



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra konstrukcí pozemních staveb

Vyztužování silikátových kompozitů pomocí nekorozivních výztuží

Reinforcement of silicate composites
by non-corrosive reinforcements

Disertační práce

Ing. Lenka Laiblová

Studijní program: Stavební inženýrství
Studijní obor: Pozemní stavby
Vedoucí disertační práce: prof. Ing. Petr Hájek, CSc., FEng.

Praha, 2019



PROHLÁŠENÍ

Jméno doktoranda: Ing. Lenka Laiblová

Název disertační práce:

Vyztužování silikátových kompozitů pomocí nekorozivních výztuží

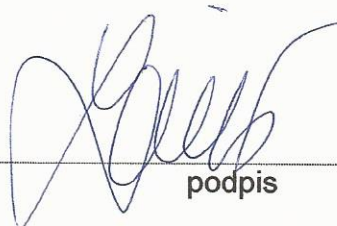
Prohlašuji, že jsem uvedenou disertační práci vypracoval/a samostatně pod vedením školitele prof. Ing. Petra Hájka, CSc., FEng.

Použitou literaturu a další materiály uvádím v seznamu použité literatury.

Disertační práce vznikla v souvislosti s řešením projektů:

- GAČR P104 13-12676S Pokročilý výzkum UHPC matrice pro ultra tenké prvky s nekonvenční výztuží
- CZ.01.1.02/0.0/0.0/15_019/0004908 Pokročilé betonové prvky s tkanou výztuží
- TH02020512 Subtilní betonový mobiliář a drobné stavby pro železniční stanice
- SGS14/116/OHK1/2T/11 Optimalizace složení směsi UHPC a alternativní druhy vyztužení
- SGS15/182/OHK1/3T/11 Ověření trvanlivosti a životnosti cementových kompozitů a recyklovaných betonů
- SGS18/108/OHK1/2T/11 Environmentální aspekty vysokohodnotných cementových kompozitů a betonů s recyklovaným kamenivem se zohledněním jejich trvanlivosti a životnosti

V Praze dne 20.7.2019



podpis

I hereby certify that this dissertation constitutes my own product. I wrote it under the guidance of prof. Ing. Petr Hajek, CSc., FEng. The language of others is set forth, quotation marks so indicate and appropriate credit is given where I have used the language, ideas, expressions or writings of another. Photos and pictures without mentioning the source are created by the author of the dissertation.

I declare that the dissertation describes original work that has not previously been presented for the award of any other degree of any institution.

Signed,

Lenka Laiblová, 07/2019



Tímto potvrzuji, že tato disertační práce je mým vlastním dílem, které jsem napsala pod vedením prof. Ing. Petra Hájka, CSc., FEng.

Přímé citace jsou značeny uvozovkami. Myšlenky, výrazy a práce ostatních jsou označeny odkazy na odpovídající zdroje. Fotografie a obrázky bez uvedení zdroje jsou tvorbou autora této disertační práce.

Prohlašuji, že tato disertační práce je původním dílem, které dosud nebylo předloženo k obhájení titulu u jakékoli jiné instituce.

Podepsána,

Lenka Laiblová, 07/2019



Poděkování

Děkuji svému muži za jeho projevenou důvěru, podporu a pochopení v těch nejvypjatějších chvílích při psaní této práce. Děkuji, že mi byl po celou dobu skvělou oporou.

Děkuji prof. Hájkovi za jeho odborné a motivující vedení při zpracování disertační práce, za jeho cenné rady a ochotné konzultace.

Poděkování patří celému týmu Laboratoře kompozitních materiálů za výpomoc při výrobě a testování vzorků.

Dále bych ráda poděkovala pracovníkům Kloknerova ústavu za jejich výpomoc při provádění některých experimentů a za jejich cenné rady a konzultace.

A v neposlední řadě bych chtěla poděkovat Laboratoři skenovací elektronové mikroskopie SEM na Fakultě stavební, ČVUT Praha (CE-SEM Lab) za snímky z elektronového mikroskopu.



Anotace

Textilní beton často označován zkratkou TRC z anglického názvu Textile Reinforced Concrete je kompozitní materiál, který je stále ve fázi výzkumu, přestože je známý již druhou desítku let. Tato disertační práce se zabývá využitím technických textilií jako alternativy výztuže vysokohodnotného betonu zejména pro subtilní fasádní panely se zaměřením na jejich trvanlivost a vliv na životní prostředí z pohledu celého jejich životního cyklu. V práci je prezentovaná řada experimentů ověřující základní mechanické parametry textilních výztuží i betonu, odolnost a trvanlivost jednotlivých druhů výztuží i celkového kompozitu. Experimentální část je doplněna o detailní LCA analýzu, zabývající se porovnáním environmentálních dopadů běžných fasádních panelů a panelů z TRC s různými druhy výztuží (z AR skla, uhlíku a čediče).

Klíčová slova: textilní beton, TRC, technické textilie, vysokohodnotný beton, ultra vysokohodnotný beton, trvanlivost, environmentální, LCA



Abstract

Textile Reinforced Concrete (TRC) is a composite material that is still in the research phase, although it has been known for the two recent decades. This dissertation deals with the use of technical textiles as an alternative reinforcement of high-performance concrete, especially for application in subtle facade panels. The dissertation is focused to durability and environmental impact from the perspective of their entire life cycle of facade elements from TRC. The thesis presents a series of experiments verifying basic technical parameters of textile reinforcement and concrete, resistance and durability of individual types of reinforcement and verifying of the composite as a whole. The experimental part is supplemented by a detailed LCA, dealing with the comparison of environmental impacts of conventional facade panels and TRC panels with different types of reinforcement (AR glass, carbon and basalt).

Keywords: textile reinforced concrete, TRC, technical textiles, high performance concrete, ultra high performance concrete, durability, environmental, LCA



List zkratek

Zkratka	Definice v původním jazyce	Definice česká
AFGC	Association Francaise de Génie Civil	Francouzská asociace pro stavebnictví
AP	Acidification potential	Potenciál acidifikace
AR	Alkali Resistant	Alkalirezistentní
EPD	Environmental Product Declaration	Environmentální prohlášení o produktu
FRP	Fiber Reinforced Polymer	Kompozitní výztuž
GAČR	Grantová agentura České republiky	Grantová agentura České republiky
GBBS	Ground Granulated Blast Furnace Slag	Jemně mletá granulovaná vysokopecní struska
GEMIS	Global Emission Model for Integrated Systems	Globální emisní model pro integrované systémy
GGBS	Ground granulated blast fume	Mletá granulovaná vysokopecní struska
GRC	Glass Reinforced Concrete	Beton vyztužený sklem
GRC	Glass reinforced concrete	Beton vyztužený skleněnými vlákny
GRCA	Glass Fibre Reinforced Concrete Association	Asociace betonů vyztužených skleněnými vlákny
GRFC	Glass Reinforced Fibre Composite	Beton vyztužený skleněnými vlákny
GWP	Global Warming Potential	Potenciál globálního oteplování
HPC	High Performance Concrete	Vysokohodnotný beton
CHRL	chemické rozmrazovací látky	Chemické rozmrazovací látky
ISO	International Organization for Standardization	Mezinárodní organizace pro normalizaci
LCA	Life Cycle Assessment	Hodnocení životního cyklu
OPC	Ordinary portland cement	Běžný portlandský cement
ORC	Ordinary reinforced concrete	Běžný železobeton
PAN	Polyakrylonitril	Polyakrylnitril
PCEs	Polycarboxylate Based Superplasticizer	Superplastifikátor na bázi polykarboxylátu
PCR	Product Category Rules	Pravidla produktové kategorie
PEI	Primary Energy Input	Spotřeba primární energie
POCP	Photochemical Ozone Creation Potential	Potenciál tvorby přízemního ozonu
PVA	Polyvinylalkohol	Polyvinyl alkohol
SEM	Scanning Electron Microscope	Rastrovací elektronový mikroskop
TAČR	Technologická agentura České republiky	Technologická agentura České republiky
TRC	Textile Reinforced Concrete	Textilní beton
TSC	Taillierte Streifenprobe	Vzorek pásu
UHPC	Ultra High Performance Concrete	Ultra vysokohodnotný beton



Obsah

1 Úvod	11
1.1 Úvodní slova a motivace.....	11
1.2 Zaměření práce	12
1.3 Cíle práce	13
2 Textilní beton	14
2.1 Technické textilie.....	15
2.1.1 Materiály vláken pro výrobu textilií.....	16
2.1.2 Typy textilií a struktury přízí.....	24
2.1.3 Povrchová úprava vláken	27
2.2 Beton používaný pro TRC.....	27
2.2.1 Vysokohodnotný beton	27
2.2.2 Nejčastěji používané složky.....	28
2.2.3 Vláknitá výztuž	33
2.3 Distančníky	34
2.4 Aplikace TRC.....	34
2.5 Trvanlivost	39
2.5.1 Trvanlivost betonu používaného pro TRC.....	40
2.5.2 Odolnost při požáru	43
2.5.3 Chemická odolnost vláken	44
2.5.4 Trvanlivost vazby mezi maticí a technickou textilií.....	50
3 Specifikace použitých materiálů v experimentech	53
3.1 Beton	53
3.2 Textilní výztuž	54
3.2.1 Skleněná výztuž.....	54
3.2.2 Uhlíková výztuž	55
3.2.3 Čedičová výztuž	56
3.3 Povrchová úprava textilií.....	56
4 Zkušební metody	57
4.1 Pevnost v tlaku.....	57
4.2 Pevnost HPC v tahu za ohybu.....	58
4.3 Statický modul pružnosti HPC v tlaku.....	58
4.4 Odolnost povrchu HPC proti působení vody a CHRL.....	59
4.5 Mikroskopická analýza.....	60
4.6 Stanovení vývoje teplot během hydratace HPC.....	60
4.7 Zrychlená zkouška karbonatace HPC.....	61
4.8 Tahová zkouška rovingů	62
4.9 Mrazuvzdornost.....	63
4.9.1 Mrazuvzdornost HPC	63
4.9.2 Mrazuvzdornost TRC.....	64
5 Experimentální výzkum	65
5.1 Mechanické parametry vysokohodnotného betonu	65



5.1.1	Pevnost v tlaku	65
5.1.2	Pevnost v tahu za ohybu	66
5.1.3	Modul pružnosti	67
5.2	Mechanické parametry technických výztuží	67
5.2.1	Tahová pevnost rovingů	67
5.3	Dlouhodobá zkouška mrazuvzdornosti vysokohodnotného betonu	73
5.4	Dlouhodobá zkouška mrazuvzdornosti TRC	75
5.5	Dlouhodobá zkouška odolnosti povrchu vysokohodnotného betonu vůči chemickým rozmrazovacím látkám	79
5.6	Urychlená zkouška karbonatace	82
5.7	Vývoj hydratačního tepla	83
5.8	Alkalivzdornost textilních výztuží	85
5.8.1	SEM analýza vlivu alkalického prostředí a zvýšené teploty na změny v morfologii vláken	85
5.8.2	Vliv alkalického prostředí na tahovou pevnost rovingů	98
6	Environmentální hodnocení TRC	110
6.1	Vliv betonových konstrukcí na životní prostředí	110
6.2	Environmentální značení	111
6.3	LCA metoda	112
6.4	Aplikace LCA na TRC	113
6.4.1	Cíl a rozsah	113
6.4.2	Inventarizace	114
6.4.3	Posouzení environmentálních dopadů TRC	115
7	Environmentální porovnání	116
7.1	Vstupní parametry pro výpočet	116
7.2	Výpočet	118
7.3	Citlivostní analýza	124
7.4	Závěr environmentálního porovnání	126
8	Závěry a doporučení	127
	Reference	131
	Seznam obrázků	144
	Seznam tabulek	148
	Publikace autora	150
	Účast na grantových projektech	150
	Přílohy	159

1 Úvod

1.1 Úvodní slova a motivace

Beton se ve stavebnictví používá v podstatě již tisíce let. O jeho velké pevnosti v tlaku ale zároveň malé pevnosti v tahu se ví od počátku jeho použití. Princip vyztužování včetně vkládání vláken do betonu u podobných druhů materiálů také není nic nového. Již před tisíci lety vkládali lidé slámu do hliněných cihel, aby je vylepšili. Později pak přišla myšlenka výztuží na bázi kovu a v posledních několika desítkách let bylo vyvinuto mnoho druhů nekonvenčních výztuží k náhradě za kovové [1]. Nesporná pevnost, odolnost, možnost téměř jakéhokoli tvarování či cena betonu, resp. železobetonu jsou jedny z mnoha výhod, které zatím žádný materiál zcela nenahradil. To je důvod, proč je beton momentálně druhý nejpoužívanější materiál na světě hned po vodě. P. Kumar Mehta a kol. [2] odhadují, že v roce 2004 byla celosvětová produkce betonu kolem 11 miliard tun. Pro srovnání v roce 1963 byla spočítána spotřeba betonu celosvětově na 0,5 miliardy tun. Podle [3] vzrostla celosvětová produkce betonu v posledních 50 letech více než 12 krát. Je zřejmé, že se zvyšujícím se počtem obyvatel a rapidním nárůstem výstavby v posledních několika letech, se bude při zachování stejného přístupu lidstva spotřeba betonu stále zvyšovat. Zvyšují se samozřejmě i náklady na výrobu betonu a s tím spojená spotřeba primární energie, nadměrná produkce CO₂ spojená především s výrobou cementu a likvidace zásob neobnovitelných zdrojů. Existuje mnoho přístupů k tomuto celosvětovému problému. Z globálního hlediska, je současným trendem přístup k navrhování stavebních konstrukcí s ohledem na udržitelné chování společnosti [4]. Znamená to, že chceme-li do budoucna zvýšit komplexní kvalitu staveb z hlediska udržitelné výstavby a výrazně snížit zátěž životnímu prostředí produkcí železobetonu, měli bychom se zamyslet nad možnými řešeními. Kromě toho, že nahradíme železobeton zcela jinými materiály, existuje možnost optimalizace zažitých konstrukčních principů, jako je např. optimalizace a celková minimalizace plochy průřezu konstrukčních prvků či náhrada běžné

ocelové výztuže alternativními výztužemi. V poslední době se ukazuje, že vhodným materiálem z hlediska environmentálních dopadů může být pro některé prvky textilní beton (TRC z anglického Textile Reinforced Concrete). Jedná se o poměrně nový kompozitní materiál, který byl vyvíjen od konce devadesátých let především v německých výzkumných centrech při univerzitách v Aachenu a Drážďanech. Dnes je rozšířen po celém světě. TRC se skládá z technických textilií a jemnozrnného vysokohodnotného (popř. ultra vysokohodnotného) betonu. Stejně tak, jako je v klasickém železobetonu kombinována pevnost betonu v tlaku a pevnost oceli v tahu, je u TRC kombinována vysoká tlaková pevnost betonu s vysokou tahovou pevností textilních vláken. Oproti železobetonu, který má předepsané minimální krytí ocelové výztuže proti korozi a u kterého jsme v určitých případech limitováni konečnou tloušťkou, nabízí TRC zcela nové možnosti. Vzhledem k používaným materiálům, které nepodléhají korozi, není nutné krytí výztuže, a právě proto dovolí tento kompozit vytvářet prvky s velmi malou tloušťkou dokonce v řádech několika desítek milimetrů při zachování podobných mechanických parametrů jako u běžného železobetonu. Použití technických textilií, které jsou umístěny v hlavním směru namáhání kompozitu, vede k daleko vyšší účinnosti ve srovnání s použitím volně rozmístěných krátkých vláken v běžně známém vlákno betonu. Textilní beton se začal zpočátku používat na skořepinové konstrukce či zesilování stávajících konstrukcí [5–11]. V poslední době se jeho aplikace začíná rozšiřovat na nejrůznější prvky od fasád, protipovodňových bariér přes protihlukové stěny a další. Pomocí provedených environmentálních analýz lze ukázat, že použitím TRC např. na fasádní panely můžeme výrazně zlepšit environmentální stopu oproti běžnému železobetonu a přispět tak k udržitelnému rozvoji výstavby [12–14].

Přestože je tento materiál známý již několik let, stále chybí veškeré informace týkající se jeho materiálových parametrů, ale především jeho trvanlivosti. Na toto téma bylo provedeno několik studií zabývajících se odolností vláken v různých prostředích a také odolnost TRC jako celku [15–22]. Stále je však toto téma nevyčerpané a je zde mnoho otázek, které bude nutno zodpovědět před širší komercializací tohoto materiálu. Tato práce má za úkol přispět k této tématice a objasnit další otázky týkající se trvanlivosti a environmentálních dopadů TRC.

1.2 Zaměření práce

Tato disertační práce je zaměřena na způsob vyztužování tenkých prvků pomocí technických textilií ze skla, uhlíku a čediče zejména pro aplikace na fasádní prvky a jejich posouzení z hlediska trvanlivosti a environmentálních dopadů.

Experimentální část je zaměřena na ověření základních mechanických parametrů používaných materiálů pro TRC tj. vysokohodnotného betonu a výztuží ze skla, uhlíku a čediče. Ze základních mechanických parametrů je ověřována pevnost betonu v tlaku, v tahu za ohybu, modul pružnosti a tahová pevnost výztuží.

Výzkum je dále soustředěn na experimenty ověřující trvanlivost TRC jako je např. mrazuvzdornost betonu i TRC, urychlená karbonatace betonu, vývoj hydratačního tepla, odolnost povrchu vůči agresivním rozmrazovacím látkám a zejména pak odolnost nekovových výztuží vůči alkalickému prostředí. Část práce zabývající se environmentálním hodnocení je zaměřena na porovnání TRC fasád oproti běžným fasádám z hlediska environmentálních dopadů v celém jejich životním cyklu pomocí metody LCA.

1.3 Cíle práce

Cílem této práce je objasnit některé parametry týkající se trvanlivosti a odolnosti textilních betonů s použitím výztuží ze skla, uhlíku a čediče a přispět tak k dosud nevysvětleným otázkám zabývajících se touto problematikou. Práce se snaží objasnit rozdíl mezi používanými výztužemi a jejich vhodnost při použití na konkrétní aplikace. Pro splnění těchto cílů byly stanoveny dílčí experimenty týkající se odolnosti a trvanlivosti jak jednotlivých složek, tak kompozitu v podobě tenkého fasádního panelu jako celku. Výsledky by měli přispět k pochopení chování tohoto kompozitního materiálu vystavenému klimatickým zatížením z dlouhodobého hlediska.

Cílem LCA analýzy je environmentální porovnání zkoumaných variant fasádních panelů z TRC oproti běžným panelům vyztužených ocelovou výztuží z hlediska základních potenciálů environmentálních dopadů. Důraz je kladen na precizní zpracování údajů o dopravě jednotlivých složek a na samotnou technologii výroby. Cílem je posoudit náročnost tohoto kompozitu z hlediska dopadů na životní prostředí v celém jeho životním cyklu od kolébky do hrobu a také vzájemné porovnání při použití různých druhů textilních výztuží.



2 Textilní beton

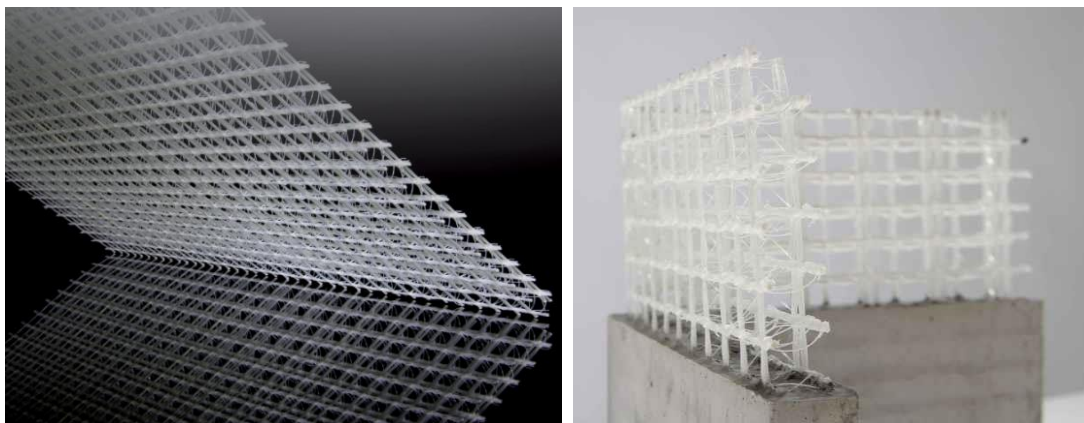


Obr. 1 Textilní beton se skleněnou výztuží [23]

Během posledních 100 let byla kvyztužování betonových konstrukcí používána téměř výhradně ocel. Přestože má ocel spoustu pozitivních vlastností, hrozí u ní možnost koroze a velkou nevýhodou je i její velká hmotnost. Alternativou za tuto konvenční výztuž se ukazují být nekovové technické textilie [4]. Textilní beton nebo také beton vyztužený technickými textiliemi (TRC) je poměrně nový kompozitní materiál, který se používá pouze několik let, přesněji od konce 90. let minulého století. K jejich vývoji přispěla především německá výzkumná centra při univerzitách v Aachenu a Drážďanech. Dnes se použití tohoto kompozitu postupně rozšiřuje po celém světě. Skládá se z jemnozrnné cementové matrice (většinou vysokohodnotného betonu) a výztuže v podobě technické textilie. Použití technických textilií, které jsou umístěny v hlavním směru namáhání prvku, vede k daleko větší účinnosti ve srovnání s použitím volně rozmístěných krátkých vláken v běžně známém vlákno betonu. Technické textilie používané pro TRC jsou vyráběny z nekorozivních materiálů, tudíž není potřeba dodržet minimální krycí vrstvu jako u oceli. S použitím takovýchto výztuží lze vyrobit velmi subtilní prvky, které bychom z běžného železobetonu vyrobit nemohli kvůli nutnému dodržení krycí vrstvy oceli. V kombinaci s vysokohodnotným betonem nebo dokonce s ultra vysokohodnotným betonem je možné zvýšit pevnost betonu v tlaku a za pomoci technické

textilie dodat betonu i potřebnou pevnost v tahu [6]. Takto navržený kompozit může při zachování stejných nebo lepších mechanických parametrů dosáhnout několikanásobně menších tlouštěk a tím i související úspory betonu.

Textilní výztuže se v kombinaci s betonem zpočátku používaly hlavně při rekonstrukcích k zesilování stávajících konstrukcí. Později se jejich uplatnění našlo v mnoha odvětvích přes skořepiny, vodohospodářské stavby, fasádní prvky, nejrůznější designové prvky, protipovodňové bariéry, protihlukové stěny a mnohé další [5–11].



Obr. 2 Textilní beton a skleněná výztuž firmy V. Fraas [23]

2.1 Technické textilie

Pro textilní betony se používají různé druhy a různé materiály technických textilií. Na trhu existuje několik materiálů, které se dají využít. Vhodné jsou nekorozyvní materiály s velkou pevností v tahu a s vysokým modulem pružnosti. Nejčastěji se používají vlákna z alkalivzdorného skla, uhlíku, aramidu či čediče. Existuje však i několik studií o využití různých přírodních vláken. Filamenty (vlákna) či rovingy (svazky několika vláken) se zpracovávají na netkané, tkané či různě pletené textilie s 2D, 3D nebo dokonce s cylindrickou strukturou. Nejčastěji jsou textilie uspořádány do mřížkovitých tvarů s oky zhruba trojnásobnými až čtyřnásobnými než je největší zrno kameniva v betonové směsi. Textilie jsou většinou uspořádány do perlinkové tkané vazby, osnovní pleteniny či trojrozměrné pleteniny. Jednotlivé rovingy jsou navíc opatřeny povrchovou úpravou z různých pryskyřic či jiných polymerů, která slouží jako ochrana před různými agresivními prostředími a zároveň dává textiliím pevný tvar. Takováto impregnace se provádí strojově na hotových textiliích nebo již při výrobě rovingů na povrchu každého svazku vláken. Stále více se zdokonalují postupy, jakými jsou samotné textilie vyráběny. Moderní technologie jako jsou samotné pletací stroje, ale především scannery, výpočetní programy pro numerické modelování a 3D tisk umožňují analyzovat přesné podmínky, navrhnout výztuže na míru nebo dokonce připravit či přizpůsobit výztuže během stavby.

Vlastnosti rovingů či vláken jsou definovány několika parametry. Jedním z parametrů je průměr vlákna, který se udává v μm . Rozmezí používaných vláken do betonu je od 4-24 μm . Dalším parametrem je počet vláken počítaný v tisících: 1k = 1000 vláken. Důležitým parametrem je hodnota tex. Tato jednotka udává počet gramů vlákna na 1 km délky vlákna [24, 25].

2.1.1 Materiály vláken pro výrobu textilií

Vlákna obecně mohou být buď organická, nebo anorganická. Mezi anorganická řadíme kovy, grafit, uhlík či sklo. Organická vlákna jsou limitována buď kreativitou přírody, nebo pokročilým chemickým průmyslem v podobě vláken umělých. Mezi umělá vlákna patří nylon, polypropylen, polyvinylalkohol (PVA), aramid a mnohá další [26]. Textilie pro vyztužování betonu jsou nejčastěji vyráběny ze skla, uhlíku, čediče a aramidu.

2.1.1.1 Skleněná vlákna

Historie a vývojové etapy skleněných vláken

Přestože samotné sklo je známé již od dob starého Egypta, vyztužování betonu skleněnými vlákny je záležitost posledních 50 let. V 60. letech 20. století dva ruští inženýři K. L. Birjukovič a J. L. Birjukovič prováděli první experiment s betonem vyztuženým skleněnými vlákny. Výroba skleněných vláken byla v té době velmi rozvinutá hlavně pro vyztužování polymerů pryskyřic. V období mezi roky 1968 – 1975 byla ve Velké Británii vyrobena první skleněná vlákna s vysokým obsahem ZrO_2 , která byla odolná vůči alkalickému prostředí. Na výrobě spolupracoval výzkumný ústav UK Building Research Station s největší společností zabývající se výrobou skla Pilkington Ltd. Tato výroba se později rozšířila do celého světa. Mechanickými vlastnostmi tohoto materiálu se začal zabývat prof. Bartoš v roce 1968 ve Velké Británii [27]. Zkoumal proces lomu a sledoval vazbu mezi maticí a skleněným vláknem. Jeho výzkum pomohl k pochopení způsobu porušení svazků vláken a většiny mechanických vlastností tohoto materiálu.

V 70. letech výrazně vzrostla výroba sklovláknobetonu (GRC). Skleněná vlákna se začala vyrábět všude možně po světě. V roce 1977 byla založena mezinárodní společnost pro beton vyztužený skleněnými vlákny pod názvem GRCA (International Glass Fibre Reinforced Concrete Association).

V 80. letech došlo k náhlému zpomalení výroby z důvodu poplašných zpráv o tom, že GRC může po několika letech křehnout, ale tato zpráva se později vyvrátila na základě dalších experimentů.

V roce 1992 byla ve Francii udělena cena společnosti St. Gobain/Vetrotex za zavedení GRC s vyšší trvanlivostí. V 90. letech byly zavedeny první normy pro výrobu GRC týkající se jeho vlastností a způsobů měření. Následně byla vydána příručka pro statické navrhování GRC

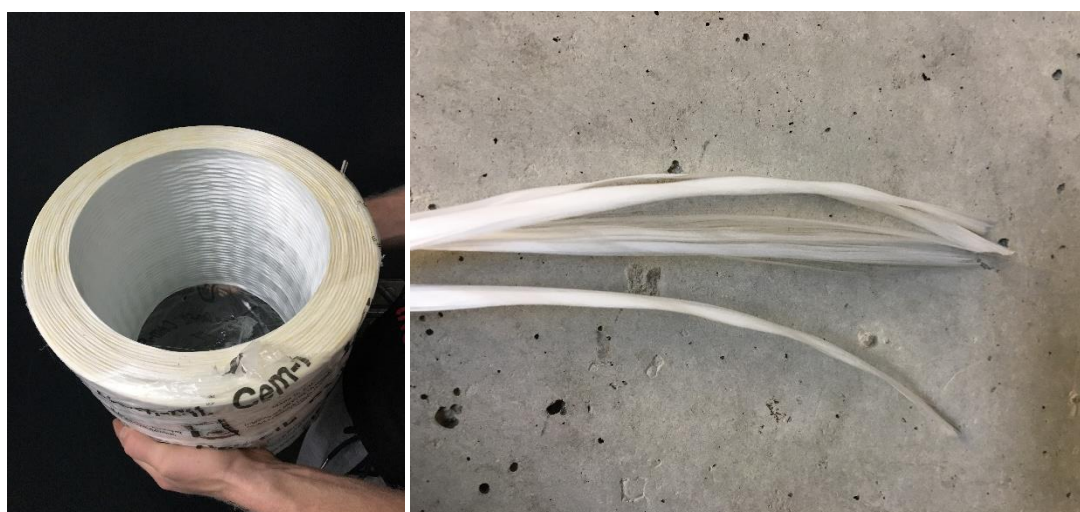
prvků podle mezních stavů od GRCA. Později byl vyvinut efektivnější automatizovaný způsob výroby GRC jak stříkaného, tak klasického. Mezi nejznámějšími firmami, které začaly beton vyrábět ve velkém, byla např. společnost Powersprays Ltd. [24, 25].

Výroba skleněných vláken

Skleněná vlákna se nejčastěji vyrábí metodou sol-gel. Jedná se o transformaci kapalné suspenze na pevnou fázi gelu. Tepelným zpracováním a současným dloužením se vytváří skleněné vlákno. Potřebného průměru vláken se dosáhne dloužením proudu skla tekoucího tryskami o průměru 1 mm ve dnu zvlákňovací hlavy. Konečný průměr vlákna je dán rozdílem mezi rychlostí vytékání skla a rychlostí odtahování vlákna. Jednotlivá vlákna se sdružují do pramene a navíjejí se na cívku. Sdružením asi 400 – 6600 vláken vzniká tzv. roving [4, 24, 25, 28]. Jednotlivá vlákna i samotné rovingy jsou opatřené povrchovou úpravou tzv. sizingem. Existuje několik studií, které se zabývají soudržností skleněných rovingů s betonem. Donnini a kol. se zabývá speciální úpravou textilních výztuží pomocí metody opískování [29].

Tab. 1 Vybraná komerčně dostupná AR skleněná vlákna [24]

Typ produktu	Výrobce	Tex	Průměr (μm)	Počet vláken
AR310S-800/DB	Nippon Electric Glass, Japan	310	13,5	800
AR620S-800/TM		620	13,5	1600
AR1100S-800/TM		1100	16	2000
AR2500S-800/DB		2500	24	2000
LTR ARC 320 5325	Saint-Gobain Vetrotex, Spain	320	14	800
LTR ARC 640 5325		640	14	1600
LTR ARC 1200 5325		1200	19	1600
LTR ARC 2400 5325		2400	27	1600



Obr. 3 Skleněný roving

Technické parametry

Sklo obecně je materiál, který je odolný mnoha chemikáliím a ohni, má poměrně vysokou pevnost v tahu a nízký modul pružnosti. Měrná hmotnost skla se pohybuje kolem $2\,500\text{ kg/m}^3$. Skleněná vlákna se vyrábí v několika variantách s různým typem značení dle různých vlastností: E-Glass (elektrický izolant), C-Glass (odolný vůči kyselému prostředí), S-Glass (vysokopevnostní a odolný vůči vysokým teplotám) a AR-glass (odolné vůči alkalickému prostředí).

Textilie používané pro vyztužování betonu jsou vyráběny z typu AR, z alkalivzdorného skla s vysokým obsahem ZrO_2 . Speciální složení tohoto druhu skla má zvýšenou odolnost proti zásaditému prostředí, které se v betonu vyskytuje. Skleněná vlákna jsou z pohledu poměru cena/výkon momentálně nejpoužívanější vlákna pro textilní výztuže do betonů. V tab. 1 jsou uvedeny parametry dvou nejznámějších výrobců komerční výztuže.

Tab. 2 Složení různých skleněných vláken v % hmotnosti [30].

složka	typ skla				
	E	S	C	AR (CEMFILL)	AR (ARG)
SiO_2	52–56	64,3-65	60-65	71	60,7
Al_2O_3	12–16	24,8-25	2-6	1	-
B_2O_3	13-18	-	2-7	-	-
CaO	16–25	0,01	13-16	-	-
MgO	0-6	10-10,3	3-4	-	-
Li_2O	-	-	-	1	1,3
K_2O	-	-	0-2	-	2
Na_2O	0-1	0-0,27	7,5-12	11	14,5
TiO_2	0-0,4	-	-	2,2	-
ZrO_2	-	-	-	16	21,5
Fe_2O_3	0,05-0,4	0–0,2	-	-	-
F_2	0-0,5	-	-	-	-

2.1.1.2 Uhlíková vlákna

Historie a vývojové etapy

Počátek uhlíkových vláken se většinou spojuje s rokem 1879, kdy Thomas Alva Edison použil uhlíkové vlákno k rozsvícení první žárovky. Téhož roku byl tento vynález patentován. Vlákna používaná Edisonem neměla však příliš dobré mechanické vlastnosti. V padesátých letech dal podnět k vytvoření silnějších tříd uhlíkových vláken z umělého hedvábí a dalších prekurzorů americký vesmírný program s podporou americké vlády. The National Carbon Company divize Union Carbide představila v roce 1959 nový typ uhlíkové tkaniny [24, 31]. O rok později se začal uhlík používat pro komerční účely. Největší uplatnění měl zpočátku v leteckém průmyslu. Jeho

výborné vlastnosti jako pevnost, tuhost a nízká hmotnost umožňovaly výrobu rychlejších letounů s celkovou nižší hmotností.

V období let 1960 – 1980 se uhlík používal převážně pro obranu. Později se využíval i v automobilovém průmyslu pro vozy Formule 1 či NASCAR.

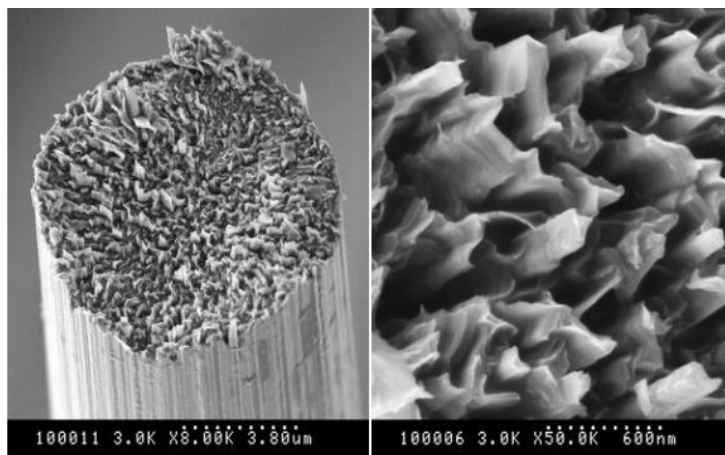
V 21. století se poptávka zvýšila ve všech možných průmyslových odvětvích od energetiky, sportu až po stavebnictví a nyní je výroba uhlíku rozšířena po celém světě.



Tab. 3 Uhlíkové vlákno

Výroba uhlíkových vláken

Uhlíková vlákna vznikají spojením atomů uhlíku do mikroskopických krystalů orientovaných paralelně k dlouhé ose vlákna. Jejich tloušťka se pohybuje mezi 5-8 μm . Základními materiály pro výrobu uhlíku jsou polyakrylonitril (PAN) a mezofázové smoly. Asi 90 % uhlíkových vláken je vyrobeno z PAN. Speciální prekurzor, který se u každého výrobce liší, je tažený do dlouhých vláken na požadovanou jemnost. Vlastnosti vlákna určuje proces karbonizace. Před tímto procesem je nutná chemická úprava vláken. Tento proces se nazývá stabilizace. Provádí se zahříváním vláken na vzduchu při teplotách 200 - 450 $^{\circ}\text{C}$ po dobu 20 - 30 minut. Při tomto procesu uhlíkové vlákno posbírání atomy kyslíku a tím způsobí přerovnění své atomové struktury. Zahřívání se provádí pomocí různých technik (zahřívací komory, válců) s odebíráním přebytečného tepla. Takto připravené vlákno prochází procesem karbonizace. Vlákna se zahřívají v peci při teplotě 1000 – 2000 $^{\circ}\text{C}$ ve směsi plynů bez obsahu kyslíku, což zabrání jejich hoření. V peci je udržován vyšší tlak. Při zahřívání dochází ke kmitání, vlákna začnou postupně ztrácet neuhlíkové atomy či atomy uhlíku v plynných formách a zůstanou tak pouze atomy, které jsou seskupeny v pevnou krystalovou vazbu vyrovnanou rovnoběžně se směrem vlákna. Vlákna dále mohou nebo nemusí procházet procesem grafitizace. Poslední fází je pak povrchová úprava vlákna a sizing [4, 24, 32–36].

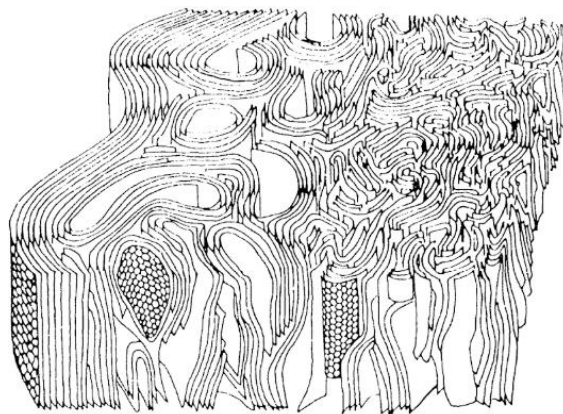


Obr. 4 Mikroskopický snímek řezu uhlíkového vlákna [37]

Technické parametry

Uhlíková vlákna mají výborné mechanické vlastnosti. Mají malou objemovou hmotnost, velkou pevnost v tahu, nízký stupeň dotvarování, malou teplotní roztažnost a výbornou elektrickou vodivost. Uhlík je také velmi stabilní vůči různým chemikáliím zvláště v alkalickém prostředí. Ze zmíněných materiálů má největší chemickou odolnost. Vzhledem k vynikající tepelné odolnosti mohou být vyráběny prvky, které jsou odolnější vůči vysokým teplotám (např. při požáru). Uhlík však s porovnáním s AR - skleněnými vlákny nemá takovou soudržnost s betonem. Nevýhodou je nebezpečí galvanické koroze při kontaktu s kovy. V porovnání s ostatními druhy textilií má nejvyšší pořizovací náklady [28, 38–41].

Vysokopevnostní vlákna (HT) jsou vyráběna při teplotě 1500 – 1700 °C, zatímco vlákna zahřívána při teplotě 2200 – 3000 °C (při grafitizaci) mají vysoký modul pružnosti (HM vlákna). Pevnost HT vláken je kolem 3000 – 5000 MPa a jejich modul pružnosti je 200-250 GPa. HM vlákna mají pevnost v tahu kolem 2000 – 4500 MPa a modul pružnosti 350 – 450 GPa [4, 24, 33].

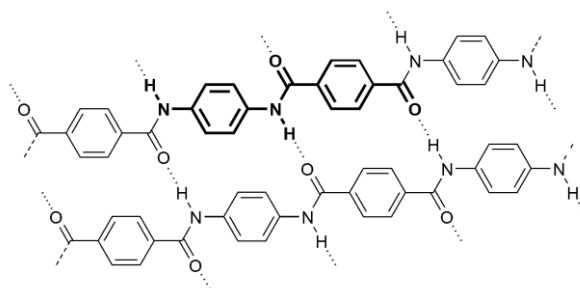


Obr. 5 Textura uhlíkového vlákna z PAN [42].

2.1.1.3 Aramidová vlákna

Historie a vývojové etapy

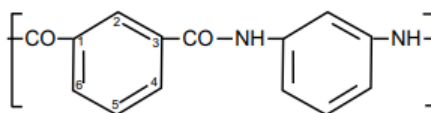
Aramidy jsou skupina vysoce pevných nylonů, do níž se řadí výrobky s obchodními názvy např. Kevlar, Twaron, či Nomex [43]. Syntéza aromatických polyamidů začala v 50. letech 20. století po rychlém komerčním rozšíření nylonu [30]. V 60. letech byla Stephanie Kwolek, americká vědkyně věnující se chemii, pověřena k vývoji pevného, žáruvzdorného a lehkého vlákna pro americkou firmu DuPont. Roku 1962 byl představen touto firmou výrobek Nomex. V roce 1965 se S. Kwolek podařilo vyvinout para-aramidové vlákno, pro které pak v roce 1972 obdržela firma DuPont výrobní značku Kevlar. Kevlar, jakožto nejznámější aramid, se dodnes používá hlavně pro ochranné oděvy či neprůstřelné vesty [44]. Téhož roku byl francouzskou firmou Rhône-Poulenc představen jejich výrobek Twaron. A japonská firma Teijin Ltd ve spolupráci s DuPont vyvinula Tejincorex. Do současné doby bylo na trh uvedeno ještě mnoho výrobků, avšak tyto tři zmíněné firmy jsou stále největšími výrobci aramidových vláken na světě [43].



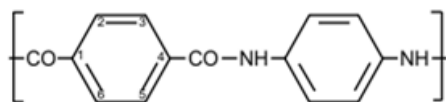
Obr. 6 Chemická struktura Kevlaru [4].

Výroba aramidových vláken

Podle americké Federální obchodní komise (Federal Trade Commission) je definováno aramidové vlákno jako: „vlákno vyrobené z polyamidu s dlouhým uhlovodíkovým řetězcem, jehož minimálně 85 % peptidických vazeb spojují dvě aromatická jádra“. Označení aramid vzniklo spojením slov aromatický a polyamid. Vyrábí se navíjením z kapalného roztoku. Rozeznávají se dva druhy aramidů: meta-aramid a para-aramid. Na obr. 7 a 8 je vidět drobný rozdíl v jejich chemické struktuře [26].



Obr. 7 Základní opakující se jednotka para-aramidu (Kevlar, Twaron) [26].



Obr. 8 Základní opakující se jednotka meta-aramidu (Nomex) [26]

Technické parametry

Aramid byl vyvinut především jako vlákno odolné proti vysokým teplotám. Bod tání má kolem 400°C. Vlákna jsou velmi chemicky odolná. Jejich pevnost je přibližně pětkrát vyšší než ocel [4]. Z pohledu pevnosti v tahu a modulu pružnosti patří tato vlákna k jedněm z nejlepších. Vlastnosti se však liší podle druhu vláken. Meta-aramidy (metafenylen-izoftalamidy, zkráceně také MPIA), jsou známy svojí vynikající termickou odolností a elektroizolačními schopnostmi. Para-aramidy (p-fenylen-tereftalamidy, zkráceně PPTA) mají podstatně větší pevnost v tahu a větší modul pružnosti. Jsou používány hlavně pro vyztužování. Dostupné jsou normální (N) verze, verze s vysokou pevností (HT) a s vysokým modulem pružnosti (HM). Aramidová vlákna mají ve srovnání s uhlíkovými či skleněnými menší křehkost a menší měrnou hmotnost. Vzhledem k rozdílné délkové roztažnosti oproti betonu je jejich použití pro TRC velmi omezené. Další nevýhodou je menší odolnost proti alkalickému prostředí, i když nový typ vláken Technora® nabízí velkou odolnost a také daleko vyšší pevnost. Cena se odvíjí od jemnosti přize, ale vzhledem k tomu, že je obecně velmi vysoká, je využití aramidových vláken ve stavební praxi velmi omezené [24, 45, 46].

2.1.1.4 Čedičová vlákna

Historie a vývojové etapy

První pokusy se zvlákněním čediče proběhly začátkem 20. století. V roce 1963 bylo v laboratoři na Ukrajině vyrobeno první čedičové vlákno s uspokojivou kvalitou. K zahájení průmyslové výroby došlo v polovině 80. let v továrně u Kyjeva. Během pár let bylo otevřeno několik dalších továren. Tehdejší způsob výroby byl ekonomicky velmi náročný, ale vzhledem k tomu, že čedičová vlákna byla využívána v tehdejší sovětské svazu hlavně pro zbrojní průmysl, nebyla vysoká cena výroby příliš řešena. Koncem 90. let byla navržena nová technologie výroby za účelem snížení výrobních nákladů. Na základě toho byl vybudován v letech 2000 – 2002 nový Ukrajinsko – japonský podnik pro výrobu čedičových vláken. V Číně byla vybudována laboratoř za účelem výzkumu nových technologií výroby i výzkumu nových druhů čedičů pod vedením Dr. Osnose. Zanedlouho byly v Číně vybudovány hned dvě továrny s velmi nízkou spotřebou energie založené na poznatcích zmíněného výzkumu. V roce 2008 - 2009 byla založena továrna NPO Vulcan v Rusku. Ukrajina, Rusko a Čína jsou i v dnešní době největšími výrobci čedičových vláken na světě [47, 48].

Výroba čedičových vláken

Čedičová vlákna se vyrábí podobně jako skleněná tj. kontinuálním procesem. Vytěžená čedičová hornina je rozdrvena, promyta a poté se taví v plynové peci při teplotě 1300 °C – 1700 °C. Roztavená hornina se poté protlačuje rozvlákňovací tryskou, ze které jsou vlákna tažena a následně ochlazována. Vzniká tak vytvrzený kontinuální svazek jednotlivých vláken neboli roving. Ve srovnání s výrobou skleněného vlákna, je kontinuální výroba čedičových vláken mnohem snazší, protože čedičové vlákno má jednodušší složení a neobsahuje žádné druhotné materiály, což má velkou výhodu pro jeho zpracování a konečné náklady [30].



Tab. 4 Čedičové vlákno

Technické parametry

Čedičová vlákna jsou šedozelené až měděné barvy, která je dána přítomností oxidu železa. Vlákna jsou pevná, mají vysoký modul pružnosti, vysokou tepelnou odolnost a mají dobré izolační vlastnosti. Jsou poměrně chemicky odolná [49]. Jongsung S. a kol. udávají, že alkalivzdornost čedičových vláken je lepší, než u skleněných vláken [50]. Vzhledem k tomu že vlákna jsou velmi křehká, při jejich manipulaci často dochází k lámání a různému poškození.

Průmyslovou výrobou čedičových vláken na základě nových technologií jsou jejich náklady stejné či dokonce nižší než náklady na výrobu vláken skleněných. Čedičová vlákna mají nejvýhodnější poměr kvality a ceny ve srovnání se skleněnými, uhlíkovými a dalšími vlákny [48].

Tab. 5 Mechanické vlastnosti vybraných vláken [30]

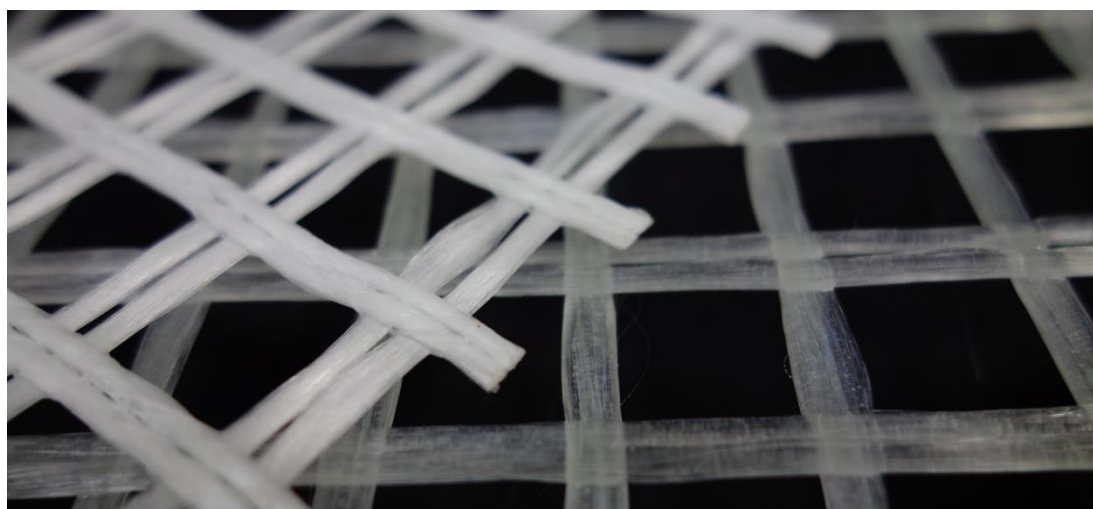
Typ vlákna	Pevnost v tahu (MPa)	Modul pružnosti v tahu (GPa)	Měrná hmotnost (kg/m ³)
sklo	2500	310	2780
uhlík	3500-6000	620	1600-1950
aramid	3000	1100	1400
čedič	3000-4800	2500	2700

2.1.2 Typy textilií a struktury přízí

Základním prvkem pro výrobu textilií je tzv. roving. Jedná se o svazek několika vláken, které mohou být krouceny nebo různě splétány, aby držely kompaktní tvar. Často se ale používají vlákna s nulovým kroucením. Základní jednotkou rovingu je již zmíněný tex a počet vláken k . Ke zlepšení odolnosti vláken, lepší manipulaci s vlákny a ke zlepšení adheze s matricí jsou rovingy opatřeny povrchovou úpravou, tzv. sizingem. Tato povrchová úprava je nejčastěji na bázi pryskyřic bez tvrdidel. Z rovingů jsou pak tvořeny různé textilie. Ty dělíme na dva základní typy: plošné (2D) a prostorové (3D). Každý typ je navíc vyráběn několika různými způsoby.

2.1.2.1 2D textilie

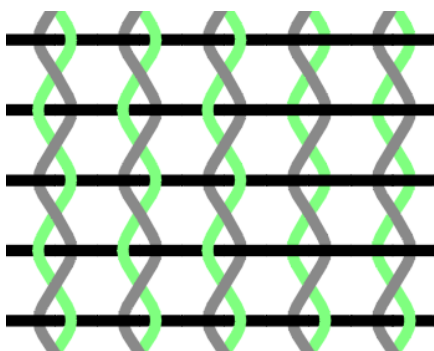
Plošné textilie se skládají nejméně ze dvou druhů vláken: vlákna v jednom směru, vlákna ve druhém kolmém směru, popř. fixační (nejčastěji polypropylenové) příze, která vlákna fixuje k sobě a zajišťuje jejich tvar. Pro 2D textilie se většinou používá klasická mřížková struktura s velikostí ok nejméně 3x - 4x větší, než je velikost největšího kameniva použitého v betonové matrici. Nejčastěji používané textilie mají oka od 10 - 25 mm. Struktura mřížky má velký vliv na konečné mechanické vlastnosti celého betonového prvku. Ke zvýšení pevnosti textilie v převládajícím směru namáhání se může použít roving s větší hodnotou tex.



Obr. 9 2D skleněná výztuž

Tkané textilie

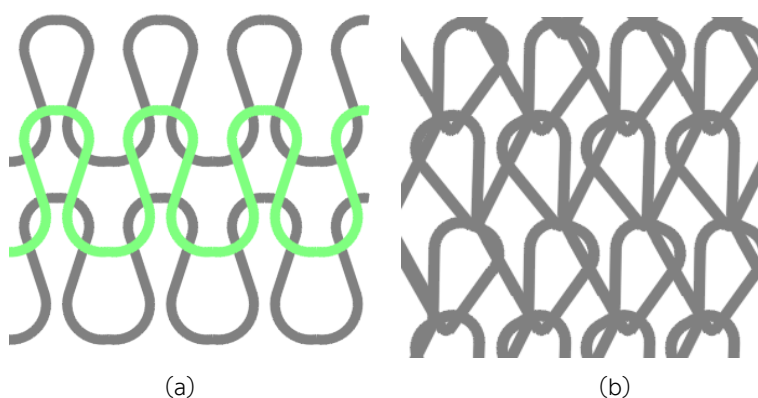
Tkaný způsob výroby textilií pro vyztužování betonových prvků je nejčastějším řešením. Jde o technologický postup, který spočívá v opakovaném provazování a křížení dvou navzájem kolmých rovingů na tkalcovském stavu. Podélná soustava se nazývá osnova, příčná útek. Pro TRC se používají tkaniny v klasické nebo zjednodušené perlínkové vazbě. Výhodou této tkaniny je možnost otevřené struktury s většími oky, stabilní pozice jednotlivých rovingů a pouze mírné zvlnění rovingu v podélné ose.



Obr. 10 Perlínková vazba

Pletené textilie

Pletené textilie jsou vyráběny pomocí speciálních pletacích strojů s příslušným softwarem, který optimalizuje pohyb cívek. Vlákna jsou během pletení skládána do kliček, které se vzájemně proplétají do ok. Tvorba oček a jejich vzájemné provlékání jsou prováděny určitým pohybem pletacích jehel. Nejčastější způsoby pletení jsou osnovní a zátažné.

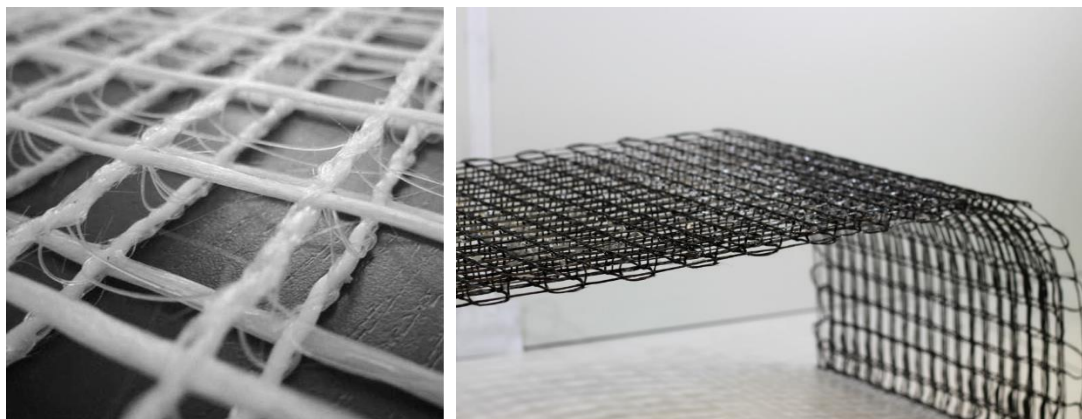


Obr. 11 Schéma pletené textilie (a) zátažná pletenina; (b) osnovní pletenina

2.1.2.2 3D textilie

Plošné 3D textilie se skládají z několika vrstev vzájemně propojenými např. polypropylenovým fixačním vláknem. Výhodou oproti plošným textiliím je rychlost v ukládání

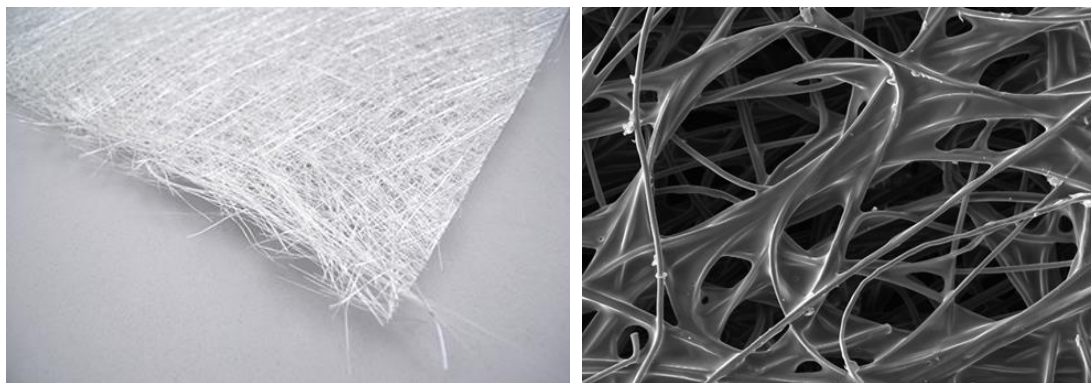
do bednění, tím se může oproti několikanásobnému vrstvení 2D textilií značně zrychlit proces výroby konečného betonového prvku. Výhodou je konstantní distanční vzdálenost mezi jednotlivými vrstvami.



Obr. 12 3D textilie [23, 51]

2.1.2.3 Netkané textilie

Jedná se o plošné textilie, které jsou složené z orientovaných nebo neorientovaných jednotlivých vláken spojených do velmi tenké plochy. Nejčastěji se setkáváme se skleněnými textiliemi tohoto druhu. Spojování jednotlivých vláken je prováděno mechanicky, chemicky, tepelně, za pomoci rozpouštědel, nebo kombinacemi těchto možností.



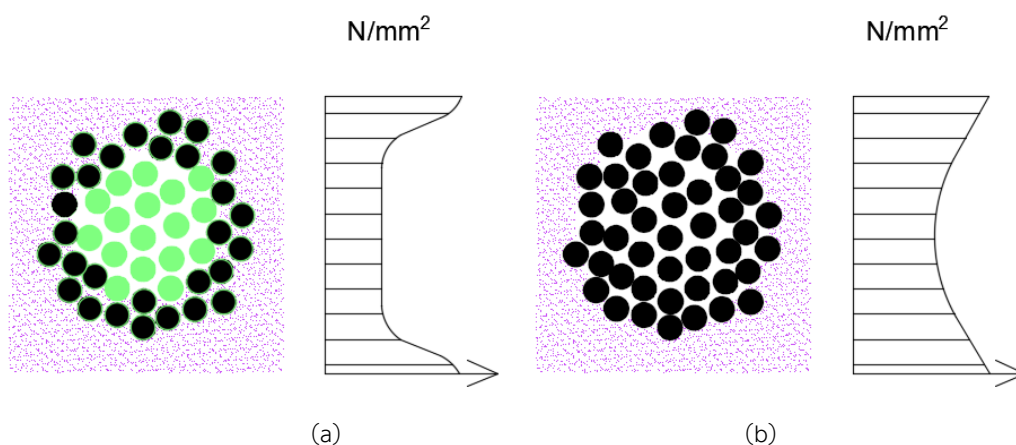
Obr. 13 Netkaná textilie [52, 53]

2.1.2.4 Lepené textilie

Lepené textilie vznikají spojováním dvou na sebe kolmých rovingů pomocí lepidla nebo pomocí zahřátí. Vyrábí se nepřeborné množství rozměrů ok. Technologie výroby je oproti jiným velmi snadná.

2.1.3 Povrchová úprava vláken

Rozeznáváme povrchovou úpravu na dvou úrovních. První vrstva (sizing) je nanášena při výrobě samotného vlákna. Jde v podstatě o jakousi impregnaci, která zlepšuje jeho chemickou odolnost a zároveň zvyšuje přilnavost s matricí. Druhý sizing je nanášen na svazek vláken a má za úkol stabilizovat vnitřní strukturu rovingu a zafixovat vlákna do požadované formy. Kromě toho zlepšuje pevnost textilie v důsledku aktivace vnitřních vláken, která jsou teleskopicky vytahována a postupně zapojována.



Obr. 14 Řez rovingem bez sizingu (a); a se sizingem (b) [1]

2.2 Beton používaný pro TRC

Betonová směs používaná pro prvky TRC se liší od směsi používané pro běžný železobeton. Používá se výhradně jemnozrnný, tekutý a samozhutnitelný beton, který má oproti běžnému betonu velkou pevnost, mechanickou odolnost, trvanlivost a další vylepšené vlastnosti. Takové betony řadíme mezi vysokohodnotné (HPC), popř. dokonce ultra vysokohodnotné betony (UHPC). Vzhledem k tomu, že se max. velikost kameniva doporučuje menší než 2 mm, bývá směs někdy uváděna jako cementová malta než jako beton. Tato minimální velikost kameniva však může mít negativní vliv na smršťování a vyšší spotřebu cementu, proto se v některých případech (s ohledem na tloušťku konstrukce a velikost ok výztuže) doporučuje použít kamenivo o velikosti zrn 4-6 mm [22]. V každém případě, receptura směsi musí být navržena podle druhu konstrukce a druhu použité výztuže. Musí splňovat požadavky na chemickou slučitelnost výztuže a betonu z hlediska alkality stejně tak jako požadavky na pevnost, mechanickou odolnost, trvanlivost a pohledovou kvalitu.

2.2.1 Vysokohodnotný beton

Vysokohodnotné betony se používají zhruba od 70. let 20. století, kdy ještě nenesly označení vysokohodnotné, ale vysokopevnostní. Byly vyvinuty převážně pro sloupy výškových staveb.

Jednalo se v podstatě o vylepšený beton, který byl vyráběn stejnou technologií jako běžný beton, pouze materiály na jeho přípravu byly vybírány pečlivěji a zároveň byly i více kontrolovány. Postupem času se do těchto betonů začaly přidávat superplastifikátory a bylo možné výrazně snížit vodní součinitel w/c až pod hodnoty 0,40. Ukázalo se, že snížení vodního součinitele má výrazný vliv na pevnostní charakteristiky, modul pružnosti, nižší permeabilitu, lepší trvanlivost či odolnost proti obrusu. Mezi odborníky se začal používat pojem vysokohodnotný beton, který více vystihoval všechny výhodné vlastnosti tohoto nového materiálu [54]. Hlavní rozdíl mezi běžným a vysokohodnotným betonem je tedy vodní součinitel. U běžných betonů se pohybuje kolem 0,42 - 0,6. U vysokohodnotných betonů je vodní součinitel do hodnoty 0,42. Hodnota vodního součinitele pro dosažení ultra vysokých pevností se pohybuje okolo 0,18 – 0,20. Z tohoto vyplývá, že vysokohodnotné betony obvykle neobsahují dostatek vody pro plnou hydrataci všech cementových zrn, přesto mají vyšší pevnost. Podle Bílka a Aitcina [55] pevnost betonu závisí především na vzdálenosti jednotlivých zrn cementu v pastě, než na počtu zhydratovaných zrn. Rozhraní mezi vysokohodnotným a ultra vysokohodnotným betonem je nejčastěji určováno podle pevnosti betonu v tlaku, avšak neexistuje žádná jednotná norma, která by přesně definovala toto názvosloví. Podle několika zažitých principů a podle Association Francaise de Génie Civil (AFGC) se nejčastěji za hranici považuje 150 MPa [54]. Připravovaná německá norma o UHPC [56] popisuje hranice mezi HPC a UHPC 130 MPa. K dosažení tak vysokých pevností již nestačí jen přidání vhodných superplastifikátorů a redukce vodního součinitele, ale rozhodující vliv má i optimalizovaná křivka zrnitosti a preciznost při zpracování samotné směsi. Existuje celá řada receptur vysokohodnotných betonů, které vznikly jako výsledky určitých výzkumů [57–59].

2.2.2 Nejčastěji používané složky

Vysokohodnotné betony a ultra vysokohodnotné betony se jako běžné druhy betonů skládají z plniva, pojiva, vody, přísad a příměsí. Plnivem vysokohodnotných betonů pro TRC je jemné kamenivo, nejčastěji křemenný písek v několika frakcích s optimalizovanou granulometrickou křivkou. Křivka zrnitosti je oproti běžným betonům doplněna o tzv. mikroplnivo. Jedná se o velmi jemné částice (do 0,125mm), které vyplňují prostory mezi zrny kameniva. Nejčastěji se používá křemenná moučka, mikromletý vápenec, čedičový či granodioritový prach [60]. Takovéto příměsi nazýváme inertními. Pevnost konečného betonu zvyšují pouze prostřednictvím fyzikálního plnicího efektu.

Prakticky jediným možným pojivem pro vysokohodnotné betony je portlandský cement [61]. Jeho částečná náhrada minerálními příměsemi však může být výhodná z environmentálního i ekonomického hlediska. Náhrada cementu také může vést také ke snížení vývoje hydratačního tepla a ke zlepšení reologie [61, 62]. Příměsi, které jsou k tomuto účelu používány, se nazývají reaktivní [63] a řadíme mezi ně např. metakaolin či mikrosiliky.

Tyto příměsi, stejně jako inertní, přispívají ke zvýšení pevnosti zaplněním zrn kameniva, avšak navíc se tyto materiály vyznačují latentně hydraulickými a pucolánovými vlastnostmi. Znamená to, že v přítomnosti vody a vápna se podílejí na tvorbě kalcium-silikát-hydrátu (CSH gelu) podobného tomu, který vzniká během hydratace portlandského cementu a kterým se také zvyšuje konečná pevnost [64, 65].

Konečné vlastnosti betonů na bázi cementu závisí tedy především na struktuře cementové matrice, která spojuje všechny složky dohromady. Znalosti o její struktuře a o jejích vlastnostech na nejnižší nanoúrovni jsou proto nezbytné pro pochopení a vývoj nových betonových směsí [63]. Další přísady jako jsou např. superplastifikátory jsou přidávány především ke snížení vodního součinitele bez negativních ovlivnění reologických vlastností.



Obr. 15 Složky vysokohodnotného betonu

2.2.2.1 Cement

Cement je dnes základním pojivem naprosté většiny směsí vysokohodnotných betonů. Pro HPC se používá portlandský cement (CEM I) nebo struskový portlandský cement (CEM II) vyšší třídy 42,5 R nebo 52,5 R. Při použití cementu pevnostní třídy 52,5 většinou dochází k menšímu ztekucení, což u textilních betonů bývá zásadním problémem. Proto se v řadě případů ukázalo jako výhodné využití cementu třídy 42,5. Nejčastěji se cement používá v kombinaci s mikrosilikou, která za pomoci pucolánové reakce a současným vyplněním zrn cementu pomáhá ke konečné pevnosti betonové směsi. Podobného výsledku můžeme použít při kombinaci portlandského cementu se zrny Mikrodur[®]. Velikost zrn se pohybuje kolem 6-20 μm , čímž skvěle doplňuje prostor mezi zrny cementu, které se pohybují kolem 20-35 μm . Množství cementu se různí v každé směsi. Obecně lze říci, že ve vysokohodnotných betonech je poměrně vysoké množství cementu. Pohybuje se nejčastěji kolem 400 – 700 kg/m^3 [60, 66].



Obr. 16 Porovnání velikosti zrn cementu, Mikroduuru a mikrosiliky

2.2.2.2 Kamenivo, mikroplnivo a jemnozrnné minerální příměsi

Kamenivo

Jak již bylo zmíněno, plnivem betonu pro prvky TRC bývá křemenný písek v několika frakcích, nejčastěji s velikostí zrna 2 mm, ale možné je případně použít směsi s kamenivem 4-6 mm. Důležité je optimalizovat křivku zrnitosti a doplnit zrna písku o tzv. mikroplnivo např. mikromletým křemenem. Jemné podíly kameniva zlepšují soudržnost např. ke starému betonu a zlepšují samozhutnitelnost.



Obr. 17 Křemenné písky [67]



Obr. 18 Křemenná moučka [67]

Mikromletý křemen

Mikromletý křemen, neboli křemenná moučka, je velmi jemně mletý křemenný písek s obsahem SiO_2 (obvykle vyšším než 99 %). Je vyráběn suchým mletím v nezelezném prostředí a tříděním za použití větrných třídičů. Přidává se do betonu za účelem lepšího samohutnění a také za účelem zlepšení odolnosti ztvrdlého betonu.

Mikrosilika

Mikrosilika někdy též nazývaná jako křemičitý úlet (angl. Silica fume) je velmi jemná amorfni minerální příměs s velikostí zrna do 0,1-1 μm složená z 98 % ze suchého SiO_2 , která vzniká většinou jako vedlejší produkt při výrobě ferrosilicia [68]. Má velký měrný povrch cca 20 000 až 60 000 m^2/kg . Kromě tohoto se vyznačuje velmi dobrými pucolánovými vlastnostmi [69]. Působí tedy jako inertní i reaktivní příměs. Znamená to, že při použití působí fyzicky jako plnivo a chemicky jako vysoce reaktivní pucolán. Velmi jemná zrna vyplňují prostor mezi hrubšími zrny cementu, čímž se dosáhne hutnější struktury a následné větší pevnosti betonu [69–71]. Mikrosilika zlepšuje rozptyl složek a zlepšuje vytvrzené vlastnosti a celkovou trvanlivost betonu. Na trhu je dostupná ve dvou hlavních formách: Undensified (U) a Densified (D). Běžné dávkování v sypkém stavu je cca 3-5 % hmotnosti cementu [69]. Pro ultra vysokohodnotné betony se používá i 20 % [12]. Křemičitý úlet býval odpadní produkt. Dnes se jedná o poměrně drahou záležitost, proto je snaha o náhradu této složky levnějšími variantami jako jsou metakaolin či ultrajemně mleté popílků [61].

Popílků

Létavý popílek (fly ash) je nejběžnější pucolánovou příměsí. Může ve směsi působit i pouze jako inertní plnivo. Vzniká při spalování uhlí, kdy se jemné částice zachytávají v odlučovacím systému uhelných elektráren. Popílků je mnoho druhů a liší se podle druhu spalovaného uhlí a také podle druhu spalování. Částečná náhrada cementu popílkem vede ke snížení vývinu hydratačního tepla a ovlivnění počáteční fáze hydratace. Závisí to však na použitém množství. Vhodnou náhradou části cementu popílkem můžeme docílit kvalitního betonu za ekonomického i ekologického přístupu [60, 61, 69, 72].

Granulovaná vysokopecní struska

Jemně mletá granulovaná vysokopecní struska (GGBS) je vedlejší produkt, který vzniká při výrobě surového železa ve vysoké peci. Když se roztavená struska rychle zchladí skrácením vody, vytvoří se jemná, granulovaná, téměř zcela nekystalická sklovitá forma známá jako granulovaná struska, která má latentní hydraulické vlastnosti [73]. Latentně hydraulická povaha strusky zpomaluje počáteční nárůst pevnosti a snižuje vývoj hydratačního tepla [1]. Počáteční pevnost bývá nižší, ale dlouhodobá pevnost se částečnou náhradou strusky zvyšuje [73, 74]. Náhradou části cementu granulovanou vysokopecní struskou můžeme zlepšit mechanické parametry betonu, jeho odolnost proti chemikáliím, snížit alkalitu směsi a zlepšit trvanlivost. Celkově se považuje použití strusky jako částečné náhrady cementu za vhodný přístup návrhu udržitelných ekologických a ekonomických směsí vysokohodnotných betonů.



Metakaolin

Metakaolin patří mezi novou generaci minerálních přísad do betonu. Vzniká jako amorfní produkt tepelnou a granulometrickou úpravou jílovců a plavených kaolinů při teplotě 650 – 800 °C. Má vysokou pucolánovou aktivitu [75–77]. Skládá se z 60 % z SiO_2 , z 38 % z Al_2O_3 a dále z nepatrné části z oxidů vápníku, hořčíku a jiných kovů. Částice metakaolinu mají velikost kolem 1,0 - 10 μm a měrný povrch 9000 - 18000 m^2/kg [60]. Částečnou náhradou cementu metakaolinem dochází ke zvýšení pevnosti v tlaku i v tahu za ohybu, snížení nasákavosti, ke snížení autogenního smršťování [78][78] a celkově ke zlepšení trvanlivost betonu [78]. Metakaolin zvyšuje odolnost povrchu betonu vůči působení agresivního prostředí, vody a rozmrazovacích solí [60, 79, 80]. Proto je velmi oblíbenou přísadou vysokohodnotných a ultra vysokohodnotných betonů. Obvykle se přidává okolo 10 % hmotnosti cementu, ale již při přidání 3% dochází ke zlepšení plastičnosti betonové směsi [60].

2.2.2.3 Voda

Jak již bylo zmíněno, pro vysokohodnotné betony se používají směsi s velmi nízkým vodním součinitelem kolem 0,2-0,4. U ultra vysokohodnotných betonů se vodní součinitel pohybuje mezi 0,1-0,2. Navržená směs by měla obsahovat jen tolik vody, kolik je potřeba k procesu hydratace cementu, protože přebytečná voda snižuje výslednou pevnost. Pro textilní betony je obzvláště důležitá tekutost směsi, jelikož musí dojít k protečení betonové směsi hustě propletenou nekovovou výztuží. Optimalizace se provádí vhodným poměrem vody/cementu za současného vyladění použitých superplastifikátorů. Zpracovatelnost a výsledné parametry betonové směsi neovlivňuje jen množství vody, ale důležitý je přesný technologický postup míchání a např. i její teplota a kvalita.

2.2.2.4 Superplastifikátory

Plastifikační či superplastifikační přísady jsou dnes nedílnou součástí většiny směsí obecně a téměř všech směsí pro TRC. Snížením vodního součinitele na minimum se zhoršuje zpracovatelnost směsi, a tak je nutné konzistenci optimalizovat použitím superplastifikátorů. Superplastifikátory mají na rozdíl od plastifikátorů daleko větší ztekucující účinek. Použitím plastifikačních přísad můžeme ovlivnit celou řadu vlastností, hlavně ale:

- zlepšení zpracovatelnosti při zachování vodního součinitele
- snížení vodního součinitele při zachování zpracovatelnosti
- snížení vodního součinitele a současně zlepšení zpracovatelnosti

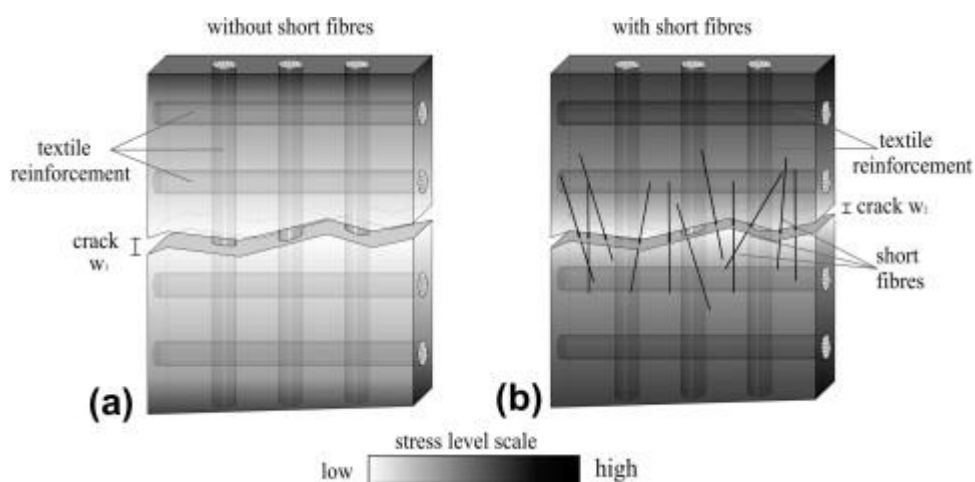
Plastifikátory mají ve směsi deflokulační efekt. Pracují na principu dispergace částic cementu. Klasické superplastifikátory na bázi kondenzátu sulfonovaného naftalenu s formaldehydem (typ SNF), na bázi sulfonované melaminformaldehydové pryskyřice (typ SMF)

či lignosulfáty s nízkým obsahem sacharidů (typ LS) jsou v dnešní době nahrazovány příměsemi na bázi polykarboxylátů (PCE) pro jejich výrazně vyšší účinnost [61, 69, 81].

Množství superplastifikátoru se pro UHPC může pohybovat až kolem 5 % hmotnosti cementu.

2.2.3 Vlákniťá výztuž

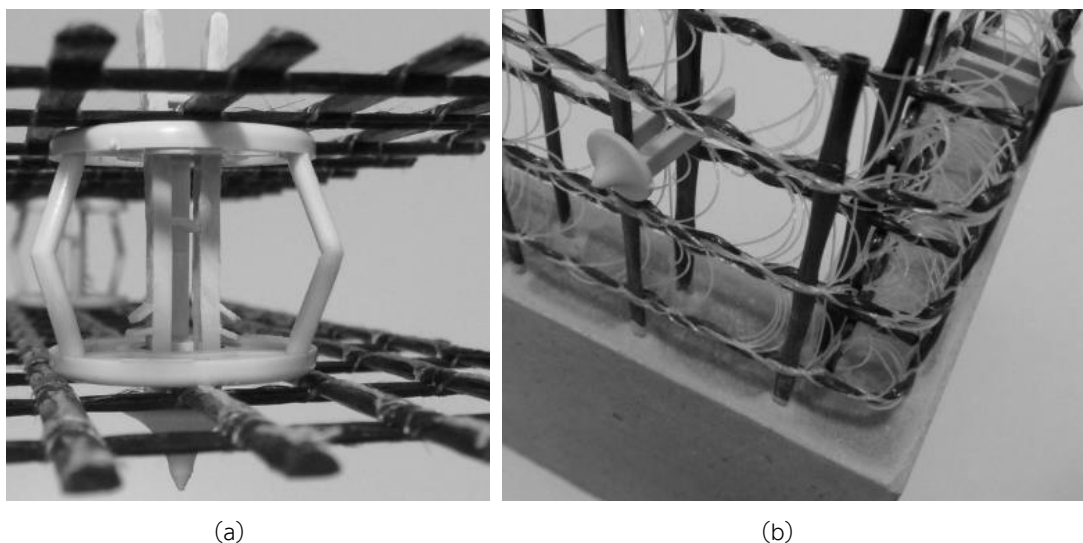
Obecně řečeno, TRC vykazuje velmi příznivé chování při zatížení v tahu za ohybu. Velká únosnost při relativně vysoké deformaci je výsledkem tvorby a otevírání značného počtu jemných trhlin. Takovéto velké deformace před selháním materiálu mají zásadní význam jak z hlediska bezpečnosti konstrukce, tak z hlediska rozptýlení energie v případě nárazového zatížení [1]. Tvar deformační křivky je závislý na kvalitě a množství použité textilní výztuže. Vyšší množství výztuže však nemá pozitivní vliv na vznik první trhliny, která je v případě použití TRC pro fasádní panely zásadní. Jakékoli trhliny, byť jen v malém množství, jsou u pohledových prvků nežádoucí. Z tohoto hlediska je v některých případech vhodné přidávat do směsi rozptýlenou výztuž ve formě krátkých vláken, která zdatelně dokáže oddálit moment první trhliny. Barhum a kol. [82, 83] studovali vliv přidávání skleněných a uhlíkových vláken do matrice TRC na vznik první trhliny. Podle jejich studie vzroste napětí při první trhlíně dvojnásobně až trojnásobně přidáním již 1 % rozptýlené skleněné či uhlíkové výztuže. Výsledky se různí s hodnotou vodního součinitele porovnávaných směsí. K podobnému zjištění došel i Hinzen [84]. Přidávání vláknitě výztuže má významný pozitivní vliv i na plastické smršťování betonu tj. na smršťovací trhliny [85, 86]. Zároveň rozptýlená výztuž pomáhá k delaminaci textilie [1].



Obr. 19 Rozložení gradientu napětí v blízkosti trhliny v TRC
(a) bez krátkých vláken a (b) s přidáním krátkých vláken [82]

2.3 Distančníky

Konstrukce z TRC jsou typické velmi malou tloušťkou při několika vrstvách technických textilií. Aby se zamezilo prokreslení textilie na povrch a zároveň zajistila požadovaná poloha výztuže ve vzorku, je nutné dostatečně a přesně zajistit její polohu. Jedním ze způsobů je použití distančníků z plastu, které se připevní na výztuž a tím zajišťují její polohu v bednění při betonáži. Po odformování nejsou distančníky na povrchu nikterak vidět. Německá firma CarboCon GmbH prodává distančníky DistTex, které mají vyladěné pro 2D i 3D textilie.



Obr. 20 Plastové distančníky DistTex (a) pro 2D výztuže; (b) pro 3D výztuže [87]

2.4 Aplikace TRC

Drtivá většina staveb v dnešní době používá určitou formu prefabrikace či prvků připravených alespoň částečně mimo stavbu. Prefabrikace nabízí možnosti aplikace inovativních materiálů při využití nových či netradičních technologií výroby pro konečné prvky. Co se týče použití TRC, v posledních letech bylo provedeno široké spektrum prefabrikovaných výrobků, které zahrnují jak architektonické (nenosné), tak konstrukční (nosné) prvky a mnoho studií o jeho aplikaci [30, 88, 88–95]. Jeho zvyšující se poptávka je dána určitými výhodami, které tento kompozitní materiál nabízí:

- snížení spotřeby betonu (možnost výroby subtilních prvků)
- snížení svázané energie (výroba, přeprava, instalace)
- snížení svázaných emisí (CO₂, SO_x, a dalších)
- dlouhá životnost
- estetika
- nové architektonické možnosti

Fasádní panely

Jednou z nejzajímavějších aplikací je použití TRC na fasádní obklady. Vysoce kvalitní a estetický betonový povrch, výborné mechanické vlastnosti, nové architektonické možnosti, životnost a redukce tloušťky betonového panelu na pouhých několik milimetrů jsou jen některé výhody, které tento materiál pro fasády nabízí. Protože se však stále jedná o poměrně nový materiál, na trhu neexistuje velké množství firem, které by se zabývaly masivní výrobou. Většinou se jedná o vědeckovýzkumné projekty univerzit a menších podniků, které končí jednorázovou aplikací. Německá firma Hering vyrábí ploché fasádní panely tl. 20-40 mm s různým probarvením a reliéfem a také sendvičové fasádní systémy s obkladem z TRC pod názvem BetoShell® [96]. Jejich fasádní panely jsou vyztužené skleněnými nebo uhlíkovými výztužemi.

V rámci výzkumného projektu "CurveTex - Development of a drapable textile reinforcement for the production of double-curved textile reinforced concrete elements" byla v Německu realizována první dvojité zakřivená fasáda TRC. Úspěšná spolupráce proběhla v letech 2016-2018 mezi univerzitou RWTH Aachen a dvěma malými a středními podniky Penn Textile Solutions and Stanecker Betonfertigteilewerk GmbH. Výrobek je připravený k uvedení na trh [97].



Obr. 21 Fasádní panely z TRC od firmy Hering na budově Skylab, budově laboratoře v oblasti Bahnstadt, nové městské čtvrti Heidelbergu [96]

Dále existují firmy, které vyrábějí na pohled velmi podobné sklo vláknité desky či desky s povrchovou úpravou z cementových tmelů, nejsou však vyztuženy technickými textiliemi. Jednou z takových je např. firma CETRIS [98], která vyrábí cementotřískové desky s povrchovou úpravou z cementového tmelu s různými typy probarvení či tvarů.



Obr. 22 Andreas Quartier AQ 8.3 Soltär, Düsseldorf (vlevo),
Komunitní centrum, Mannheim (vpravo) [96]

Další firmou zabývající se výrobou sklovláknobetonových desek je firma DAKO Brno [99] a další. Bylo provedeno mnoho studií na téma fasádních panelů z TRC [89, 100–102].

Lávky

V německém Lautlingenu byla v roce 2010 postavena lávka pro pěší o délce 100 m a řadí se tak mezi největší aplikace TRC na světě. Na stavbu byl použit jemnozrnný beton s max. velikostí zrna 4 mm vyztužený skleněnými textiliemi s impregnací epoxidovou pryskyřicí. V Kemptenu v Německu byla postavena lávka, která se skládá z jednotlivých segmentů. Ty jsou vyztuženy ocelovou výztuží obalenou AR – skleněnými textiliemi.



Obr. 23 Lávka pro pěší v Albstadt - Lautlingenu [103]

Tenké skořepiny

TRC se díky vysoké tvarové pružnosti textilní výztuže velmi hodí pro konstrukci tenkostěnných skořepin. V posledních letech bylo realizováno několik projektů hlavně v areálu univerzity v Aachenu. Na obr. 24 (a) je vidět tenká skořepina skládající se ze čtyř segmentů, z nichž každý je nesen centrickým sloupem.



Obr. 24 Zastřešení skořepinovou konstrukcí v RWTH Aachen [92, 104]

Na obr. 24 (b) je vidět experimentální stavba stojanu na kola z velmi tenké skořepiny [93, 104, 105]. Woerd a kol. tuto stavbu vzali jako inspiraci a vyvinuli technologii Oricrete, založenou na skládání složitých tvarů dle prastaré technologie skládání papíru - origami. Výsledkem je experimentální stavba skořepiny stejného tvaru, ale složená z jednotlivých segmentů, která slouží hlavně k ověření proveditelnosti nové technologie tvarování tenkých skořepin [106].

Zesilování a ochrana stávajících konstrukcí

V některých případech je vhodné použít TRC pro zesilování či opravu stávajících železobetonových konstrukcí. Na obr. 25 je praktická aplikace textilních výztuží k zesílení nevyhovující střešní konstrukce ze železobetonu na Univerzitě aplikovaných věd v Schweinfurtu v Německu. Projekt byl realizován s technickou podporou výzkumného centra SFB 528 „Textile Reinforced For Structural Strengthening and Retrofitting“ při Technické univerzitě v Drážďanech. 80 mm tlustá skořepina s rozpětím až 39 m vykazovala deformace až 200 mm. Konstrukce byla zesílena TRC v celkové tl. 15 mm se třemi vrstvami uhlíkové výztuže uvnitř [107].



Obr. 25 Oprava ŽB střešní konstrukce pomocí vrstvy TRC [108]

V roce 2009 byla v Praze zahájena rekonstrukce šestipodlažní bytové a komerční budovy. Stávající železobetonové stropy na ploše 75x35 m, lokálně podepřené, začaly být nevyhovující z hlediska mezního stavu použitelnosti, protože vykazovaly průhyby až 150 mm. Požadavky na vyšší zatížení vyústily ve zvýšené požadavky na odolnost proti protlačení v oblasti lokálního podepření desek železobetonovými sloupy. Při rekonstrukci bylo použito několik metod. Kde bylo dostatek prostoru, tam byly použité uhlíkové FRP výztuže. Mezi poli byla z důvodu nedostatečné světlé výšky použita metoda zesílení pomocí uhlíkových tkanin spolu se stříkaným betonem. Celkové zesílení textilním betonem bylo 20 mm se čtyřmi vrstvami uhlíkové textilie.



Obr. 26 Zesílení nevyhovující stropní konstrukce v budově v Praze pomocí uhlíkové textilní výztuže [109]

Designový nábytek a mobiliář

Kromě výše zmíněných aplikací se TRC hodí i pro menší nenosné prvky se specifickými požadavky na betonový design. Možnost téměř neomezeného tvarového řešení, dokonce možnost organických tvarů dala volnou ruku designerům pro různé návrhy nábytku, městského mobiliáře ale i drobných designových doplňků. Existuje již několik aplikací

textilního betonu na městský mobiliář a domovní nábytek. Jednou z průkopových firem je německá firma Paulsberg [33]. Řešení výztuže do nábytku nabízí např. firma Solidian [110], jedna z neznámějších firem, která vyrábí textilní výztuže do betonu. Kromě jiného se TRC využívá na protihlukové stěny, domovní čistírny odpadních vod, protipovodňové bariéry a mnohá další využití.



Obr. 27 Designový nábytek z výztuže od firmy Solidian [110]

2.5 Trvanlivost

Trvanlivost je jedním z neaktuálnějších podtémat zabývajících se TRC. Vzhledem k tomu, že se stále jedná o poměrně nový materiál, není možné ověřit si poznatky o jeho chování v reálných podmínkách v reálném čase. Proto je prováděno mnoho různých experimentů snažících se co nejvíce simulovat různá prostředí a různá zatížení, která by se mohla u konstrukcí z TRC vyskytnout a následně jsou vyvozovány dílčí závěry. Stejně jako u navrhování a zkoušení tohoto materiálu, neexistuje legislativa, která by se zabývala přesným definováním zkoušek pro ověření trvanlivosti. Soubor experimentů v odborných publikacích by měl napomoci k pochopení chování materiálu v dlouhodobém horizontu a časem jako podklad pro vytvoření norem zabývajících se zkouškami trvanlivosti. Cílem i této práce je přispět provedenými experimenty k tomuto tématu.

Široká škála potenciálních aplikací sebou nese širokou škálu požadavků na mechanickou odolnost. Pro posuzování trvanlivosti je mechanická odolnost obzvláště důležitá z hlediska trhlin, které výrazně zvyšují transport tekutin a plynů a mohou tak zvýšit možnost degradace výztuže. Tvorba trhlin však často začíná ještě před jakýmkoli mechanickým zatížením např. smršťováním [1]. Požadavky závisí především na druhu a účelu použití dané konstrukce. Pro prvky jako jsou fasádní panely a skořepiny má zřejmě největší význam odolnost proti vlivům klimatu (mrznutí a rozmrazání, vlhkost, UV záření, vliv vysoké teploty z přímého slunce,...). U protihlukových stěn a lávek je navíc důležitá odolnost vůči rozmrazovacím solím. Trvanlivost TRC by měla být řešena na několika úrovních:

- (a) trvanlivost betonu
- (b) chemická odolnost technických textilií
- (c) trvanlivost vazby mezi maticí a technickou textilií
- (d) odolnost kompozitu při požáru

Vzhledem k tomu, že vysokohodnotné betony používané nejčastěji pro prvky TRC se obecně považují za odolné a trvanlivé [54, 55, 62, 111–116], je výzkum zabývající se trvanlivostí zaměřen z větší části na ověření chemické stability textilní výztuže v agresivním prostředí a sledování spolupůsobení výztuže a matrice v průběhu životnosti konstrukce. Nicméně stále je téma trvanlivosti HPC a UHPC otevřené a všechna tvrzení nejsou ještě dostatečně ověřena.

Většina testů je založena na simulaci agresivního prostředí a urychleného stárnutí konstrukce, po kterém je zkoušena tahová a ohybová pevnost materiálu, která je porovnávána s referenčními hodnotami a ověřena na mikroskopické úrovni pomocí snímků z mikroskopu.

2.5.1 Trvanlivost betonu používaného pro TRC

Jak již bylo popsáno v odstavci 2.2, pro TRC se používá vysokohodnotných betonů, jejichž základem je nejčastěji cementová matrice z portlandského cementu s příměsí mikrosiliky, popílků či vysokopecní granulované strusky. V posledních letech je věnována velká pozornost tématu trvanlivosti těchto druhů betonů. Obecně lze říci, že se tyto materiály ukazují jako velmi odolné a trvanlivé, přesto jsou závěry zatím podloženy pouze zkouškami urychleného stárnutí a přesné údaje budou známy až za několik desítek let. Musíme si totiž uvědomit, že první použití HPC se datuje koncem 60. let. Tyto aplikace však byly v interiérech, nejčastěji na sloupech výškových staveb a první venkovní aplikace vznikaly až počátkem let 90 [62]. Na základě zkušeností s běžným betonem však můžeme bezpečně předpokládat, že HPC je odolnější než běžný beton. Pro zjišťování trvanlivosti je prováděno několik dílčích testů: zkoušky mrazuvzdornosti, odolnosti proti agresivním látkám (rozmrazovacím solím), odolnost proti oděru, požární odolnost, mechanické zkoušky zjišťování pevnosti a modulu pružnosti a další. Některé zkoušky jsou však stále diskutovaným tématem, neboť neexistuje jednotný postup či norma pro stanovení výsledků jako např. u mrazuvzdornosti či odolnosti proti chemickým rozmrazovacím látkám (CHRL).

2.5.1.1 Mrazuvzdornost betonu

Zkouška mrazuvzdornosti betonu je jednou ze základních zkoušek k ověřování jeho trvanlivosti. Vyjadřuje odolnost betonu za výrazného střídání teplot a působení atmosférických vlivů s ohledem na jeho funkčnost a použitelnost v dlouhodobém časovém horizontu. Bohužel neexistuje žádná jednotná zkouška, která by určila mrazuvzdornost HPC. Normy často navrhují několik postupů pro stanovení odolnosti proti zmrazování a rozmrazování a výběr správného postupu není vždy přímočarý. Dále, rychlost zmrazování a rozmrazování se může při provádění těchto testů měnit ve velkém rozsahu a změna rychlosti

může ovlivnit výsledky testu. V neposlední řadě není stanovena pevná hodnota pro rozlišení betonu odolného proti mrazu a toho, který není. Otázka je i kolem předepsaných počtů zmrazovacích a rozmrazovacích cyklů [62].

V ČR lze provádět zkoušku klasicky podle ČSN 731322 [117] a lze předpokládat, že materiál vyhoví minimálně na 200 cyklů. Podle americké ASTM C 666 [118] se materiál považuje za mrazuvzdorný, když po 300 cyklech vykazuje 60% odolnost. Z důvodu zdouhavého zkoušení některé státy zavedly určování mrazuvzdornosti podle faktoru mezerovitosti současně s vodním součinitelem. Kanadská norma CSA A23.1 [119] z roku 2000 uvádí, že pokud má HPC poměr vody/ cementu nižší než 0,36, musí být jeho mezerový faktor nižší než 250 μm (bez individuálních hodnot vyšších než 300 μm), aby byl považován za mrazuvzdorný. V Německu je nyní připravována nová norma zabývající se UHPC a předpokládá se stanovení mrazuvzdornosti podle podobného principu.

2.5.1.2 Odolnost betonu proti agresivním látkám

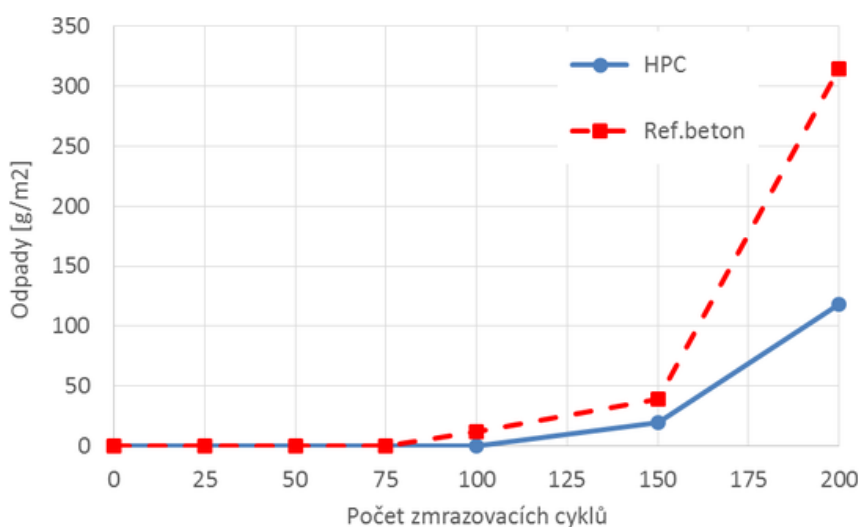
Vysokohodnotné a ultra vysokohodnotné betony mají obecně několikanásobně větší pevnost v tlaku než běžné betony. Ta je dána především jejich hutnou strukturou viz kapitola 2.2. Podle několika publikací [120–122] je právě hutná struktura důvodem velké odolnosti proti různým nesilovým zatížením, kam se řadí i odolnost proti agresivním rozmrazovacím látkám a mrazuvzdornost. U HPC se degradace probíhající v místě průsaku vody do betonu pohybuje pouze v řádech několika milimetrů. Obecně máme u HPC dvě možnosti jak zajistit životnost konstrukcí z něj: zajistit dostatečné krytí ocelové výztuže anebo zajistit, aby byl beton dostatečně hutný a nepropustný [62].

Protože technické textilie nepodléhají běžné korozi jako ocel, jejich krycí vrstva je v řádech několika milimetrů, což bývá ve většině případů dostačující. Odolnost TRC vůči agresivním látkám je ovšem důležitá hlavně při stavbě lávek a mostů. Existuje již několik aplikací, kde je TRC použito právě na pěší lávky, kde je nutné v zimním období používat rozmrazovací látky k bezpečnému provozu. Proto je nutné soustředit pozornost na dostatečnou hutnost a nepropustnost použitého betonu k zajištění maximální ochrany nekovové výztuže.

V ČR je k posypům v zimním období nejčastěji používána Württembergská posypová sůl (NaCl). Její 3 % roztok je pro betony nejškodlivější. Většina testů je proto založena právě na vystavení tomuto roztoku. Opět neexistuje jednotný postup pro stanovení odolnosti HPC proti rozmrazovacím látkám. V ČR se zkouší odolnost proti rozmrazovacím solím dle ČSN 73 1326 [123] z roku 1985 „*Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek*“. V roce 2007 vstoupila platnost norma pro zkoušení ČSN 73 1380 „*Zkoušení odolnosti betonu proti zmrazování a rozmrazování – Porušení vnitřní struktury*“. Tyto metody se různí v typech vzorků i zatěžování a samozřejmě i ve vyhodnocení výsledků.



Fládr a Bílý [120] se ve svém článku zabývali rozsáhlým výzkumem HPC s použitím lokálních surovin se zaměřením na stanovení mrazuvzdornosti a odolnosti HPC proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek. Výsledky byly porovnávány s referenčním betonem pevnostní třídy C40/50. Došli k závěru, že během provedených 200 zmrazovacích cyklů nedošlo k významné změně pevnosti v tlaku ani v tahu a změna by pravděpodobně nastala až při vyšším počtu cyklů. Toto potvrzuje dobrou odolnost HPC. Odolnost HPC proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek velmi dobře koresponduje s mrazuvzdorností. Při zkoušce odolnosti proti CHRL vykazovala zkušební tělesa z HPC lepší odolnost než vzorky z referenčního betonu, což je dáno hutnější strukturou HPC [120].



Obr. 28 Množství odpadů při zkoušce odolnosti proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek dle výzkumu Fládra [120]

Kromě odolnosti proti CHRL je také sledována odolnost HPC vůči mořské vodě. HPC je již více než 20 let velmi úspěšně používán k výstavbě pobřežních plošin v Severním moři. Několik zkušebních vzorků a reálných aplikací je již mnoho let v různých mořských prostředích a jsou stále v relativně dobrém stavu. Toto však není klíčové pro prvky TRC, které se předpokládají na jiný typ aplikací.

2.5.1.3 Odolnost proti obrusu a mechanickému poškození, vandalismu

Vysoká hutnost a tvrdost HPC nabízí dobrou ochranu proti abrazivnímu působení písku či nečistot. V případě aplikace TRC na fasády hutná struktura zajistí menší nasákavost a odolnost proti zašpinění. V posledních desítkách let se celosvětově řeší také problém čištění poničených pohledových ploch vandaly, kteří konstrukce posprejují různými barvami. V tomto ohledu vykazuje hutná struktura jistou výhodu oproti jiným konstrukcím. V kombinaci

s vhodným nátěrem je možné HPC vyčistit tlakem vodního proudu. Toto je velkou výhodou pro aplikace TRC pro městský mobiliář, kde se s těmito problémy potýkáme nejvíce.

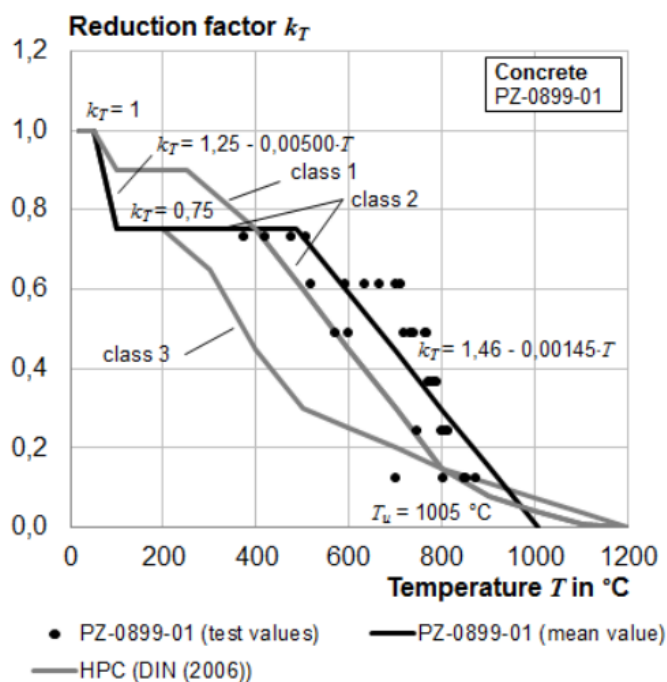
2.5.2 Odolnost při požáru

Odolnost HPC vůči požáru byla mnoho let diskutovaným tématem. Některé studie uváděly podobnou odolnost jako běžný beton a některé udávaly opak [124–126]. Po skutečném požáru v tunelu a zasažení první HPC konstrukce ohněm, byla tvrzení ujednocena následovně: požární odolnost HPC je sice horší než u běžného betonu, ale není zcela špatná. Podobně jako v případě jakéhokoliv jiného betonu se HPC řadí mezi bezpečnější stavební materiály, pokud jde o požární odolnost [62].

Kulas a kol. [127] se zabývali testováním speciální jemnozrné cementové matrice o pevnosti 70 MPa pro TRC za vysokých teplot. Byly testovány vzorky se skleněnou a uhlíkovou výztuží. Z grafu na obr. 29 je patrný úbytek pevnosti betonu na 75 % (redukční faktor $k_T=0,75$) nejspíše vlivem ztráty hmotnosti vysycháním při zatížení teplotou 50 -100 °C. Mezi 100 – 500 °C je konstantní chování, poté dochází k lineární ztrátě pevnosti až do 1005 °C.

Studie zabývající se odolností samotného HPC při požáru nám sice ukazují základní chování při zatížení teplotou, ale při použití s technickými textiliemi je nutné zaměřit se na testování kompozitu jako celku, jelikož vliv textilních výztuží může být klíčový. Otázka smykového namáhání, pevnosti v tahu, lomové energie a šíření trhlin za požáru jsou témata, na která je nutné soustředit pozornost v dalších výzkumech.

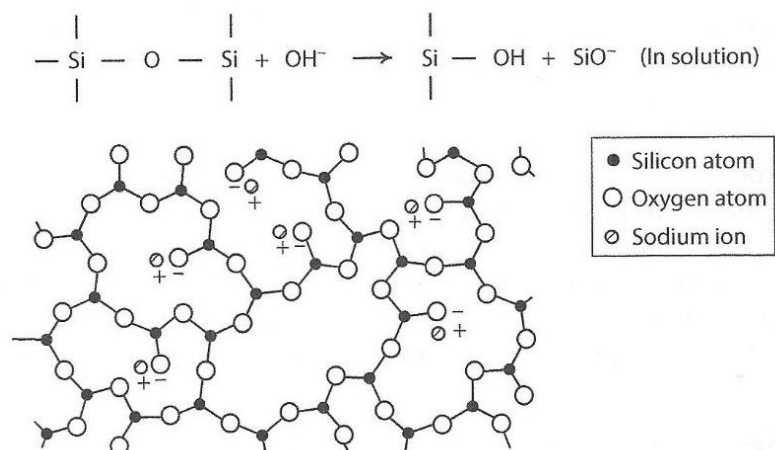




Obr. 29 Redukční faktor při zatížení speciálního jemnozrnného betonu (PZ – 0899-01) pro TRC vysokou teplotou [127]

2.5.3 Chemická odolnost vláken

V cementové matrici může vznikat prostředí s pH až 13,5. Vysoké pH cementové matrice je do značné míry způsobeno přítomností Ca^{2+} iontů spojených s hydratovaným $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a alkalickými ionty (K^+ , Na^+), které se nachází v solích obsažených v Portlandském cementu. Za takovýchto podmínek vysoké hladiny pH může docházet k chemické degradaci některých typů vláken roztokem, který je vysoce koncentrovaný OH^- . Každý materiál je jinak odolný v tomto agresivním prostředí. Hannant ve své studii [128] popisuje výbornou odolnost polypropylenových vláken v cementové matrici během dlouhodobého 18letého pozorování bez urychlení. Jiné studie ukazují výbornou odolnost PVA vláken [129]. Podle zrychlených zkoušek stárnutí v cementové alkalické vodě se ukazuje, že pevnost v tahu PVA vlákna je po 100 letech zachována více než z 95 %. Podle [30, 130] je uhlíkové vlákno dobře známé svou vysokou chemickou odolností a v důsledku běžného chemického prostředí nelze pozorovat žádné zhoršení vlastností. Mnohem složitější je však situace s vláknem z AR-skla a čediče a pozornost by měla být věnována převážně tomuto problému. O odolnosti čedičových vláken není mnoho publikací.



Obr. 30 Schéma struktury skleněné sítě a napadení zásaditým roztokem [131]

2.5.3.1 Odolnost skleněných vláken

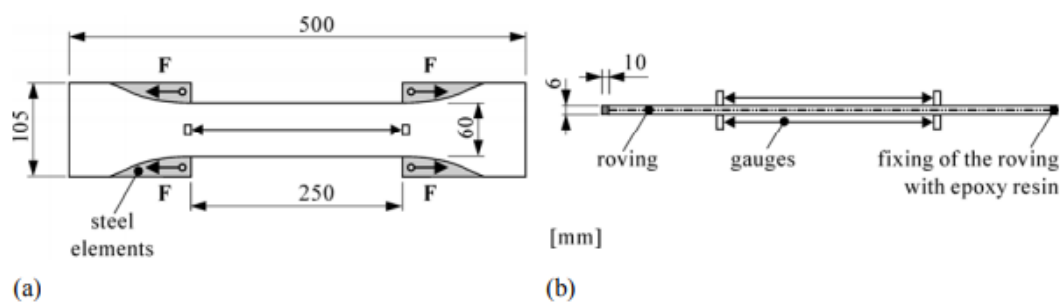
Skleněná vlákna jsou v dnešní době spolu s uhlíkem nejpoužívanějšími vlákny pro textilní betony. Sklo je však mnohem levnější než uhlík, a tak je často mnohem žádanější. Ohledně jeho trvanlivosti v alkalickém prostředí cementové matrice, která může dosahovat pH až 13,5, však probíhá několik kontroverzních výzkumů. Nejběžnější typ skla používaného pro vyztužování TRC je AR sklo, které je obohaceno o cca 16 % ZrO_2 . Porovnání s běžným E-sklem, používaným pro vyztužování polymerních matic je vidět v tab. 3. AR sklo díky vysokému obsahu oxidu zirkoničitého vykazuje výrazně vyšší odolnost ve vysoce alkalickém prostředí v porovnání s běžnými skly. Přesto však dochází k nerovnoměrnému poškození vlákna v důsledku různých koncentrací prvků v blízkosti povrchu vlákna. Toto zhoršení se zvyšuje s rostoucí hodnotou pH roztoku a s teplotou [132, 133]. V případě skla je výsledkem porušení Si-O-Si vazeb a tvorba defektů na povrchu spojená s úbytkem pevnosti viz obr. 32 [30].

Tab. 6 Chemické složení E-skla a AR-skla [134]

složka	E - sklo	AR -sklo
	[%]	[%]
SiO_2	52,4	71
$\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$	0,8	11
B_2O_3	10,4	-
Al_2O_3	14,4	18
MgO	5,2	-
CaO	16,6	-
ZrO_2	-	16
Li_2O	-	1

Organické polymery aplikované na povrch vlákna ve výrobě v podobě sizingu mohou výrazně oddálit proces degradace. Scheffler a kol. [135] se ve své práci zabývají vlivem alkalických roztoků na skleněná a čedičová vlákna. Porovnáva zde způsob porušení vláken při vystavení působení cementového roztoku a roztoku NaOH o stejných pH. Podle nich závisí porušení na době vystavení alkalickému prostředí a také teplotě. Ukazuje se, že v případě vystavení NaOH dochází k porušení celé vnější vrstvy. V případě vystavení cementovému roztoku o stejném pH je porušení pouze lokální.

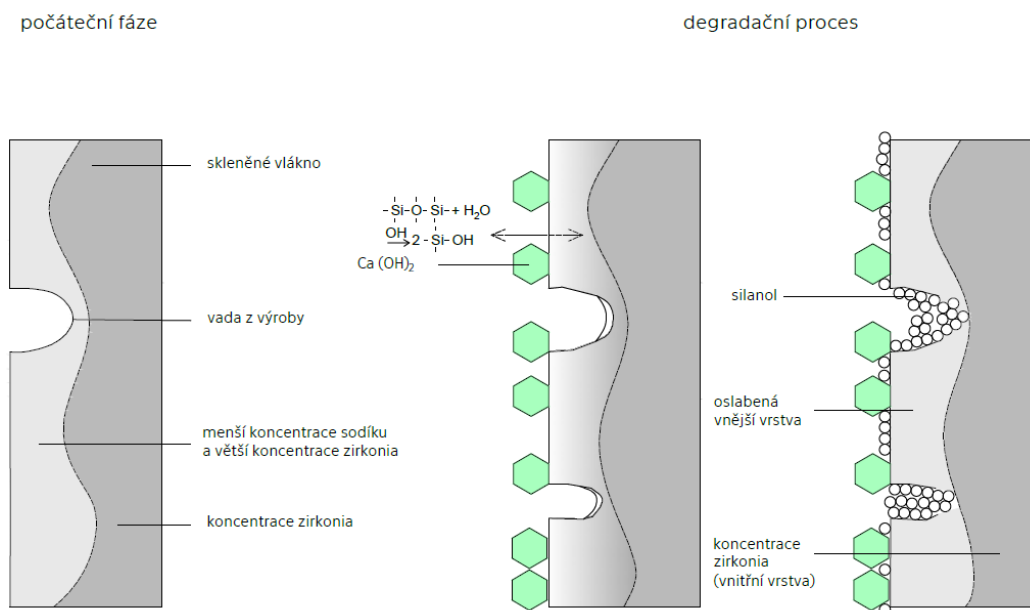
Většina provedených testů je založena na simulování alkalického prostředí pomocí hydroxidů nebo cementových roztoků. Bylo provedeno i několik studií zabývajících se zlepšením chemické odolnosti AR skla. Některé jsou starší a zabývají se sklovláknobetonem a některé jsou z posledních let a zabývají se přímo rovingy v TRC. Litherland a kol. [136] se zabývají výzkumem odolnosti skleněných vláken ve sklovláknobetonu pomocí metody SIC (Strand-in-cement). Navržené testy mají reálněji simulovat prostředí kolem výztuže. Büttner a kol. [137] se zabývají úpravou skleněných rovingů pomocí speciálních dvou druhů epoxidových pryskyřic a ověření tahové pevnosti na vzorcích dog bonů. Typ vzorků též nazývají TSC podle německé terminologie Taillierte Streifenprobe.



Obr. 31 (a) půdorys a (b) řez schématu testování TSC metodou [137]

Několik studií se také zabývá vysvětlením rozdílu v odolnosti skla s přítomností ZrO_2 oproti běžnému sklu. Nejjednodušším vysvětlením je, že ZrO_2 stabilizuje síť, a tak, i když dochází k vyluhování Si, se síť nerozpadne a vnější vrstva, která je bohatá na ZrO_2 , zůstává a zpomaluje další proces loužení. Další studie popisují mechanismus vytvořené vady z výroby, která se ve skle bohatém na zirkon může vyskytnout, ale zirkon zamezí dalšímu růstu těchto trhlin či děr viz obr. 32 [138]. Tento mechanismus vzniku a zastavení vad může vysvětlit některé protichůdné údaje v literatuře, které v některých případech udávají ztrátu pevnosti AR skla a v jiných nikoli [30].

Wei a kol. [139] uvádí, že odolnost skleněných vláken vůči kyselinám je podobná odolnosti vůči alkáliím.



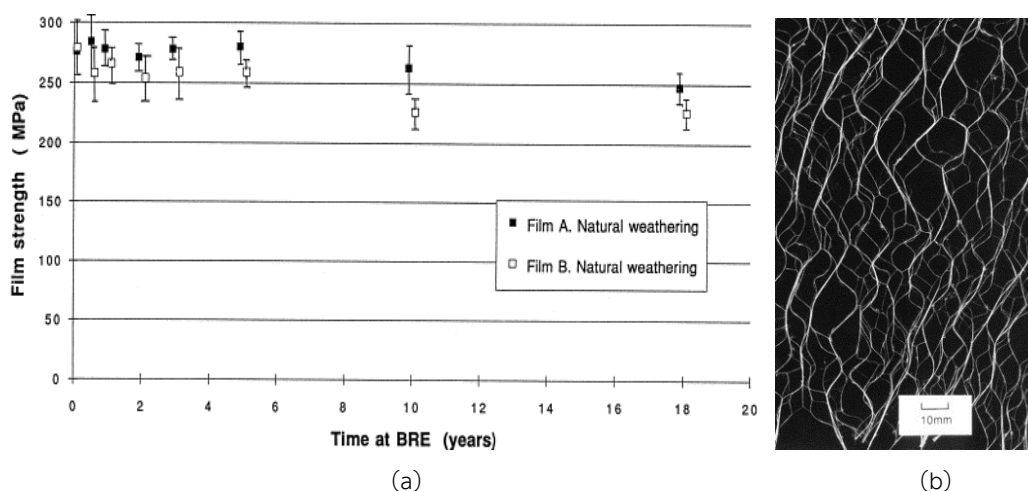
Obr. 32 Proces degradace skleněného vlákna v alkalickém prostředí [138]

2.5.3.2 Odolnost polymerních vláken

Polymerní vlákna nejsou mezi nejčastějšími materiály používanými pro hlavní výztuž v TRC. Avšak existují některé studie o jeho využití. Častěji jsou používána ve formě rozptýlené výztuže.

Degradace polymerních vláken je primárně způsobována UV zářením. Vzhledem k tomu že u prvků z TRC je výztuž vsazena do cementové matrice, je pravděpodobné, že je proti UV záření dostatečně chráněna. Tento předpoklad byl potvrzen ve studii Hannanta a kol. [128] z roku 1998, který zkoumal trvanlivost cementového kompozitu vyztuženého polypropylenovými vlákny s různými typy stabilizátorů (typ A, B) po dobu 18 let v reálných přírodních podmínkách. Výsledky studie ukazují úbytek 10 % pro jeden druh vláken a 20 % pro druhý typ během prvních 10 let. Po další pozorovanou dobu 8 let již nedocházelo k další degradaci, viz obr. 33. Závěrem studie je zjištění, že cementová matrice je dostatečnou ochranou pro polymerní vlákna.

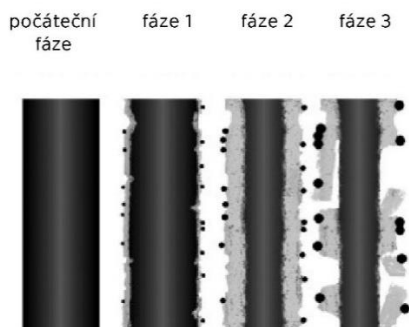
V publikaci od Zijla a Wittmanna [129] je udáváno, že polyvinylalkoholová vlákna (PVA) mají 95 % pevnost po 100 letech simulovaných zrychleným stárnutím v cementové vodě. Kromě zkoumání odolnosti proti alkalickému prostředí však nejsou známy jiné údaje o chemické odolnosti PVA vláken v agresivním prostředí. Obecně jsou však tato vlákna považována za chemicky rezistentní, a tudíž se dá předpokládat dobrá odolnost vlákna v běžném prostředí. De Lhoneux ve spolupráci se společností Eternit publikovali výzkum [140] ve kterém uvádí spolehlivé údaje taktéž o výborné životnosti PVA vláken.



Obr. 33 (a) Vliv přirozených přírodních podmínek po dobu až 18 let na pevnost polypropylenových vláken ve formě fólie. (b) Struktura folie (typ A) [128]

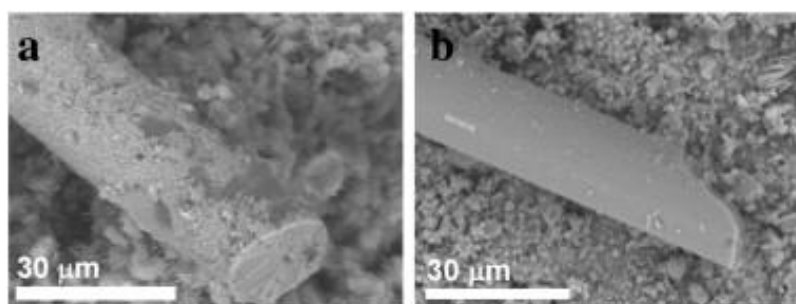
2.5.3.3 Odolnost čedičových vláken

Čedičová vlákna se zdají být dobrou alternativou za skleněná vlákna. Díky své dobré teplotní odolnosti, široké dostupnosti po celém světě a relativně nízké ceně jsou vhodná pro širokou škálu aplikací [141]. Procesem výroby, kde je vlákno taveno, tvarováno dlužením do požadovaného tvaru a ochlazováno, se mění jeho krystalická struktura na amorfní. Mikrostruktura čedičových vláken je proto podobná struktuře skleněné sítě. Odolnost čedičových vláken a jeho dalších vlastností silně závisí na jeho složení. Oproti skleněným vláknům obsahují čedičová vlákna poměrně hodně Fe_xO_x (cca 7-15 %). Se zvyšujícím se poměrem CaO/Fe_xO_x se stávají čedičová vlákna méně odolná vůči alkalickému prostředí [141]. Proces degradace vlákna v alkalickém prostředí je velmi podobný jako u vlákna skleněného. V první fázi se vazby $-Si-O-Si-$ a $-Al-O-Si-$ začínají porušovat hydroxylovými ionty a aluminosilikátová síť se začíná rozpouštět póry a mikrotrhlinami, které jsou již přítomny v podvrchové vrstvě (obr. 34, fáze 1). Jak alkalický roztok proniká do čedičového vlákna, dochází k rozpouštění aluminosilikátové sítě a na povrchu vlákna se vytváří gelová vrstva. Tloušťka gelové vrstvy se časem zvyšuje. Reakce se pohybuje směrem k jádru vlákna a zanechává za sebou nerozpustné oxidy a hydroxidy jako krystalické a amorfní fáze (obr. 34, fáze 2). V dalších fázích leptání je korozní plášť částečně nebo úplně odlupován z vlákna (obr. 34, fáze 3). To je způsobeno jednak slabou vazbou mezi korozním pláštěm a jádrem vlákna skrze gel, jednak mechanickým namáháním v povlaku, a nakonec expanzí gelu ve vodném médiu. Odlupování korozního obalu vede k odhalení jádra čedičového vlákna [142].



Obr. 34 Proces degradace čedičového vlákna [142]

Bylo také zjištěno, že alkalivzdornost vláken závisí již na složení a zásaditosti čedičové suroviny, která byla pro výrobu použita. Förster ve své publikaci [141] uvádí, že obecně platí, že vlákna mají nižší alkalivzdornost než AR sklo, ale vyšší alkalivzdornost než E sklo. Rybin a kol. se ve své studii [142] zabývají zlepšením alkalivzdornosti čedičových vláken pomocí speciálního povlaku s ZrO_2 . Výsledky ukazují výrazné zlepšení odolnosti čedičových vláken s povlakem oproti vláknům bez povlaku.

Obr. 35 Snímky z elektronového mikroskopu (SEM) cementové matrice s čedičovými vlákny (a) bez povlaku (b) s povlakem ZrO_2 (0.4 M sol) [142]

Wei a kol. [139] uvádí, že odolnost čedičových vláken vůči kyselinám je mnohem lepší než jejich alkalická odolnost. Toto je rozdíl oproti skleněným vláknům, kde, jak již bylo zmíněno, je odolnost vůči kyselinám podobná odolnosti vůči alkáliím.

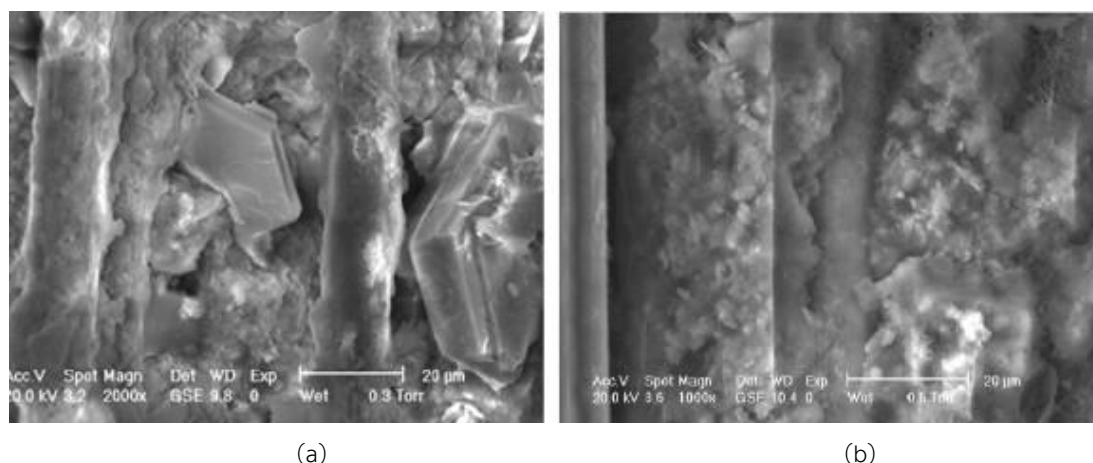
2.5.3.4 Odolnost uhlíkových vláken

Chemická odolnost uhlíkových vláken je z dostupných vláken nejlepší. Tomu však odpovídá i jeho cena, která je téměř dvojnásobná než například u skla. Podle [30, 130] je uhlíkové vlákno dobře známé svou vysokou chemickou odolností a v důsledku běžného chemického prostředí nelze pozorovat žádné zhoršení vlastností. Několik studií ukazuje, že vlákna zůstávají neporušena po vystavení alkalickým roztokům [143]. Studie Kabira a kol. zkoumá odolnost uhlíkových výztuží v chladných podmínkách [144].

Ve srovnání se s ostatními výztužemi, je uhlík téměř spolehlivou variantou pro všechny typy aplikací. Z tohoto důvodu je uhlík stále více a více používán i přes jeho nepříznivou cenu.

2.5.4 Trvanlivost vazby mezi maticí a technickou textilií

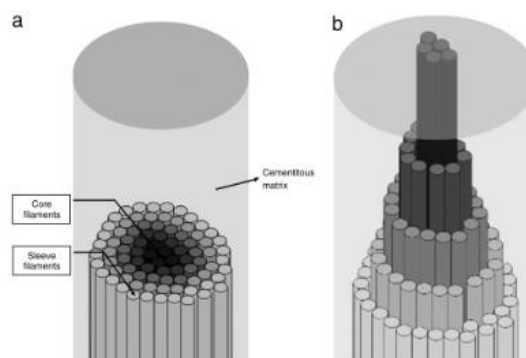
Vazba mezi maticí a technickou textilií je z hlediska trvanlivosti velmi důležitým aspektem. Pro TRC vyztužené AR sklem bylo zjištěno, že úbytek síly s rostoucím stářím je ovlivněn alkalitou matrice kolem výztuže. Ta totiž ovlivňuje tvorbu pevné fáze na rozhraní vlákna a matrice a na povrchu vláken. Tloušťka této krustovité vrstvy je závislá na tvorbě portlanditu v matrici. Se zvyšující se alkalitou roste i srážení $\text{Ca}(\text{OH})_2$ mezi vlákny. Tyto inkrustace vláken snižují jejich prokluz v blízkosti trhlin, takže při menších šířkách trhlin se vlákno nemůže deformovat. Vlivem těchto krystalů dochází navíc k bočnímu namáhání vláken. Krystaly způsobí jakési zářezy do vlákna a dochází k jejich časnému porušení. V případě nahrazení portlandského cementu pucolánovými příměsemi, které mají obecně menší alkalitu, dominuje na rozhraní vlákna a matrice fáze C-S-H, která zaručuje výbornou vazbu, viz obr. 36 [130]. Zjednodušeně řečeno, v místě trhlin je možné částečné odlupování tenké obálky a následné prokluzování, čímž je zajištěno tažné chování vlákna, které trhlinu přemostuje [15].



Obr. 36 Snímky z SEM skleněných vláken z AR skla v maticí vyrobené z (a) portlandského cementu (po 28 dnech zrychleného stárnutí a (b) vysokopecního cementu a pucolány (zde po 360 dnech zrychleného stárnutí) [130]

Pro TRC se používá výztuží složených z několika stovek až tisíců vláken. Cementová matrice se však skládá z relativně velkých částic (~ 10 μm), které jsou větší než mezery mezi jednotlivými vlákny. Tyto částice proto nemohou zcela proniknout do mezer mezi vlákna rovingu, což má za následek jedinečné mechanismy vazby. Na vnějších vláknech (obálce), které jsou v těsném kontaktu s produkty hydratace, dochází k výše zmíněným procesům. Vnitřní vlákna (jádro) zůstávají relativně volná. Díky této speciální mikrostruktuře jsou vnější vlákna (obalová vlákna), která jsou v přímém kontaktu s cementovou maticí a jsou dobře

spojena s matricí, při lomu rozdrčena. Tím se dosahuje vysokého napětí při první trhlině. Po jejich poruše je aktivován teleskopický způsob vytahování, přičemž vnitřní vlákna (jádrová) kloužají proti vnějším (obalovým) vláknům, viz obr. 37.



Obr. 37 (a) jednotlivé vrstvy ve svazku vláken;
(b) teleskopický systém vytahování vláken [145]

Tento kluzný způsob vnitřních vláken vyvolává vysokou tažnost celého kompozitu, zejména při použití křehkých vláken jako je sklo. Při pokračující hydrataci a postupném stárnutí konstrukce se pak může měnit poměr jádra a obálky vlivem vzniku produktů hydratace mezi vlákny [145]. To může mít za následek silnější vazbu s matricí, ale zároveň to může vést i ke křehnutí, zejména při použití materiálu jako je právě sklo. Cohen a Peled zjistili, že z hlediska pevnosti a celkové životnosti jsou vhodnější pojiva, která mírně prostupují mezi vlákna svazku v průběhu stárnutí [1, 146].

Uhlíková vlákna jsou oproti skleněným vláknům inertní [147, 148]. Vlivem sizingu jednotlivých vláken a coatingu celého svazku se předpokládá možná funkcionalizace na povrchu vláken [1]. Chování TRC s uhlíkovou a skleněnou výztuží je však naprosto rozdílné. Vzorky s uhlíkovou výztuží dle experimentu Butlera a kol. [149] nabývají pevnosti i po uskladnění v komoře o teplotě 40 °C a 99 % vlhkosti po jeden rok, což značí o opačném chování oproti skleněné výztuži. Bylo také zjištěno, že bez ohledu na pucolánové příměsi a bez ohledu na stáří vzorku, je na rozhraní vlákna a matrice přítomna fáze C-S-H nikoli krystaly $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Tento jev dosud nebyl dostatečně vysvětlen, ale dalo by se říci, že morfologie rozhraní vlákna a matrice je ve větší míře určena vlastnostmi povrchové vrstvy vlákna než použité matrice [1, 149].

Čedičová vlákna vykazují prokazatelně nejhorší vlastnosti. Experiment Hempela a kol. [150] se zabýval vyztužením TRC různými čedičovými vlákny s nátěrem a bez něj. Vzorky bez coatingu byly v klimatické komoře vystaveny urychlenému testu stárnutí. Výsledky ukázaly dramatický úbytek pevnosti. Styrolbutadienový povlak o něco zlepšil pevnost a chování vazby mezi matricí a vlákny, ale postupně docházelo k úbytku pevnosti vlivem stáří. Autoři dospěli k závěru, že k používání čediče jako výztuže TRC je nutné vyvinout speciální vhodný nátěr odolný proti alkalickému prostředí a zabývat se touto tematikou více do hloubky.

Z výše uvedených poznatků je zřejmé, že trvanlivost vazby matrice s vlákny je obsáhlé téma se spoustou různorodých mechanismů, které nejsou dostatečně objasněné. Experimentální zkoumání nových kombinací vláken a maticí, stejně jako vývoj nových coatingů zůstává nepostradatelnou kapitolou v trvanlivosti TRC.



3 Specifikace použitých materiálů v experimentech

3.1 Beton

Pro všechny vzorky a experimentální prvky TRC byl použit vysokohodnotný beton. Pro srovnání byly v některých experimentech zhotoveny prvky z běžného betonu třídy C 30/37. Směs vysokohodnotného betonu používaná pro zmíněné experimenty byla vyvinuta a optimalizována na Fakultě stavební ČVUT v Praze. Jedná se o směs jemnozrnného samozhutnitelného betonu s vodním součinitelem 0,25, která se skládá z několika druhů písků, cementu, mikrosiliky, křemenné moučky, plastifikátorů a vody, viz Tab. 7.

Tab. 7 Složení směsi HPC1.

složka	[kg/m ³]
technické písky	979,0
cement I 42.5R	693,0
křemenná moučka	332,0
mikrosilika	178,0
superplastifikátory	29,6
voda	174,0
celkem	2 385,6

Cement

Pro výrobu zkušebních těles byly použity dva druhy cementu. Do směsí pro vysokohodnotné betony byl použit Portlandský cement CEM I 42,5 R, prvky z běžného betonu obsahují cement Portlandský směsný CEM II 32,5 s různě zkombinovanými neslínkovými složkami.

Kamenivo

Bylo použito několik druhů kameniva jako plniva do vzorků. Pro vysokohodnotné betony byly použity technické písky frakcí 01/06 a 06/12. Pro referenční vzorky z betonu běžných pevností byl použit písek a štěrk s frakcí 4/8.

Mikrosilika (křemičitý úlet)

Do směsi HPC1 je přidáváno značné množství mikrosiliky Elkem Microsilica® 940 typu Undensified (U) [151].

Mikromletý křemen

Za účelem lepšího samohutnění a také za účelem zlepšení odolnosti ztvrdlého betonu je do směsi přidáván mikromletý křemen s frakcí ST 6.

Superplastifikátory

Ke zlepšení zpracovatelnosti byly použity různé superplastifikátory na bázi polykarboxylátů (PCE) s vysokým plastifikačním účinkem.

3.2 Textilní výztuž

Vzhledem k dostupnosti byly prováděny experimenty na třech typech výztuže:

- skleněné
- uhlíkové
- čedičové

V experimentech byly používány samotné rovingy s různými povrchovými úpravami či komerčně dostupné 2D nebo 3D textilní výztuže. Druh výztuže se liší pro jednotlivé experimenty nebo aplikační výsledky. V některých případech bylo nutné vyvinout v laboratoři vlastní pletenou 2D výztuž pro konkrétní použití.

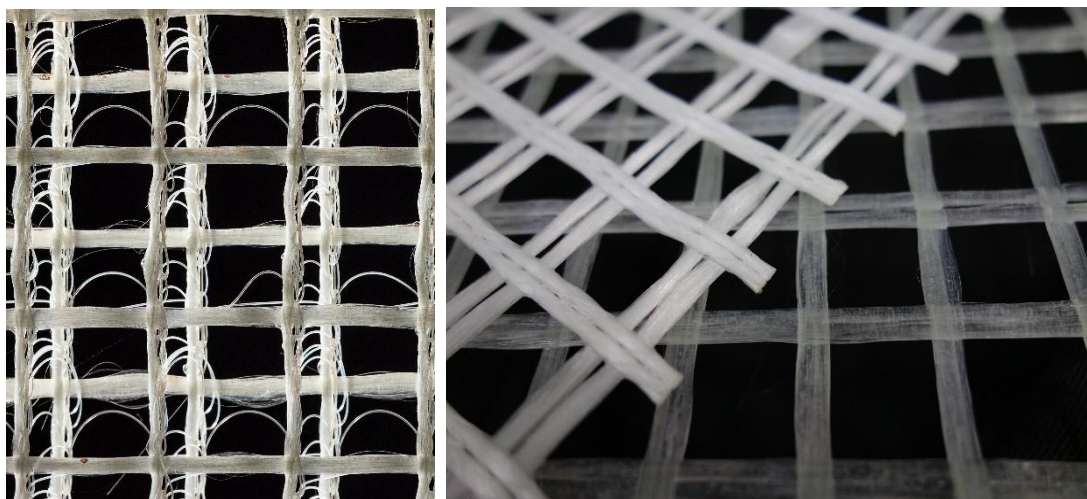
3.2.1 Skleněná výztuž

Pro celý experimentální program bylo použito několik druhů skleněných výztuží. Všechny použité výztuže jsou z AR skla se zvýšeným obsahem ZrO_2 a základní povrchovou úpravou

z výroby, která podle výrobce zajišťuje chemickou odolnost v alkalickém prostředí. Byl použit skleněný roving Cem-FIL® 5325 od firmy Owens Corning® 2400 Tex [152]. Dále byla použita 3D výztuž SITgrid 709KB od firmy V. Fraas [23]. Pro účely některých speciálních experimentů a aplikací byla vyráběna vlastní 2D výztuž ze zmíněného rovingu.

Tab. 8 Specifikace použitých skleněných výztuží

typ výztuže	délková hmotnost 0°/90° [tex]	pevnost v tahu [MPa]	modul pružnosti [GPa]	objemová hmotnost [kg/m ³]	mřížka 0°/90° [mm]	Počet rovingů na 1m	průřezová plocha [mm ²]
Cem – FIL	2400	1700	72	2680	-	-	0,896
3D SITgrid 709 KB	2400/2400	-	-	-	10/18	78/80	-



(a)

(b)

Obr. 38 Použité textilie: (a) 3D textilie; (b) 2D textilie komerční (horní) a ručně vyráběná (spodní)

3.2.2 Uhlíková výztuž

Pro experimentální část byl použit uhlíkový roving od firmy Toreyca® 24k, který má 1650 Tex a pevnost v tahu 4900 MPa.

Tab. 9 Specifikace použité uhlíkové výztuže

typ výztuže	délková hmotnost 0°/90° [tex]	pevnost v tahu [MPa]	modul pružnosti [GPa]	objemová hmotnost [kg/m ³]	průřezová plocha [mm ²]
Toreyca® 24K	1650	4900	230	1800	0,917

3.2.3 Čedičová výztuž

Pro účely všech experimentů byl použit čedičový roving od firmy Basaltex. Jedná se o nekonečný roving o délkové hmotnosti 2520 Tex a pevnosti v tahu 2000 MPa. Ostatní parametry viz Tab. 10.

Tab. 10 Specifikace použitého čedičového rovingu

typ výztuže	délková hmotnost 0°/90° [tex]	pevnost v tahu [MPa]	modul pružnosti [GPa]	objemová hmotnost [kg/m ³]	průřezová plocha [mm ²]
ROVING 2520 tex	2520	2600-2900	85-90	2660	0,947

3.3 Povrchová úprava textilií

Komerčně dostupná 2D textilní výztuž má povrchovou úpravu přímo z výroby a pro účely experimentu nebyla již nijak dále upravována.

Pro aplikace, kde je potřeba ručně vyráběných textilií, ať už z jakéhokoli materiálu, byl vyvinut speciální nátěr z dvousložkové nízko viskózní epoxidové pryskyřice Sikafloor®156 od firmy Sika., který chrání samotnou textilií a dává jí pevný tvar. Ideální je použití v případě vyztužování různě ohýbaných míst. Část A této pryskyřice je složena z: bisfenolu-A diglycidyl etheru (60 %), bisfenolu F epoxidu (1–10 %) a glycidyl etheru z alkoholů C12-C14 (1–10 %). Část B (tvrdidlo) se skládá z: benzylalkoholu (30–60 %), m-xylenu, a'-diaminu (10–30 %), cyclohexanemethanaminu (10–30 %) a z tetraethylen pentaminu (1–10 %).

Poměr míchání části A/B byl stanoven na 1/3. Epoxidová pryskyřice má pevnost v tahu 15,0 MPa, modul pružnosti 2,0 GPa a objemovou hmotnost 1100 kg/m³.

Tab. 11 Specifikace epoxidové pryskyřice

typ	objemová hmotnost [kg/m ³]	pevnost v tahu [MPa]	modul pružnosti [MPa]
Sikafloor®156	1100	15	2

4 Zkušební metody

Jak již bylo v této práci několikrát zmíněno, textilní betony jsou stále poměrně novým a dostatečně nevyzkoumaným tématem. Jelikož neexistují jednotné normy ani předepsané zkušební postupy, jsou následující zkušební metody z velké části pouze inspirované českými či zahraničními normami podobných druhů materiálů či prestižními publikacemi autorů, zabývající se tematikou textilních betonů. Některé zkušební postupy jsou na základě zkušeností navrženy samotným autorem.

4.1 Pevnost v tlaku

Zkouška pevnosti HPC v tlaku byla prováděna dle ČSN EN 12390-3 [153] minimálně po 28 dnech od betonáže na třech různých vzorcích dle [154]. Za prvé, na zlomcích z hranolů 40x40x160 mm, dále na zkušebních krychlích o hraně délky 100 mm a na krychlích o hraně délky 150 mm. Vzorky byly vloženy mezi tlačné desky lisu, který vyhovuje dle ČSN EN 12390-4 [155], výškou ve směru kolmém na směr lití betonu. Nastavilo se konstantní zatěžování 0,6±0,2 MPa/s a zatěžovalo se plynule až do porušení vzorku. Zaznamená se maximální zatěžovací síla při porušení vzorku a pevnost betonu v tlaku f_c se pak vypočte dle vzorce:

$$f_c = \frac{F_{\max}}{A_c} \quad (1)$$

- Kde: f_c je pevnost v tlaku [MPa],
 A_c tlačná plocha [mm²],
 F_{\max} maximální zatížení (síla) při porušení [N].

4.2 Pevnost HPC v tahu za ohybu

Zkouška pevnosti HPC v tahu ohybem byla prováděna dle ČSN EN 12390-5 [156] na betonových hranolech o rozměrech 40x40x160 mm zatížených jedním břemenem tj. tříbodovým ohybem. Zkušební tělesa byla umístěna centricky do zkušební lisu vyhovujícímu dle ČSN EN 12390-4 [155] tak, že tlačná plocha vzorku byla umístěna kolmo na směr lití betonové směsi. Tělesa byla vystavena tříbodovému zatížení, tj. ohybovému momentu od zatížení přenášeného prostřednictvím jednoho horního zatěžovacího válečku a dvou spodních podpěrných válečků. Zaznamená se maximální zatěžovací síla při porušení vzorku a pevnost betonu v tlaku f_c se pak vypočte dle vzorce:

$$f_{cf} = \frac{3 \cdot F_{max} \cdot l}{2 \cdot a \cdot b^2} \quad (2)$$

- Kde: f_{cf} je pevnost v tahu ohybem neboli napětí v ohybu [MPa],
 l vzdálenost mezi podporami [mm],
 a šířka vzorku [mm],
 b výška vzorku [mm],
 F_{max} maximální zatížení (síla) při porušení [N].

Zkouška pevnosti textilem vyztužených prvků byla zkoušena pomocí čtyřbodového ohybu na vzorcích tenkých desek. Pevnost v tahu ohybem f_{cf} se vypočte podle vzorce:

$$f_{cf} = \frac{F \cdot l}{b \cdot d^2} \quad (3)$$

- Kde: f_{cf} je pevnost v tahu ohybem neboli napětí v ohybu [MPa],
 l vzdálenost mezi podpěrnými válečky [mm],
 b šířka desky [mm],
 F maximální zatížení při porušení [N],
 d tloušťka desky [mm].

4.3 Statický modul pružnosti HPC v tlaku

Zkouška stanovení modulu pružnosti byla prováděna dle ČSN ISO 1920-10 [157] na hranolech o velikosti 100x100x400 mm. Horní zatěžovací napětí σ_a se určí jako třetina z aritmetického průměru pevností v tlaku, tedy jako $f_c/3$. Na zkušební těleso se osově osadí snímací zařízení a umístí se dostředně do zatěžovacího stroje. Při zahájení zkoušky se vyvodí základní napětí σ_b o velikosti 0,5 MPa, udržuje se po dobu 60 s a poté se odečtou a zaznamenají hodnoty na všech snímačích. Následně se napětí plynule zvyšuje konstantní rychlostí v rozmezí 0,2 – 0,6 MPa/s

do hodnoty $\sigma_a = f_c/3$. Napětí σ_a se udržuje 60 sekund a během následujících 30 sekund se odečtou hodnoty ze snímacích zařízení. Jestliže se jednotlivá přetvoření liší od své průměrné hodnoty o více než 20 %, musí se těleso v lisu vycentrovat znovu a celý předchozí postup se opakuje. Pokud se vzorek nepodaří vycentrovat, zkouška je neplatná. Po vycentrování se zkušební vzorek střídavě zatěžuje na horní hodnotu zatěžovacího napětí σ_a a odlehčuje na počáteční hodnotu σ_b (0,5 MPa) vždy s výdrží 60 sekund. Rychlost zatěžování a odlehčování je shodná a cyklus zatěžování se opakuje nejméně 2x. Po ukončení posledního předběžného zatěžovacího cyklu se vyčká 60 sekund při napětí σ_b a během následujících 30 sekund se zaznamenají hodnoty poměrného přetvoření ϵ_b . Zkušební těleso se znovu zatíží předepsanou rychlostí na hodnotu σ_a , udržuje se po dobu 60 s a během 30 sekund se zaznamenají hodnoty přetvoření ϵ_a .

Po dokončení všech měření se zatížení zkušebního tělesa zvyšuje předepsanou rychlostí až do porušení. Jestliže se pevnost v tlaku zkušebního tělesa liší od f_c o více než 20 %, je nutné tuto okolnost uvést do protokolu o zkoušce, kvůli snížené spolehlivosti výsledku.

Modul pružnosti E_c se vypočte podle vzorce:

$$E_c = \frac{(\sigma_a - \sigma_b)}{(\epsilon_a - \epsilon_b)} \quad (4)$$

- Kde: E_c je statický modul pružnosti v tlaku [MPa],
 σ_a horní zatěžovací napětí v [MPa],
 σ_b základní zatěžovací napětí v [MPa],
 ϵ_a poměrné přetvoření při horním zatěžovacím napětí,
 ϵ_b poměrné přetvoření při spodním zatěžovacím napětí.

4.4 Odolnost povrchu HPC proti působení vody a CHRL

Zkouška dlouhodobé odolnosti proti CHRL byla prováděna dle ČSN 73 1326-Z1 [123] pomocí automaticky programovatelného cyklovacího zařízení pro zmrazování a rozmrazování KD 20.5. Zkušební tělesa tvaru krychle o hraně délky 150 mm a hranoly 40x40x160 mm byly uloženy před samotným cyklováním 28 dní ve vodě o teplotě $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$. Jako rozmrazovací látka byl použit 3 % roztok chloridu sodného (NaCl). Vzorky byly uloženy v mrazícím zařízení do misek z nerezové oceli a zality roztokem NaCl tak, aby byl vzorek ponořen (5 ± 1) mm. Čidla pro měření teplot byla rovnoměrně rozmístěna v miskách se zkušebními tělesy dle předepsaných postupů. Vzorky jsou ochlazovány po dobu 45 minut z teploty $+20^\circ\text{C}$ na -15°C . Po dobu 15 minut je udržována konstantní teplota -15°C a po dobu 45 minut jsou vzorky opět ohřívány na teplotu $+20^\circ\text{C}$. Tím je dosažen jeden cyklus. Po každých 25 cyklech je zkouška přerušena. Vzorky s miskou jsou vyjmuty. Odpadlé částice v každé misce se po vysušení zvaží



s přesností 0,1g. Po každém 25. cyklu se tedy zváží odpad v misce, vzorky se ponoří do nového roztoku NaCl a postup se opakuje. Zkouška se ukončí po předepsaném počtu cyklů normou nebo po dosažení max. povolené velikosti ρ_a dle tab. 1[123].

Odolnost povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek je dána hmotností odpadu na jednotku plochy dle vzorce:

$$\rho_a = \frac{\Sigma m}{A} \quad (5)$$

- Kde: ρ_a je odolnost povrchu cementového betonu [$\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$],
 Σm součet všech hmotnostních odpadů [g],
A velikost zkušební plochy smáčeného roztokem, včetně smáčené plochy po obvodu tělesa [m^2].

4.5 Mikroskopická analýza

Pro mikroskopickou prvkovou analýzu byl použit rastrovací elektronový mikroskop SEM Thermo Scientific™ Phenom XL s vysokým rozlišením až 14 nm a zvětšením až 100 000, který je umístěn v Laboratoři skenovací elektronové mikroskopie SEM na Fakultě stavební, ČVUT v Praze. Mikroskop je vybaven čtyř segmentovým detektorem zpětně odražených elektronů (BSD), který poskytuje ostré obrazy, dále plně integrovaná energie Dispersive Spektroskopie (EDS) pro elementární analýzu a detektorem sekundárních elektronů (SED), který umožňuje citlivé zobrazení povrchu a poskytuje informace o chemickém kontrastu. Zařízení umožňuje zobrazení vzorků o velikosti 100x100x65 mm.

Snímky byly prováděny detektorem sekundárních elektronů (SED) a detektorem zpětně odražených elektronů (BDS). Vzorky byly přilepeny pomocí vodivé uhlíkové pásky a pozorovány s potahem tenké vrstvy platiny z důvodu lepší vodivosti.

4.6 Stanovení vývoje teplot během hydratace HPC

Stanovení vývoje teploty betonu během hydratace bylo měřeno v Kloknerově ústavu dle jejich interního postupu KÚ č.01/EXPO/15. Zkušební vzorek byl betonován přímo v laboratořích Kloknerova ústavu. Měření teplot v betonu probíhalo do ustálení teplot (cca 11 dní po betonáži).

Předmětem zkoušky bylo zjistit nejvyšší dosaženou teplotu vlivem hydratace cementu. Měření bylo prováděno na směsi vysokohodnotného betonu HPC1 (v protokolu značené jako HPC124) pomocí odporových teplotních čidel Pt1000. Teplotní snímače byly připojeny k měřicí ústředně Commet S0141. a teploty byly odečítány kontinuálně každých 5 min. Rozšířená

nejistota měření teploty je $\pm 0,5$ °C. Pro zkoušky byla použita krychle o hraně 300 mm, vybetonována do formy z voděvzdorné překližky tloušťky 20 mm, která byla odizolována od okolního prostředí ze všech stran polystyrenem o tl. 100 mm. Vnější stěnu formy tvořila opět voděvzdorná překližka tloušťky 20 mm. Do středu tělesa bylo umístěno čidlo pro záznam teploty betonu, další snímač zaznamenával teplotu okolního prostředí. Vyhodnocení výsledků je ve formě grafu.

4.7 Zrychlená zkouška karbonatace HPC

Zrychlená zkouška karbonatace byla provedena dle ČSN EN 13295 [158] v Kloknerově ústavu ČVUT v Praze. Byly vyrobeny vzorky zkoušeného betonu o velikosti 40x40x160 mm a stejně velké vzorky z referenčního běžného betonu dle ČSN EN 1766 C (0,45), které byly po 24h odformovány a uloženy v normálních laboratorních podmínkách. Po 28 dnech od betonáže byly vzorky uloženy na břitové podpory do hermetické komory s regulací vlhkosti a byly vystaveny atmosféře obsahující 1 % CO₂ při teplotě (21±2) °C a při relativní vlhkosti RH (60±10) %. Při koncentraci 1% CO₂ ve vzduchu vznikají stejné reakční produkty s hydratovaným cementem jako při normální atmosféře s koncentrací 0,03 %. Relativní vlhkost (60±10)% zvyšuje rychlost karbonatace [158].

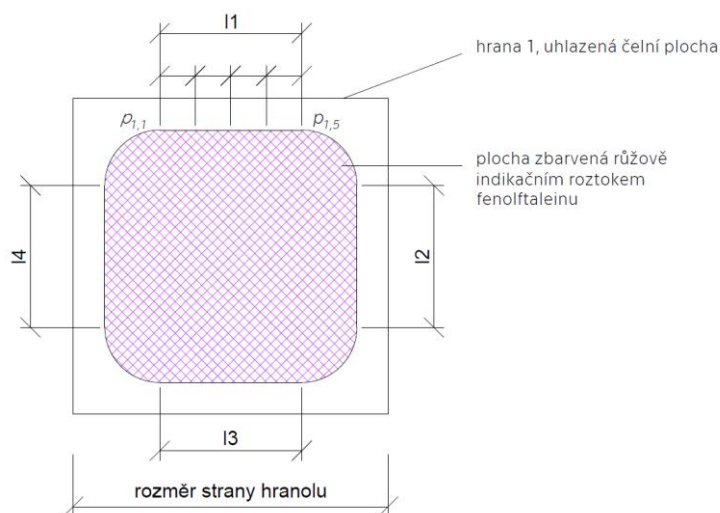
Po skončení urychleného testu se vzorky rozlomí a lomové plochy se natrou indikačním roztokem namíchaným z 1g fenolftaleinu v 70 ml etanolu a 30 ml destilované vody. Fenolftaleinový test funguje na principu změny barvy indikátoru v závislosti na pH betonu. Indikační roztok se nechá hodinu zaschnout a poté se změří hloubka karbonatace. Pokud se beton nezbarví vlivem indikačního roztoku, znamená to, že došlo k zreagování Ca (OH)₂ a můžeme ho považovat za zkarbonatovaný. Pokud se vzorek zabarví do růžovofialové barvy, beton zkarbonatovaný není. Hloubka karbonatace se měří jak u zkušebního tělesa, tak i u kontrolního tělesa po ukončení uložení v laboratorních podmínkách, tj. před zatížením CO₂ a po 56 dnech uložení v hermetické komoře s CO₂. U každého povrchu se délka zkarbonatované plochy (I1-I4) rozdělí na čtyři stejné díly ohraničené pěti body (p_{1,1-5}) dle obr. 39. V každém bodě se pak měří hloubka karbonatace pravítkem nebo posuvným měřítkem s přesností 0,1 mm. Výsledná karbonatace dané strany se vypočte se zaokrouhlením na 0,5 mm dle vzorce:

$$d_{k,1} = \frac{\sum(p_{1,1-5})}{5} \quad (6)$$

Kde: $d_{k,1}$ je hodnota zkarbonatované vrstvy strany I1 [mm],
 $p_{1,1-5}$ hodnota naměřená v jednotlivých bodech [mm]

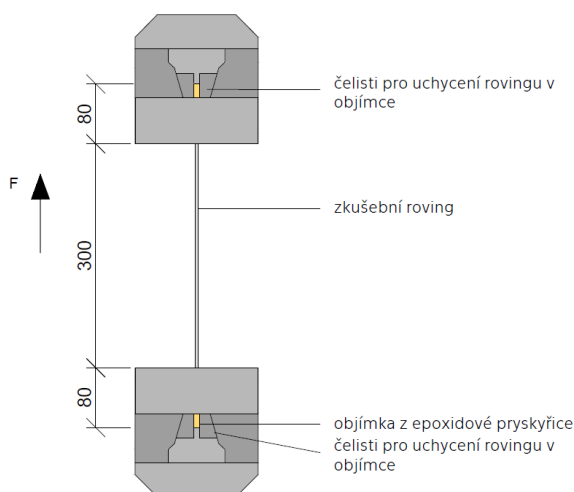
Výsledná karbonatace celého vzorku je pak průměr ze čtyř hodnot $d_{k,1-4}$.



Obr. 39 Stanovení hloubky karbonatace pro $l \geq 30$ mm [158]

4.8 Tahová zkouška rovingů

Tahová pevnost rovingů byla stanovena jednoosou tahovou zkouškou za pomoci zkušebního lisu LabTest 4.100SP1 se sběrníci dat dle nové vylepšené zkušební metody Rypla a kol. [159], která vychází z americké normy ACI 440.3R-04 [160]. Tato metoda optimalizuje systém ukotvení vzorků a eliminuje tak možnost předčasného poškození rovingu vlivem nestejněmého zavedení zátěže a zlepšuje koncentraci napětí. Zkušební rovingy délky 460 mm byly na obou koncích opatřeny roznášecími objímkami z epoxidové pryskyřice o rozměru 8x8x80 mm, za které byl vzorek uchopen do zkušebního zařízení [161]. Zkušební délka rovingů mezi objímkami tedy byla 300 mm. Následně byl vzorek zatěžován konstantní rychlostí 2 mm/min až do přetržení rovingu. Výsledkem je graf závislosti síly na posunu příčnicku. V případě přesnějších výsledků se na vzorky umístí potenciometr, který měří deformaci během zatěžování. Možným a nejpřesnějším výsledkem je pak přepočítaná závislost napětí na přetvoření a odpovídající modul pružnosti. Pro tuto práci však byla nejdůležitějším parametrem maximální dosažená síla, která se dále porovnávala s dalšími vzorky, proto byly všechny vzorky zkoušeny bez potenciometru pouze se záznamem posunu a síly.



Obr. 40 Schéma tahové zkoušky rovingů

4.9 Mrazuvzdornost

4.9.1 Mrazuvzdornost HPC

Zkouška mrazuvzdornosti HPC byla provedena dle ČSN 73 1322-Z1 [117] pomocí automaticky programovatelného cyklovacího zařízení pro zmrazování a rozmrazování KD 20.5. Podstata zkoušky spočívá ve zmrazování a rozmrazování vodou nasycených zkušebních hranolů na požadovaný počet cyklů. Ke zkoušce je možné použít tělesa, která dosáhla zrání 28 dnů. Zkušební tělesa s portlandským cementem byla dle normy před zkouškou uložena 25 dní ve vlhkém prostředí a 3 dny ve vodě.

Zmrazování a rozmrazování zkušebních těles se koná ve zmrazovacích cyklech, při kterých musí být teplota mrazicího prostředí v rozmezí $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ pro betony vystavené mrazu do $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a v rozmezí $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$ pro betony vystavené mrazu pod $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Jeden zmrazovací cyklus se skládá ze 4 hodin zmrazování a 2 hodin rozmrazování. Při zmrazování se zkušební tělesa ukládají do prostoru, který musí mít předem požadovanou teplotu, při rozmrazování se zkušební tělesa ukládají do vody $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ teplé. Po ukončení každé zmrazovací etapy, tj. 25 po cyklech se vzorky povrchově osušily a byly změřeny rozměry, hmotnost a objemová hmotnost. Následně byla provedena deformační zkouška pevnosti v tahu za ohybu dle [156] a pevnosti v tlaku na zlomcích hranolů dle [153]. Pro každou etapu tj. 25 cyklů byly vyrobeny 3 vzorky hranolů. Další 3 vzorky byly odzkoušeny na začátku zkoušky bez zatížení mrazem jako referenční hodnota a 3 vzorky byly zkoušeny po skončení cyklování též bez zatížení mrazem. K ověření byla vyrobena tělesa krychlí o hraně délky 150 mm, která byla zkoušena před samotnou zkouškou a po konečných 400 cyklech. Výsledkem zkoušky jsou pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku po jednotlivých zmrazovacích cyklech.

4.9.2 Mrazuvzdornost TRC

Mrazuvzdornost TRC byla zkoušena na základě klasické zkoušky mrazuvzdornosti dle ČSN 73 1322 –Z1 [117] pomocí automaticky programovatelného cyklovacího zařízení pro zmrazování a rozmrazování KD 20.5. Zkušební postup byl obdobný jako v odstavci 4.9.1. Velikost vzorků byla navržena speciálně pro tento druh experimentu tak, aby bylo možno zkoušet pevnost v tahu za ohybu na zkušebním zařízení LabTest 4.100SP1 a to na 18x100x360 mm. Z důvodu velkých rozměrů vzorků a jejich počtu bylo navrženo zkoušení vždy na třech vzorcích po každých 100 cyklech až do 800 cyklů. Po každé etapě tj. 100 cyklech byla měřena pevnost v tahu za ohybu pomocí čtyřbodového ohybu. Další 3 vzorky byly odzkoušeny na začátku zkoušky bez zatížení mrazem jako referenční hodnota a 3 vzorky byly zkoušeny po skončení cyklování též bez zatížení mrazem. Vzorky byly vyztuženy 3D skleněnou výztuží, která byla umístěna ve středu vzorku.

5 Experimentální výzkum

Experimentální část této disertační práce se zabývá stanovením základních mechanických parametrů používaných materiálů pro TRC tj. vysokohodnotného betonu a výztuží ze skla, uhlíku a čediče. Ze základních mechanických parametrů byla zkoumána pevnost betonu v tlaku, v tahu za ohybu, modul pružnosti a tahová pevnost výztuží. Výzkum byl dále soustředěn na experimenty ověřující trvanlivost TRC. Ze zkoušek trvanlivosti byla zkoumána mrazuvzdornost betonu i TRC, urychlená karbonatace betonu, vývoj hydratačního tepla, odolnost povrchu vůči agresivním rozmrazovacím látkám a zejména pak odolnost výztuží vůči alkalickému prostředí

5.1 Mechanické parametry vysokohodnotného betonu

Z hlediska komplexní analýzy a navrhování je nutno provést nejprve základní výzkum používaných materiálů a ověření jejich mechanických vlastností. Základními parametry, které je nutno znát při návrhu všech prvků z TRC je pevnost betonu v tlaku, tahu za ohybu a modul pružnosti. Při každém novém experimentu je pak nutno tyto vlastnosti ověřit na doprovodných tělesech.

5.1.1 Pevnost v tlaku

V grafu (Obr. 41) jsou znázorněny naměřené hodnoty pevností v tlaku používaného druhu vysokohodnotného betonu na vzorcích krychlí o hraně délky 100 mm a na zlomcích z hranolů 40 x 40 x 160 mm po 28 dnech stáří. Průměrná hodnota krychelné pevnosti směsi HPC1 je 128,3 MPa a průměrná hodnota naměřená na zlomcích hranolů je 139,6 MPa.

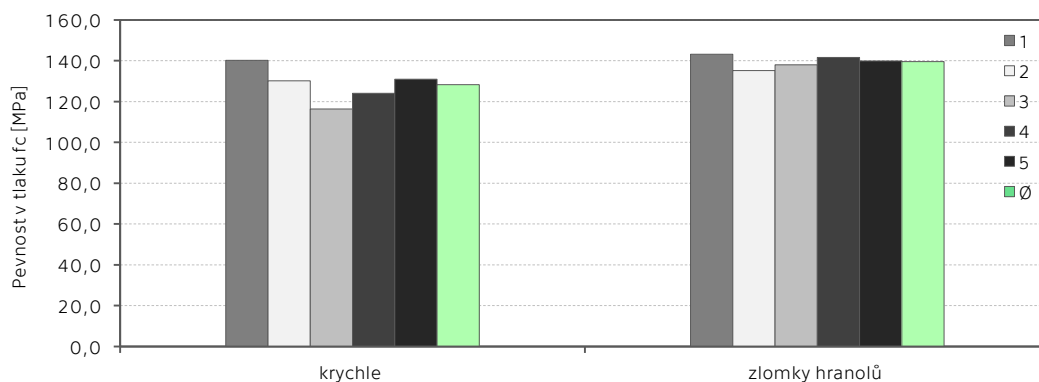


Tab. 12 Výsledky zkoušky pevnosti v tlaku na vzorcích krychlí o hraně délky 100 mm

Vzor.	m	a	b	h	V	ρ	A_c	F_{max}	f_{ck}
	[kg]	[mm]	[mm]	[mm]	[m ³]	[kg/m ³]	[mm ²]	[kN]	[MPa]
1	2,435	100,0	100,0	99,9	0,00100	2437	9990	1401	140,2
2	2,395	100,0	100,0	101,4	0,00101	2362	10140	1319	130,1
3	2,421	100,0	100,0	101,2	0,00101	2392	10120	1178	116,4
4	2,394	100,0	100,0	101,1	0,00101	2368	10110	1254	124,0
5	2,433	100,0	100,0	101,3	0,00101	2402	10130	1326	130,9
Ø	2,416	100,0	100,0	101,0	0,00101	2392	10098	1296	128,3

Tab. 13 Výsledky zkoušky pevnosti v tlaku na zlomcích hranolů

Vzor.	m	d ₁	d ₂	l	V	ρ	A_c	F_{max}	Ø F_{max}	f_c	
	[kg]	[mm]	[mm]	[mm]	[m ³]	[kg/m ³]	[mm ²]	L [kN]	P [kN]	[kN]	[MPa]
T1	0,594	40,0	39,9	160,0	0,00026	2325	1596	226,0	231,0	228,5	143,2
T2	0,601	40,0	40,3	160,0	0,00026	2330	1612	212,0	224,0	218,0	135,2
T3	0,608	40,0	40,5	160,0	0,00026	2346	1620	219,0	228,0	223,5	138,0
T4	0,600	40,0	40,1	160,0	0,00026	2338	1604	223,0	231,0	227,0	141,5
T5	0,599	40,0	40,2	160,0	0,00026	2328	1608	217,0	233,0	225,0	139,9
Ø	0,600	40,0	40,2	160,0	0,00026	2334	1608	-	-	224,4	139,6



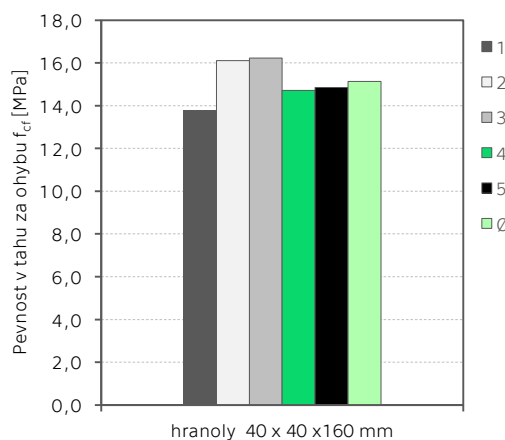
Obr. 41 Pevnost HPC1 v tlaku

5.1.2 Pevnost v tahu za ohybu

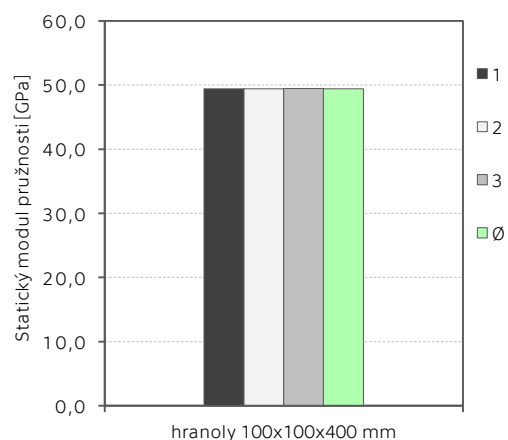
Pevnost v tahu za ohybu byla měřena pomocí tříbodového ohybu na vzorcích hranolů o velikosti 40 x 40 x 160 mm 28 dní od betonáže. Průměrná hodnota pevnosti v tahu za ohybu směsi HPC1 byla naměřena 15,1 MPa.

Tab. 14 Výsledky zkoušky pevnosti v tahu za ohybu tříbodovým ohybem

Vzor.	m	d ₁	d ₂	l	V	ρ	F	f _{cf}
	[kg]	[mm]	[mm]	[mm]	[m ³]	[kg·m ⁻³]	[kN]	[MPa]
1	0,593	40,0	40,1	160,0	0,00026	2311	5,89	13,8
2	0,601	40,0	40,2	160,0	0,00026	2336	6,91	16,1
3	0,608	40,0	40,5	160,0	0,00026	2346	7,01	16,2
4	0,601	40,0	40,0	160,0	0,00026	2348	6,28	14,7
5	0,599	40,0	39,9	160,0	0,00026	2346	6,32	14,8
∅	0,600	40,0	40,1	160,0	0,00026	2337	6,48	15,1



Obr. 42 Pevnost v tahu za ohybu směsi HPC1



Obr. 43 Modul pružnosti směsi HPC1 v tlaku

5.1.3 Modul pružnosti

Modul pružnosti HPC1 v tlaku byl spočítán z naměřených hodnot napětí a relativních deformací. Zkouška byla prováděna na vzorcích hranolů o rozměrech 100x100x400 mm po 28 dnech od betonáže. Z následujícího grafu je patrné, že modul pružnosti nabývá konstantních hodnot kolem 49,4 GPa.

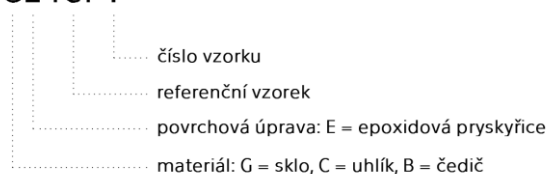
5.2 Mechanické parametry technických výztuží

5.2.1 Tahová pevnost rovingů

Tahová pevnost rovingů byla stanovena jednoosou tahovou zkouškou. Zkušební rovingy byly na obou koncích opatřeny roznášecími objímkami z epoxidové pryskyřice. Zkoušeny byly jak čisté rovingy bez povrchové úpravy, tak rovingy opatřené nátěrem z epoxidové pryskyřice. Zatěžování probíhalo konstantní rychlostí 2 mm/min až do přetržení vzorku. Vstupní

parametry jsou uvedeny v tabulkách 15-20. Výsledkem je graf závislosti síly na posunu příčnicku a maximální síla a napětí při přetržení vzorku. Značení vzorků je podle anglických názvů glass, carbon a basalt, viz legenda značení:

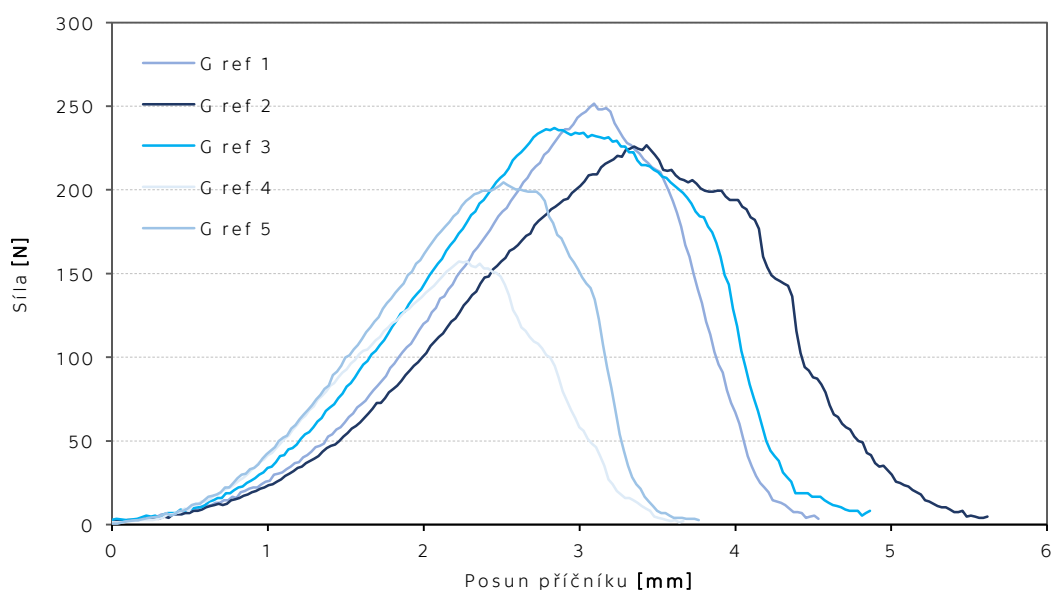
GE ref 1



Sklo

Tab. 15 Vstupní charakteristiky a výsledky tahové zkoušky skleněných rovingů bez povrchové úpravy

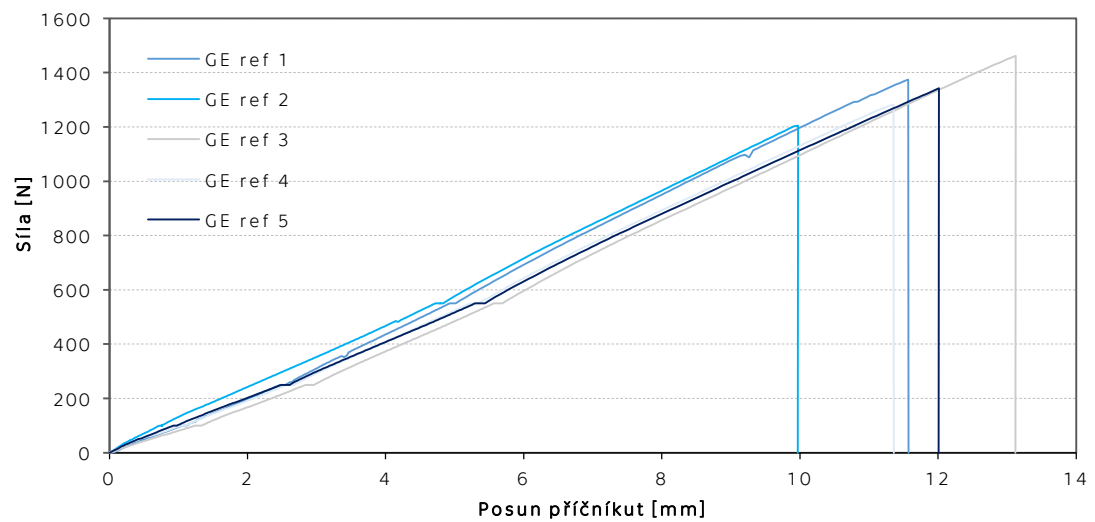
Vzor.	T_r	ρ_r	A_r	F_{max}	f_t
	[tex]	[Kg/m ³]	[mm ²]	[N]	[MPa]
G ref 1	2400	2680	0,8955	237	265
G ref 2	2400	2680	0,8955	252	280
G ref 3	2400	2680	0,8955	227	253
G ref 4	2400	2680	0,8955	157	176
G ref 5	2400	2680	0,8955	204	228
Ø	2400	2680	0,8955	215	240



Obr. 44 Graf závislosti síly na posunu příčnicku skleněných rovingů bez povrchové úpravy

Tab. 16 Vstupní charakteristiky a výsledky tahové zkoušky skleněných rovingů s povrchovou úpravou z epoxidové pryskyřice

Vzor.	T_r [tex]	ρ_r [Kg/m ³]	A_r [mm ²]	F_{max} [N]	f_t [MPa]
GE ref 1	2400	2680	0,8955	1374	1534
GE ref 2	2400	2680	0,8955	1205	1346
GE ref 3	2400	2680	0,8955	1462	1633
GE ref 4	2400	2680	0,8955	1283	1433
GE ref 5	2400	2680	0,8955	1342	1499
Ø	2400	2680	0,8955	1333	1489



Obr. 45 Graf závislosti síly na posunu příčnicku



Obr. 46 Zkušební vzorek upnutý v trhačím zařízení těsně před zatěžováním

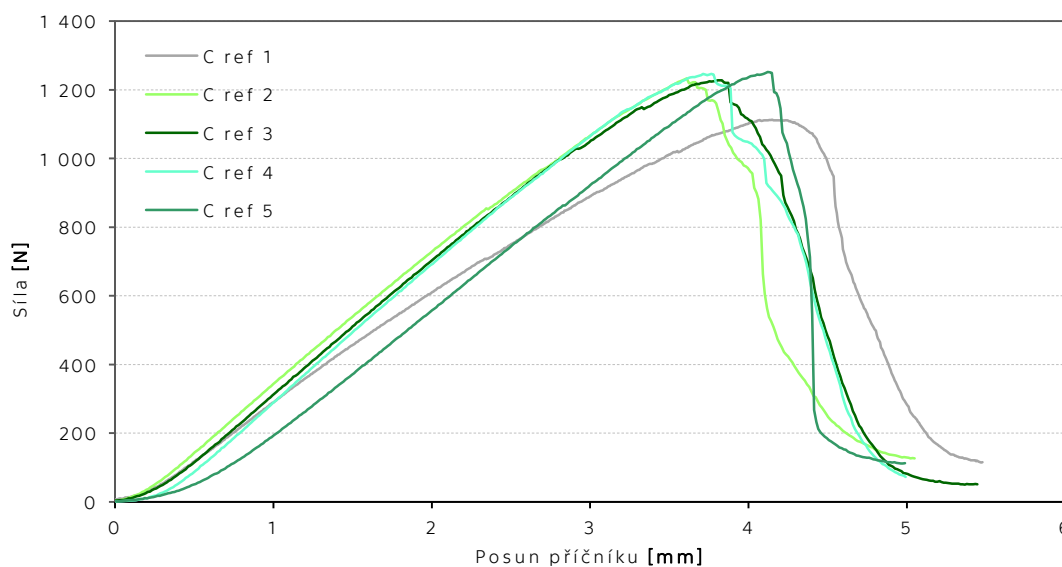


Obr. 47 Zkušební vzorek skleněného rovingu bez povrchové úpravy (G ref) po přetržení

Uhlík

Tab. 17 Vstupní charakteristiky a výsledky tahové zkoušky uhlíkových rovingů bez povrchové úpravy

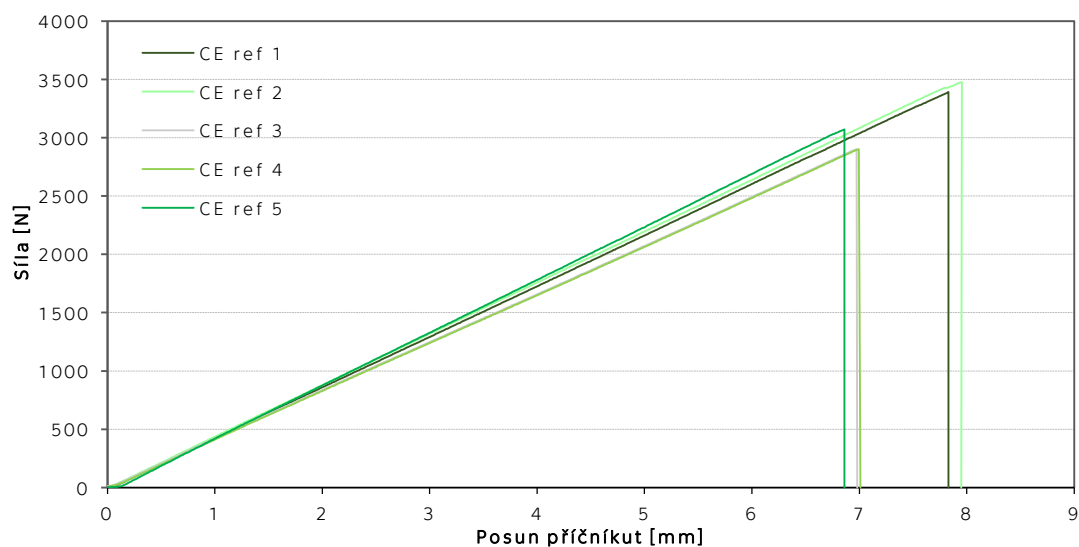
Vzor.	T_r	ρ_r	A_r	F_{max}	f_t
	[tex]	[Kg/m ³]	[mm ²]	[N]	[MPa]
C ref 1	1650	1800	0,9167	1113	1214
C ref 2	1650	1800	0,9167	1233	1345
C ref 3	1650	1800	0,9167	1228	1340
C ref 4	1650	1800	0,9167	1246	1359
C ref 5	1650	1800	0,9167	1252	1365
Ø	1650	1800	0,9167	1214	1325



Obr. 48 Graf závislosti síly na posunu příčnicku uhlíkových rovingů bez povrchové úpravy

Tab. 18 Vstupní charakteristiky a výsledky tahové zkoušky uhlíkových rovingů s povrchovou úpravou z epoxidové pryskyřice

Vzor.	T_r	ρ_r	A_r	F_{max}	f_t
	[tex]	[Kg/m ³]	[mm ²]	[N]	[MPa]
CE ref 1	1650	1800	0,9167	3392	3700
CE ref 2	1650	1800	0,9167	3474	3790
CE ref 3	1650	1800	0,9167	2902	3166
CE ref 4	1650	1800	0,9167	3142	3428
CE ref 5	1650	1800	0,9167	3072	3351
Ø	1650	1800	0,9167	3196	3487

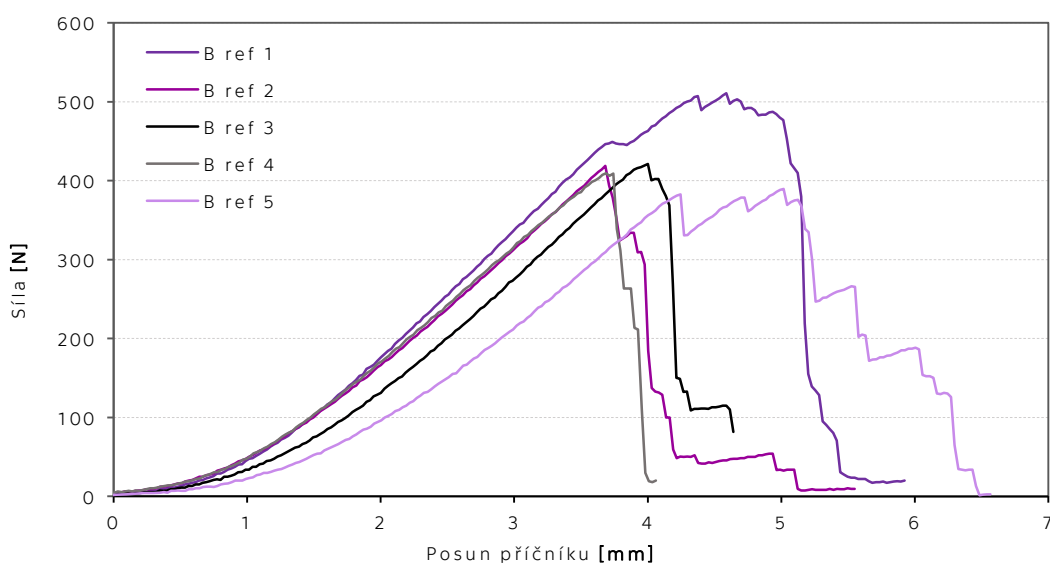


Obr. 49 Graf závislosti síly na posunu příčnicku

Čedič

Tab. 19 Vstupní charakteristiky a výsledky tahové zkoušky čedičových rovingů bez povrchové úpravy

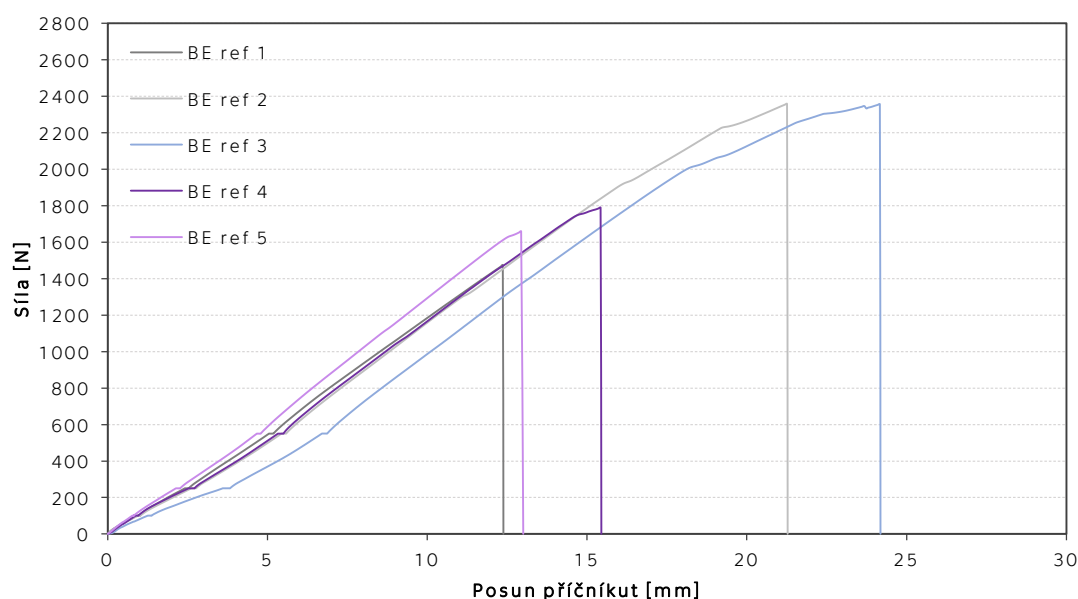
Vzor.	T_r [tex]	ρ_r [Kg/m ³]	A_r [mm ²]	F_{max} [N]	f_t [MPa]
B ref 1	2520	2660	0,9474	511	539
B ref 2	2520	2660	0,9474	419	442
B ref 3	2520	2660	0,9474	421	445
B ref 4	2520	2660	0,9474	410	432
B ref 5	2520	2660	0,9474	389	411
∅	2520	2660	0,9474	470	454



Obr. 50 Graf závislosti síly na posunu příčnicku

Tab. 20 Vstupní charakteristiky a výsledky tahové zkoušky čedičových rovingů s povrchovou úpravou z epoxidové pryskyřice

Vzor.	T_r [tex]	ρ_r [Kg/m ³]	A_r [mm ²]	F_{max} [N]	f_t [MPa]
BE ref 1	2520	2660	0,9474	2337	2476
BE ref 2	2520	2660	0,9474	2358	2498
BE ref 3	2520	2660	0,9474	2355	2495
BE ref 4	2520	2660	0,9474	1789	1896
BE ref 5	2520	2660	0,9474	1659	1758
Ø	2520	2660	0,9474	2100	2225



Obr. 51 Graf závislosti síly na posunu příčnicku

Závěr

Z uvedených výsledků je patrné, že zkoušení pevnosti v tahu je efektivnější za pomoci nátěru z epoxidové pryskyřice. Samotná pryskyřice nemá na tahovou pevnost téměř žádný vliv, ale jejím nátěrem dojde k homogenizování vláken a pevnost rovingu se pak více přibližuje teoretické pevnosti uvedené v technickém listu. U vláken bez povrchové úpravy dochází k postupnému praskání jednotlivých vláken. Výsledky jsou také velmi závislé na stavu vláken před samotným zatěžováním. Jakoukoli manipulací jsou ovlivněny konečné výsledky, neboť vlákna jsou sama o sobě velmi křehká a mají tendenci se lámat. Nicméně během dalších experimentů jsou používány oba přístupy.

Z uvedených vláken má největší pevnost v tahu uhlík. Oproti sklu má asi o 50-60 % větší pevnost a oproti čediči asi o 30-40 % větší pevnost.

5.3 Dlouhodobá zkouška mrazuvzdornosti vysokohodnotného betonu

Zkouška mrazuvzdornosti je jednou ze základních metod ověřování trvanlivosti určitého materiálu. Vyjadřuje jeho odolnost vůči výraznému střídání teplot v dlouhodobém časovém horizontu. Zkouška dle ČSN 73 1322 –Z1 [122] je nejběžnější používanou zkouškou, která je však poměrně náročná, jak z hlediska časového, tak z hlediska ekonomického. U běžných betonů máme pro srovnání i hodnoty ověřené praxí. Zkoušky, resp. počet cyklů je také nastaven pro tyto druhy betonů. U vysokohodnotných či ultra vysokohodnotných betonů zatím toto ověření praxí nemáme. Zkoušení podle norem nám sice ukáže, že materiál vyhoví podmínkám na daný počet cyklů, ale předpoklad je, že tento materiál by měl odolávat několikanásobně déle. Na toto téma není mnoho studií ani v zahraničí. Navíc kvalita každé směsi je výrazně ovlivněna použitými surovinami. Pro směs HPC1 jsou používány lokální zdroje z České republiky. Z těchto důvodů byl tento experiment mírně rozšířen. Cílem bylo stanovit mrazuvzdornost směsi HPC1 v extrémně dlouhém časovém horizontu nad rámec normy, abychom získali představu o chování tohoto materiálu z opravdu dlouhodobého hlediska.

Základem zkoušky byl postup dle ČSN 73 1322-Z1 [122], avšak počet cyklů byl stanoven buď do porušení vzorků, nebo do 400 cyklů. Zkouška probíhala na vzorcích hranolů 40x40x160 mm, které byly po každých 25 cyklech zkoušeny deformační zkouškou pevnosti v tlaku a v tahu za ohybu. Pro každou etapu tj. 25 cyklů byly vyrobeny 3 vzorky. Další 3 vzorky byly odzkoušeny na začátku zkoušky bez zatížení mrazem jako referenční hodnota a 3 vzorky byly zkoušeny po skončení cyklování též bez zatížení mrazem. Jako doplňující, byly vyrobeny 3 krychle o hraně délky 100 mm, které byly zkušeny na začátku jako referenční hodnota. A po celkových 400 cyklech.

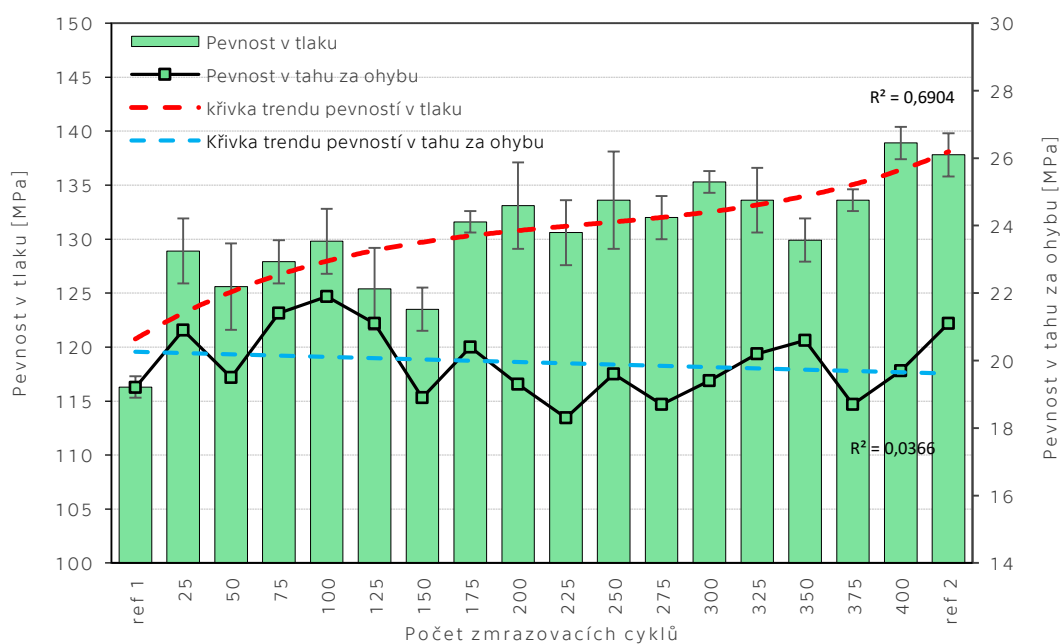
Na obr. 52 je uveden graf znázorňující průběžná měření pevnosti v tlaku a v tahu ohybem na vzorcích hranolů. Je patrné, že vlivem zmrazovacích cyklů nedochází ani po 400 cyklech k žádnému zhoršení tlakové pevnosti betonu. Naopak z grafu je vidět mírný nárůst pevnosti ještě po 400 cyklech, což je pravděpodobně dáno neukončeným hydratačním procesem. Průměrný nárůst tlakové pevnosti HPC1 do 400 cyklů je zhruba o 12 %. Hodnoty pevnosti v tahu za ohybu však stoupající trend nemají, navíc mají velký rozptyl. Na počátku je vidět mírný nárůst pevnosti jako u pevnosti v tlaku a od 125. cyklu pevnost mírně klesá až do 275. cyklu, kdy pak opět mírně roste. I přes velký rozptyl výsledků by se dalo konstatovat, že nedochází k výraznému poklesu hodnoty pevnosti v tahu za ohybu ani po 400 cyklech, a to je důležité. Pevnost doprovodných vzorků krychlí je po 400 zmrazovacích cyklech v porovnání s referenční hodnotou asi o 9 % větší. Během zkoušky byly opticky kontrolovány odpady. Na žádných vzorcích nebyl zjištěn viditelně větší odpad.

Závěr

Z prezentovaných výsledků můžeme říci, že ani 400 zmrazovacími cykly nedochází k výraznému zhoršení mechanických parametrů vysokohodnotného betonu HPC1. V případě použití této směsi pro TRC fasádní panely, které jsou zmrazováním a rozmrazováním značně vystaveny, můžeme předpokládat dobrou odolnost vůči tomuto nesilovému zatížení.

Tab. 21 Výsledky deformačních zkoušek po jednotlivých zmrazovacích cyklech

počet cyklů	$f_{cf, 40}$ [MPa]	$f_{c, 40}$ [MPa]	$f_{c, 100}$ [MPa]
ref 1	19,2	116,3	127,6
25	20,9	128,9	
50	19,5	125,6	
75	21,4	127,9	
100	21,9	129,8	
125	21,1	125,4	
150	18,9	123,5	
175	20,4	131,6	
200	19,3	133,1	
225	18,3	130,6	
250	19,6	133,6	
275	18,7	132,0	
300	19,4	135,3	
325	20,2	133,6	
350	20,6	129,9	
375	18,7	133,6	
400	19,7	138,9	138,7
ref2	21,1	137,8	

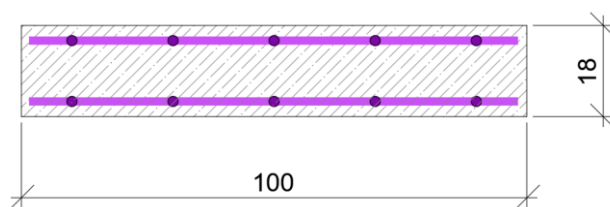


Obr. 52 Pevnost vzorků hranolů 40x40x160 mm po jednotlivých zmrazovacích cyklech

5.4 Dlouhodobá zkouška mrazuvzdornosti TRC

Předešlá zkouška se zabývala mrazuvzdorností samotného používaného vysokohodnotného betonu. TRC se však nejčastěji používá v podobě velmi tenkých prvků, které mají v sobě jednu nebo několik vrstev textilní výztuže. Krytí vláken umístěných v hlavním směru namáhání je tak pouze několik milimetrů. Proto byl navržen experiment, který má za úkol ověřit odolnost těchto velmi tenkých prvků z TRC vůči výraznému střídání teplot.

Jako podklad byla použita norma ČSN 73 1322 – Z1 [122] pro klasickou zkoušku mrazuvzdornosti. Velikost vzorků byla navržena 18x100x360 mm speciálně pro tento druh experimentu tak, aby bylo možno zkoušet pevnost v tahu za ohybu na zkušebním zařízení LabTest 4.100SP1. Z důvodu velkého počtu vzorků a poměrně velkých rozměrů vůči rozměrům automatického cyklovacího zařízení bylo navrženo zkoušení vždy pouze na třech vzorcích po každých 100 cyklech až do 800 cyklů. Po každé etapě tj. 100 cyklech byla měřena pevnost v tahu za ohybu pomocí čtyřbodového ohybu. Další 3 vzorky byly odzkoušeny na začátku zkoušky bez zatížení mrazem jako referenční hodnota a 3 vzorky byly ponechány ve vodě a zkoušeny po skončení cyklování též bez zatížení mrazem. Vzorky byly vyztuženy 3D skleněnou výztuží umístěnou ve středu vzorku, viz. obr. 53. Skleněná výztuž byla vybrána kvůli největším předpokladům k degradaci, což bylo také ověřeno dalšími experimenty.



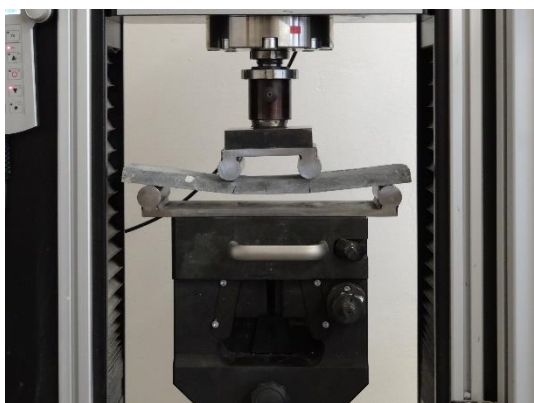
Obr. 53 Příčný řez zkušebním vzorkem

Výsledky deformačních zkoušek pro každou etapu se někdy značně liší. To je dáno způsobem betonáže, kdy je obtížné zachovat identickou polohu 3D výztuže ve vzorku. Velký vliv hraje i samotný roving, jeho soudržnost s betonem a zapojení jednotlivých vláken při zatěžování. Z tohoto důvodu jsou v grafech uváděny všechny tři nezprůměrované výsledky. Na obrázcích 54 a 55 je zachycen proces zatěžování vzorků a porušené vzorky po odlehčení (po 700 zmrazovacích cyklech).

Na obr. 56 je graf znázorňující průběh zatěžování tenkých desek čtyřbodovým ohybem. Graf znázorňuje závislost síly na posunu příčnicku. Z důvodu přehlednosti ve velkém množství vzorků jsou v grafu uvedeny průběhy zatěžování vzorků po každých 200 cyklech. Všechny výsledky jsou pak porovnány ve sloupcovém grafu na obr. 58.

Z grafu na obr. 56 je patrný mírný klesající trend maximální síly. Z detailu A, který je znázorněn v grafu na obr. 57 je dobře vidět průběh zatěžování do první a druhé trhliny, která značí porušení betonu většinou pod jednou a druhou podporou. Další skoky v grafu znázorňují již porušení samotné výztuže až do jejího kolapsu. Pevnost betonu u vzorků nezatížených zmrazovacími cykly (ref 2) je ztelně vyšší, což značí nárůst pevnosti do první trhliny.

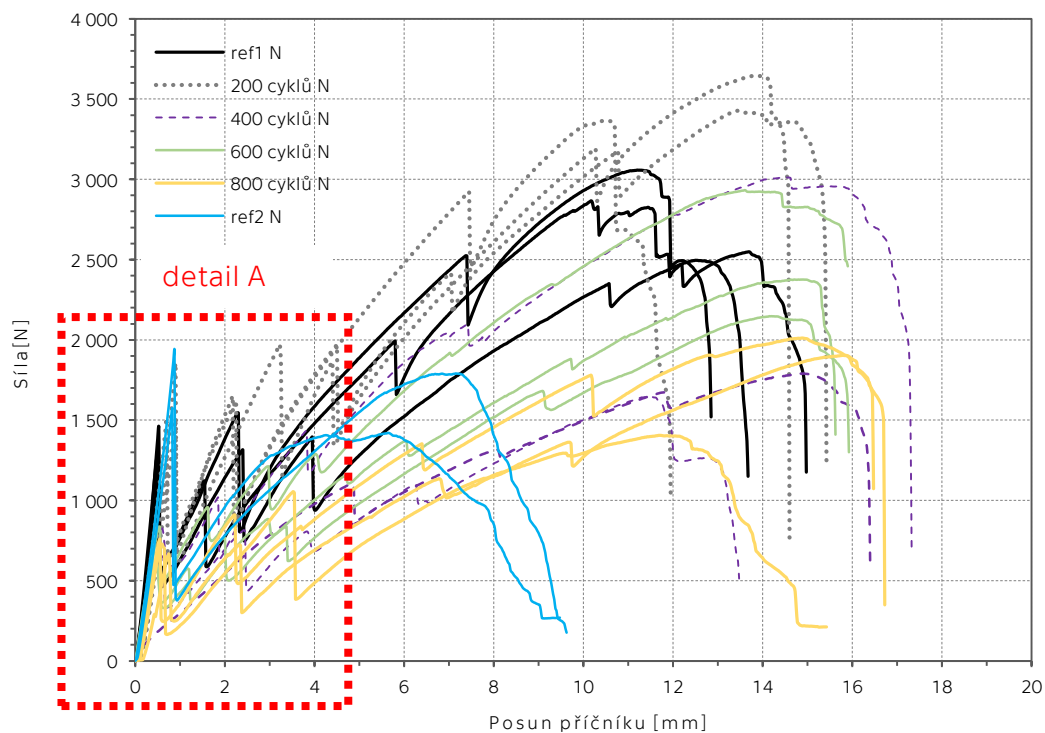
Na grafu v obr. 58 je shrnut průběh celého experimentu. Výsledky zatěžovacích sil jsou přepočítány na hodnoty napětí. V grafu jsou znázorněny jak maximální hodnoty napětí ($f_{cf, max}$), tak hodnoty napětí při první trhlině v betonu ($f_{cf, first crack}$).



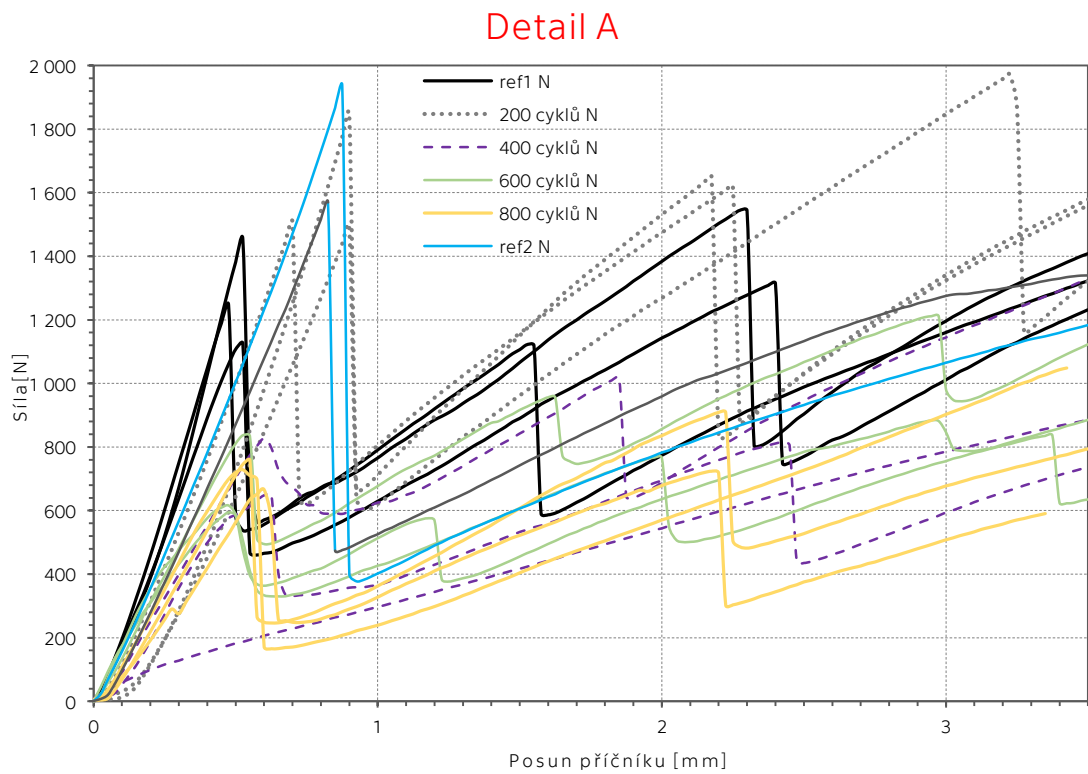
Obr. 54 Průběh zatěžování čtyřbodovým ohybem



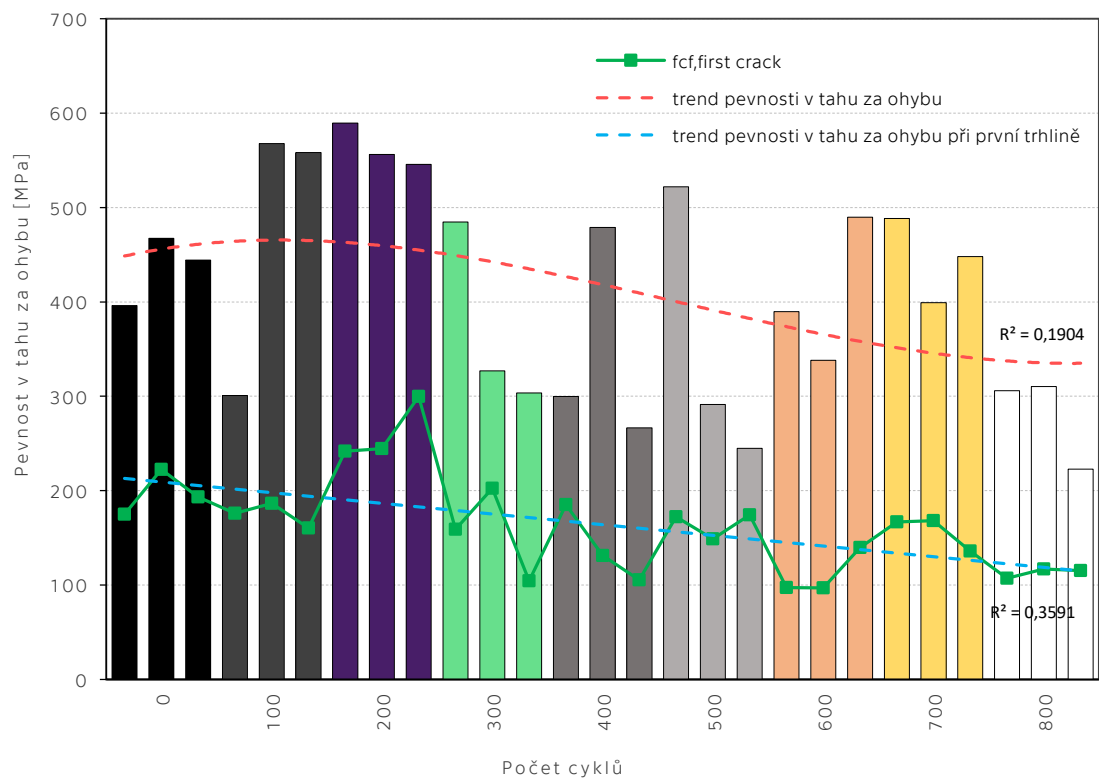
Obr. 55 Porušené vzorky po zkoušení



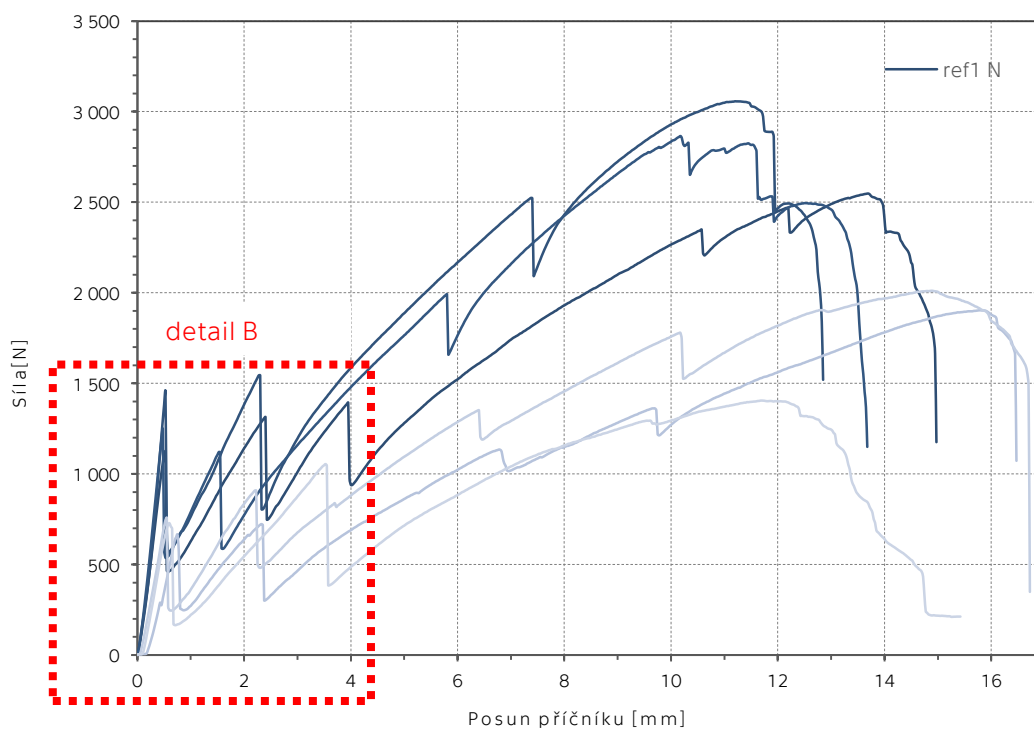
Obr. 56 Graf průběhu zkoušky čtyřbodového ohybu na tenkých deskách



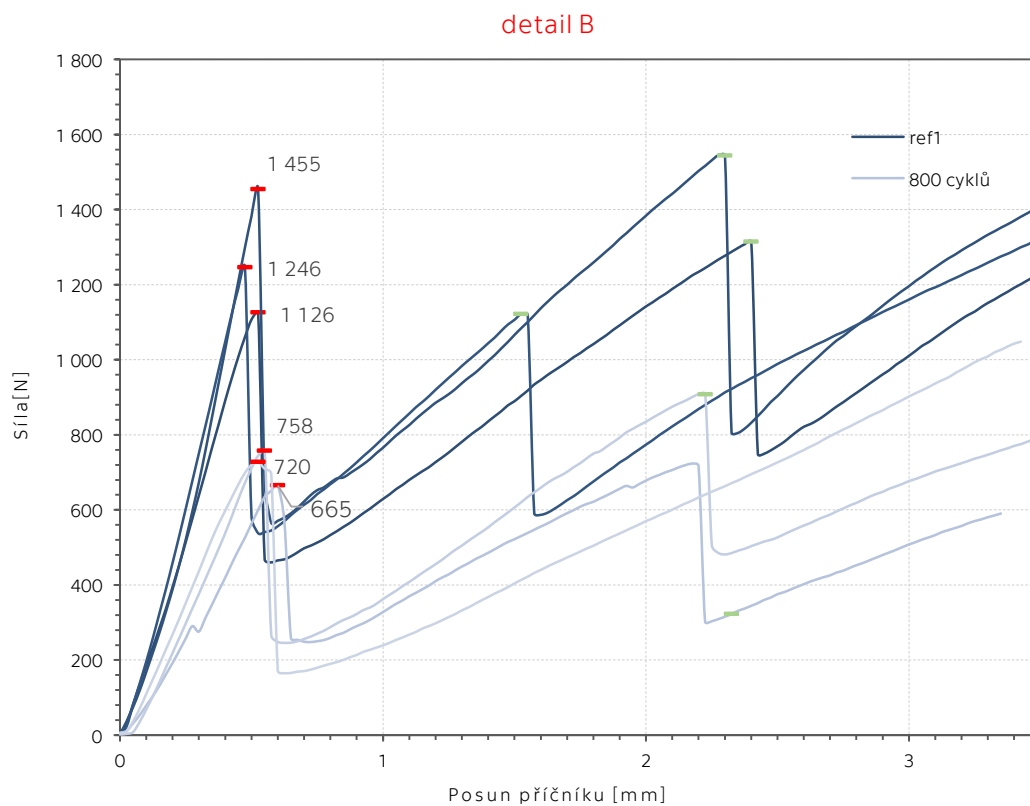
Obr. 57 Detail prvních trhlin při zatěžování čtyřbodovým ohybem



Obr. 58 Pevnost v tahu za ohybu (maximální a při první trhlině)



Obr. 59 Křivka znázorňující průběh zatěžování



Obr. 60 Graf detailu prvních trhlin v betonu u vzorků referenčních a po 800 cyklech

Závěr

Nestandardně dlouhá zkouška mrazuvzdornosti tenkých TRC desek se skleněnou výztuží ukazuje jejich dobrou odolnost vůči extrémnímu střídání teplot z opravdu dlouhodobého hlediska. Maximální hodnoty napětí po jednotlivých cyklech mají poměrně velký rozptyl. Polygonální křivka 3. řádu proložená výslednými hodnotami ukazuje mírný klesající trend pevnosti v tlaku po 800 cyklech. Spolehlivost této křivky však není příliš velká z důvodu malého počtu vzorků a velkých rozptylů hodnot.

Hodnoty napětí při první trhlině ukazují mírný klesající trend, ale rozptyl hodnot je opět dost velký k určení přesných závěrů.

Obecně lze však konstatovat, že ani při extrémně dlouhém zatěžování prvků z TRC zmrazovacími cykly, nedochází k výraznému snížení pevnosti, která by se projevila na použitelnosti fasádních prvků. K přesnému vyčíslení hodnot a generalizování závěrů by bylo zapotřebí vyrobit větší množství vzorků.

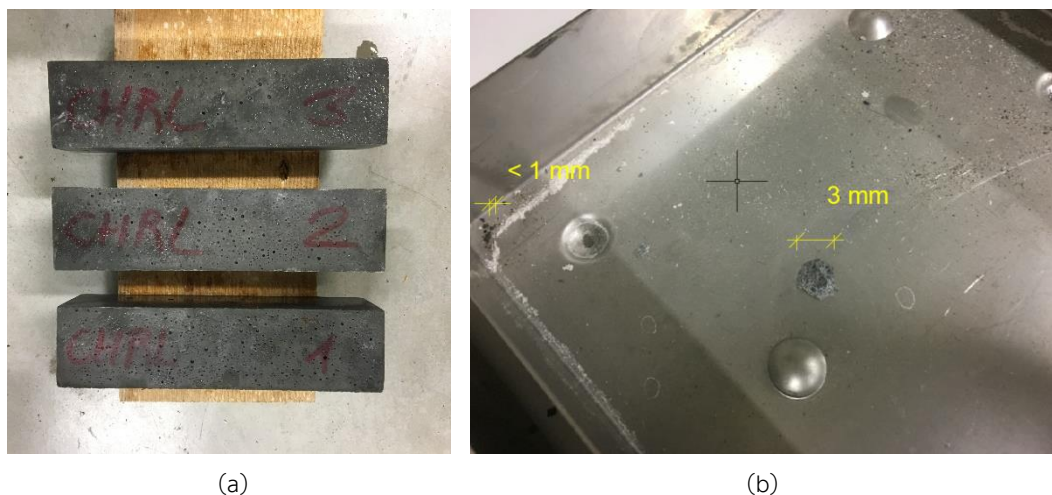
5.5 Dlouhodobá zkouška odolnosti povrchu vysokohodnotného betonu vůči chemickým rozmrazovacím látkám

Odolnost povrchu vysokohodnotné směsi betonu HPC1 byla prováděna na 6 vzorcích hranolů o velikosti 40x40x160 mm a 6 vzorcích krychlí o hraně délky 150 mm dle ČSN 73 1326-Z1 [123]. Zkouška probíhala standardním způsobem do 100 cyklů, kdy byl změřen celkový odpad a přepočítán na počet g/m² smáčené plochy. Současně byla provedena destruktivní zkouška pevnosti v tlaku na 3 vzorcích krychlí a zkoušky v tahu za ohybu a v tlaku na 3 hranolech, resp. na zlomcích hranolů. Poté se 3 vzorky krychlí a 3 vzorky hranolů podrobili dalšímu testování. Po každých 25 cyklech probíhala vizuální kontrola a po každých 100 cyklech byl měřen odpad. Zkouška se ukončila po 800 cyklech změřením celkového odpadu a destruktivními zkouškami pro porovnání.

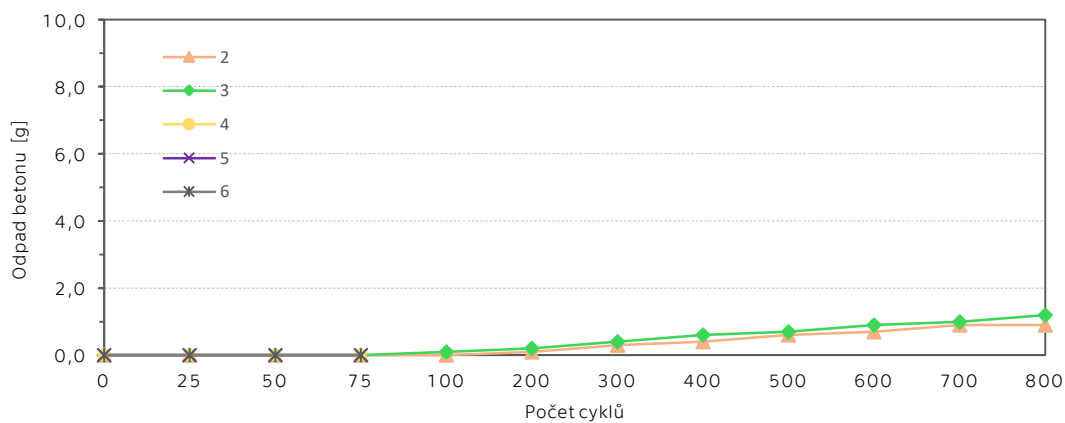
Z šesti vzorků hranolů bylo pět téměř bez odpadu dokonce i po 800 cyklech. Jeden vzorek musel být vyřazen, kvůli odlomení rohu. Zbylé odpady nepřesahovaly 120 g/m² po 800 cyklech. U jednoho vzorku se odlomil kus při 75 cyklech (4,05 g). V grafu na obr. 62 jsou znázorněny průběhy všech měření. Do průměrných hodnot nebyl vzorek č. 1 započítán.

V grafu na obr. 64 jsou znázorněny průběhy měření odpadů na vzorcích krychlí. Vzorek č. 4 byl vyřazen, ostatní vzorky vykazovaly odpad do 60 g/m².

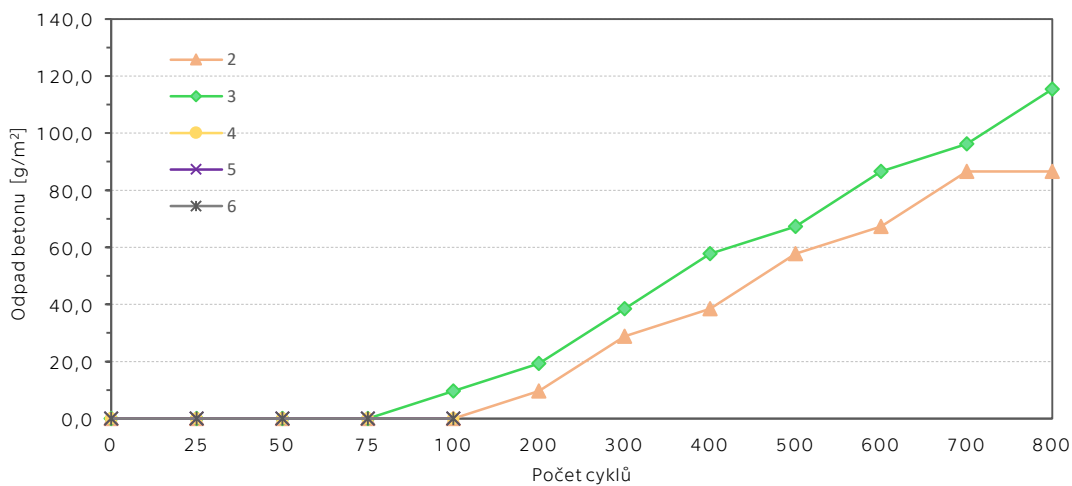




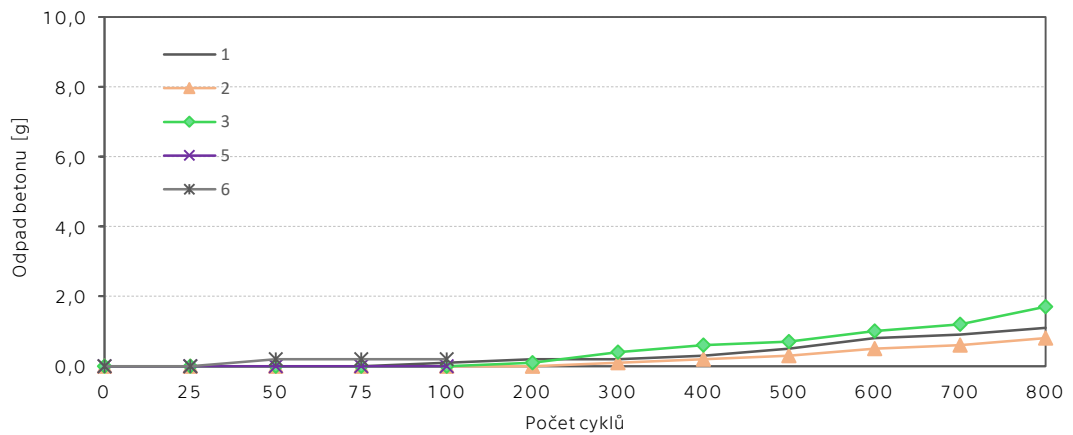
Obr. 61 (a) Vzorky hranolů po 800 zmrazovacích cyklech ; (b) Odpad po 100 cyklech na vzorku krychle



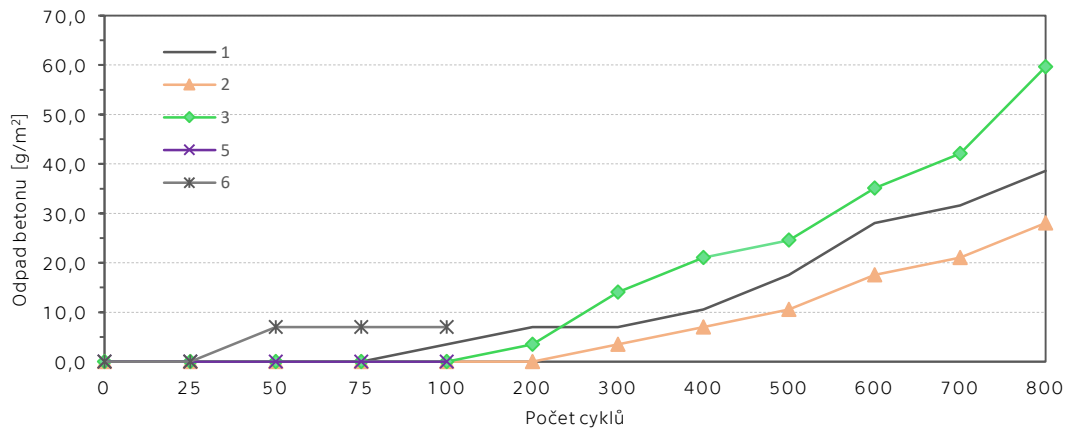
Obr. 62 Odpady během jednotlivých zmrazovacích cyklů na vzorcích hranolů 40x40x160 mm



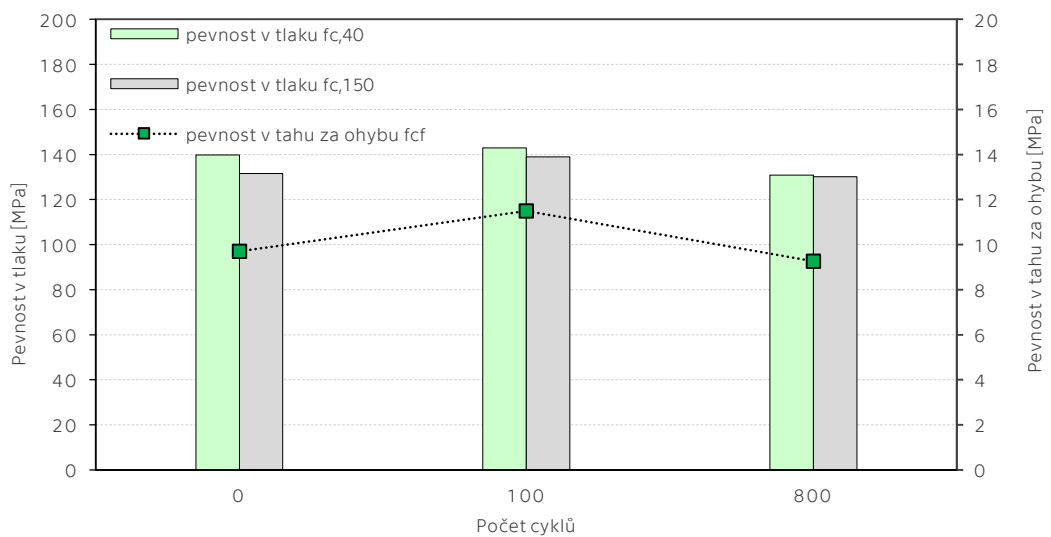
Obr. 63 Odpady přepočítané na smáčenou plochu v jednotlivých zmrazovacích cyklech na vzorcích hranolů 40x40x160 mm



Obr. 64 Odpady během jednotlivých zmrazovacích cyklů na vzorcích krychlí o hraně délky 150 mm



Obr. 65 Odpady přepočítané na smáčenou plochu v jednotlivých zmrazovacích cyklech na vzorcích krychlí o hraně délky 150 mm



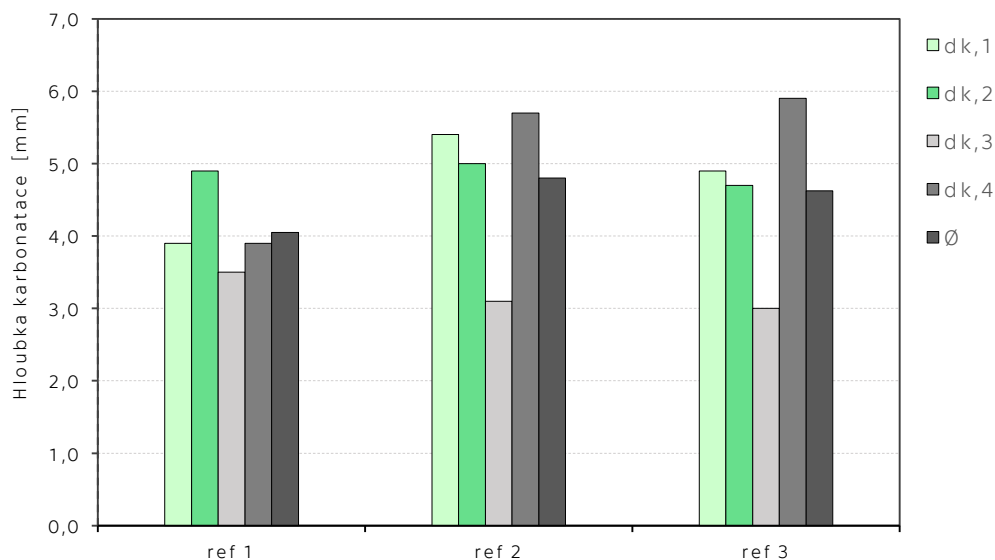
Obr. 66 Výsledky destruktivních zkoušek po 100 cyklech a po 800 cyklech zmrazování za působení rozmrazovací látky

Závěr

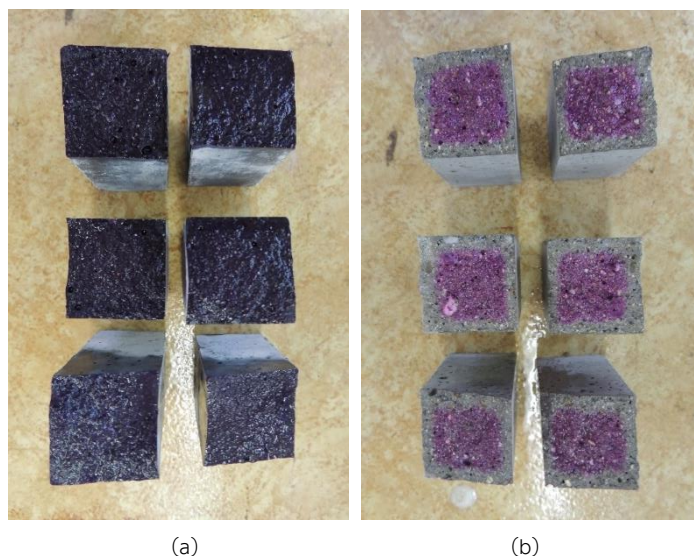
Vysokohodnotný beton HPC1 vykazuje velmi dobré výsledky z hlediska odolnosti povrchu vůči působení agresivních rozmrazovacích solí. Extrémně dlouhé zatěžování mrazem za současného působení agresivních látek nad rámec normy (až do 800 cyklů) nemá na povrch vysokohodnotného betonu téměř žádný vliv. Nasvědčují tomu i výsledky destruktivních zkoušek, kde vychází pevnost po 800 cyklech téměř stejná jako referenční. Vyvinutá směs HPC1 se ukazuje jako vhodná směs pro použití na fasádní panely, u kterých se očekává dlouhá životnost při zachování vysoké kvality povrchu.

5.6 Urychlená zkouška karbonatice

Zrychlená zkouška karbonatice spočívá ve vystavení vzorků působení atmosféry s 1% CO₂ ve speciální hermetické skříni po dobu 56 dní a následným fenolftaleinovým testem. Vzorky byly vyrobeny v Laboratoři kompozitních materiálů UCEEB v Buštěhradě. Karbonatice byla zkoušena v Kloknerově ústavu ČVUT v Praze. Testovány byly tři vzorky hranolů z HPC1 o velikosti 40x40x160 mm a pro srovnání na třech vzorcích referenčního betonu C (0,45). Z obr. 68 je patrné, že vzorky HPC1 nejsou zkarbonatované. Hodnota karbonatice HPC1 = 0 mm. Oproti referenčním vzorkům, kde hodnota karbonatice byla kolem 4,5 mm.



Obr. 67 Hloubka karbonatice u referenční betonu



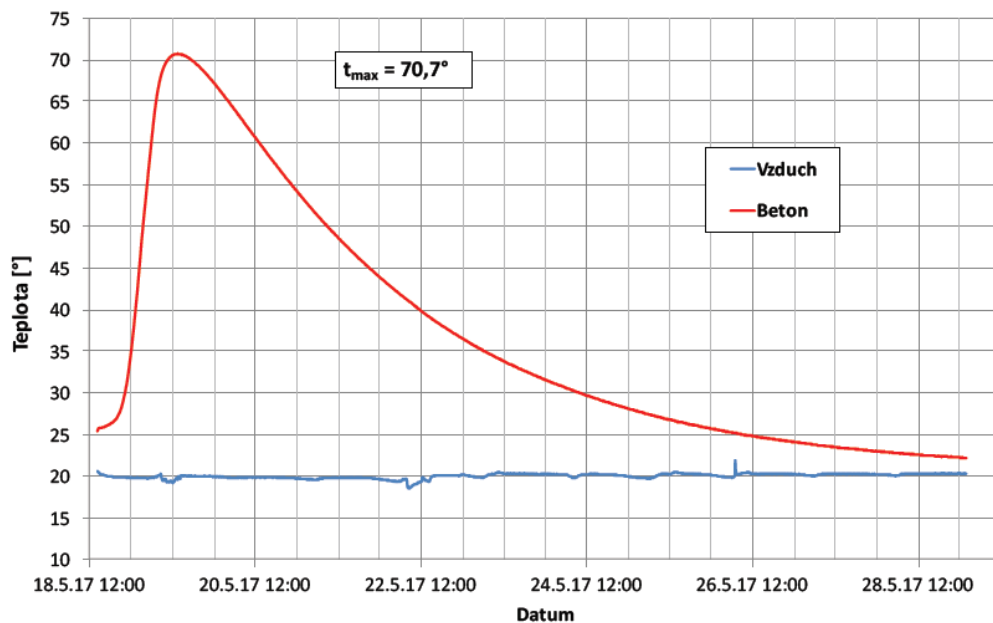
Obr. 68 (a) Vzorky HPC 1 postříkané indikátorem z fenolftaleinu
v porovnání se vzorky z referenčního betonu (b) (foto Tomáš Bittner, K.Ú. ČVUT)

5.7 Vývoj hydratačního tepla

Vliv působení vysokých teplot na konstrukci může být z hlediska trvanlivosti stejně důležitý jako vliv extrémně nízkých teplot. Existuje několik případů, kdy může být prvek vystaven vysokým teplotám. Kromě přímého slunce a požáru je prvek vystaven poměrně velkému zahřívání (zejména u masivnějších konstrukcí) již na počátku jeho výroby během procesu hydratace, tj. prvních 24 hodin. Vývoj hydratačního tepla může být důležitou informací již při návrhu vhodné výztuže, resp. její povrchové úpravy. Vysoké teploty mohou v kombinaci s vysokým pH totiž ovlivňovat případnou degradaci výztuže.

Vývoj hydratačního tepla byl měřen v Kloknerově ústavu ČVUT v Praze dle jejich interního postupu KÚ č. 01/EXPO/15. Směs HPC1 byla betonována na místě spolu s pracovníky Kloknerova ústavu.

Z grafu na obr. 69 je patrný průběh teplot během hydratace. V grafu jsou zobrazeny jednotlivé měřené části (beton, vzduch) v časovém úseku od zahájení betonáže do ukončení měření po cca 11 dnech. Maximální dosažená teplota s časovým údajem dosažení maxima je uvedena nad grafem. Ve středu krychle o hraně 300 mm bylo naměřeno 70,7°C po 23:15 (hodin:minut) od uložení betonu do izolované krychle [162].



Obr. 69 Záznam teplot během hydratace betonu HPC1 měřený v Kloknerově ústavu [162]



Obr. 70 Pohled na izolovanou formu tvaru krychle o hraně délky 300 mm
(foto: David Čítek, K. Ú. ČVUT)

5.8 Alkalivzdornost textilních výztuží

Textilní výztuže určené jako výztuže do betonu jsou na trhu dostupné v několika formách a s různými povrchovými úpravami. V Laboratoři kompozitních materiálů UCEEB ČVUT a v laboratoři Katedry konstrukcí pozemních staveb Fakulty stavební ČVUT jsou často vyráběny nejrůznější designové tvary konstrukčních prvků, pro které není možné využít komerčně dostupné textilie a je proto nutné si vyrobit speciální přímo na míru. K tomuto účelu se používají nekonečná vlákna (rovingy) navinuté na špulce. Po ručním vypletení do požadovaného tvaru jsou textilie opatřeny nátěrem z epoxidové pryskyřice Sikafloor®156 kvůli získání pevného tvaru a kvůli zajištění ochrany vláken vůči agresivnímu prostředí. Za mokrého stavu je na pryskyřici aplikován jemný písek, který po zatvrdnutí tvoří adhezivní můstek mezi výztuží a betonem.

Podstatou této rozsáhlé zkoušky je analýza alkalivzdornosti zmíněných rovingů z AR skla, uhlíku a čediče komerčně dostupných na trhu ve formě navinutého nekonečného vlákna jak bez povrchové úpravy, tak s používanou povrchovou úpravou z epoxidové pryskyřice Sikafloor®156S. Předpokládá se, že vlákna mohou vlivem vysokého pH korodovat a ztrácet svoje mechanické vlastnosti. Cílem je ověřit rozsah případné degradace v různě zásaditém prostředí a účinnost případné ochrany epoxidovým nátěrem.

Pro každý materiál bylo vytvořeno několik kombinací nesilového zatížení. Výsledkem jsou tahové zkoušky rovingů a snímky z elektronového mikroskopu a jejich celková analýza.

5.8.1 SEM analýza vlivu alkalického prostředí a zvýšené teploty na změny v morfologii vláken

5.8.1.1 Příprava vzorků pro SEM

Pro mikroskopickou analýzu bylo připraveno 18 vzorků velikosti cca 50 mm od každého druhu materiálu (skla, uhlíku a čediče) celkem tedy 54 vzorků. Polovina vzorků byla opatřena povrchovou úpravou z epoxidové pryskyřice Sikafloor®156. Čisté vzorky i vzorky s povrchovou úpravou byly namočené do dvou různých roztoků: 5 % roztoku KOH s pH 13,4 a 5% roztoku NaOH s pH 12,2. Namáčení probíhalo v Erlenmeyerových baňkách s hliníkovými víčky. První sada vzorků byla namáčena po dobu 24h. Druhá sada vzorků byla namáčena po dobu 200h. Jedna sada vzorků byla uložena při pokojové teplotě 22°C. a druhá sada vzorků byla zkoušena pod zatížením teplotou 80 °C v laboratorní sušárně. Tři vzorky od každého druhu materiálu byly ponechány jako referenční. Po odpovídajícím čase byly vzorky vyjmuty z baněk, omyty vodou, nahrubo osušeny a uloženy v otevřených Petriho miskách do boxů se silikagelem kvůli zbavení vlhkosti. Schéma kombinací je zřejmé z tabulky 22.

GE 13 24 T1

materiál: G1a = sklo, Car = uhlík, Bas = čedič
 povrchová úprava: teplota: T1 = 22 °C, T2 = 80 °C
 P = bez povrchové úpravy doba smáčení: 24 h, 200 h
 E = epoxidová pryskyřice hodnota pH: 12 = pH12,2, 13 = pH 13,4

Značení vzorků je následující:

Tab. 22 Schéma zatěžovacích kombinací a značení vzorků

materiál	povrchová úprava	reference	5% NaOH PH 12,2						5% KOH PH 13,4					
			teplota T1 = 22°			teplota T2 = 80°			teplota T1 = 22°			teplota T2 = 80°		
			24 h	200 h	24 h	200 h	24 h	200 h	24 h	200 h	24 h	200 h	24 h	200 h
sklo	bez povrchové úpravy	G ref	č.7	č.13	č.19	č.25	č.31	č.37	č.43	č.49	č.31	č.37	č.43	č.49
	s povrchovou úpravou	GE ref	č.8	č.14	č.20	č.26	č.32	č.38	č.44	č.50	č.32	č.38	č.44	č.50
uhlík	bez povrchové úpravy	C ref	č.9	č.15	č.21	č.27	č.33	č.39	č.45	č.51	č.33	č.39	č.45	č.51
	s povrchovou úpravou	CE ref	č.10	č.16	č.22	č.28	č.34	č.40	č.46	č.52	č.34	č.40	č.46	č.52
čedič	bez povrchové úpravy	B ref	č.11	č.17	č.23	č.29	č.35	č.41	č.47	č.53	č.35	č.41	č.47	č.53
	s povrchovou úpravou	BE ref	č.12	č.18	č.24	č.30	č.36	č.42	č.48	č.54	č.36	č.42	č.48	č.54



Takto připravené vzorky musely být pro samotnou mikroskopickou analýzu dále upraveny na dva rozdílné typy. První sloužil pro zkoumání povrchu vláken a druhý pro zkoumání vláken v příčném řezu.

Pro první sadu vzorků byla vždy odebrána reprezentativní část vlákna, která byla přilepena pomocí oboustranné, vodivé uhlíkové pásky na mikroskopické stuby. Před samotnou mikroskopickou analýzou pomocí elektronového mikroskopu (SEM) je nutná příprava vzorků kvůli zvýšení jejich povrchové vodivosti. Zkoumané vysušené vzorky vláken jsou téměř elektricky a tepelně nevodivé. Při jejich prohlížení v řádkovacím elektronovém mikroskopu dochází k nabíjení rastrovaného povrchu primárními elektrony, které se projevuje deformacemi a ztrátou ostroty obrazu. K eliminaci nabíjecích jevů se proto vzorek pokrývá tenkou vrstvou kovu o tloušťce cca 5-10 nm, která má za úkol odvést negativní náboj, zvýšit produkci sekundárních elektronů a minimalizovat poškození vzorku teplem uvolněným brzdícími se primárními elektrony. Pro tuto analýzu byla použita platina tloušťky 5 nm. Takto připravené vzorky byly vyhovující pro zkoumání povrchu vláken.

Druhá sada vzorků byla připravena formou mikroskopického nábrusu. Pro přípravu mikroskopických nábrusů byly odebrány vzorky o přibližné délce 2,5 cm. Vlákna bylo nutné uzavřít do epoxidu, aby byla zajištěna jejich kolmost a nedocházelo k jejich uvolňování během přípravy. Pro tento účel byla využita metoda vakuové impregnace vzorků epoxidovou pryskyřicí. Nábrusy byly pak připraveny na stroji Tegramin od firmy Struers. Vzorky byly broušeny a leštěny ve více krocích pro dosažení co nejlepší kvality povrchu vzorků. V prvním kroku byl použit smirkový papír s hrubostí 500 zrn/cm², aby odstranil největší nerovnosti po řezání. V dalších krocích byl použit jemnější smirkový papír: 1200 zrn/cm², 2000 zrn/cm² a 4000 zrn/cm². Každý krok trval 2 minuty pod přitlakem cca 5 N. Celý tento proces broušení probíhal pod vodou. Po každém kroku byl vzorek čištěn v ultrazvukové lázni pomocí destilované vody. Po dosažení dostatečné kvality povrchu byly i tyto vzorky opatřeny tenkou vrstvou platiny o tl. 5 nm z důvodu lepší vodivosti.

5.8.1.2 SEM snímkování

Pro mikroskopickou prvkovou analýzu byl použit rastrovací elektronový mikroskop SEM Thermo Scientific™ Phenom XL, který je umístěn v Laboratoři skenovací elektronové mikroskopie SEM na Fakultě stavební, ČVUT v Praze. Snímkování i úprava vzorků pro mikroskopickou analýzu probíhalo za pomoci proškoleného vědeckého pracovníka Fakulty stavební ČVUT Ing. Proška. V průběhu analýzy bylo nastavení mikroskopu následující:

- urychlovací napětí 5kV
- proud 2 nA
- vzdálenost pracovního stolku od 4 do 8 mm
- rozlišení 684 px



Snímky byly prováděny ve dvou režimech, respektive za pomoci dvou detektorů, a to detektoru sekundárních elektronů a detektoru zpětně odražených elektronů.

Detektor sekundárních elektronů (SED) je prostředníkem mezi dějem, odehrávajícím se při interakci primárních elektronů s povrchem vzorku, při kterém dochází k uvolnění sekundárních elektronů. Informace získané zachycením sekundárních elektronů nám dávají topografický kontrast vzorku. Zpětně odražené elektrony (BSD) mají energii srovnatelnou s energií primárního elektronového svazku. Vystupují z větší hloubky (řádově desítky mikrometrů) a přináší tedy informaci o lokálních změnách materiálu. Jedná se tedy o materiálový kontrast.

5.8.1.3 Výsledky ze snímků SEM vláken bez povrchové úpravy

AR Sklo

Obecně se ukázalo, že 24 h je natolik krátká doba, že vlákna na snímcích z elektronového mikroskopu nevykazovala viditelné změny. Pozornost byla tedy věnována době 200 h. Na obr. 71 jsou snímky, které ukazují změny na povrchu skleněných vláken bez povrchové úpravy. První řada obrázků (vzorek č. 1) je referenční vzorek focený několikrát v různých rozlišeních. Druhá řada ukazuje snímky vláken vystavených roztoku o pH 12,2 (vzorek č. 13) po dobu 200 h při pokojové teplotě 22°C. Na povrchu vláken jsou po 200 h vidět pouze nepatrné změny. V poslední řadě jsou snímky vzorků vystavených stejnému druhu roztoku při zvýšené teplotě po dobu 200 h (vzorek č. 25). Vliv teploty a alkalického prostředí je znatelný. Na povrchu vláken jsou vidět značné změny a počátek degradace povrchu vláken.

Na obr. 72 jsou snímky vzorků vystavených alkalickému roztoku o pH 13,4. Jak je vidět z druhé řady obrázků, pokojová teplota alkalických roztoků opět nemá po viditelný vliv na povrch vláken. Vlákna vystavená tomuto roztoku při zvýšené teplotě 80 °C však nesou velké známky degradace. Na povrchu vláken se začínají tvořit otvory a vlákna jsou silně narušena.

Jak je vidět z obr. 71 a 72, je značný rozdíl v hodnotě pH roztoku na degradační proces povrchu vlákna. Čím je hodnota pH vyšší, tím je porušení vlákna větší.

Uhlík

SEM snímky uhlíkových vláken bez povrchové úpravy z epoxidové pryskyřice jsou vidět na obr. 73 a 74. Vzorek č. 3 je referenční roving focený ve dvou různých zvětšeních. Vzorek č. 15 je uhlíkový roving vystavený roztoku o pH 12,2 a pokojové teplotě 22°C. Vzorek č. 27 je roving vystavený roztoku o pH 12,2 a teplotě 80°C. Vzorek č. 39 je vzorek vystavený roztoku o pH 13,4 při pokojové teplotě a vzorek č. 51 byl vystaven pH 13,4 a teplotě 80°C.

Jak je patrné z obrázků 73 a 74, uhlíková vlákna jsou odolná vůči alkalickým roztokům pH 12,2 i 13,4 dokonce i za zvýšené teploty 80°C. Na povrchu vláken nejsou vidět znatelné změny.

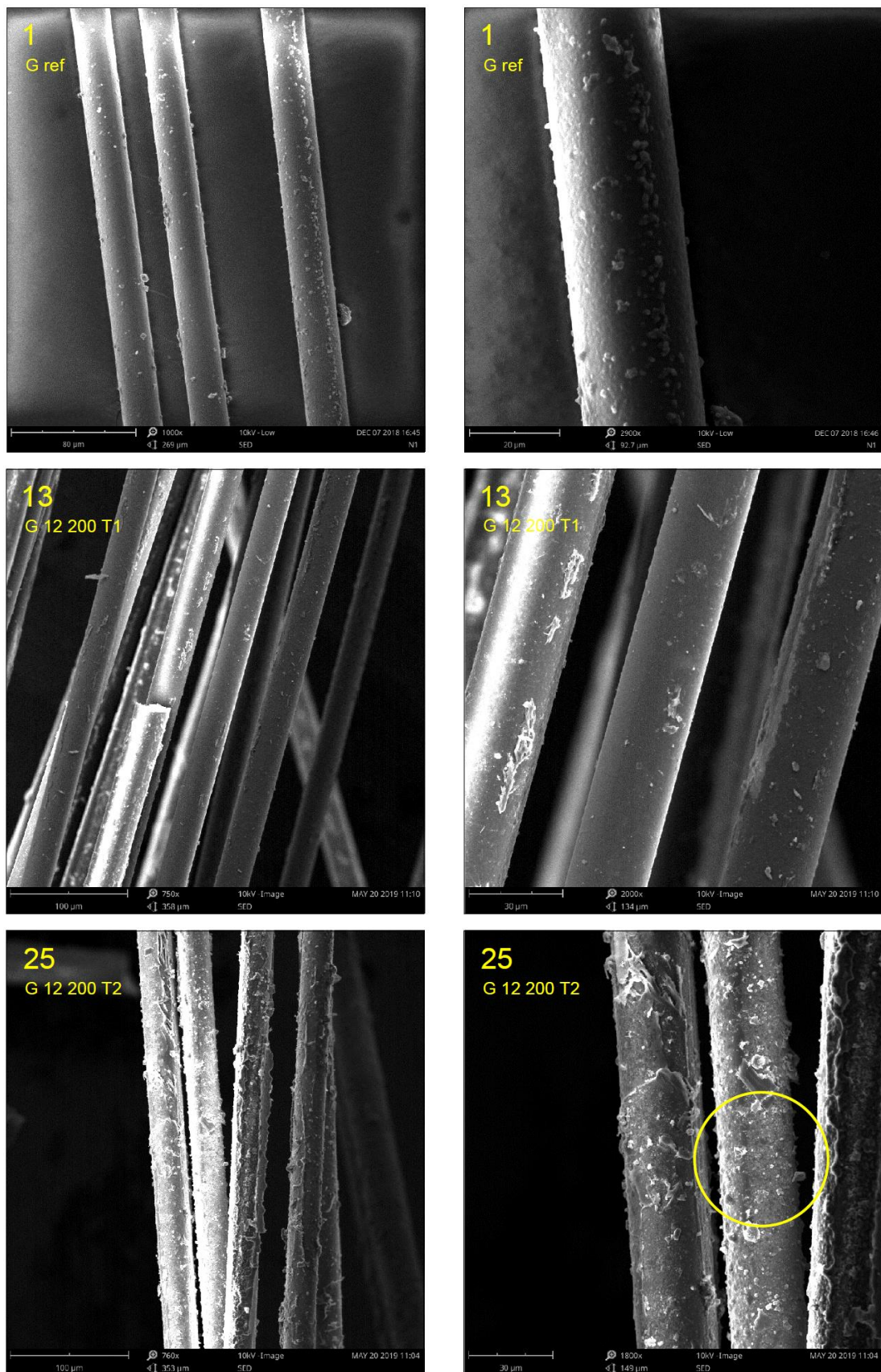
Čedič

Na obr. 75 a 76 jsou snímky čedičových vláken. Vzorek č. 5 je referenční vzorek. Vzorek č. 17 je vzorek vystavený roztoku o pH 12,2 a teplotě 22°C. Na tomto vzorku je vidět již mírné porušení struktury vlákna. Na vzorku č. 29, který byl vystavený pH 12,2 a teplotě 80 °C je vidět značný degradační proces. Povrch vlákna je pokrytý silnou vrstvou krusty. Na omak vlákna křehla a rozpadala se. Vzorek č. 41 je roving vystavený roztoku o pH 13,4 a pokojové teplotě. Na tomto vlákně nejsou vidět takové změny jako u roztoku o nižším pH nicméně povrch vlákna je mírně naleptán. Vzorek č. 53 je roving vystavený roztoku o pH 13,5 a teplotě 80°C. V porovnání s roztokem o nižším pH nejsou vidět tak znatelné změny na povrchu, ale vlákna se při manipulaci rozpadala a znatelně křehla.

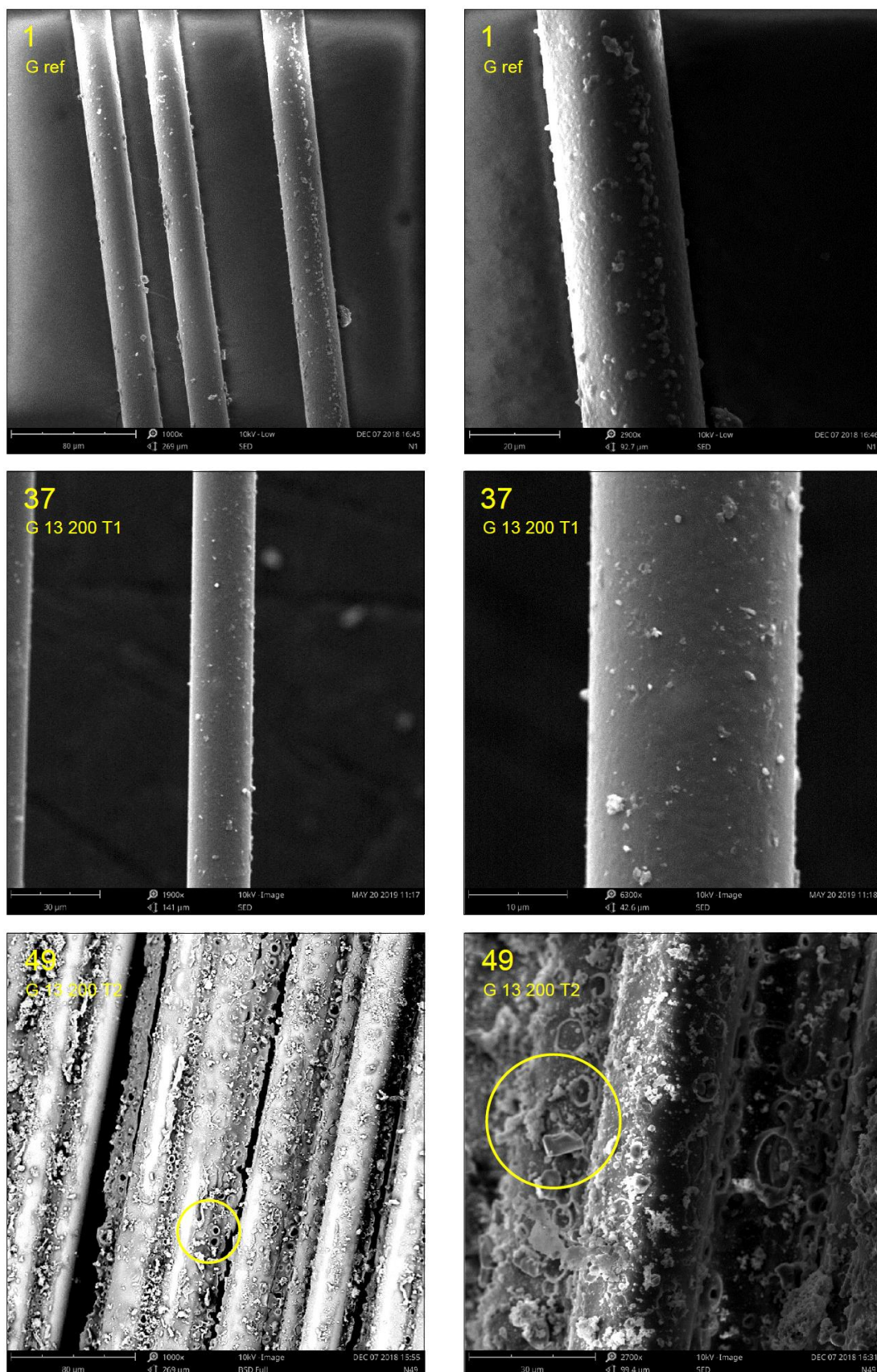
Závěr

Z uvedených snímků všech porovnávaných vzorků bez povrchové úpravy je zřejmé, že jediným stálým materiálem, který odolává agresivnímu alkalickému prostředí, je uhlík. Jeho povrch zůstává neporušený i při zatížení vysokými teplotami. Skleněná vlákna podléhala korozi hlavně v prostředí s vyšším pH. Teplota hraje pro alkalické prostředí výrazný vliv. Z jejího působení se degradační procesy u skleněných vláken zněkolikanásobily. Čedičová vlákna znatelně degradovala již při pokojové teplotě alkalických roztoků, více však v roztoku NaOH o nižším pH. Teplota také znatelně ovlivnila degradační proces a tvorbu korozních produktů.

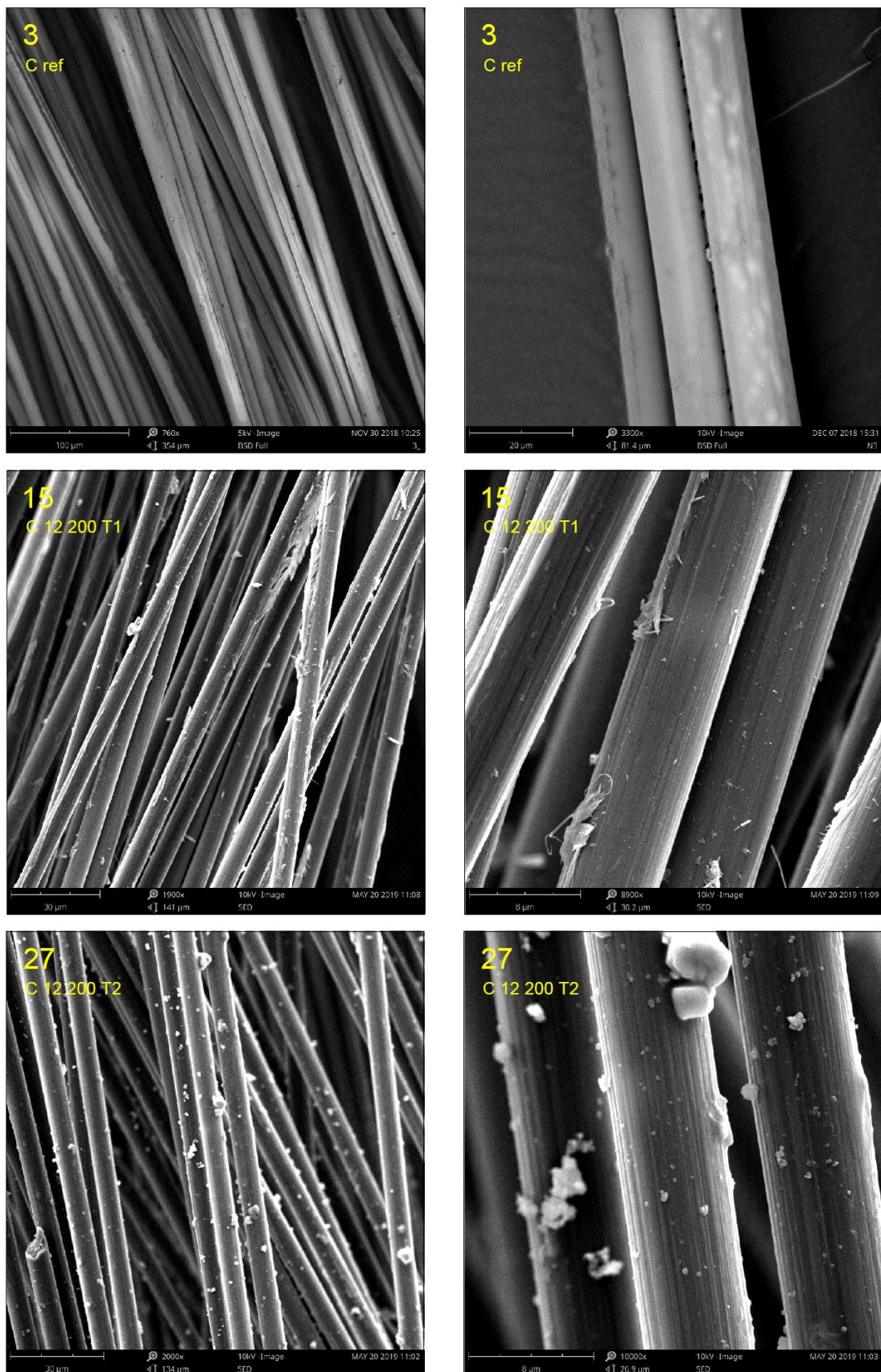




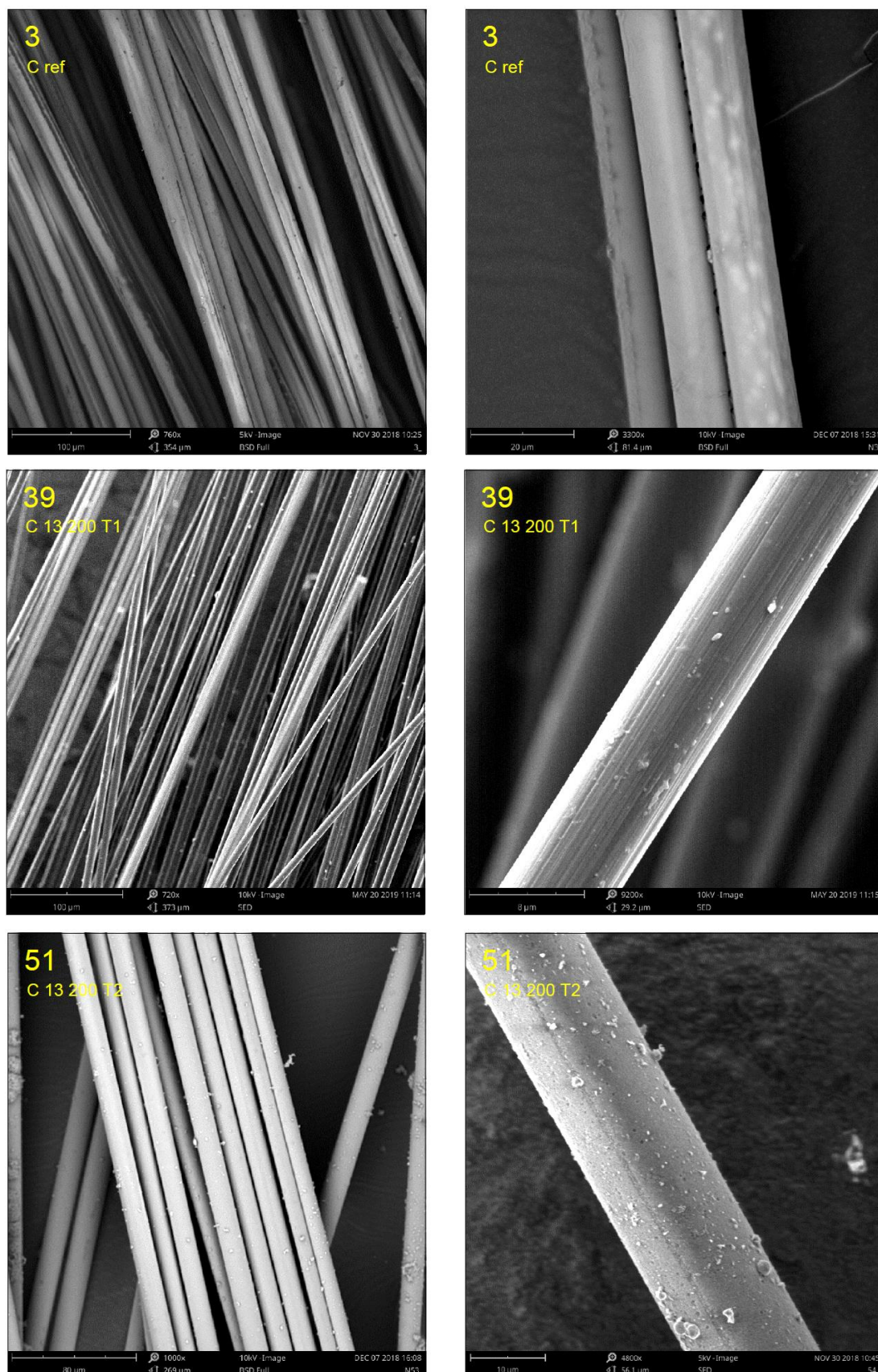
Obr. 71 SEM snímky vzorků skleněných rovingů po vystavení alkalickému roztoku o pH 12,2 po dobu 200h při pokojové teplotě 22°C (č.13) a při teplotě 80°C (č.25) ve srovnání s referenčními vzorky (č.1)



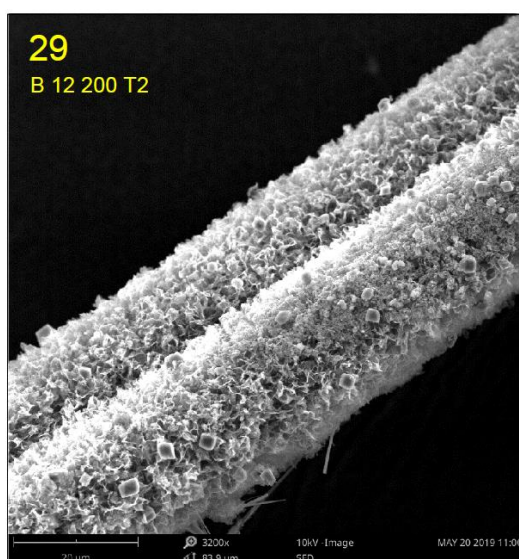
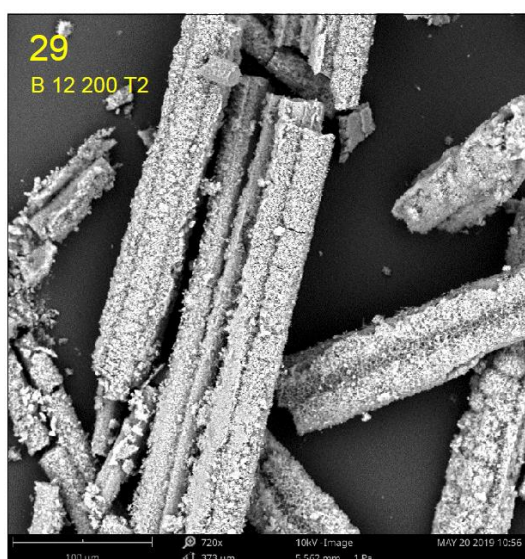
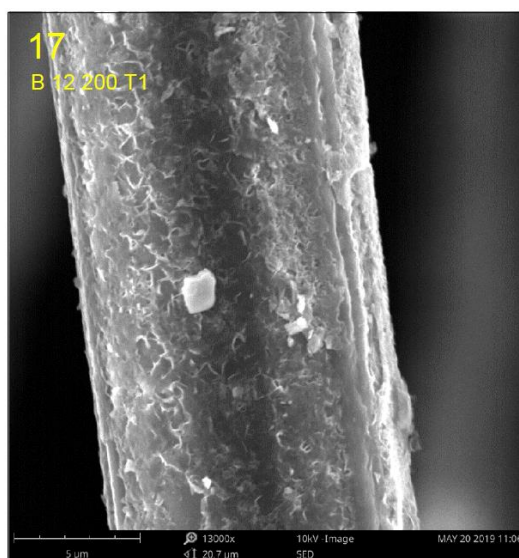
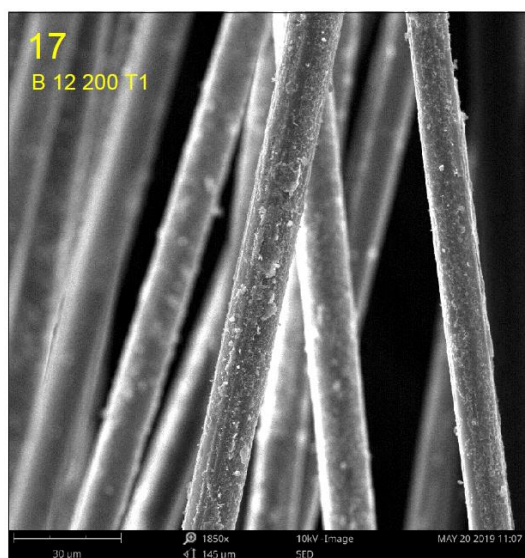
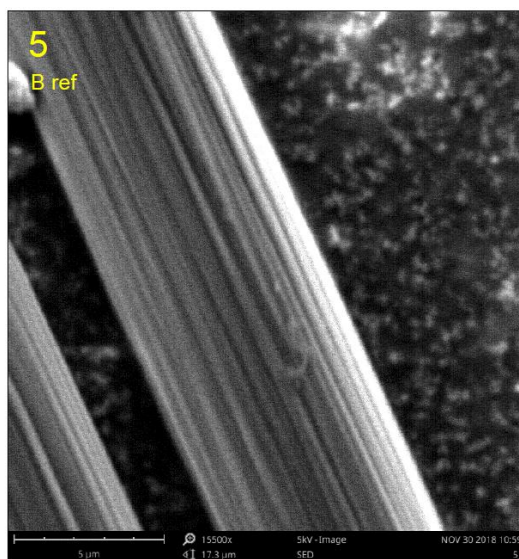
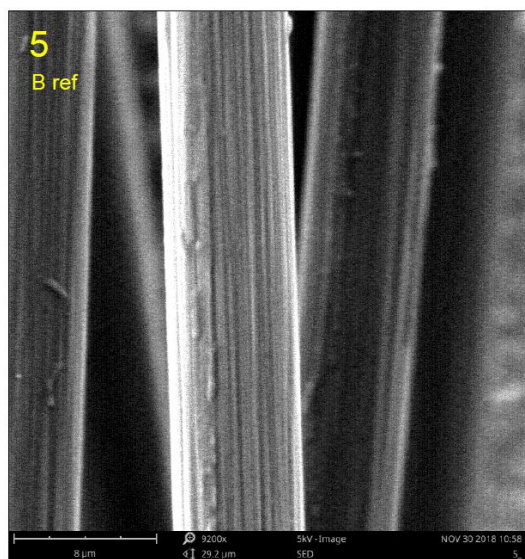
Obr. 72 SEM snímky vzorků skleněných rovinů po vystavení alkalickému roztoku o pH 13,4 po dobu 200h při pokojové teplotě 22°C (č.37) a při teplotě 80°C (č.49) ve srovnání s referenčními vzorky (č.1).



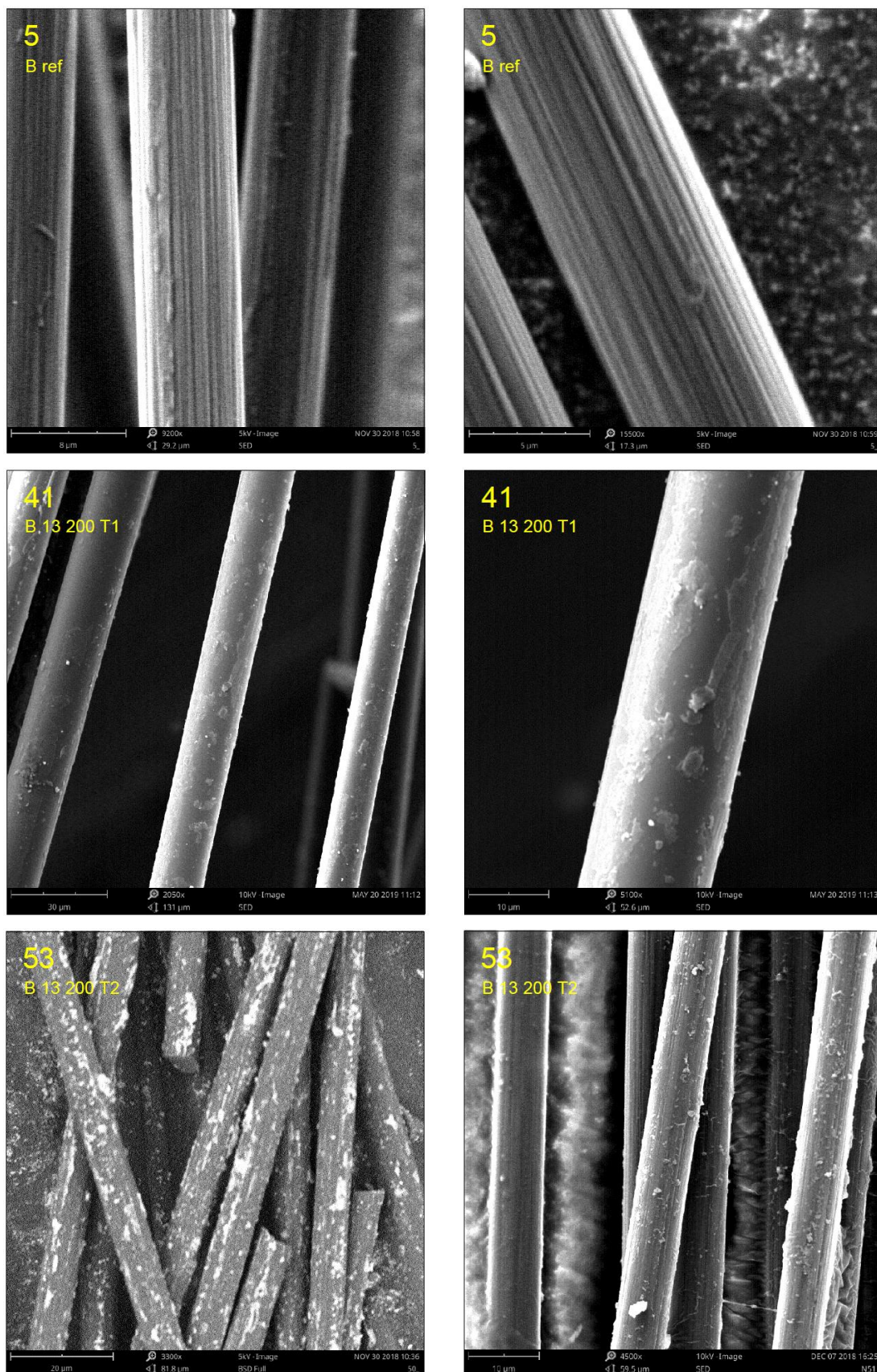
Obr. 73 SEM snímky vzorků uhlíkových rovingů po vystavení alkalickému roztoku o pH 12,2 po dobu 200h při pokojové teplotě 22°C (č.15) a při teplotě 80°C (č.27) ve srovnání s referenčními vzorky (č.3)



Obr. 74 SEM snímky vzorků uhlíkových rovingů po vystavení alkalickému roztoku o pH 13,4 po dobu 200h při pokojové teplotě 22°C (č.39) a při teplotě 80°C (č.51) ve srovnání s referenčními vzorky (č.3).



Obr. 75 SEM snímky vzorků čedičových rovingů po vystavení alkalickému roztoku o pH 12,2 po dobu 200h při pokojové teplotě 22°C (č.17) a při teplotě 80°C (č.29) ve srovnání s referenčními vzorky (č.5)



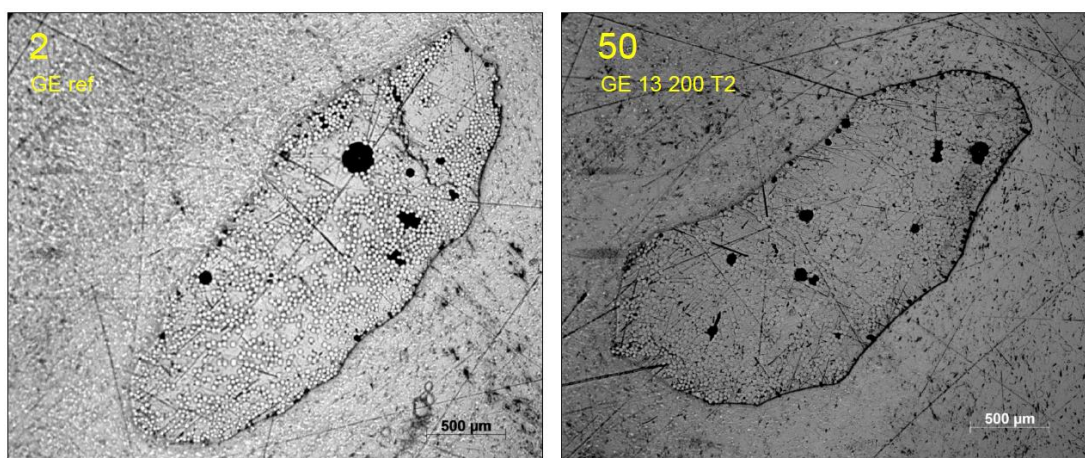
Obr. 76 SEM snímky vzorků čedičových rovingů po vystavení alkalickému roztoku o pH 13,4 po dobu 200h při pokojové teplotě 22°C (č.41) a při teplotě 80°C (č.53) ve srovnání s referenčními vzorky (č.3).

5.8.1.4 Výsledky ze snímků SEM vláken s povrchovou úpravou z epoxidové pryskyřice Sikafloor®156

AR Sklo

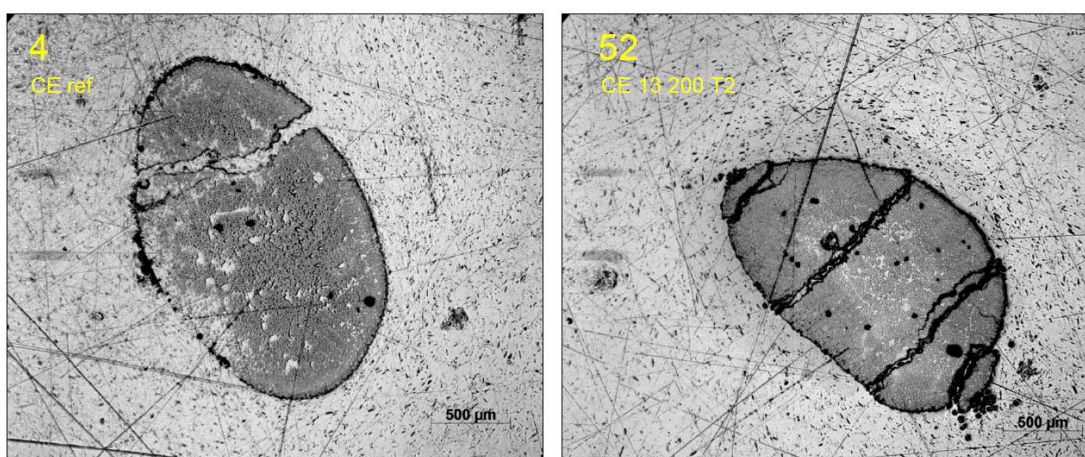
Na obr. 77 je srovnání referenčního vzorku skleněného rovingu opatřeného nátěrem z epoxidové pryskyřice a stejného vzorku vystaveného 200 h alkalickému roztoku při teplotě 80°C.

Jak je vidět ze snímků, vrstva epoxidové pryskyřice nejeví známky sebemenšího poškození a tvoří tak dostatečnou ochranu vláken i při tomto extrémním zatížení.



Obr. 77 SEM snímky skleněného rovingu s povrchovou úpravou z epoxidové pryskyřice po vystavení alkalickému roztoku o pH 13,4 po dobu 200h při teplotě 80°C (č.50) ve srovnání s referenčním vzorkem (č.2).

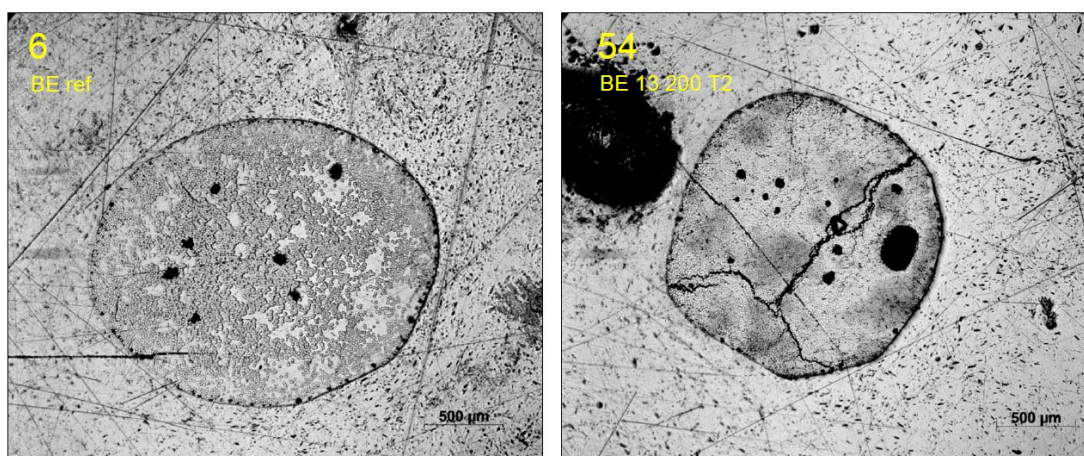
Uhlík



Obr. 78 SEM snímky uhlíkového rovingu s povrchovou úpravou z epoxidové pryskyřice po vystavení alkalickému roztoku o pH 13,4 po dobu 200h při teplotě 80°C (č.52) ve srovnání s referenčním vzorkem (č.4).

Na obr. 78 je srovnání uhlíkového rovingu zatíženého opět teplotou 80°C po dobu 200 h v roztoku o pH 13,5 (vzorek č.52) a referenčního vzorku (č.4). Trhliny na obou obrázcích jsou způsobeny přípravou vzorků. Vzorky s nátěrem Sikafloor®156 musí být nařezány na cca 25 mm a zality do epoxidové pryskyřice určené pro pozorování pod mikroskopem z důvodu zajištění jejich kolmosti. Vzorky jsou následně broušeny, viz kapitola 5.8.1.1. Znamky po nábrusech jsou vidět na snímcích jako tenké přímky. Jak je vidět na snímcích, epoxidový nátěr tvoří dostatečnou vrstvu pro vlákna a zajišťuje jejich ještě větší ochranu.

Čedič



Obr. 79 SEM snímky čedičového rovingu s povrchovou úpravou z epoxidové pryskyřice po vystavení alkalickému roztoku o pH 13,4 po dobu 200h při teplotě 80°C (č.54 ve srovnání s referenčním vzorkem (č.6).

Vzorky čediče vykazují podobný trend jako předchozí vzorky. Jak je vidět z obr. 79, epoxidový nátěr dostatečně chrání vlákna před jakoukoli korozí. Povrch zůstává bez jakýchkoli známek poškození. Trhliny ve vzorcích jsou opět způsobeny přípravou vzorků.

Závěr

Používaný typ epoxidové pryskyřice Sikafloor®156 k povrchovým úpravám se ukazuje jako dobrá ochrana vláken před alkalickým prostředím. Dokonce i při extrémní teplotě 80°C zůstává roving stabilní a podle snímků z elektronového mikroskopu nenesl žádné známky degradace. Při přípravě vzorků je nutné pečlivě opatřit povrch rovingu po celé jeho ploše a zajistit dostatečné prosycení. Neprosycené vzorky skla a čediče by mohly podléhat degradaci v místech bez dostatečné povrchové úpravy. Uhlíková vlákna se ukazují jako odolná vůči alkáliím. Vrstva epoxidové pryskyřice však slouží jako dobrá homogenizace vláken a také jako přechodový můstek pro další úpravu např. opískováním apod.

5.8.2 Vliv alkalického prostředí na tahovou pevnost rovingů

K ověření zjištěných změn na površích vláken z mikroskopické analýzy byly připraveny vzorky pro identické nesilové zatížení dvěma druhy alkalických roztoků po různě dlouhou dobu, které byly podrobeny mechanické zkoušce v tahu. Výsledky byly porovnány s mikroskopickou analýzou pro vyvození závěrů.

5.8.2.1 Příprava vzorků

Pro tahové zkoušky byly vyrobeny vzorky čistých rovingů bez povrchové úpravy a rovingů s povrchovou úpravou z epoxidové pryskyřice Sikafloor®156. Vzorky o celkové délce 460 mm byly opatřeny na koncích objímkami z epoxidové pryskyřice, viz odstavec. 4.8.

Vzorky byly vystaveny dvěma alkalickým roztokům stejným jako pro mikroskopickou analýzu (NaOH pH 12,2 a KOH pH 13,4). Vzorky bez povrchové úpravy byly vystaveny těmto alkalickým prostředím po dobu 24 h a 200 h. Vzorky s povrchovou úpravou z epoxidové pryskyřice byly namáčeny na 200 h, jelikož se z mikroskopické analýzy ukázalo, že alkalické prostředí nemá sebemenší vliv na strukturu vláken. Pro namáčení těchto velkoformátových vzorků byly používány teflonové plechy určené, které byly se vzorky hermeticky uzavřeny folií k zamezení průniku CO₂ a tím možnému snížení pH roztoku. Pro dokonalé ponoření vzorků byly vyrobeny speciální příločky z lamina, které zaručovaly ponoření pod hladinu po celou dobu experimentu. Po odpovídajícím čase byly vzorky vyjmuty, vymyty čistou vodou a uloženy do provětrávaných plastových boxů, kde přirozeně vyschly. Zatěžování teplotou nebylo provedeno z důvodu nedostatečné velikosti horkovzdušné sušárny. Značení vzorků je pro přehlednost zachováno stejné jako pro snímkování SEM.

5.8.2.2 Zkoušení vzorků

Tahová pevnost rovingů byla stanovena jednoosou tahovou zkouškou za pomoci zkušebního lisu LabTest 4.100SP1 se sběrníci dat. Vzorky opatřené objímkami z epoxidové pryskyřice byly zatěžovány konstantní rychlostí 2 mm/min až do přetržení, viz kapitola 4.8. Výsledkem jsou grafy se znázorněním průběhu zatěžování a celkové porovnání formou sloupcového grafu.

5.8.2.3 Výsledky tahové zkoušky rovingů bez povrchové úpravy

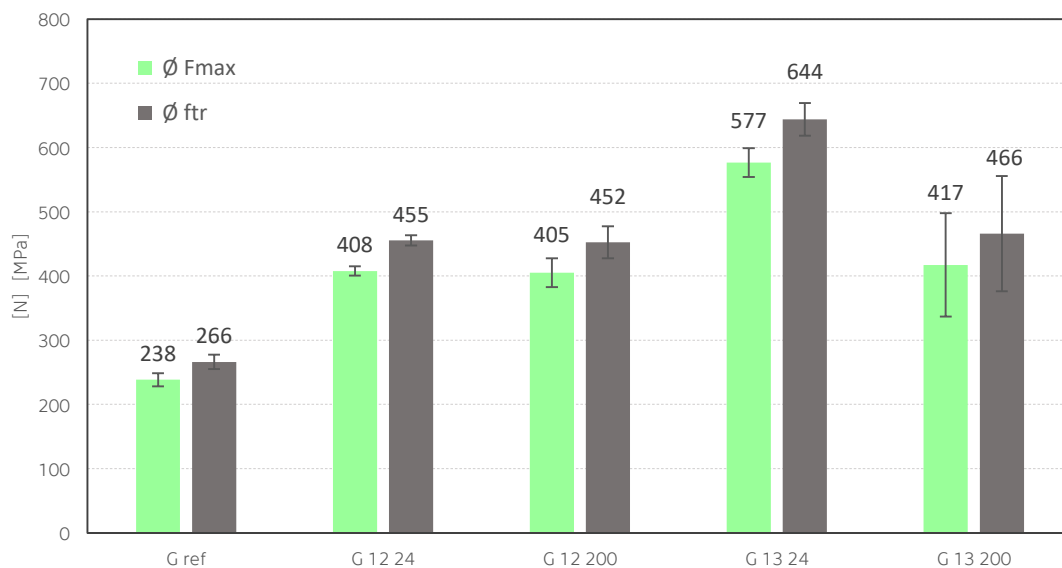
Sklo

Průběh tahové zkoušky pro jednotlivé vzorky je vidět na obr. 81., který znázorňuje závislost zatěžovací síly na posunu příčnicku. Na první pohled je vidět nárůst pevnosti u všech vzorků zatížených alkalickým roztokem. Ve sloupcovém grafu na obr. 80 je pak vidět průměr dosažených maximálních sil, pro každý typ vzorku. Neočekávaný nárůst pevnosti u vzorků vystavených alkalickému prostředí se vysvětluje procesem jakéhosi hojení. Vlivem koroze

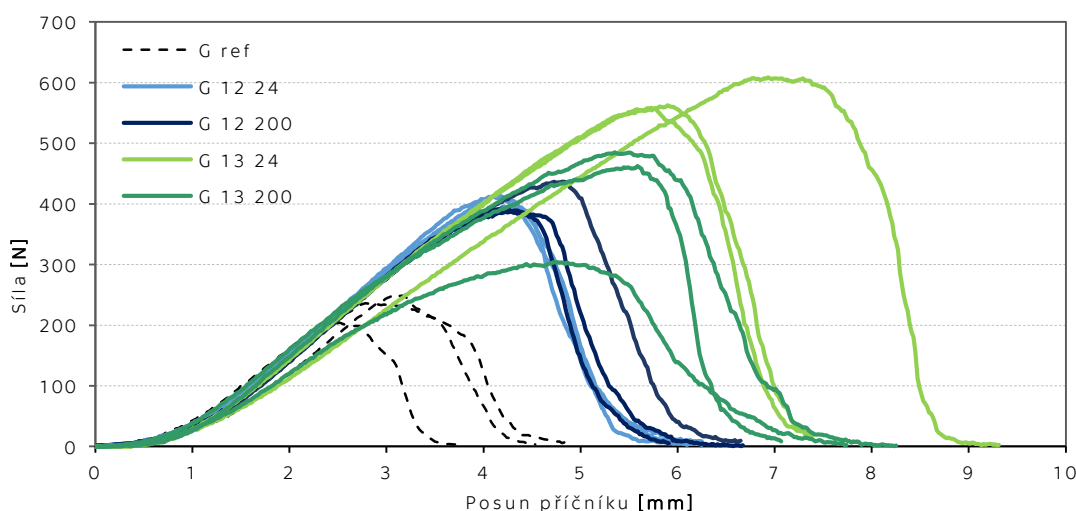
nechráněného skleněného povrchu v alkalickém prostředí bez vápenatých kationtů dochází k zaoblení trhlin mechanického původu v povrchu skelného vlákna. Tímto je významně omezena lomová mechanika, tj. růst trhlin při mechanickém zatěžování v tahu. Svazek pak může vykazovat vyšší pevnost, čemuž nasvědčují snímky s elektronového mikroskopu, kdy povrch skelného vlákna je napaden rovnoměrným korozním poškozením. Objem vykrystalizovaných anorganických fází tj. korozních produktů je i po 200h zatěžování velmi malý. Výsledky se značně liší svazek od svazku a záleží na mnoha okolnostech, zejména ale na počátečním stavu rovingu či na manipulaci během zkoušky.

Tab. 23 Tabulka výsledků tahových pevností skleněných rovingů bez povrchové úpravy

Označení	Číslo vzorku	A_r	F_{max}	$\emptyset F_{max}$	f_{tr}	$\emptyset f_{tr}$
		[mm]	[N]	[N]	[MPa]	[MPa]
G ref	1.1	0,896	237		265	
G ref	1.2	0,896	252	238	281	266
G ref	1.3	0,896	227		253	
G 12 24	7.1	0,896	412		461	
G 12 24	7.2	0,896	413	408	461	455
G 12 24	7.3	0,896	398		444	
G 12 200	13.1	0,896	392		438	
G 12 200	13.2	0,896	437	405	488	452
G 12 200	13.3	0,896	387		432	
G 13 24	31.1	0,896	563		628	
G 13 24	31.2	0,896	559	577	624	644
G 13 24	31.3	0,896	608		679	
G 13 200	37.1	0,896	485		542	
G 13 200	37.2	0,896	304	417	340	466
G 13 200	37.3	0,896	462		516	



Obr. 80 Průměrné hodnoty naměřených maximálních sil a přepočítané hodnoty maximálních napětí pro vzorky skleněných rovingů



Obr. 81 Graf znázorňující průběh zatěžování skleněných rovingů bez povrchové úpravy

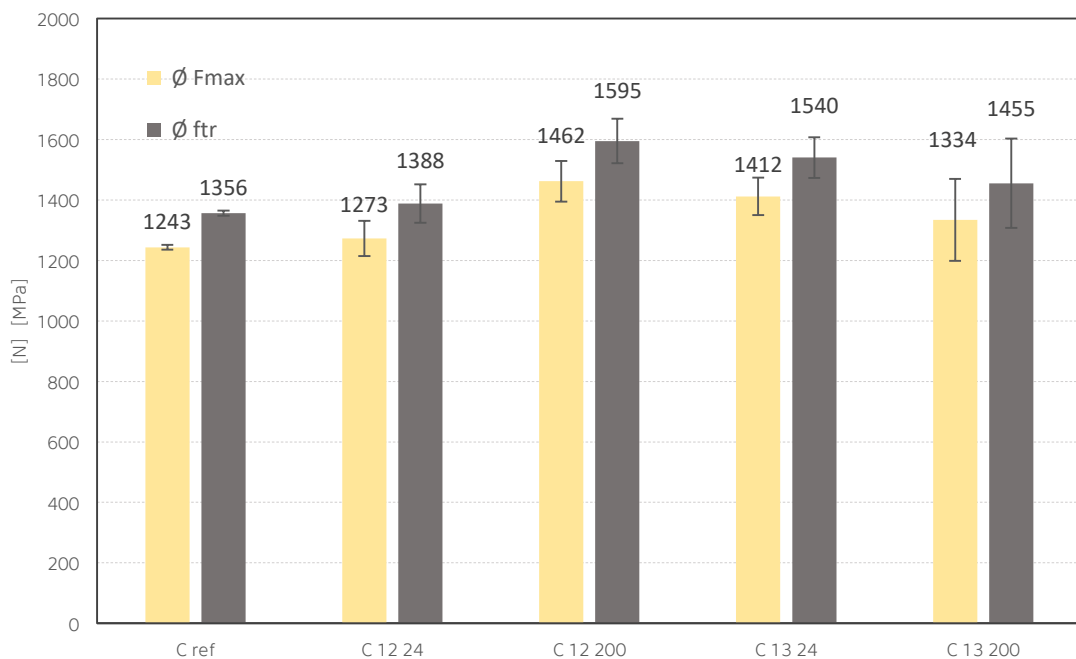
Uhlík

Uhlíková vlákna podle výsledků vykazují velmi dobrou odolnost vůči alkalickému prostředí. Nasvědčují tomu jak SEM snímky, tak výsledky tahových zkoušek. Na obr. 83 je vidět průběh zatěžování při zkoušce pevnosti v tahu. Graf ukazuje závislost zatěžovací síly na posunu příčnicku. Oproti sklu jsou křivky referenčních vzorků a vzorků vystavených alkalickému prostředí velmi podobné. Odchytky nejsou způsobeny alkalickým roztokem, ale manipulací s vlákny a jejich počátečním stavem před samotným zatěžováním. Mírný vliv může mít i omývání vzorku a přirozené vysychání, kdy je roving na pohled mírně slepený, a proto vlákna nepraskají postupně, jako tomu je u referenčního vzorku. Následkem je pak mírný nárůst pevnosti, což je vidět z grafu na obr. 82. U vzorků zalitých do objímek z epoxidové pryskyřice

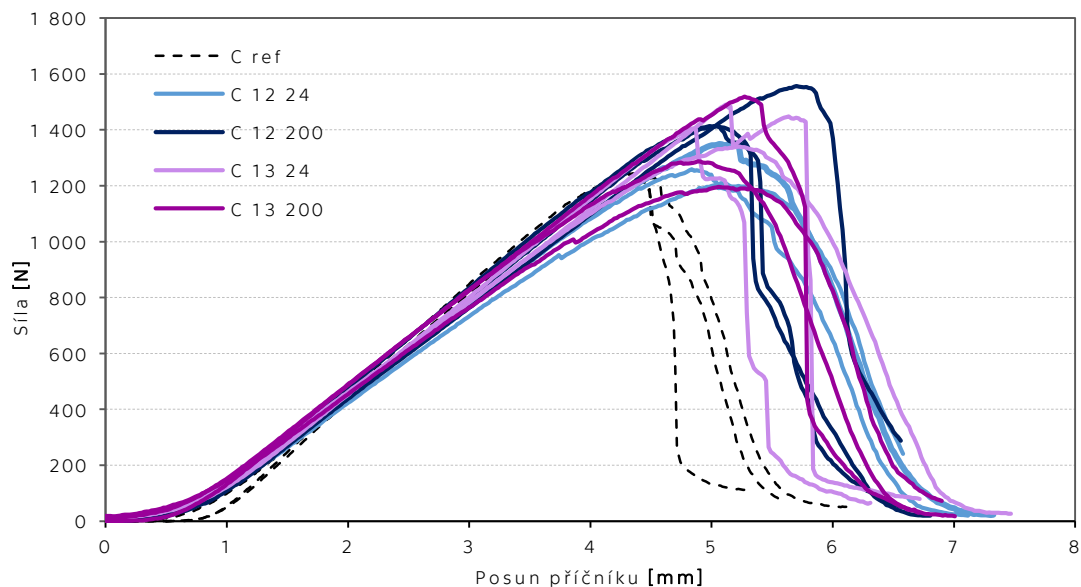
také velmi záleží na preciznosti zpracování. I sebemenší nedokonalost u konce objímky a přechodu na čisté vlákno může způsobit zcela odlišný výsledek.

Tab. 24 Tabulka výsledků tahových pevností uhlíkových rovingů bez povrchové úpravy

Označení	Číslo vzorku	A_r	F_{max}	$\emptyset F_{max}$	f_{tr}	$\emptyset f_{tr}$
		[mm]	[N]	[N]	[MPa]	[MPa]
C ref	3.2	0,917	1233		1345	
C ref	3.4	0,917	1246	1243	1359	1356
C ref	3.5	0,917	1252		1365	
C 12 24	9.1	0,917	1259		1373	
C 12 24	9.2	0,917	1350	1273	1473	1388
C 12 24	9.3	0,917	1209		1319	
C 12 200	15.1	0,917	1557		1699	
C 12 200	15.2	0,917	1414	1462	1542	1595
C 12 200	15.3	0,917	1415		1543	
C 13 24	31.1	0,917	1491		1626	
C 13 24	31.2	0,917	1340	1412	1462	1540
C 13 24	31.3	0,917	1405		1533	
C 13 200	39.1	0,917	1519		1657	
C 13 200	39.2	0,917	1196	1334	1305	1455
C 13 200	39.3	0,917	1288		1405	



Obr. 82 Průměrné hodnoty naměřených maximálních sil a přepočítané hodnoty maximálních napětí pro vzorky uhlíkových rovingů



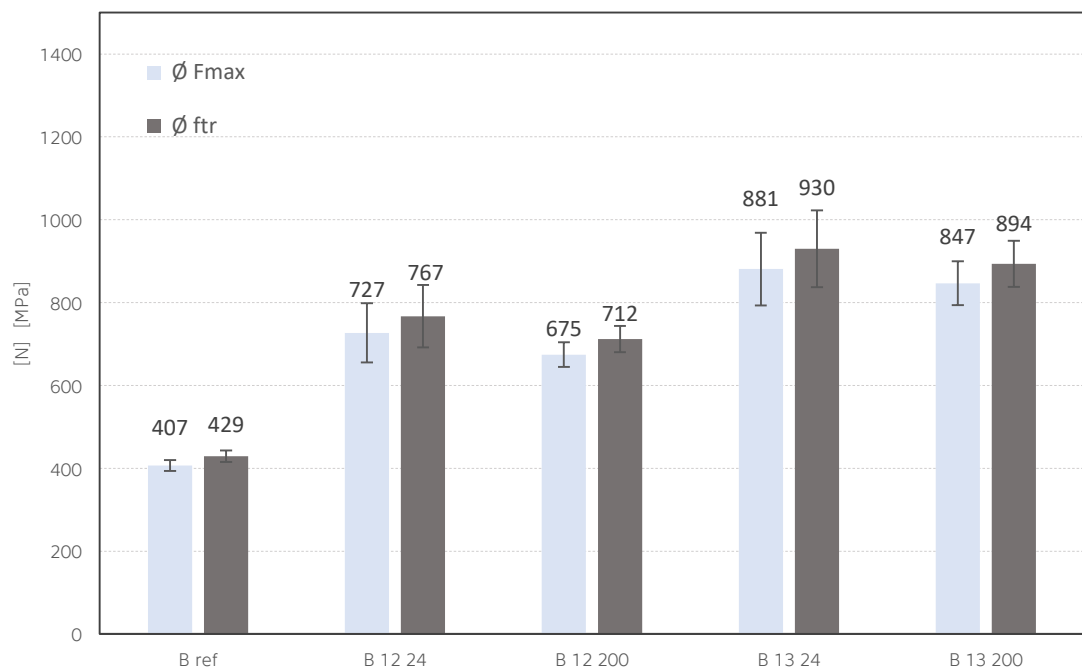
Obr. 83 Graf znázorňující průběh zatěžování uhlíkových rovingů bez povrchové úpravy

Čedič

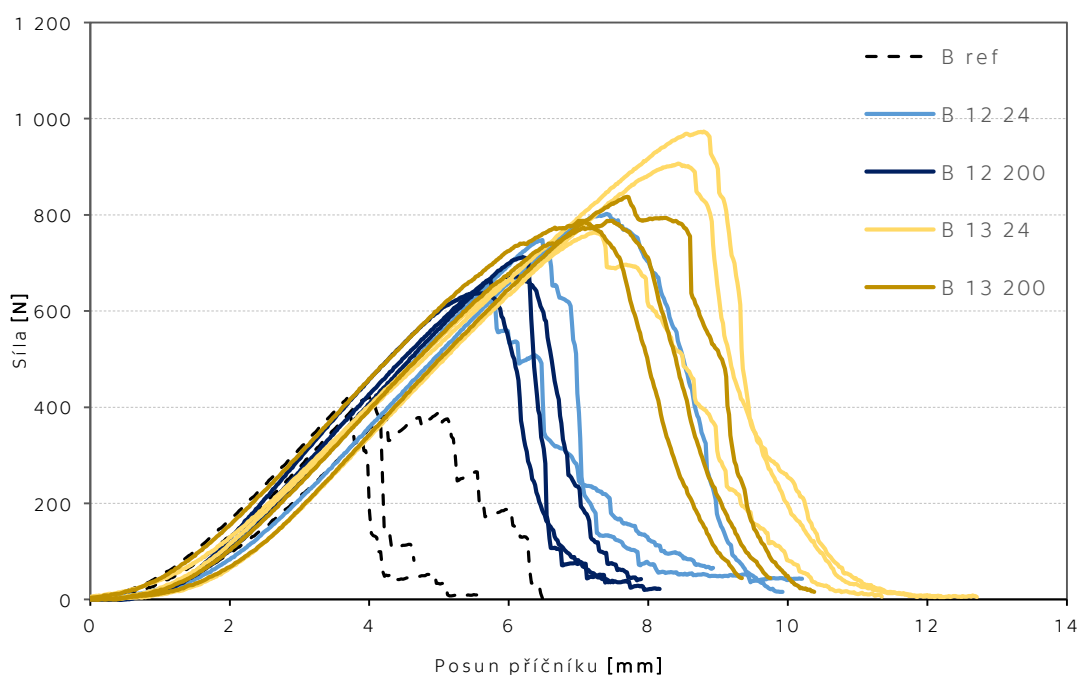
Mikrostruktura čedičových vláken je obecně velmi podobná struktuře skleněné sítě, proto se dá předpokládat podobné chování v alkalickém prostředí. Z výsledků tahových zkoušek čedičových rovingů (obr. 85) se ukazuje, že proces degradace vlákna v alkalickém prostředí je opravdu velmi podobný jako u vlákna skleněného. Odolnost čedičových vláken vůči alkalickému prostředí však silně závisí na jeho složení, zejména na poměru $\text{CaO}/\text{Fe}_x\text{O}_x$. Pevnost vláken vystavených alkalickému roztoku s dobou působení narůstá oproti vláknům referenčním, viz. obr. 84, 85. Bez detailního rozboru je v tomto případě nepřesné analyzovat proces degradace. Je však zřejmé, že po 200 h vystavení velmi alkalickému roztoku, nedochází k takové degradaci vlákna, která by způsobila úbytek pevnosti. Snímky z elektronového mikroskopu ukazují mírné napadení vlákna korozními produkty po 200 h. Dá se předpokládat, že v počáteční fázi dochází k mírnému zpevnění vláken vlivem hojivého procesu jako u vláken skleněných. Tuto teorii je však nutno u tohoto druhu vláken ověřit FTIR analýzou či jinou upřesňující metodou a prodloužit dobu zatěžování vysokým pH.

Tab. 25 Tabulka výsledků tahových pevností čedičových rovingů bez povrchové úpravy

Označení	Číslo vzorku	A_r	F_{max}	$\emptyset F_{max}$	f_{tr}	$\emptyset f_{tr}$
		[mm]	[N]	[N]	[MPa]	[MPa]
B ref	5.1	0,947	421		445	
B ref	5.2	0,947	410	407	432	429
B ref	5.3	0,947	389		411	
B 12 24	11.1	0,947	748		789	
B 12 24	11.2	0,947	631	727	666	767
B 12 24	11.3	0,947	802		846	
B 12 200	17.1	0,947	672		710	
B 12 200	17.2	0,947	639	675	674	712
B 12 200	17.3	0,947	712		752	
B 13 24	35.1	0,947	973		1027	
B 13 24	35.2	0,947	763	881	805	930
B 13 24	35.3	0,947	907		957	
B 13 200	41.1	0,947	787		831	
B 13 200	41.2	0,947	916	847	966	894
B 13 200	41.3	0,947	837		884	



Obr. 84 Průměrné hodnoty naměřených maximálních sil a přepočítané hodnoty maximálních napětí pro vzorky čedičových rovingů



Obr. 85 Graf znázorňující průběh zatěžování čedičových rovingů bez povrchové úpravy

Závěr

Podstatou zkoušky byla analýza vlivu dvou různých alkalických roztoků na tahovou pevnost vláken ve dvou různých časových intervalech. Výsledky tahových zkoušek ukázaly zajímavé výsledky v podobě nárůstu pevnosti vzorků skla a čediče vystavené alkalickému prostředí. Skleněná vlákna vystavená vysokým pH vykazovala mírnou povrchovou korozi, což se ukazuje jako pozitivní efekt. Trhliny mechanického původu vzniklé během výroby a manipulace se vzorky se vlivem vysokého pH zaoblují a dochází k jejich zacelení. Výsledkem je pak zpevnění celého svazku a nárůst konečné pevnosti při tahových zkouškách. Čedič vykazoval podobné výsledky jako sklo. Jeho nárůst pevnosti při vystavení vysokému pH se podobá trendu u skleněných vláken. O jeho chování však velmi rozhoduje jeho složení a nelze tyto výsledky zcela generalizovat, jak tomu jde u skla. Z uvedených vláken se ukazuje uhlík jako jediný odolný materiál vůči jakémukoli alkalickému prostředí.

Výsledky vykazují jistý trend, který by však bylo dobré ověřit ještě několika časovými intervaly a infračervenou spektroskopií (FTIR) jak na narušených vláknech, tak na vláknech referenčních k určení přesného degradačního procesu. Dá se předpokládat, že po delší době vystavení alkalickému roztoku dojde ke ztelnějšímu narušení vláken z AR skla a čediče a k výraznějším změnám v mechanických vlastnostech.

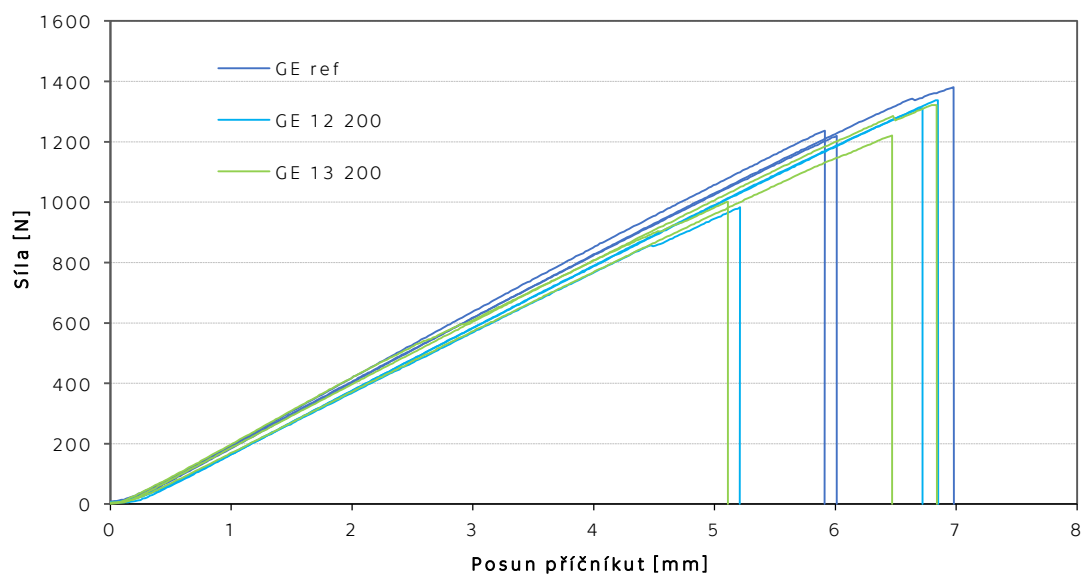
5.8.2.4 Výsledky tahové zkoušky rovingů s povrchovou úpravou

Sklo

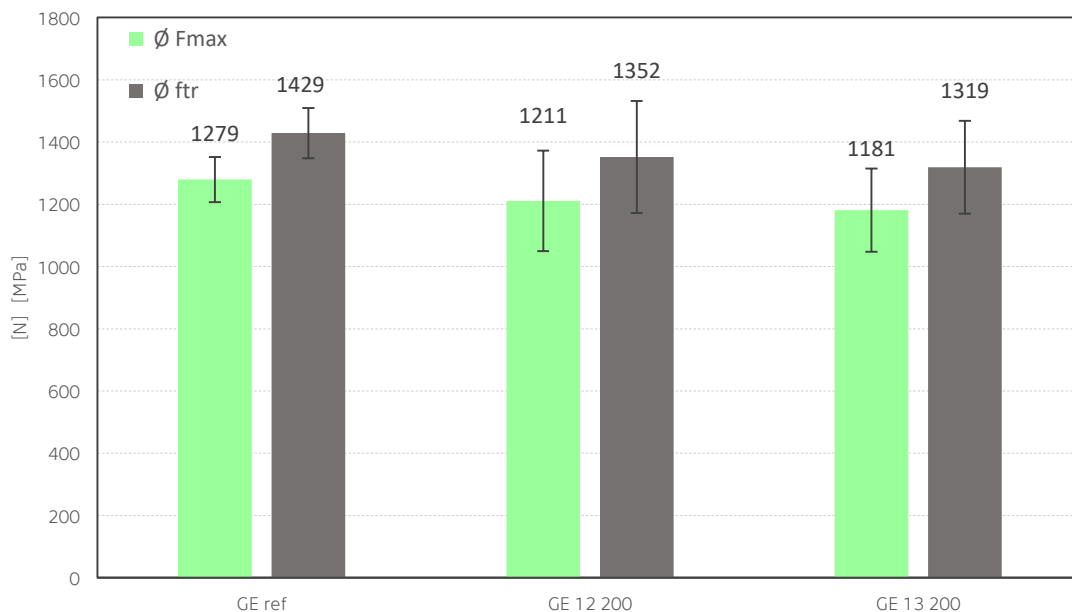
Z tabulky 26 a grafů na obr. 86 a 87 jsou výsledky tahových zkoušek skleněných rovingů s povrchovou úpravou z epoxidové pryskyřice Sikafloor 156®. Graf 87 ukazuje průběh zatěžovací zkoušky, tj. závislost síly na posunu příčnicku. Průměrné hodnoty maximálních dosažených sil během zatěžování jsou téměř stejné u vzorků referenčních jako u vzorků zatížených různými alkalickými roztoky. Liší se řádově o 4-6 %. Z výsledků je zřejmé, že epoxidová pryskyřice tvoří dobrou ochranu vláken před tímto agresivním prostředím.

Tab. 26 Tabulka výsledků tahových pevností skleněných rovingů s povrchovou úpravou z epoxidové pryskyřice

Označení	Číslo vzorku	A_r	F_{max}	$\emptyset F_{max}$	f_{tr}	$\emptyset f_{tr}$
		[mm]	[N]	[N]	[MPa]	[MPa]
GE ref	2.1	0,896	1381		1542	
GE ref	2.2	0,896	1237	1279	1382	1429
GE ref	2.3	0,896	1220		1362	
GE 12 200	14.1	0,896	1311		1464	
GE 12 200	14.2	0,896	1338	1211	1494	1352
GE 12 200	14.3	0,896	983		1098	
GE 13 200	38.1	0,896	1322		1476	
GE 13 200	38.2	0,896	1002	1181	1118	1319
GE 13 200	38.3	0,896	1221		1363	



Obr. 86 Graf závislosti síly na posunu příčnicku u skleněných vláken s povrchovou úpravou z epoxidové pryskyřice



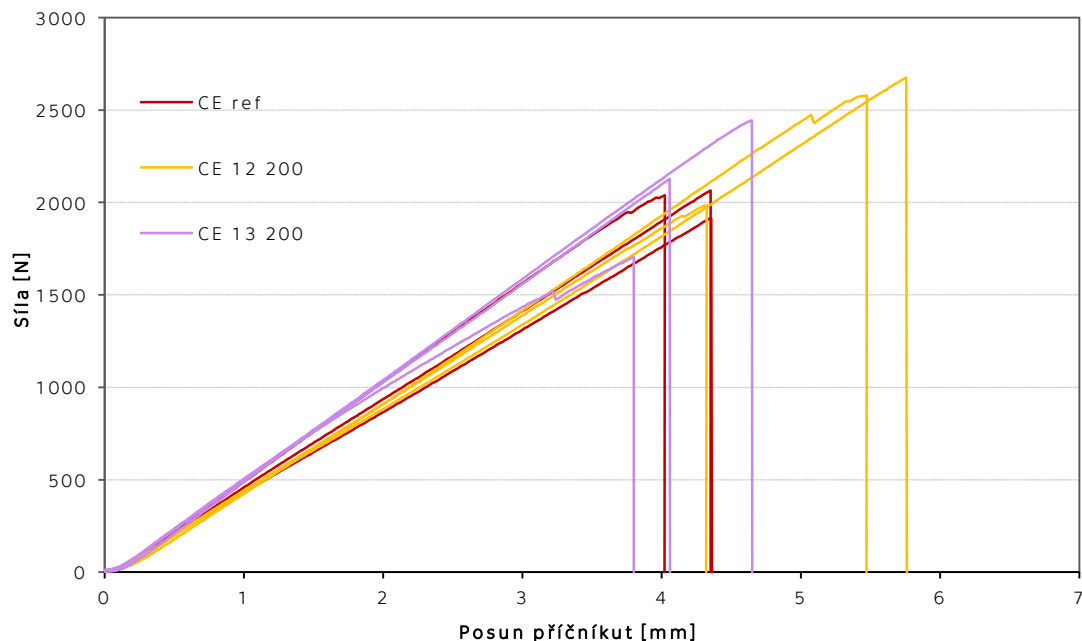
Obr. 87 Průměrné hodnoty maximálních dosažených sil a přepočítané hodnoty maximálního napětí pro skleněná vlákna s povrchovou úpravou z epoxidové pryskyřice

Uhlík

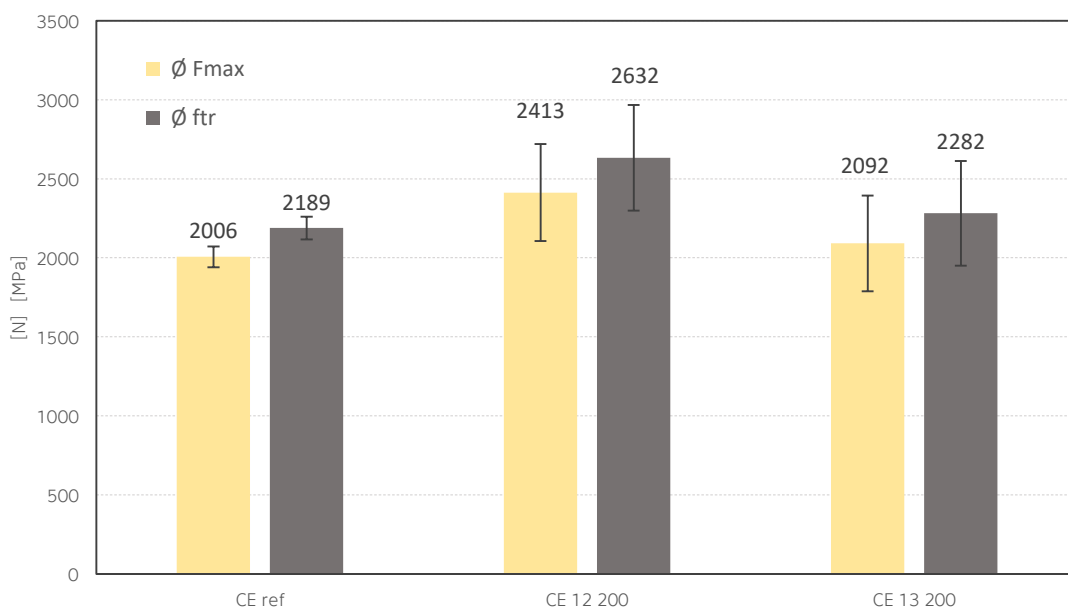
Výsledky tahových zkoušek uhlíku vykazují stejný trend jako zkoušky skleněných vláken. Zprůměrované výsledky tahových zkoušek jsou patrné z obr. 89. Výsledky se různí o cca 13-16 %, což není způsobeno alkalickým prostředím, ale počátečním stavem vláken a způsobem přípravy vzorků.

Tab. 27 Tabulka výsledků tahových pevností uhlíkových rovingů s povrchovou úpravou z epoxidové pryskyřice

Označení	Číslo vzorku	A_r	F_{max}	$\bar{\sigma} F_{max}$	f_{tr}	$\bar{\sigma} f_{tr}$
		[mm]	[N]	[N]	[MPa]	[MPa]
CE ref	4.2	0,917	2039		2225	
CE ref	4.3	0,917	1915	2006	2089	2189
CE ref	4.4	0,917	2065		2253	
CE 12 200	16.1	0,917	1983		2164	
CE 12 200	16.2	0,917	2579	2413	2813	2632
CE 12 200	16.3	0,917	2677		2920	
CE 13 200	40.1	0,917	2127		2320	
CE 13 200	40.2	0,917	1704	2092	1859	2282
CE 13 200	40.3	0,917	2444		2666	



Obr. 88 Graf závislosti síly na posunu příčnicků u uhlíkových vláken s povrchovou úpravou z epoxidové pryskyřice



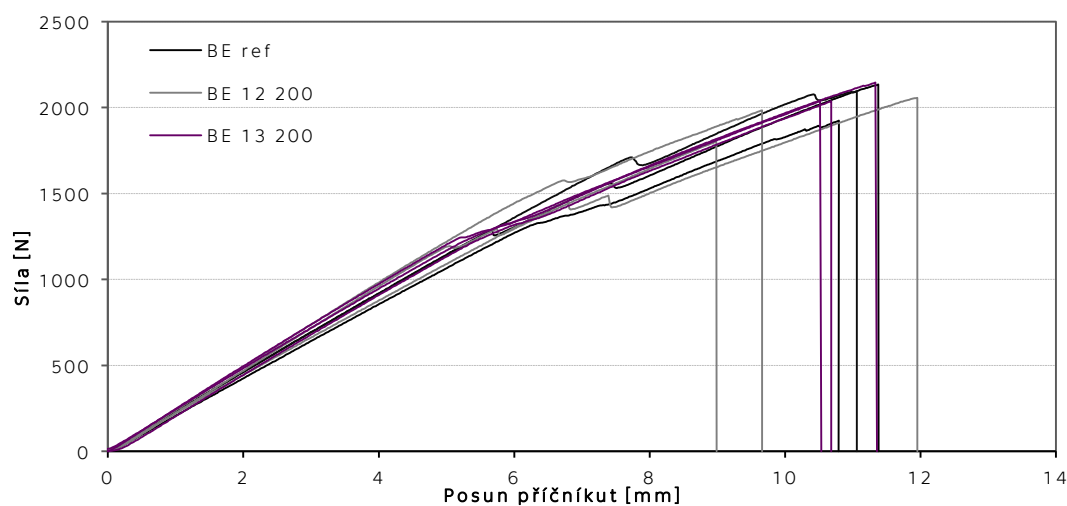
Obr. 89 Průměrné hodnoty maximálních dosažených sil a přepočítané hodnoty maximálního napětí pro uhlíková vlákna s povrchovou úpravou z epoxidové pryskyřice

Čedič

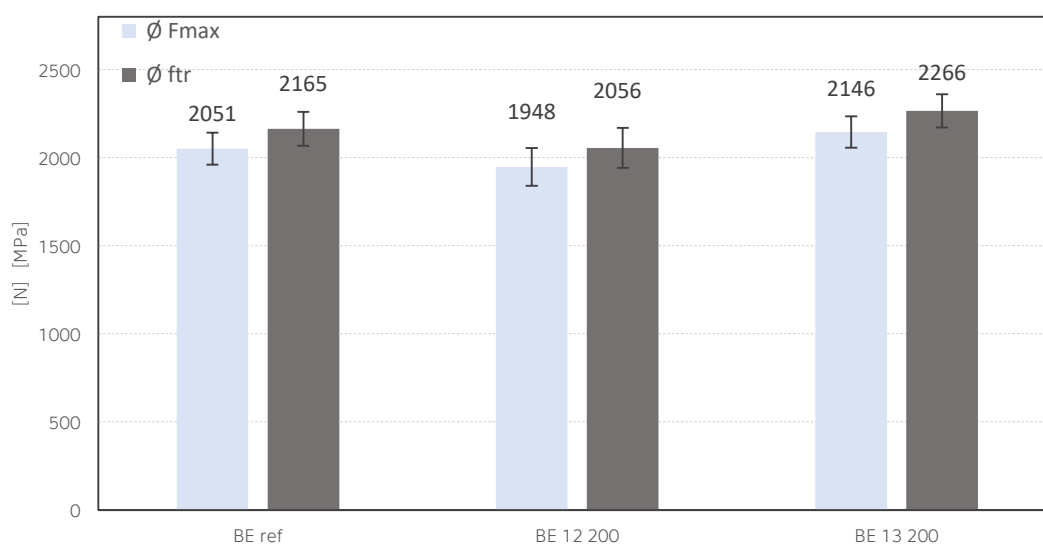
Průměrné výsledky tahových zkoušek čediče se různí o 5-9 %. Opět se ukazuje, že epoxidová pryskyřice tvoří dobrou ochranu vláken před agresivním alkalickým prostředím. S takovou úpravou vláken nemá alkalické prostředí vliv na jejich mechanické parametry, což se potvrdilo i snímky z elektronového mikroskopu.

Tab. 28 Tabulka výsledků tahových pevností čedičových rovingů s povrchovou úpravou z epoxidové pryskyřice

Označení	Číslo vzorku	A_r [mm]	F_{max} [N]	$\emptyset F_{max}$ [N]	f_{tr} [MPa]	$\emptyset f_{tr}$ [MPa]
BE ref	6.1	0,947	1924		2031	
BE ref	6.2	0,947	2135	2051	2254	2165
BE ref	6.3	0,947	2093		2209	
BE 12 200	18.1	0,947	2057		2171	
BE 12 200	18.2	0,947	1985	1948	2095	2056
BE 12 200	18.3	0,947	1802		1902	
BE 13 200	42.1	0,947	2037		2150	
BE 13 200	42.2	0,947	2145	2146	2265	2266
BE 13 200	42.3	0,947	2256		2382	



Obr. 90 Graf závislosti síly na posunu příčnicku u čedičových vláken s povrchovou úpravou z epoxidové pryskyřice



Obr. 91 Graf maximální dosažené síly a přepočítaná hodnota maximálního napětí pro uhlíková vlákna s povrchovou úpravou z epoxidové pryskyřice

Závěr

Tahovými zkouškami se potvrdily výsledky z elektronového mikroskopu. Na snímcích SEM vykazovala epoxidová pryskyřice Sikafloor 156® dostatečnou ochranu vláken před alkalickým prostředím. Tahové zkoušky ukázaly téměř stejné výsledky u vzorků vystavených alkalickým prostředím jako u vzorků referenčních. Epoxidová pryskyřice nejen homogenizuje vlákna a dává jim pevný tvar, který je výhodný při manipulaci s výztužemi, ale zajišťuje dobrou ochranu vláken před různým alkalickým prostředím o pH až 13,5.



6 Environmentální hodnocení TRC

6.1 Vliv betonových konstrukcí na životní prostředí

Stavebnictví se řadí mezi největší spotřebitele materiálových zdrojů, producenty odpadů a škodlivých emisí na světě. Stavby a stavební konstrukce mají významný dopad na životní prostředí jak v přímém okolí, tak na životní prostředí jako celek. Tyto vlivy by se daly rozdělit na několik úrovní: globální, regionální a lokální. Na globální úrovni se zabýváme např. poškozováním ozonové vrstvy, skleníkovým efektem a globálním oteplováním. Na regionální úrovni řešíme problémy s okyselováním prostředí, eutrofizací vod a na lokální úrovni např. spotřebu místních zdrojů surovin zejména těch neobnovitelných a vody [14].

O betonu je všeobecně známo, že je to druhý nejpoužívanější materiál na světě hned po vodě. Podle studie [2] z roku 2004 se odhadovala celosvětová produkce betonu kolem 11 miliard tun ročně. V roce 1963 to však bylo ještě pouze 0,5 miliardy tun. Podle [3] vzrostla celosvětová produkce betonu v posledních 50 letech více než 12 krát a je možné očekávat další nárůst. Stále rozsáhlejší použití betonu ve stavebnictví pro jeho nesporné výhody má výrazný vliv na životní prostředí. Ten je hodnocen jednak dle přímé spotřeby energie a produkce emisí, které jsou součástí provozu budovy, tak dle energií a emisí svázaných, tj. spojených se vznikem a existencí stavebního materiálu samotného (těžba surovin, výroba materiálu, doprava, použití v konstrukci apod.). S nastupující výstavbou nízkoenergetických a pasivních staveb začínají být svázané energie a svázané emise významnou složkou v hodnocení životního cyklu celé stavby. Ekologická zátěž, která vzniká při výrobě betonu, resp. železobetonu a jeho jednotlivých složek není zanedbatelná. Významnou podíl představuje používání ocelové výztuže. Stavebnictví a jeho produkty jsou odpovědné za 30% z celkové produkce emisí CO₂ v EU [14]. Výroba cementu a oceli má v tomto ohledu značnou

roli. Optimalizace spotřeby betonu se proto stalo jedním z velmi diskutovaných témat posledních let [163, 164].

Prvním legislativně platným dokumentem v České Republice, který se zabývá dopadem staveb na životní prostředí je „Nařízení evropského parlamentu a rady (EU) č. 305/2011“ [165] v němž je mimo jiné zakotveno, že „*Stavba musí být navržena, provedena a zbourána takovým způsobem, aby bylo zajištěno udržitelné využití přírodních zdrojů*“ a zabývá se otázkou opětovného využití nebo recyklovatelností staveb stejně jako použitím surovin a materiálů šetrných k životnímu prostředí. V dnešní době je stavební činnost celkově vázána pravidly udržitelného rozvoje, která jsou zakotvena v dokumentu „Strategický rámec Česká Republika 2030“ [166], schváleném vládou roku 2017. Tímto dokumentem se ČR zavázala k přijetí globální rozvojové agendy.

Přístupů k výše zmíněné problematice vztahu betonových konstrukcí k životnímu prostředí je hned několik. Jedním z nich je zřejmě varianta náhrady betonu zcela jinými materiály, to však není v mnoha případech možné vzhledem k nesporným výhodám, jaké beton, resp. železobeton oproti jiným materiálům nabízí. Druhou možností je používání vysokohodnotných materiálů, vhodně optimalizovaných průřezů jednotlivých prvků [4] či náhrada ocelové výztuže nekovovými výztužemi.

Textilní beton řeší jak otázku náhrady oceli, tak značnou úsporu betonu. Přestože vysokohodnotný beton používaný pro prvky TRC je celkově environmentálně náročnější než běžný beton hlavně z důvodu obsahu velkého množství cementu a jemných příměsí, v případě TRC je ho použito několikanásobně méně z důvodu minimálního krytí textilní výztuže. Tím je výrazně snížena spotřeba betonu, ale i celkové množství přepravovaného materiálu. V hodnocení celého životního cyklu je doprava jedním z klíčových parametrů. Započítáme-li navíc několikanásobnou životnost prvků z TRC oproti prvkům z běžného betonu, ukazuje se tento kompozitní materiál jako velmi efektivní z hlediska environmentálních dopadů.

6.2 Environmentální značení

Podle ČSN EN ISO 14020 [167] environmentální značka nebo prohlášení udává environmentální aspekty daného výrobku či služby. Hodnověrná značení jsou realizována podle norem ČSN EN ISO 14020 [167] a navazujícími normami ČSN EN ISO 14021 [168], ČSN EN ISO 14024 [169] a ČSN ISO 14025 [170]. Existují tři úrovně environmentálního značení: Environmentální značení I. typu (tzv. ekoznačka) [169], environmentální značení II. typu (vlastní environmentální tvrzení) [168] a environmentální značení III. typu (tzv. environmentální prohlášení o produktu). Pro stavby a stavební prvky se nejvíce používá značení typu III.

Environmentální prohlášení typu III dle ČSN EN ISO 14025 [170] je nejčastěji označováno jako environmentální prohlášení o produktu značené jako EPD (Environmental Product



Declaration). Jedná se o obsáhlý dokument, který udává přesné vyčíslení skutečných environmentálních aspektů a dopadů hodnoceného prvku s ohledem na celý jeho životní cyklus. Podkladem pro jeho sestavení je studie LCA (Life Cycle Assessment) vypracovaná dle ČSN EN ISO 14040 [171] a ČSN EN ISO 14044 [172].

Od roku 2014 je v platnosti doplnění základní normy ČSN EN ISO 14025 o normu ČSN EN 15804 +A1 Udržitelnost staveb - Environmentální prohlášení o produktu - Základní pravidla pro produktovou kategorii stavebních produktů [173], která definuje základní postupy tvorby EPD v oblasti stavebních výrobků, poskytuje základní pravidla produktové kategorie (PCR) pro EPD. Zmíněná norma zajišťuje harmonizovaný způsob hodnocení konkrétního stavebního výrobku nebo služby, jehož data jsou pak lépe porovnatelná. Speciálně pro betonové konstrukce byla v roce 2018 přijata evropská norma ČSN EN 16757 Udržitelnost staveb - Environmentální prohlášení o produktu - Pravidla produktové kategorie pro beton a betonové prvky [174]. Tato norma doplňuje základní pravidla pro produktové kategorie stavebních výrobků stanovená v [177] pro beton a betonové prvky pozemních a inženýrských staveb. Tento dokument definuje posuzovací parametry, fáze a způsob posuzování dopadů.

Existuje několik EPD pro betonové fasádní prvky vyztužené skleněnými vlákny. Pro TRC však EPD zatím neexistují, neboť není na světě mnoho firem, které by takovéto fasádní prvky vyráběly. Pro širší komercializaci TRC fasád nejen v České republice je nezbytné se tímto tématem zabývat a vytvořit ucelené výsledky v podobě environmentálního prohlášení.

6.3 LCA metoda

Zkrácené označení LCA z anglického Life Cycle Assessment představuje informační analytickou metodu posuzování životního cyklu produktu nebo služby z pohledu působení na životní prostředí. S její pomocí je možné určit všechny vlivy na životní prostředí od těžby nerostných surovin přes dopravu, výrobu, užívání a likvidaci. Je to základní metodika pro hodnocení environmentální kvality všech betonových konstrukcí. Výsledky se liší především zvolenými systémovými hranicemi a použitou databází. Metoda LCA má pevně danou strukturu, provádí se dle normy ČSN EN ISO 14040 [171] a skládá se ze čtyř základních kroků:

- (a) Stanovení cíle a rozsahu studie LCA
- (b) Inventarizace životního cyklu
- (c) Posuzování dopadů
- (d) Interpretace výsledků

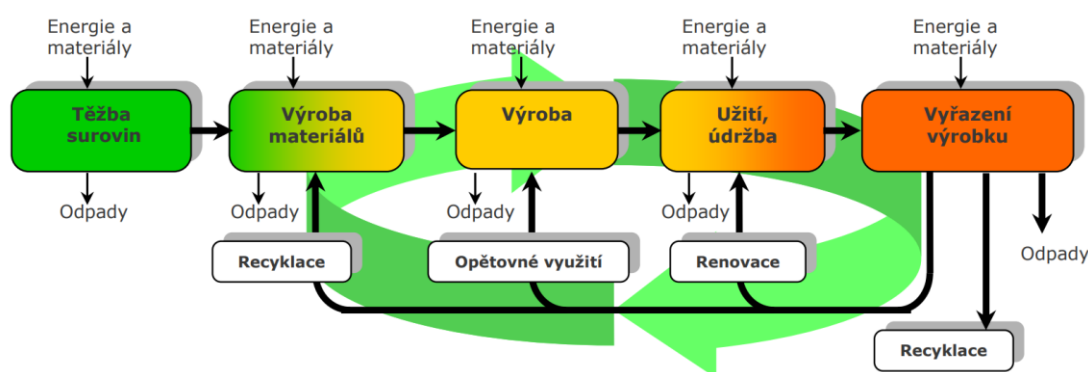
V první fázi se stanoví předmět studie, cíle, druh použití, význam a koncový uživatel. Dále se stanoví rozsah na dvou úrovních: na úrovni technické specifikace, kde se definuje funkce, referenční tok, hranice systému či alokace a na úrovni procedurálních kroků souvisejících s

vypracováním studie, jako je popis zvolených metodických postupů, určení zdrojů a použitých dat.

Inventarizace životního cyklu (LCI) je druhou fází LCA. Slouží k vyčíslení množství elementárních toků uvolněných během životního cyklu produktů do životního prostředí. Její součástí je shromáždění údajů nezbytných k naplnění cíle studie a výběru určitého druhu výpočtu.

Fáze posuzování dopadů je třetí fází LCA a zabývá se měřitelným porovnáním environmentálních dopadů pomocí nových kvantifikovatelných veličin označených jako kategorie dopadu. Jednotlivé kategorie dopadu jsou značeny počátečními písmeny jejich jednotlivých anglických překladů, např. GW - globální oteplování (angl. Global Warming) nebo OD - úbytek stratosférického ozónu (angl. Ozone Deflection) a další.

Poslední fází je fáze Interpretace výsledků. Zde jsou výsledky shrnuty a diskutovány. Významná zjištění se zpracují do vhodné interpretovatelné verze, učiní se určité závěry a možná doporučení pro zlepšení v souladu s definovaným cílem studie [171, 175].



Obr. 92 Životní cyklus výrobku a jeho fáze [176]

6.4 Aplikace LCA na TRC

6.4.1 Cíl a rozsah

LCA metoda by měla v ideálním případě zahrnovat všechny životní fáze posuzovaného prvku od těžby prvotních surovin, dopravy, výroby materiálů, fáze užívání až po konec životního cyklu. Hranice systému je v takovémto případě nastavena tzv. od kolébky do hrobu (cradle to grave). V některých případech lze hranice systému zúžit a použít tak hranici např. od kolébky k bráně závodu (cradle to gate), která zahrnuje těžbu surovin, dopravu, výrobu a skladování a někdy je možné použít i hranice systému od kolébky na místo stavby (cradle to site). Betonové prvky včetně prvků TRC by měly být hodnoceny podle ČSN EN 16757 [174] podle jejich celé životní fáze. Běžně tyto prvky a konstrukce zahrnují následující kroky:

Fáze výroby

- Získávání a těžba surovin (kamenivo, písek, voda, železo, čedič, sklářský písek, ...)
- Doprava surovin na místo dalšího zpracování
- Výroba dílčích materiálů (cement, výztuž, rovingy, textilie, epoxid, ...)
- Doprava do betonárny nebo prefy
- Výroba betonových prvků, ošetřování, skladování

Fáze výstavby

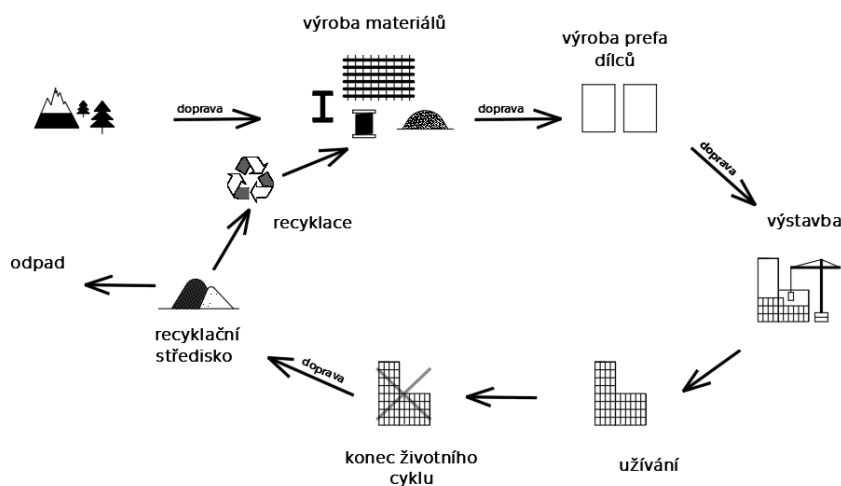
- Doprava betonu nebo prefabrikátů na stavbu
- Umístění na stavbě (ukládání, čerpání, montáž, jeřáb, ošetřování, ...)

Fáze užívání

- Užívání z hlediska emisí a životního prostředí
- Údržba
- Výměna
- Čištění povrchů u pohledových betonů

Fáze konce životního cyklu

- Demolice
- Demontáž
- Recyklace
- Odvoz na skládku



Obr. 93 Životní cyklus fasády z TRC

6.4.2 Inventarizace

Ve fázi inventarizační analýzy jsou zjišťována a vyčíslena data týkající se všech materiálových a energetických toků. Vstupní data mohou být získána z veřejných databází nebo přímo od

výrobců jednotlivých materiálů. Ve stavebnictví se nejčastěji používají charakterizační modely CML 2001. Výstupem je sada hodnot označená jako inventarizační profil. Návrh, suroviny na výrobu betonu a výztuží i samotný proces výroby včetně dopravy se v každé zemi mírně liší stejně jako klimatické podmínky a technologie zpracování. V inventarizační fázi je proto nutné zohlednit národní specifika. Často se stává, že několik produktů sdílí jeden či více společných procesů jako např. režijní vstupy a výstupy. V takovýchto případech je použita tzv. alokace, která se provádí na základě různých alokačních pravidel jako je hmotnost nebo cena [177].

U textilních výztuží hraje velkou roli doprava, neboť převážná většina vláken je vyráběna v zahraničí a je do České republiky dovážena. Stejně tak mikrosilika a další složky TRC. Toto vše je sumarizováno ve fázi inventarizace.

6.4.3 Posouzení environmentálních dopadů TRC

Ve fázi posuzování environmentálních dopadů jsou jednotlivé výsledky inventarizační analýzy propojeny s konkrétními kategoriemi dopadu na životní prostředí pomocí tzv. indikátorů dopadů. Rozeznáváme dva druhy indikátorů kategorií: midpointové a endpointové. Midpointový indikátor určuje míru potenciálního škodlivého účinku. Endpointový indikátor navazuje na midpointový a udává konkrétní pozorovatelné poškození. Pro EPD se používají výhradně midpointové indikátory.

První fází při posuzování dopadů je tzv. klasifikace, kde jsou přiřazeny výsledky inventarizace jednotlivým kategoriím dopadu. V následující fázi charakterizace se se vyčíslí míra působení elementárních toků na jednotlivé kategorie dopadu podle charakterizačního modelu, což je definovaný postup, který vyjadřuje vliv elementárních toků na jednotlivé kategorie dopadů. K charakterizaci slouží charakterizační faktory (CF), někdy označované jako potenciály, pomocí kterých se jednotlivé látky přepočítají na látky referenční. Výsledek indikátoru kategorie dopadu se vypočítá jako součet výsledků indikátorů kategorie dopadu všech škodlivých látek ze vzorce [178]:

$$V_{XY} = \sum_i \left(CF_{i,XY} \cdot \sum_r m_i \right) \quad (4)$$

- Kde: V_{XY} je výsledek indikátoru kategorie dopadu XY,
 $CF_{i,XY}$ charakterizační faktor pro látku i a kategorii dopadu XY,
 m_i množství elementárního toku látky i,
i elementární toky,
r emisní zdroje.

7 Environmentální porovnání

7.1 Vstupní parametry pro výpočet

Tato kapitola se zabývá environmentálním porovnáním zkoumaných variant panelů z TRC pomocí metody LCA. Jejím cílem je porovnání subtilních fasádních panelů z TRC oproti běžně používaným betonovým fasádám vyztužených ocelovou výztuží (ORC) z hlediska vybraných základních potenciálů environmentálních dopadů. Pro všechny posuzované varianty je uvažována výroba v České republice a pro české klimatické podmínky. V analýze jsou započítány všechny vzdálenosti pro dopravu jednotlivých surovin a materiálů potřebných pro výrobu stejně jako energetické toky pro specifický způsob výroby.

Hranice systému

Hranice systému byla zvolena od kolébky do hrobu (cradle to grave). Posuzovány byly tedy všechny životní fáze jednotlivých variant: těžba surovin, doprava na výrobu, výroba dílčích materiálů, doprava do výroby prefabrikátů, výroba, ošetřování, doprava na stavbu, zabudování, užívání až po fázi konce životního cyklu. Práce je rozdělena na tři hlavní části: výrobu, užívání a konec životního cyklu. V závěru jsou jednotlivé varianty porovnány v celém životním cyklu, tedy součtem hodnot těchto zmíněných tří fází. Z experimentálních výsledků předchozích kapitol vyplývá i rámcová životnost porovnávaných variant, která je do hodnocení taktéž zahrnuta.

Funkční jednotka, referenční toky

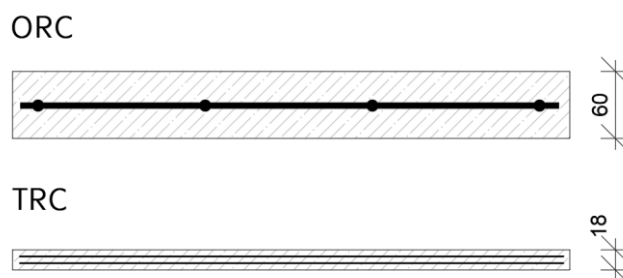
K porovnání byla zvolena experimentální fasáda určená jako alternativa opláštění experimentálního objektu OSEEB v Experimentálním centru energeticky efektivních budov v Buštěhradě nedaleko Prahy o rozměru 60 m². Pro všechny posuzované varianty je uvažován

stejný nosný rošt a stejný systém kotvení. Stejně tak se uvažuje stejná velikost fasádních panelů. Mění se pouze jejich minimální tloušťka. Byla zvolena vždy nejmenší možná tloušťka, jaká je pro danou variantu možná z hlediska konstrukčních, statických a funkčních zásad. Pro beton, resp. jeho složky a výztuže byly uvažovány deklarované váhové jednotky (t) a objemové jednotky (m³), které pak byly převedeny na stejného jmenovatele (t). U dopravy se uvažovaly tkm. Potenciální výrobní prefabrikátů, ve které by se prvky vyráběly, se nachází v Praze.

Porovnávané varianty

Porovnávány byly celkem 4 následující varianty:

V1	ORC ocel	Běžný beton vyztužený ocelovou kari sítí o průměru 6 mm s oky 150 x150 mm. Celková tl. fasádní desky 60 mm.
V2	TRC sklo	Vysokohodnotný beton vyztužený 2 vrstvami textilní výztuže z AR skla. Celková tl. fasádní desky 18 mm.
V3	TRC uhlík	Vysokohodnotný beton vyztužený 2 vrstvami textilní výztuže z uhlíku. Celková tl. fasádní desky 18 mm.
V4	TRC čedič	Vysokohodnotný beton vyztužený 2 vrstvami textilní výztuže z čediče. Celková tl. fasádní desky 18 mm.



Obr. 94 Porovnávané varianty (řez fasádními deskami)

Sběr dat

Soubor environmentálních informací o jednotlivých materiálech a souvisejících procesech byl shromážděn a stanoven v rámci studie provedené v centru CIDEAS ČVUT v Praze. Tyto údaje jsou založeny na regionálně dostupných materiálech a zdrojové údaje poskytly české výrobní společnosti. Energetické údaje a emisní faktory použité při hodnocení jsou z databáze GEMIS (Global Emission Model for Integrated Systems) [179]. Data o výrobě textilních vláken jsou určena podle metodiky hodnocení environmentálních dopadů CML 2001. Použity byly vždy indikátory na úrovni midpointů. Všechna data byla nahrána a organizována v programu iCFΔconcrete LCATool CZ [180], vyvinutém C. Fialou na Fakultě stavební Českého vysokého

učení technického v Praze. Pro transport byla data přepočítaná z energií a emisí pro MJ mechanické energie spalovacího vznětového turbo motoru, který pracuje s účinností 35 %. Energetické a emisní faktory byly převzaty z GEMIS 4.6 s databází CZ, D 2012 [179].

7.2 Výpočet

Výpočet probíhal v programu iCF Δ concrete LCATool CZ [180]. Tabulky 20 – 22 popisují inventarizační data pro jednotlivé fáze a jednotlivé porovnávané varianty.

Fáze výroby

Ve fázi výroby jsou zahrnuty všechny procesy od těžby surovin, jejich dopravu do výrobních závodů, proces zpracování, dopravu do ČR do místa výroby prefabrikátů, výrobu prefa dílců, ošetřování, skladování, dopravu na stavbu a jejich zabudování. Pro každý materiál byla spočítána přesná vzdálenost dopravovaného prvku od místa výroby po výrobu prefabrikátů, kde dochází k dalšímu zpracování. Následně je vyhodnocena doprava prefa dílců na místo stavby. Doprava je rozdělena na dálkovou a místní. Pro místní dopravu je uvažována vzdálenost do 30 km.

Tab. 29 Vstupní data pro fázi výroby

Výroba včetně montáže			V1	V2	V3	V4
Bilance vstupních dat hodnocených variant		jednotka	ORC	TRC sklo	TRC uhlík	TRC čedič
betony	beton ORC (C 30/37)	m ³	3,600	0	0	0
	beton HPC 1	m ³	0	1,080	1,080	1,080
složky betonu	cement CEM II/B-M (S-LL) 32,5	t	1,296	0,000	0,000	0,000
	cement CEM I 42,5 R	t	0,000	0,748	0,748	0,748
	technický mletý písek	t	0,000	1,057	1,057	1,057
	písek/šterk	t	7,056	0,000	0,000	0,000
	mikrosilika	t	0,000	0,192	0,192	0,192
	mikromletý křemen	t	0,000	0,359	0,398	0,398
	superplastifikátor	t	0,010	0,032	0,032	0,032
	voda	t	0,558	0,188	0,188	0,188
výztuž	ocelová výztuž	t	0,266	0,000	0,000	0,000
	skleněná textilie	t	0,000	0,023	0,000	0,000
	uhlíková textilie	t	0,000	0,000	0,016	0,000
	čedičová textilie	t	0,000	0,000	0,000	0,021
	epoxidový nátěr textilní výztuže	t	0,000	0,014	0,014	0,014
doprava	nákladní doprava dálková	tkm	662	326	324	376
	nákladní doprava místní	tkm	248	76	76	76

Fáze užívání

Přestože z výsledků experimentálního výzkumu vyplývá životnost TRC panelů několikanásobně větší, je třeba brát v potaz i morální životnost, která v případě designových prvků jako jsou fasádní panely, může být rozhodující. Z tohoto důvodu byla zvolena životnost 100 let pro všechny varianty. U prvků z TRC se za tuto dobu předpokládají běžné opravy a případnou výměnou 5 % prvků. V případě běžných panelů se počítá s opravami a výměnou prvků v řádu 15 %. K tomuto odhadu byla provedena citlivostní analýza ukazující vliv změny vstupních proměnných výpočtu na jeho výsledky

viz. kapitola 7.3.Tab. 30 Vstupní data pro fázi užívání

Užívání			V1	V2	V3	V4
Bilance vstupních dat		jednotka	ORC	TRC sklo	TRC uhlík	TRC čedič
hodnocených variant						
beton	beton ORC (C 30/37)	m ³	0,540	0,000	0,000	0,000
	beton HPC 1		0,000	0,054	0,054	0,054
složky betonu	cement CEM II/B-M (S-LL) 32,5	t	0,194	0,000	0,000	0,000
	cement CEM I 42,5 R	t	0,000	0,037	0,037	0,037
	technický mletý písek	t	0,000	0,053	0,053	0,053
	písek/šterk	t	1,058	0,000	0,000	0,000
	mikrosilika	t	0,000	0,010	0,010	0,010
	mikromletý křemen	t	0,000	0,018	0,018	0,018
	superplastifikátor	t	0,001	0,002	0,002	0,002
	voda	t	0,084	0,009	0,009	0,009
výztuž	ocelová výztuž	t	0,040	0,000	0,000	0,000
	skleněná textilie	t	0,000	0,001	0,000	0,000
	uhlíková textilie	t	0,000	0,000	0,001	0,000
	čedičová textilie	t	0,000	0,000	0,000	0,001
	epoxidový nátěr textilní výztuže	t	0,000	0,001	0,001	0,001
opravy	výměna fasádních prvků	t	1,378	0,131	0,130	0,131
	demontáž	t	1,378	0,131	0,130	0,131
doprava	nákladní doprava dálková	tkm	99	16	16	19
	nákladní doprava místní	tkm	79	8	8	8

Fáze konce životního cyklu

V konečné fázi životního cyklu jsou započítány práce spojené s demolicí včetně použití jeřábu a odvoz na skládku. Možnost recyklovatelnosti určitého druhu vyztuženého betonu není v hodnocení započítána.

Tab. 31 Vstupní data pro fázi konce životního cyklu

Konec životního cyklu			V1	V2	V3	V4
Bilance vstupních dat hodnocených variant		jednotka	ORC	TRC sklo	TRC uhlík	TRC čedič
betony	demolice betonové konstrukce	t	9,200	2,600	2,600	2,600
transport	nákladní doprava místní	tkm	276	78	78	78

Výsledky indikátorů ED

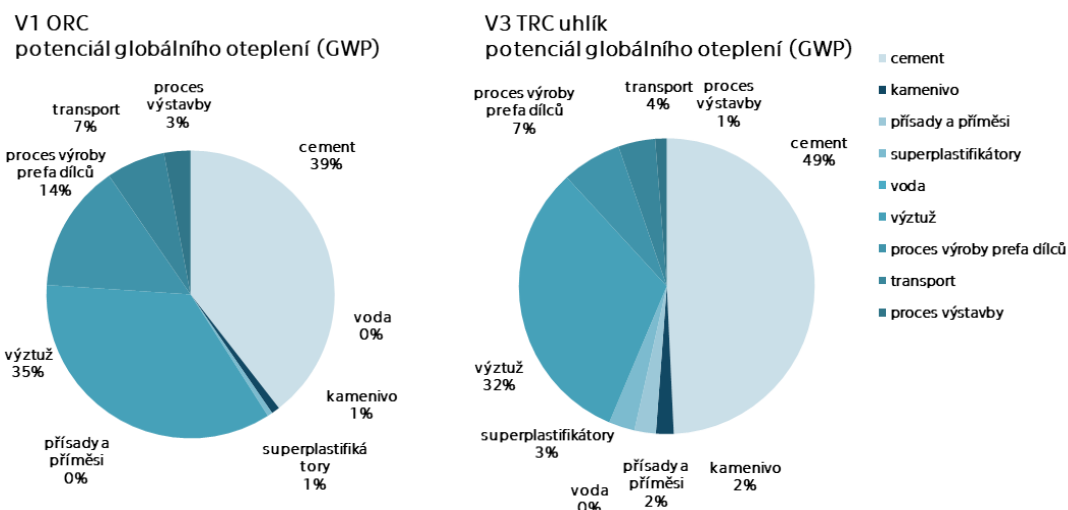
Vstupní data byla přepočítána podle metodiky popsané v kapitole 6.4.3. Porovnávané varianty byly hodnoceny pomocí vybraných potenciálů:

- Potenciál globálního oteplování – GWP [kg CO₂,ekv.]
- Potenciál acidifikace půdy a vody – AP [g SO₂,ekv.]
- Potenciál tvorby přízemního ozonu – POCP [g C₂H₄,ekv.]
- spotřeba primární energie – PEC [MJ]

Následující tabulky 23-25 ukazují agregované údaje o jednotlivých potenciálech environmentálních dopadů hodnocených variant v jednotlivých etapách životního cyklu.

Tab. 32 Agregovaná data pro fázi výroby

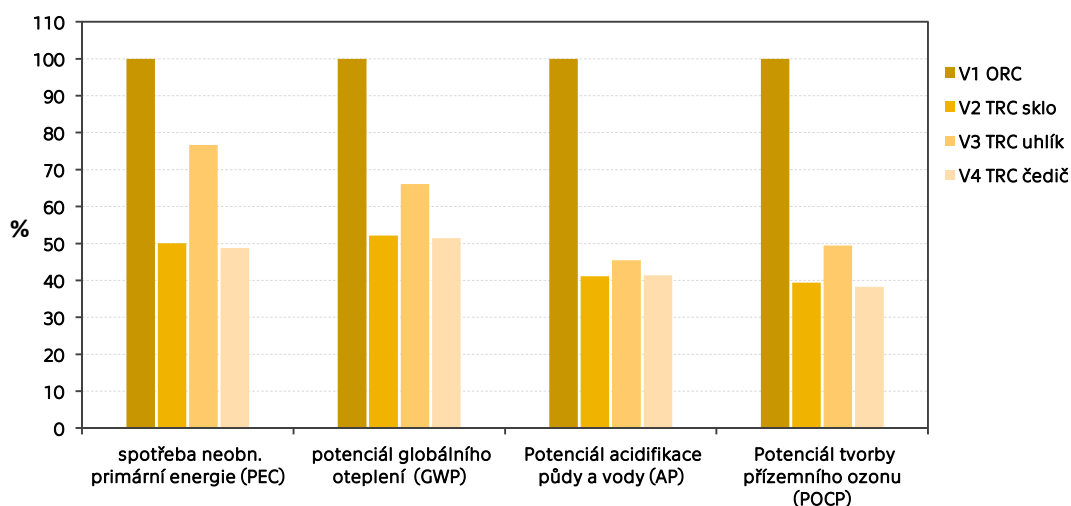
Výroba						
Agregovaná data hodnocených variant		jednotka	V1 ORC	V2 TRC sklo	V3 TRC uhlík	V4 TRC čedič
Spotřeba neobnov. primární energie (PEC)		MJ	19 310	9 665	14 798	9 410
Potenciál globálního oteplení (GWP)		kg	1 901	991	1 257	979
Potenciál acidifikace půdy a vody (AP)		g	8 791	3 613	3 993	3 635
Potenciál tvorby přízemního ozonu (POCP)		g	349	137	173	134



Obr. 95 Podíl jednotlivých složek či procesů ve fázi výroby na celkové hodnoty uhlíkové stopy

Grafy na obr. 95 ukazují podíl jednotlivých složek na uhlíkovou stopu. U běžného betonu hraje velkou roli výroba cementu (39 %) a výroba oceli (35 %). Značnou část představuje i samotná výroba prefa dílců (14 %). Doprava činí asi 7 % z celkového dopadu.

U TRC s uhlíkovou výztuží činí výroba cementu ještě větší podíl (49 %), výroba výztuží včetně nátěru z epoxidové pryskyřice činí asi 32 %. Výroba prefabrikátů představuje asi 7 % a doprava 4 %.



Obr. 96 Znárodnění procentuálního porovnání jednotlivých variant pro jednotlivé kategorie dopadu

Z porovnávaných grafů na obr. 96 jsou zřejmé menší environmentální dopady textilních betonů. Z porovnávaných variant nekovového vyztužení vychází jako nejhorší uhlík. Je to dáno jeho velmi náročným procesem výroby zmíněným v kapitole 2.1.1.2. Čedič a sklo mají podobné výsledky a vykazují nejmenší dopad na životní prostředí.

Tab. 33 Agregovaná data pro fázi užívání

Užívání					
Agregovaná data hodnocených variant	jednotka	V1	V2	V3	V4
		ORC	TRC sklo	TRC uhlík	TRC čedič
Spotřeba neobn. Primární energie (PEC)	MJ	3 193	511	768	499
potenciál globálního oteplení (GWP)	kg	307	55,6	64,9	51,0
Potenciál acidifikace půdy a vody (AP)	g	1 518	200	218	200
Potenciál tvorby přízemního ozonu (POCP)	g	62,5	7,8	9,6	7,6

Tab. 34 Agregovaná data pro fázi konce životního cyklu

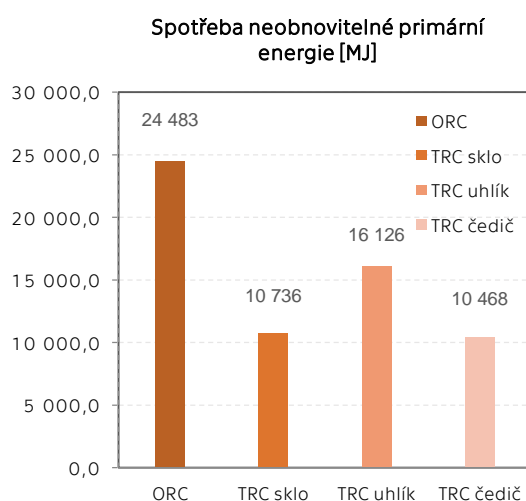
Konec životního cyklu					
Agregovaná data hodnocených variant	jednotka	V1	V2	V3	V4
		ORC	TRC sklo	TRC uhlík	TRC čedič
Spotřeba neobn. Primární energie (PEC)	MJ	1 981	560	560	560
Potenciál globálního oteplení (GWP)	kg	146	41,2	41,2	41,2
Potenciál acidifikace půdy a vody (AP)	g	1 327	375	375	375
Potenciál tvorby přízemního ozonu (POCP)	g	67,8	19,2	19,2	19,2

Souhrnné výsledky všech životních fází

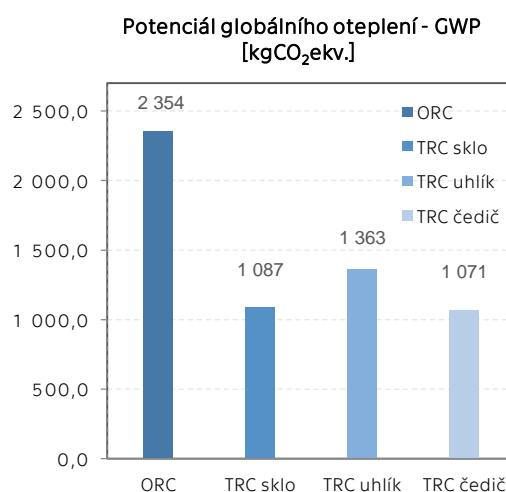
Všechna agregovaná data jednotlivých fází životního cyklu byla sečtena u všech hodnocených variant. Výsledky jsou uvedeny v tabulce 26. V grafu na obr. 84 je znázorněno porovnání spotřeby primární neobnovitelné energie pro všechny čtyři druhy fasád. Na obr. 85 je znázorněna uhlíková stopa též pro všechny porovnávané varianty fasád.

Tab. 35 Souhrnná agregovaná data pro celou životní fázi všech porovnávaných variant

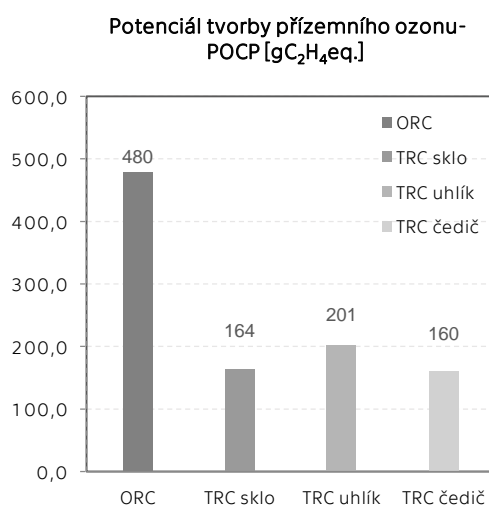
Celkem (výroba, užívání, konec životního cyklu)					
Agregovaná data hodnocených variant	jednotka	V1	V2	V3	V4
		ORC	TRC sklo	TRC uhlík	TRC čedič
Spotřeba neobn. Primární energie (PEC)	MJ	24 483	10 736	16 126	10 468
Potenciál globálního oteplení (GWP)	kg	2 354	1 087	1 363	1 071
Potenciál acidifikace půdy a vody (AP)	g	11 636	4 187	4 586	4 210
Potenciál tvorby přízemního ozonu (POCP)	g	480	164	201	160



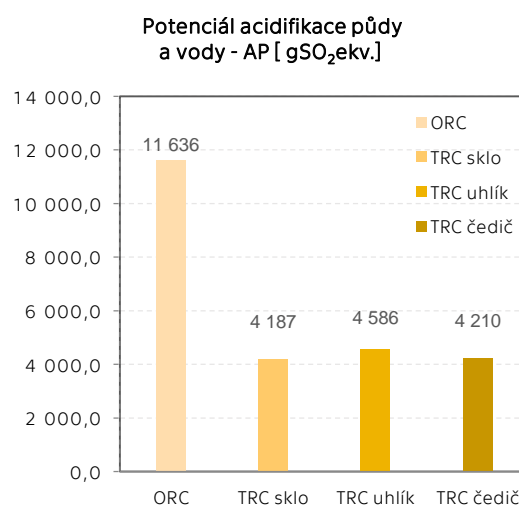
br. 97 Graf porovnání spotřeby primární neobnovitelné energie



Obr. 98 Graf porovnání potenciálu globálního oteplování

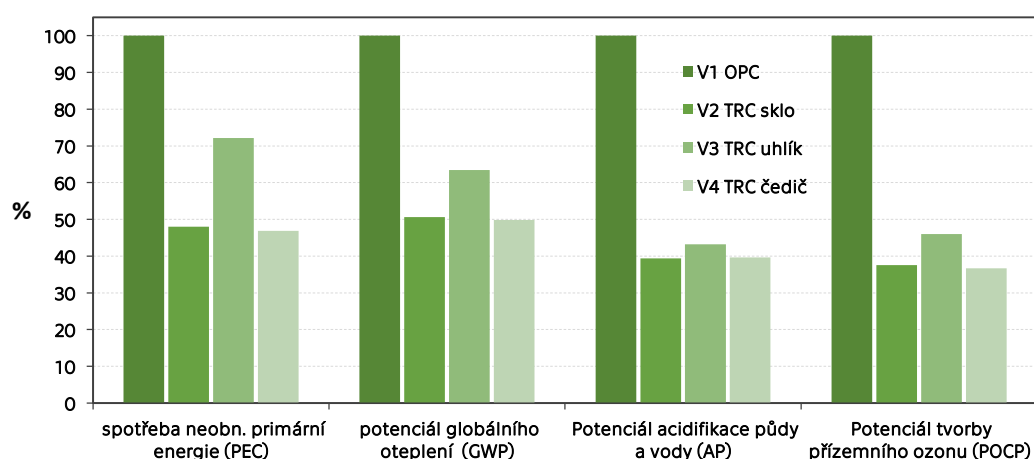


Obr. 99 Graf porovnání potenciálu tvorby přízemního ozonu



Obr. 100 Graf znázorňující potenciál acidifikace půdy a vody

Na grafech v obrázcích 97-100 jsou výsledky hodnocení všech variant s ohledem na celý jejich životní cyklus od kolébky do hrobu pro jednotlivé kategorie dopadu. Na grafu v obrázku 101 je pak procentuální porovnání všech variant ve všech posuzovaných kategoriích dopadu. Výsledky ukazují podobný trend jako ve fázi výroby.



Obr. 101 Porovnání výsledků všech potenciálů kategorií dopadů

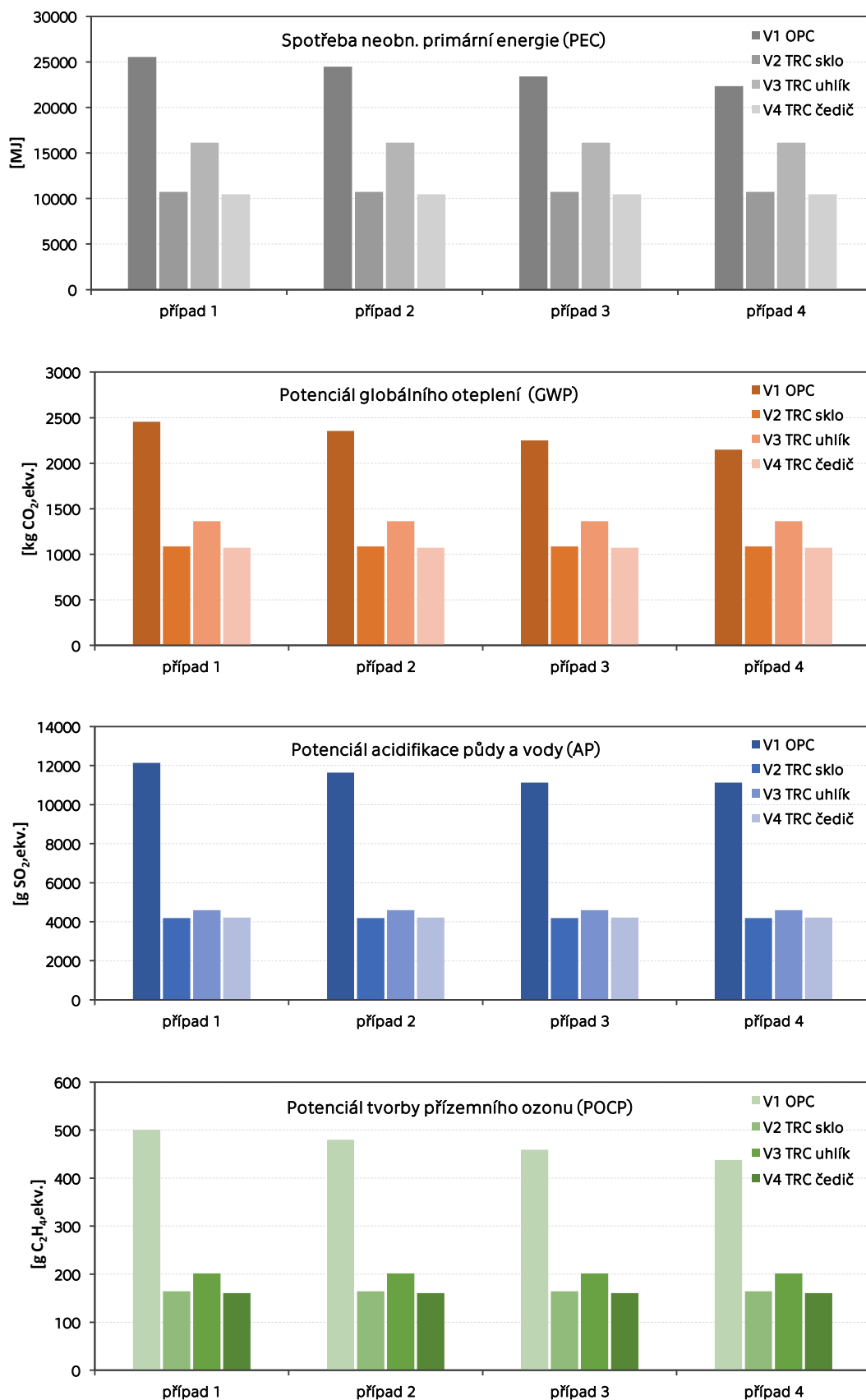
7.3 Citlivostní analýza

Ve fázi užívání byl stanoven předpoklad výměny fasádních panelů z TRC v řádu 5 % a fasádních panelů z běžného betonu v řádu 15 %. K ověření vlivu změny vstupních proměnných výpočtu na celkové výsledky dopadů byla provedena citlivostní analýza, která ověřuje čtyři různé kombinované vstupy (Případ 1-4) a znázorňuje jejich vliv na konečný výsledek. Pro názornost jsou uvedeny změny ve všech posuzovaných kategoriích dopadů.

Tab. 36 Kombinace případů pro citlivostní analýzu fáze užívání

Případy citlivostní analýzy	Výměna prvků fasády [%]			
	V1	V2	V3	V4
	ORC	TRC sklo	TRC uhlík	TRC čedič
Případ 1	20 %	5 %	5 %	5 %
Případ 2	15 %	5 %	5 %	5 %
Případ 3	10 %	5 %	5 %	5 %
Případ 4	5 %	5 %	5 %	5 %

Z prezentovaných grafů na obr. 102 je zřejmé, že vliv odhadu výměny fasádních prvků nemá zásadní vliv na konečné výsledky jednotlivých kategorií dopadu. I v nejméně příznivé variantě pro TRC, kdy uvažujeme výměnu stejnou pro všechny typy prvků (5 %) jsou zřejmé výrazně menší environmentální dopady textilního betonu.



Obr. 102 Výsledky citlivostní analýzy

7.4 Závěr environmentálního porovnání

Z uvedených grafů environmentální analýzy vyplývá pro posuzovaný případ výhoda použití vysokohodnotných betonů vyztužených technickými textiliemi oproti běžně používanému železobetonu. Výsledky však mohou být různé v závislosti na umístění výroby prefabrikátů a v závislosti na použitých zdrojích a nelze je proto zcela generalizovat. Nicméně výsledky ukazují na možný potenciál zlepšení environmentálních parametrů využitím TRC pro subtilní konstrukční prvky. V prezentovaném případě se po podrobném výpočtu celého životního cyklu ukazují fasády z textilního betonu jako šetrnější ve všech kategoriích dopadů v průměru o 40 %. Do výpočtu byla zahrnuta podrobná data o výrobě získaná od výrobců, data o dopravě jednotlivých prvků a zčásti jejich životnost. Pokud bychom uvažovali pouze absolutní životnost prvků a zanedbali životnost morální, výhoda prvků z TRC by se zněkolikanásobila, jelikož prvky z TRC jsou schopny odolávat několik stovek let, jak se prokázalo v experimentální části této práce. Takto podrobný výpočet se v mnoha případech liší od zjednodušených výpočtů prováděných pro TRC. V případě zjednodušených výpočtů, kde nejsou zahrnuty všechny procesní fáze, doprava ani užívání, se může TRC ukazovat jako stejně výhodný či dokonce horší. Je proto nesmírně důležité započítat všechny kroky výroby jednotlivých surovin, prvků a procesy celého životního cyklu. Větší životnost je bezesporu výhodou tohoto materiálu a v konečných výsledcích hraje velkou roli. Zaměříme-li se však pouze na fázi výstavby, která zahrnuje pouze proces výroby surovin, jejich zpracování, dopravu a výrobu prefa dílců včetně zabudování, je znatelná výhoda textilního betonu vidět již v této fázi. Nesporná výhoda je samozřejmě v menší hmotnosti konečných prvků a v náhradě oceli, což se odráží na dopravě a montáži.

Je však nutné podotknout, že prezentovaný typ textilního betonu má své rezervy a dopady na životní prostředí by se daly ještě zlepšit. Použitím HPC/UHPC se dostáváme na životnost, která v reálných podmínkách nebude nejspíše využita. Předpokládáme, že dříve, než se materiál rozpadne, dojde k jeho výměně z důvodu estetických. Materiál, který je moderní v 21. století nemusí mít oblibu o 100 či 200 let později. Environmentální dopady by se daly zlepšit na dvou dalších úrovních: použitím environmentálně příznivějších surovin a recyklací TRC. Z grafů na obr. 83 je vidět podíl uhlíkové stopy pro jednotlivé složky ve fázi výstavby. Pro fasádu z textilního betonu hraje největší roli cement. Zajímavou otázkou by byla tedy částečná náhrada cementu jinými materiály a detailní porovnání z pohledu životnosti a hodnocení životního cyklu stejně jako otázka recyklace textilních betonů. Obecně se ukazuje TRC jako materiál, který má pro dané podmínky velmi dobrý potenciál z hlediska udržitelné výstavby a environmentálních dopadů.

8 Závěry a doporučení

Žijeme nyní v době, která nás nutí přemýšlet nad environmentálně šetrnými přístupy téměř na jakémkoli kroku našeho všedního dne. Stavebnictví hraje jednu z klíčových rolí z hlediska globálních environmentálních dopadů a beton tvoří jeho velkou část. Otázka environmentálního smýšlení v tomto odvětví je nyní více než důležitá. Environmentální náročnost betonu obecně je dána především environmentální náročností cementu v něm obsaženém a ocelí používanou k jeho vyztužení. Další složky již nenesou tak velký podíl, avšak jsou také důležité. Principů řešení tohoto problému je hned několik. Kromě snížení spotřeby betonu či náhrady cementu jinými materiály se nabízí otázka efektivního navrhování prvků s dlouhou životností a minimalizovaným průřezem při zachování alespoň stejných mechanických parametrů jako při klasickém přístupu. Textilní beton (TRC), který se skládá z vysokohodnotného betonu a textilní výztuže nabízí velký potenciál právě v tomto zmíněném přístupu. Vysokohodnotný beton má velkou pevnost v tlaku, dobrou mechanickou odolnost a dlouhou životnost. Nekovové výztuže umístěné v hlavním směru namáhání mají dostatečnou pevnost pro vyztužení betonu v tahu a nepotřebují krycí vrstvu jako ocel. Tím je, kromě jiného, možné výrazně snížit tloušťku určitého prvku a tím i množství přepravovaného materiálu a celkovou spotřebu betonu.

Práce je rozdělena na několik kapitol. Úvod a literární rešerše shrnuje poznatky a výsledky publikovaných výzkumů. Experimentální část se zabývá zkouškami ověřující trvanlivost TRC prvků a uzavírá jí kapitola o environmentálním hodnocení s podrobnou LCA analýzou celého životního cyklu TRC fasád od kolébky do hrobu.

Následující odstavce shrnují nejzásadnější dílčí závěry a poznatky zjištěné v průběhu řešení disertační práce.

- Z provedených mechanických zkoušek se ukazuje uhlík jako nejlepší materiál z hlediska tahových pevností. Nátěrem vláken epoxidovou pryskyřicí Sikafloor dochází k homogenizování svazku vláken a naměřené hodnoty dosazují téměř teoretické hodnoty pevnosti v tahu. Naměřená pevnost asi o 50-60 % větší než u skla a asi o 30-



40 % větší než u čediče. Využití potenciálu pevnosti jednotlivých rovingů je nutné zvážit při návrzích konkrétních prvků a vybrat optimální materiál.

- Směs vysokohodnotného betonu (HPC1) navržená v rámci disertační práce M. Kynčlové/Novotné před několika lety na Fakultě stavební ČVUT v Praze a používaná v Laboratoři Katedry pozemních staveb a Laboratoři kompozitních materiálů UCEEB se z hlediska zpracovatelnosti a pevnosti ukazuje jako vhodnou variantou pro aplikace TRC. Naměřená pevnost v tlaku se pohybuje kolem 130 MPa na vzorcích krychlí o hraně délky 100 mm a kolem 140 MPa na zlomcích hranolů.

Výsledky zkoušky urychlené karbonatace ukazují vysokou odolnost této směsi, neboť hloubka karbonatace byla naměřena jako nulová.

Z hlediska mrazuvzdornosti se ukazuje směs HPC1 jako velmi odolná. Vlivem zmrazovacích cyklů nedochází ani po 400 cyklech ke zhoršení tlakové pevnosti betonu. Velmi dobré výsledky vykazuje i zkouška odolnosti povrchu HPC1 vůči rozmrazovacím solím. Extrémně dlouhá zkouška s 800 zmrazovacími cykly ukazuje výbornou odolnost povrchu vůči tomuto nesilovému zatížení. V případě použití této směsi pro TRC fasádní panely, které jsou zmrazování a rozmrazování značně vystaveny, můžeme předpokládat jejich velkou a opravdu dlouhodobou odolnost, která několikrát převyšuje odolnost běžného betonu.

- Velká část práce byla věnována tématu alkalivzdornosti textilií. Technické textilie sice nepodléhají korozi vlivem karbonatace, ale na jejich degradaci může mít vliv vysoké pH, které se v betonu běžně vyskytuje a také vysoká teplota. Opomeneme-li teplotu za požáru, která by byla samostatným a samozřejmě důležitým tématem pro další práci, může se při použití TRC na fasády významně projevit teplota od přímého slunce v letních měsících. Ve velkém množství případů jsou v Laboratoři kompozitních materiálů UCEEB v Buštěhradě a na Fakultě stavební ČVUT v Praze vyráběny vlastní výztuže speciálních tvarů a požadavků. V takových případech jsou používána nekonečná vlákna (rovingy), která se následně opatřují nátěrem z epoxidové pryskyřice. Cílem zkoušky bylo ověřit celkovou alkalivzdornost vláken bez povrchové úpravy a následně i s povrchovou úpravou z hlediska mechanických vlastností a na mikroskopické úrovni.

- Výsledky mikroskopické analýzy ukazují, že z porovnávaných vzorků bez povrchové úpravy je uhlík jediným stálým materiálem, který odolává agresivnímu alkalickému prostředí. Jeho povrch zůstává neporušený i při zatížení vysokými teplotami. Skleněná vlákna podléhala korozi hlavně v prostředí s vyšším pH (13,4). Teplota hraje pro alkalické prostředí výrazný vliv. Z jejího působení se degradační procesy u skleněných vláken zněkolikanásobily. Čedičová vlákna ztelně degradovala již při pokojové teplotě alkalických roztoků, více však v roztoku NaOH o nižším pH (12,2). Teplota také ztelně ovlivnila degradační proces a tvorbu korozních produktů.

Snímky SEM vláken opatřených povrchovou úpravou z epoxidové pryskyřice Sikafloor®156 ukazují, že navržená úprava se ukazuje jako dobrá ochrana jakýchkoli zmíněných vláken před alkalickým prostředím. Dokonce i při extrémní teplotě 80 °C zůstávají rovingy stabilní a podle snímků z elektronového mikroskopu nenesou žádné

známky degradace. Při přípravě vzorků je nutné pečlivě opatřit povrch rovingu po celé jeho ploše a zajistit dostatečné prosycení. Neprosycené vzorky skla a čediče by mohly podléhat degradaci v místech bez dostatečné povrchové úpravy. Vrstva epoxidové pryskyřice slouží nejen jako dobrá homogenizace vláken ale také dobrý přechodový můstek pro další úpravu např. opískováním apod.

- Výsledky tahových zkoušek rovingů bez povrchové úpravy ukázaly zajímavé výsledky v podobě nárůstu pevnosti vzorků skla a čediče vystavené alkalickému prostředí pH 12,2 a 13,4. Skleněná vlákna vystavená vysokým pH vykazovala mírnou povrchovou korozi, což se jeví jako vcelku pozitivní efekt co se pevnosti týče. Ukazuje se, že trhliny mechanického původu vzniklé během výroby a manipulace se vzorky, se vlivem vysokého pH zaoblují a dochází k jejich zacelení. Výsledkem je pak zpevnění celého svazku a nárůst konečné pevnosti při tahových zkouškách. Čedič vykazoval podobné výsledky jako sklo. Jeho nárůst pevnosti při vystavení vysokému pH se podobá trendu u skleněných vláken. O jeho chování však velmi rozhoduje jeho složení a nelze tyto výsledky zcela generalizovat, jako tomu jde u skla. Z uvedených vláken se ukazuje uhlík jako jediný odolný materiál vůči jakémukoli alkalickému prostředí. Výsledky vykazují jistý trend, který by však bylo dobré ověřit ještě několika časovými intervaly a Infračervenou spektroskopii (FTIR) jak na narušených vláknech, tak na vláknech referenčních kurčení přesného degradačního procesu. Dá se předpokládat, že po delší době vystavení alkalickému roztoku dojde ke ztuhléjšímu narušení vláken z AR skla a čediče a k výraznějším změnám v mechanických vlastnostech.

Tahovými zkouškami rovingů s povrchovou úpravou se naopak potvrdily výsledky z elektronového mikroskopu. Na snímcích SEM vykazovala epoxidová pryskyřice Sikafloor 156® dostatečnou ochranu vláken před alkalickým prostředím. Tahové zkoušky ukázaly téměř stejné výsledky u vzorků vystavených alkalickým prostředím jako u vzorků referenčních. Epoxidová pryskyřice nejen homogenizuje vlákna a dává jim pevný tvar, který je výhodný při manipulaci s výztužemi, ale zajišťuje dobrou ochranu vláken před různým alkalickým prostředím o pH až 13,5.

- Rozsáhlou kapitolou je pak hodnocení prvků z TRC z hlediska environmentálních dopadů. Jejím cílem je porovnání subtilních fasádních panelů z TRC oproti běžně používaným betonovým fasádám vyztužených ocelovou výztuží (ORC) z hlediska vybraných základních potenciálů environmentálních dopadů. Z uvedených výsledků porovnávaných případů vyplývá výhoda použití TRC oproti běžně používanému železobetonu. Výsledky však nelze globálně zobecnit, protože se mohou různit použitými zdroji, umístěním výroby jak samotných surovin, tak hotových prefabrikátů a velmi záleží na místních podmínkách. Výsledky nicméně ukazují na možný potenciál zlepšení environmentálních parametrů využitím TRC pro subtilní konstrukční prvky. Například posuzovanými variantami se po podrobném výpočtu celého životního cyklu ukazují fasády z textilního betonu jako šetrnější ve všech kategoriích dopadů v průměru o 40 %. Pokud bychom uvažovali pouze absolutní životnost prvků a zanedbali životnost morální, výhoda prvků z TRC by se zněkolikanásobila, jelikož prvky z TRC jsou schopny odolávat několik stovek let, jak se prokázalo v experimentální části této práce. Takto podrobný výpočet se v mnoha případech liší



od zjednodušených výpočtů prováděných pro TRC. V případě zjednodušených výpočtů, kde nejsou zahrnuty všechny procesní fáze, doprava ani užívání, se může TRC ukazovat jako stejně výhodný či dokonce horší. Je proto nesporně důležité započítat všechny kroky výroby jednotlivých surovin, prvků a procesy celého životního cyklu. Větší životnost je bezesporu výhodou tohoto materiálu a v konečných výsledcích hraje velkou roli. Zaměříme-li se však pouze na fázi výroby, která zahrnuje pouze proces výroby surovin, jejich zpracování, dopravu a výrobu prefa dílců včetně zabudování, je znatelná výhoda textilního betonu vidět již v této fázi. Nesporná výhoda je samozřejmě v menší hmotnosti konečných prvků a v náhradě oceli, což se odráží na dopravě a montáži.

Jako každý nový materiál na počátku výzkumu i tento typ TRC má své rezervy a jeho environmentální dopad by se dal ještě zlepšit použitím environmentálně příznivějších surovin či možností recyklací TRC. Zajímavou otázkou by byla tedy částečná náhrada cementu jinými materiály a detailní porovnání z pohledu životnosti a hodnocení životního cyklu stejně jako otázka způsobu recyklace textilních betonů.

Textilní beton se v mnoha ohledech ukazuje jako vhodný materiál pro využití v 21. století. Jedná se o materiál, který má nesporné výhody z hlediska architektury a designu stejně jako z hlediska odolnosti a trvanlivosti. Pro dané podmínky má velmi dobrý potenciál z hlediska udržitelné výstavby a environmentálních dopadů. Je to materiál, který má velkou perspektivu nejen v použití na fasády, ale i pro různé konstrukční a nosné prvky. Pro jeho komercializaci a širší uplatnění na trhu je však nutné tento materiál ještě komplexněji prostudovat v rámci dalších navazujících výzkumů. Zejména je třeba se zaměřit na návrh nosných prvků z tohoto materiálu, kde je velmi důležitým aspektem požární odolnost. Důležitým tématem pro nosné prvky je také princip numerického modelování při statických návrzích. Nutností je pak vytvoření norem a předpisů pro možnost použití textilních betonů namísto klasických přístupů.

Reference

- [1] TRIANTAFILLOU, Thanasis. *Textile Fibre Composites in Civil Engineering*. Woodhead Publishing, 2016. ISBN 978-1-78242-469-7.
- [2] MEHTA, P. Kumar a Paulo J.M. MONTEIRO. *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. 3rd edition. McGraw -Hill Companies, 2004. ISBN 978-0-07-146800-8.
- [3] HÁJEK, Petr. Význam betonu a betonových konstrukcí z hlediska kritérií udržitelné výstavby. *Časopis stavebnictví: časopis stavebních inženýrů, techniků a podnikatelů*. 2007, 11–12.
- [4] MOBASHER, Barzin. *Mechanics of fiber and textile reinforced cement composites*. CRC press, 2011.
- [5] CAUBERG, Niki, Tine TYSMANS, Sigrid ADRIAENSSENS, Jan WASTIELS, Marijke MOLLAERT a Bachir BELKASSEM. Shell Elements of Textile Reinforced Concrete Using Fabric Formwork: A Case Study. *Advances in Structural Engineering*. 2012, 15(4), 677–689. ISSN 1369-4332.
- [6] TYSMANS, Tine, Bachir BELKASSEM, Sigrid ADRIAENSSENS, Jan WASTIELS a Niki CAUBERG. Shell elements of architectural concrete using fabric formwork—part b: case study. In: *Ninth international symposium on fiber reinforced polymer reinforcement for concrete structures, Sydney, Australia*. 2009.
- [7] TYSMANS, Tine, Sigrid ADRIAENSSENS, Heidi CUYPERS a Jan WASTIELS. Structural analysis of small span textile reinforced concrete shells with double curvature. *Composites Science and Technology*. 2009, 69(11), 1790–1796.
- [8] DE BOLSTER, E., H. CUYPERS, P. VAN ITTERBEECK, J. WASTIELS a W. P. DE WILDE. Use of hypar-shell structures with textile reinforced cement matrix composites in lightweight constructions. *Composites Science and Technology*. 2009, 69(9), 1341–1347.
- [9] ORTLEPP, Regine, Uwe HAMPEL a Manfred CURBACH. A new approach for evaluating bond capacity of TRC strengthening. *Cement and concrete composites*. 2006, 28(7), 589–597.
- [10] GRAF, Wolfgang, Andreas HOFFMANN, Bernd MÖLLER, Jan-Uwe SICKERT a Frank STEINIGEN. Analysis of textile-reinforced concrete structures under consideration of non-traditional uncertainty models. *Engineering Structures*. 2007, 29(12), 3420–3431.
- [11] BRÜCKNER, Anett, R. ORTLEPP a M. CURBACH. Anchoring of shear strengthening for T-beams made of textile reinforced concrete (TRC). *Materials and Structures*. 2008, 41(2), 407–418.
- [12] LAIBLOVÁ, Lenka, Ctislav FIALA, Michal ŽENÍŠEK, Petr HÁJEK, Tomáš VLACH a Magdalena NOVOTNÁ. Technical textiles as an innovative material for reinforcing of elements from high performance concretes (HPC). *Advanced Materials Research*. 2014.
- [13] HÁJEK, Petr, Magdalena NOVOTNÁ, Alexandru CHIRA, Ctislav FIALA, Tomáš VLACH a Lenka LAIBLOVÁ. Challenge of Textile Reinforced High Performance Concrete for Sustainable Construction. In: *Fib Symposium Proceedings. Copenhagen*. 2015.



- [14] FIALA, Ctislav. *Optimalizace betonových konstrukcí v environmentálních souvislostech*. CIDEAS-Centrum integrovaného navrhování progresivních stavebních konstrukcí, 2011.
- [15] BUTLER, Marko, Viktor MECHTCHERINE a Simone HEMPEL. Durability of textile reinforced concrete made with AR glass fibre: effect of the matrix composition. *Materials and structures*. 2010, 43(10), 1351–1368.
- [16] CUYPERS, Heidi, Jan WASTIELS, Petra VAN ITTERBEECK, E DE BOLSTER, Jeanette ORLOWSKY a Michael RAUPACH. Durability of glass fibre reinforced composites experimental methods and results. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2006, 37, 207–215.
- [17] BUTLER, Marko, Viktor MECHTCHERINE a Simone HEMPEL. Experimental investigations on the durability of fibre–matrix interfaces in textile-reinforced concrete. *Cement and Concrete Composites*. 2009, 31(4), 221–231. ISSN 0958-9465.
- [18] ALTMANN, Frank, Jan Uwe SICKERT, Viktor MECHTCHERINE a Michael KALISKE. A fuzzy-probabilistic durability concept for strain-hardening cement-based composites (SHCCs) exposed to chlorides: Part 1: Concept development. *Cement and Concrete Composites*. 2012, 34(6), 754–762.
- [19] ALTMANN, Frank a Viktor MECHTCHERINE. Durability design strategies for new cementitious materials. *Cement and Concrete Research*. 2013, 54, 114–125.
- [20] ABBAS, Safeer, Ahmed M. SOLIMAN a Moncef L. NEHDI. Exploring mechanical and durability properties of ultra-high performance concrete incorporating various steel fiber lengths and dosages. *Construction and Building Materials*. 2015, 75, 429–441.
- [21] NOBILI, Andrea. Durability assessment of impregnated Glass Fabric Reinforced Cementitious Matrix (GFRCM) composites in the alkaline and saline environments. *Construction and Building Materials*. 2016, 105, 465–471.
- [22] WILLIAMS PORTAL, Natalie. *Usability of Textile Reinforced Concrete: Structural Performance, Durability and Sustainability*. 2015. Disertační práce. Chalmers University of Technology.
- [23] V. FRAAS Solution in Textile [online]. 2019 [vid.2019-04-15]. Dostupné z: <https://solutions-in-textile.com/>
- [24] BRAMESHUBER, Wolfgang. *Report 36: Textile Reinforced Concrete - State-of-the-Art Report of RILEM TC 201-TRC*. RILEM Publications, 2006. ISBN 978-2-912143-99-0.
- [25] BARTOS, P. J. M. Sklovláknobeton e-GRC: Nová cesta ke zlepšení čistoty fasád a kvality ovzduší našich měst. *Beton TKS*. 2009, 9(2).
- [26] VILKNER, Gregor. *Glass Concrete Thin Sheets Reinforced with Prestressed Aramid Fabrics*. 2003. Dizertační práce. Columbia University.
- [27] BARTOŠ, Peter. Analysis of pull-out tests on fibres embedded in brittle matrices. *Journal of Materials Science* [online]. 1980, 15(12), 3122–3128. ISSN 1573-4803. Dostupné z: doi:10.1007/BF00550385
- [28] KOŘÍNEK, Zdeněk. Vlákna. *Kompozity* [online]. 2018. Dostupné z: <https://kompozity.webnode.cz/>



- [29] DONNINI, Jacopo, Valeria CORINALDESI a Antonio NANNI. Mechanical properties of FRCM using carbon fabrics with different coating treatments. *Composites Part B: Engineering*. 2016, 88, 220–228. ISSN 1359-8368.
- [30] PELED, Alva, Arnon BENTUR a Barzin MOBASHER. *Textile Reinforced Concrete*. CRC Press, 2017. ISBN 978-1-4665-5255-5.
- [31] MORGAN, Peter. *Carbon fibers and their composites*. CRC press, 2005. ISBN 978-0-429-11682-7.
- [32] HORROCKS, A. Richard a Subhash C. ANAND. *Handbook of Technical Textiles*. Elsevier, 2000. ISBN 978-1-85573-896-6.
- [33] How is Carbon Fiber Made? *Zoltek* [online]. 2017 [vid.2019-04-03]. Dostupné z: <http://zoltek.com/carbon-fiber/how-is-carbon-fiber-made/>
- [34] BHAT, Gajanan. *Structure and properties of high-performance fibers*. Woodhead Publishing, 2016. ISBN 978-0-08-100550-7.
- [35] CHUNG, Deborah D. L. *Carbon Fiber Composites*. Elsevier, 2012. ISBN 978-0-08-050073-7.
- [36] FRANK, Erik, Frank HERMANUTZ a Michael R. BUCHMEISER. Carbon fibers: precursors, manufacturing, and properties. *Macromolecular materials and engineering*. 2012, 297(6), 493–501.
- [37] CARBONFIBER & PRODUCTS. 炭素繊維協会 [online]. 2019 [vid. 2019-04-03]. Dostupné z: <https://carbonfiber.gr.jp/english/material/what.html>
- [38] WINKLER, F. Chemiefaser-Lexikon. Begriffe, Zahlen, Handelsnamen. Von R. BAUER und HJ KOSLOWSKI. Frankfurt am Main: Deutscher Fachverlag GmbH 1979. XV u. 168 S., brosch. DM 25,-. *Acta Polymerica*. 1980, 31(4), 274–274.
- [39] CARBON FIBER. ОАО «СветлогорскХимволокно» [online]. 2019 [vid.2019-04-20]. Dostupné z: <http://www.sohim.by/en/produksiya/uglerodnye-materialy/volokna/>
- [40] Carbon fibre. *Designing Buildings Wiki* [online]. 2019 [vid.2019-04-23]. Dostupné z: https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Carbon_fibre
- [41] VNOUČEK, Milan. *Kompozitní materiály* [online]. 2019 [vid.2019-04-23]. Dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/download/kompozity09_10.pdf
- [42] MOCHIDA, Isao a Shizuo KAWANO. Capture of ammonia by active carbon fibers further activated with sulfuric acid. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 1991, 30(10), 2322–2327. ISSN 0888-5885, 1520-5045.
- [43] JASSAL, Manjeet a Sourabh GHOSH. Aramid fibres - An overview. *Indian Journal of Fibre and Textile Research*. 2002, 27(3), 290–306.
- [44] *Kevlar® DuPont USA, Inspired by Stephanie Kwolek* [online]. [vid.2019-04-09]. Dostupné z: <http://www.dupont.com/products-and-services/fabrics-fibers-nonwovens/fibers/articles/joel-westfahl-story.html>
- [45] NATIONAL RESEARCH COUNCIL AT AL. High-Performance Structural Fibers for Advanced Polymer Matrix Composites. Washington DC. 2005. ISSN 978-0-309-38341-7.



- [46] KIESSLING, Alois a Max MATTHES. *Textil-Fachwörterbuch*. Fachverlag Schiele & Schoen, 1993. ISBN 978-3-7949-0546-1.
- [47] BASALT FIBER - TECHNOBASALT. *Basalt rebar, basalt fiber, basalt roving - Technobasalt* [online]. 2019 [vid. 2019-04-25]. Dostupné z: <http://technobasalt.com/our-products/basalt-fiber/>
- [48] CONTINUOUS BASALT FIBER. *BASALTEM.COM -- Basalt Fiber Equipment and Materials* [online]. 2019 [vid. 2019-04-25]. Dostupné z: <http://basaltfm.com/eng/fiber/info.html>
- [49] SINGHA, Kunal. A Short Review on Basalt Fiber. *International Journal of Textile Science*. 2012, 4(1), 19–28.
- [50] SIM, Jongsung, Cheolwoo PARK a Do Young MOON. Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures. *Composites Part B: Engineering*. 2005, 36(6–7), 504–512. ISSN 13598368.
- [51] TEXTILBETON05 | PROF. FEIX INGENIEURE GMBH. *Start | Prof. Feix Ingenieure GmbH* [online]. 2019 [vid. 2019-05-18]. Dostupné z: <https://www.feix-ingenieure.de/projekte/textilbeton/textilbeton05/>
- [52] FIBREGLASS MAT. *Faserverbundwerkstoffe | Composite Materialien - HACOTECH GmbH* [online]. 2019 [vid. 2019-05-18]. Dostupné z: <https://www.hacotech.com/en/products/composite-materials/fibreglass-mat-fibreglass-combi-mat/>
- [53] WHAT ARE NONWOVENS. *EDANA* [online]. 2019 [vid. 2019-05-18]. Dostupné z: <https://www.edana.org/discover-nonwovens/what-are-nonwovens->
- [54] AÏTCIN, Pierre-Claude. *Vysokohodnotný beton*. Praha: ČKAIT, 2015. ISBN 80-86769-39-9.
- [55] BÍLEK, Vlastimil a Claude Pierre AITCIN. Vysokohodnotný beton - Aktualizace v roce 2011. *Beton TKS*. 2012, 12. ISSN I S SN 1213-3116.
- [56] SCHMIDT, Michael, Torsten LEUTBECHER, Siemon PIOTROWSKI a Udo WIENS. The German Guideline For Ultra-high Performance Concrete. *Reinforced Concrete*. 2017, 10.
- [57] REDA, M. M, N. G SHRIVE a J. E GILLOTT. Microstructural investigation of innovative UHPC. *Cement and Concrete Research*. 1999, 29(3), 323–329. ISSN 0008-8846.
- [58] RANDL, N., T. STEINER, S. OFNER, E. BAUMGARTNER a T. MÉSZÖLY. Development of UHPC mixtures from an ecological point of view. *Construction and Building Materials*. 2014, 67, 373–378.
- [59] YU, R., P. SPIESZ a H. J. H. BROUWERS. Development of an eco-friendly Ultra-High Performance Concrete (UHPC) with efficient cement and mineral admixtures uses. *Cement and Concrete Composites*. 2015, 55, 383–394. ISSN 0958-9465.
- [60] TIPKA, Martin. Složení, návrh a příprava vysokopevnostního a ultravysokopevnostního betonu. *Rešeršní článek pro grant SGS 2011* [online]. 2011 [vid. 2019-04-23]. Dostupné z: http://people.fsv.cvut.cz/~tipkamar/granty__soubory/SGS__2011/Slozeni__navrh__priprava__HSC__a__UHSC.pdf



- [61] ŠILER, Pavel. *Studium vlivu chemických modifikujících přísad a příměsí na vlastnosti vysokohodnotných betonů*. Brno, 2009. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická.
- [62] AÏTCIN, P. C. The durability characteristics of high performance concrete: a review. *Cement and Concrete Composites*. 2003, 25(4), Concrete Durability, 409–420. ISSN 0958-9465.
- [63] KORPA, A., T. KOWALD a R. TRETTIN. Hydration behaviour, structure and morphology of hydration phases in advanced cement-based systems containing micro and nanoscale pozzolanic additives. *Cement and Concrete Research*. 2008, 38(7), 955–962. ISSN 0008-8846.
- [64] KAMAL, H, K.H. KHAYAT a Claude Pierre AITCIN. Silica fume in concrete, An overview. In: *CANMENT/ACI International Workshop on Silica Fume in Concrete*. 2011.
- [65] DAY, Robert L. Pozzolans for use in low cost housing. *A State of the ART Report prepared for the International Development Research Center Ottawa, Canada*. 1990.
- [66] FEHLING, Ekkehard, Michael SCHMIDT a S. STÜRWARD. *Ultra High Performance Concrete (UHPC): Proceedings of the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel, Germany, March 05-07, 2008*. Kassel university press GmbH, 2008. ISBN 978-3-89958-376-2.
- [67] KŘEMENNÉ PÍSKY. *H-GLOST* [online]. 2019 [vid. 2019-05-27]. Dostupné z: <https://www.h-glost.cz/kremenne-pisky>
- [68] RAHHAL, V. a R. TALERO. Calorimetry of Portland cement with metakaolins, quartz and gypsum additions. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2008, 91(3), 825–834.
- [69] SVOBODA, Luboš. *Stavební hmoty*. 2013. ISBN 978-80-260-4972-2.
- [70] AGARWAL, S. K. a Deepali GULATI. Utilization of industrial wastes and unprocessed micro-fillers for making cost effective mortars. *Construction and Building Materials*. 2006, 20(10), 999–1004.
- [71] AÏTCIN, Pierre-Claude. *High performance concrete*. CRC press, 2011.
- [72] PACEWSKA, B., G. BLONKOWSKI a I. WILIŃSKA. Investigations of the influence of different fly ashes on cement hydration. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2006, 86(1), 179–186. ISSN 1572-8943.
- [73] BILIM, Cahit, Cengiz D. ATIŞ, Harun TANYILDIZI a Okan KARAHAN. Predicting the compressive strength of ground granulated blast furnace slag concrete using artificial neural network. *Advances in Engineering Software*. 2009, 40(5), 334–340. ISSN 0965-9978.
- [74] SONG, Ha-Won a Velu SARASWATHY. Studies on the corrosion resistance of reinforced steel in concrete with ground granulated blast-furnace slag—An overview. *Journal of Hazardous Materials*. 2006, 138(2), 226–233. ISSN 0304-3894.
- [75] LI, Zongjin a Zhu DING. Property improvement of Portland cement by incorporating with metakaolin and slag. *Cement and Concrete Research*. 2003, 33(4), 579–584. ISSN 0008-8846.
- [76] KHATIB, Jamal, Oussama BAALBAKI a Adel ELKORDI. Metakaolin, Chapter 15 in “Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concrete”. In: *Waste and*



Supplementary Cementitious Materials in Concrete Characterisation Properties, and Applications. Wood-head Publishing an imprint of Elsevier, 2018. ISBN 978-0-08-102157-6.

- [77] METAKAOLIN - OBECNÉ INFORMACE : ČLUZ A.S. ČLUZ a.s.. ČLUZ a.s. : žáruvzdorná ostřiva - lupek a kaolín [online]. 2019 [vid. 2019-04-24]. Dostupné z: <http://www.cluz.cz/cz/metakaoliny-obecne-informace>
- [78] TAZAWA, Ei-ichi a Shingo MIYAZAWA. Influence of cement and admixture on autogenous shrinkage of cement paste. *Cement and Concrete Research*. 1995, 25(2), 281–287. ISSN 0008-8846.
- [79] A. CALDARONE, Michael, Karen A. GRUBER a Ronald G. BURG. High-Reactivity Metakaolin: A new generation mineral admixture. *Modern Steel Construction*. 1994, 16, 37–40.
- [80] ZHANG, M. H. a V. M. MALHOTRA. Characteristics of a thermally activated aluminosilicate pozzolanic material and its use in concrete. *Cement and Concrete Research*. 1995, 25(8), 1713–1725. ISSN 0008-8846.
- [81] COLLEPARDI, M. Admixtures used to enhance placing characteristics of concrete. *Cement and Concrete Composites*. 1998, 20(2), 103–112. ISSN 0958-9465.
- [82] BARHUM, Rabea a Viktor MECHTCHERINE. Effect of short, dispersed glass and carbon fibres on the behaviour of textile-reinforced concrete under tensile loading. *Engineering Fracture Mechanics*. 2012, 92, 56–71. ISSN 0013-7944.
- [83] BARHUM, Rabea a Viktor MECHTCHERINE. Influence of short dispersed and short integral glass fibres on the mechanical behaviour of textile-reinforced concrete. *Materials and Structures*. 2013, 46(4), 557–572. ISSN 1871-6873.
- [84] HINZEN, Marcus. *Einfluss von Kurzfasern auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften sowie das Tragverhalten von Textilbeton*. Aachen: Mainz, 2014. Aachener Beiträge zur Bauforschung, 20. ISBN 978-3-86073-938-9.
- [85] BOSHOFF, William P. a Riaan COMBRINCK. Modelling the severity of plastic shrinkage cracking in concrete. *Cement and Concrete Research*. 2013, 48, 34–39. ISSN 0008-8846.
- [86] KRONLÖF, Anna, Markku LEIVO a Pekka SIPARI. Experimental study on the basic phenomena of shrinkage and cracking of fresh mortar. *Cement and Concrete Research*. 1995, 25(8), 1747–1754. ISSN 0008-8846.
- [87] DISTTEX. *Distanzstücke und Abstandhalter für Textilbeton* [online]. 2019 [vid. 2019-05-16]. Dostupné z: <https://www.disttex.com/>
- [88] HEGGER, J., M. ZELL a M. HORSTMANN. Textile reinforced concrete—realization in applications. In: *Proceedings: international fib symposium tailor made concrete structures: new solutions for our society*. 2008, s. 357–362.
- [89] HEGGER, J., H. SCHNEIDER, A. SHERIF, M. MOLTER a S. VOSS. Exterior cladding panels as an application of textile reinforced concrete. *Special Publication*. 2004, 224, 55–70.
- [90] HÄUSSLER-COMBE, U., F. JESSE a M. CURBACH. Textile reinforced concrete—overview, experimental and theoretical investigations. In: *Fracture Mechanics of Concrete Structures. Proceedings of the fifth International Conference on Fracture Mechanics*



of Concrete and Concrete Structures/Vail, Colorado/USA/12-16 April. *la-FraMCoS*. 2004, s. 749–756.

- [91] HEGGER, J. a S. VOSS. Investigations on the bearing behaviour and application potential of textile reinforced concrete. *Engineering structures*. 2008, 30(7), 2050–2056.
- [92] SHAREI, Ehsan, Alexander SCHOLZEN, Josef HEGGER a Rostislav CHUDOBA. Structural behavior of a lightweight, textile-reinforced concrete barrel vault shell. *Composite Structures*. 2017, 171.
- [93] SCHOLZEN, Alexander, Rostislav CHUDOBA a Josef HEGGER. Thin-walled shell structures made of textile-reinforced concrete: Part I: Structural design and construction. *Structural Concrete*. 2015, 16(1), 106–114.
- [94] SCHNEIDER, Hartwig N. a Christian SCHÄTZKE. Structure construction/rhombic lattice structures: Bar nets of textile reinforced concrete. *Betonwerk+ Fertigteil-Technik*. 2006, 72(3), 34–40.
- [95] BUTLER, M., M. LIEBOLDT a V. MECHTCHERINE. Application of textile-reinforced concrete (TRC) for structural strengthening and in prefabrication. In: *Proceedings of the International Conference on Advanced Concrete Materials (ACM), Stellenbosch, South Africa*. 2010, s. 125–134.
- [96] Hering [online]. 2019 [vid. 2019-04-16]. Dostupné z: <https://www.heringinternational.com/en/>
- [97] CURVETEX - THE WORLD'S FIRST DOUBLE-CURVED TEXTILE CONCRETE. *RWTH AACHEN UNIVERSITY Institut für Textiltechnik* [online]. 2019 [vid. 2019-04-16]. Dostupné z: <http://www.ita.rwth-aachen.de/cms/ITA/Die-Organisationseinheit/Aktuelle-Meldungen/~shbd/Weltweit-erste-doppelgekruemte-Betonfas/?lidx=1>
- [98] CETRIS [online]. Dostupné z: <http://www.cetris.cz/>
- [99] DAKO BRNO [online]. 2018. Dostupné z: <http://www.dakobrno.cz/cs/>
- [100] PIDUN, Kevin a Michael SCHULZE. Designed Textile Reinforced Concrete Elements for Architectural Facade Applications. *Applied Mechanics and Materials* [online]. 2015 [vid. 2019-04-16]. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.719-720.171
- [101] MUELLER, Urs, Natalie WILLIAMS PORTAL, Mathias FLANSBJER a Katarina MALAGA. Textile reinforced reactive powder concrete and its application for facades. In: *Eleventh High Performance concrete (11th HPC) and the Second Concrete Innovation Conference (2nd CIC), Tromsø, 6-8 March 2017*. 2017.
- [102] CHIRA, Alexandru, Anuj KUMAR, Tomáš VLACH, Lenka LAIBLOVÁ a Petr HAJEK. Textile-reinforced concrete facade panels with rigid foam core prisms. *Journal of Sandwich Structures & Materials*. 2016, 18(2), 200–214. ISSN 1099-6362.
- [103] CONCRETE BRIDGE IN ALBSTADT-LAUTLINGEN. *Innovation in textile* [online]. 2019 [vid. 2019-05-27]. Dostupné z: <https://www.innovationintextiles.com/textile-concrete-bridge-in-albstadt-lautlingen/>
- [104] SCHOLZEN, Alexander, Rostislav CHUDOBA a Josef HEGGER. Thin-walled shell structures made of textile-reinforced concrete: Part II: Experimental characterization, ultimate limit state assessment and numerical simulation. *Structural Concrete*. 2015, 16(1), 115–124.



- [105] CHUDOBA, R., E. SHAREI a A. SCHOLZEN. A strain-hardening microplane damage model for thin-walled textile-reinforced concrete shells, calibration procedure, and experimental validation. *Composite Structures*. 2016, 152, 913–928.
- [106] VAN DER WOERD, Jan Dirk, Rostislav CHUDOBA a Josef HEGGER. Design and construction of a thin barrel vault by folding. In: *Proceedings of the IASS Symposium 2015 "Future Visions"*. 2015.
- [107] WEILAND, S., R. ORTLEPP, B. HAUPTENBUCHNER a M. CURBACH. Textile Reinforced Concrete for Flexural Strengthening of RC-Structures-Part 2: Application on a Concrete Shell. *Special Publication*. 2008, 251, 41–58.
- [108] SCHEERER, Silke, Robert ZOBEL, Egbert MÜLLER, Tilo SENCKPIEL-PETERS, Angela SCHMIDT a Manfred CURBACH. Flexural Strengthening of RC Structures with TRC—Experimental Observations, Design Approach and Application. *Applied Sciences*. 2019, 9(7), 1322.
- [109] ERHARD, Erich, Silvio WEILAND, Enrico LORENZ, Frank SCHLADITZ, Birgit BECKMANN a Manfred CURBACH. Anwendungsbeispiele für Textilbetonverstärkung. *Beton- und Stahlbetonbau*. 2015, 110(S1), 74–82. ISSN 1437-1006.
- [110] *Solidian* [online]. [vid. 2019-05-27]. Dostupné z: <https://www.solidian.com/en/textile-reinforced-concrete/formability/>
- [111] GRAYBEAL, Benjamin a Jussara TANESI. Durability of an Ultrahigh-Performance Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2007, 19(10), 848–854. ISSN 0899-1561, 1943-5533.
- [112] TAFRAOUI, Ahmed, Gilles ESCADEILLAS a Thierry VIDAL. Durability of the ultra high performances concrete containing metakaolin. *Construction and Building Materials*. 2016, 112, 980–987.
- [113] ZHOU, Zhidong a Pizhong QIAO. Durability of ultra-high performance concrete in tension under cold weather conditions. *Cement and Concrete Composites*. 2018, 94, 94–106. ISSN 0958-9465.
- [114] GANESH, P. a A. Ramachandra MURTHY. Tensile behaviour and durability aspects of sustainable ultra-high performance concrete incorporated with GGBS as cementitious material. *Construction and Building Materials*. 2019, 197, 667–680. ISSN 0950-0618.
- [115] MASSANA, Jordi, Encarnación REYES, Jesús BERNAL, Néstor LEÓN a Elvira SÁNCHEZ-ESPINOSA. Influence of nano- and micro-silica additions on the durability of a high-performance self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*. 2018, 165, 93–103. ISSN 0950-0618.
- [116] VAITKEVIČIUS, Vitoldas, Evaldas ŠERELIS, Danutė VAIČIUKYNIENĖ, Vidas RAUDONIS a Žymantas RUDŽIONIS. Advanced mechanical properties and frost damage resistance of ultra-high performance fibre reinforced concrete. *Construction and Building Materials*. 2016, 126, 26–31.
- [117] ČSN 73 1322-Z1. Stanovení mrazuvzdornosti betonu. *Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví*. 2003.
- [118] ASTM C666 / C666M - 15. Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing. *ASTM International, West Conshohocken, PA*. 2015.



- [119] CSA A23.1/A23.2. Concrete materials and methods of concrete construction/Test methods and standard practices for concrete. CSA. 2014.
- [120] FLÁDR, J. a P. BÍLÝ. Srovnávací zkoušky chování HPC a běžných betonů při zatížení povětrnostními vlivy. *TZB-info* [online]. 2017 [vid. 2019-04-28]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/beton-malty-omitky/15391-srovnavaci-zkousky-chovani-hpc-a-beznych-betonu-pri-zatizeni-povetrnostnimi-vlivy>
- [121] VANDE VOORT, Thomas L. *Design and field testing of tapered H-shaped Ultra High Performance Concrete piles*. Ames, 2008. Iowa State University, Digital Repository.
- [122] NEMATOLLAHI, Behzad, Raizal SAIFULNAZ M.R., Mohd SALEH JAAFAR a Yen LEI VOO. A review on ultra high performance 'ductile' concrete (UHPdC) technology. *INTERNATIONAL JOURNAL OF CIVIL AND STRUCTURAL ENGINEERING*. 2012.
- [123] ČSN 73 1326-Z1. Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek. *Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví*. 2003.
- [124] NOUMOWE, A.N., P. CLASTRES, G. DELVICKI a J.-L. COSTAZ. Thermal stresses and water vapour pressure of high-performance concrete at high temperature. *Proceedings of Utilization of high strength/high performance concrete, Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées*. 1996, 561–570.
- [125] DIEDERICH, U., J. SPITZNER, M. SANDVIK, B. KEPP a M. GILLEN. The behavior of High-Strength Lightweight Aggregate Concrete at Elevated Temperatures. In: *Proceedings of Utilization of High Strength Concrete Symposium in Lillehammer*. 1993, s. 1046–1053.
- [126] SANJAYAN, G. a L. J. STOCKS. Spalling of High-Strength Silica Fume Concrete in Fire. *Materials Journal*. 1993, 90(2), 170–173. ISSN 0889-325X.
- [127] KULAS, Christian, Josef HEGGER, Michael RAUPACH a Udo ANTONS. High-Temperature Behavior of Textile Reinforced Concrete. *International RILEM conference on Advances in Construction Materials Through Science and Engineering*. 2011.
- [128] HANNANT, D. J. Durability of polypropylene fibers in portland cement-based composites: eighteen years of data. *Cement and Concrete Research*. 1998, 28(12), 1809–1817. ISSN 0008-8846.
- [129] ZIJL, G. P. A. G. Van a F. H. WITTMANN. *Durability of Strain-Hardening Fibre-Reinforced Cement-Based Composites (SHCC)*. Springer Science & Business Media, 2010. ISBN 978-94-007-0338-4.
- [130] MECHTCHERINE, Viktor. Towards a durability framework for structural elements and structures made of or strengthened with high-performance fibre-reinforced composites. *Construction and Building Materials*. 2012, 31, 94–104. ISSN 0950-0618.
- [131] HULL, D. a T. W. CLYNE. *An Introduction to Composite Materials*. Cambridge University Press, 1996. ISBN 978-0-521-38855-9.
- [132] BENTUR, Arnon a Sidney MINDESS. *Fibre Reinforced Cementitious Composites, Second Edition*. CRC Press, 2006. ISBN 978-0-203-08872-2.
- [133] YILMAZ, Veysel T. a Fredrick P. GLASSER. Reaction of alkali-resistant glass fibers with cement: II, Durability in cement matrices conditioned with silica fume. *Glass technology*. 1991, 32(4), 138–47.



- [134] MAJUMDAR, A. J. a R. W. NURSE. Glass fibre reinforced cement. *Materials Science and Engineering*. 1974, 15(2), 107–127. ISSN 0025-5416.
- [135] SCHEFFLER, C., T. FÖRSTER, E. MÄDER, G. HEINRICH, S. HEMPEL a V. MECHTCHERINE. Aging of alkali-resistant glass and basalt fibers in alkaline solutions: Evaluation of the failure stress by Weibull distribution function. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2009, 355(52), 2588–2595. ISSN 0022-3093.
- [136] LITHERLAND, K. L., P. MAGUIRE a B. A. PROCTOR. A test method for the strength of glass fibres in cement. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*. 1984, 6(1), 39–45. ISSN 0262-5075.
- [137] BÜTTNER, T., J. ORLOWSKY, M. RAUPACH, M. HOJCZYK a O. WEICHOLD. Enhancement of the Durability of Alkali-resistant Glass-Rovings in concrete. In: *International RILEM Conference on Material Science*. RILEM Publications SARL, 2010, s. 333–342.
- [138] ORLOWSKY, J., M. RAUPACH, H. CUYPERS a J. WASTIELS. Durability modelling of glass fibre reinforcement in cementitious environment. *Materials and Structures*. 2005, 38(2), 155–162. ISSN 1871-6873.
- [139] WEI, Bin, Hailin CAO a Shenhua SONG. Tensile behavior contrast of basalt and glass fibers after chemical treatment. *Materials & Design*. 2010, 31(9), 4244–4250. ISSN 0261-3069.
- [140] DE LHONEUX, B. Durability Study of PVA Fibres in Fibre-Cement Products. *Concrete for a Sustainable Agriculture, Agro-, Aqua-, and Community Applications ; Proceedings of the IVth International Symposium, 2002*. 2002.
- [141] FÖRSTER, Theresa. *Einfluss der chemischen Zusammensetzung und der Oberflächenmodifizierung auf die Eigenschaften von Basaltfasern*. 2015. Doctoral thesis. Technische Universität Dresden.
- [142] RYBIN, V. A., A. V. UTKIN a N. I. BAKLANOVA. Alkali resistance, microstructural and mechanical performance of zirconia-coated basalt fibers. *Cement and Concrete Research*. 2013, 53, 1–8. ISSN 0008-8846.
- [143] MICELLI, Francesco a Maria Antonietta AIELLO. Residual tensile strength of dry and impregnated reinforcement fibres after exposure to alkaline environments. *Composites Part B: Engineering*. 2019, 159, 490–501. ISSN 1359-8368.
- [144] KABIR, M. H., S. FAWZIA a T. H. T. CHAN. Durability of CFRP strengthened circular hollow steel members under cold weather: Experimental and numerical investigation. *Construction and Building Materials*. 2016, 123, 372–383. ISSN 0950-0618.
- [145] COHEN, Zvi a Alva PELED. Controlled telescopic reinforcement system of fabric–cement composites — Durability concerns. *Cement and Concrete Research*. 2010, 40(10), 1495–1506. ISSN 0008-8846.
- [146] ZHU, W. a P. J. M. BARTOS. Assessment of interfacial microstructure and bond properties in aged GRC using a novel microindentation method. *Cement and Concrete Research*. 1997, 27(11), 1701–1711. ISSN 0008-8846.
- [147] LANGLOIS, V., B. FIORIO, A.-L. BEAUCOUR, R. CABRILLAC a D. GOUVENOT. Experimental study of the mechanical behavior of continuous glass and carbon yarn-reinforced mortars. *Construction and Building Materials*. 2007, 21(1), 198–210. ISSN 09500618.



- [148] OHAMA, Yoshihiko. Carbon-cement composites. *Carbon*. 1989, 27(5), Carbon Fibers and Composites, 729–737. ISSN 0008-6223.
- [149] BUTLER, M., S. HEMPEL a V MECHTCHERINE. Zeitliche Entwicklung des Verbundes von AR-Glas- und Kohlenstofffaser- Multifilamentgarnen in zementgebundenen Matrices. *Proceeding of 4th Colloquium on Textile Reinforced Structures (CTRS4)*. 2009, 213–226.
- [150] HEMPEL, Simone, Marko BUTLER a Viktor MECHTCHERINE. Bond behaviour and durability of basalt fibres in cementitious matrices. In: *3rd ICTR International Conference on Textile Reinforced Concrete Brameshuber, W.(ed.) Aachen, Germany*. 2015, s. 225–233.
- [151] SILICA FUME ELKEM. *Elkem.com* [online]. 2019. Dostupné z: <https://www.elkem.com/globalassets/silicon-materials/construction/con-940-pds.pdf>
- [152] CEM-FIL®. *Owens corning* [online]. 2019 [vid. 2019-05-12]. Dostupné z: <http://www.ocvreinforcements.com/CemFIL/default.aspx>
- [153] ČSN EN 12390-3. Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles. *Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví*. 2009.
- [154] ČSN EN 12390-2. Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 2: Výroba a ošetřování zkušebních těles pro zkoušky pevnosti. *Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví*. 2009.
- [155] ČSN EN 12390-4. Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 4: Pevnost v tlaku - Požadavky na zkušební lisy. *Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví*. 2001.
- [156] ČSN EN 12390-5. Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles. *Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví*. 2009.
- [157] ČSN ISO 1920-10. Zkoušení betonu - Část 10: Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku. *Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví*. 2016.
- [158] ČSN EN 13295. Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí - Zkušební metody - Stanovení odolnosti proti karbonataci. *Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví*. 2005.
- [159] RYPL, Rostislav, Rostislav CHUDOBA, Ulrich MÖRSCHER, Scott E STAPLETON, Thomas GRIES a Guido SOMMER. A novel tensile test device for effective testing of high-modulus multi-filament yarns. *Journal of Industrial Textiles*. 2015, 44(6), 934–947. ISSN 1528-0837, 1530-8057.
- [160] ACI 440.3R-03. Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening of Concrete Structures. *ACI Committee 440*. 2012.
- [161] VLACH, Tomáš, Lenka LAIBLOVÁ, Michal ŽENÍŠEK, Pavel KOKEŠ a Petr HÁJEK. Comparison of Two Approaches for the Tensile Test of Single Roving in Polymer Matrix. In: *Key Engineering Materials*, 2017, s. 86–91.
- [162] Protokol o zkoušce 45 /17 / EXPO - *Stanovení vývoje teplot během hydratace betonu, receptura HPC K124*. Kloknerův ústav ČVUT v Praze. 2017



- [163] HÁJEK, Petr, Ctislav FIALA a Magdaléna KYNČLOVÁ. Life cycle assessments of concrete structures – a step towards environmental savings. *Structural Concrete*. nedatováno, 2011(12), 13–22.
- [164] LAIBLOVÁ, Lenka, Tomáš VLACH, Ctislav FIALA a Petr HÁJEK. Fasádní panely z textilního betonu z pohledu hodnocení jejich životního cyklu. 2015, 2(2), 86–92. ISSN 2336-7148.
- [165] Nařízení Evropského parlamentu a Rady (EU) č. 305/2011 ze dne 9. března 2011, kterým se stanoví harmonizované podmínky pro uvádění stavebních výrobků na trh a kterým se zrušuje směrnice Rady 89/106/EHSText s významem pro EHP. 2011, 39.
- [166] Strategický rámec Česká republika 2030. *ČR 2030 | Strategie* [online]. [vid. 2019-06-21]. Dostupné z: <https://www.cr2030.cz/strategie/>
- [167] ČSN EN ISO 14020. Environmentální značky a prohlášení - Obecné zásady. *Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví*. 2002.
- [168] ČSN EN ISO 14021. Environmentální značky a prohlášení - Vlastní environmentální tvrzení (environmentální značení typu II). *Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví*. 2016.
- [169] ČSN EN ISO 14024. Environmentální značky a prohlášení - Environmentální značení typu I - Zásady a postupy. *Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví*. 2018.
- [170] ČSN ISO 14025. Environmentální značky a prohlášení - Environmentální prohlášení typu III - Zásady a postupy. *Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví*. 2006.
- [171] ČSN EN ISO 14040. Environmentální management - Posuzování životního cyklu - Zásady a osnova. *Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví*. 2006.
- [172] ČSN EN ISO 14044. Environmentální management - Posuzování životního cyklu - Požadavky a směrnice. *Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví*. 2006.
- [173] ČSN EN 15804 +A1. Udržitelnost staveb - Environmentální prohlášení o produktu - Základní pravidla pro produktovou kategorii stavebních produktů. *Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví*. 2014.
- [174] ČSN EN 16757. Udržitelnost staveb – Environmentální prohlášení o produktu – Pravidla produktové kategorie pro beton a betonové prvky. *Evropský výbor pro normalizaci*. 2018.
- [175] KOČÍ, Vladimír. Příručka základních informací o posuzování životního cyklu. *Praha. VŠCHT. ETC Consulting*. 2010, 3.
- [176] HANUS, Robert, Jan KOUBSKÝ a Miroslav KRČMA. *Inovace výrobků a jejich systémů – Metodika analýzy inovačního potenciálu výrobků a služeb*. Praha: Centrum inovací a rozvoje, 2004.
- [177] KOČÍ, Vladimír. *LCA a EPD stavebních výrobků: posuzování životního cyklu a environmentální prohlášení o produktu jako cesta k udržitelnému stavebnictví*. Česká rada pro šetrné budovy, 2012. ISBN 978-80-260-3504-6.



- [178] KOČÍ, Vladimír. *Environmentální dopady: posuzování životního cyklu*. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2013.
- [179] GEMIS - IINAS. *The International Institute for Sustainability Analysis and Strategy* [online]. 2019 [vid. 2019-05-20]. Dostupné z: <http://iinas.org/about.html>
- [180] FIALA, Ctislav. *iCFconcrete*. 2019.



Seznam obrázků

Obr. 1	Textilní beton se skleněnou výztuží [23].....	14
Obr. 2	Textilní beton a skleněná výztuž firmy V. Fraas [23].....	15
Obr. 3	Skleněný roving.....	17
Obr. 4	Mikroskopický snímek řezu uhlíkového vlákna [37].....	20
Obr. 5	Textura uhlíkového vlákna z PAN [42].....	20
Obr. 6	Chemická struktura Kevlaru [4].....	21
Obr. 7	Základní opakující se jednotka para-aramidu (Kevlar, Twaron) [26].....	21
Obr. 8	Základní opakující se jednotka meta-aramidu (Nomex) [26].....	22
Obr. 9	2D skleněná výztuž.....	24
Obr. 10	Perlinková vazba.....	25
Obr. 11	Schéma pletené textilie (a) zátažná pletenina; (b) osnovní pletenina.....	25
Obr. 12	3D textilie [23, 51].....	26
Obr. 13	Netkaná textilie [52, 53].....	26
Obr. 14	Řez rovingem bez sizingu (a); a se sizingem (b) [1].....	27
Obr. 15	Složky vysokohodnotného betonu.....	29
Obr. 16	Porovnání velikosti zrn cementu, Mikroduoru a mikrosiliky.....	30
Obr. 17	Křemenné písky [67].....	30
Obr. 18	Křemenná moučka [67].....	30
Obr. 19	Rozložení gradientu napětí v blízkosti trhliny v TRC (a) bez krátkých vláken a (b) s přidáním krátkých vláken [82].....	33
Obr. 20	Plastové distančníky DistTex (a) pro 2D výztuže; (b) pro 3D výztuže [87].....	34
Obr. 21	Fasádní panely z TRC od firmy Hering na budově Skylab, budově laboratoře v oblasti Bahnhof, nové městské čtvrti Heidelbergu [96].....	35
Obr. 22	Andreas Quartier AQ 8.3 Soltär, Düsseldorf (vlevo), Komunitní centrum, Mannheim (vpravo) [96].....	36
Obr. 23	Lávka pro pěší v Albstadt - Lautlingenu [103].....	36
Obr. 24	Zastřešení skořepinovou konstrukcí v RWTH Aachen [92, 104].....	37
Obr. 25	Oprava ŽB střešní konstrukce pomocí vrstvy TRC [108].....	38
Obr. 26	Zesílení nevyhovující stropní konstrukce v budově v Praze pomocí uhlíkové textilní výztuže [109].....	38
Obr. 27	Designový nábytek z výztuže od firmy Solidian [110].....	39
Obr. 28	Množství odpadů při zkoušce odolnosti proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek dle výzkumu Fládra [120].....	42
Obr. 29	Redukční faktor při zatížení speciálního jemnozrnného betonu (PZ – 0899-01) pro TRC vysokou teplotou [127].....	44
Obr. 30	Schéma struktury skleněné sítě a napadení zásaditým roztokem [131].....	45
Obr. 31	(a) půdorys a (b) řez schématu testování TSC metodou [137].....	46
Obr. 32	Proces degradace skleněného vlákna v alkalickém prostředí [138].....	47
Obr. 33	(a) Vliv přirozených přírodních podmínek po dobu až 18 let na pevnost polypropylenových vláken ve formě folie. (b) Struktura folie (typ A) [128].....	48
Obr. 34	Proces degradace čedičového vlákna [142].....	49

Obr. 35	Snímky z elektronového mikroskopu (SEM) cementové matrice s čedičovými vlákny (a) bez povlaku (b) s povlakem ZrO_2 (0.4 M sol) [142]	49
Obr. 36	Snímky z SEM skleněných vláken z AR skla v matrici vyrobené z (a) portlandského cementu (po 28 dnech zrychleného stárnutí a (b) vysokopecního cementu a pucolány (zde po 360 dnech zrychleného stárnutí) [130]	50
Obr. 37	(a) jednotlivé vrstvy ve svazku vláken; (b) teleskopický systém vytahování vláken [145]	51
Obr. 38	Použité textilie: (a) 3D textilie; (b) 2D textilie komerční (horní) a ručně vyráběná (spodní)	55
Obr. 39	Stanovení hloubky karbonatace pro $l \geq 30$ mm [158]	62
Obr. 40	Schéma tahové zkoušky rovingů	63
Obr. 41	Pevnost HPC1 v tlaku	66
Obr. 42	Pevnost v tahu za ohybu směsi HPC1	67
Obr. 43	Modul pružnosti směsi HPC1 v tlaku	67
Obr. 44	Graf závislosti síly na posunu příčnicku skleněných rovingů bez povrchové úpravy	68
Obr. 45	Graf závislosti síly na posunu příčnicku	69
Obr. 46	Zkušební vzorek upnutý v trhacím zařízení těsně před zatěžováním	69
Obr. 47	Zkušební vzorek skleněného rovingu bez povrchové úpravy (G ref) po přetržení	69
Obr. 48	Graf závislosti síly na posunu příčnicku uhlíkových rovingů bez povrchové úpravy	70
Obr. 49	Graf závislosti síly na posunu příčnicku	71
Obr. 50	Graf závislosti síly na posunu příčnicku	71
Obr. 51	Graf závislosti síly na posunu příčnicku	72
Obr. 52	Pevnost vzorků hranolů 40x40x160 mm po jednotlivých zmrazovacích cyklech	74
Obr. 53	Příčný řez zkušebním vzorkem	75
Obr. 54	Průběh zatěžování čtyřbodovým ohybem	76
Obr. 55	Porušené vzorky po zkoušení	76
Obr. 56	Graf průběhu zkoušky čtyřbodového ohybu na tenkých deskách	76
Obr. 57	Detail prvních trhlin při zatěžování čtyřbodovým ohybem	77
Obr. 58	Pevnost v tahu za ohybu (maximální a při první trhlíně)	77
Obr. 59	Křivka znázorňující průběh zatěžování	78
Obr. 60	Graf detailu prvních trhlin v betonu u vzorků referenčních a po 800 cyklech	78
Obr. 61	(a) Vzorky po 800 zmrazovacích cyklech ; (b) Odpad po 100 cyklech na vzorku krychle	80
Obr. 62	Odpady během jednotlivých zmrazovacích cyklů na vzorcích hranolů 40x40x160 mm	80
Obr. 63	Odpady přepočítané na smáčenou plochu v jednotlivých zmrazovacích cyklech na vzorcích hranolů 40x40x160 mm	80
Obr. 64	Odpady během jednotlivých zmrazovacích cyklů na vzorcích krychlí o hraně délky 150 mm	81
Obr. 65	Odpady přepočítané na smáčenou plochu v jednotlivých zmrazovacích cyklech na vzorcích krychlí o hraně délky 150 mm	81
Obr. 66	Výsledky destruktivních zkoušek po 100 cyklech a po 800 cyklech zmrazování za působení rozmrazovací látky	81
Obr. 67	Hloubka karbonatace u referenčního betonu	82
Obr. 68	(a) Vzorky HPC 1 postříkané indikátorem z fenolftaleinu v porovnání se vzorky z referenčního betonu (b) (foto Tomáš Bittner, K.Ú. ČVUT)	83
Obr. 69	Záznam teplot během hydratace betonu HPC1 měřený v Kloknerově ústavu [162]	84
Obr. 70	Pohled na izolovanou formu tvaru krychle o hraně délky 300 mm (foto: David Čítek, K. Ú. ČVUT)	84



Obr. 71	SEM snímky vzorků skleněných rovingů po vystavení alkalickému roztoku o pH 12,2 po dobu 200h při pokojové teplotě 22°C (č.13) a při teplotě 80°C (č.25) ve srovnání s referenčními vzorky (č.1).....	90
Obr. 72	SEM snímky vzorků skleněných rovingů po vystavení alkalickému roztoku o pH 13,4 po dobu 200h při pokojové teplotě 22°C (č.37) a při teplotě 80°C (č.49) ve srovnání s referenčními vzorky (č.1).....	91
Obr. 73	SEM snímky vzorků uhlíkových rovingů po vystavení alkalickému roztoku o pH 12,2 po dobu 200h při pokojové teplotě 22°C (č.15) a při teplotě 80°C (č.27) ve srovnání s referenčními vzorky (č.3).....	92
Obr. 74	SEM snímky vzorků uhlíkových rovingů po vystavení alkalickému roztoku o pH 13,4 po dobu 200h při pokojové teplotě 22°C (č.39) a při teplotě 80°C (č.51) ve srovnání s referenčními vzorky (č.3).....	93
Obr. 75	SEM snímky vzorků čedičových rovingů po vystavení alkalickému roztoku o pH 12,2 po dobu 200h při pokojové teplotě 22°C (č.17) a při teplotě 80°C (č.29) ve srovnání s referenčními vzorky (č.5).....	94
Obr. 76	SEM snímky vzorků čedičových rovingů po vystavení alkalickému roztoku o pH 13,4 po dobu 200h při pokojové teplotě 22°C (č.41) a při teplotě 80°C (č.53) ve srovnání s referenčními vzorky (č.3).....	95
Obr. 77	SEM snímky skleněného rovingu s povrchovou úpravou z epoxidové pryskyřice po vystavení alkalickému roztoku o pH 13,4 po dobu 200h při teplotě 80°C (č.50) ve srovnání s referenčním vzorkem (č.2).....	96
Obr. 78	SEM snímky uhlíkového rovingu s povrchovou úpravou z epoxidové pryskyřice po vystavení alkalickému roztoku o pH 13,4 po dobu 200h při teplotě 80°C (č.52) ve srovnání s referenčním vzorkem (č.4).....	96
Obr. 79	SEM snímky čedičového rovingu s povrchovou úpravou z epoxidové pryskyřice po vystavení alkalickému roztoku o pH 13,4 po dobu 200h při teplotě 80°C (č.54 ve srovnání s referenčním vzorkem (č.6).....	97
Obr. 80	Průměrné hodnoty naměřených maximálních sil a přepočítané hodnoty maximálních napětí pro vzorky skleněných rovingů.....	100
Obr. 81	Graf znázorňující průběh zatěžování skleněných rovingů bez povrchové úpravy.....	100
Obr. 82	Průměrné hodnoty naměřených maximálních sil a přepočítané hodnoty maximálních napětí pro vzorky uhlíkových rovingů.....	101
Obr. 83	Graf znázorňující průběh zatěžování uhlíkových rovingů bez povrchové úpravy.....	102
Obr. 84	Průměrné hodnoty naměřených maximálních sil a přepočítané hodnoty maximálních napětí pro vzorky čedičových rovingů.....	103
Obr. 85	Graf znázorňující průběh zatěžování čedičových rovingů bez povrchové úpravy.....	104
Obr. 86	Graf závislosti síly na posunu příčnicku u skleněných vláken s povrchovou úpravou z epoxidové pryskyřice.....	105
Obr. 87	Průměrné hodnoty maximálních dosažených sil a přepočítané hodnoty maximálního napětí pro skleněná vlákna s povrchovou úpravou z epoxidové pryskyřice.....	106
Obr. 88	Graf závislosti síly na posunu příčnicku u uhlíkových vláken s povrchovou úpravou z epoxidové pryskyřice.....	107
Obr. 89	Průměrné hodnoty maximálních dosažených sil a přepočítané hodnoty maximálního napětí pro uhlíková vlákna s povrchovou úpravou z epoxidové pryskyřice.....	107
Obr. 90	Graf závislosti síly na posunu příčnicku u čedičových vláken s povrchovou úpravou z epoxidové pryskyřice.....	108
Obr. 91	Graf maximální dosažené síly a přepočítaná hodnota maximálního napětí pro uhlíková vlákna s povrchovou úpravou z epoxidové pryskyřice.....	108
Obr. 92	Životní cyklus výrobku a jeho fáze [176].....	113
Obr. 93	Životní cyklus fasády z TRC.....	114
Obr. 94	Porovnávané varianty (řez fasádními deskami).....	117
Obr. 95	Podíl jednotlivých složek či procesů ve fázi výroby na celkové hodnoty uhlíkové stopy.....	121

Obr. 96 Znárodnění procentuálního porovnání jednotlivých variant pro jednotlivé kategorie dopadu	121
Obr. 97 Graf porovnání spotřeby primární neobnovitelné energie	123
Obr. 98 Graf porovnání potenciálu globálního oteplování.....	123
Obr. 99 Graf porovnání potenciálu tvorby přízemního ozonu	123
Obr. 100 Graf znázorňující potenciál acidifikace půdy a vody.....	123
Obr. 101 Porovnání výsledků všech potenciálů kategorií dopadů	124



Seznam tabulek

Tab. 1	Vybraná komerčně dostupná AR skleněná vlákna [24].....	17
Tab. 2	Složení různých skleněných vláken v % hmotnosti [30].....	18
Tab. 3	Uhlíkové vlákno	19
Tab. 4	Čedičové vlákno	23
Tab. 5	Mechanické vlastnosti vybraných vláken [30].....	24
Tab. 6	Chemické složení E-skla a AR-skla [134]	45
Tab. 7	Složení směsi HPC1	53
Tab. 8	Specifikace použitých skleněných výztuží.....	55
Tab. 9	Specifikace použité uhlíkové výztuže	55
Tab. 10	Specifikace použitého čedičového rovingu	56
Tab. 11	Specifikace epoxidové pryskyřice	56
Tab. 12	Výsledky zkoušky pevnosti v tlaku na vzorcích krychlí o hraně délky 100 mm	66
Tab. 13	Výsledky zkoušky pevnosti v tlaku na zlomcích hranolů	66
Tab. 14	Výsledky zkoušky pevnosti v tahu za ohybu třibodovým ohybem.....	67
Tab. 15	Vstupní charakteristiky a výsledky tahové zkoušky skleněných rovingů bez povrchové úpravy.....	68
Tab. 16	Vstupní charakteristiky a výsledky tahové zkoušky skleněných rovingů s povrchovou úpravou z epoxidové pryskyřice	69
Tab. 17	Vstupní charakteristiky a výsledky tahové zkoušky uhlíkových rovingů bez povrchové úpravy.....	70
Tab. 18	Vstupní charakteristiky a výsledky tahové zkoušky uhlíkových rovingů s povrchovou úpravou z epoxidové pryskyřice	70
Tab. 19	Vstupní charakteristiky a výsledky tahové zkoušky čedičových rovingů bez povrchové úpravy.....	71
Tab. 20	Vstupní charakteristiky a výsledky tahové zkoušky čedičových rovingů s povrchovou úpravou z epoxidové pryskyřice	72
Tab. 21	Výsledky deformačních zkoušek po jednotlivých zmrazovacích cyklech	74
Tab. 22	Schéma zatěžovacích kombinací a značení vzorků.....	86
Tab. 23	Tabulka výsledků tahových pevností skleněných rovingů bez povrchové úpravy	99
Tab. 24	Tabulka výsledků tahových pevností uhlíkových rovingů bez povrchové úpravy	101
Tab. 25	Tabulka výsledků tahových pevností čedičových rovingů bez povrchové úpravy	103
Tab. 26	Tabulka výsledků tahových pevností skleněných rovingů s povrchovou úpravou z epoxidové pryskyřice	105
Tab. 27	Tabulka výsledků tahových pevností uhlíkových rovingů s povrchovou úpravou z epoxidové pryskyřice	106
Tab. 28	Tabulka výsledků tahových pevností čedičových rovingů s povrchovou úpravou z epoxidové pryskyřice	108
Tab. 29	Vstupní data pro fázi výroby.....	118
Tab. 30	Vstupní data pro fázi užívání.....	119
Tab. 31	Vstupní data pro fázi konce životního cyklu	120
Tab. 32	Agregovaná data pro fázi výroby.....	120

Tab. 33 Agregovaná data pro fázi užívání.....	122
Tab. 34 Agregovaná data pro fázi konce životního cyklu	122
Tab. 35 Souhrnná agregovaná data pro celou životní fázi všech porovnávaných variant	122
Tab. 36 Kombinace případů pro citlivostní analýzu fáze užívání	124



Publikace autora

- (1) CHIRA, A. et al. Property Improvements of Alkali Resistant Glass Fibres/Epoxy Composite with Nanosilica for Textile Reinforced Concrete Applications. *Materials & Design*. 2015, ISSN 0264-1275. DOI 10.1016/j.matdes.2015.09.122.
- (2) CHIRA, A. et al. Textile-Reinforced Concrete Facade Panels with Rigid Foam Core Prisms. *Journal of Sandwich Structures and Materials*. 2015, 1-15. ISSN 1530-7972. DOI 10.1177/1099636215613488.
- (3) CHIRA, A. et al. Textile-Reinforced Concrete Facade Panels with Rigid Foam Core Prisms. *Journal of Sandwich Structures and Materials*. 2016, 18(2), 200-214. ISSN 1530-7972. DOI 10.1177/1099636215613488. Dostupné z: <http://jsm.sagepub.com/content/early/2015/10/26/1099636215613488.full.pdf>
- (4) CHIRA, A. et al. Property Improvements of Alkali Resistant Glass Fibres/Epoxy Composite with Nanosilica for Textile Reinforced Concrete Applications. *Materials & Design*. 2016, 89 146-155. ISSN 0264-1275. DOI 10.1016/j.matdes.2015.09.122.
- (5) LAIBLOVÁ, L. et al. FASÁDNÍ PANELY Z TEXTILNÍHO BETONU Z POHLEDU HODNOCENÍ JEJICH ŽIVOTNÍHO CYKLU LCA. *Czech Journal of Civil Engineering*. 2015, 2(2), 86-92. ISSN 2336-7148. Dostupné z: http://www.scientificjournals.eu/magazine/2016/CJCE__2016__02.pdf
- (6) KUMAR, A. et al. Engineered Bamboo Scrimber: Influence of Density on the Mechanical and Water Absorption Properties. *Construction and Building Materials*. 2016, 127 815-827. ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2016.10.069.
- (7) KUMAR, A. et al. Nanocoating on Alkali-Resistant Glass Fibers by Octadecyltrichlorosilane to Improve the Mechanical strength of fibers and fibers/epoxy composites. *Textile Research Journal*. 2018, 88(9), 1038-1046. ISSN 0040-5175. DOI 10.1177/0040517517693977.
- (8) LAIBLOVÁ, L., T. VLACH a J. ŘEPKA. Co je to textilní beton (TRC). *TZB info*. 2019, 21.(10), ISSN 1801-4399. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/beton-malty-omitky/18732-co-je-to-textilni-beton-trc>
- (9) České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Katedra konstrukcí pozemních staveb, Praha 6, CZ. *Fasádní panel z vysokohodnotného betonu*. Původci: P. HÁJEK et al. Česká republika. Užitný vzor CZ 30082. 2016-11-29. Dostupné z: https://isdv.upv.cz/webapp/webapp.pts.det?xprim=10241469&lan=cs&s__majs=&s__puvo=&s__naze=&s__anot=
- (10) VLACH, T. et al. Interaction of Composite Reinforcement Produced from Rovings with High Performance Concrete. 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. 171-172. ISBN 978-80-261-0376-9. DOI 10.4028/www.scientific.net/AMM.732.397.



- (11) ŽENÍŠEK, M., T. VLACH a L. LAIBLOVÁ. Ground Granulated Blast Furnace Slag as Partial Replacement of the Binder of High Performance Concrete. In: REITERMAN, P., ed. *Special Concrete and Composites 2014*. 11th International Conference Special Concrete and Composites 2014, Skalský Dvůr, 2014-10-16/2014-10-17. Uetikon-Zurich: Trans Tech Publications, 2014. s. 90-94. Advanced Materials Research. ISSN 1022-6680. ISBN 978-3-03835-317-1. DOI 10.4028/www.scientific.net/AMR.1054.90.
- (12) ŽENÍŠEK, M., T. VLACH a L. LAIBLOVÁ. Mletá vysokopecní granulovaná struska jako částečná náhrada pojiva vysokohodnotného betonu. In: *11. konference Speciální betony*. Speciální betony 2014, Bystřice nad Pernštejnem, 2014-10-16/2014-10-17. Praha: Sekurkon, 2014. s. 37-41. ISBN 978-80-86604-64-0.
- (13) LAIBLOVÁ, L. et al. Technical Textiles as an Innovative Material for Reinforcing of Elements from High Performance Concretes (HPC). In: REITERMAN, P., ed. *Special Concrete and Composites 2014*. 11th International Conference Special Concrete and Composites 2014, Skalský Dvůr, 2014-10-16/2014-10-17. Uetikon-Zurich: Trans Tech Publications, 2014. s. 110-115. Advanced Materials Research. ISSN 1022-6680. ISBN 978-3-03835-317-1. DOI 10.4028/www.scientific.net/AMR.1054.110.
- (14) VLACH, T. et al. Comparison of Different Methods for Determination of Modulus of Elasticity of Composite Reinforcement Produced from Roving. In: REITERMAN, P., ed. *Special Concrete and Composites 2014*. 11th International Conference Special Concrete and Composites 2014, Skalský Dvůr, 2014-10-16/2014-10-17. Uetikon-Zurich: Trans Tech Publications, 2014. s. 104-109. Advanced Materials Research. ISSN 1022-6680. ISBN 978-3-03835-317-1. DOI 10.4028/www.scientific.net/AMR.1054.104.
- (15) ŽENÍŠEK, M., T. VLACH a L. LAIBLOVÁ. Možnosti zlepšení zpracovatelnosti vysokohodnotného betonu. In: *21. Betonářské dny 2014*. Hradec Králové, 2014-11-26/2014-11-27. Praha: Česká betonářská společnost ČSSI, 2014. ISBN 978-80-903806-7-7.
- (16) VLACH, T. et al. Porovnání různých metod stanovení modulu pružnosti kompozitní výztuže vyrobené z rovingu. In: *11. konference Speciální betony*. Speciální betony 2014, Bystřice nad Pernštejnem, 2014-10-16/2014-10-17. Praha: Sekurkon, 2014. s. 83-88. ISBN 978-80-86604-64-0.
- (17) LAIBLOVÁ, L. et al. Technické textilie jako inovativní materiál pro vyztužování prvků z vysokohodnotných betonů (HPC). In: *11. konference Speciální betony*. Speciální betony 2014, Bystřice nad Pernštejnem, 2014-10-16/2014-10-17. Praha: Sekurkon, 2014. s. 89-94. ISBN 978-80-86604-64-0.
- (18) VLACH, T. et al. Vliv soudržnosti textilní výztuže s vysokohodnotným betonem (hpc) na zkoušku čtyřbodovým ohybem s použitím numerických simulací. In: *21. Betonářské dny 2014*. Hradec Králové, 2014-11-26/2014-11-27. Praha: Česká betonářská společnost ČSSI, 2014. ISBN 978-80-903806-7-7.
- (19) ŽENÍŠEK, M., T. VLACH a L. LAIBLOVÁ. Options for Improving the Workability of High Performance Concrete. In: KOSTELECKÁ, M., ed. *Proceedings from 21st Czech Concrete Day 2014*. 21. Betonářské dny 2014, Hradec Králové, 2014-11-26/2014-11-27. Pfaffikon: Trans Tech Publications Ltd., 2015. s. 53-56. Advanced Materials Research. ISSN 1022-6680. ISBN 978-3-03835-474-1. DOI 10.4028/www.scientific.net/AMR.1106.53.
- (20) VLACH, T. et al. Numerical Simulation of Cohesion Influence of Textile Reinforcement on Bending Performance of Plates Prepared from High Performance Concrete (HPC). In: KOSTELECKÁ, M., ed. *Proceedings from 21st Czech Concrete Day 2014*. 21. Betonářské dny



2014, Hradec Králové, 2014-11-26/2014-11-27. Pfaffikon: Trans Tech Publications Ltd., 2015. s. 65-68. Advanced Materials Research. ISSN 1022-6680. ISBN 978-3-03835-474-1.

- (21) VLACH, T. et al. Eccentricity Influence on Bearing Capacity of Subtle Column Using Numerical Analysis and Experimental Verification. In: PADEVĚT, P. a P. BITTNAR, eds. *Experimental Stress Analysis 2015*. Experimentální analýza napětí 2015, Český Krumlov, 2015-06-01/2015-06-04. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, 2015. s. 473-476. první, CD-ROM - full text of papers. ISBN 978-80-01-05734-6.
- (22) VLACH, T. et al. Vliv uhlíkových nanotrubiček na základní materiálové parametry vysokohodnotného betonu (HPC). In: *Nanomateriály a nanotechnologie ve stavebnictví 2015*. Praha, 2015-06-11. Praha: Vydavatelství ČVUT v Praze, 2015. s. 96-100. ISBN 978-80-01-05767-4.
- (23) ŽENÍŠEK, M., T. VLACH a L. LAIBLOVÁ. Pevnost vysokohodnotného betonu v závislosti na jeho konzistenci. 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. s. 287. ISBN 978-80-214-5091-2.
- (24) ŽENÍŠEK, M., T. VLACH a L. LAIBLOVÁ. Pevnost v tahu za ohybu u reaktivních jemnozrnných betonů. 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.
- (25) VLACH, T. et al. The Effect of Surface Treatments of Textile Reinforcement on Mechanical Parameters of HPC Facade Elements. In: REITERMAN, P., ed. *Special Concrete and Composites 2015*. Skalský Dvůr, 2015-10-15/2015-10-16. Zurich: Trans Tech Publications, 2016. s. 203-206. Key Engineering Materials. ISSN 1013-9826. ISBN 978-3-03835-579-3. DOI 10.4028/www.scientific.net/KEM.677.203.
- (26) VLACH, T. et al. Vliv povrchových úprav textilní výztuže na mechanické vlastnosti fasádních panelů z vysokohodnotného betonu (HPC). In: *12. KONFERENCE SPECIÁLNÍ BETONY*. Speciální betony 2015, Skalský dvůr, 2015-10-14/2015-10-16. Praha: Sekurkon, 2015. s. 117-120. ISBN 978-80-86604-67-1.
- (27) HÁJEK, P. et al. Challenge of Textile Reinforced High Performance Concrete for Sustainable Construction. In: STANG, H. a M. BRAESTRUP, eds. *Concrete - Innovation and Design - Fib Symposium Proceedings*. Concrete - Innovation and Design - Fib Symposium, Copenhagen, 2015-05-18/2015-05-20. München: FIB, 2015.
- (28) ŽENÍŠEK, M., T. VLACH a L. LAIBLOVÁ. Dosage of Silica Fume in High Performance Concrete. In: REITERMAN, P., ed. *Special Concrete and Composites 2015*. Skalský Dvůr, 2015-10-15/2015-10-16. Zurich: Trans Tech Publications, 2016. s. 98-102. Key Engineering Materials. ISSN 1013-9826. ISBN 978-3-03835-579-3. DOI 10.4028/www.scientific.net/KEM.677.98.
- (29) LAIBLOVÁ, L. et al. Influence of Silica Nanoparticles on Mechanical Properties of HPC. In: PADEVĚT, P., ed. *Modern Methods of Experimental and Computational Investigations in Area of Construction*. Nano a Makro Mechanika 2015 - 6. ročník konference, Praha, 2015-09-17. Pfaffikon: Trans Tech Publications Inc., 2016. s. 81-84. Applied Mechanics and Materials Vol. 825. ISSN 1660-9336. ISBN 978-3-03835-603-5. DOI 10.4028/www.scientific.net/AMM.825.81.
- (30) VLACH, T. et al. Cohesion of Composite Reinforcement Produced from Rovings with High Performance Concrete. 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. 397-402. Applied Mechanics and Materials. ISSN 1660-9336. ISBN 978-3-03835-413-0. DOI 10.4028/www.scientific.net/AMM.732.397.

- (31) LAIBLOVÁ, L., T. VLACH a M. ŽENÍŠEK. Využití technických textilií jako alternativní výztuže do subtilních fasádních panelů z vysokohodnotného betonu. In: MATUŠKA, T., ed. *Symposium Energeticky efektivní budovy 2015*. Buštěhrad, 2015-10-15. Praha: Společnost pro techniku prostředí, 2015. s. 155-160. 1. vydání. ISBN 978-80-02-02615-0.
- (32) ŽENÍŠEK, M., T. VLACH a L. LAIBLOVÁ. Dávkování mikrosiliky ve vysokohodnotném betonu. In: *12. KONFERENCE SPECIÁLNÍ BETONY*. Speciální betony 2015, Skalský dvůr, 2015-10-14/2015-10-16. Praha: Sekurkon, 2015. s. 30-34. ISBN 978-80-86604-67-1.
- (33) LAIBLOVÁ, L. et al. Development of Lightweight TRC Panel for Sustainable Building Envelope. In: HÁJEK, P. et al., eds. *Central Europe towards Sustainable Building 2016 - Innovations for Sustainable Future*. Central Europe towards Sustainable Building 2016 Innovations for Sustainable Future, Prague, 2016-06-22/2016-06-24. Praha: GRADA PUBLISHING, 2016. s. 1169-1174. 1st edition, Prague, June 2016, Complete edition - printed version + Flash disk with full paper version. ISBN 978-80-271-0248-8.
- (34) VLACH, T. et al. Waffle Facade Elements from Textile Reinforced High Performance Concrete. In: FEHLING, EF, BF MIDDENDORF a JT THIEMICKE, eds. *Proceedings of HiPerMat 2016 - 4th International Symposium on Ultra-High Performance Concrete and High Performance Construction Materials*. HiPerMat 2016 - 4th International Symposium on Ultra-High Performance Concrete and High Performance Construction Materials, Kassel, 2016-03-09/2016-03-11. Kassel: Kassel University Press GmbH, 2016. ISBN 978-3-7376-0094-1.
- (35) VLACH, T. et al. Comparison of Two Approaches for the Tensile Test of Single Roving in Polymer Matrix. In: *Experimental Stresss Analysis 2016*. 54. konference Experimentální Analýza Napětí, Srní, 2016-05-30/2016-06-02. Plzeň: Západočeská universita, Fakulta aplikovaných věd, 2016. ISBN 978-80-261-0624-1.
- (36) ŽENÍŠEK, M., T. VLACH a L. LAIBLOVÁ. Flexural Strength of the Reactive Powder Concrete. 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. Pöfaffikon: Trans Tech Publications Ltd., 2016. s. 108-111. Solid State Phenomena. ISSN 1662-9779. ISBN 978-3-03835-675-2. DOI 10.4028/www.scientific.net/SSP.249.108.
- (37) VLACH, T. et al. Influence of Carbon Nanotubes on Mechanical Properties of High Performance Concrete (HPC). 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. Pöfaffikon: Trans Tech Publications Inc., 2016. s. 107-110. ISSN 1013-9826. ISBN 978-3-03835-719-3. DOI 10.4028/www.scientific.net/KEM.714.107.
- (38) LAIBLOVÁ, L. et al. Comparison of different types of glass reinforcement for HPC façade elements from mechanical and economical aspects. In: REITERMAN, P., ed. *Special Concrete and Composites 2016*. Speciální betony 2016, Bystřice nad Pernštejnem, Lísek, 2016-10-13/2016-10-14. Curich: Trans Tech Publications, 2017. s. 286-291. Key Engineering Materials. ISSN 1013-9826. ISBN 978-3-0357-1079-3. DOI 10.4028/www.scientific.net/KEM.722.286.
- (39) ŽENÍŠEK, M., T. VLACH a L. LAIBLOVÁ. Dosage of Metakaolin in High Performance Concrete. In: REITERMAN, P., ed. *Special Concrete and Composites 2016*. Speciální betony 2016, Bystřice nad Pernštejnem, Lísek, 2016-10-13/2016-10-14. Curich: Trans Tech Publications, 2017.



s. 311-315. Key Engineering Materials. ISSN 1013-9826. ISBN 978-3-0357-1079-3. DOI 10.4028/www.scientific.net/KEM.722.311.

- (40) ŽENÍŠEK, M., T. VLACH a L. LAIBLOVÁ. Dávkování metakaolinu ve vysokohodnotném betonu. In: *13. konference Speciální betony 2016*. Speciální betony 2016, Bystřice nad Pernštejnem, Lísek, 2016-10-13/2016-10-14. Praha: Sekurkon, 2016. s. 31-35. ISBN 978-80-86604-70-1.
- (41) LAIBLOVÁ, L. et al. Různé typy skleněných výztuží pro HPC fasádní prvky a jejich porovnání z mechanického a ekonomického hlediska. In: *13. konference Speciální betony 2016*. Speciální betony 2016, Bystřice nad Pernštejnem, Lísek, 2016-10-13/2016-10-14. Praha: Sekurkon, 2016. s. 97-102. ISBN 978-80-86604-70-1.
- (42) ŘEPKA, J. et al. Vylehčené subtilní panely z textilního betonu. 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.
- ŽENÍŠEK, M., T. VLACH a L. LAIBLOVÁ. Mixing of concretes with extremely low water-cement ratio. In: NENADÁLOVÁ, Š, PJOHOVÁ 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. 41-45. Solid State Phenomena. sv. 259. ISSN 1662-9779. ISBN 978-3-0357-1105-9. DOI 10.4028/www.scientific.net/SSP.259.41.
- (43) ŘEPKA, J. et al. Thin Lightweight Panels Made of Textile Reinforced Concrete. In: NENADÁLOVÁ, Š, PJOHOVÁ 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. 238-243. Solid State Phenomena. sv. 259. ISSN 1662-9779. ISBN 978-3-0357-1105-9. DOI 10.4028/www.scientific.net/SSP.259.238.
- (44) VLACH, T., L. LAIBLOVÁ a P. HÁJEK. Influence of Different Fillers in Polymer Matrix of Single Roving on the Tensile Properties. In: RYPAROVÁ, P. a P. TESÁREK, eds. *Contemporary Materials and Technologies in Civil Engineering*. Nanomateriály a nanotechnologie ve stavebnictví 2016, Praha, 2016-06-15. Curich: Trans Tech Publications, 2017. s. 86-91. 731. ISSN 1013-9826. ISBN 978-3-0357-1138-7. DOI 10.4028/www.scientific.net/KEM.731.86.
- (45) VLACH, T. et al. Influence of Penetrated Roving Surface Treatment on the Crack Width Using Pull-Out Test. In: TREBUŇA, F et al., eds. *55th Conference on Experimental Stress Analysis 2017*. 55th International Scientific Conference on Experimental Stress Analysis 2017, Nový Smokovec, 2017-05-30/2017-06-01. Košice: Technical University of Kosice, 2017. s. 87-90. ISBN 978-80-553-3167-6.
- (46) LAIBLOVÁ, L. et al. Vylehčené TRC fasádní panely s LED diodami. In: *14. konference Speciální betony 2017*. Skalský Dvůr, 2017-10-10/2017-10-11. Praha: Sekurkon, 2017. ISBN 978-80-86604-73-2.
- (47) VLACH, T. et al. Měkká vložka použita pro modelování podpory slabě vyztuženého textilního betonu. In: *14. konference Speciální betony 2017*. Skalský Dvůr, 2017-10-10/2017-10-11. Praha: Sekurkon, 2017. ISBN 978-80-86604-73-2.
- (48) ŘEPKA, J. et al. Hodnocení účinnosti povrchových úprav betonu. In: *24. Betonářské dny 2017 - Sborník příspěvků*. 24. Betonářské dny 2017, Litomyšl, 2017-11-22/2017-11-23. Praha: ČBS - Česká betonářská společnost ČSSI, 2017. ISBN 978-80-906759-0-2.
- (49) LAIBLOVÁ, L. et al. Lightweight TRC Facade Panels with the LEDs. In: REITERMAN, P., ed. *Special Concrete and Composites 2017*. 14th International Conference on Special Concrete and



- Composites, Skalský Dvůr, 2017-10-10/2017-10-11. Zürich: Transtech Publications, 2018. s. 141-146. Key Engineering Materials. sv. 760. ISSN 1013-9826. ISBN 978-3-0357-1240-7. DOI 10.4028/www.scientific.net/KEM.760.141.
- (50) ŽENÍŠEK, M., T. VLACH a L. LAIBLOVÁ. Aggregate Segregation of Ultra-High Performance Concrete. In: REITERMAN, P., ed. *Special Concrete and Composites 2017*. 14th International Conference on Special Concrete and Composites, Skalský Dvůr, 2017-10-10/2017-10-11. Zürich: Transtech Publications, 2018. s. 164-168. Key Engineering Materials. sv. 760. ISSN 1013-9826. ISBN 978-3-0357-1240-7. DOI 10.4028/www.scientific.net/KEM.760.164.
- (51) VLACH, T. et al. Soft Insert for Support Modeling of Slightly Textile Reinforced Concrete. In: REITERMAN, P., ed. *Special Concrete and Composites 2017*. 14th International Conference on Special Concrete and Composites, Skalský Dvůr, 2017-10-10/2017-10-11. Zürich: Transtech Publications, 2018. s. 158-163. Key Engineering Materials. sv. 760. ISSN 1013-9826. ISBN 978-3-0357-1240-7.
- (52) ŘEPKA, J. et al. Efficiency Evaluation of Concrete Surface Treatment. In: NENADÁLOVÁ, Š., P. JOHOVÁ a T. SAJDLOVÁ, eds. *24th Concrete Days 2017*. 24. Betonářské dny 2017, Litomyšl, 2017-11-22/2017-11-23. Curich: Trans Tech Publications, 2018. s. 9-14. Solid State Phenomena. sv. 272. ISSN 1662-9779. ISBN 978-3-0357-1284-1. DOI 10.4028/www.scientific.net/SSP.272.9. Dostupné z: <https://www.scientific.net/SSP.272.9>
- (53) HÁJEK, K. et al. Moderní mobiliář pro prostředí dopravních staveb. In: *Verejná osobná doprava 2017 - Zborník prednášok*. Verejná osobná doprava 2017, Bratislava, 2017-10-23/2017-10-24. Bratislava: Kongres STUDIO, spol. s r.o., 2017. ISBN 978-80-89565-33-7.
- (54) ŘEPKA, J. et al. Vylehčování subtilních panelů z textilního betonu. In: *41. vědecká mezinárodní konference ústavů a kateder pozemních staveb České a Slovenské republiky*. Dlouhá Lhota, 2018-09-19/2018-10-21. Praha: ČVUT, Fakulta stavební, Katedra konstrukcí pozemních staveb, 2018. s. 55-58. ISBN 978-80-01-06494-8.
- (55) ŘEPKA, J. et al. Utilization of Vacuum-Formed Plastic Membranes for the Production of Lightened HPC Panels. In: JOHOVÁ, P. a Š. NENADÁLOVÁ, eds. *25th Concrete Days 2018*. 25. betonářské dny, Praha, 2018-11-20/2018-11-22. Curich: Trans Tech Publications, 2019. s. 236-241. Solid State Phenomena. sv. 292. ISSN 1662-9779.
- (56) ŽALSKÝ, J. et al. Numerical Analysis of Rigid Frame Joint with Textile Carbon Reinforcement. In: JOHOVÁ, P. a Š. NENADÁLOVÁ, eds. *25th Concrete Days 2018*. 25. betonářské dny, Praha, 2018-11-20/2018-11-22. Curich: Trans Tech Publications, 2019. s. 159-163. Solid State Phenomena. sv. 292. ISSN 1662-9779.
- (57) ŘEPKA, J. et al. Využití vakuově tvářených folií pro výrobu vylehčených panelů z HPC. 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.
- (58) ŽALSKÝ, J. et al. Numerická analýza rámového rohu vyztuženého textilní uhlíkovou výztuží. 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.
- (59) LAIBLOVÁ, L. et al. Using TRC as an Environmentally Effective Alternative for Subtle Elements of Railway Furniture. In: SOJKOVÁ, K. et al., eds. *Central Europe towards Sustainable Building (CESB19)*. Central Europe towards Sustainable Building 2019, Praha, 2019-07-02/2019-07-04.



Bristol: IOP Publishing Ltd, 2019. IOP Conference Series. ISSN 1755-1307. DOI 10.1088/1755-1315/290/1/012020.

- (60) VLACH, T. et al. *Pergola z vylehčených betonových prvků s uhlíkovou výztuží*. [Prototyp] 2019.
- (61) České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Katedra konstrukcí pozemních staveb, Praha 6, CZ. *Fasádní panel z vysokohodnotného betonu a způsob jeho výroby*. Původci: P. HÁJEK et al. Česká republika. Patent CZ 307206. 2018-02-07. Dostupné z: <http://isdv.upv.cz/doc/FullFiles/Patents/FullDocuments/307/307206.pdf>
- (62) 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.
- (63) ŽENÍŠEK, M., T. VLACH a L. LAIBLOVÁ. *Vylehčený fasádní panel s LED obrazovkou*. [Funkční vzorek] 2017.
- (64) LAIBLOVÁ, L. et al. *Stůl s lepeným spojem vysokohodnotný beton - ocel*. [Funkční vzorek] 2018.



Účast na grantových projektech

- Název projektu (česky) GAČR P104 13-12676S
Pokročilý výzkum UHPC matrice pro ultra tenké prvky s nekonvenční výztuží

Název projektu (anglicky) GAČR P104 13-12676S
Advanced research on UHPC matrix for ultra-light elements with non-conventional reinforcement

Role v projektu řešitel
Doba trvání 2012-2016
Poskytovatel GAČR
- Název projektu (česky) CZ.01.1.02/0.0/0.0/15_019/0004908
Pokročilé betonové prvky s tkanou výztuží

Název projektu (anglicky) CZ.01.1.02/0.0/0.0/15_019/0004908
Advanced Concrete Elements with Woven Reinforcement

Role v projektu řešitel
Doba trvání 2016-2019
Poskytovatel Operační program Podnikání a inovace pro konkurenceschopnost
- Název projektu (česky) TH02020512 Subtilní betonový mobiliář a drobné stavby pro železniční stanice

Název projektu (anglicky) TH02020512 Subtle Concrete Furniture and Small Structures for the Railways Stations

Role v projektu řešitel
Doba trvání 2017-2019
Poskytovatel TAČR
- Název projektu (česky) CZ.07.1.02/0.0/0.0/16_0403/0000364 Technologický transfer pro chytrou Prahu; Dílčí projekt 05: Inteligentní solární lavička

Název projektu (anglicky) CZ.07.1.02/0.0/0.0/16_0403/0000364 Technology transfer for smart Prague; Sub Project 05: Smart Solar Bench

Role v projektu řešitel

Doba trvání 2018-2019
Poskytovatel Operační program Praha - pól růstu ČR
- Název projektu (česky) SGS14/116/OHK1/2T/11
Optimalizace složení směsi UHPC a alternativní druhy výztužení

Název projektu (anglicky) SGS14/116/OHK1/2T/11 Optimization of mix UHPC composition and alternative types of reinforcement

Role v projektu řešitel
Doba trvání 2014 – 2015
Poskytovatel ČVUT



- 6 Název projektu (česky) SGS15/182/OHK1/3T/11 Ověření trvanlivosti a životnosti cementových kompozitů a recyklovaných betonů
- Název projektu (anglicky) SGS15/182/OHK1/3T/11 Verification of durability and lifespan of cement composites and recycled concrete
- Role v projektu řešitel
Doba trvání 2015 - 2018
Poskytovatel ČVUT
- 7 Název projektu (česky) SGS16/131/OHK1/2T/11 Experimentální fasádní panely z UHPC jako podklad pro LED obrazovky
- Název projektu (anglicky) SGS16/131/OHK1/2T/11 Experimental Facade Panels from UHPC as a Base for LED Display
- Role v projektu řešitel
Doba trvání 2016- 2017
Poskytovatel ČVUT
- 8 Název projektu (česky) SGS17/010/OHK1/1T/11 Využití odpadního skleněného prachu ve vysokohodnotném betonu
- Název projektu (anglicky) SGS17/010/OHK1/1T/11 Glass Powder Waste Utilization in High Performance Concrete
- Role v projektu řešitel
Doba trvání 2017
Poskytovatel ČVUT
- 9 Název projektu (česky) SGS18/110/OHK1/2T/11 Subtilní profilované velkoformátové panely z TRC pro environmentálně efektivní konstrukci fasád
- Název projektu (anglicky) SGS18/110/OHK1/2T/11 Thin Large Format Panels Made of TRC with Profiled Cross-Section for Environmentally Efficient Facade Design
- Role v projektu řešitel
Doba trvání 2018-2019
Poskytovatel ČVUT
- 10 Název projektu (česky) SGS18/108/OHK1/2T/11 Environmentální aspekty vysokohodnotných cementových kompozitů a betonů s recyklovaným kamenivem se zohledněním jejich trvanlivosti a životnosti
- Název projektu (anglicky) SGS18/108/OHK1/2T/11 Environmental aspects of high performance cement composites and concrete with recycled aggregate including their durability and service life
- Role v projektu hlavní řešitel
Doba trvání 2018-2019
Poskytovatel ČVUT

9 Přílohy



CEM-FIL® 5325

AR DIRECT ROVING FOR CONCRETE & MORTARS



DESCRIPTION

- **Cem-FIL® 5325** roving is made from engineered AR-glass wound filament designed to be used with concrete, mortar and all hydraulic binder-based mix-designs.
- Cem-FIL® 5325 rovings have a high Elastic Modulus and Tensile Strength making it ideal as an effective reinforcement for cement/concrete matrices. It will not rot or corrode and is unaffected by UV radiation, making it suitable for use with minimal cover.

BENEFITS

- Alkali resistant glass*
- Excellent unwinding
- Low level of fuzz
- Compatible with coating and hydraulic binder matrices
- Easy chopping
- Very easy incorporation into the matrix
- Enhancement of GRC mechanical performance and durability
- High tensile strength

APPLICATIONS

- Cem-FIL® 5325 has been particularly designed for the weaving of fabrics, meshes/nets, scrims, etc. Its surface coating (size) is compatible with cement-based matrices
- Cem-FIL® 5325 rovings are particularly well suited to the needs of the market for the reinforcement of GRC (Glass Reinforced Cement) as well as screeds, mortars or renders

* Our fibers are manufactured with high Zirconia content in compliance with ASTM C1666/C 1666/M-07 and EN 15422 and under the recommendations of PCI and GRCA



CEM-FIL® 5325

AR DIRECT ROVING

TECHNICAL CHARACTERISTICS

Linear density of Roving (Tex) (ISO 1889 : 2009)	Linear density of Strand (Tex) (ISO 1889 : 2009)	Loss on Ignition (%) (ISO 1887 : 1995)	Moisture (%) (ISO 3344 : 1997)
320	14	0.80	0.50 max.
640	14	0.80	0.50 max.
1200	19	0.80	0.50 max.
2400	27	0.80	0.50 max.

- Assembled Roving
- Electrical Conductivity: Very low
- Specific Gravity: 2.68 g/cm³
- Material: Alkali Resistant Glass*
- Softening point: 860°C – 1580°F
- Chemical Resistance: Very high
- Modulus of elasticity: 72 GPa – 10 x 10⁶ psi
- Tensile Strength: 1000–1700 MPa – 145–250 x 10³ psi

* Our fibers are manufactured with high Zirconia content in compliance with ASTM C1666/C 1666/M-07 and EN 15422 and under the recommendations of PCI and GRCA

PACKAGING AND STORAGE

Cem-FIL® 5325 rovings are protected by a shrink-wrap polythene film, open at the top which should not be removed when the product is in use. Rovings are packed on pallets. Cem-FIL® 5325 rovings should be stored away from heat and moisture, and in their original packaging. Optimum conditions are temperature between 15°C and 35°C and humidity between 35% and 65%. If the product is stored at lower temperatures it is advisable to condition it in the workshop for at least 24 hours before use, to prevent condensation.

QUALITY STANDARDS – CERTIFICATION

Cem-FIL® 5325 fibers are manufactured under a quality Management System approved to ISO 9001.

Cem-FIL® fibers are not classified as dangerous by the Regulation 1272/2008/EC. For more information, please refer to our Safe Use Instructions Sheet.

For further info please send a email to: cem-fil@owenscorning.com / www.cem-fil.com

Americas

Owens Corning
Composite Materials, LLC.
One Owens Corning Parkway
Toledo, Ohio 43659
1.800.get.pink™
+1-623-566-0206

Europe

European Owens Corning
Fiberglas Sprl.
166 Chaussée de la Hulpe
B-1170 Brussels
Belgium
+33.479.75.5300

Asia Pacific

Owens Corning - OC Asia Pacific
Shanghai Regional Headquarters
40/F, Pudong Kerry Parkside,
1155 Fang Dian Road, Pudong, Shanghai,
201204, China
+86-21-6101 9666

This information and data contained herein is offered solely as a guide in the selection of product. We believe this information to be reliable, but do not guarantee its applicability to the user's process or assume any responsibility or liability arising out of its use or performance. The user agrees to be responsible for thoroughly testing any application of the product to determine its suitability. Because of numerous factors affecting results, we make no warranty of any kind, express or implied, including those of merchantability and fitness for a particular purpose. Statements in this publication shall not be construed as representations or warranties or as inducements to infringe any patent or violate any law, safety code or insurance regulation. We reserve the right to modify this document without prior notice.

© 2017 Owens Corning. All Rights Reserved.. Picture: iStockphoto.com

Pub number: 10010692. Cem-FIL 5325_product sheet_ww_06-2017_Rev8_EN. June 2017

[Cem-fil@owenscorning.com](mailto:cem-fil@owenscorning.com)
www.cem-fil.com

T700S DATA SHEET

Highest strength, standard modulus fiber available with excellent processing characteristics for filament winding and prepreg. This never twisted fiber is used in high tensile applications like pressure vessels, recreational, and industrial.

FIBER PROPERTIES

		English	Metric	Test Method
Tensile Strength		711 ksi	4,900 MPa	TY-030B-01
Tensile Modulus		33.4 Msi	230 GPa	TY-030B-01
Strain		2.1 %	2.1 %	TY-030B-01
Density		0.065 lbs/in ³	1.80 g/cm ³	TY-030B-02
Filament Diameter		2.8E-04 in.	7 μm	
Yield	6K	3,724 ft/lbs	400 g/1000m	TY-030B-03
	12K	1,862 ft/lbs	800 g/1000m	TY-030B-03
	24K	903 ft/lbs	1,650 g/1000m	TY-030B-03
Sizing Type	50C		1.0 %	TY-030B-05
& Amount	60E		0.3 %	TY-030B-05
	FOE		0.7 %	TY-030B-05
	Twist	Never twisted		

FUNCTIONAL PROPERTIES

CTE	-0.38 $\alpha \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
Specific Heat	0.18 Cal/g $\cdot^{\circ}\text{C}$
Thermal Conductivity	0.0224 Cal/cm $\cdot\text{s}\cdot^{\circ}\text{C}$
Electric Resistivity	$1.6 \times 10^{-3} \Omega\cdot\text{cm}$
Chemical Composition: Carbon	93 %
	Na + K

COMPOSITE PROPERTIES *

Tensile Strength	370 ksi	2,550 MPa	ASTM D-3039
Tensile Modulus	20.0 Msi	135 GPa	ASTM D-3039
Tensile Strain	1.7 %	1.7 %	ASTM D-3039
Compressive Strength	215 ksi	1,470 MPa	ASTM D-695
Flexural Strength	245 ksi	1,670 MPa	ASTM D-790
Flexural Modulus	17.5 Msi	120 GPa	ASTM D-790
ILSS	13 ksi	9 kgf/mm ²	ASTM D-2344
90° Tensile Strength	10.0 ksi	69 MPa	ASTM D-3039

* Toray 250°F Epoxy Resin. Normalized to 60% fiber volume.

T700S

COMPOSITE PROPERTIES * *

Tensile Strength	355 ksi	2,450 MPa	ASTM D-3039
Tensile Modulus	18.0 Msi	125 GPa	ASTM D-3039
Tensile Strain	1.7 %	1.7 %	ASTM D-3039
Compressive Strength	230 ksi	1,570 MPa	ASTM D-695
Compressive Modulus	--- Msi	--- GPa	ASTM D-695
In-Plane Shear Strength	14 ksi	98 MPa	ASTM D-3518
ILSS	15.5 ksi	11 kgf/mm ²	ASTM D-2344
90° Tensile Strength	10.0 ksi	70 MPa	ASTM D-3039

** Toray Semi-Toughened 350°F Epoxy Resin. Normalized to 60% fiber volume.

See Section 4 for Safety & Handling information. The above properties do not constitute any warranty or guarantee of values.

These values are for material selection purposes only. For applications requiring guaranteed values, contact our sales and technical team to establish a material specification document.

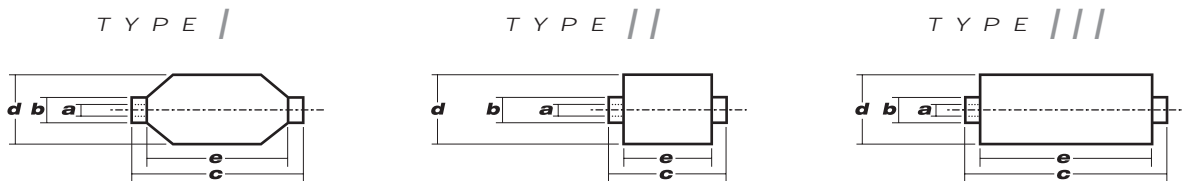
PACKAGING

The table below summarizes the tow sizes, twists, sizing types, and packaging available for standard material. Other bobbin sizes may be available on a limited basis.

Tow Sizes	Twist ¹	Sizing	Bobbin Net Weight (kg)	Bobbin Type ²	Bobbin Size (mm)					Spools per Case	Case Net Weight (kg)
					a	b	c	d	e		
6K	C	50C	2.0	///	76.5	82.5	280	140	252	12	24
	C	50C	6.0	///	76.5	82.5	280	200	252	4	24
12K	C	60E	6.0	///	76.5	82.5	280	200	252	4	24
	C	FOE	6.0	///	76.5	82.5	280	200	252	4	24
24K	C	50C	6.0	///	76.5	82.5	280	200	252	4	24
	C	60E	6.0	///	76.5	82.5	280	200	252	4	24
	C	FOE	6.0	///	76.5	82.5	280	200	252	4	24
	C	FOE	6.0	///	76.5	82.5	280	200	252	4	24

¹ **Twist** A: Twisted yarn B: Untwisted yarn made from a twisted yarn through an untwisting process C: Never twisted yarn

² **Bobbin Type** See Diagram below



TORAY CARBON FIBERS AMERICA, INC.

6 Hutton Centre Drive, Suite #1270, Santa Ana, CA 92707 TEL: (714) 431-2320 FAX: (714) 424-0750

Sales@Toraycfa.com Technical@Toraycfa.com www.torayusa.com

Torayca® yarn

Toray's Torayca® yarn is a high-performance carbon fiber made of polyacrylonitrile (PAN). After releasing its Torayca® T300 in 1971, Toray has been manufacturing high-performance carbon fiber longer than any other company in the world, providing a number of high-quality, stable products.

With its excellent characteristics, Torayca® composite materials are contribution significantly to wide-ranging fields including aerospace, industrial, sport/leisure, etc.



1. Physical property table of Torayca® yarn

Product No.	Filaments	Tensile strength (MPa)	Tensile strength (kgf/mm ²)	Modulus of elongation (GPa)	Modulus of elongation (kgf/mm ²)	Elongation (%)	Fineness tex (g/1000m)	Density (g/cm ³)	
T300	T300-1000	1000	3530	360	230	23500	1.5	66	1.76
	T300-3000	3000	3530	360	230	23500	1.5	198	1.76
	T300-6000	6000	3530	360	230	23500	1.5	396	1.76
	T300-12000	12000	3530	360	230	23500	1.5	800	1.76
T300B	T300B-1000	1000	3530	360	230	23500	1.5	66	1.76
	T300B-3000	3000	3530	360	230	23500	1.5	198	1.76
	T300B-6000	6000	3530	360	230	23500	1.5	396	1.76
	T300B-12000	12000	3530	360	230	23500	1.5	800	1.76
T400HB	T400HB-3000	3000	4410	450	250	25500	1.8	198	1.8
	T400HB-6000	6000	4410	450	250	25500	1.8	396	1.8
T700SC	T700SC-12000	12000	4900	500	230	23500	2.1	800	1.8
	T700SC-24000	24000	4900	500	230	23500	2.1	1650	1.8
T800SC	T800SC-24000	24000	5880	600	294	30000	2	1030	1.8
T800HB	T800HB-6000	6000	5490	560	294	30000	1.9	223	1.81
	T800HB-12000	12000	5490	560	294	30000	1.9	445	1.81
T830HB	T830HB-6000	6000	5340	545	294	30000	1.8	223	1.81
T1000GB	T1000GB-12000	12000	6370	650	294	30000	2.2	485	1.8
T1100GC	T1100GC-12000	12000	7000	715	324	33000	2	505	1.79
	T1100GC-24000	24000	7000	715	324	33000	2	1010	1.79
M35JB	M35JB-6000	6000	4510	460	343	35000	1.3	225	1.75
	M35JB-12000	12000	4700	480	343	35000	1.4	450	1.75
M40JB	M40JB-6000	6000	4400	450	377	38500	1.2	225	1.77
	M40JB-12000	12000	4400	450	377	38500	1.2	450	1.77
M46JB	M46JB-6000	6000	4200	430	436	44500	1	223	1.84
	M46JB-12000	12000	4020	410	436	44500	0.9	445	1.84
M50JB	M50JB-6000	6000	4120	420	475	48500	0.9	216	1.88
M55J	M55J-6000	6000	4020	410	540	55000	0.8	218	1.91
M55JB	M55JB-6000	6000	4020	410	540	55000	0.8	218	1.91
M60JB	M60JB-3000	3000	3820	390	588	60000	0.7	103	1.93
	M60JB-6000	6000	3820	390	588	60000	0.7	206	1.93
M30SC	M30SC-18000	18000	5490	560	294	30000	1.9	760	1.73

2. Product specifications of Torayca® yarn

Yarn type	Fiber weight(kg)	Packaging type	Packaging size (mm)					Packing unit (Net weight: kg)	
			a	b	c	d	e		
T300	1K A/B	1.0	II	76	82	192	132	156	1.0×12=12
	3K A/B	2.0	II	76	82	192	157	156	2.0×12=24
	6K A/B	2.0	II	76	82	192	157	156	2.0×12=24
	12K A/B	4.0	II	76	82	192	204	156	4.0×6=24
T400H	3K A/B	2.0	II	76	82	192	157	156	2.0×12=24
	6K A/B	2.0	II	76	82	192	157	156	2.0×12=24
T700S	12K C	6.0	III	76.5	82.5	280	200	252	6.0×4=24
	24K C	6.0	III	76.5	82.5	280	200	252	6.0×4=24
T800S	24K C	7.8	III	76.5	82.5	280	170	252	7.8×4=31.2
T800H	6K B	2.0	II	76	82	192	157	156	2.0×12=24
	12K B	4.0	III	76.5	82.5	280	176	252	4.0×6=24
T830H	6K B	2.0	II	76	82	192	157	156	2.0×12=24
T1000G	12K B	2.0	III	76.5	82.5	280	140	252	2.0×12=24
T1100G	12K C	2.0	III	76.5	82.5	280	170	252	2.0×12=24
	24K C	4.0	III	76.5	82.5	280	170	252	4.0×6=24
M35J	6K B	1.0	II	76	82	192	126	156	1.0×12=12
	12K B	2.0	II	76	82	192	157	156	2.0×12=24
M40J	6K B	1.0	II	76	82	192	126	156	1.0×12=12
	12K B	2.0	II	76	82	192	157	156	2.0×12=24
M46J	6K B	1.0	II	76	82	192	126	156	1.0×12=12
	12K B	2.0	II	76	82	192	157	156	2.0×12=24
M50J	6K B	1.0	II	76	82	192	126	156	1.0×12=12
M55J	6K B	0.5	II	76	82	192	107	156	0.5×24=12
M60J	3K B	0.2	II	76	82	192	94	156	0.2×20=4.0
	6K B	0.4	II	76	82	192	103	156	0.4×20=8.0
M30S	18K C	4.0	III	76.5	82.5	280	170	252	4.0×6=24

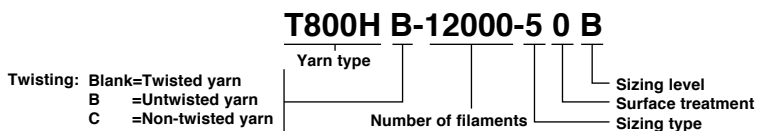
● Display method <Cautions>

The above data is displayed on the Torayca® label.

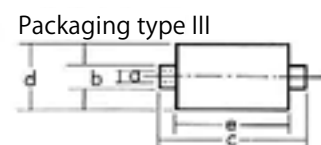
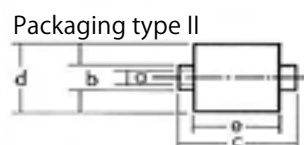
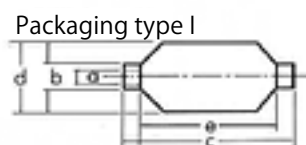
<Cautions>

On Toray's products, the number of filaments is some - times indicated using "K," which is an abbreviated symbol meaning 1000. Also, twisted yarns and untwisted yarns are denoted by the symbols "A" and "B," respectively.

To be specific, Torayca® 3000 twisted yarn is called "3K A," while Torayca® 6000 untwisted yarn is called "6K B."



● Packaging standards



3. Handling precautions for carbon fiber

- Carbon fiber is conductive. Implement dust-proof measures to prevent electrical equipment from shorting, malfunctioning, etc., due to fibers scattering and flying around in the work area.
- No cases of health problems due to carbon fiber have been reported, but short fibers may attach to the skin or viscous membrane to cause itchiness or inflammation. When handling carbon fiber, wear a mask, gloves and other protective equipment to prevent carbon fiber from being inhaled or attaching to the skin.
- Incinerating waste material of carbon fiber or carbon fiber composite material may cause fibers to scatter and fly around and cause electrical failures. It is appropriate to bury such material as industrial waste.

Cautions

1. This product documentation does not guarantee the result or product safety/compliance achieved by applying the information provided herein. When using the product, confirm its safety/compliance according to the purpose of use.
 2. Our carbon fiber Torayca® products or technologies relating to the design, manufacturing or use thereof may be classified as the goods specified in 1 to 15 of Appended Table 1 of the Export Trade Control Order, or as the technologies specified in 1 to 15 of Appended Table 1 of the Foreign Exchange Order, or as other goods/technologies that may be specified by the government as being subject to export control for national security reasons.

When exporting or providing to a non-resident any such Torayca® product or any such technology relating to the design, manufacture or use of Torayca® product, an export permission or service transaction permission must be obtained from the Minister of Economy, Trade and Industry or other necessary procedure must be taken according to the Foreign Exchange and Foreign Trade Act or other relevant law, notice, etc.
- Torayca® is a registered trademark of Toray's high-performance carbon fiber.

Toray Industries, Inc.

Tokyo Head Office
2-1-1 Nihonbashi Muromachi, Chuo-ku, Tokyo 103-8666
TEL : +81(3)3245-5758 FAX : +81(3)3245-5817

Osaka Head Office
3-3-3 Nakanoshima, Kita-ku, Osaka 530-8222
TEL : +81(6)7688-3166 FAX : +81(6)7688-3075

URL : <http://www.torayca.com/en/>



BASALTEX a.s.
Uničovská 296/46
787 01 Šumperk
Česká republika

TECHNICKÝ LIST

Podniková norma: **Čedičový Roving**

Technický list číslo: **003 – 2012**

Název: **ROVING 2.520 tex**

Technické parametry:

1. Použitý materiál:	100 % Basalt
2. Multifinament :	čedičová nekonečná vlákna
3. Průměr filamentu / μm /:	13
4. Měrná hmotnost / g/cm^3 /:	2,66
5. Tepelná vodivost / W/mK /:	0,031 – 0,038
6. Délková hmotnost /tex/:	2520
7. Pevnost v tahu /MPa/:	2600 - 2900
8. Tažný modul /GPa/:	85 - 90
9. Min. pevnost v tahu suchého vlákna /N/: (ASTM D3822)	1260
10. Typ lubrikace :	silan
11. Obsah lubrikace /hmotnostních %/:	0,5 – 0,7
12. Obsah vlhkosti /hmotnostních %/:	< 0,3
13. Ostatní údaje:	Kompatibilní s pryskyřicemi epoxidovými, vinyl esterovými i polyesterovými.
14. Balení návin /kg/:	9
15. Max. teplota při používání / °C/:	- 260 až + 560
16. Krátkodobá tepelná expozice / °C/ :	+ 700
17. Skladování: Skladování v suchých skladech, na roli nesmí působit žádný tlak. Teplota skladování je -10 °C až + 50 °C.	

Nahrazuje : -

Účinnost: 2.4. 2012

Zpracovatel: -

Schválil:

Ing. Josef Kimmer
business manager

Telefon: +420 583 222 220

IČO: 416 95 721

E-mail: info@basaltex.cz

DIČ: CZ416 95 721

Firma zapsána OR u Krajský obchodní soud v Ostravě oddíl B, vložka 2769.

PRODUKTOVÝ LIST

Sikafloor®-156

2KOMPONENTNÍ EPOXIDOVÝ PENETRAČNÍ NÁTĚŘ, VYROVNÁVACÍ MALTA A STĚRKA

POPIS PRODUKTU

Sikafloor®-156 je 2komponentní, nízkoviskózní epoxidová pryskyřice. Celkový obsah pevných částic, podle testovací metody "Deutsche Bauchemie".

POUŽITÍ

Sikafloor®-156 může být použit pouze proškolenými aplikátory

- pro penetraci betonových podkladů, cementových stěrek a epoxidových malt
- vhodný na normálně až silně savé podklady
- penetrační nátěr pod všechny epoxidové a polyuretanové podlahové nátěry Sikafloor®
- spojovací můstek pod vyrovnávací malty a stěrky
- určen pro vnitřní i vnější použití

VLASTNOSTI / VÝHODY

- nízkoviskózní
- dobrá penetrační schopnost
- vysoká přídržnost
- snadná aplikace
- krátké čekací doby
- víceúčelový
- vhodný i pro použití v exteriéru

SCHVÁLENÍ / STANDARDY

Systém ochrany povrchu betonu podle EN 1504-2 a potěrová malta podle EN 1504-2:2004 a EN 13813:2002, vydáno Prohlášení o vlastnostech č. 02 08 01 02 007 0 000001 2017, certifikováno Oznámeným subjektem č.0921 QDB, certifikát č. 2017 a označeno CE značkou.

Drenážní plastbeton – průkazní zkoušky, Zpráva č. P28/14 vydaná v 01/2015 zkušební laboratoří Horský s.r.o., Klánovická 286/12, Praha.

INFORMACE O PRODUKTU

Chemická báze	Epoxid	
Balení	Komponent A	1,875 kg, 7,5 kg a 18,75 kg
	Komponent B	0,625 kg, 2,5 kg a 6,25 kg
	Směs A+B	2,5 kg a 10 kg a 25 kg (kompletní balení)
	Velká balení (sudy):	
	Komponent A	180 kg a 1000 kg
	Komponent B	60 kg, 180 kg a 1000 kg
Vzhled / Barva	Pryskyřice - komponent A	transparentní, kapalina
	Tvrdidlo - komponent B	nahnědlá, kapalina
Skladovatelnost	24 měsíců od data výroby	
Podmínky skladování	Materiál musí být skladován v originálním, neotevřeném a nepoškozeném balení, v suchu a za teplot mezi +5 °C a +30 °C.	

Objemová hmotnost	Komponent A	~ 1,10 kg /l	(DIN EN ISO 2811-1)
	Komponent B	~ 1,02 kg /l	
	Směs	~ 1,1 kg /l	

Hodnoty jsou platné při +23 °C.

Obsah sušiny hmotnostně ~ 100 %

Obsah sušiny objemově ~ 100 %

TECHNICKÉ INFORMACE

Tvrdość Shore D	~83 (7 dní / +23 °C / 50% r.v.)	(DIN 53505)
Pevnosť v tlaku	Malta: ~55 N/mm ² (30 dní / +23 °C / 50% r.v.) Malta: Sikafloor®-156 smíchaný v poměru 1:10 s vhodnou směsí písku, viz níže.	(EN 196-1)
Pevnosť v ohybu	Malta: ~15 N/mm ² (30 dní / +23 °C / 50% r.v.) Malta: Sikafloor®-156 smíchaný v poměru 1:10 s vhodnou směsí písku, viz níže.	(EN 196-1)
Tahová přídržnosť	> 1,5 N/mm ² (porušení v betonu)	(EN 4624)

SYSTÉMOVÉ INFORMACE

Systémy

Primer

Málo / středně pórovitý beton 1 x Sikafloor®-156

Vysoce pórovitý beton 2 x Sikafloor®-156

Jemná vyrovnávací malta (nerovnosť povrchu < 1 mm)

Primer 1 x Sikafloor®-156

Vyrovnávací malta 1 x Sikafloor®-156 + křemičitý písek (zrnitost 0,1 - 0,3 mm) + Extender T

Vyrovnávací malta (nerovnosť povrchu < 2 mm)

Primer 1 x Sikafloor®-156

Vyrovnávací malta 1 x Sikafloor®-156 + křemičitý písek (zrnitost 0,1 - 0,3 mm) + Extender T

Epoxidová stěrka (tloušťka vrstvy 15 - 20 mm) / opravná malta

Primer 1 x Sikafloor®-156

Spojovací můstek 1 x Sikafloor®-156

Stěrka 1 x Sikafloor®-156 + vhodná směs písku

Doporučujeme použít následující směs písku (ověřeno z praxe). Vhodné rozložení zrnitosti pro tloušťku vrstvy 15 - 20 mm:

25 % křemičitého písku zrnitosti 0,1 - 0,5 mm

25 % křemičitého písku zrnitosti 0,4 - 0,7 mm

25 % křemičitého písku zrnitosti 0,7 - 1,2 mm

25 % křemičitého písku zrnitosti 2 - 4 mm

Poznámka: Největší velikost zrna musí být maximálně 1/3 tloušťky celkové vrstvy. Závisí na tvaru zrn a aplikačních podmínkách, musí být pečlivě vybrán druh kameniva a jeho zrnitost.

APLIKAČNÍ INFORMACE

Poměr míchání Komponent A : komponent B = 75 : 25 (hmotnostně)

Spotřeba

Nátěrový systém	Produkt	Spotřeba
Primer	1-2 x Sikafloor®-156	1-2 x 0,3 – 0,5 kg/m ²
Jemná vyrovnávací malta (nerovnost povrchu < 1 mm)	1 hm. díl Sikafloor®-156 + 0,5 hm. dílu kř. písku (zrnitost 0,1 – 0,3 mm) + 0,015 hm. dílu Extender T	1,4 kg/m ² /mm
vyrovnávací malta (nerovnost povrchu < 2 mm)	1 hm. díl Sikafloor®-156 + 1 hm. díl kř. písku (zrnitost 0,1 – 0,3 mm) + 0,015 hm. dílu Extender T	1,6 kg/m ² /mm
Spojovací můstek	1- 2 x Sikafloor®-156	1-2 x 0,3 – 0,5 kg/m ²
Epoxidová stěrka (tloušťka vrstvy 15 - 20 mm) / Opravná malta	1 hm. díl Sikafloor®-156 + 10 hm. dílů křemičitého písku	2,2 kg/m ² /mm

Poznámka: Výše uvedené hodnoty jsou pouze informativní a nepočítají s další spotřebou materiálu způsobenou pórovitostí a nerovnostmi podkladu. Ztráty a plýtvání materiálem rovněž nejsou započítány.

Teplota vzduchu v okolí	+10 °C min. / +30 °C max.	
Relativní vzdušná vlhkost	80 % r.v. max.	
Rosný bod	Pozor na kondenzaci! Podklad i nevytvrzený nátěr musí mít teplotu alespoň o 3 °C vyšší, než je rosný bod. Poznámka: Nízké teploty a vysoká vlhkost vzduchu může vést ke tvorbě výkvětů.	
Teplota podkladu	+10 °C min. / +30 °C max.	
Obsah vlhkosti v podkladu	< 4 % Testovací metoda: Sika®-Tramex meter, CM - měření nebo metoda Oven-dry. Bez vzrůstající vlhkosti dle ASTM (polyetylenová fólie).	
Zpracovatelnost	Teplota	Čas
	+10 °C	~ 60 minut
	+20 °C	~ 30 minut
	+30 °C	~ 15 minut

Čas vytvrzení	Čekací doba před aplikací bezrozpouštědlových produktů na Sikafloor®-156:		
	Teplota podkladu	Minimum	Maximum
	+10°C	24 hodin	4 dny
	+20°C	12 hodin	2 dny
	+30°C	8 hodin	24 hodin
	Čekací doba před aplikací produktů s obsahem rozpouštědel na Sikafloor®-156:		
	Teplota podkladu	Minimum	Maximum
	+10 °C	36 hodin	6 dní
	+20 °C	24 hodin	4 dny
	+30 °C	12 hodin	2 dny
Poznámka: Uvedené časy jsou pouze orientační a mohou být ovlivněny měněními se podmínkami okolí, především teplotou a relativní vlhkostí vzduchu.			

INSTRUKCE PRO APLIKACI**KVALITA PODKLADU / PŘEDPŘÍPRAVA**

- Betonový podklad musí být zdravý a musí mít minimální pevnost v tlaku 25,0 N/mm² a minimální pevnost povrchových vrstev v odtrhu 1,5 N/mm².

- Podklad musí být pevný, bez volných a pískových částic, bez prachu a dalších znečištění jako jsou tuky, oleje, staré nátěry a povrchová ošetření apod.
- Betonový podklad musí být mechanicky připraven, např. tryskáním nebo frézováním, aby byly odstraněny veškeré volné částice a otevřena povrchová struktura betonu.

- Nekvalitní beton musí být odstraněn a povrchové vady jako jsou díry a prázdná místa musí být zcela vyčištěny a poté vyplněny.
- Pro opravu podkladu, vyplnění děr a vyrovnání povrchu musí být použity vhodné produkty řady Sikafloor®, Sikadur® a Sikagard®.
- Všechny prach, nesoudržný a drobný materiál musí být zcela odstraněn z povrchu před aplikací produktu, nejlépe zametením nebo vysátím průmyslovým vysavačem.

MÍCHÁNÍ

Komponent A nejprve dobře promíchejte a potom do něj nalijte komponent B a důkladně míchejte minimálně 3 minuty, dokud nedocílíte jednotného vzhledu. Následně do směsi přidejte křemičitý písek a Extender T a míchejte minimálně další 2 minuty, až do dosažení homogenní směsi. Namíchanou směs přelijte do čisté nádoby a pokračujte v míchání. Snažte se, aby se do směsi dostalo pokud možno co nejméně vzduchu.

Míchací nástroje

Sikafloor®-156 míchejte pomocí nízkootáčkového míchacího zařízení (300 – 400 ot./min.) nebo jiným vhodným zařízením. Pro přípravu malty použijte míchačku s nuceným oběhem nebo podobné zařízení. Nepoužívejte míchačky s volným pádem.

APLIKACE

Nejdříve zkontrolujte vlhkost podkladu, relativní vlhkost vzduchu a rosný bod. Pokud je obsah vody v podkladu (vlhkost podkladu) vyšší než 4 %, doporučujeme nejprve aplikovat Sikafloor® EpoCem® jako dočasnou bariéru proti vlhkosti.

Primer:

Ujistěte se, že primer souvisle pokrývá podklad. Jestliže je to nezbytné, aplikujte dvě vrstvy penetrace. Aplikujte Sikafloor®-156 štětkou, válečkem nebo stěrkou. Doporučujeme aplikaci stěrkou a následně převálečkování do kříže.

Vyrovňovací malta:

Nerovný povrch je nejprve nutné vyrovnat vyrovnávací maltou. Aplikujte vyrovnávací maltu stěrkou v požadované tloušťce.

Spojovací můstek:

Sikafloor®-156 aplikujte štětkou, válečkem nebo stěrkou. Doporučujeme aplikaci provést stěrkou a poté převálečkovat válečkem.

Epoxidová stěrka / opravná malta:

Aplikujte Sikafloor®-156 jako stěrku do ještě nezaschlého spojovacího můstku, aplikujte pomocí nivelační latě nebo stěrkové lišty dle potřeby. Po krátké čekací době uhlad'te vrstvu zednickou lžící nebo hladíčkou s teflonovými listy (20 – 90 ot./min.).

ČIŠTĚNÍ NÁRADÍ

Veškeré použití náradí očistěte ihned po ukončení aplikace pomocí ředidla Sika, typ C (Thinner C). Vytvrzený materiál lze odstranit pouze mechanicky.

DALŠÍ DOKUMENTACE

Příprava podkladu

Viz Metodická příručka "Vyhodnocení, příprava podkladu pro aplikaci podlahových systémů Sikafloor®".

Pokyny pro aplikaci

Viz Metodická příručka "Míchání & Aplikace podlahových systémů Sikafloor®".

Údržba

Viz Návody na údržbu a čištění jednotlivých výrobků Sikafloor®.

OMEZENÍ

- Nepoužívejte Sikafloor®-156 na povrchy, u kterých může dojít ke vzrůstání vlhkosti.
- Čerstvě aplikovaný Sikafloor®-156 chraňte před vlhkem, parami a vodou prvních 24 hodin po aplikaci.
- Stěrka Sikafloor®-156 není vhodná pro častý nebo trvalý kontakt s vodou.
- Pro výběr vhodné zrnitosti kameniva proveďte praktické zkoušky.
- V exteriéru aplikujte za klesajících teplot (při aplikaci za zvyšujících se teplot může dojít k tenzím par a vzniku otevřených pórů).
- Tyto případně vzniklé otevřené póry ošetřete záškrabem ze Sikafloor®-156 a cca 3 % Extender T.
- Za určitých podmínek, podlahové topení, vysoká teplota v místnosti kombinovaná s vysokým zatížením, může dojít k vtiskům do podlahy.
- Pro temperaci prostor s aplikací Sikafloor®-156 nepoužívejte plyn, olej a fosilní paliva, která produkují velké množství CO₂ a vodních par, které nepříznivě ovlivňují povrch, pro topení používejte pouze topení na elektrický proud.
- Nedostatečné ošetření trhlin v podkladu může vést ke snížení životnosti nátěru.

Konstrukční spáry vyžadují předpřípravu. Ošetřete je následujícím způsobem:

- Statické trhliny: vyplňte a vyrovnejte pomocí epoxidové pryskyřice Sikadur® nebo Sikafloor®
- Pohyblivé trhliny (> 0,4 mm): Je třeba posoudit, je možné vyplnit pružným materiálem nebo provést jako pohyblivý spoj.

PLATNOST HODNOT

Veškeré technické údaje uvedené v tomto produktovém listu vycházejí z laboratorních zkoušek. Z důvodu okolností, jež nejsme schopni ovlivnit, mohou být skutečně naměřené hodnoty odlišné.

MÍSTNÍ OMEZENÍ

Upozorňujeme, že v důsledku zvláštních místních předpisů se mohou účinky výrobku v jednotlivých zemích lišit. Přesný popis možných způsobů použití naleznete v místním produktovém listu.

ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ, ZDRAVÍ A BEZPEČNOST

Informace a pokyny týkající se bezpečné manipulace, skladování a likvidace chemických výrobků najdete v aktuálním vydání Bezpečnostního listu, který obsahuje také fyzikální, ekologické, toxikologické a ostatní údaje týkající se bezpečné manipulace s výrobkem.

SMĚRNICE 2004/42/CE - OMEZENÍ EMISÍ VOC

Podle EU směrnice 2004/42 je maximální přípustný obsah VOC (kategorie IIA / j typ sb) 500 g/l (hodnota 2010). Maximální přípustný obsah VOC u výrobku Sikafloor®-156 je < 500 g/l.

PRÁVNÍ DODATEK

Informace a zejména doporučení k aplikaci a použití výrobků společnosti Sika koncovými uživateli jsou poskytovány v dobré víře na základě stávajících znalostí a zkušeností společnosti Sika s těmito výrobky za předpokladu řádného skladování, nakládání a používání za běžných podmínek v souladu s doporučeními společnosti Sika. V praxi nelze vzhledem k rozdílům v materiálech, podkladech a ve skutečných podmínkách v daném místě dovozovat z těchto informací ani z písemných doporučení či jiného poskytnutého poradenství žádnou záruku za prodejnost či vhodnost k určitému účelu ani žádnou odpovědnost vyplývající z jakéhokoli právního vztahu. Uživatel výrobku musí předem vyzkoušet, zda je výrobek vhodný pro zamýšlené použití a účel. Společnost Sika si vyhrazuje právo změnit vlastnosti svých výrobků. Je nutné respektovat majetková práva třetích osob. Veškeré objednávky přijímáme v souladu s Obchodními a dodacími podmínkami v platném znění. Uživatelé jsou vždy povinni prostudovat si poslední verzi produktového listu k danému výrobku, jehož kopie zašleme na vyžádání nebo jsou k dispozici na www.sika.cz.

Sika CZ, s.r.o.
Bystrcká 1132/36
CZ-624 00 Brno
tel: +420 546 422 464
sika@cz.sika.com
www.sika.cz



Produktový list
Sikafloor®-156
Únor 2018, Verze 05.01
020811020010000007

Sikafloor-156-cs-CZ-(02-2018)-5-1.pdf

České vysoké učení technické v Praze Kloknerův ústav

Experimentální oddělení



PROTOKOL O ZKOUŠCE

Číslo protokolu : 45 /17 / EXPO
Datum vydání : 9. 6. 2017
Číslo zakázky : 1700 J 216
Počet stran protokolu : 4

Objednatel zkoušky : Ing. Lenka Laiblová
Fakulta stavební ČVUT v Praze
Thákurova 7, 16629
Praha 6

Předmět zkoušky : Stanovení vývoje teplot během hydratace
betonu, receptura HPC K124

Počet výtisků / poř. č. výtisku : 4 / 1 2 3 4

Odpovědný pracovník : Ing. David Čítek
Provedení zkoušky a spolupráce : Ing. David Čítek

Vedoucí oddělení : Doc. Ing. Jiří Kolísko, Ph.D.
Ředitel : Doc. Ing. Jiří Kolísko, Ph.D.

1. Předmět zkoušky

Na základě objednávky Fakulta stavební ČVUT v Praze bylo pracovníky Kloknerova ústavu ČVUT v Praze provedeno stanovení vývoje teploty betonu během hydratace v izolované krychli o hraně 300 mm. Měření teplot probíhalo na zkušebním vzorku, který byl betonován dne 18.5.2017. Betonáž vzorku probíhala v laboratořích Kloknerova ústavu. Beton pro výrobu zkušebních vzorků byl dodán pracovníky Fakulta stavební ČVUT v Praze. Měření teplot v betonu probíhalo do ustálení teplot (cca 11 dní po betonáži).

V rámci zkoušek bylo provedeno:

- 1) stanovení vývoje teplot betonu během hydratace (N),

Zkouška označená (A) je uvedena v příloze osvědčení o akreditaci, zkouška označená (N) není uvedena v příloze osvědčení o akreditaci.

2. Podklady

[1] Stanovení vývoje tepla betonu během hydratace – interní postup KÚ č.01/EXPO/15

3. Zkušební zařízení

- ◆ Měřicí ústředny Commet S0141
- ◆ Odporová teplotní čidla Pt1000

3. Charakterizace betonáže a testované směsi

Receptura: HPC K124

Místo výroby betonu	:	laboratoře Kloknerova Ústavu
Datum výroby betonu	:	18.5.2017 – 13:30
Označení betonu	:	HPC K124
Čas uložení betonu do formy	:	18.5.2017 – 14:15

4. Měření vývoje teplot betonu během hydratace

Předmětem zkoušky bylo zjistit nejvyšší dosaženou teplotu vlivem hydratace cementu. Měření bylo prováděno na jedné záměsi betonu. Měření bylo prováděno od 18.5. do 29. 5. 2017 pomocí odporových teplotních čidel Pt1000. Teplotní snímače byly připojeny k měřicí ústředně Commet S0141. Odečítání teploty probíhalo kontinuálně každých 5 min. Rozšířená nejistota měření teploty je $\pm 0,5$ °C.

Pro zkoušky byla použita krychle o hraně 300 mm, vybetonována do formy z voděvzdorné překližky tloušťky 20 mm, která byla odizolována od okolního prostředí ze všech stran polystyrenem o tl. 100 mm. Vnější stěnu formy tvořila opět voděvzdorná překližka tloušťky 20 mm (obr.1). Do středu tělesa bylo umístěno čidlo pro záznam teploty betonu, další snímač zaznamenával teplotu okolního prostředí.

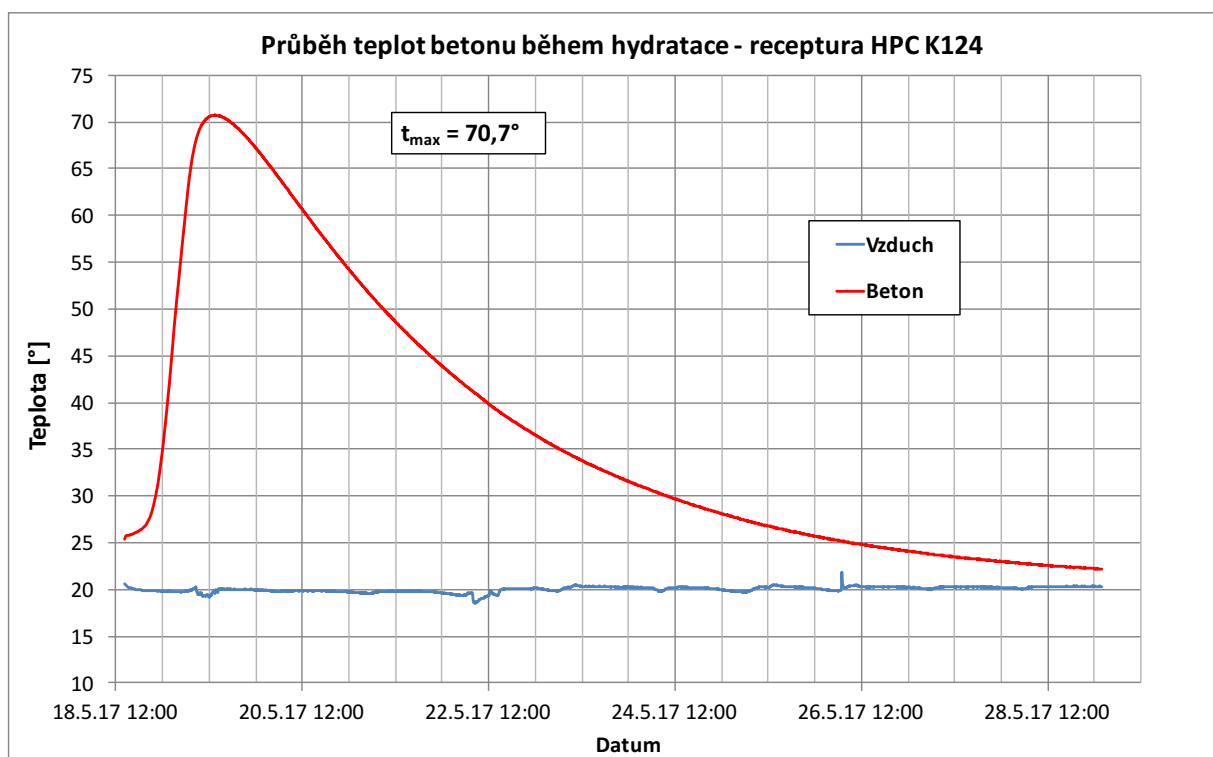
5. Výsledky měření vývoje teplot betonu během hydratace

Instalace teploměrů	:	18. 5. 2015
Provedení zkoušky	:	18.5. - 29. 5. 2017
Provedl	:	Ing. David Čítek
Zkušební těleso	:	Izolovaná krychle o hraně 300 mm
Měřicí ústředny	:	ústředna COMET S0141 čtyřkanálová

Vyhodnocení výsledků je ve formě grafu. V grafu jsou zobrazeny jednotlivé měřené části (beton, vzduch) v časovém úseku od zahájení betonáže do ukončení měření po cca 11 dnech. Maximální dosažená teplota s časovým údajem dosažení maxima je uvedena nad grafem.

Maximální naměřená teplota uprostřed krychle – receptura HPC K124:

střed krychle o hraně 300 mm: 70,7 °C po 23:15 (hodin:minut) od uložení betonu do izolované krychle



Graf 1: Záznam teplot během hydratace betonu – receptura HPC K124



Obr 2: Pohled na připravenou formu izolované krychle o hraně 300 mm

PROHLÁŠENÍ

Výsledky zkoušky se týkají jen předmětu zkoušky popsaného v oddíle "Předmět zkoušky". Výsledky tohoto protokolu nenahrazují jiné dokumenty, např. dokumenty správního charakteru. Protokol o zkoušce může být reprodukován jen jako celek. Části protokolu o zkoušce mohou být reprodukovány a ty publikovány nebo jinak použity jen po písemném schválení Zkušební laboratoře Kloknerova ústavu.