcí.*
- [102] Vorlíček M., Holický M. a Špačková M. *Pravděpodobnost a matematická statistika pro inženýry.* Praha: ČVUT, 1984.
- [103] Collepari, M. *Moderní beton.* 1st ed.; ČKAIT, Pelhřimov 2009.
- [104] Helland S. Navrhování zaměřené na životnost: implementace zásad zahrnutých v model code 2010 do provozní normy ISO 16204. *Beton TKS* 2013, 6, 3-10.
- [105] Naaman A. E. Textile reinforced cement composites: competitive status and research directions. *International RILEM Conference on Material Science 2010*, Aachen, 22 s.
- [106] Mleziva J. *Polymery-výroba, struktura, vlastnosti a použití.* Sobotáles: Praha, 1993.
- [107] Dongwei W., Zhang. X., Luo S., Li. S. Preparation and property analysis of melamine formaldehyde foam. *Advances in Materials Physics and Chemistry* 2012, 2, 63-67.
- [108] Zhang J., Wang X., Zhang S., Gao Q., Li J. Effects of melamine addition stage on the performance and curing behavioe of melamine-urea-formaldehyde (MUF) resin. *BioResources* 2013, 8(4),5500-5514.
- [109] Castro Y., Aparicio M., Moreno R., Durán A. Silica-zirconia sol-gel coatings obtained by different synthesis routes. *Journal of Sol-Gel Science and Technology* 2005, 35 (1), 41-50.
- [110] Parashar, V. K., Raman V., Bahl O. P. Thermal evolution of sol-gel derived zirkonia and Binary oxides of zirkoniasilica. *Journal of Materials Science Letters* 1996, 15, 1625-162.
- [111] Nogami M. Glass preparation of the ZrO₂-SiO₂ systém by the sol-gel proces from metal alkoxides. *Journal of NonCrystalline Solids* 1985, 69 (2-3),415-423.
- [112] Bosman H. J. M., Kruissink E. C., Vanderspoel J., Vandenbrink F. Characterization of the acid strength of SiO₂-ZrO₂ mixed oxides. *Journal of Catalysis* 1994, 148 (2), 660-672.
- [113] Ducháček V. *Polymery-výroba, vlastnosti, zpracování, použití.* VŠCHT Praha, Praha 2011.
- [114] Prokopová I. *Makromolekulární chemie.* VŠCHT Praha, Praha 2007.
- [115] Osswald T. A., Menges G. *Material science of polymers for engineers.* Third edition, Hanser: München, 2012.

- [116] Bouška P., Hájek P., Vlach T., a kol. *UHPC matrix for ultra-thin elements with non-conventional reinforcement*. 1st edition 2017, ISBN 978-80-01-06120-6, 110 pages.
- [117] Novák P. *Průmyslové řídicí systémy*. ISBN 978-80-248-3032-2.
- [118] ČSN ISO 6784 *Beton. Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku*.
- [119] ČSN EN 14889-2 *Vlákna do betonu - Část 2: Polymerová vlákna - Definice, specifikace a shoda*.
- [120] Miccoli L., Fontana P., Johansson G., Zandi K., Williams Portal N., Müller U. Numerical modelling of UHPC and TRC sandwich elements for building envelopes, IABSE Conference – *Structural Engineering: Providing Solutions to Global Challenges*, September 23.-25., 2015, Geneva, Switzerland, page 195 – 203.
- [121] ČERVENKA V., ČERVENKA J. and PUKL R. *ATENA – A tool for engineering analysis of fracture in concrete*. *Sadhana* 27 (4) (2002) 485-492.
- [122] Červenka J., Pukl R., Červenka V. Design of Sustainable Reinforced Concrete Structures Assisted by Numerical Simulations. *3rd Int. Conf. on Sustainable Materials and Technologies*, SCMT 3, Kyoto, 18-21.8.2013, paper 332.
- [123] Červenka J. Design of Reinforced Concrete Structures by Numerical Simulation. *A XXIII a Conferinta Nationala A.I.C.P.S.*, May 30, 2013. Bucharest, pp. 150-153.
- [124] Červenka J., Papanikolaou V. K. Three Dimensional Combined Fracture-Plastic Material Model for Concrete. *Int. Journal of Plasticity* 24 (12),(2008) 2192-2220.
- [125] LI, Victor C, Hwai-Chung WU. Conditions for Pseudo Strain-Hardening in Fiber Reinforced Brittle Matrix Composites. *Applied Mechanics Reviews*. 1992, 48(8), 390– 398, ISSN 0003-6900.
- [126] Bažant Z. P., Planas J. *Fracture and Size Effect in Concrete and Other Quasibrittle Materials*. Boca Raton and London: CRC Press, 640 pages, ISBN 9780-8493-82840, (December 29, 1997).
- [127] Ožbolt J., Eligehausen R. *Size effect in concrete and reinforced concrete structures, Fracture Mechanics of Concrete Structures*. Proceedings FRAMCOS-2, edited by Folker H. Wittmann, D-79104 Freiburg (1995).
- [128] X. X. He, S. Wu. Experimental Study on Size Effect in Strength of Pervious Concrete and its Associated Factor. *Advanced Materials Research*, Vol. 634-638, pp. 2684-2692, Jan. 2013.
- [129] SETRA/AFGC: *Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concretes: Interim Recommendations*. 01/2002

- [130] AFGC/SETRA: *Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concretes, Recommendations*. Paris CEDEX 06/2013.
- [131] Raupach M., Orłowsky J., Büttner, T., Dilthey U., and Schleser M. Epoxy-impregnated textiles in concrete-load bearing capacity and durability. Proc., *1st Int. RILEM Symp., Textile Reinforced Concrete*, J. Hegger, ed., RILEM Publication S.A.R.L., Bagneux, France, 77–88, (2006).
- [132] Jesse F., Will N., Curbach M., and Hegger J. Loading-bearing behavior of textile-reinforced concrete. SP-250, A. Dubey, ed., *American Concrete Institute*, Detroit, MI, 59–68, (2008).
- [133] Macháčová D. *Objemové změny vybraných cementových kompozitů: vyhodnocení experimentů*. Diplomová práce, Brno 2012.
- [134] Čekon M., Slávik M. A Non-Ventilated Solar Façade Concept Based on Selective and Transparent Insulation Material Integration: An Experimental Study. *Solar Energy Application in Buildings*, *Energies* 2017, 10 (6), 815; <https://doi.org/10.3390/en10060815>.
- [135] Alonso C., Consuegra F., Oteiza I., Asensio E. Effect of façade surface finish on building energy rehabilitation. In: *Solar Energy* 146:470-483, April 2017, DOI: 10.1016/j.solener.2017.03.009.
- [136] Holister G. S. *Experimental Stress Analysis: Principles and Methods*. Cambridge at the University press 1967, 67-10159.
- [137] Marciano Laredo dos Reis J. Effect of temperature on the mechanical properties of polymer mortars. *Mat. Res.* Vol. 15, no. 4 São Carlos July/Aug. 2012 Epub Aug 07, 2012, ISSN 1516-1439.
- [138] Běhálek L. *Polymery*. ISBN 978-80-88058-68-7, Liberec 2014, dostupné z: <https://publi.cz/books/180/Impresum.html>
- [139] Halama R., Katedra aplikované mechaniky, Fakulta strojní Ostrava, sylabus přednášek *Nauka o materiálu*. Dostupné z: <https://www.fs.vsb.cz/330/cs/nauka-o-materilu/>.
- [140] Bažant Z. P. Size effect on structural strength. *Archive of Applied Mechanics*. 1999, Vol. 69, pp. 703–725.
- [141] KIM, J.-K., YI, S.-T. *Application of size effect to compressive strength of concrete members*. *Sādhanā*. 2002, Vol. 27, pp. 467–484.

- [142] Fládr, J., Bílý, P. Vliv velikosti zkušební krychle při zkoušce pevnosti v tlaku u vysokopevnostních drátkobetonů s hrubozrnným kamenivem. *Beton TKS*, číslo 2/2017, ISSN 1213-3116.
- [143] Oshima M, Sato R, Hayashi F and Koyanagi W. Thermal properties and temperature dependency of mechanical properties of resin concretes for structural use. *Proceedings of the 10th International Congress on Polymers in Concrete*; 2001; Honolulu. Honolulu; 2001.
- [144] OLYMPUS, *Confocal laser scanning microscope LEXT OLS 3000*. Printed in Japan M1571E-0805B, www.olympus.com.
- [145] Soška J., Vráblík L. Porovnání matematických modelu pro výpočet smrštění a dotvarování betonu. *BETON TKS* 6/2011, ISSN 1213-3116.
- [146] Bažant Z. P., Baweja S. Creep and Shrinkage Prediction Model for Analysis Design of Concrete Structures: Model B3. *ACI Special Publication Creep and Shrinkage of Concrete*, A, Al-Manaseer, Editor, 2000.
- [147] BITTNER, T. et al. Impact of Increased Temperature on Cohesiveness of Textile Glass Reinforcement with UHPC Matrix. In: PADEVĚT, P., ed. *Applied Methods of the Analysis of Static and Dynamic Loads of Structures and Machines II*. Experimentální analýza napětí 2015, Český Krumlov, 2015-06-01/2015-06-04. Zurich: TRANS TECH PUBLICATIONS LTD, 2016. s. 211-214. *Applied Mechanics and Materials* vol. 827. ISSN 1660-9336. ISBN 978-3-03835-531-1. DOI 10.4028/www.scientific.net/AMM.827.211.
- [148] POKORNÝ, P. et al. Study of damage extent to glass fibre in glass-fibre fabric reinforcement during exposure simulating concrete pore. *Koroze a ochrana materiálu*. 2017, 61(4), 131-142. ISSN 1804-1213. DOI 10.1515/kom-2017-0016. Dostupné z: <http://www.casopis-koroze.cz>
- [149] BITTNER, T. et al. Textile Concrete in Adverse Conditions. In: KOSTELECKÁ, M., ed. *Rehabilitation and Reconstruction of Buildings*. 19th International Conference on Rehabilitation and Reconstruction of Buildings, Praha, Česká republika, 2017-11-23/2017-11-24. Zurich: Trans Tech Publications, 2018. s. 59-65. sv. Vol.776. ISSN 1013-9826. ISBN 978-3-0357-1361-9.
- [150] ČSN 73 6207 *Navrhování mostních konstrukcí z předpjatého betonu*. 10/1993 včetně změny Z1 01/1998 a Z2 01/2006.

- [151] ČSN EN 1992-1-1 Eurokód 2 Příloha B: *Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. 11/2006, vč. opravy 1, 07/2009, změny Z1 03/2010.
- [152] ČSN EN 1992-2 Eurokód 2 Příloha B: *Navrhování betonových konstrukcí - Část 2: Betonové mosty – Navrhování a konstrukční zásady*. 10/2009, vč. opravy 1, změny Z1 03/2010.
- [153] Tej P., Knez P., Mourek J., Císlar O., Design of an experimental arch pedestrian bridge made of UHPC. IABSE Congress Stockholm, 2016: *Challenges in Design and Construction of an Innovative and Sustainable Built Environment 2016*, Pages 1352-1355.

10. Seznam dosavadních publikací autora

Seznam byl přejet ze systému V3S (www.v3s.cvut.cz). Ing. Tomáš Bittner je jako autor nebo spoluautor veden celkem u 173 záznamů. Dle značení V3S se jedná o příspěvky typu: STA, ABS, CLA, KNI, UZV, FVZ, PAT, VZP). V souhrnu níže jsou uvedeny pouze výstupy typu článků, stať ve sborníku, kniha a abstrakt ve sborníku publikované na národních, mezinárodních, zahraničních konferencích a časopisech.

- [1] BITTNER, T. et al. Study of Corrosion Damage of Glass Fibers in Textile Fiberglass Reinforcement under Expositions Simulating Concrete Environment. In: NENADÁLOVÁ, Š., P. JOHOVÁ a T. SAJDLOVÁ, eds. *24th Concrete Days 2017*. 24. Betonářské dny 2017, Litomyšl, 2017-11-22/2017-11-23. Zurich: Trans Tech Publications, 2018. s. 189-196. Solid State Phenomena. sv. 272. ISSN 1012-0394. ISBN 978-3-0357-1284-1. DOI 10.4028/www.scientific.net/SSP.272.189.
- [2] BITTNER, T. et al. Textile Concrete in Adverse Conditions. In: KOSTELECKÁ, M., ed. *Rehabilitation and Reconstruction of Buildings*. 19th International Conference on Rehabilitation and Reconstruction of Buildings, Praha, Česká republika, 2017-11-23/2017-11-24. Zurich: Trans Tech Publications, 2018. s. 59-65. Vol. 776. ISSN 1013-9826. ISBN 978-3-0357-1361-9. DOI 10.4028/www.scientific.net/KEM.776.59.
- [3] BITTNER, T. et al. Textile Concrete in Adverse Conditions. In: KOSTELECKÁ, M., ed. *Rehabilitation and Reconstruction of Buildings*. 19th International Conference on Rehabilitation and Reconstruction of Buildings, Praha, Česká republika, 2017-11-23/2017-11-24. Zurich: Trans Tech Publications, 2018. s. 59-65. sv. Vol.776. ISSN 1013-9826. ISBN 978-3-0357-1361-9.
- [4] RYDVAL, M. et al. Mechanical Properties of Functionally Double Layered Thin Slabs. *IJSCER*. 2017, **2017**(6), 164-167. ISSN 2319-6009. DOI 10.18178/ijscer.6.3.164-167.
- [5] RYDVAL, M. et al. Functionally layered thin slabs made from UHPC and ECC composites. In: NENADÁLOVÁ, Š., P. JOHOVÁ a T. SAJDLOVÁ, eds. *23rd Concrete Days 2016*. 23. Betonářské dny 2016, Litomyšl, 2016-11-30/2016-12-01. Zurich: Trans Tech Publications, 2017. s. 90-96. Solid State Phenomena. sv. 259. ISSN 1012-0394. ISBN 978-3-0357-1105-9. DOI 10.4028/www.scientific.net/SSP.259.90.

- [6] BITTNER, T. et al. High-Performance Textile Concrete Structural Element Loaded by Bending Moment. *IJSCER*. 2017, **2017**(Volume 6, No. 2), 89-92. ISSN 2319-6009.
- [7] BITTNER, T. et al. Effect of Temperature Increasing on Deformation Properties of TRC. In: NENADÁLOVÁ, Š, P JOHOVÁ a T SAJDLOVÁ, eds. *23rd Concrete Days 2016*. 23. Betonářské dny 2016, Litomyšl, 2016-11-30/2016-12-01. Curich: Trans Tech Publications, 2017. s. 75-79. Solid State Phenomena. sv. 259 ISSN 1012-0394. ISBN 978-3-0357-1105-9. DOI 10.4028/www.scientific.net/SSP.259.75.
- [8] NENADÁLOVÁ, Š. et al. Detailed Examination of Myslinka Stone Railway Detailed Examination of Myslinka Stone Railway Bridge, Czech Republic , Czech Republic. *IJSCER*. 2017, **6** 131-136. ISSN 2319-6009. DOI 10.18178/ijcer.6.2.131-136.
- [9] BOUŠKA, P. et al. *Advanced Research of UHPC Matrix for Ultra-Thin Elements with Non-Conventional Reinforcement*. Prague: Department of Building Structures, Faculty of Civil Engineering, CTU in Prague, 2017. ISBN 978-80-01-06120-6.
- [10] BITTNER, T. et al. ÚČINEK ZVYŠOVÁNÍ TEPLoty NA DEFORMAČNÍ VLASTNOSTI TRC. In: SAJDLOVÁ, T a J VÍCH, eds. *23. Betonářské dny 2016*. Litomyšl, 2016-11-30/2016-12-01. Praha: ČBS - Česká betonářská společnost ČSSI, 2016. ISBN 978-80-906097-6-1.
- [11] POKORNÝ, P. et al. Study of damage extent to glass fibre in glass-fibre fabric reinforcement during exposure simulating concrete pore. *Koroze a ochrana materiálu*. 2017, 61(4), 131-142. ISSN 1804-1213. DOI 10.1515/kom-2017-0016. Dostupné z: <http://www.casopis-koroze.cz>
- [12] RYDVAL, M. et al. LEHKÉ BETONY ZA VYSOKÉ TEPLoty. In: *Doktorandská konference k 95. výročí Kloknerova ústavu*. Praha, 2016-09-22. Praha: ČVUT. Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2016. s. 99-105. ISBN 978-80-01-06006-3.
- [13] RYDVAL, M. et al. FUNKČNĚ VRSTVENÉ DESKY Z UHPC A ECC. In: SAJDLOVÁ, T a J VÍCH, eds. *23. Betonářské dny 2016*. Litomyšl, 2016-11-30/2016-12-01. Praha: ČBS - Česká betonářská společnost ČSSI, 2016. ISBN 978-80-906097-6-1.
- [14] RYDVAL, M. et al. Impact of Steel Fibers on Workability and Properties of UHPC. In: *Proceedings from 22nd Czech Concrete Day 2015*. 22. Betonářské dny 2015,

- Litomyšl, 2015-11-25/2015-11-26. Pfaffikon: Trans Tech Publications Inc., 2016. s. 57-61. Solid State Phenomena - Proceedings from 22nd Czech Concrete Day 2015. ISSN 1662-9779. ISBN 9783038356752. DOI 10.4028/www.scientific.net/SSP.249.57.
- [15] RYDVAL, M. et al. ZKOUŠKY PEVNOSTI LEHKÝCH BETONŮ V TLAKU ZA VYSOKÉ TEPLoty. In: HEŘMÁNKOVÁ, V, ed. *Zkoušení a jakost ve stavebnictví 2016 - Sborník recenzovaných příspěvků*. Zkoušení a jakost ve stavebnictví 2016, Brno, 2016-05-18/2016-05-20. Brno: VUT v Brně, 2016. s. 141-150. ISBN 978-80-214-5341-8.
- [16] RYDVAL, M., T. BITTNER a Š. NENADÁLOVÁ. COMPRESSIVE STRENGTH OF LWC EXPOSED TO HIGH TEMPERATURE. In: *Sborník konference JUNIORSTAV 2016*. JUNIORSTAV 2016, Brno, 2016-01-28. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2016. ISBN 978-80-214-5311-1.
- [17] VOKÁČ, M. et al. LONG TERM MEASURING OF EXPANSIONS AND CONTRACTIONS OF PRE-STRESSED CONCRETE BRIDGE STRUCTURE. In: *Key Engineering Materials*. Proceedings of the 17th Conference on the Rehabilitation and Reconstruction of Buildings (CRRB 2015), Praha, 2015-11-12/2015-11-13. Pfaffikon: Trans Tech Publications Inc., 2016. s. 201-206. ISSN 1013-9826. DOI 10.4028/www.scientific.net/KEM.714.201.
- [18] BITTNER, T. et al. Diagnosis of Myslinka Stone Railway Bridge. In: *Proceedings of the 17th Conference on the Rehabilitation and Reconstruction of Buildings (CRRB 2015)*. 17th Conference on the Rehabilitation and Reconstruction of Buildings - CRRB 2015, Praha, 2015-11-12/2015-11-13. Zurich: Trans Tech Publications, 2015. s. 186-191. ISSN 1013-9826. ISBN 978-3-03835-719-3. DOI 10.4028/www.scientific.net/KEM.714.186.
- [19] BITTNER, T. et al. Impact of Increased Temperature on Cohesiveness of Textile Glass Reinforcement with UHPC Matrix. In: PADEVĚT, P., ed. *Applied Methods of the Analysis of Static and Dynamic Loads of Structures and Machines II*. Experimentální analýza napětí 2015, Český Krumlov, 2015-06-01/2015-06-04. Zurich: TRANS TECH PUBLICATIONS LTD, 2016. s. 211-214. Applied Mechanics and Materials vol. 827. ISSN 1660-9336. ISBN 978-3-03835-531-1. DOI 10.4028/www.scientific.net/AMM.827.211.
- [20] BITTNER, T. et al. PODROBNÁ DIAGNOSTIKA KAMENNÉHO ŽELEZNIČNÍHO MOSTU MYSLINKA. In: *Juniorstav 2016, sborník abstraktů*.

- JUNIORSTAV 2016, 18. odborná konference doktorského studia, Brno, 2016-01-28. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2016. ISBN 978-80-214-5311-1.
- [21] BITTNER, T., J. ČECH a Š. NENADÁLOVÁ. DOPAD ZVÝŠENÉ TEPLoty NA SOUDRŽNOST MEZI TEXTILNÍ SKLENĚNOU VÝZTUŽÍ A UHPC MATRICÍ. In: *Juniorstav 2016, sborník abstraktů*. JUNIORSTAV 2016, 18. odborná konference doktorského studia, Brno, 2016-01-28. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2016. ISBN 978-80-214-5311-1.
- [22] BITTNER, T. et al. Experimental Tests of I Profile Made from UHPC Reinforced with Textile Glass Fibres. In: NENADÁLOVÁ, Š a P JOHOVÁ, eds. *Proceedings from 22nd Czech Concrete Day 2015 (print)*. 22. Betonářské dny 2015, Litomyšl, 2015-11-25/2015-11-26. Pfaffikon: Trans Tech Publications Ltd., 2016. s. 261-266. Solid State Phenomena. ISSN 1012-0394. ISBN 978-3-03835-675-2. DOI 10.4028/www.scientific.net/SSP.249.261.
- [23] BITTNER, T., Š. NENADÁLOVÁ a P. TEJ. EXPERIMENTÁLNÍ VÝZKUM A ZKOUŠENÍ PRVKŮ TRC. In: *Doktorandská konference k 95. výročí Kloknerova ústavu*. Praha, 2016-09-22. Praha: ČVUT. Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2016. s. 8-13. ISBN 978-80-01-06006-3.
- [24] NENADÁLOVÁ, Š. et al. WATER VAPOUR RESISTANCE FACTORS OF THREE WALL SURFACE FINISHING. In: KOSTELECKÁ, M. a P. KUKLÍK, eds. *Proceedings of the 17th Conference on the Rehabilitation and Reconstruction of Buildings (CRRB 2015)*. 17th Conference on the Rehabilitation and Reconstruction of Buildings - CRRB 2015, Praha, 2015-11-12/2015-11-13. Pfaffikon: Trans Tech Publications Inc., 2016. s. 64-71. ISSN 1013-9826. ISBN 978-3-03835-719-3. DOI 10.4028/www.scientific.net/KEM.714.64.
- [25] NENADÁLOVÁ, Š. a T. BITTNER. MECHANICAL PROPERTIES OF NON-CONVENTIONAL REINFORCEMENT TESTED IN THE KLOKNER INSTITUTE. In: VILTOVÁ, T. et al., eds. *25. betonářské dny*. Praha, 2018-11-20/2018-11-22. Praha: ČBS - Česká betonářská společnost ČSSI, 2018. ISBN 978-80-906759-6-4.
- [26] NENADÁLOVÁ, Š. a T. BITTNER. IZOZEK MANTO PLATE THERMAL INSULATION PLASTER SUITABLE FOR REHABILITATIONS. In: *SANACE A REKONSTRUKCE STAVEB 2018 Sborník odborných příspěvků*. Praha:

- Vědeckotechnická společnost pro sanace staveb a péči o památky WTA CZ, 2018. ISBN 978-80-02-02838-3.
- [27] VOKÁČ, M. et al. LONG TERM MEASURING OF EXPANSIONS AND CONTRACTIONS OF PRE-STRESSED CONCRETE BRIDGE STRUCTURE. In: *Proceedings of the 17th Conference on the Rehabilitation and Reconstruction of Buildings (CRRB 2015)*. 17th Conference on the Rehabilitation and Reconstruction of Buildings - CRRB 2015, Praha, 2015-11-12/2015-11-13. Zurich: Trans Tech Publications, 2015. s. 201-206. ISSN 1013-9826. ISBN 978-3-03835-719-3. DOI 10.4028/www.scientific.net/KEM.714.201.
- [28] NENADÁLOVÁ, Š. et al. Vliv relativní vlhkosti a dalších okrajových podmínek na difuzní vlastnosti materiálů. *Materiály pro stavbu*. 2016, (9771211078003), 33-36. ISSN 1213-0311.
- [29] NENADÁLOVÁ, Š. et al. Experimental tests of water vapour permeability of plasters. In: ROCCAFORTE, F. et al., eds. *Silicon Carbide and Related Materials 2015*. International Conference on silicon carbide and Related Materials 2015, Giardini Naxos, 2015-10-04/2015-10-09. Pfaffikon: Trans Tech Publications Ltd., 2016. s. 151-156. Materials Science Forum. ISSN 0255-5476. ISBN 978-3-0383-5740-7. DOI 10.4028/www.scientific.net/MSF.865.151.
- [30] NENADÁLOVÁ, Š., M. RYDVAL a T. BITTNER. EXPERIMENTAL TESTS OF WATER VAPOUR PERMEABILITY PROPERTIES. In: *Sborník konference JUNIORSTAV 2016*. JUNIORSTAV 2016, Brno, 2016-01-28. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2016. ISBN 978-80-214-5311-1.
- [31] NENADÁLOVÁ, Š., M. RYDVAL a T. BITTNER. EXPERIMENTAL TESTS OF WATER VAPOUR PERMEABILITY PROPERTIES. In: *Sborník abstraktů konference Juniorstav 2016*. Juniorstav 2016, Brno, VUT, 2016-01-28. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2016. s. 279. ISBN 978-80-214-5312-8.
- [32] NENADÁLOVÁ, Š. et al. DIFUZNÍ VLASTNOSTI – PROPUSTNOST VODNÍCH PAR POVRCHOVÝCH ÚPRAV. In: HEŘMÁNKOVÁ, V, ed. *Zkoušení a jakost ve stavebnictví 2016 - Sborník recenzovaných příspěvků*. Zkoušení a jakost ve stavebnictví 2016, Brno, 2016-05-18/2016-05-20. Brno: VUT v Brně, 2016. s. 105-116. ISBN 978-80-214-5341-8.
- [33] NENADÁLOVÁ, Š. et al. Laboratory Verification of Water Vapour Permeability of Plaster Compositions. In: DRDLOVÁ, M.D., D.K. KUBÁTOVÁ a

- M.B. BOHÁČ, eds. *Ecology and new building materials and products 2016*. Černá Hora, 2016-05-31/2016-06-02. Oxford: Elsevier Ltd, 2016. s. 50-57. Procedia Engineering. ISSN 1877-7058. DOI 10.1016/j.proeng.2016.07.364.
- [34] BITTNER, T., P. BOUŠKA a M. VOKÁČ. Mechanické vlastnosti nekonvenčních druhů výztuží. *Strojírenská technologie*. 2015, **XX**(2), 64-67. ISSN 1211-4162.
- [35] BITTNER, T. et al. Stanovení smykového spolupůsobení vrstveného skla zatíženého účinkem zvýšené teploty. *Strojírenská technologie*. 2015, **XX**(2), 67-72. ISSN 1211-4162.
- [36] NENADÁLOVÁ, Š. et al. Surface Finishings and Water Vapour Permeability. In: *International Masaryk Conference for Ph.D. Students and Young Researchers 2015*. Hradec Králové, 2015-12-14/2015-12-18. Hradec Králové: MAGNANIMITAS, 2015. s. 2688-2694. ISBN 978-80-87952-12-2.
- [37] BITTNER, T. et al. EXPERIMENTÁLNÍ ZKOUŠKY I PROFILU Z UHPC VYZTUŽENÉHO TEXTILNÍ SKLENĚNOU VÝZTUŽÍ. In: *22. Betonářské dny 2015 - Sborník příspěvků konference*. 22. Betonářské dny 2015, Litomyšl, 2015-11-25/2015-11-26. Praha: Česká betonářská společnost ČSSI, 2015. 1. vydání. ISBN 978-80-906097-0-9.
- [38] RYDVAL, M. et al. FUNKČNĚ VRSTVENÉ TRÁMCE. In: *Juniorstav 2015. sborník anotací*. Juniorstav 2015 17. odborná konference doktorského studia, Brno, 2015-01-29. VUT v Brně, Fakulta stavební, 2015. s. 198. ISBN 978-80-214-5091-2.
- [39] RYDVAL, M. et al. FUNCTIONALLY GRADED BEAMS. In: *Juniorstav 17. odborná konference doktorského studia, fakulta stavební*. Juniorstav 2015 17. odborná konference doktorského studia, Brno, 2015-01-29. VUT v Brně, Fakulta stavební, 2015. ISBN 978-80-214-5091-2.
- [40] BOUŠKA, P. et al. Flexural Strength of Float Glass. In: POLACH, P., ed. *Applied Methods of the Analysis of Static and Dynamic Loads of Structures and Machines*. 52nd International Conference on Experimental Stress Analysis, Mariánské Lázně, 2014-06-02/2014-06-05. Zürich: Trans Tech Publications Offices LTD, 2015. s. 341-344. Applied Mechanics and Materials. ISSN 1660-9336. ISBN 978-3-03835-413-0. DOI 10.4028/www.scientific.net/AMM.732.341.
- [41] BOUŠKA, P. et al. Experimental Verification of the Effective Thickness of Laminated Glass. In: *Proceedings of the 11th Conference on Local Mechanical Properties*. 11th Conference on Local Mechanical Properties, Stará Lesná, 2014-11-

- 12/2014-11-14. Uetikon-Zurich: Trans Tech Publications, 2015. s. 245-248. Key Engineering Materials. ISSN 1013-9826. ISBN 978-3-03835-555-7. DOI 10.4028/www.scientific.net/KEM.662.245.
- [42] BITTNER, T. et al. Diagnosis of Myslinka Stone Railway Bridge. In: *Sanace a rekonstrukce staveb WTA 2015*. Praha, 2015-11-12/2015-11-13. Praha: WTA CZ, 2015. s. 167. ISBN 978-80-02-02631-0.
- [43] BITTNER, T. et al. DIAGNOSTIKA KAMENNÉHO ŽELEZNIČNÍHO MOSTU MYSLINKA. In: *Sanace a rekonstrukce staveb WTA 2015*. Praha, 2015-11-12/2015-11-13. Praha: WTA CZ, 2015. s. 53-59. ISBN 978-80-02-02631-0.
- [44] BOUŠKA, P. et al. EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF A STRUCTURAL ELEMENT MADE FROM HIGH-PERFORMANCE TEXTILE CONCRETE LOADED BY THE BENDING MOMENT. In: DVORSKÝ, T., A. KOHOUTKOVÁ a V. VYTLAČILOVÁ, eds. *Fibre Concrete 2015 - Technology, Design, Application*. Fibre Concrete 2015, Praha, 2015-09-10/2015-09-11. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, 2015. ISSN 2336-338X. ISBN 978-80-01-05683-7.
- [45] NENADÁLOVÁ, Š. et al. FAKTOR DIFUZNÍHO ODPORU TŘÍ POVRCHOVÝCH ÚPRAV ZDIVA. In: *Sanace a rekonstrukce staveb WTA 2015*. Praha, 2015-11-12/2015-11-13. Praha: WTA CZ, 2015. s. 29-37. ISBN 978-80-02-02631-0.
- [46] NENADÁLOVÁ, Š. et al. DIFUZNÍ PARAMETRY A OVLIVŇUJÍCÍ OKRAJOVÉ PODMÍNKY. In: DROCHYTKA, R. a J. HODUL, eds. *CONSTRUMAT 2015*. Brno, 2015-06-10/2015-06-12. Brno: Brno University, 2015. ISBN 978-80-214-5205-3.
- [47] TEJ, P. et al. Loading Tests of Thin Plates Made of Ultra-High Performance Concrete Reinforced by PVA Fibers and 2D Textile Glass Reinforcement. In: *Advances in Materials and Materials Processing V. 5th International Conference on Advances in Materials and Manufacturing Processes*, Fuzhou, 2014-12-20/2014-12-21. Zurich: TRANS TECH PUBLICATIONS LTD, 2015. s. 569-572. ISSN 1662-8985. ISBN 978-3-03835-431-4. DOI 10.4028/www.scientific.net/AMR.1095.569.
- [48] NENADÁLOVÁ, Š. et al. Diffusion Parameters of Basic Diffusion Adhesive Mortars with Silicate or Acrylic Plaster. In: SMETANOVÁ, L., M. NEJEDLÍK a M. DRDLOVÁ, eds. *Ecological and New Building Materials and Products 2015*.

- Černá Hora, 2015-06-02/2015-06-04. Zurich: TRANS TECH PUBLICATIONS LTD, 2015. s. 16-22. ISBN 978-3-03835-587-8.
- [49] BITTNER, T., P. BOUŠKA a M. VOKÁČ. Mechanické vlastnosti nekonvenčních výztuží. In: *Experimentální a výpočtové metody v inženýrství*. Litoměřice, 2015-06-24/2015-06-25. Ústí nad Labem: UJEP v Ústí nad labem, Fakulta výrobních technologií a managementu, 2015. s. 17. ISBN 978-80-7414-922-1. BITTNER, T. et al. Hodnocení smykového spolupůsobení vrstveného skla vystaveného účinku zvýšené teploty. In: *EXPERIMENTÁLNÍ A VÝPOČTOVÉ METODY V INŽENÝRSTVÍ*. Experimentální a výpočtové metody v inženýrství, Litoměřice, 2015-06-24/2015-06-25. Ústí nad Labem: FVTM,UJEP, 2015. FVTM UJEP 2015. ISBN 978-80-7414-913-9.
- [50] BITTNER, T., P. BOUŠKA a M. VOKÁČ. Mechanické vlastnosti nekonvenčních výztuží. In: *EXPERIMENTÁLNÍ A VÝPOČTOVÉ METODY V INŽENÝRSTVÍ*. Experimentální a výpočtové metody v inženýrství, Litoměřice, 2015-06-24/2015-06-25. Ústí nad Labem: FVTM,UJEP, 2015. FVTM UJEP 2015. ISBN 978-80-7414-913-9.
- [51] BITTNER, T. et al. Impact of Increased Temperature on Cohesiveness of Textile Glass Reinforcement with UHPC Matrix. In: PADEVĚT, P. a P. BITTNAR, eds. *Experimental Stress Analysis 2015*. Experimentální analýza napětí 2015, Český Krumlov, 2015-06-01/2015-06-04. Praha: Czech Technical University in Prague, 2015. s. 9-10. ISBN 978-80-01-05734-6.
- [52] BITTNER, T. et al. Experimental Tests of White UHPC Plates Reinforced PVA Fibres and Textile Glass Reinforcement. In: *Ekologie a nové stavební hmoty a výrobky*. Ecological and New Building Materials and Products 2015, Černá Hora, 2015-06-02/2015-06-04. Brno: Výzkumný ústav stavebních hmot, a.s., 2015. ISBN 978-80-87397-19-0.
- [53] BITTNER, T. et al. MECHANICKÉ ZKOUŠKY TENKÝCH UHPC DESEK. In: DROCHYTKA, R. a J. HODUL, eds. *CONSTRUMAT 2015*. Brno, 2015-06-10/2015-06-12. Brno: Brno University, 2015. ISBN 978-80-214-5205-3.
- [54] BITTNER, T. et al. Experimental Tests of White UHPC Plates Reinforced by PVA Fibres and Textile Glass Reinforcement. In: SMETANOVÁ, L., M. NEJEDLÍK a M. DRDLOVÁ, eds. *Ecological and New Building Materials and Products 2015*. 19. Conference of Ecological and New Building Materials and Products 2015, Černá Hora, 2015-06-02/2015-06-04. Zurich: TRANS TECH PUBLICATIONS

- LTD, 2015. s. 83-88. ADVANCED MATERIALS RESEARCH. ISSN 1662-8985. ISBN 978-3-03835-587-8. DOI 10.4028/www.scientific.net/AMR.1124.83.
- [55] BITTNER, T. et al. Determination of Mechanical Properties of Non-Conventional Reinforcement. In: *Mechanical Properties of Materials from Nano to Micro/Meso-Scale*. 11th Conference on Local Mechanical Properties, Stará Lesná, 2014-11-12/2014-11-14. Zurich: TRANS TECH PUBLICATIONS LTD, 2015. s. 249-252. ISSN 1013-9826. ISBN 978-3-03835-555-7. DOI 10.4028/www.scientific.net/KEM.662.249.
- [56] NENADÁLOVÁ, Š. et al. Diffusion Parameters of Basic Diffusion Adhesive Mortars with Silicate or Acrylic Plaster. In: *Ekologie a nové stavební hmoty a výrobky*. Ecological and New Building Materials and Products 2015, Černá Hora, 2015-06-02/2015-06-04. Brno: Výzkumný ústav stavebních hmot, a.s., 2015. ISBN 978-80-87397-19-0.
- [57] NENADÁLOVÁ, Š. et al. Testy materiálů historických budov. In: *Juniorstav 17. odborná konference doktorského studia, fakulta stavební*. Juniorstav 2015 17. odborná konference doktorského studia, Brno, 2015-01-29. VUT v Brně, Fakulta stavební, 2015. ISBN 978-80-214-5091-2.
- [58] NENADÁLOVÁ, Š. et al. Testy materiálů historických budov. In: *Juniorstav 2015. sborník anotací*. Juniorstav 2015 17. odborná konference doktorského studia, Brno, 2015-01-29. VUT v Brně, Fakulta stavební, 2015. s. 280. ISBN 978-80-214-5091-2.
- [59] BITTNER, T. et al. Experimental Investigation of the Mechanical Properties of Textile Glass Reinforcement. In: POLACH, P., ed. *Applied Methods of the Analysis of Static and Dynamic Loads of Structures and Machines*. 52nd International Conference on Experimental Stress Analysis, Mariánské Lázně, 2014-06-02/2014-06-05. Zürich: Trans Tech Publications Offices LTD, 2015. s. 45-48. Applied Mechanics and Materials. ISSN 1660-9336. ISBN 978-3-03835-413-0. DOI 10.4028/www.scientific.net/AMM.732.45.
- [60] BITTNER, T. et al. MECHANICAL PROPERTIES OF BASALT REINFORCEMENT AND TEXTILE GLASS REINFORCEMENT. In: *Juniorstav 2015. sborník anotací*. Juniorstav 2015 17. odborná konference doktorského studia, Brno, 2015-01-29. VUT v Brně, Fakulta stavební, 2015. s. 192. ISBN 978-80-214-5091-2.

- [61] BITTNER, T. et al. MECHANICKÉ VLASTNOSTI ČEDIČOVÉ A SKLENĚNÉ TEXTILNÍ VÝZTUŽE. In: *Juniorstav 17. odborná konference doktorského studia, fakulta stavební*. Juniorstav 2015 17. odborná konference doktorského studia, Brno, 2015-01-29. VUT v Brně, Fakulta stavební, 2015. ISBN 978-80-214-5091-2.
- [62] BITTNER, T. et al. Zkoušky tenkých desek z UHPC vyztužených PVA vlákny a textilní skleněnou výztuží. *Strojírenská technologie*. 2014, **XIX**(3, 4), 146-149. ISSN 1211-4162.
- [63] BITTNER, T. et al. Tests of UHPC Thin Plates Reinforced by 2D Textile Glass Reinforcement and PVA Fibres. In: *EXPERIMENTÁLNÍ A VÝPOČTOVÉ METODY V INŽENÝRSTVÍ*. I. mezinárodní vědecká konference pro mladé pracovníky EVM, Ústí nad Labem, 2014-06-11/2014-06-13. Ústí nad Labem: UJEP, 2014. s. 11. Fakulta výrobních technologií a managementu UJEP Ústí n. L.. ISBN 978-80-7414-724-1.
- [64] BOUŠKA, P. et al. Estimating the Flexural Strength of Float Glass. In: *52nd conference on experimental stress analysis 2014*. Mariánské Lázně, 2014-06-02/2014-06-05. Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o., 2014. ISBN 978-80-231-0377-6.
- [65] BOUŠKA, P. et al. Estimating the Flexural Strength of Float Glass. In: *Experimental Stress Analysis 2014*. 52nd conference on experimental stress analysis, Mariánské Lázně, 2014-06-02/2014-06-05. Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o., 2014. s. 9-10. ISBN 978-80-261-0376-9.
- [66] BOUŠKA, P. et al. Experimental Investigation of Transparent Glazed Noise Reducing Traffic Barrier Against Impact of Flying Stones. In: KOSTELECKÁ, M., ed. *Advanced Materials Research*. 15th Conference on Rehabilitation and Reconstruction of Buildings, Prague, 2013-11-14/2013-11-15. Uetikon-Zurich: Trans Tech Publications Inc., 2014. s. 221-224. Proceedings of the Conference on the Rehabilitation and Reconstruction of Buildings CRRB 2013. ISSN 1022-6680. ISBN 978-3-03835-083-5. DOI 10.4028/www.scientific.net/AMR.923.221.
- [67] TEJ, P. et al. Loading Tests of Experimental Models of an Integral Bridge Loaded by the Effects of Water Pressure during Floods. In: *4th International Conference on Civil Engineering, Architecture and Building Materials*. Haikou, 2014-05-24/2014-05-25. Zurich: TRANS TECH PUBLICATIONS LTD, 2014. s. 1554-1557. ISSN 1660-9336. ISBN 9783038351672. DOI 10.4028/www.scientific.net/AMM.587-589.1554.

- [68] RYDVAL, M. et al. Experimentální zkoušení vrstvených UHPFRC prvků. In: *Konference zkoušení a jakost ve stavebnictví - Sborník recenzovaných příspěvků 2014*. Zkoušení a jakost ve stavebnictví 2014, Brno, 2014-10-07/2014-10-08. VUT v Brně, Fakulta stavební, 2014. s. 225-233. ISBN 978-80-214-5032-5.
- [69] RYDVAL, M. et al. Experimentální zkoušení vrstvených UHPFRC prvků. In: *Konference zkoušení a jakost ve stavebnictví - Sborník recenzovaných příspěvků 2014*. Zkoušení a jakost ve stavebnictví 2014, Brno, 2014-10-07/2014-10-08. VUT v Brně, Fakulta stavební, 2014. s. 225-233. ISBN 978-80-214-5032-5.
- [70] BITTNER, T. et al. STANOVENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ NEKONVENČNÍCH VÝZTUŽÍ. In: *Konference zkoušení a jakost ve stavebnictví - Sborník recenzovaných příspěvků 2014*. Zkoušení a jakost ve stavebnictví 2014, Brno, 2014-10-07/2014-10-08. VUT v Brně, Fakulta stavební, 2014. s. 19-25. ISBN 978-80-214-5032-5.
- [71] NENADÁLOVÁ, Š. et al. VLIV VSTUPNÍCH PARAMETRŮ NA PŘESNOST PŘI STANOVENÍ SOUČinitele DIFÚZNÍHO ODPORU. In: *Konference zkoušení a jakost ve stavebnictví - Sborník recenzovaných příspěvků 2014*. Zkoušení a jakost ve stavebnictví 2014, Brno, 2014-10-07/2014-10-08. VUT v Brně, Fakulta stavební, 2014. ISBN 978-80-214-5032-5.
- [72] NENADÁLOVÁ, Š. et al. VLIV VSTUPNÍCH PARAMETRŮ NA PŘESNOST PŘI STANOVENÍ SOUČinitele DIFÚZNÍHO ODPORU. In: *Konference zkoušení a jakost ve stavebnictví - Sborník recenzovaných příspěvků 2014*. Zkoušení a jakost ve stavebnictví 2014, Brno, 2014-10-07/2014-10-08. VUT v Brně, Fakulta stavební, 2014. s. 215-223. ISBN 978-80-214-5032-5.
- [73] NENADÁLOVÁ, Š. et al. ZÁVISLOST RYCHLOSTI PŘIROZENÉHO VYSOUŠENÍ CIHELNÉHO ZDIVA NA JEHO POVRCHOVÉ ÚPRAVĚ. In: *Sanace a rekonstrukce staveb 2014 a CRRB -16th International Conferene on Rehabilittation and Reconstruction of Buildings*. WTA-Sanace a rekonstrukce staveb 2014, Brno, 2014-11-05/2014-11-06. Praha: Vědeckotechnická společnost pro sanace staveb a péči o památky WTA CZ, 2014. s. 120-123. ISBN 978-80-02-02539-9.
- [74] BITTNER, T. et al. Zkoušky tenkých desek z UHPC vyztužených PVA vlákny a textilní skleněnou výztuží. In: PETRENKO, A., ed. *Experimentální a výpočtové metody v inženýrství*. Ústí nad Labem, 2014-06-11/2014-06-13. Ústí nad Labem: UJEP, 2014. ISBN 978-80-7414-725-8.

- [75] BITTNER, T. et al. Degradation of laminated glass as result of increased temperature. In: KOSTELECKÁ, M., ed. *Advanced Materials Research*. 15th Conference on Rehabilitation and Reconstruction of Buildings, Prague, 2013-11-14/2013-11-15. Uetikon-Zurich: Trans Tech Publications Inc., 2014. s. 209-212. Proceedings of the Conference on the Rehabilitation and Reconstruction of Buildings CRRB 2013. ISSN 1022-6680. ISBN 978-3-03835-083-5. DOI 10.4028/www.scientific.net/AMR.923.209.
- [76] BITTNER, T. et al. Experimental Determination of Mechanical Properties of Textile Glass Reinforcement. In: *52nd conference on experimental stress analysis 2014*. Mariánské Lázně, 2014-06-02/2014-06-05. Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o., 2014. ISBN 978-80-231-0377-6.
- [77] BITTNER, T. et al. Experimental Determination of Mechanical Properties of Textile Glass Reinforcement. In: *Experimental Stress Analysis 2014*. 52nd conference on experimental stress analysis, Mariánské Lázně, 2014-06-02/2014-06-05. Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o., 2014. s. 7-8. ISBN 978-80-261-0376-9.
- [78] BITTNER, T. et al. STANOVENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTI TEXTILNÍ SKLENĚNÉ VÝZTUŽE. In: *Ekologie a nové stavební hmoty a výrobky ICEBMP 2014*. 18 mezinárodní konference Ekologie a nové stavební hmoty a výrobky ICEBMP 2014, Černá Hora, 2014-06-03/2014-06-05. Brno: VUSTAH - Výzkumný ústav stavebních hmot, 2014. ISBN 978-80-87397-16-9.
- [79] KOSTELECKÁ, M. et al. THE INFLUENCE OF FROST RESISTANCE ON UHPC PLATES WITH DIFFERENT TYPES OF TEXTILES ARMATURES. In: *20th International Conference Engineering Mechanics 2014*. Svatka, 2014-05-12/2014-05-15. Brno: Brno University of Technology, 2014. s. 308-311. ISSN 1805-8248. ISBN 978-80-214-4871-1.
- [80] KOSTELECKÁ, M. et al. VLIV MRAZU NA UHPC DESKY VYZTUŽENÉ RŮZNÝMI TYPY TEXTILNÍCH VÝZTUŽÍ. In: *Technologie betonu 2014*. 12. konference Technologie betonu, Jihlava, 2014-04-09. Praha: ČBS - Česká betonářská společnost ČSSI, 2014. s. 161-166. ISBN 978-80-903806-4-6.
- [81] BOUŠKA, P. et al. Experimental Investigation of Transparent Glazed Noise Reducing Traffic Barrier Against Impact of Flying Stones. In: *Sanace a rekonstrukce staveb 2013*. 35. konference Sanace a rekonstrukce staveb 2013,

- Praha, 2013-11-14/2013-11-15. Praha: Vědeckotechnická společnost pro sanace staveb a péči o památky WTA CZ, 2013. s. 264. ISBN 978-80-02-02502-3.
- [82] BITTNER, T. et al. Degradation of Laminated Glass as Result of Increased Temperature. In: *Sanace a rekonstrukce staveb 2013*. 35. konference Sanace a rekonstrukce staveb 2013, Praha, 2013-11-14/2013-11-15. Praha: Vědeckotechnická společnost pro sanace staveb a péči o památky WTA CZ, 2013. s. 261. ISBN 978-80-02-02502-3.
- [83] BOUŠKA, P. et al. Mechanical Resistance of Triple Glass Facade Panels. In: *Applied Mechanics and Materials*. 51st Conference on Experimental Stress Analysis, Litoměřice, 2013-06-11/2013-06-13. Uetikon-Zurich: Trans Tech Publications, 2014. s. 84-89. ISSN 1660-9336. ISBN 978-3-03785-977-3. DOI 10.4028/www.scientific.net/AMM.486.84.
- [84] BOUŠKA, P. et al. Mechanical Resistance of Triple Glass Facade Panels. In: SKOČILASOVÁ, Blanka a Alena PETRENKO, eds. *Proceedings of the 51st Conference on Experimental Stress Analysis*. 51st Conference on Experimental Stress Analysis, Litoměřice, 2013-06-11/2013-06-13. Ústí nad Labem: FVTM,UJEP, 2013. ISBN 978-80-7414-579-7.
- [85] BITTNER, T. et al. Deformation Properties of Laminated Glass Subjected to Increased Temperature. In: *Applied Mechanics and Materials*. 51st Conference on Experimental Stress Analysis, Litoměřice, 2013-06-11/2013-06-13. Uetikon-Zurich: Trans Tech Publications, 2014. s. 66-71. ISSN 1660-9336. ISBN 978-3-03785-977-3. DOI 10.4028/www.scientific.net/AMM.486.66.
- [86] BITTNER, T. et al. Deformation Properties of Laminated Glass Subjected to Increased Temperature. In: SKOČILASOVÁ, Blanka a Alena PETRENKO, eds. *Proceedings of the 51st Conference on Experimental Stress Analysis*. 51st Conference on Experimental Stress Analysis, Litoměřice, 2013-06-11/2013-06-13. Ústí nad Labem: FVTM,UJEP, 2013. ISBN 978-80-7414-579-7.
- [87] BITTNER, T. et al. Degradace vrstveného skla vlivem zvýšené teploty. In: *Sanace a rekonstrukce staveb 2013*. 35. konference Sanace a rekonstrukce staveb 2013, Praha, 2013-11-14/2013-11-15. Praha: Vědeckotechnická společnost pro sanace staveb a péči o památky WTA CZ, 2013. s. 223-226. ISBN 978-80-02-02502-3.