



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra betonových a zděných konstrukcí

Konstrukční prvky z lehkého betonu se speciální výztuží

**The Lightweight Concrete Structural Elements
with Special Reinforcement**

DISERTAČNÍ PRÁCE

Ing. arch. Tereza Cibulka

Doktorský studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby

Školitel: doc. Ing. Jan Vodička, CSc.

Praha, 2021



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Thákurova 7, 166 29 Praha 6

PROHLÁŠENÍ

Jméno doktoranda: Tereza Cibulka

Název disertační práce: Konstrukce z lehkých betonů se speciální výztuží

Prohlašuji, že jsem uvedenou disertační práci vypracovala samostatně pod vedením školitele doc. Ing. Jana Vodičky, CSc.

Použitou literaturu a další materiály uvádím v seznamu použité literatury.

Disertační práce vznikla v souvislosti s řešením projektů:

SGS14/035/OHK1/1T/11 - Analýza chování vláknobetonů vybraných struktur,

SGS15/036/OHK1/1T/11 - Tahové charakteristiky vláknobetonu – experimenty a numerická simulace,

SGS18/115/OHK1/2T/11 - Beton a vláknobeton specifických vlastností – analýza a aplikace,

SGS20/109/OHK1/2T/11 - Zkušební metody a aplikace cementových kompozitů.

V Praze dne 31.1.2021

Cibulka

.....
podpis

Poděkování

Na tomto místě bych ráda poděkovala svému školiteli, panu doc. Ing. Janu Vodičkovi, CSc., za jeho odborné vedení a konzultace, cenné rady a připomínky, motivaci a inspiraci pro dané téma, které mi poskytoval v průběhu celého doktorského studia. Ráda bych dále poděkovala svému kolegovi Ing. Luboši Musilovi za pomoc nejen při realizaci experimentální části výzkumu.

Poděkování za vytvoření výborných studijních podmínek a poskytnutí technického a materiálního zázemí během mého studia patří také celému vedení katedry betonových a zděných konstrukcí Fakulty stavební ČVUT v Praze. Poděkování patří také zaměstnancům Experimentálního centra ČVUT a laboratoře Katedry betonových a zděných konstrukcí na Fakultě stavební ČVUT, kteří se významnou měrou podíleli na přípravě a realizaci laboratorních zkoušek a experimentů. Za zajištění materiálu, poskytnutí receptury a cenných rad děkuji také panu Ing. Martinu Krocovi, Ph.D.

Rovněž bych chtěla poděkovat svému manželovi a rodině za projevenou důvěru, podporu a trpělivost během doktorského studia.

Abstrakt

Práce se věnuje problematice lehkého betonu s pórovitým kamenivem se speciálním vyztužením se a jeho aplikace do tenkostěnných prvků. V rámci experimentálního výzkumu bylo vyrobeno několik sad desek a doprovodné vzorky. K vyztužení vzorků byly použity plošná uhlíková textilie, prostorová skelná textilie a rozptýlená vysokopevnostní ocelová vlákna. Byly ověřovány a vyhodnocovány vlivy změny receptury a technologie výroby na materiálové charakteristiky lehkého betonu. Mezi hodnocená kritéria patřila také míra homogenity vyrobených zkušebních těles, reálná únosnost vyrobených tenkostěnných prvků a jejich chování při zatěžování. Způsob betonáže i receptura mají významný vliv na materiálové charakteristiky prvků. U desek vyztužených textiliemi bylo po odtížení pozorováno uzavírání trhlin v důsledku nezáměrně vyvozeného předpětí. Rozptýlená ocelová vlákna měla pozitivní vliv na homogenitu prvků.

Klíčová slova

lehký beton, pórovité kamenivo, vláknobeton, textilní beton, předpětí, homogenita

Abstract

The work deals with lightweight aggregate special reinforced concrete and its applications in thin-walled elements. The experimental research included thin-walled slabs and complementary test sample production. Two-dimensional carbon textile, three-dimensional glass textile and dispersed high-strength steel fibres were used to reinforce the samples. The effects of changes in the formula and production technology on the material characteristics of lightweight concrete were verified and evaluated. The degree of homogeneity of the produced test samples, the real load-bearing capacity produced and the loading behaviour of the thin-walled elements were also included in the evaluated criteria. The used method of concreting and the formula have a significant effect on the material characteristics of the elements. The closing of cracks due to unintentionally induced prestressing was observed when textile reinforced slab samples were unloaded. The dispersed steel fibres had a positive effect on the homogeneity of the elements.

Keywords

lightweight concrete, lightweight aggregate, fibre reinforced concrete, textile reinforced concrete, prestressing, homogeneity

Obsah

1. Úvod	1
2. Lehký beton s pórovitým kamenivem	3
2.1. Pórovité kamenivo.....	3
2.1.1. Pórovitá kameniva z expandovaných jíílů a břidlic.....	3
2.1.1.1. Technologie výroby.....	4
2.1.1.2. Liapor.....	4
2.2. Lehký beton	7
2.2.1. Lehký beton s pórovitým kamenivem	7
2.2.2. Lehký beton z pórovitého kameniva Liapor	9
2.2.3. Výroba lehkého betonu z pórovitého kameniva Liapor	9
2.2.3.1. Vlhkost, sytná a objemová hmotnost kameniva Liapor	9
2.2.3.2. Vnitřní vlhkost kameniva Liapor.....	10
2.2.3.3. Nasákavost kameniva Liapor	10
2.2.3.4. Drtitelnost kameniva Liapor.....	11
2.2.3.5. Objemové hmotnosti jednotlivých frakcí	11
2.2.3.6. Zpracování a ošetřování lehkého betonu	11
2.2.3.7. Nízká objemová hmotnost zrn.....	12
2.2.3.8. Závislost pevnosti betonu na pevnosti kameniva.....	12
3. Vláknobetony	13
3.1. Typy vláknobetonů dle materiálu vláken.....	18
3.1.1. Vláknobeton s ocelovými vlákny.....	18
3.1.2. Vláknobeton se skelnými vlákny.....	21
3.1.3. Vláknobeton s uhlíkovými vlákny.....	24
3.2. Typy vláknobetonů dle velikosti a uspořádání vláken	26
3.2.1. Vláknobeton s rozptýlenou výztuží	27
3.2.2. Textilní beton	33
4. Experimentální část.....	41
4.1. Lehký beton s pórovitým kamenivem vyztužený textilií.....	45
4.1.1. Vertikální bednění, plošná uhlíková textilie, lehký beton s pórovitým kamenivem.....	51

4.1.2. Vertikální i horizontální bednění, skelná prostorová textilie, lehký beton s pórovitým kamenivem.....	58
4.1.3. Horizontální bednění, skelná prostorová textilie, lehký beton s pórovitým kamenivem.....	64
4.1.4. Shrnutí	70
4.2. Lehký beton s pórovitým kamenivem vyztužený rozptýlenými vlákny	72
4.2.1. Horizontální bednění, ocelová rozptýlená vlákna, lehký beton s pórovitým kamenivem.....	80
4.2.2. Shrnutí	92
5. Závěr.....	95
Reference.....	99
Seznam obrázků	103
Seznam tabulek.....	107
Symboly	108
Zkratky	110
Přílohy.....	111

1. Úvod

V současné době narůstá poptávka po betonech speciálních vlastností. Kromě požadavků na fyzikálně-mechanické vlastnosti bývá značný důraz kladen také na estetickou kvalitu výsledného produktu. Vzrůstající tlak na snižování celkových nákladů již při návrhu konstrukce, avšak současně při vysokých požadavcích na únosnost konstrukcí, napomáhá k hledání nových postupů a vývoji inovativních technologií. Tato tendence vede v kombinaci s vysokými architektonickými nároky ke stále subtilnějším konstrukcím, stále častěji realizovaných z pohledového betonu.

Snížením vlastní tíhy prvku lze dosáhnout úspor nákladů při výrobě, dopravě, manipulaci, skladování i při zakládání staveb. Vylehčení samotného betonového kompozitu nahrazením části či plnou náhradou přírodního kameniva pórovitým kamenivem (LWA) je jedním z postupů výroby lehkého betonu (LC). Lehký beton s pórovitým kamenivem (LWAC) byl v minulosti používán pouze pro estetické či izolační účely. Příčinou jsou u normálních i vysokopevnostních lehkých betonů jejich nevýhodné mechanicko-fyzikální vlastnosti, a to nízký poměr pevnosti v tahu ku tlaku, nízká pevnost v ohybu, nízká lomová houževnatost, vysoká křehkost a velké smrštění. LWAC vykazuje navíc křehkou povahu a při působení vnějšího zatížení dochází k náhlému porušení při namáhání.

Dizertační práce se věnuje netradiční kombinaci lehkého betonu a speciálních způsobů jeho vyztužení a jejich aplikací v konstrukcích. Přidání vláken dokáže výše popsané nežádoucí chování LWAC pozitivně ovlivnit. Vhodné začlenění vláken do křehké betonové matrice vede ke zvýšení lomové houževnatosti kompozitu díky zachycení trhlin a ke zvýšení pevnosti v tahu za ohybu. Takto vyztužený beton selže ve chvíli, kdy se vlákna zpřetrhají nebo poruší jejich soudržnost s cementovou matricí v důsledku působení tahových sil. Přidání vláken do betonové směsi taktéž vede ke zlepšení duktility a obecně houževnatosti.

Současně vyztužení vlákny nabízí v porovnání se standardní betonářskou výztuží zajímavou alternativu, která umožňuje při zachování vysoké únosnosti realizaci i tvarově složitějších a subtilnějších konstrukcí. Vyztužení může být realizováno rozptýlenými jednotlivými vlákny nebo vlákny vůči sobě fixovanými ve formě technické textilie.

Experimentální výzkum byl zaměřen na aplikace lehkého betonu se speciální výztuží do tenkostěnných konstrukcí, s požadavkem nízké objemové hmotnosti při současně vysoké únosnosti prvků, konkrétně s myšlenkou na reálné využití zjištěných poznatků při výrobě mobiliáře. Jako referenční prvek byla zvolena tenká deska. K vyztužení byly použity plošná uhlíková textilie, prostorová skelná textilie a rozptýlená krátká ocelová vysokopevnostní vlákna.

2. Lehký beton s pórovitým kamenivem

2.1. Pórovité kamenivo

Pórovité kamenivo (LWA) je díky své struktuře nejdůležitější složkou při výrobě lehkého betonu (LC) s relativně nízkou objemovou hmotností, který bývá označován taktéž jako lehký beton s pórovitým kamenivem (LWAC). Zahříváním určitých surovin, zejména jíílů, se rozvíjí pórovitá struktura v částicích vznikajícím slynutím. Při této teplotě se uvnitř pyroklastické hmoty vyvíjejí plyny způsobující expanzi, která si po ochlazení zachovává určitý tvar. Toto rychlé chlazení vytváří dutiny nebo póry, které snižují objemovou hmotnost kameniva.

Normou je pórovité kamenivo specifikováno jako zrnitý materiál nerostného původu s objemovou hmotností zrn vysušených v sušárně menší nebo rovnou $2\,000\text{ kg/m}^3$ nebo se sypanou hmotností volně sypaného kameniva vysušeného v sušárně menší nebo rovnou $1\,200\text{ kg/m}^3$ (1). Kamenivo zaujímá převážnou část objemu betonu a tvoří pevnou kostru v betonu. Obvyklým požadavkem při návrhu betonu je omezení mezerovitosti a z tohoto důvodu bývá použito různě velkých zrn ve vhodných poměrech. Pro výrobu betonu se používají maximální zrna do velikosti 32 mm (2). V současné době je platná norma ČSN EN 12620+A1 Kamenivo do betonu.

Pórovitá kameniva se dělí primárně na přírodní a umělá. Aktuálně platná norma rozeznává pórovité kamenivo přírodní, vyrobené z přírodních zdrojů, vyrobené z vedlejších produktů průmyslových procesů nebo z recyklovaného kameniva a pórovité kamenivo jako vedlejší produkt. Přírodní pórovitá kameniva, jako je pemza, pěnová vulkanická hornina, se vyskytují, když se láva vypuzovaná do vzduchu ze sopečného zdroje ochlazuje relativně rychle. Nejpoužívanější uměle vyrobené pórovité kamenivo se nazývá expandovaná hlína. Její výroba spočívá v ohřevu jílových částic v rotační peci. Jednou z alternativ k těmto kamenivům z expandované hlíny je využití lehkých odpadních materiálů. Výsledkem je snížení celkových nákladů na stavbu i pevného odpadu. Jedním z takových materiálů jsou skořápky palmy olejné nebo skořápky palmových jader, materiál dostupný v obrovských množstvích v tropických oblastech.

2.1.1. Pórovitá kameniva z expandovaných jíílů a břidlic

Vysoké požadavky kladené na lehký beton použitý nejen v nosných konstrukcích způsobují, že přírodní lehká kameniva nebo upravené vedlejší energetické produkty nejsou obvykle schopny těmto nárokům dostát. Vzhledem k nákladnosti úpravy těchto surovin, se dnes většinou využívá uměle vyrobené pórovité kamenivo. Vhodným zpracováním přírodních surovin s nejlepší předpoklady k výrobě kvalitního kameniva vzniká produkt splňující většinu kladených požadavků. V našich podmínkách je nejčastěji využíváno uměle vyrobeného pórovitého kameniva z expandovaných břidlic a jíílů.

2.1.1.1. Technologie výroby

Vlastnosti vstupního materiálu, například obsah vody a původ, určují způsob průmyslového procesu výroby lehkých kameniv z expandovaných jílu a břidlic. Pro tvárnější materiál je vhodný plastický postup, který je podobný přípravě jílu při výrobě cihel. Pro tvrdší jíly a břidlice je obvyklý suchý postup drcením nebo mletím s následnou granulací. Dále probíhá totožný proces vypalování a expandace v rotačních pecích při teplotě 1100 až 1200°C.

Určitým výrobním postupem lze vyrábět kamenivo jedné požadované úzké frakce, například 4–8 mm nebo 8–16 mm, při požadované sypané objemové hmotnosti, například 300, 400 kg/m³. Jiným výrobním postupem je vyráběna najednou široká frakce, například 0–16 mm, přičemž je průběžně kontrolována a řízena sypaná hmotnost jedné vybrané užší frakce. Široká frakce se poté tříděna na úzké frakce s požadovanou sypanou hmotností. Takto vzniklá větší zrna mají nižší objemovou hmotnost a drobná zrna vyšší.

2.1.1.2. Liapor

Název skupiny výrobců a výrobků v České republice, LIAS a.s., je odvozen z druhohorního období Lias. Jíly z usazenin z Jurských moří z tohoto období vykazují vhodné vlastnosti pro výrobu velmi lehkého granulátu Liaporu. Toto rozšířeně používané pórovité uměle vyráběné keramické kamenivo s téměř kulovitými zrny bylo dříve dodáváno na náš trh pod názvem Keramzit. (3)



Obr. 1 Zrno Liaporu a jeho řez (3)

Liapor je využíván v mnoha průmyslových odvětvích. Zejména díky nasákavosti se uplatňuje při pěstování a výsadbě rostlin a pro zahradnické a dekorativní účely. Vzhledem k jeho nízké objemové hmotnosti a tepelně izolačním vlastnostem je využíván pro zasypaní stropů, kleneb, podlah a tepelné izolace střech. Dále je přidáván do zdících materiálů pro zlepšení jejich termo-akustických vlastností. Ve vodohospodářství bývá Liapor náplní filtrů odpadních vod či drenážní vrstvou pro odvod dešťových vod. Nejvíce Liaporu se však celkově spotřebuje ve stavebnictví, kde slouží především jako plnivo pro lehké konstrukční betony, mezerovité lehké betony, hutné lehké betony či pro lehké betony s rozptýlenou výztuží. Liapor je prakticky nejlehčím kamenivem s dostatečnou pevností, příznivým tvarem a dobrou zpracovatelností pro využití do konstrukčních betonů. (4)

Průmyslová výroba a využití Liaporu

Při výrobě kameniva Liapor je firmou Lias Vintířov používán plastický postup s výrobou široké frakce a následným tříděním na úzké frakce. Při jeho výrobě není využíváno žádných umělých plynatvorných přísad. Vytěžený jíl z třetihorních cypřišových jílů z nadloží hnědouhelných slojí Sokolovské pánve je v několika stupních drcen a plastifikován a následně formován do granulí potřebných velikostí a tvarů. Tyto granule poté expandují při teplotě přibližně 1150 °C v rotační peci. Vychlazený expandovaný granulát je tříděn na jednotlivé frakce. Ty jsou skladovány v uzavřených silech nebo na otevřených krytých skládkách. Liapor skladovaný v uzavřených silech může být dodáván v dokonale suchém stavu. Část materiálů je dále drcena. (3)

Jíl pro výrobu Liaporu obsahuje zejména minerály illit, kaolinit a křemík, úlomky slíd a fosilní zbytky. Fosilní zbytky a určité příměsi minerálů způsobí vznik plynů a tím expanzi. Expanze jílu musí probíhat v tzv. pyroplastickém stavu, kdy je zajištěn vznik plynů uvnitř zrna a zároveň se na povrchu zrna vytvoří dostatečné množství taveniny zabraňující úniku těchto plynů. Takto vzniklá přibližně stejnoměrná pórovitá vnitřní struktura zrna se výrazně liší od pevné slinuté vrstvy na jeho povrchu. Obvyklá barva Liaporu bývá červenohnědá nebo hnědá, může však být i hnědošedá v závislosti na složení jílu. Kamenivo Liapor se disponuje množstvím vlastností čistých keramických materiálů. (3)

Frakce, sypaná hmotnost, mezerovitost a setřesitelnost Liaporu

Mezerovitost volně sypaného Liaporu se pohybuje mezi 40 až 50 %, zatímco u drceného Liaporu se jedná o 55 až 65 %. Ve srovnání se setřesitelností nedrceného Liaporu, která je v rozmezí 2 až 13 %, je setřesitelnost drceného Liaporu dokonce 8 % až 20 %. Jeho sypaná hmotnost je uváděna v rozpětí od 250 do 900 kg/m³. Větší zrna mají nižší objemovou hmotnost, zatímco menší zrna vyšší. V závodu LIAS a.s. ve Vintířově se vyrábí široká frakce s následným přesným tříděním na úzké frakce 0-1 mm, 0-2 mm, 0-4 mm, 4-8 mm a i 8-16 mm. Liapor se sypanou hmotností frakce 8-16 mm (viz obrázek 2) pod 300 kg/m³ lze považovat za jeden z nejllehčích materiálů svého druhu. (3)



Obr. 2 Zrna Liaporu frakce 8-16 (3)

Materiálové charakteristiky Liaporu (3)

Materiálové charakteristiky Liaporu ovlivňují zásadně vlastnosti čerstvého i ztvrdlého betonu.

- **Objemová hmotnost** ovlivňuje řadu dalších vlastností včetně pevnosti nebo součinitele tepelné vodivosti a lze je tedy považovat za nejdůležitější vlastnost

lehkého pórovitého kameniva. Díky poréznímu jádru zrna se objemovou hmotnost Liaporu pohybuje od 500 do 1500 kg/m³.

- **Počáteční vlhkost** Liaporu se odvíjí dle způsobu skladování. Liapor je ve výrobně skladován buď v uzavřených silech, nebo na otevřených skládkách. Vlhkost materiálu skladovaného v uzavřených silech je udávána do 1 % hmotnosti oproti materiálu skladovanému na otevřených skládkách, kde může vlhkost dosahovat až 25 % a to v závislosti na povětrnostních vlivech.
- **Pevnost v tlaku** zrn Liaporu se díky jejich pevnému slinutému povrchu a poréznímu jádru pohybuje v rozmezí 0,7 až 10 MPa. Kulovitý tvar zrn a objemová hmotnost zásadně ovlivňuje jejich pevnost v tlaku.
- **Nasákavost** Liaporu je vyšší ve srovnání s obyčejným hutným kamenivem. Samotná zrna Liaporu nemají kapilární strukturu a voda tak jimi nevzlíná. Při celkovém ponoření Liaporu do vody zrna postupně nasávají vodu, při vyjmutí z vody však na vzduchu rychle vysychají. Liapor nepřijímá vlhkost ze vzduchu (není hygroskopický) a jeho přirozená ustálená vlhkost je 0,2 % objemu. Liapor umístěný do konstrukce ve vysušeném stavu a chráněný proti přímému přístupu vody voděodolnou vrstvou zůstává dokonale suchý.
- **Tepelná vodivost** je poměrně nízká díky porézní struktuře jádra. Liapor vykazuje výborné tepelně izolační vlastnosti a dobré akumulární vlastnosti. Součinitel tepelné vodivosti λ nabývá hodnot od 0,09 W*m⁻¹*K⁻¹ do 0,20 W*m⁻¹*K⁻¹ v závislosti na objemové hmotnosti, tloušťce konstrukce, vlhkosti a typu Liaporu.
- **Chemické složení** Liaporu vykazuje obsah síry v rozmezí 0,2-0,5 % hmotnosti, obsah sirníků 0,02-0,05 % hmotnosti a obsah chloridů 0,005-0,01 % hmotnosti. Díky tomu je Liapor vhodný do vyztuženého i předpjatého betonu. V důsledku tepelného zpracování a třídění má téměř nulový obsah organických i cizorodých částic.
- **Mrazuvzdornost** produktů s kamenivem Liapor je prokazatelně vysoká díky porézní nekapilární struktuře Liaporu, která umožňuje rozpínání zamrzlé vody uvnitř jeho zrn. V důsledku toho také Liapor odolává opakovanému zmrazování a jeho hmotnostní úbytek při 25 zmrazovacích cyklech je do 2 %.
- **Objemová stálost** Liaporu po setřesení je vysoká a není pozorovatelné další sedání ani dotvarování. V suchém stavu je objemově stabilní, a to až do teploty 1050 °C.
- **Žáruvzdornost** tohoto materiálu na čistě keramické bázi je nesporná a výrobce udává jeho stupeň hořlavosti A – materiál nehořlavý.
- **Trvanlivost** Liaporu je díky poměrné mechanické a chemické stabilitě vysoká a jeho zrno odolává dlouhodobě kyselinám i louchům. Taktéž ve vodě se zrno nerozpouští, je stabilní a neutrální.
- **Zdravotní nezávadnost** je z hlediska přírodních radionuklidů systematicky ověřována. Liapor neuvolňuje škodlivé výluhy ani plyny. Po skončení životnosti je možné výrobky z Liaporu recyklovat.

2.2. Lehký beton

Normy z hlediska objemové hmotnosti rozeznávají betony lehké, obyčejné a těžké, přičemž lehké betony (LC) jsou kompozitní materiál vyznačující se objemovou hmotností ve vysušeném stavu větší než 800 kg/m^3 a menší než 2000 kg/m^3 . (5)

Snížení hmotnosti betonu lze dosáhnout několika způsoby (4):

- Přímou – navýšením objemu vzduchu v cementovém tmelu za použití pěnotvorných přísad
- Nepřímou – vylehčení lehkým pórovitým kamenivem nebo přidáním organických surovin (piliny, korek atd.) do cementového tmelu
- Kombinace – kombinace zmíněných metod, například současnou aplikací pěnotvorných přísad a lehkého pórovitého kameniva.

Lehký beton lze z hlediska objemové hmotnosti rozdělit do tříd. Značení jednotlivých tříd specifikuje norma následovně (5):

Tabulka 1 Klasifikace lehkého betonu podle objemové hmotnosti

Třída objemové hmotnosti	D1,0	D1,2	D1,4	D1,6	D1,8	D2,0
Rozsah objemové hmotnosti [kg/m^3]	800-1000	1000-1200	1200-1400	1400-1600	1600-1800	1800-2000

S ohledem na pevnosti v tlaku norma rozeznává různé pevnostní třídy lehkého betonu. Tyto třídy jsou vztaženy k charakteristické pevnosti v tlaku ve stáří 28 dnů na válci $f_{ck, cyl}$ výšky 300 mm a průměru 150 mm a dále v tlaku zjištěném na krychli $f_{ck, cube}$ o hraně 150 mm. (5)

Tabulka 2 Třídy pevnosti v tlaku lehkého betonu

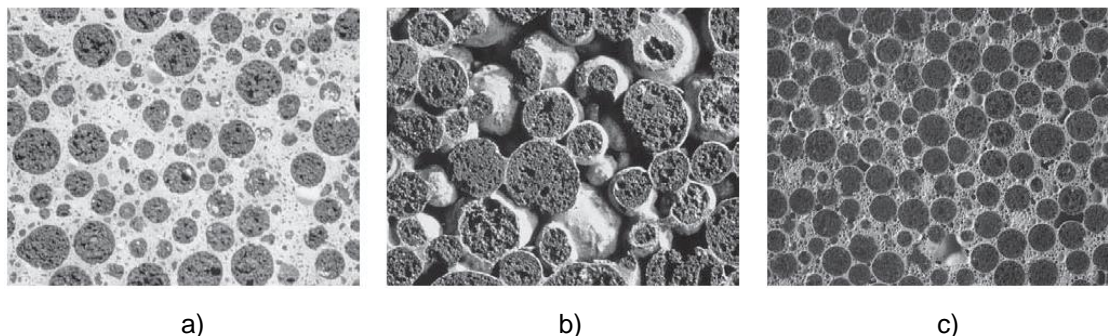
Pevnostní třída	$f_{ck, cyl}$ [MPa]	$f_{ck, cube}$ [MPa]
LC 8/9	8	9
LC 12/13	12	13
LC 16/18	16	18
LC 20/22	20	22
LC 25/28	25	28
LC 30/33	30	33
LC 35/38	35	38
LC 40/44	40	44
LC 45/50	45	50
LC 55/60	55	60
LC 60/66	60	66
LC 70/77	70	77
LC 80/88	80	88

2.2.1. Lehký beton s pórovitým kamenivem

Pokud je lehký beton vyráběn z lehkého kameniva zcela nebo z části, musí se jednat o pórovité kamenivo požadovaných vlastností. Tyto vlastnosti a způsoby jejich ověřování jsou určeny technickými normami ČSN EN 13055 Pórovité kamenivo (1) a ČSN EN 1097

Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva. (6) Norma specifikuje beton s pórovitým kamenivem (LWAC) jako hutný beton s objemovou hmotností nejvýše 2 200 kg/m³, obsahující zcela nebo zčásti umělé nebo přírodní pórovité kamenivo s objemovou hmotností zrn menší než 2 000 kg/m³. (7)

Z hlediska struktury je používáno rozdělení lehkých betonů na hutné a mezerovité, kdy je rozhodující objem pórů v betonu. Ten nesmí u hutné struktury dosahovat více než 2 %. Do uvažovaného objemu se nezapočítává objem pórů v lehkém kamenivu. (3)



Obr. 3 Struktura betonu: a) hutného lehkého betonu, b) mezerovitého lehkého betonu – přirozená mezerovitá struktura, c) mezerovitého lehkého betonu – napěněná struktura (8)

Hlavní výhodou oproti betonu s běžným kamenivem je výrazně nižší objemová hmotnost, což se příznivě projevuje na zatížení konstrukce a například také na snížení nákladů za přepravu a montáž prefabrikovaných výrobků. Nezanedbatelnou výhodou je dále jejich nízká tepelná vodivost, zvuková neprůzvučnost a vyšší mrazuvzdornost díky pórové struktuře kameniva. V porovnání s betony s klasickým kamenivem však lehké betony vykazují větší křehkost. Modul pružnosti a teplotní roztažnost je v porovnání s prostým betonem o 20 až 30 % nižší, což příznivě ovlivňuje napjatost v konstrukci a současně snižuje riziko vzniku trhlin. Nižší tuhost pórovitého kameniva však ovlivňuje deformační vlastnosti lehkého betonu a způsobuje vyšší smršťování a dotvarování v porovnání s betonem s klasickým kamenivem. Snížená teplotní roztažnost a tepelná vodivost zlepšují ohnivzdornost konstrukce. U masivních konstrukcí je třeba zohlednit možnou koncentraci hydratačního tepla v důsledku tepelně technických vlastností. V prefabrikované výrobě lze tohoto jevu využít pro snížení teploty na prohřívání výrobků a tím snížit výrobní náklady. (9)

Vzhledem k nižší pevnosti v tlaku pórovitého kameniva v porovnání s pevností cementového kamene lze říci, že pevnost v tlaku lehkého betonu je závislá především na pevnosti pojivové malty. Pevnost v tlaku dále závisí na objemové hmotnosti lehkého betonu, kdy větší objemová hmotnost se spojuje s navýšením pevnosti v tlaku. Nižší pevnost v tlaku pórovitého kameniva limituje výsledné pevnosti lehkého betonu pouze s pórovitým kamenivem. Vyšších pevností lze dosáhnout vhodným přidáním přírodního hutného kameniva a dále díky příměsím zhušťujícím strukturu betonu a superplastifikačních přísad. Vhodným návrhem lze takto dosáhnout i pevností betonu v tlaku přes 50 MPa. (10)

V porovnání s betonem s hutným kamenivem mají lehké betony s pórovitým kamenivem specifické požadavky na zpracování. Z důvodu nízké objemové hmotnosti kameniva může při nesprávně zvolené receptuře či nevhodném způsobu betonáže dojít k segregaci a následně k vyplavání lehkého kameniva směrem k hornímu povrchu.

2.2.2. Lehký beton z pórovitého kameniva Liapor

Pro výrobu lehkého betonu s pórovitým kamenivem je zásadní použití kvalitního kameniva. Pórovité kamenivo Liapor je vhodné pro výrobu hutných i mezerovitých lehkých betonů pro nosné i nenosné konstrukce. Nízké objemové hmotnosti lehkých betonů z Liaporu je dosahováno zejména díky nízké objemové hmotnosti samotného kameniva, které je vyráběno v mnoha frakcích. Kromě hrubého a drobného kameniva je k dispozici i v podobě moučky jako plnivo. Z Liaporu jsou vyráběny lehké betony o pevnostech v rozmezí 2 až 80 MPa a objemové hmotnosti 450 až 2000 kg/m³. Pro dosažení vyšších pevností je potřeba nakombinovat Liapor v určitém poměru s přírodním kamenivem. (3)

2.2.3. Výroba lehkého betonu z pórovitého kameniva Liapor

Lehké betony z pórovitého kameniva Liapor lze připravit v totožných výrobnách a na stejných zařízeních jako při výrobě běžných betonů. Konzistence a zpracovatelnost čerstvého betonu se zásadně neodlišuje a jako u běžných betonů lze pro zlepšení technologických vlastností přimíchat obvyklé přísady do betonů. Z Liaporu lze vyrábět i samozhutnitelné lehké betony. Doprava, ukládání do bednění a zpracování se u lehkých betonů z Liaporu však může lišit. Při návrhu složení, výrobě a zpracování lehkých betonů z Liaporu je třeba zohlednit některé vlastnosti tohoto kameniva, jako je pórovitost a jeho schopnost přijímat vodu, které jsou odlišné od hutného kameniva. Z hlediska odlišnosti technologie výroby je třeba zohlednit především tyto vlastnosti Liaporu:

- větší vliv vlhkosti na sypanou hmotnost a objemovou hmotnost
- možnost větší vnitřní vlhkosti kameniva
- vyšší nasákavost za atmosférického tlaku
- vyšší nasákavost pod tlakem (čerpadlo)
- vyšší drtitelnost zrn při míchání betonu
- vyšší závislost pevnosti betonu na pevnosti kameniva
- různá objemová hmotnost zrn různých frakcí
- objemová hmotnost zrn menší než objemová hmotnost vody. (10)

2.2.3.1. Vlhkost, sypaná a objemová hmotnost kameniva Liapor

Vzhledem k poměrně širokému rozpětí možné vnitřní vlhkosti pórovitého kameniva Liapor má její hodnota značný vliv na jeho sypanou i objemovou hmotnost. Spadne-li na otevřené skládce na hutné kamenivo 50 mm srážek, dojde v horní vrstvě k navýšení hmotnostní vlhkosti o 5-7 %, zatímco u Liaporu 4-8/350 může tento nárůst dosáhnout až 30 % hmotnosti. Zejména při používání otevřených boxů pro skladování kameniva je vhodnější objemové dávkování Liaporu. Podstatné je použití správné objemové dávky,

protože při tomto způsobu dávkování je vliv změn vlhkosti u objemové hmotnosti Liaporu podstatně menší, namísto hmotnostní dávky. (8)

Při hmotnostní dávkování je třeba kontrolovat a zohlednit jeho skutečnou objemovou hmotnost ve vysušeném stavu a aktuální vlhkost. Stanovení objemové hmotnosti a vlhkosti je nutné minimálně jednou denně, zásadně před započítáním míchání. Zejména při uložení materiálu na otevřených skládkách je však doporučeno provádět tento úkon častěji. Výsledky jsou pak použity pro úpravu dávek složek v receptuře betonu. Pokud jsou tato pravidla dodržena, lze i při hmotnostním dávkování Liaporu docílit při výrobě lehkých betonů dobrých výsledků. (8)

Při hmotnostním dávkování se využívá převodu na hmotnost a korektura hmotnostní dávky lehkého kameniva dle vlhkosti (8):

$$m_v = m_s(1+v),$$

kde je

- m_v hmotnost vlhké dávky (kg),
- m_s hmotnost suché dávky (kg),
- v hmotnostní vlhkost (%).

V porovnání s hmotnostním dávkováním však může dávkování objemové, díky menšímu vlivu nerovnoměrností vlhkosti a objemové hmotnosti Liaporu a díky téměř konstantnímu skutečnému objemu zrn lehkého kameniva v záměsi, zajistit rovnoměrnější dávky. Při objemovém dávkování Liaporu není třeba používat korekci dle okamžité vlhkosti. Za zmínku stojí taktéž vliv výrobních tolerancí Liaporu, který způsobuje jistou nerovnoměrnost sypané a objemové hmotnosti, než je běžné u přírodních kameniv, a to zejména u frakce 8-16 mm. (8)

2.2.3.2. Vnitřní vlhkost kameniva Liapor

Pórovitá kameniva mohou mít v porovnání s hutnými kamenivy vysokou vnitřní vlhkost. Tato vlhkost se nepodílí na vytváření cementové malty při míchání a neovlivňuje vodní součinitel. Má však vliv mimo jiné na nasákavost kameniva při výrobě, dobu zpracovatelnosti, čerpatelnosti a dobu vysychání čerstvého betonu a v neposlední řadě také na celkovou vlhkost betonu. Celkovou vlhkost lehkého kameniva lze stanovit vysušením při 105 °C do konstantní hmotnosti. Podíl vnitřní a povrchové vlhkosti lze zjistit povrchovým vysušením proudem teplého vzduchu. Rozdíl těchto hmotností pak je určující pro povrchovou vlhkost, zbytek je vlhkost vnitřní. (8)

2.2.3.3. Nasákavost kameniva Liapor

Liapor vykazuje ve srovnání s hutným kamenivem vyšší nasákavost. Tu je nutné zohlednit při návrhu dávek vody. Při přípravě receptury lehkého betonu z pórovitého kameniva rozlišujeme vodu přídatnou a vodu účinnou.

Přídatná voda se vsákne do lehkého kameniva během míchání a její množství závisí na nasákavosti a vlastní vlhkosti lehkého kameniva. Neúčastní se na vytváření cementové

pasty, a tedy se v této souvislosti nezapočítává do vodního součinitele. Při návrhu jejího množství se zjišťuje krátkodobá nasákavost Liaporu. Ta se určuje zkouškou nasáknutí po 30 minutách ponoření ve vodě, což do určité míry charakterizuje nasákavost kameniva v míchačce. Množství přídavné vody je však ještě třeba upravit podle konkrétních podmínek míchání. (8)

Účinná voda je zásadní pro konzistenci a vodní součinitel lehkého betonu. Pro obvykle požadovanou konzistenci je potřebné množství účinné vody a s ním související vodní součinitel vyšší než u obyčejných betonů. Pro nejčastěji požadovanou konzistenci S2 je nutné v praxi použít množství účinné vody mezi 230 a 260 l/m³. Potřebný obsah vody závisí na zvoleném druhu drobného kameniva. Jako drobné kamenivo může být použit kulatý nebo drcený drobný Liapor, obyčejné přírodní drobné kamenivo nebo směs Liaporu a obyčejného kameniva. Použití obyčejného kameniva snižuje potřebné množství záměsové vody. (8)

Nasákavosti lehkého kameniva Liapor lze omezit nebo eliminovat předvlhčením kameniva, které je možné provést postřikem na skládce nebo zkrápěním na páse během dopravy do sil. Vodu, která se ještě před vstupem do míchačky vsákne do kameniva a neulpívá na povrchu jako povrchová voda, můžeme nazývat předmáčecí vodou. Tato voda není zahrnuta ve výpočtu vodního součinitele, avšak u takto předvlhčeného kameniva je nutné stanovit vnitřní vlhkost a nasákavost lehkého kameniva a s těmito hodnotami pak pracovat při návrhu záměsi. (10)

2.2.3.4. Drtitelnost kameniva Liapor

Při provozní přípravě betonu se až 5 % zrn Liaporu částečně rozdrťí. Převážně se jedná o zrna větší než 4 mm. Drcení zrn Liaporu se děje v závislosti na druhu míchačky a lze částečně omezit obkladem lopatek míchačky pryží nebo umělou hmotou a udržováním lopatek a bubnu míchačky v čistém stavu. U lehkého betonu je kontrolována vydatnost záměsi. Tato hodnota udává, jaký objem betonu se skutečně vyrobí z návrhového množství složek pro 1 m³. Díky této kontrole lze ověřit míru nadrcení zrn lehkého kameniva. (8)

2.2.3.5. Objemové hmotnosti jednotlivých frakcí

Zrna Liaporu mají výrazně nižší objemovou hmotnost než zrna hutného kameniva, přičemž zrna jeho větší frakce mají obvykle menší objemovou hmotnost než zrna drobných frakcí. Tím vzniká jistý rozdíl mezi objemem, který různá zrna v betonu zaujímají, a jejich hmotnostním podílem. Rozdílná objemová hmotnost zrn různých frakcí je zřetelná při podrobném sledování zrnitosti kameniva. Vzhledem k tomu, že je křivka zrnitosti obvykle sestavována podle hmotnostního podílu zrn dílčích frakcí kameniva, je tento fakt je ještě zvýrazněn při kombinaci Liaporu s hutným kamenivem. Kamenivo určité skladby s plynulou hmotnostní křivkou má podle objemové křivky zrnitosti menší podíl zrn drobných frakcí. (8)

2.2.3.6. Zpracování a ošetřování lehkého betonu

Při ukládání do forem a zhutňování je zásadním požadavkem vyvarovat se rozmísení a oddělení cementové malty dolů na dno formy, čímž by vznikly vrstvy s různou

objemovou hmotností. Rozdíly při zhutňování lehkého a obyčejného betonu souvisí s menší setrvačnou hmotností zrna Liaporu a s tím spojeným tlumením.

Vlhkost dočasně zachycená uvnitř zrna pórovitého kameniva napomáhá při hydrataci cementového tmelu tím, že zajišťuje vnitřní ošetřování zrajícího betonu. I přes dobré samoošetřování prostřednictvím přídavné vody obsažené v zrnech kameniva potřebuje lehký beton starostlivé ošetřování stejně jako jakýkoli jiný beton. Lehký beton se během hydratace zahřívá více než obyčejný beton, což je dáno jeho nižší tepelnou jímavostí a vodivostí. Z důvodu omezení trhlin v důsledku teploty je vhodné pozdější odformování, případně obložení povrchu tepelnou izolací. Horní plochu betonu je nezbytně nutné chránit proti vysychání. Po odbednění je třeba chránit povrch betonu proti rychlému vysychání, lze přistoupit i k jeho kropení. (8)

2.2.3.7. Nízká objemová hmotnost zrn

Objemová hmotnost zrn Liaporu je u většiny frakcí menší než objemová hmotnost vody, což v důsledku znamená, že při příliš tekuté konzistenci čerstvého betonu a jeho nevhodném zpracování může docházet k vystoupaní zrn k povrchu. Lehký beton je náchylnější k rozmísění než beton obyčejný. Toto nebezpečí narůstá u lehkého betonu s maltou s hmotností výrazně vyšší, než je hmotnost zrn Liaporu. Konkrétně může tato situace nastat při použití kombinace Liaporu lehkých větších frakcí a drobného hutného kameniva. Vyplavování lehkých zrn může být redukováno přidáním stabilizační přísady. Tento krok současně přispěje i k lepší zpracovatelnosti betonu.

2.2.3.8. Závislost pevnosti betonu na pevnosti kameniva

Vliv pevnosti kameniva na pevnost výsledného betonu je při aplikaci lehkého kameniva vyšší než při použití kameniva hutného. Při návrhu složení směsi pro lehké betony z Liaporu je proto zásadní vycházet ze vztahů zohledňujících dostatečně vliv pevnosti kameniva. Nejvhodnějším řešením je však vycházet přímo z konkrétních zkoušek pevnosti jednotlivých betonů s Liaporem.

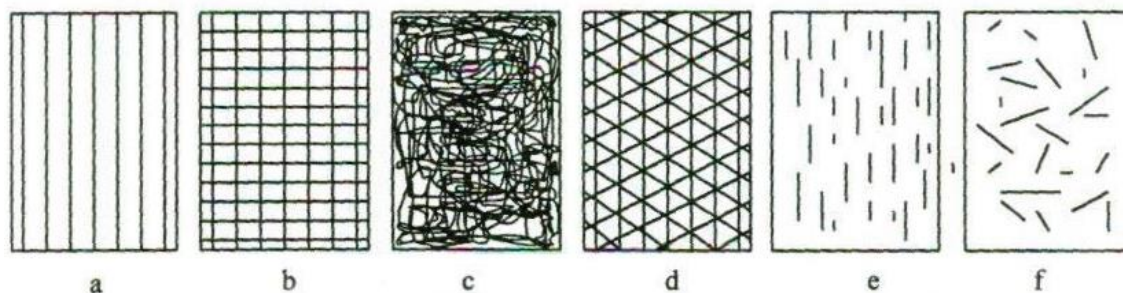
3. Vláknobetony

Vláknobeton, ve zkratce FRC (fibre reinforced concrete), je kompozitní materiál na bázi betonu, ve kterém je však základní betonová matrice doplněna vlákny ztužujícími jeho strukturu. Kompozit lze definovat jako materiálový systém složený z více fází, z nichž alespoň jedna je pevná s makroskopicky rozeznatelným rozhraním mezi fázemi. Díky tomu, že výsledný kompozitní materiál dosahuje vlastností, které nemohou být dosaženy jednotlivými složkami samostatně ani prostým součtem, lze mluvit u tohoto materiálu o takzvaném synergickém efektu. (11) (12)

Vláknobeton lze dle platné normy specifikovat jako beton splňující ustanovení platné normy, jehož základní struktura je doplněna vlákny. Ta mohou být z libovolného materiálu, libovolných tvarů a rozměrů. Vlákna musí tvořit v objemové jednotce vláknobetonu takový podíl (objemový stupeň ztužení vlákny), aby vznikl homogenní vláknobeton, který umožní zlepšit alespoň některou z fyzikálně-mechanických vlastností původního betonu. (13)

Fyzikálně-mechanické vlastnosti vláknobetonu vyniknou zejména v porovnání s prostým betonem. Prostý beton se používá především na prvky namáhané pouze tlakem, jelikož je velmi náchylný na trhliny vzniklé účinkem tahových napětí. Vyztužení vlákny může podstatně zvýšit absorpci energie a rázovou houževnatost betonu, což má za následek zlepšení duktility, poměru pevnosti v tahu a v tlaku, odolnosti proti popraskání a houževnatosti v lomu, odolnost proti otěru a obrusu a obecně zvýšení trvanlivosti. Jejich zahrnutí přeměňuje beton z křehkého na tvárnější materiál. (14)

Vlákna mohou být z různých materiálů, různých tvarů a rozměrů, mohou být v betonové matrici náhodně rozptýlena nebo různým způsobem uspořádána a fixována v podobě textilií, popřípadě rohoží (viz obrázek 4). Každý typ vláken je vhodný pro specifické použití. Pro požadovaný efekt je potřeba přidat vhodný druh vláken ve správném množství, které bude vhodně vmícháno a distribuováno. Jednotlivé druhy vláken lze i mezi sebou v receptuře kombinovat.



Obr. 4 Příklady uspořádání vláknové výztuže v kompozitech: a) jednosměrné uspořádání, b) tkanina, c) rohož, d) víceosá výztuž z kontinuálních vláken, e) krátká vlákna jednosměrně orientovaná, f) krátká vlákna s nahodilou orientací (15)

Pevnost vlákna je významně větší než pevnost stejného materiálu v kompaktní formě. Tato anizotropie je způsobena malým příčným průřezem vláken, kdy jsou v tenkých vláknech minimalizovány rozměry vnitřních defektů materiálu a také nebezpečí výskytu povrchových vad je při malých příčných rozměrech nižší, díky menšímu povrchu. Přestože ke vzniku vad dochází, jsou mikroskopické a orientované v podélném směru

vlákna. Z toho lze odvodit, že vlastnosti vláken jsou závislé na průřezu, který ovlivňuje jejich pevnost v tahu. Menší průřez vlákna tedy bude vykazovat větší pevnost v tahu díky zpevnění v důsledku stupně deformace. Dalším důvodem vyšší pevnosti vlákna je přednostní nasměrování pevných kovalentních meziatomových vazeb v podélném směru vlákna. (16)

Tabulka 3 Porovnání mechanických vlastností vláken a kompaktních materiálů (15)

materiál	modul pružnosti [MPa]	pevnost v tahu [MPa]
skleněné vlákno typu E	73	2500
sklovina E	73	100
uhlíkové vlákno	230 až 950	2000 až 6000
polykrystalický grafit	10	20
keramické vlákno SiC	300	3000
SiC monolitický	410	500
polyethylenové vlákno	90 až 170	3000
lineární polyethylen	0,4	26

Rozdělení vláken dle modulu pružnosti

- vlákna s menším modulem pružnosti než matrice
 - přírodní vlákna
 - polymerní vlákna
- vlákna s větším modulem pružnosti než matrice
 - azbestová vlákna
 - ocelová vlákna
 - skelná vlákna
 - speciální vlákna (uhlíková)

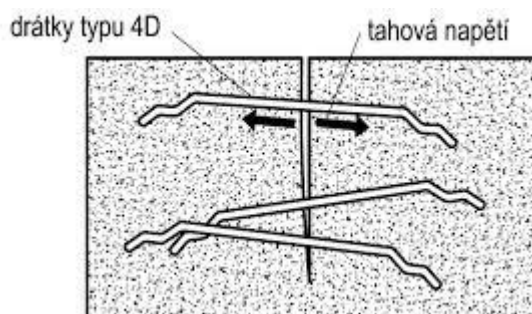
Mezi vlákna s menším modulem pružnosti než matrice lze zařadit vlákna polymerní a přírodní. Tato vlákna se uplatňují především na počátku hydratace cementu tím, že zabraňují především objemovým změnám, zejména smrštění způsobené změnami vlhkosti, dále omezují křehkost betonu a zvyšují jeho houževnatost, a to právě v čase, kdy beton dosahuje minimálních hodnot modulu pružnosti. Příkladem dalšího využití je například aplikace polymerních vláken za účelem zvýšení odolnosti betonu proti vysokým teplotám, kdy vzniklé kapiláry po vyhořelých vláknech pomohou odchodu vody z konstrukce explozivnímu odprýskávání krycí vrstvy výztuže a následujícímu rychlému zborcení konstrukce. (17) (18)

Vlákna s větším modulem pružnosti, než matrice jsou především vlákna ocelová, skelná, dnes již zakázaná vlákna azbestová a vlákna méně obvyklá, například uhlíková vlákna. Vlákna s větším modulem pružnosti než betonová matrice lze zvětšit modul pružnosti výsledného kompozitu vláknobetonu a jeho odolnost vůči tahovému namáhání. (18)

Vláknobeton, jakož i běžný beton, se chová rozdílně při namáhání tlakem a tahem. Jedná se o dvoufázový kompozitní materiál složený z betonové matrice a vláken. Vlastnosti jednotlivých fází definují vlastnosti výsledného kompozitu. U konstrukčních vláknobetonů, ve kterých mají vlákna statickou funkci a podílejí se na přenášení zatížení, je obvykle pro navrhování konstrukcí a jejich prvků rozhodující působení v tahu.

Vláknobetony se vyznačují velkou schopností plastického přetváření po dosažení maximálního napětí. (19)

Působí-li na konstrukci tlak, prvek se ve směru působícího zatížení zmenšuje a dochází k současnému namáhání konstrukce příčným tahem kolmým na směr tlakového působení. V případě prostého betonu dojde k selhání konstrukce, pokud napětí v příčném tahu dosáhne tahové pevnosti betonu, čímž dojde ke vzniku trhlin a kolapsu prvku. U vláknobetonu probíhá postup porušení podobně s tím rozdílem, že po vzniku trhliny se aktivují vlákna a tím je zamezeno náhlému dynamickému porušení. O porušení při tlakové zkoušce rozhoduje u vláknobetonů, stejně jako u prostého betonu, vznik podélné trhliny, který je závislý zejména na tahové pevnosti betonové matrice. Z tohoto důvodu bývá pevnost v tlaku obdobná jako u prostého betonu při obvykle používaném množství vláken. (19)



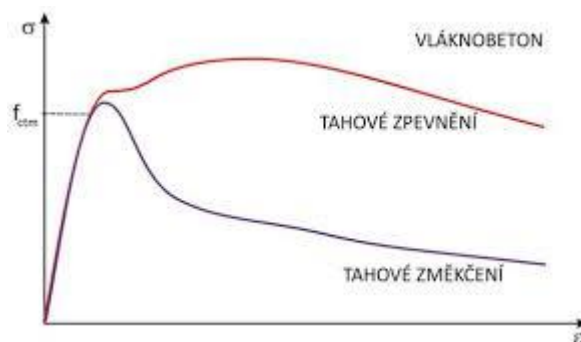
Obr. 5 Princip přenesení tahového namáhání vláknem při vzniku trhliny ve vláknobetonu (20)

Vláknobetony lze rozdělit podle jejich chování v jednoosém tahu do dvou skupin. Obecně se při tahovém zatížení napětí ve vláknobetonu zvyšuje, až dojde ke vzniku trhliny. V této chvíli přestává beton působit a aktivují se vlákna v trhlíně. Děje se tak rozšiřováním trhliny do té míry, než se ve vláknech aktivuje síla, kterou dříve přenášel beton. Rychlost aktivace vláken závisí zejména na modulu pružnosti vláken a na jejich množství. (19)

Pokud po vzniku trhliny dojde ke navýšení únosnosti v tahu, jedná se o kompozit s tahovým zpevněním (viz obrázek 6). Únosnost vláken je tomto případě větší než únosnost samotného betonu v tahu před vznikem trhliny. Tento typ vláknobetonu vykazuje násobnou lokalizaci přetvoření, přestože zóna poškození zasahuje obvykle malou oblast, a jejich chování lze tedy přirovnat k chování kovů. Tyto vysokohodnotné vláknobetonové materiály se vyrábějí z kvalitních cementů a vláken s vysokými pevnostmi a vysokým modulem pružnosti, běžně neobsahují hrubé frakce kameniva či jsou dokonce vlákna rozptýlena pouze v cementové matrici. Kompozity charakterizované zpevněním v tahu bývají také označovány jako vysokohodnotné vláknobetonové materiály. Tahového zpevnění lze dále docílit vysokým obsahem vláken, a tedy jejich větší průřezovou plochou. Takové kompozity bývají obvykle drahé a náročné na technologii výroby. Proto jsou častěji aplikovány vláknobetony s tahovým změkčením. Tato varianta je ekonomičtější a lze snáze vyrábět v běžných betonárnách. (19) (21)

Kompozit s tahovým změkčením (viz obrázek 6) se vyznačuje vyšší únosnosti betonu v tahu před vznikem trhliny, než po vzniku trhliny a aktivaci vláken. Přetvoření je

lokalizováno a dochází k rozvoji jedné hlavní trhliny, jejíž maximální rozevření je v závislosti na délce vláken obvykle 3–4 mm. Poté obvykle dojde k úplnému vytažení vláken z betonové matrice, což zásadně ovlivní reziduální pevnost. Z tohoto důvodu není vhodné tuto mezní šířku trhlin překročit. K tomuto typu chování dochází zejména u vláknobetonu s obsahem vláken nižším než 1 % objemu. Přestože je tato varianta ekonomičtější oproti vláknobetonům s tahovým zpevněním, nese s sebou současně riziko křehkého porušení konstrukce, a proto je její použití možné pouze za splnění určitých podmínek. (19) (21)



Obr. 6 Příklad pracovní diagram vláknobetonu s tahovým zpevněním a s tahovým změkčením (20)

Základní pojmy

- **objemový stupeň ztužení vlákny $\rho_{v,f}$** – vyjadřuje podíl objemu vláken k objemu vláknobetonu podle vztahu:

$$\rho_{v,f} = \frac{V_f}{V_{fc}} \text{ (uvedený v \%),}$$

kde je

V_f objem vláken (m^3),

V_{fc} objem vláknobetonu (m^3).

- **mikrotrhlina** – neprůběžná neviditelná trhlina vznikající ve struktuře vláknobetonu. Rozvoj mikrotrhliny, zvláště v tahové oblasti prvku před vznikem makrotrhliny, je doprovázen nelineárním chováním vláknobetonu.
- **makrotrhlina** – spojení mikrotrhlin do průběžné trhliny, která plně vyloučí z působení část tažené oblasti kritického vláknobetonového průřezu; rozevíráním makrotrhliny se aktivují mikrosíly ve vláknech, která trhlinu protínají. Vznik makrotrhliny určuje mezní stav vzniku trhliny, která je důležitou charakteristikou pro změnu chování vláknobetonového prvku.
- **kritický průřez** – průřez prvku, ve kterém dojde k porušení a vznikne makrotrhlina. Kritický průřez zpravidla vzniká v místě největšího namáhání a nejmenší odolnosti průřezu.
- **mezní stav vzniku trhliny** – stav, kdy v kritickém průřezu vláknobetonového prvku vznikne makrotrhlina. Chování vláknobetonového prvku lze považovat až do vzniku makrotrhliny zjednodušeně za kvazilineárněpružné. Po vzniku

makrotrhliny lze zjednodušeně považovat chování vláknobetonového prvku za kvaziplastické.

- **reziduální pevnost vláknobetonu v tahu** – pevnost vláknobetonu v tahu po vzniku makrotrhliny. Pevnost vláknobetonu v tahu po vzniku makrotrhliny je definovaná naměřeným průhybem za předpokladu kvaziplastického chování kritického průřezu. (13)

Návrh složení vláknobetonu

Návrh složení vláknobetonu lze stanovit obdobnými postupy a použít stejné složky (včetně přísad a příměsí) jako u prostého betonu. Materiálem, typem a objemovým stupněm ztužení vlákny lze ovlivnit charakteristické vlastnosti vláknobetonu. Je však potřeba zahrnout v úvahu skutečnost, že složení vláknobetonu se liší od složení prostého betonu přidanými vlákny. Materiál a geometrický tvar přidaných vláken, a jejich různé objemové koncentrace mohou mimo jiných parametrů ovlivnit i dávky složek na jednotku objemu betonu (m^3) stanovené pro výrobu betonu podle platných norem. Taktéž je vždy nutné uvážit způsob výroby a postup při realizaci navržené vláknobetonové konstrukce, jelikož užitá vlákna ovlivňují i celou technologii výroby vláknobetonu. (13)

Konstrukce z vláknobetonu bez betonářské výztuže

Nosné prvky z vláknobetonu nevyztuženého betonářskou výztuží lze nazývat prvky z prostého vláknobetonu. Avšak na rozdíl od prvků z prostého betonu je možné u vláknobetonových prvků uvažovat se zkouškami zaručenými tahovými částmi charakteristického pracovního diagramu. To umožňuje v řadě případů návrh nosných konstrukcí z vláknobetonu, kdy by samotný prostý beton kvůli jeho nízké tahové pevnosti nesplnil požadavky z hlediska své velmi nízké duktility a možnosti náhlého porušení. (22)

U homogenního vláknobetonu namáhaného ohybem je před vznikem makrotrhliny poměrné protažení okraje průřezu asi trojnásobkem poměrného protažení prostého betonu. Vlákna „přemost'ují“ vznikající mikrotrhliny ve struktuře betonového kompozitu a mají díky tomu ztužující účinek. Ke vzniku makrotrhliny nedochází, přenesou-li charakteristická pevnost v tahu za ohybu vláknobetonu schopna napětí od přímých zatížení i objemových změn vláknobetonu, a výpočet pro návrh konstrukce lze v tomto případě provést podle klasické pružnosti. Tento způsob namáhání průřezu je vhodné zachovat při mezním stavu použitelnosti konstrukce z prostého vláknobetonu. (22)

Spolehlivost konstrukce proti porušení je zajištěna i v situaci, kdy návrhová pevnost vláknobetonu v tahu za ohybu přenesou též návrhová zatížení přímá a nepřímá. V případě, že mezní stav únosnosti před vznikem makrotrhliny nespĺňuje tuto podmínku spolehlivosti, je zde i možnost posouzení únosnosti po vzniku makrotrhliny s uvážením kvaziplastického (QPL) chování konstrukčního prvku ve vznikajícím QPL kloubu v místě makrotrhliny. V tomto případě návrhové ekvivalentní pevnosti v tažené oblasti kritického průřezu, zpravidla při pružném chování tlačené oblasti, musí splnit podmínku spolehlivosti. (22)

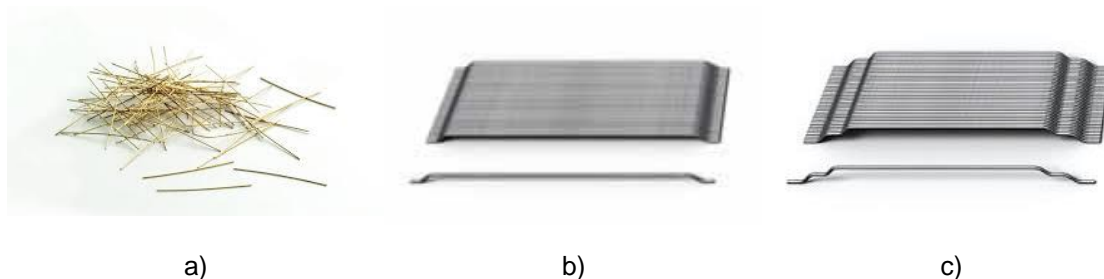
3.1. Typy vláknobetonů dle materiálu vláken

Vlákno bylo již ve starověku používáno jako výztužný materiál zejména při výrobě cihel z bahna obsahujících slámu, koňské žíně, rákosí, peří, dřevo a další přírodní vlákna. Dnes se začala přírodní vlákna opět objevovat ve stavebnictví především u nízkonákladových a ekologických staveb rodinných domů. První známé novodobé pokusy o vyztužení křehkých stavebních hmot vlákny spadají do začátku šedesátých let 20. století, kdy se objevily první drátkobetony a sklovláknocement. Roku 1980 byla prvně použita ocelová vlákna pro kompletní nahrazení klasické výztuže. Od té doby došlo k rozšíření škály používaných vláken. (23) (24)

V současné době existuje mnoho výztužných vláken z různých materiálů, která lze použít při výrobě vláknobetonů včetně oceli, skla, syntetického a přírodního materiálu. Za nejčastěji v současnosti používaný lze považovat vláknobeton s ocelovými drátky, tzv. drátkobeton. V této práci jsou zmíněna pouze nejběžnější vlákna, která se používají ve výrobě betonu, a detailnější popis je věnován pouze vláknům použitým v experimentálním výzkumu. (25)

3.1.1. Vlákobeton s ocelovými vlákny

Vlákobeton s ocelovými vlákny je kompozitní materiál s ocelovou výztuží dispergovanou v betonové matici. Pro beton vyztužený ocelovými vlákny je obvykle používáno označení drátkobeton, ve zkratce SFRC (steel fibre reinforced concrete). Drátkobeton vykazuje oproti běžnému betonu zejména vyšší houževnatost a duktilitu, vyšší odolnost vůči dynamickému zatížení a únavě. Drátkobetonů je značné množství, jelikož drátky jsou vyráběny z ocelí různých pevností a v různých tvarech. Ocelová vlákna používaná pro výrobu drátkobetonů mají poměrně vysokou pevnost, dobře spolupůsobí s betonovou maticí a lze je zjednodušeně definovat jako „krátkou nespojitou délku oceli s poměrem délka/průměr od přibližně 20 do 100, s jakýmkoli průřezem, a která je dostatečně malá a náhodně rozptýlená v nevytvrzené betonové směsi za použití obvyklých postupy míchání“. (26) (27)

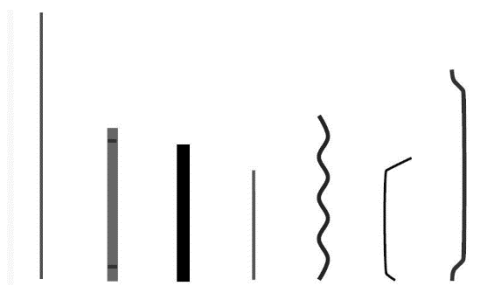


Obr. 7 Příklady ocelových vláken: (a) krátké drátky z vysokopevnostní oceli, (b) a (c) delší drátky se zahnutím na koncích (20)

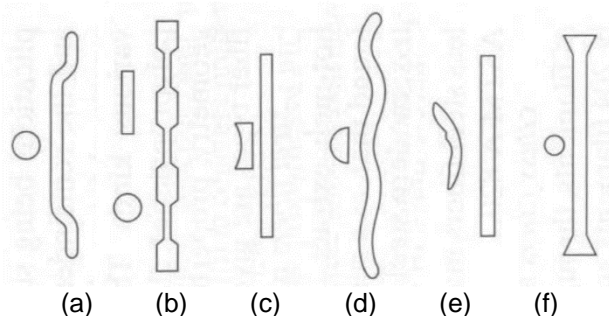
Klasifikace vláken (28):

- Typ I – za studena tažený drát,
- Typ II – vlákna stříhaná z plechu,
- Typ III – vlákna oddělovaná z taveniny,
- Typ IV – vlákna protahovaná z drátu taženého za studena,
- Typ V – vlákna frézovaná z ocelových bloků.

Tvarování, průřez i délka vlákna mají významný vliv na zpracovatelnost, soudržnost, konzistenci a současně na výsledné pevnosti betonu. Průřez vláken může být hranatý, kruhový či polokruhový průřez a jejich tvar po délce rovný nebo profilovaný. Soudržnost vláken a jejich spolupůsobení s betonovou matricí se vylepšuje povrchovou úpravou, například zdrsněním povrchu, a tvarováním drátků, kdy drátky mohou být kupříkladu zvlňené nebo mít na koncích háky, kuličky či jinou tvarovou úpravu, což napomáhá mechanickému ukotvení vláken v cementové matrici. (25)



Obr. 8 Příklady tvarů ocelových drátků a jejich koncových úprav (29)

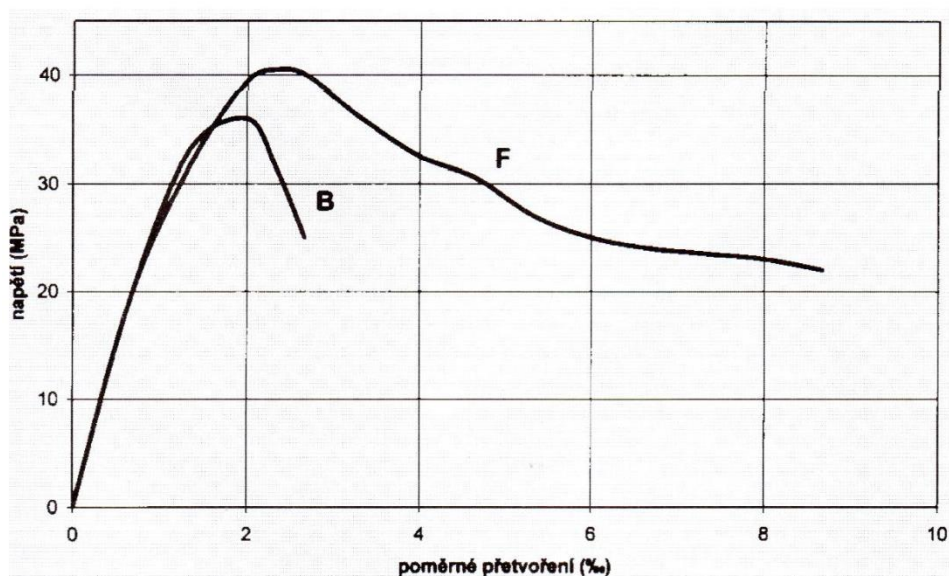


Obr. 9 Nejběžnější povrchové úpravy ocelových vláken: (a) vlákna zahnutá na koncích, (b) vlákna nepravidelná, (c) vlákna deformovaná, (d) vlákna zvlňená, (e) vlákna leptaná, (f) vlákna pádlovitá (30)

Čím delší vlákno je, tím vyšší je jeho teoretická účinnost. Při aplikaci se však již vlákna delší než 100 mm jen velmi těžko rozmíchávají v čerstvé směsi. Vlákna s větším průřezem mívají vyšší tahovou únosnost, na úkor zpracovatelnosti čerstvého vláknobetonu. Tenká vlákna lze obecně snáze zamíchat, ale velmi tenká mikrovlákna při vmíchání silně snižují zpracovatelnost díky velkému měrnému povrchu. Z těchto důvodů jsou obvykle používána ocelová vlákna v délkách 12–76 mm a tloušťky přibližně 0,25 - 1 mm.

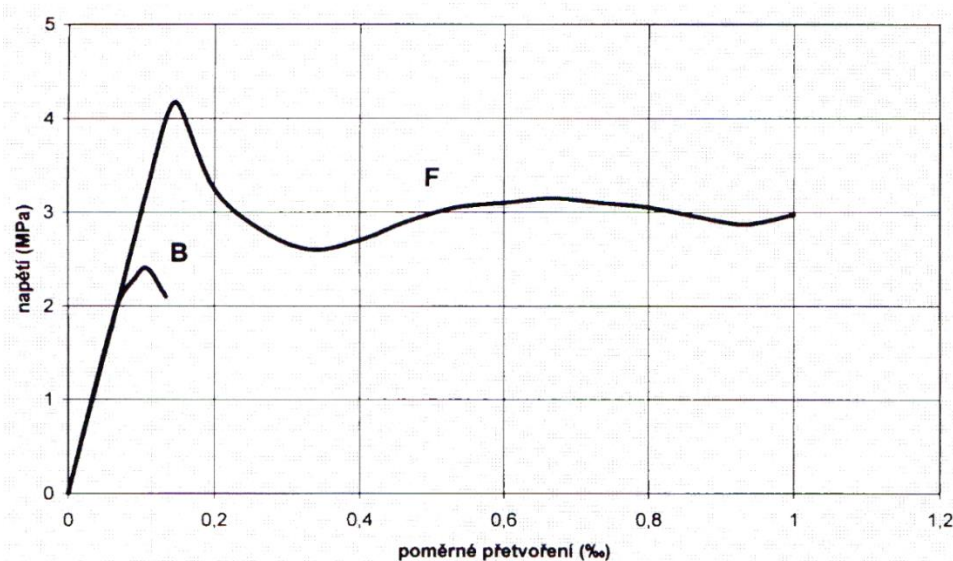
Ocelová vlákna mohou být náchylná ke korozi. Při správném návrhu umožní konstrukce bez trhlin korozi vláken pouze v povrchové vrstvě. Rozvojem trhlin větších šířek však může koroze vláken nastat i hlouběji v konstrukci a vést tak k předčasné poruše.

Drátkobeton lze považovat za velmi houževnatý materiál oproti prostému betonu, což dále souvisí s jeho velmi dobrou odolností proti rázům, a tedy i jeho využitelností například u dynamicky namáhaných konstrukcí. V porovnání s prostým betonem dosahuje drátkobetonem zhruba trojnásobných hodnot mezního stlačení. V pracovním diagramu drátkobetonu je v porovnání s prostým betonem jasně vidět vliv rozptýlené výztuže, zejména v diagramu tahovém (viz obrázek 11), ale i tlakovém (viz obrázek 10). (31)



Obr. 10 Pracovní diagram drátkobetonu (F) a prostého betonu (B) v tlaku (31)

Drátkobeton ve srovnání s prostým betonem dosahuje vyšší pevnosti nejen v tlaku, ale zejména v tahu. Drátkobeton je i po vzniku viditelných trhlin houževnatý materiál schopný přenášeti reziduálních tahových napětí. Míra přenosu tahových napětí u drátkobetonu je dána především množstvím a tvarem drátků. Oproti prostému betonu může mezní protažení drátkobetonu dosáhnout až desetinásobných maximálních hodnot. (31)



Obr. 11 Pracovní diagram drátkobetonu (F) a prostého betonu (B) v tahu (31)

Při návrhu a míchání drátkobetonu je třeba vzít v potaz jeho odlišné vlastnosti a použít vhodnou techniku a technologii. Správný návrh drátkobetonové směsi je zásadní, nelze pouze přidat drátky do běžné receptury. Drátkobeton vykazuje v porovnání s běžným čerstvým obyčejným betonem a se shodným vodním součinitelem horší zpracovatelnost. Zlepšení zpracovatelnosti napomáhají přísady.

Dále je třeba vzít v potaz při výrobě drátkobetonu také požadavek rovnoměrného rozptýlení vláken ve směsi. Delší vlákna často vytvářejí obtížně rozmíchatelné shluky. Méně štíhlá vlákna se sice dobře rozmísí, avšak mohou negativně ovlivnit výsledné pevnosti kompozitu. Pevnost výsledného kompozitu může být dále snížena tzv. nakypřením, které vzniká nesprávným návrhem. Pro vmíchání drátků do směsi se postupuje odlišně, a to v závislosti na typu drátků, které jsou přidávány do hotové směsi nebo předem do kameniva na dopravním pásu.

Drátkobetony jsou nejčastěji aplikovány do podlah, jejich použití je však rozšířené i v mostovkách a při výstavbě letištních ploch. Pro tunelová ostění jsou vhodné stříkané drátkobetony. Výhodná je aplikace drátkobetonů při výrobě prefabrikátů.

3.1.2. Vláknobeton se skelnými vlákny

Beton vyztužený skelnými vlákny bývá označován jako sklovláknobeton a vyrábí se obvykle z cementopískové malty. Skelná vlákna byla primárně vyvinuta k vyztužování velmi tenkých betonových deskových konstrukcí, u kterých bylo třeba omezit hmotnost konstrukce (obkladové dílce, balkónové zábradlí). Obecně tato vlákna zvyšují pevnosti betonu v tahu, v tahu za ohybu, rázu a houževnatosti, pokud působí v prameni. (15)

Současná technologie výroby sklovláknobetonu umožňuje vytvářet prvky rozmanitých tvarů a povrchových úprav. Jeho nespornou předností je také možnost výroby prvků s tloušťkou pouhých 8-15 mm. Nejčastějšími výrobky ze sklovláknobetonu jsou fasádní panely, dekorativní fasádní prvky, protihlukové bariéry, ztracené bednění na mostní římsy a pilířové hlavice, odvodňovací žlaby, kabelové kanály, odpadní potrubí a drenáže. Používá se i při rekonstrukcích historických staveb, k vyztužení potěrů, malt či stěrek a pro výrobu tenkých obkladových desek. (18)

I přes dobré mechanické vlastnosti má skelné vlákno ve srovnání s ocelovými vlákny malý modul pružnosti v tahu a je poměrně křehké. Další nevýhodou skelných vláken je jejich nízká odolnost proti alkáliím (pH betonu 12,6). Zpočátku se do sklovláknobetonu vmíchávala vlákna z konvenčních skel, což vedlo k předčasným ztrátám pevnosti způsobených alkalicko-křemičitou reakcí. Časem byla vyvinuta skelná vlákna odolná proti alkáliím, tzv. AR-skleněná vlákna. Ta mají upravené chemické složení (nižší podíl křemíku a vyšší podíl zirkonia) a jsou opatřena povrchovou úpravou, při které je na povrch vláken nanášen tenký ochranný povlak. Dlouhá životnost výrobků ze sklovláknobetonu může být zajištěna použitím výše zmíněných skelných vláken odolných vůči alkáliím, případně aplikací pojiv se sníženou alkalitou. (32)



Obr. 12 Porovnání běžných (vlevo) a alkalivzdorných skleněných vláken (vpravo) po několika týdnech v betonové matici (33)

Běžná skelná vlákna jsou vyráběna ve svazcích o počtu 100 až 400 jednotlivých vláken, každé cca 13 μm v průměru. Princip výroby sklených vláken spočívá v tažení skelné taveniny otvorem ve dně rozžhavené platinové nádoby či pánve, kdy se nejčastěji táhne 204 vláken současně. Ta jsou po ztuhnutí spletena do jednoho provazce a mohou být použita jak ve formě naštipaných vláken či nekonečného vinutí. (21) (30)

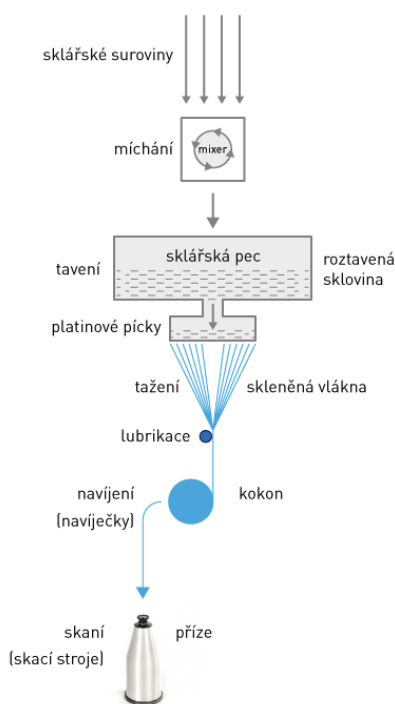
Pevnost v tahu je značně závislá na stavu povrchu. Vzájemné poškozování vláken při sdružování do pramenů a adsorpce vzdušné vlhkosti snižuje pevnost čerstvě vytaženého vlákna až o 50 %. Pro ochranu před vzájemným poškozováním je nutno skelná vlákna chránit povlaky nanášenými ještě před sdružením vláken do pramene. Tzv. lubrikace je používána pro vlákna určená pro textilní zpracování na technické tkaniny. Pro kompozitní díly se vlákna opatřují vazebnými prostředky pro zlepšení adheze polymeru k vláknům. (15)



Obr. 13 Příklad skelných vláken v podobě sekaných pramenů (vlevo) a plošné výztuže z pramenů (33)

Přestože se některé svazky při výrobě kompozitu rozpadnou do menších pramenů, lze svazky vláken považovat za základní prvek výztuže, jelikož k rozpadu svazků na jednotlivá vlákna nedochází. Jednotlivá skelná vlákna se mohou přidávat do smíchané směsi běžným způsobem nebo jsou do předem smíchané směsi ve stříkací pistoli kráceny prameny vláken na požadovanou délku. Kromě rozptýlení v betonové matici mohou být vlákna pro lepší kontrolu jejich rozmístění a orientace uspořádána v podobě netkaných rohoží a skelných tkanin ještě před betonáží (podrobněji kapitola

3.2.2. Textilní beton). U ze sklovláknobetonů obvykle vyráběných tenkých prvků je doporučováno jejich ošetřování po vybetonování vlhčením po nejméně 7 dní. (21)



Obr. 14 Princip výroby skelných vláken (34)

Skelná vlákna jsou amorfní. Jejich vlastnosti v podélném i příčném směru se předpokládají shodné. Mikrostruktura sklovláknobetonů se mění v souvislosti s vlhkostí prostředí více než u obyčejných betonů. To je způsobeno kvůli obvykle poměrně vysokému obsahu cementu. Tato skutečnost může následně vést ve venkovním prostředí ke snížení tahové a ohybové pevnosti. V důsledku může toto zkrěhnutí vést až ke čtyřicetiprocentnímu snížení celkové pevnosti a dvacetiprocentnímu snížení mezního přetvoření. (21)

Chování a vlastnosti skelné výztuže se navíc mění s časem, záleží zejména na změně hodnoty soudržnosti jak mezi okrajovými vlákny svazku a matricí dotýkající se výztuže, tak mezi jednotlivými vlákny uvnitř pramenu výztuže. Existuje stav, ve kterém sklovláknobeton nabývá jak vyšší pevnosti díky vysoké soudržnosti mezi okrajovými vlákny svazků a sousedící matricí, tak houževnatosti v souvislosti s nízkou soudržností mezi vlákny uvnitř pramenu. Při přetvoření pak dochází k „teleskopickému“ typu lomu, kdy okrajová vlákna přispívají k pevnosti kompozitu, zatímco vnitřní vlákna se aktivují později a jsou postupně se vytahována či přetrhávána. Právě vlákna uvnitř svazku tak dodávají sklovláknobetonu jeho houževnatost. Tohle optimální chování bývá však v praxi omezeno na krátké období po výrobě, jelikož soudržnost sklovláknobetonu se mění s časem a vlivem okolního prostředí. S rostoucí soudržností klesá počáteční houževnatost. (24)

Současné přidání dvou druhů vláken, prvního s vysokou soudržností a vyšší pevností, kdy se vlákna se přetrhávají, a druhého s nízkou soudržností, která dovolí vytažení vláken, a nízkým modulem pružnosti, nabízí možnou alternativu ke svazkům skelných

vláken. Tato kombinovaná vláknitá výztuž však v praktické výrobě naráží na problematičnost dosažení rovnoměrného rozptýlení obou druhů vláken, na interference mezi oběma druhy vláken a kamenivem, čímž je v důsledku snížena jejich prakticky dosažitelná celková koncentrace. Taktéž zhutňování čerstvé směsi bývá obtížnější. (24)

3.1.3. Vlákno-beton s uhlíkovými vlákny

Uhlíková vlákna disponují vysokou pevností, která v tahu dosahuje skoro 12tinásobné mezní pevnosti ve srovnání s ocelí, a nízkou měrnou hmotností. Je však potřeba zmínit, že zatímco teoretická pevnost je až 180 GPa, pevnosti vláken (whiskeru) v tahu dosahují cca 20 GPa. Nízké reálné pevnosti ve srovnání s teoretickou je zapříčiněna vnitřními defekty.

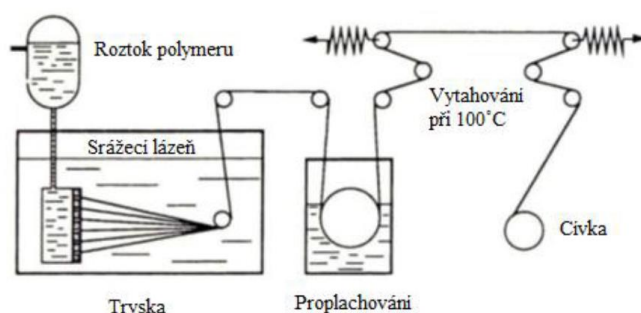
Uhlíková vlákna jsou taktéž odolná proti požáru, chemickému a mechanickému namáhání, což dále souvisí s jejich vysokou životností a dobrým chováním při cyklickém zatížení. Oproti skelným vláknům se uhlíková vlákna vyznačují vysokým modulem pružnosti, který může dosahovat až několiknásobku modulu pružnosti ocelových vláken.

Zásadní nevýhodou uhlíkových vláken je však jejich malé přetvoření na mezi porušení, odpovídající zhruba pouhému 1-2 %, což činí uhlíková vlákna velice křehká a nepřetvárná. Betonový kompozit s uhlíkovými vlákny bude vykazovat pod zatížením velmi malé deformace, avšak při překročení meze pevnosti dojde k náhlému porušení. Křehkost uhlíkového vlákna způsobuje jeho nízkou odolnost proti nárazu. Za zmínku stojí dále možnost elektrochemické koroze uhlíkového vlákna při kontaktu s méně ušlechtilými kovy.

Uhlíková vlákna jsou tvořena nejméně z 90 % čistého uhlíku, pokud však zastoupení uhlíku přesáhne cca 98 %, jedná se již o vlákna grafitová. Atomy uhlíku jsou vzájemně spojeny do mikroskopických krystalů paralelně orientovaných ke střednici vlákna. Díky tomuto uspořádání dosahují v tomto směru nejlepších mechanických vlastností. Uhlíková vlákna patří mezi anizotropní materiály.

Výroba uhlíkových vláken je ve srovnání s jinými vlákny velmi nákladná, jelikož mají zcela odlišný způsob výroby oproti kovovým, skelným, křemenným nebo polymerním vláknům. Na rozdíl od těchto vláken totiž uhlík netaje, je dokonale odolný vůči rozpouštědlům a není tažný. Uhlíková vlákna, stejně jako ostatní uhlíkové materiály, jsou vyráběna pomocí řízené pyrolýzy organických prekurzorů, které již před procesem musí mít formu výsledného produktu, protože karbonizace těchto netajících prekurzorů uchovává jejich tvar. Jako prekurzor slouží viskózová nebo polyakrylonitrilová (PAN) vlákna, případně tzv. anizotropní smoly. Z každého prekurzoru vznikají uhlíková vlákna částečně odlišných vlastností. Zatímco nejvyšší tahové pevnosti dosahují PAN vlákna, nejvyšší moduly pružnosti mají vlákna vyráběná z černouhelných a ropných smol. (35)

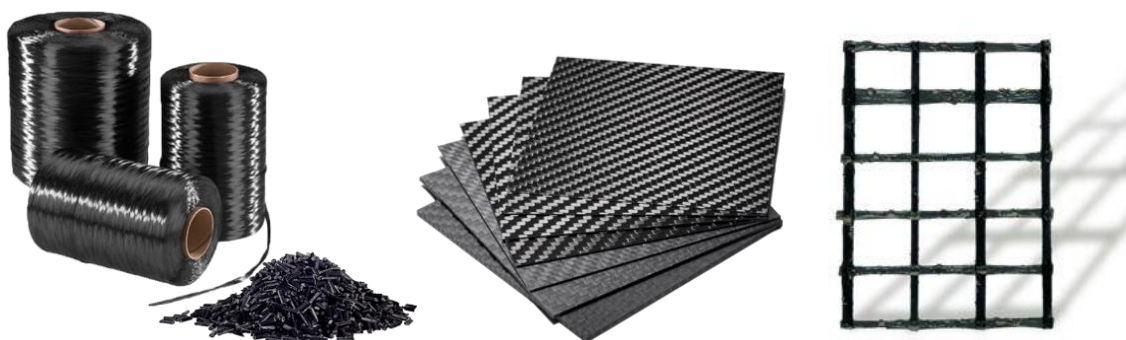
Výroba probíhá obvykle obdobně, nejdříve se připraví nitě při počátečním spřádání. Ty obsahují 3000–12000 vláken, přičemž průměry jednotlivých vláken se pohybují mezi 5–7 μm . Nítě jsou dále navinuty na cívky a připraveny k retikulaci (viz obrázek 15), kdy je prekurzor dlužen na určitou jemnost tavným rozvlákňováním nebo zvlákňováním v roztoku. Následné zahřátí vlákna na 200–400 $^{\circ}\text{C}$ umožňuje uspořádání atomové struktury ve vlákne, tj. orientaci molekul v potřebném směru osy vlákna, na čemž závisí modul pružnosti a pevnost. Připravený prekurzor se stabilizuje (zpevní). Vlákno je dále zahříváno bez přítomnosti kyslíku na teploty v rozmezí 1000–3000 $^{\circ}\text{C}$, čímž se odstraní přebytečné neuhlíkové atomy a dochází tak k čistotě vlákna (karbonizace, grafitizace). Při karbonizaci primárního vlákna se surovina nesmí roztavit a zreagovat na nežádoucí produkty. Povrchovou oxidací vlákna je zajištěn hrubší povrch, který by jinak nemohl přijmout některé povrchové úpravy, což je třeba zejména pro dobré spojení elementárních vláken, například epoxidem. (35)



Obr. 15 Schéma procesu spřádání a dlužení vláken PAN prekurzoru (35)

Výsledná povrchová úprava se nazývá sizing. Jedná se o úpravu uhlíkového vlákna za účelem lepší soudržnosti s kompozity. Nejčastěji se používá materiál na bázi nezatvrdlých epoxidových pryskyřic nebo polyuretanů. Ke zlepšení soudržnosti uhlíkových vláken s cementovou maticí slouží také taktéž studená plasma. (36)

Pro výrobu konstrukčních materiálů ve formě kompozitů jsou využívána vlákna krátkých rozměrů (pro izotropní výtzuže) nebo kontinuální rovnoběžně uspořádané kabely s řádově tisícovkami monofilů. Jako textilní útvary jsou vyráběny jak čistě uhlíkové tkaniny, tak hybridní tkaniny, například se skleněnými nebo poly-para-aramidovými vlákny. Tkaniny s převažující orientací vláken jsou vyráběna jako non-crimp tkaniny, prostorové integrální profily, pásy a proplety. Taktéž jsou k dispozici netkané textilie. (37)



Obr. 16 Příklad uhlíkových vláken ve formě sekaných krátkých vláken z cívky (38), plošné plně výtzuže (39) a plošné sítě s oky (40) (zleva doprava)

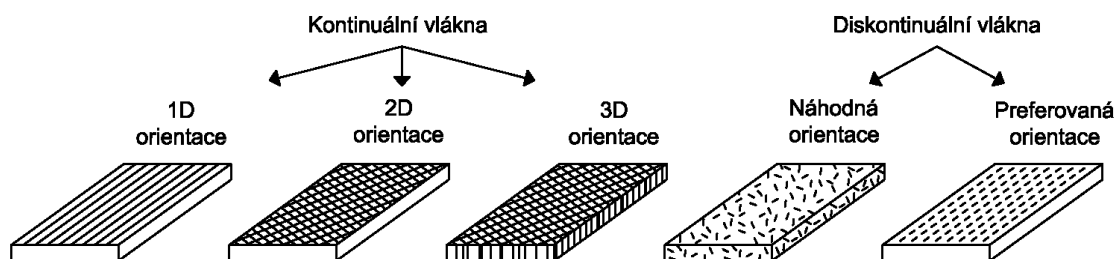
Uhlíková výztuž je vhodná například do tenkostěnných betonových profilů jako náhrada konstrukční výztuže a pro zlepšení tahových pevností. U špatně dostupných míst slouží jako částečná náhrada tahové výztuže, nebo pro zlepšení absorpce energie, například u betonových pražců a mostních dílů. Rozptýlenou uhlíkovou výztuž lze dále použít jako náhradu konstrukční výztuže u předpjatých nosníků a vazníků.

3.2. Typy vláknobetonů dle velikosti a uspořádání vláken

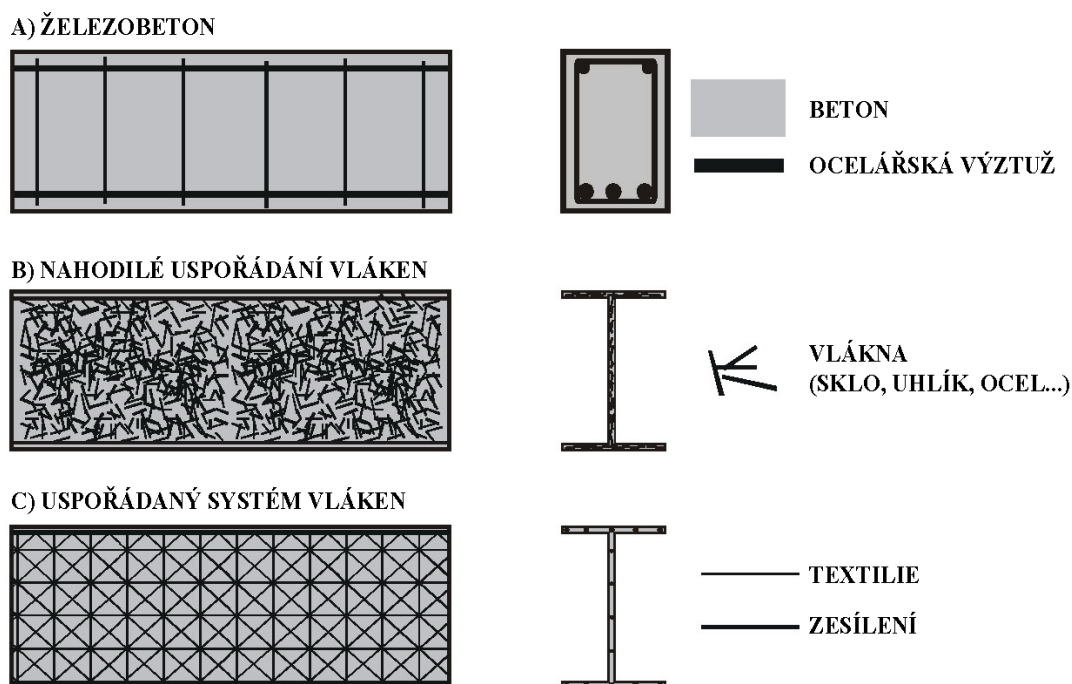
Při návrhu vláknových kompozitů je třeba vzít na vědomí, že vlákna mají v podélném směru nejvyšší specifické pevnosti a specifické moduly pružnosti. Před aplikací je vhodné nejprve zvážit, kde jsou vlákna v konstrukci potřeba a v jaké kvantitě, a poté vlákna umístit tak, aby jejich poloha zohledňovala orientaci směru hlavního napětí.

Kompozity obecně lze rozdělit dle specifických vlastností jejich výztuže (16):

- podle velikosti výztuže
 - makrokompozity (velikosti řádově v mm až cm)
 - mikrokompozity (řádově v μm)
 - nanokompozity (řádově v nm)
- podle orientace výztuže
 - uspořádaný systém vláken
 - nahodilé uspořádání vláken
- podle tvaru výztuže
 - částicové (izometrický či anizometrický tvar)
 - vláknové (kontinuální či diskontinuální vlákna, viz obr. 17)



Obr. 17 Rozdělení vláknových kompozitních materiálů



Obr. 18 Příklad rozdílného způsobu vyztužení ve (b) vláknobetonu s rozptýlenými vlákny a v (c) textilním betonu v porovnání s (a) železobetonem (41)

3.2.1. Vláknobeton s rozptýlenou výztuží

Rozptýlená výztuž je systém náhodně prostorově rozmístěných vláken v betonu, kdy vlákna ztužují samotnou strukturu betonu. Při vhodné distribuci jednotlivých vláken vzniká homogennější a izotropnější směs a zatvrdlý beton se stává z křehkého tvárnějším materiálem. Vlákna mohou být do betonu aplikována jak samostatně, tak společně se standardní betonářskou výztuží.

Obvyklým požadavkem rozptýlené výztuže je zlepšit fyzikálně-mechanické vlastnosti betonu v zatvrdlém stavu. Rozptýlená výztuž však mění současně i chování betonu v čerstvém stavu. Při návrhu složení tohoto typu vláknobetonu je třeba upravit objemy složek (zejména jemných podílů v kamenivu, cementu, příměsí) aby byl eliminován vliv nakypění směsi kameniva náhodně rozptýlenými vlákny. Vlákna mimo jiné redukuje tvarové a objemové změny vlivem dotvarování, omezují vznik trhlin vlivem smršťování a zlepšují pevnostní charakteristiky samotného betonu. (13)

V tenkostěnných prvcích je použití klasické betonářské výztuže problematické z důvodu zajištění dostatečné tloušťky krycí vrstvy. Pokud však konstrukce obsahuje pouze rozptýlená vlákna výztuže, není třeba při samotném návrhu prvku krycí vrstvu řešit. Povrch konstrukce lze dodatečně ošetřit, například ochranným nátěrem. Vláknobeton s rozptýlenou výztuží je aplikovatelný i pro tvarově složitě a tenkostěnné konstrukce a je odolný i vůči neočekávanému zatížení.

Výsledný ztužující efekt na matrici betonu ovlivňuje tvar, rozměr, materiál a v neposlední řadě dávka vláken. Nejčastěji používaná jsou vlákna polymerová, skelná a ocelová. Zásadní pro vláknobeton s rozptýlenými vlákny je rovnoměrné rozmístění vláken

ve struktuře betonu, čehož lze dosáhnout jak vhodným objemovým dávkováním, tak volbou vhodné velikosti a tvaru vláken vůči použitému kamenivu, a to v souladu se zamýšlenou aplikací. Neméně důležitý je čas přidání vláken do čerstvého betonu, způsob a délka jeho dopravy a způsob uložení.

Účinnost vláknobetonu s rozptýlenými vlákny je tedy založena na uvažovaném rovnoměrném přenosu zatížení ve všech směrech, proto je třeba zajistit rovnoměrné rozmístění vláken v celém objemu. Teoreticky, jsou-li vlákna rozmístěna po objemu tělesa zcela rovnoměrně, působí pak ve směru namáhání pouze jedna třetina vláken.

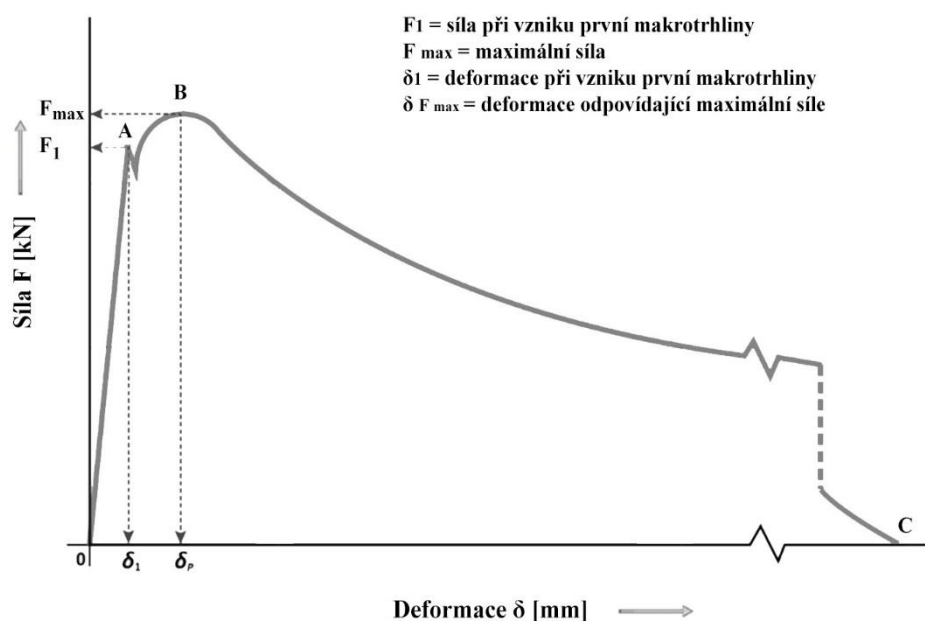
Základní pojmy

- **průřezový poměr** – délka vlákna ku ekvivalentnímu průměru vlákna L/d (d – průměr kruhu mající shodnou plochu průřezu jako vlákno), v rozmezí 50–150 je zaručena dobrá zpracovatelnost a disperze v matrici
- **kritická délka l_c** – teoretická délka, nad kterou se vlákno přetrhne dříve, než se uvolní z matrice, přičemž trhlinka protíná vlákno v jeho středu
- **faktor orientace (koeficient účinnosti vlákna)** – účinnost, s jakou náhodně orientovaná vlákna snesou tahové namáhání působící v jakémkoliv směru, pohybuje se v rozmezí 0,2 - 1,0, přičemž hodnota 1 je pro zcela vyrovnaná vlákna kolmo na trhlinku
- **rozdělovací faktor** – pokud jsou vlákna dostatečně blízko sebe, pak první mez tahu kompozitu je mnohem vyšší než matrice samotné, neboť vlákna efektivně redukuje napětový faktor řídicí lom (působící napětí se mezi nimi rovnoměrně rozdělí)
- **první lomová síla** – síla odpovídající zatížení (v tahu či ohybu), při kterém zatěžovací zařízení zaznamená první zřejmou nelinearitu. (30)

Chování vláknobetonu s rozptýlenou výztuží

Chování vláknobetonu s rozptýlenou výztuží v prostém tahu může být zaznamenáno ve třech oblastech v jeho pracovním diagramu:

- Oblast OA – oblast bez vzniku trhlin, úsek je shodný s výsledky pro prostý beton
- Oblast AB – oblast vzniku trhlin, zátěž přebírají vlákna
- Oblast BC – ukončení vzniku trhlin v průřezu



Obr. 19 Diagram odolnosti v tahu za ohybu vláknobetonu s rozptýlenou výztuží (42)

Oblast OA – Vláknobeton s rozptýlenými vlákny se ještě před dosažením charakteristické meze vzniku makrotrhliny (viz bod A na obrázku 19) začíná chovat nelineárně. To je způsobeno vlivem vznikajících mikrotrhlin ve struktuře kompozitu. S ohledem na malá přetvoření lze tuto část pracovního diagramu nahradit kvazilineárněpružným (QLE) chováním vláknobetonu. (22)

Oblast AB – Vzniklá makrotrhlina se velmi rychle rozevívá a její délka se významně prodlužuje. Vlákna v trhlině se aktivují a začnou přenášet tahová namáhání v kritickém průřezu. Neutrální osa se přibližuje k tlačnému okraji průřezu, čímž se zmenšuje jeho tlaková část. Při zkoušce trámku ohybem, zatěžovaného konstantní rychlostí přírůstků průhybu v čase, klesá obvykle rychle i síla odolnosti na úroveň odpovídající residuální únosnosti. Na její hodnotu má převládající vliv odolnost vláken a objemový stupeň ztužení struktury kompozitu. (22)

Napjatost zvětšující se tažené části kritického průřezu lze při namáhání prostým ohybem nahradit tzv. rovnoměrnou charakteristickou ekvivalentní pevností vláknobetonu v dostředném tahu. Ta představuje výpočetní model kvaziplastického (QPL) chování vláken v tažené oblasti kritického průřezu. (22)

Oblast BC – Po překročení bodu B již nevznikají další trhliny nebo porušení v betonu. Při dalším nárůstu napětí dojde až k mezi pevnosti prvku – bod C. Ke kolapsu prvku dochází nejčastěji překročením soudržnosti vláken s matricí, a tedy jejich vytržením nebo dosažením meze pevnosti vláken za předpokladu působení pouze vláken v průřezu. Mez pevnosti vláknobetonu s rozptýlenými vlákny v tahu je tedy určena soudržností vláken s betonovou matricí a pevností v tahu vláken.

Příklady aplikace vláknobetonů s rozptýlenou výztuží

Vláknobetony s rozptýlenou výztuží jsou využívány nejčastěji pro omezení vzniku trhlin, pro navýšení houževnatosti prvku, odolnosti vůči rázu, trvanlivosti a v neposlední řadě požární odolnosti konstrukce. Při vhodné aplikaci lze dosáhnout nižší spotřeby materiálu, například snížením tloušťky prvku či množstvím betonářské výztuže, a tedy i druhotných úspor při manipulaci, skladování a dopravě. To přináší do budoucna velký potenciál zejména u prefabrikovaných prvků.

- **ostění tunelů**

Segmentové ostění je poměrně štíhlý prvek, kdy se tloušťka obvykle pohybuje mezi 250 mm a 400 mm. Běžná krycí vrstva 50 mm neponechává mnoho prostoru pro betonářskou výztuž. Vyztužení rozptýlenou výztuží předchází této nehomogenitě a možnému odtržení krycí vrstvy. Využití vláknobetonu s rozptýlenými vlákny pro výrobu segmentů tunelového ostění dále přináší zejména výhody z hlediska trvanlivosti, úspor finančních nákladů spojených s realizací (méně výztuže a energie, menší pracnost) a omezení produkce CO₂. Pro ostění tunelů se dále využívá také technologie stříkaného drátkobetonu. Výhodou je výborná prostupnost směsi mezi pruty výztuže, jednodušší armování, omezení vzniku trhlin a s tím související zvýšení vodonepropustnosti. (20)

- **prefabrikáty pro dopravní stavby**

Například vláknobeton se syntetickými vlákny přináší v prefabrikované výrobě prvků pro dopravní stavby několik podstatných výhod. Vedle vysoké odolnosti betonu je hlavním přínosem také úspora materiálu. U těchto konkrétních aplikací (viz obrázky 20 a 21) byla ještě částečně ponechána, i když již redukována, klasická ocelová výztuž. Technologický vývoj vláknobetonu může dovolit v některých případech klasickou ocelovou výztuž zcela vypustit. Vláknobetonu s rozptýlenými vlákny bývá dále využito pro výrobu chodníků, dálnic, letištních ploch atd.



Obr. 20 Mostní římsa (43)



Obr. 21 Silniční svodidla (43)

- **mosty a lávky**

Vláknobeton s ocelovými vlákny je používán například v podobě prefabrikovaného předpjatého vazníku. Tato technologie umožňuje realizovat konstrukce i značných rozpětí a bylo jí již vystavěno několik mostů. Na výrobu pěší lávky přes řeku Han na ostrov Suyudo v Soulu, Jižní Korea, (viz obrázek 22) byl použit UHPC (Ductal), který

umožnil navrhnout oblouk na rozpětí 120 m o šířce 4,3 m. Horní deska jeho oblouku má největší tloušťku pouhé 3 cm. Konstrukce lávky je z ocelových prvků a středního UHPC oblouku, který je tvořen šesti zakřivenými segmenty o délce 20 až 22 metrů. Ty byly dovezeny na stavbu, sepnuty dohromady a předepnuty. Dvě poloviny oblouku byly spojeny dohromady monolitickým prvkem z Ductalu ve vrcholu oblouku. Ductal, taktéž použitý na výrobu segmentů, je UHPC s ocelovými vlákny délky 13–15 mm a o průměru 0,2 mm, v dávce 2 objemových procent. Další esteticky atraktivní realizací je silniční most André-Lévy v Montpellier, Francie, z roku 2014, s celkovou délkou 74 m (viz obrázek 23). Konstrukce mostu je sestavena ze 17 prefabrikovaných segmentů a rozpětí jednotlivých polí odpovídá 25 m. Pro výrobu jeho mostovky byl použit UHPC vláknobeton. (21) (44)



Obr. 22 Most míru – Seonyu Bridge (21)



Obr. 23 Most André-Lévy (44)

- **plovoucí vláknobeton**

Ostrůvky z plovoucí vláknobetonové plošiny (hnízdiště) pro ohrožený druh ptactva – rybáka obecného – jsou tvořeny dutými tenkostěnnými prefabrikáty tvaru šestibokého hranolu, které lze vzájemně spojovat do větších celků. Pro výrobu byl použit vysokopevnostní jemnozrnný vláknobeton odolný proti průsaku vody a působení mrazu a ledu. (21)



Obr. 24 Dřevěná forma bednění (21)



Obr. 25 Spojené plovoucí ostrůvky (21)

- **střešní konstrukce**

Vláknobeton lze využít i u konstrukcí v podobě tenkých skořepin, kdy je s ohledem na zakřivení konstrukce a omezenou tloušťku prvků velmi obtížné instalovat dostatečné množství tradiční výztuže. Zastřešení zastávky v Shawnessy, Kanada, (viz obrázek 26)

je provedeno z 24 UHPC prefabrikátů, kdy jednotlivé segmenty přístřešku zastřešují plochu 5,5 x 6 m a mají tloušťku pouhých 20 mm. Zastřešení mýtné brány Mýtná brána u mostu Millau, Francie, (viz obrázek 27) je zastřešena betonovou konstrukcí o rozměrech 100 x 28 m, sestavenou z 53 prefabrikátů z UHPC s vysokým obsahem drátků. (21)



Obr. 26 Zastřešení zastávky, Shawnessy (21)



Obr. 27 Mýtná brána, Millau (21)

- **fasádní a obkladové desky**

Příkladem využití UHPC jsou fasádní panely muzea středozemních kultur v Marseille MuCEM. Pro náhodný nepravidelný vzhled fasády s opakujícími se prvky bylo navrženo šest různých typů prefabrikátů a z nich byla fasáda smontována. (21)



Obr. 28 Pohled na lávku z UHPC (21)



Obr. 29 Fasádní panely muzea MuCEM (21)

- **schodiště**

Příkladem jsou prefabrikovaná schodiště z drátkobetonu vyráběné firmou HI-CON. V nabídce jsou schodiště s tloušťkou stupňů 50 mm. Zavěšené schodiště z roku 2011 vyrobené pro společnost Arting bylo vytvořeno z velmi tenkých schodišťových prvků (viz obrázek 30). Dalším příkladem realizace je schodiště ve škole Sydhavnsskolen v Kodani z roku 2013, jehož schodišťová ramena mají šířku 1,6 m a tloušťku 13 cm (viz obrázek 31). (45)



Obr. 30 Schodiště pro Arting (45)



Obr. 31 Schodiště ve škole Sydhavnsskolen (45)

- **mobiliář**

Při budování naučné stezky poblíž Blovic vznikla netradiční konstrukce Cyklopointu z UHPC. Pro realizaci jednoduché, subtilní konstrukce přístřešku s lavičkami, stolem a stojanem pro kola (viz obrázky 32 a 33) byl zvolen z důvodu zajištění odolnosti a trvanlivosti na nosné prvky UHPC a pro lavičky vláknobeton s polymerovými vlákny.



Obr. 32 Architektonická studie cyklopointu (46)



Obr. 33 Realizace cyklopointu (47)

3.2.2. Textilní beton

Pro textilní beton se používá označení TRC (textile reinforced concrete). Jedná se o jemnozrný cementový kompozitní materiál vyztužený technickou textilií. Textilní výztuž, jejíž jednotlivá vlákna jsou rovnoměrně rozmístěna a fixována nejčastěji v podobě sítě plošné (2D) či prostorové (3D), je v prvku uložena ve vhodné poloze vzhledem k uvažovanému namáhání. Díky fixaci pozici vláken nedochází k vytváření jejich shluků. S pevně danou polohou vláken souvisí lépe definovatelné vlastnosti textilních betonů a menší rozptyl materiálových parametrů. (48)

Textilní výztuže jsou nejčastěji vyrobeny například z uhlíkových, alkalivzdorných skelných, čedičových či jiných vláken. Tyto materiály nepodléhají korozi a díky tomu je potřebná krycí vrstva výrazně nižší ve srovnání se standardním železobetonem. Konstrukční prvky vyztužené tímto způsobem tak vynikají svou štíhlostí. Textilní beton představuje výbornou alternativu stávajících ocelových výztuží (viz obrázek 18).

Vlákna mohou být v textilií uspořádaná v různé podobě. Kompozity s dlouhými jednosměrně orientovanými dosahují různých vlastností závislých na směru vláken. Anizotropie vláken je nižší u víceosých uložení vláken. K výrobě textilních výztuží jsou využívány spojité příze nebo přásty, které jsou zpracovávány v rovinný prvek za pomoci textilní techniky. Kromě útku a osnovy může být použita textilie netkaná s vlákny náhodně uspořádanými v rovině. V případě rohoží jsou vlákna uspořádána prostorově ve formě trojrozměrné tkaniny, kde je dopředu přesně definována pozice a vzdálenost vláken. Pro tyto 3D textilie se používají vlákna skelná, uhlíková a aramidová. (33)

Textilní beton má stejné výhody jako tradiční železobeton, ale nabízí i nové možnosti využití. Použitím textilních vláken lze zásadně zvýšit únosnost prvku při snížené tloušťce a hmotnosti prvku. TRC nabízí inovativní možnost výroby tenkých betonových dílů s extrémně vysokou nosností. Hlavním předpokladem pro fungování tohoto kompozitu je dobré spojení mezi textilní výztuží a betonovou směsí. Pro zajištění dostatečné soudržnosti mezi textilií a betonem, je vhodné použít výztuž s mřížovou strukturou a s dostatečným rozestupem vláken zalitou betonem s adekvátní maximální velikostí zrn kameniva. I s ohledem na dobrou probetonovatelnost bývá síť obvykle zalita velmi jemným tekutým betonem s maximální velikostí částic 4 mm. Textilie ve spojení s jemnozrnnou betonovou matricí umožňuje vytvořit tenkostěnné dílce vysoké estetické kvality povrchu a s tloušťkou pouhých 10–20 mm. (49)

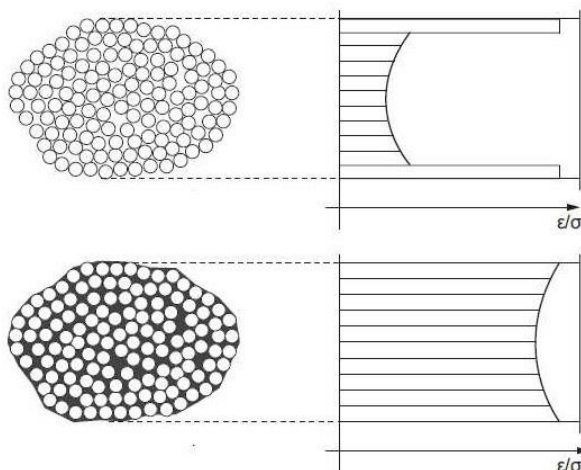
Textilní beton a jiné nové technologie a materiály mohou v budoucnu zcela nahradit ocel jako výztuž betonového průřezu. Důvodem tohoto trendu vývoje je nahradit betonářskou ocel, jejíž nevýhodou je vysoká energetická náročnost při její výrobě, hmotnost, a hlavně riziko koroze. Největší výhodou textilních vláken používaných v TRC je nekorozivnost vláken, kdy nenastává jejich degradace působením negativních okolních podmínek. Odolnost vláken proti korozi tak výrazně zvyšuje trvanlivost konstrukcí z TRC.

Výrobci textilních vláken určených přímo pro použití ve stavebnictví je v současnosti na našem území malé množství, textilních výztuží je však velké množství. U textilní výztuže je zásadní materiál textilních vláken, tvar průřezu vlákna, vzájemné spojení vláken, odolnosti proti korozi, průřezová plocha, symetrie, hustota textilie atd. Textilní výztuž má často tvar čtvercové nebo obdélníkové sítě o vzájemné vzdálenosti prutů z textilních vláken nejčastěji do 40 mm. Zejména z tohoto důvodu je vhodné textilní výztuž kombinovat s betonovou směsí s menšími frakcemi kameniva, jak bylo již dříve v textu zmíněno.

Technologie TRC se v poslední době dynamicky rozvíjí. Z hlediska způsob výroby je kromě fixace textilie ve formě a následném uložení čerstvého betonu do bednění je možná i aplikace vstříkáním jemnozrnného cementu do předem vytvarované sítě. Používá se výroba v kalandrech nebo formování textilie a cementové matrice na kopytech. Pro vyšší pohledovou atraktivitu i funkčnost výrobku je možná dodatečná úprava povrchu broušením či ošetření nátěrem.

Pokud je vlákno v textilií zatíženo, je potřeba zajistit rovnoměrný přenos zatížení mezi vnějšími a vnitřními elementárními vlákny průřezu – viz obrázek 34. Za tímto účelem se využívá spřažení, pomocí epoxidu a styrol-butadienu. Tímto opatřením není pouze

zvýšena pevnost v tahu, ale také je umožněno vytvarování dané výztuže na požadovaný tvar.



Obr. 34 Porovnání napětí na průřezích textilních vláken – bez úpravy a epoxidem spřažené (50)

Základní pojmy

- **elementární vlákno** – základní stavební prvek, stovky až tisíce elementárních vláken tvoří vlákno
- **vlákno** – základní stavební prvek, z kterého se skládají další textilní struktury jako příze, tkanina, nit atd.
- **jemnost** – popisuje vlastnosti vlákna obdobně jako průměr prutu u kovové výztuže

Pro popsání jemnosti byl zaveden vztah a jednotka:

tex – jednotka, slouží k popisu objemové hmotnosti a dalších charakteristik tkanin, příze, nití atd.

$$f=1 \text{ tex} = \frac{1 \text{ g}}{1 \text{ km}}$$

Na základě tohoto vzorce se dá následně vyčíslit **plocha vlákna** (m^2):

$$A = \frac{f}{\rho}$$

kde f je jemnost vlákna (tex) a ρ měrná hmotnost (kg/m^3). (50)

Jemnozrný beton

Jemnozrný beton obsahuje velmi jemné frakce kameniva. Betonová směs tak může proniknout skrz textilní síť, jejíž struktura má malou vzdálenost jednotlivých textilních vláken. Jemnozrné betony jsou vysokohodnotné betony s maximální velikostí frakce obvykle okolo 1 mm, vysokým obsahem cementu pohybujícím se kolem $500 \text{ kg}/\text{m}^3$, s přidáním plastifikátoru a obvykle fluidního popílku a mikrosilik. Receptury betonové směsi se mění dle aktuální potřeby a použité výztuže.

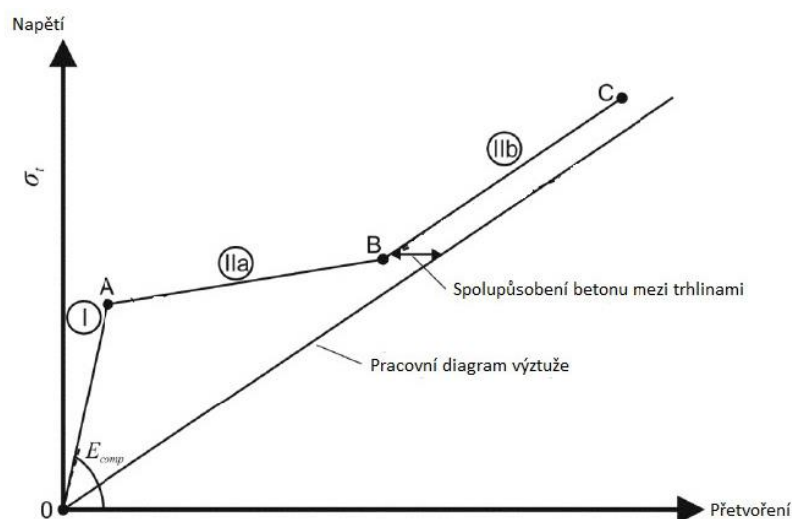
Jemnozrný beton má větší objemovou hmotnost a také menší modul pružnosti než běžný beton. To je způsobeno vyšším obsahem pojiv ve směsi. Další odlišností od normálních betonů je pevnost v tahu. Na rozdíl od normálních betonů je chování jemnozrného betonu v osovém tahu méně duktilní, což je také způsobeno pojivy a velmi jemnými frakcemi kameniva. Dle dlouhodobého zkoumání jemnozrného betonu byl stanoven i jeho součinitel dotvarování. Hodnoty dotvarování jsou v průměru stejné jako u běžně používaných betonů.

Chování textilního betonu

Chování TRC v prostém tahu může být zaznamenáno ve třech oblastech v jeho pracovním diagramu.

- Oblast I – oblast bez vzniku trhlin
- Oblast IIa – oblast vzniku trhlin
- Oblast IIb – ukončení vzniku trhlin v průřezu

Tyto oblasti jsou vymezeny body A, B a C.



Obr. 35 Pracovní diagram TRC v tahu (51)

Oblast I – Je to lineárně elastická oblast s modulem pružnosti E_{comp} , kde nedochází ke vzniku trhlin a je vymezená bodem A. Modul pružnosti E_{comp} lze vyčíslit:

$$E_{comp} = \frac{E_t A_t + E_c A_c}{A_t + A_c}$$

kde E_t , E_c jsou moduly pružnosti textilních vláken a betonu,

A_t , A_c – jsou průřezové plochy textilních vláken a betonu.

Oblast IIa – Po překročení bodu A dochází k takzvané fázi vzniku trhlin. Beton již není schopen přenášet napětí v tahu. Z hlediska mezního stavu použitelnosti má bod A velký význam. Od jeho hodnoty již není mezní stav použitelnosti splněn. Vyčíslení bodu A je závislé od průřezové plochy textilních vláken v průřezu. Výpočet napětí v bodě A za předpokladu:

- lineární průběh pracovního diagramu textilního betonu v oblasti I

- $A_c \approx A$

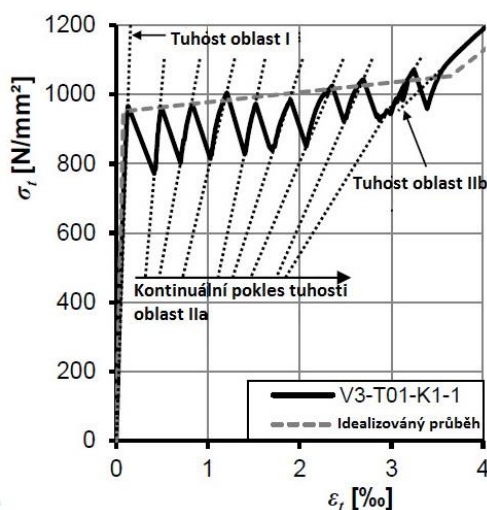
- spolupůsobení textilních vláken a betonu: $\varepsilon_{cr} = \varepsilon_{cr,t} = \varepsilon_{cr,c}$

Potom je možné vyčíslit napětí v bodě A takto: $f_{ctm}(\omega_I) = f_{ctm}(0) \cdot (1 + \omega_I)$

kde $f_{ctm}(0)$ - je průměrná pevnost betonu v tahu

ω_I - míra vyztužení v závislosti na modulech pružností E_t ; E_c a ploch A_t ; A_c ;

$$\omega_I = \frac{E_t A_t}{E_c A_c}$$



Obr. 36 Oblast IIa pracovního diagramu TRC v tahu – příklad idealizovaného a reálného průběhu (51)

Na druhu materiálu použitého pro výrobu textilie záleží chování prvků z textilních betonů. V hlediska počtu trhlin vykazují textilie s vysokou pevností a modulem pružnosti vznik násobných trhlin, zatímco u textilií s nižším modulem pružnosti může docházet k porušení i jednotlivou trhlinou.

Oblast IIb – Po překročení meze oblasti IIa již nevznikají žádné další trhliny nebo porušení v betonu. Při dalším nárůstu napětí dojde až k mezi pevnosti prvku – bod C. Bod C je stanoven za předpokladu působení pouze textilních vláken v průřezu. Mez pevnosti textilbetonu v tahu je tedy dána pevností v tahu textilních vláken. (51)

Příklady aplikace textilních betonů

Textilní betony jsou nejčastěji využívány pro výrobu tenkostěnných prvků, například fasádních a obkladových panelů, balkónových prefabrikátů a pro další speciální aplikace. O širší využití TRC v praxi usiluje společenství Tudalit se sídlem v Drážďanech. Toto společenství sdružuje od roku 2008 některé výrobce textilních vláken, univerzity a stavební firmy. Na našem území obdobné sdružení prozatím nevzniklo. Již nyní je TRC používán na sanace a dodatečné vyztužování betonových a železobetonových konstrukcí.

• skořepinové konstrukce



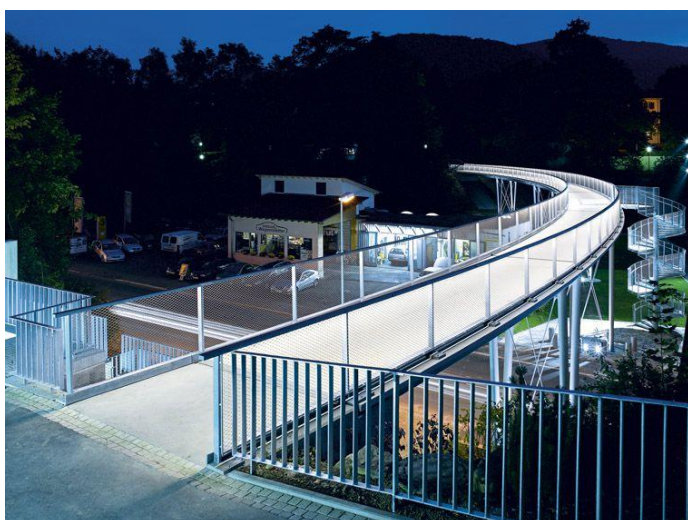
Obr. 37 Pavilon v Löbau (52)



Obr. 38 Betónová mřížka (53)

• mostní a jiné konstrukce

Z postupně narůstajícího počtu realizací mostních konstrukcí z TRC zasluží pozornost zejména lávka pro pěší v Albstadt-Lautlingen. Ta se skládá z několika polí, přičemž výjimečné je nejen maximální rozpětí pole 17,2 m, ale i celková délka 97 m. Použitá textilní výztuž z alkalivzodrného skla impregnovaného epoxidovou pryskyřicí je uspořádána do mřížky o maximální velikosti ok 15 x 15 mm. Díky použití textilní výztuže bylo možné snížit krytí nekovové výztuže na 15 mm. Jemnozrnná betonová matrice obsahuje zrna o maximální velikosti do 4 mm.



Obr. 39 Most pro pěší v Lautlingenu (54)



Obr. 40 Detail vyztužení mostu pro pěší v Lautlingenu (54)

- **nábytek a mobiliář**

Metodou textilního betonu vytvořené prvky, přestože působí velmi subtilně, vynikají odolností. Jsou tedy velmi vhodné pro umístění i do velmi exponovaných míst, kde by jiný mobiliář neobstál delší časový úsek bez újmy.



Obr. 41 SLUB lehátko (55)



Obr. 42 Lehátko (56)

Na našem území s textilními betony pracuje například firma Gravelli, která se zabývá převážně interiéry. Jako výztuž využívá skelnou tvarovanou tkaninu, betonovou směs většinou aplikuje nástřikem a povrch výsledných produktů dále brousí, leští a opatřuje několika vrstvami nátěrů, včetně ochranných.



Obr. 43 Gravelli (57)



Obr. 44 Gravelli (57)

- **fasádní panely, užité předměty a další**



Obr. 45 Gravelli (57)



Obr. 46 Gravelli (57)

4. Experimentální část

Pro aplikaci do prvků městského mobiliáře, případně nábytku, se jeví z důvodu snadnější manipulace jako velmi vhodné použití lehkých betonů. Jako vhodná náhrada přírodního kameniva byl zvolen expandovaný jíl – Liapor. Frakce pórovitého kameniva byla vzhledem k uvažované aplikaci do tenkostěnných prvků a současně z důvodu zajištění dostatečného spolupůsobení s uvažovanou speciální výztuží zvolena 0–2 mm. Liapor zvolené frakce vykazuje sypanou hmotnost 575 kg/m^3 , nasákavost w_{120} do 5 % hmotnosti, hmotnostní úbytek při 25 zmrazovacích cyklech do 2 % a nízký součinitel tepelné vodivosti. Liapor nemá kapilární strukturu a není hygroskopický. (58)

Použitá receptura obsahuje kromě Liaporu písek frakce 0–1 mm, portlandský cement CEM I 52,5, popílek či vápennou moučku, mikrosilika, vodu (přídavná a účinná) a plastifikátor pro zajištění dostatečně tekuté konzistence čerstvého betonu. Použitý superplastifikátor STACHEMENT 2095 a mikrosilika Stachesil S vyrábí společnost Stachema CZ s. r. o. Detailní receptura se u jednotlivých sad vzorků může lišit s ohledem na zamýšlenou aplikaci a použitý způsob vyztužení. Dílčí poměry jednotlivých složek a konkrétní váhová či objemová množství jednotlivých receptur nelze uvést, přestože jsou autorce disertační práce známa.

Původní receptura poskytnutá společností Liapor:

• písek 0-1 mm	500 kg/m^3
• Liapor 0-2 mm	700 l/m^3
• cement I 52,5	350 kg/m^3
• mikrosilika	15 kg/m^3
• popílek/vápenná moučka	220 kg/m^3
• plastifikátor	min. 4 l/m^3
• voda – dle potřeby	w/c cca 0,4

Při přípravě čerstvého betonu je třeba dodržet technologickou kázeň, přesnost dávkování, potřebnou vlhkost kameniva, rychlost a dobu míšení. Vlastnosti použité betonové matrice lze kontrolovat u čerstvého betonu a následně u výsledného produktu po zatvrdnutí betonového kompozitu. Vhodná konzistence čerstvého betonu byla průběžně ověřovaná s použitím střešovacího stolku pro zkoušky konzistencí čerstvých malt.

V rámci výzkumu problematiky bylo přistoupeno k výrobě zkušebních vzorků. Jako referenční zkušební vzorek pro tenkostěnné konstrukce byla zvolena deska. Tloušťka desky byla v průběhu experimentů postupně snižována, tloušťka použitého bednění byla redukována z původních 25 mm na 20 mm či dokonce 18 mm. Důvodem je snaha o maximální odlehčení konstrukce při zachování dostatečné únosnosti pro uvažované budoucí aplikace do nábytku a ověření technologie i pro tyto stále tenčí prvky. Nevyztužený lehký beton s pórovitým kamenivem zvolený pro experimentální ověření s ohledem na konkrétní použitou recepturu dosahuje průměrných objemových hmotností

do 1 700 kg/m³. V rámci bakalářské práce byl s použitím poznatků z experimentálního výzkumu zhotoven jako příklad finálního produktu kávový stolek (59).

Z hlediska speciálních výztuží pro konstrukce z lehkého betonu se experimentální část výzkumu soustředila konkrétně na vyztužení textiliemi, nejprve plošnými (2D) a později prostorovými (3D), a dále na vyztužení rozptýlenými ocelovými vlákny. Pro porovnání chování vzorků bylo vyrobeno několik sad vzorků z rozdílných výztužných materiálů. Sady zahrnovaly vyztužené i nevyztužené desky a doprovodné zkušební vzorky.

Zkušební vzorky byly vyrobeny v Experimentálním centru ČVUT či v laboratoři Katedry betonových a zděných konstrukcí na Fakultě stavební ČVUT. Vyrobené vzorky byly zajištěny proti nežádoucímu vysychání na povrchu zakrytím plastovou fólií. K odbednění vzorků bylo přistoupeno po dvou dnech. Vzorky byly poté uloženy do vodní lázně, ze které byly vyjmuty s dostatečným předstihem, aby došlo k jejich dostatečnému vyschnutí před zkoušením. Zkoušky, měření a vážení zkušebních vzorků probíhalo ve stejný den, a to nejdříve při stáří vzorků 28 dnů. Desky a trámce byly poté zkoušeny v tahu za ohybu, krychle v tlaku. Zkoušky byly opět prováděny v Experimentálním centru ČVUT či v laboratoři Katedry betonových a zděných konstrukcí na Fakultě stavební ČVUT v Praze. Detailní informace k prováděným zkouškám jsou uvedeny dále v textu. Výsledky zkoušek byly posléze porovnány.

Zkoušení čerstvého betonu

Vlastnosti čerstvého betonu musí zejména umožnit dobrou probetonovanost prvku, což znamená, že čerstvý beton musí vyplnit všechna požadovaná místa formy, například u textilního betonu je třeba zajistit jeho protečení mřížkovou strukturou výztuže. To je třeba vzít v potaz již při samotném návrhu složení směsi. Pro uvažovanou aplikaci do tenkostěnných prvků mobiliáře či nábytku a pro zajištění dobré probetonovanosti těchto prvků a soudržnosti betonové matrice se speciální výztuží je vhodné použití jemnozrnného betonu. U použité receptury s maximální velikostí zrn kameniva 2 mm jsou pro ověření vlastností čerstvého betonu s matricí s tekutější konzistencí aplikovatelné zkoušky pro výrazně tekoucí betony, tím jsou myšleny betony s konzistencí podobnou samozhutnitelnému betonu (SCC).

Pro vyhodnocení vlastností čerstvého betonu lze využít v současnosti platnou normu ČSN EN 206+A1 (5). Zpracovatelnost lze ověřit pomocí metod popsanych v ČSN EN 12350-8 (60) či metodou pro zkoušení malt dle EN 1015-3 (61). Zkoušení vlastností čerstvého vláknobetonu se věnuje norma ČSN P 73 2451 (62), která u zkoušky rozlitem odkazuje na ustanovení ČSN EN 12350-5 (63) a současně stanovuje, že pro vláknobeton nelze použít ani zkouška sednutím podle ustanovení ČSN EN 12350-2 (64), ani zkouška VeBe dle ustanovení ČSN EN 12350-3 (65).

Při experimentálním výzkumu bylo v praxi využito metody pro zkoušení malt, s použitím střešacího stolku pro stanovení konzistence čerstvých malt. Při této zkoušce se stanoví hodnota rozlité změřením průměru rozlitého zkušebního vzorku čerstvé malty umístěné na předepsané desce střešacího stolku pomocí předepsaného kovového kužele po předepsaném počtu svislých pádů, při nichž se deska střešacího stolku zvedá a pak volně padá z předepsané výšky. (61)



Obr. 47 Příklad konzistence vhodné do horizontálního bednění s vloženou prostorovou skelnou textilií (66)



Obr. 48 Příklad konzistence receptury pro LWAFRC, bez rozptýlených ocelových vláken (66)

Při návrhu betonové směsi je třeba zohlednit zejména její zpracovatelnost, která musí být uzpůsobena typu a množství výztuže i celkovému výrobnímu procesu. U betonového kompozitu s rozptýlenou výztuží je třeba vzít v potaz, že vlákna celkově ztuží čerstvý beton a podstatně tak ovlivní jeho zpracovatelnost. U metody výroby prvků z TRC spočívající v uložení textilní výztuže do formy a následném zalití betonovou matricí je rozhodující právě zpracovatelnost směsi a její schopnost se rozlít. Při výrobě složitých geometrických tvarů či při použití husté výztuže je doporučeno provést test betonáže. To lze provést v praxi nalitím čerstvého betonu do vzorku bednění reprezentujícího například detail, kdy je pozorováno jeho rozlítí, čímž je míněno chování při procházení skrze textilní výztuž.

Zkoušení ztvrdlého betonu

Pro zkoušení vlastností nevyztuženého ztvrdlého betonu lze použít standardních normových metod pro konvenční betony ČSN EN 12390 (67). Pro prvky vyztužené rozptýlenými vlákny jsou vhodné metody zkoušení ztvrdlého vláknobetonu popsané v normě ČSN P 73 2452 (68). Jedná se zejména o zkoušky pro stanovení pevnosti v tlaku, v prostém tahu, pevnosti v příčném tahu, pevnosti v tahu za ohybu, stanovení modulu pružnosti. Ztvrdlý beton lze dále zkoušet z hlediska fyzikálních vlastností, například mrazuvzdornosti, odolnosti proti působení vody a chemických rozmrazovacích přípravků, smršťování, dotvarování a další.

Postup zkoušky v tlaku byl proveden v souladu s ČSN EN 12390-3 (69). Pro stanovení pevnosti v tlaku prostého betonu i vláknobetonu platí dále ustanovení ČSN EN 12390-4. Zatímco jmenovité rozměry krychle z prostého betonu dle normy odpovídají 100, 150, 200, 250 a 300 mm (70), pro vláknobeton se zpravidla volí jmenovité rozměry 150/150/150 mm ČSN P 73 2452 (68).

Pevnost v tlaku je dána vzorcem:

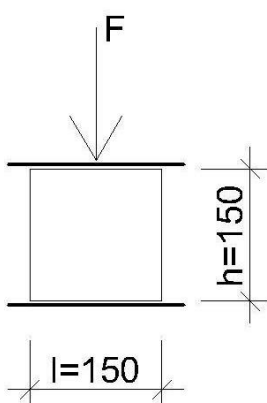
$$f_c = \frac{F}{A_c}$$

kde je

f_c pevnost v tlaku (MPa),

F maximální tlaková síla při porušení (N),

A_c plocha zkoušeného betonu (mm²).



Obr. 49 Znárodnění zkoušky v tlaku na krychli o rozměrech 150/150/150 mm

Zkoušením pevnosti v tahu ohybem zkušebních těles se podrobně zabývá norma ČSN EN 12390-5 (71). Zkouška se standardně provádí na betonovém hranolu rozměrů 100/100/400 nebo 150/150/700 mm, které splňují jmenovité rozměry dle ČSN EN 12390-1 (70). Normalizované trávce z prostého vláknobetonu pro zkoušku ohybem podle ČSN EN 12390-1 mají rozměry 150/150/700 mm (68). Zkouška trávcečků o rozměrech 40/40/160 mm není pro beton normována, avšak pro ověření dílčích vlastností jejich porovnáním je dostatečně vypovídající. U jemnozrnných betonů lze zkoušku na malých trávcečcích provést dle ČSN EN 196-1 (72). Vždy je třeba vzít v potaz, že na reálných prvcích o výrazně odlišných rozměrech se projevují účinky rozměrového efektu.

Při zatěžování zkušebního tělesa jedním břemenem uprostřed je užíváno označení zkouška tříbodových ohybem. Při zatěžování zkušebního tělesa dvěma břemeny, která jsou od sebe umístěna ve vzdálenosti 1/3 délky vzdálenosti podpěr, je užíváno označení zkouška čtyřbodovým ohybem. Zaznamená se dosažené maximální zatížení a místo lomu, jestliže je mimo oblast zatěžovacích válečků (u zkoušky čtyřbodovým ohybem).

Pevnost v tahu ohybem je u tříbodového ohybu dána vzorcem:

$$f_{ct,l} = \frac{3Fl}{2bh^2}$$

Pevnost v tahu ohybem je u čtyřbodového ohybu dána vzorcem :

$$f_{ct,fl} = \frac{Fl}{bh^2}$$

kde je

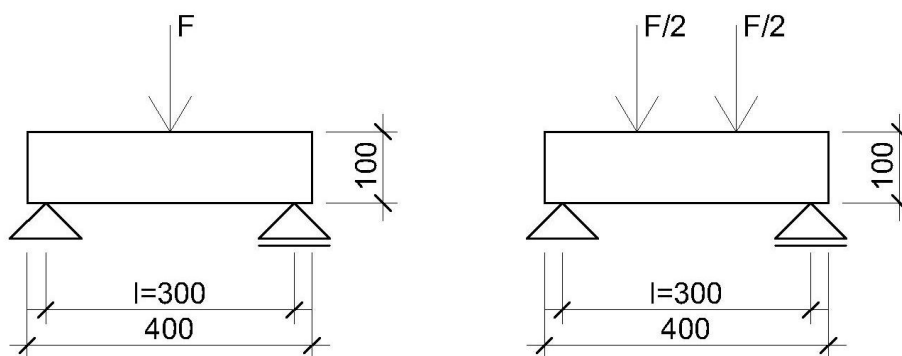
$f_{ct,fl}$ pevnost v tahu ohybem v MPa (N/mm²),

F maximální zatížení (N),

l vzdálenost mezi podpěrnými válečky (mm),

b šířka průřezu (mm),

h výška průřezu (mm).



Obr. 50 Uspořádání zkoušky v tahu za ohybu na hranolech o rozměrech 100/100/400 mm pro třibodový (vlevo) a čtyřbodový ohyb (vpravo)

4.1. Lehký beton s pórovitým kamenivem vyztužený textilií

Pro porovnání chování vzorků z lehkého textilního betonu s pórovitým kamenivem, dále označovaného zkratkou LWATRC, bylo vyrobeno několik vyztužených i nevyztužených desek a doprovodné zkušební vzorky. Celkem byly vyrobeny čtyři sady. Ty nesou v následném textu označení číslicemi 1-4, chronologicky dle pořadí výroby. Přehled desek, zkoušených v tahu za ohybu, je obsažen v tabulce 4.

Tabulka 4 Přehled desek zkoušených v tahu za ohybu

zkušební vzorky		materiál výztuže	typ výztuže	typ bednění	kusů	
sada	rozměry [mm]					
LWATRC, LWAC	1	700/425/25	-	-	1	
	2	700/425/20	uhlík	plošná textilie	2	
	3	700/400/18	sklo	prostorová textilie	vertikální horizontální	1 1
	4	620/150/18	sklo	prostorová textilie	horizontální	6

Receptura lehkého betonu s pórovitým kamenivem Liapor

Obecně pro betony s textilní výztuží je vhodné použití textilií mřížových struktur s dostatečným rozestupem vláken a k nim odpovídající velikosti zrn kameniva, aby byla zajištěna dostatečná soudržnost mezi textilií a betonem. Protože je pevnost pórovitého kameniva obvykle nižší než pevnost cementového tmelu, odvíjí se pevnost výsledné betonové matrice převážně od pevnosti použitého cementového pojiva.

Pro vláknobetonové prvky však nemusí být pevnost výsledného cementového kompozitu zcela rozhodující, zejména u TRC je nutné dodržet zejména požadavek na tekutost čerstvě zamíchané směsi. Je výhodné kombinovat vysoce únosnou textilní výztuž s matricí vysokohodnotného betonu, což také pomáhá zajistit lepší spolupůsobení textilie a cementového kompozitu. Za rozhodující však lze považovat velikost použité frakce kameniva. Zatímco běžně vyráběné betony obsahují kamenivo hrubé a drobné, matrice vhodná pro TRC by měla obsahovat jen kamenivo jemnozrné s $D_{\max} \leq 4$ mm.

Původní doporučená receptura poskytnutá společností Liapor byla v průběhu jednotlivých betonáží dle potřeby upravována za účelem dostatečného předmáčení pórovitého kameniva a pro dosažení vhodné konzistence do zamýšleného bednění (plastifikátor, voda).

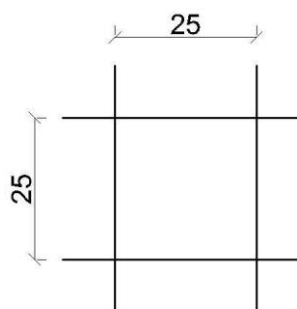
Typy použité textilní výztuže

V průběhu experimentů s lehkým betonem s pórovitým kamenivem byly nejprve vyrobeny desky vyztužené plošnou uhlíkovou výztuží. Později bylo přistoupeno k vyztužení prostorovou skelnou výztuží. Použitá textilní výztuž není náchylná ke korozi a krycí vrstva může být tedy výrazně nižší ve srovnání se standardně vyztuženým betonem.

Na vyztužení desek byla použita nejprve plošná textilie z epoxidem spřažených uhlíkových vláken o vzájemné vzdálenosti svazků vláken 25 mm a průřezové ploše $142 \text{ mm}^2/\text{m}$ ve všech směrech. Plocha průřezu jednoho svazku vláken činí $3,62 \text{ mm}^2$. Podélná průměrná pevnost v tahu odpovídá 3100 MPa a podélná charakteristická pevnost v tahu 2200 MPa. (73)

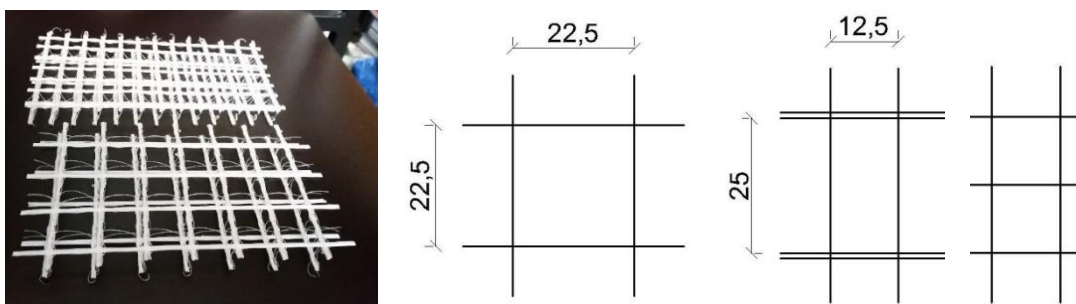


Obr. 51 Uhlíková síť Solidian GRID Q142-CCE-25 (73)



Obr. 52 Geometrie uhlíkové sítě Solidian GRID Q142-CCE-25

Tahová pevnost svazku použitých skelných vláken činí 1100 MPa, plocha svazku vláken pak $3,7 \text{ mm}^2$ (59). Osová vzdálenost dvou plošných vrstev sítě je 12 mm. Sít' s oky $22,5 \times 22,5 \text{ mm}$ je z obou stran totožná, zatímco u druhého použitého typu se strany liší. Plocha vláken na metr běžný je u této sítě v obou směrech a na obou stranách totožná, na osovou vzdálenost 12,5 mm připadá jedno vlákno, avšak zatímco většina svazků vláken leží v osové vzdálenosti 12,5 mm, z jedné strany a v jednom směru jsou vlákna sdružena do dvojvláken s osovou vzdáleností 25 mm z důvodu usnadnění betonáže sítě s vyšší hustotou svazků vláken (viz obrázek 53).



Obr. 53 Srovnání hustoty sítí obou sad použitých skelných textilií (66)

Experimentální ověřování vhodného bednění a postupu betonáže

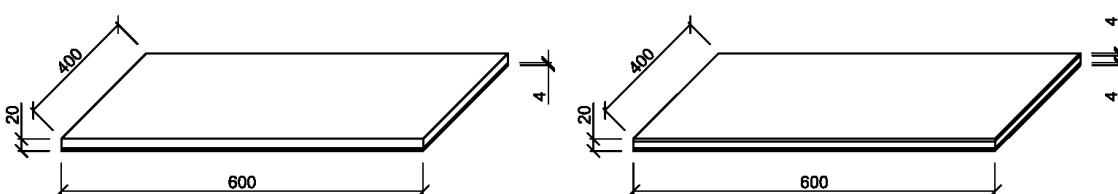
Poznatky z prvotních experimentů zaměřených na textilií vyztužené hutné obyčejné betony a jejich aplikace do tenkostěnných konstrukcí sloužily k ověření jednotlivých typů bednění a způsobů uchycení textilní výztuže, poznání jejich výhod a nedostatků, a celkově k ověření technologie provedení.

V rámci výzkumu této problematiky bylo přistoupeno k výrobě zkušebních vzorků. Jako vhodný zkušební vzorek byla zvolena nejprve tenkostěnná deska o rozměrech $400/600/20 \text{ mm}$ vyztužená symetrickou čedičovou textilií jednostranně i oboustranně z betonu C 40/50 a z vysokohodnotného betonu (HPC). Vzájemná vzdálenost vláken byla změřena na 5 mm a průměr vláken na 1 mm. Čerstvý beton pro výrobu desek byl nejprve umístěn do speciálních vodorovných dřevěných forem. V další fázi bylo přistoupeno k betonování vzorků ve svislé poloze. Speciální dřevotřískové formy nebylo třeba dále povrchově upravovat díky potažení desek laminátovou vrstvou.

Dalším krokem experimentů byla aplikace symetrické tkaniny z epoxidem spřažených uhlíkových vláken se vzájemnou vzdáleností vláken 25 mm a o průřezové ploše $142 \text{ mm}^2/\text{m}'$ v obou na sebe kolmých směrech. Z důvodu volby většího rozponu pro další výpočty byly tentokrát vyrobeny speciální dřevotřískové formy o vnitřních rozměrech $425/700/25 \text{ mm}$, které nebylo třeba dále upravovat díky laminátové vrstvě. Vzhledem k pozitivním výstupům z předchozích destruktivních zkoušek bylo opět přistoupeno k betonování vzorků ve svislé poloze. Desky byly vyztuženy uhlíkovou textilií jednostranně i oboustranně.

- **Horizontální bednění, plošná čedičová textilie, C40/50 a HPC**

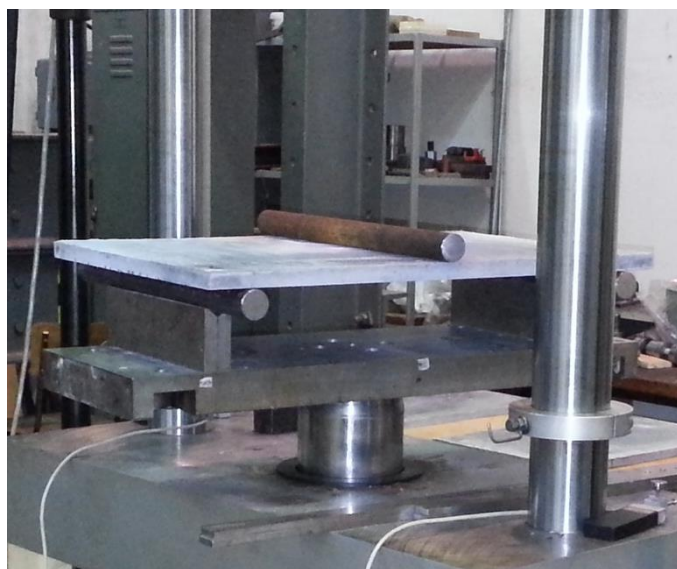
Pro desky bylo vyrobeno dřevotřískové bednění s laminátovým povrchem o vnitřních rozměrech 400/600/18 mm. U jednostranně vyztužených desek byla textilie vložena cca 4 mm od spodního povrchu bednění do čerstvého betonu. Při vkládání zbytku čerstvého betonu došlo k posunu textilie nahoru. Příčinou bylo nedostatečné zajištění polohy textilie v kombinaci s její malou hmotností. U desek oboustranně vyztužených byla nejprve na spodní povrch bednění vložena textilie. Následně byl na textilií přidáván čerstvý beton, který byl 2 x krátce zavibrován. Vibrací se docílilo posunutí textilie výše od spodního povrchu. Poté byla vložena druhá textilie a na ní byla přidána zbylá část čerstvého betonu. Z důvodu zabránění nežádoucího posunu textilie nebyly desky dále vibrovány. (74)



Obr. 54 Schéma umístění čedičové textilie v deskách jednostranně a oboustranně vyztužených



Obr. 55 Bednění desky s čerstvým betonem a vloženou čedičovou textilií (66)



Obr. 56 Rozestavení zkoušky ohybem pro textilií jednostranně vyztužené desky (66)

Přestože došlo při betonování ve vodorovné poloze k posunu textilie mimo určenou polohu 4 mm pod povrchem, byly výsledky zkoušek pozitivní. Zjištěné hodnoty předčily očekávání získaná předběžnými výpočty. U jednostranně vyztužených desek z HPC byl prokázán výrazný přínos textilie, při zkoušce v tahu za ohybu bylo dosaženo maximální síly 2,35 kN, což odpovídá asi 35% nárůstu pevnosti oproti nevyztuženým deskám.

- **Vertikální bednění, plošná čedičová textilie, HPC**

V další fázi bylo z důvodu zabránění posunu textilie přistoupeno k betonování vzorků ve svislé poloze. Speciální dřevotřískové formy o vnitřních rozměrech 400/600/20 mm byly

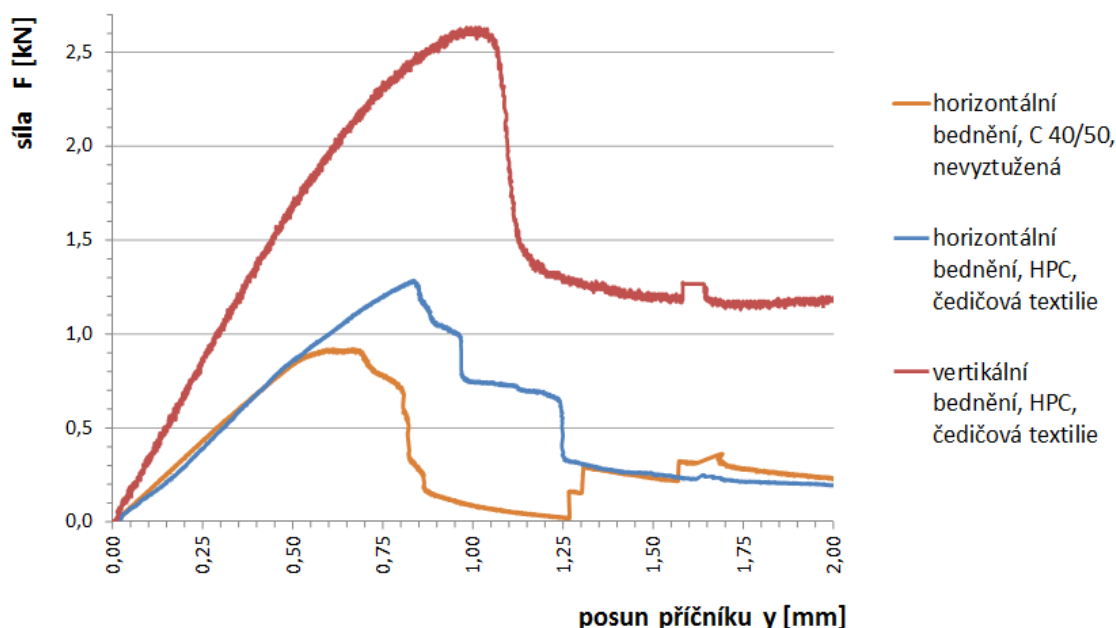
vyrobeny tak, aby mohla být textilie fixována v požadované poloze pod povrchem desky. Textilie byla ve formě těsně před betonáží vypnuta. Díky laminátovému povrchu nebylo třeba formy opatřovat další povrchovou vodoodpudivou úpravou. Místo hutnění vibrováním byl aplikován pouze poklep gumovým kladivem na boky formy.



Obr. 57 Vertikální bednění s vypnutou čedičovou textilií (66)



Obr. 58 Pohled na desku s čedičovou textilií po odbednění (66)



Obr. 59 Porovnání průměrných výsledků zkoušek desek s čedičovou textilií v tahu za ohybu

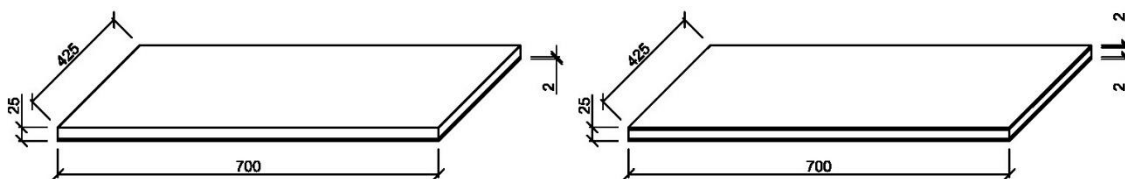
Při zkouškách vzorků betonovaných svisle vykazaly vzorky vyšší únosnosti. Při zkoušce jednostranně vyztužených desek v tahu za ohybu došlo k navýšení pevnosti v tahu, maximální síla dosáhla hodnoty 2,63 kN, což odpovídá přibližně 51% nárůstu pevnosti oproti nevyztuženým deskám. Tento způsob betonáže se ukázal jako efektivní.

- **Vertikální bednění, plošná uhlíková textilie, HPC**

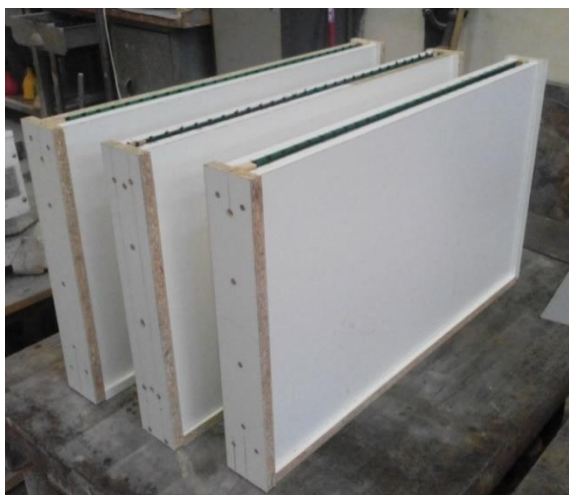
Vzhledem k pozitivním výstupům z předchozích destruktivních zkoušek opět přistoupeno k betonování vzorků ve svislé poloze. V tomto případě byla zvolena textilní výztuž z epoxidem spřažených uhlíkových vláken. Speciální dřevotřískové formy o vnitřních rozměrech tentokrát 425/700/25 mm byly vyrobeny tak, aby mohla být textilie fixována

v požadované poloze pod povrchem desky. Upevnění v požadované pozici však bylo vzhledem k odlišné tuhosti uhlíkové textilie docíleno za použití v kraji umístěných plastových lišt a v ploše desky distančních plastových prvků, které zajišťovaly krytí minimálně 2 mm.

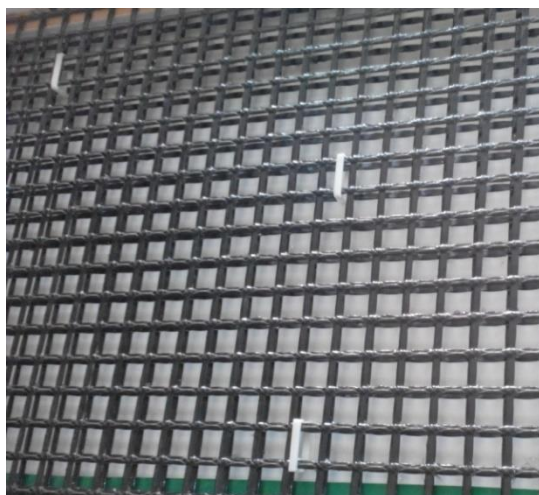
Při betonáži došlo v některých místech vlivem působení zatížení betonovou směsí na stěny formy k vyboulení stěny formy. Z tohoto důvodu nebylo u všech vzorků docíleno konstantní tloušťky. Betonáž všech desek probíhala postupně z jedné dávky připravené směsi. Vzhledem k časově náročnému plnění forem došlo v případě jedné desky taktéž k tuhnutí betonové směsi a její hrana pak musela být z důvodu špatného probetonování formy zaříznuta.



Obr. 60 Schéma umístění uhlíkové textilie v deskách jednostranně a oboustranně vyztužených

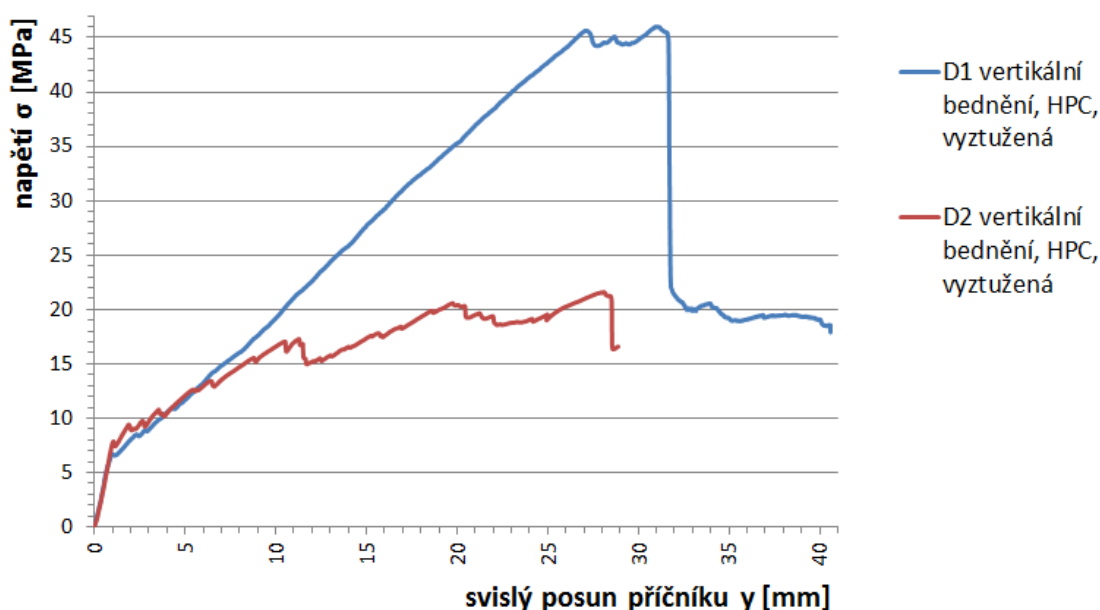


Obr. 61 Bednění s uhlíkovou textilií (66)



Obr. 62 Detail distančních prvků (66)

Při zkoušce v tahu za ohybu jednostranně vyztužených desek byla naměřena u první desky maximální hodnota síly 10,03 kN, což odpovídá napětí 30,30 MPa, u druhé pak 9,466 kN, což odpovídá napětí 21,575 MPa. Nižší hodnota u druhé desky byla pravděpodobně způsobena horší probetonovaností vzorku. Průměrná maximální dosažená síla u těchto dvou vzorků odpovídá 9,75 kN a průměrné napětí 25,94 MPa. Při maximálním napětí došlo k odtržení textilie od betonového průřezu.



Obr. 63 Srovnání výsledků zkoušek v tahu za ohybu

4.1.1. Vertikální bednění, plošná uhlíková textilie, lehký beton s pórovitým kamenivem

Z důvodu vylehčení výsledných produktů byla použita receptura pro lehký beton s pórovitým kamenivem Liapor. Vodní součinitel byl upravován dodatečně na místě dle potřeby. V rámci experimentálního ověření byly zhotoveny dvě sady desek jednostranně vyztužených plošnou uhlíkovou textilií a jedna desky nevyztužená.

Výroba zkušebních těles

Pro srovnání se vzorky z HPC z předchozího experimentu byl použit shodný typ vertikálního bednění a shodná uhlíková výztuž z epoxidem spřažených vláken o vzájemné vzdálenosti 25 mm a průřezové ploše 142 mm²/m. Taktéž vnitřní rozměry bednění první sady desek byly totožné 425/700/25 mm jako v předchozím experimentu, vnitřní rozměry bednění pro druhou sadu se však již lišily tloušťkou - 425/700/20 mm. Důvodem snižování tloušťky zkušebních vzorků desek je snaha prokázat aplikovatelnost tohoto typu výztuže v kombinaci s lehkým betonem s pórovitým kamenivem zvoleným způsobem i do velmi tenkých konstrukcí. Pro srovnání byla současně s první sadou vzorků vyrobena také jedna nevyztužená deska o tloušťce 25 mm. Pro zjištění materiálových charakteristik bylo vyrobeno několik doprovodných vzorků.

Speciální svislé dřevotřískové formy s povrchovou úpravou laminací (viz obrázek 65) byly tentokrát lépe vyztužené proti vyboulení stěn. Vylepšením byla taktéž na míru vyrobená kovová nálevka (viz obrázek 64). Postup při fixaci textilie byl shodný jako v předchozím případě s plošnou uhlíkovou textilií vyztužených desek z HSC – sítě byly zajištěny po obvodu forem a v ploše byla jejich poloha fixována plastovými distančními prvky. Krycí vrstva 2 mm byla zajištěna pomocí plastových distančních prvků zhotovených na 3D tiskárně a rozmístěných rovnoměrně po ploše mezi stěnou bednění

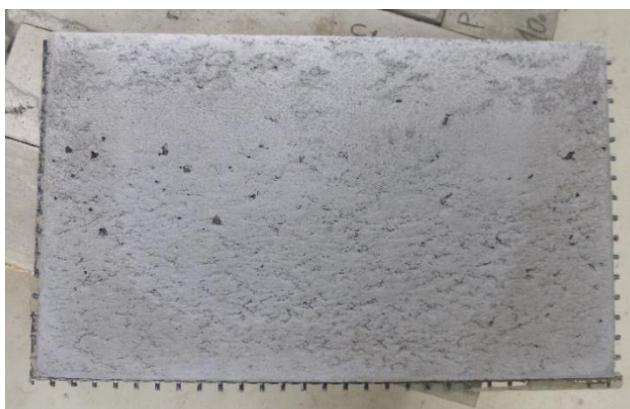
a výztuží. Pro zajištění správné polohy textilie dále sloužily po okrajích formy rozmístěné plastové lišty. Detail zajištění sítě proti posunu je vidět na obrázku 62.



Obr. 64 Vertikální bednění s nálevkou (66)

Obr. 65 Boční pohled na vertikální bednění pro desku s nálevkou a fixovanou uhlíkovou textilií (66)

Při betonáži bylo přistoupeno ke krátkému hutnění vibrací. Nejdříve po dvou dnech byly vzorky odbedněny a vloženy do vodní lázně, kde dozrávaly minimálně dalších 26 dní.



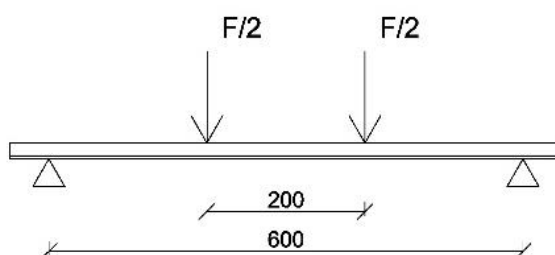
Obr. 66 Deska s plošnou uhlíkovou textilií po odbednění (66)



Obr. 67 Trámce po odbednění (66)

Destruktivní zkoušky

Vzorky desek a trámů byly zkoušeny v tahu za ohybu, z důvodu možné heterogenity byla zvolena zkouška čtyřbodovým ohybem. Zatížení bylo symetricky přenášeno pomocí kovové desky na obě strany od středu rozpětí zkušební vzorku, kde působilo liniově. V případě desek byly podpory umístěny ve vzdálenosti 600 mm a zatížení bylo symetricky přenášeno do vzdálenosti 100 mm na obě strany od středu rozpětí desky (viz obrázek 68).



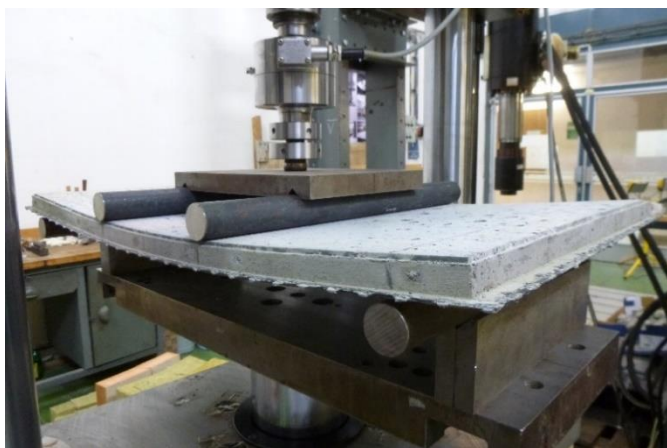
Obr. 68 Schéma zatěžování desek při zkoušce v tahu za ohybu - čtyřbodový ohyb

U vzorků byla měřena působící síla a průhyb, u trámů byl průhyb měřen ve středu rozponu, u desek však bylo možné přístrojem změřit pouze svislý posun v místě zatěžování, nejedná se tedy o reálný průhyb vprostřed rozponu.

Průběh zkoušek byl řízen deformací vzorků. Rychlost nárůstu deformace byla stanovena standardně v hodnotě 0,2 mm/min, což bylo aplikováno u trámů a pro první jednostranně vyztuženou desku stanovena opět 0,2 mm/min. U dalších desek byla rychlost nárůstu deformace upravena z důvodu velmi vysoké únosnosti vzorků na 0,5 mm/min. Zkoušky byly ukončeny při vyčerpání únosnosti.

První sada s deskami tl. 25 mm obsahovala tato zkušební tělesa:

- 1 x deska nevyztužená o rozměrech 425/700/25 mm
- 2 x deska jednostranně vyztužená o rozměrech 425/700/25 mm
- 3 x trámce o rozměrech 100/100/400 mm



Obr. 69 Vyztužená deska při zkoušce v tahu za ohybu (66)



Obr. 70 Průběh trhlin v deskách (66)

Trámce

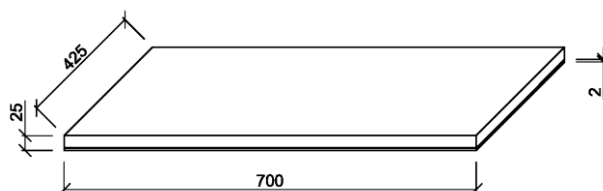
Nejprve bylo přistoupeno ke zkouškám v tahu za ohybu na nevyztužených trámčích z lehkého betonu. K ukončení zkoušky došlo po vzniku trhlin při průměrném průhybu 0,39 mm a při průměrné maximální síle 8,55 kN, což odpovídá průměrnému napětí 2,56 MPa.

Tabulka 5 Výsledky zkoušek trámů v tahu za ohybu

zkušební vzorky	rozměry tělesa			hmotnost [kg]	objemová hmotnost [kg/m ³]	tah za ohybu	
	šířka [mm]	výška [mm]	délka [mm]			síla [kN]	pevnost [MPa]
T1a	99,37	100,58	401,48	5,850	1457,96	7,0175	2,09
T1b	99,18	100,25	399,74	5,775	1453,00	7,9071	2,38
T1c	99,38	100,44	401,20	6,750	1685,53	10,7208	3,21
průměrné hodnoty							
T1	99,31	100,42	400,81	6,125	1532,16	8,5485	2,56

Desky

Dvě jednostranně vyztužené a jedna nevyztužená deska v tloušťce 25 mm byly zkoušeny čtyřbodovým ohybem.



Obr. 71 Umístění plošné uhlíkové textilie v desce tl. 25 mm

Ke vzniku prvních běžným pohledem patrných trhlin došlo u obou vyztužených desek kolem zatížení o velikosti 5 kN, což odpovídá napětí 11,29 MPa. K ukončení zkoušky došlo po náhlém porušení soudržnosti betonu a výztuže odtrženým textilem v místě trhliny. Oproti předpokladům tedy nedošlo k okamžitě viditelnému drcení betonu v horním průřezu prvku. Textilie zůstala neporušena. U desky nevyztužené došlo k náhlému kolapsu poměrně záhy za začátku zatěžování. Deska se rozlomila na několik kusů.

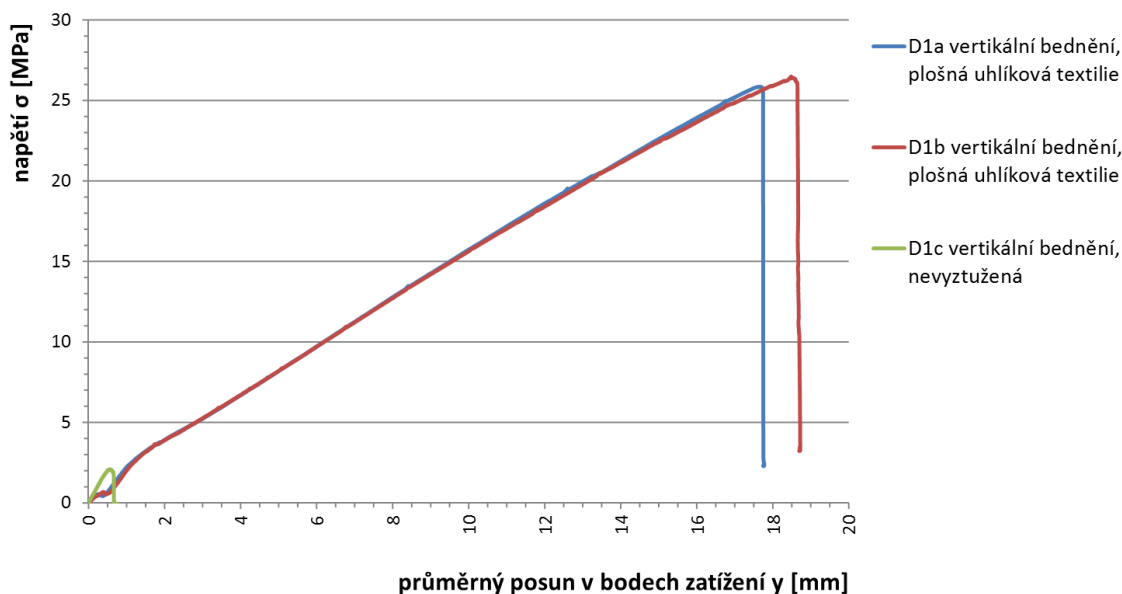
Z výsledků zkoušek jasně vyplývá značný přínos textilie. Maximální naměřená síla u nevyztužené desky dosáhla hodnoty 1,11 kN, což odpovídá maximální hodnotě napětí 2,09 MPa. U vyztužené desky bylo dosaženo průměrně maximální síly 13,615 kN, což odpovídá napětí 26,175 MPa. Vyztužením došlo k více než 12,5násobnému nárůstu únosnosti. Výsledky zkoušek ohybem jsou uvedeny v tabulkách 6 a 7.

Tabulka 6 Výsledky zkoušek vyztužených desek tl. 25 mm v tahu za ohybu

zkušební vzorky	rozměry tělesa			hmotnost [kg]	objemová hmotnost [kg/m ³]	tah za ohybu	
	šířka [mm]	výška [mm]	délka [mm]			síla [kN]	pevnost [MPa]
D1a	429	26,84	709	12,035	1474,21	13,31	25,86
D1b	430	27,08	708	12,115	1468,47	13,92	26,49
průměrné hodnoty							
D1a,b	429,5	26,96	708,5	12,075	1471,34	13,615	26,175

Tabulka 7 Výsledky zkoušky nevyztužené desky tl. 25 mm v tahu za ohybu

zkušební vzorky	rozměry tělesa			hmotnost [kg]	objemová hmotnost [kg/m ³]	tah za ohybu	
	šířka [mm]	výška [mm]	délka [mm]			síla [kN]	pevnost [MPa]
D1c	428	27,28	706	11,775	1604,96	1,11	2,09



Obr. 72 Srovnání průběhu zkoušek desek tl. 25 mm v tahu za ohybu

Druhá sada s deskami tl. 20 mm obsahovala tato zkušební tělesa:

- 2 x deska jednostranně vyztužená o rozměrech 425/700/20 mm
- 3 x trámce o rozměrech 100/100/400 mm

Trámce

Nejprve bylo přistoupeno ke zkouškám v tahu za ohybu, opět čtyřbodovým ohybem, na nevyztužených trámcích z lehkého betonu. Zkouška byla ukončena po vzniku trhliny při průměrném průhybu 0,045 mm při průměrné maximální síle 9,46 kN, což odpovídá napětí 2,88 MPa. Výsledky ohybových zkoušek jsou uvedeny v tabulce 8.

Tabulka 8 Výsledky zkoušek trámců v tahu za ohybu

zkušební vzorky	rozměry tělesa			hmotnost [kg]	objemová hmotnost [kg/m ³]	tah za ohybu	
	šířka [mm]	výška [mm]	délka [mm]			síla [kN]	pevnost [MPa]
T2a	98,38	99,97	400,82	6,069	1539,54	9,55	2,91
T2b	98,56	99,98	399,98	6,008	1524,33	10,35	3,15
T2c	99,32	99,9	401,02	5,998	1507,43	8,47	2,56
průměrné hodnoty							
T2	98,75	99,95	400,61	6,025	1523,77	9,46	2,88

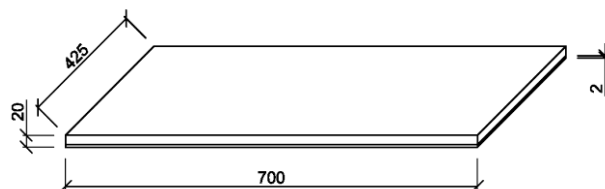
Zlomky trámů byly dále zkoušeny v tlaku. Ze tří trámů bylo tedy takto zkoušeno 6 vzorků. Průměrná výsledná pevnost dosáhla 20,6 MPa. Hodnoty získané tímto postupem jsou uvedené níže v tabulce 9.

Tabulka 9 Výsledky zkoušek v tlaku na zlomcích trámů

zkušební vzorky	síla	pevnost	průměrná pevnost trámce	průměrná pevnost trámce
	[kN]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
T2a-1	225,97	22,6	22,50	20,6
T2a-2	224,13	22,4		
T2b-1	205,90	20,6	19,75	
T2b-2	188,80	18,9		
T2c-1	195,67	19,6	19,60	
T2c-2	195,85	19,6		

Desky

Druhá sada o dvou jednostranně vyztužených deskách tl. 20 mm byla zkoušena taktéž čtyřbodovým ohybem.

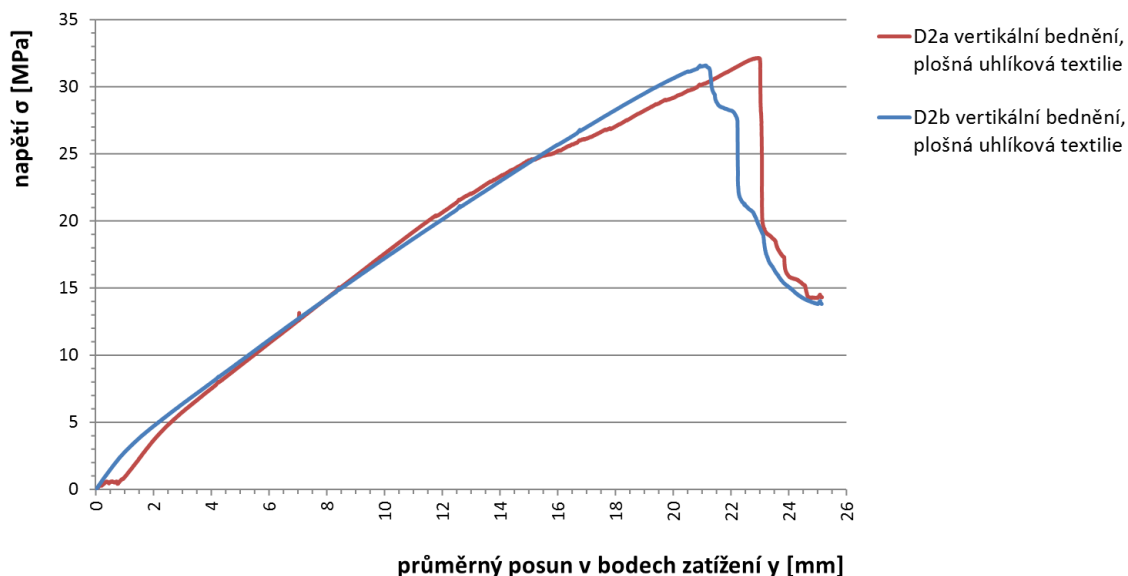


Obr. 73 Umístění plošné uhlíkové textilie v desce tl. 20 mm

Ke vzniku prvních trhlin při zkoušce v tahu za ohybu došlo opět kolem zatížení o velikosti 5 kN, což ovšem v případě této sady desek z důvodu jejich menší tloušťky odpovídá napětí 17,65 MPa. Únosnost prvku byla vyčerpána porušením soudržnosti betonu a výztuže odtrženým textilem v místě trhliny. Textilie zůstala neporušena. Výsledky zkoušek jsou obsaženy v tabulce 10.

Tabulka 10 Výsledky zkoušek vyztužených desek tl. 20 mm v tahu za ohybu

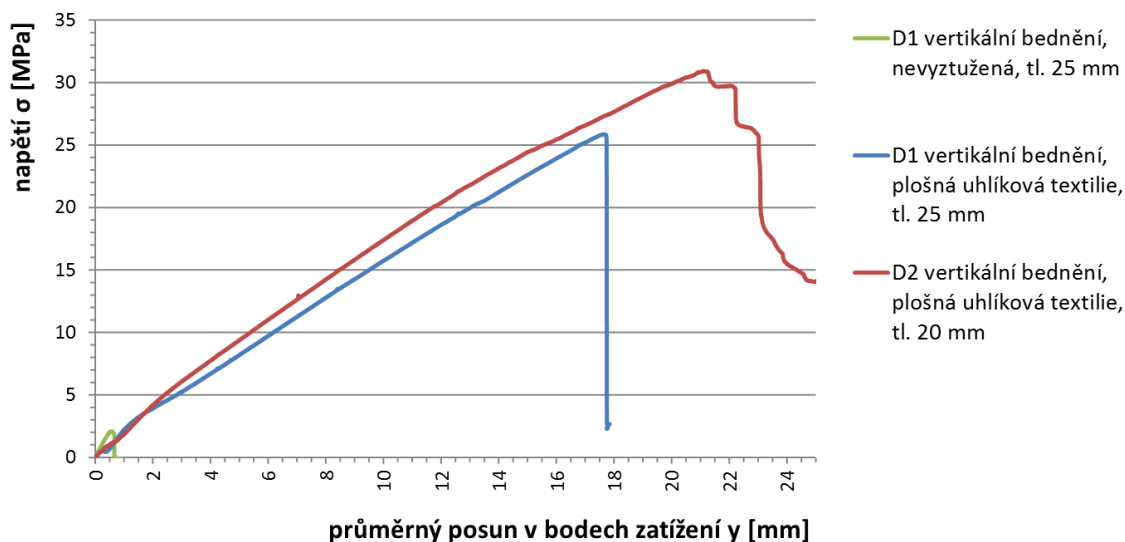
zkušební vzorky	rozměry tělesa			hmotnost [kg]	objemová hmotnost [kg/m ³]	tah za ohybu	
	šířka [mm]	výška [mm]	délka [mm]			síla [kN]	pevnost [MPa]
D2a	422,5	21,88	706	10,28	1575,12	10,84	32,16
D2b	425,0	22,37	709	10,13	1502,82	11,20	31,59
průměrné hodnoty							
D2a,b	423,75	22,125	707,5	10,205	1538,97	11,02	31,87



Obr. 74 Srovnání průběhu zkoušek desek tl. 20 mm v tahu za ohybu

Zjištění

Doprovodné vzorky k deskám o tl. 20 mm vykázaly průměrně o 12,27 % vyšší pevnost v tahu za ohybu než u desek tl. 25 mm, samotné vyztužené desky o tl. 20 mm dosáhly o 22,84 % vyšší pevnosti v tahu za ohybu ve srovnání s vyztuženou deskou o tl. 25 mm a 15,4násobně vyšší pevnosti oproti nevyztužené desce o tl. 25 mm (viz obrázek 75). Nejvyšší hodnoty napětí bylo dosaženo u vyztužených desek 425/700/20 mm - 32,15 MPa.



Obr. 75 Porovnání průměrných průběhů zkoušek v tahu za ohybu pro desky vyztužené uhlíkovou textilií a nevyztužené

Ačkoli se tento způsob výroby deskových prvků v oproti předchozím experimentům vylepšeném vertikálním bednění osvědčil při realizaci a prvky vykazaly poměrně vysokou únosnost a nízkou hmotnost, místy se po odbednění dala pozorovat nedokonalé probetonovaná místa. Nevýhodou tohoto typu bednění je nezbytnost použití čerstvého betonu s poměrně tekutou konzistencí a dále velká časová náročnost plnění bednění.

4.1.2. Vertikální i horizontální bednění, skelná prostorová textilie, lehký beton s pórovitým kamenivem

S ohledem na zkušenosti při zhotovení předchozích vzorků desek byly zvažovány další možné formy bednění, včetně již dříve vyzkoušeného bednění horizontálního, které se ovšem neosvědčilo zejména vzhledem k problematičnosti zajištění výztuže proti nežádoucímu posunu a zvýšenému riziku segregace jednotlivých složek čerstvého betonu. Poznatků z experimentálního výzkumu bylo použito při výrobě desek s prostorovou skelnou textilií, jejichž první sada byla vyrobena v rámci bakalářské práce (59). Výsledky pozorování získané v této etapě a jejich interpretace poukázaly na zajímavé jevy a posloužily k nasměrování další fáze výzkumu. Tato kapitola přibližuje podstatná zjištění z první sady vzorků vyztužených prostorovou skelnou textilií.

Výroba zkušebních těles

Oproti předchozím deskám s plošnou uhlíkovou výztuží bylo z důvodu ověření chování lehkého betonu při jiném způsobu betonáže přistoupeno v tomto případě i k betonáži do vodorovného bednění. Jako výztuž desek byla použita prostorová síť ze skelných vláken. Přestože se jednalo o dva typy sítí s rozdílnou hustotou ok, kdy osová vzdálenost svazků vláken odpovídala 12,5 mm a 22,5 mm, vzdálenost 12 mm mezi dvěma plochami sítí s oky byla v prostorové struktuře výztuže v obou případech shodná (podrobnosti viz kapitola 4.1. – Lehký beton s pórovitým kamenivem vyztužený textilií - Typy použité textilní výztuže).

Skelné sítě byly vloženy do forem a jejich poloha byla fixována distančními prvky. S přihlédnutím na požadavek hladké a pohledově atraktivní lícové strany bez narušení na první pohled patrnými distančními prvky posloužila pro zajištění min. krycí vrstvy 2 mm, namísto dříve použitých plastových distančních prvků z 3D tiskárny, běžná kovová kancelářská sponka. Ta byla dle potřeby zohýbána a osazena v bednění zapřením o svazky vláken se směru ukládání čerstvého betonu tak, aby netvořila mechanickou zábranu. Čerstvý beton pro výrobu desek byl umístěn do dřevotřískových forem s povrchovou úpravou laminací (viz obrázky 76 a 77).



Obr. 76 Vertikální bednění s nálevkou (59)



Obr. 77 Horizontální bednění s vloženou prostorovou skelnou textilií (59)

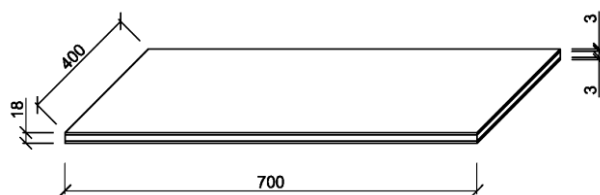
V této etapě byla zhotovena sada čtyř desek o rozměrech 400/700 mm a tloušťce 18 mm (viz obrázek 80) a několik doprovodných nevyztužených vzorků. Pro tři desky bylo použito vertikální bednění, které bylo plněno pomocí již při předchozích experimentech osvědčené trychtýřovité nálevky. Betonáž poslední desky proběhla v horizontálním bednění bez vibrování z důvodu eliminace vyplouvání lehkého kameniva k hornímu povrchu. Ten byl nakonec manuálně uhlazen pomocí prkna s povrchovou úpravou laminací. Ostatní vzorky byly krátce vibrovány. Dvě desky betonované vertikálně byly použity pro sestavení nábytku (viz obrázek 78). Vyrobený kávový stůlek váží díky použití lehkého betonu pouze 14 kg. (59)



Obr. 78 Kávový stůlek (59)



Obr. 79 Způsob uložení výztuže ve vertikálním bednění pro desku (59)



Obr. 80 Umístění skelné textilie v desce tl. 18 mm

Destruktivní zkoušky

Sada s deskami tl. 18 mm obsahovala tato zkušební tělesa:

- 2 x deska jednostranně vyztužená o rozměrech 400/700/18 mm
- 1 x trámec o rozměrech 100/100/400 mm
- 5 x trámců o rozměrech 40/40/160 mm
- 3 x krychle o rozměrech 100/100/100 mm

Trámce

Nevyztužené trámce byly podrobeny zkoušce v tahu za ohybu tříbodovým ohybem.

Tabulka 11 Výsledky zkoušek trámců o rozměrech 40/40/160 mm v tahu za ohybu

zkušební vzorky	rozměry tělesa			hmotnost [g]	objemová hmotnost [kg/m ³]	tah za ohybu	
	šířka [mm]	výška [mm]	délka [mm]			síla [kN]	pevnost [MPa]
T3b	39,6	40,3	160,0	408,0	1598	2,35	5,48
T3c	39,7	40,6	160,0	393,0	1524	1,78	4,09
T3d	40,6	40,2	160,0	417,0	1597	2,29	5,24
T3e	39,8	40,3	160,0	410,0	1598	1,94	4,50
T3f	40,3	40,4	160,0	405,0	1555	2,01	4,59
průměrné hodnoty							
T3b-f	40,0	40,36	160,0	406,6	1574,4	2,07	4,78

Tabulka 12 Výsledky zkoušky trámce o rozměrech 100/100/400 mm v tahu za ohybu

zkušební vzorky	rozměry tělesa			hmotnost [kg]	objemová hmotnost [kg/m ³]	tah za ohybu	
	šířka [mm]	výška [mm]	délka [mm]			síla [kN]	pevnost [MPa]
T3a	96,9	102,0	400,0	6,14	1553,05	9,55	1,46

Krychle

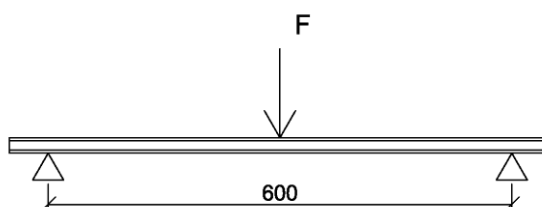
Výsledky zkoušky v tlaku na třech vzorcích krychlí jsou zapsány v tabulce 13.

Tabulka 13 Výsledky zkoušek na krychlích o rozměrech 100/100/100 mm v tlaku

zkušební vzorky	rozměry tělesa			hmotnost m [g]	objemová hmotnost [kg/m ³]	tlak	
	šířka [mm]	Výška [mm]	délka [mm]			síla [kN]	pevnost [MPa]
K3a	96,5	100,6	100,3	1569,0	1611,4	326,39	33,72
K3b	95,3	100,0	99,9	1568,0	1647,0	318,32	33,44
K3c	95,0	100,8	100,6	1567,0	1626,6	276,09	28,89
průměrné hodnoty							
K3a-c	95,6	100,5	100,3	1568,0	1628,3	306,93	32,02

Desky

Dvě desky, jedna betonovaná horizontálně (oka sítě 12,5 mm) a druhá vertikálně (oka sítě 22,5 mm), byly podrobeny destruktivním zkouškám třibodovým ohybem v důvodu snazšího měření reálného průhybu uprostřed prvku (rozestavení zkoušky viz obrázek 81). Průběh zkoušek byl řízen deformací vzorků. U desky z vertikálního bednění byla rychlost nárůstu deformace stanovena v hodnotě 0,2 mm/min, u desky z horizontálního bednění byla tato hodnota upravena z důvodu časové náročnosti zkoušky na 0,5 mm/min.



Obr. 81 Schéma zatěžování desek při zkoušce v tahu za ohybu - třibodový ohyb



Obr. 82 Pohled na uspořádání zkoušky třibodovým ohybem (66)



Obr. 83 Pohled na namáhaný povrch v okamžiku ukončení zkoušky (66)

Z důvodu časové náročnosti zkoušek bylo přistoupeno k ukončení zkoušky pro desky před konečnou destrukcí prvku. Díky tomu bylo možné sledovat chování desek při odtížení. Napnutá vlákna vrátila odtíženou horizontálně betonovanou desku o 90 % průhybu nazpět do její původní polohy, což je vidět na obrázcích 84 a 85. Výsledky zkoušek jsou obsaženy v tabulce 14.



Obr. 84 Pohled na desku s téměř uzavřenými trhlinami po ukončení zkoušky ohybem (66)

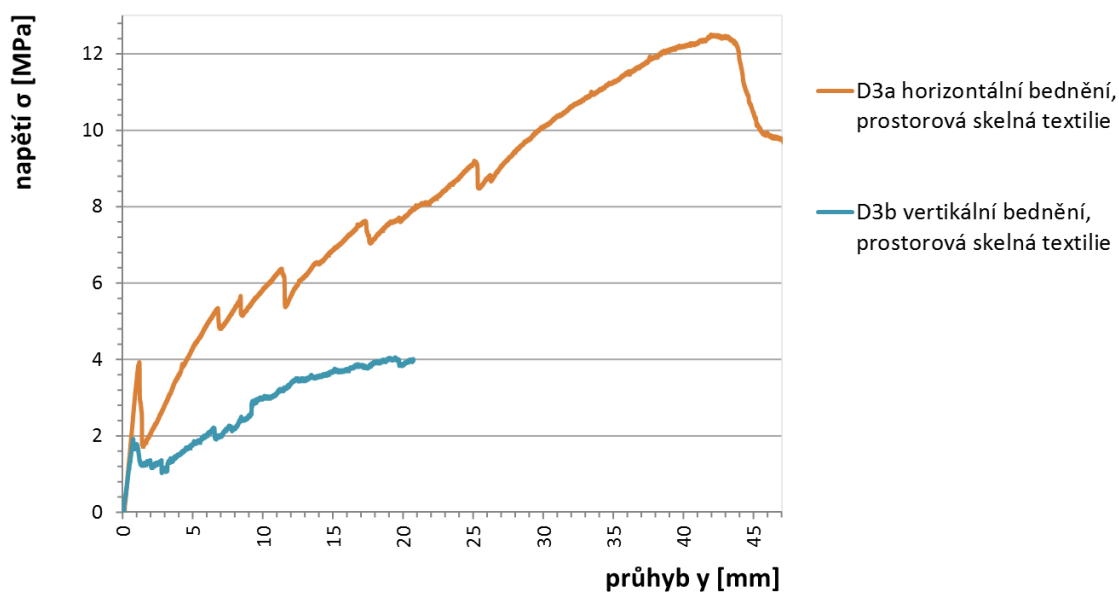
Obr. 85 Pohled na desku s redukovanou trvalou deformací po odtížení (66)

Tabulka 14 Výsledky zkoušek desek v tahu za ohybu

zkušební vzorky	bednění	hmotnost m [kg]	objemová hmotnost ρ_v [kg/m ³]	síla F [kN]		pevnost v tahu za ohybu (bez trhlin) σ_{max} [MPa]	průhyb y [mm]		
				první makrotrhlina	maximální síla		první makrotrhlina	maximální síla	po odtížení
D3a	vertikální	8,02	1591,27	0,23	0,58	4,03	1,12	18,62	2,60
D3b	horizontální	6,91	1371,03	0,56	1,80	12,50	1,19	41,97	4,30

Zjištění

Vodorovně betonovaná deska prokázala výrazně vyšší pevnost při zkoušce v tahu za ohybu než deska betonovaná svisle. To může být dáno jak vyšší hustotou ok sítě, tak nerovnoměrným rozmístěním jednotlivých složek v betonu, kdy část prvku namáhaná ohybem byla tvořena převážně cementovou matricí, jejíž samotná únosnost je u použité receptury sama o sobě vysoká, o čemž vypovídá i působící síla ve chvíli vzniku první trhliny. Výsledky průběhu zkoušky v tahu za ohybu pro desky lze vidět na obrázku 86.



Obr. 86 Porovnání průběhu zkoušky v tahu za ohybu pro desky horizontálně a vertikálně betonované vyztužené prostorovou skelnou textilií – závislost napětí na průhybu

Z povrchu desek betonovaných vertikálně šlo po odbednění snadno poznat, že byl beton ukládán ve vrstvách (viz obrázky 87 a 88). To bylo způsobeno prodlevami při plnění bednění úzkým profilem nástavce.



Obr. 87 Deska z vertikálního bednění s patrným rozvrstvením (59)



Obr. 88 Detail povrchu desky z vertikálního bednění s patrným rozvrstvením (59)

Horizontální metoda betonáže v kombinaci s použitou recepturou betonu zapříčinila vyplutí pórovitého kameniva k povrchu desky, a tedy nerovnoměrné rozmístění jednotlivých složek v betonu (viz obrázek 89). Tento defekt lze sledovat i u doprovodných vzorků (viz obrázek 90).



Obr. 89 Nerovnoměrné rozmístění složek betonu v desce z horizontálního bednění (59)



Obr. 90 Nerovnoměrné rozmístění složek betonu v trámci (59)

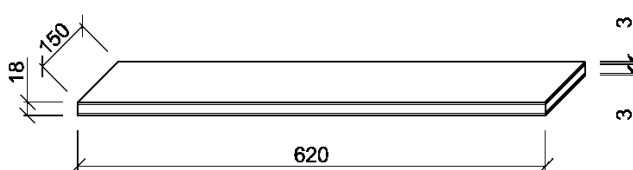
4.1.3. Horizontální bednění, skelná prostorová textilie, lehký beton s pórovitým kamenivem

Další etapa experimentálního výzkumu navázala na zjištění zejména z poslední betonáže a zkoušek. Konkrétně se zaměřila na chování desky po odtížení, kdy se deska navzdory průhybu způsobeného zatěžováním při zkoušce tahem za ohybu ve velké míře narovnála. Další problematikou je pozorovaná nehomogenita prvků. Tento jev byl zohledněn při přípravě této etapy a také vedl na další směřování výzkumu, které je detailněji rozvedeno v kapitole 4.2. Lehký beton s pórovitým kamenivem vyztužený rozptýlenými vlákny.

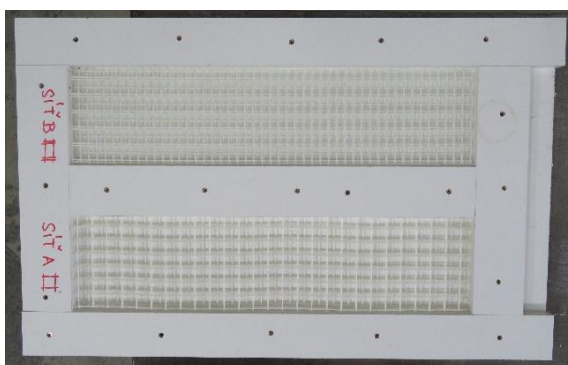
Na deskách z vertikálního bednění byly po odbednění patrné vrstvy vzniklé postupným ukládáním čerstvého betonu do bednění. Horizontální bednění umožňuje snazší a rychlejší ukládání betonu a vyžaduje méně tekutou konzistenci čerstvého betonu v porovnání s vertikálním bedněním. Z tohoto důvodu bylo přistoupeno k betonáži do horizontálního bednění s již dříve osvědčenou povrchovou úpravou laminací. Z důvodu usnadnění manipulace se zkušebními tělesy byla jako zkušební vzorek zvolena deska o šířce 150 mm, délce 620 mm a tloušťce 18 mm. Menší rozměr desek umožnil v kombinaci se zvoleným typem bednění vyrobit současně více desek. Pro porovnání chování vzorků s předchozí etapou bylo vyrobeny celkem dvě sady desek, každá po třech vyztužených deskách, a doprovodné nevyztužené zkušební vzorky. Desky byly vyztuženy stejnými prostorovými skelnými textiliemi použitými pro vyztužení desek v předchozí etapě. Síť s rozdílnou hustotou (podrobnosti viz kapitola 4.1. – Lehký beton s pórovitým kamenivem vyztužený textilií - Typy použité textilní vyztuže) byly v rámci experimentu označeny s ohledem na osově vzdálenosti svazku vláken jako síť A (á 22,5 mm) a síť B (á 12,5 mm).

Výroba zkušebních vzorků

Skelné sítě pro výrobu desek byly nejprve vloženy připravených forem s povrchovou úpravou laminací a jejich poloha byla od spodního povrchu fixována plastovými distančními prvky (obrázky 92 a 93). Pro zajištění krycí vrstvy 2 mm byly distanční prvky nasazeny po okrajích na spodní stranu textilie a vloženy současně s ní na dno bednění. Poté byl umístěn do bednění čerstvý beton. Vibrování čerstvého betonu v horizontálním bednění bylo maximálně zkráceno z důvodu eliminace separace složek při dodržení dostatečné doby potřebné ke zhuštění. Na závěr byl horní povrch desek uhlazen polaminovaným prknem. Výsledný vzhled vybetonovaných desek je vidět na obrázcích 94-97. Ostatní vzorky byly také krátce vibrovány.



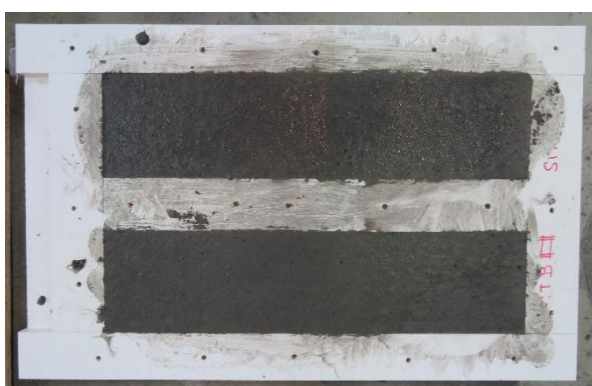
Obr. 91 Umístění prostorové skelné textilie v desce tl. 18 mm



Obr. 92 Umístění prostorových skelných textilií v horizontálním bednění (66)



Obr. 93 Detail distančního prvku (66)



Obr. 94 Pohled na čerstvě uložený beton do bednění desek (66)



Obr. 95 Pohled na vybetonované vzorky desek zakryté folií (66)



Obr. 96 Pohled na spodní strany odbedněných desek se sítí A (66)



Obr. 97 Pohled na spodní strany odbedněných desek se sítí B (66)

Destruktivní zkoušky

Sada s deskami tl.18 mm obsahovala tato zkušební tělesa:

- 3 x deska vyztužená sítí A o rozměrech 150/620/18 mm
- 3 x deska vyztužená sítí B o rozměrech 150/620/18 mm
- 6 x trámec o rozměrech 40/40/160 mm
- 3 x krychle o rozměrech 150/150/150 mm

Trámce

Nevyztužené trámce byly zkoušeny čtyřbodovým ohybem z důvodu zohlednění možné heterogenity prvků. Výsledky zkoušek pro jednotlivé vzorky trámců o rozměrech 40 x 40 x 160 mm jsou obsaženy v tabulce 15.

Tabulka 15 Výsledky zkoušek trámců o rozměrech 40/40/160 mm v tahu za ohybu

zkušební vzorky	rozměry tělesa			hmotnost [g]	objemová hmotnost [kg/m ³]	tah za ohybu	
	šířka [mm]	výška [mm]	délka [mm]			síla [kN]	pevnost [MPa]
T4a	40,1	40,1	160,6	422,9	1635,2	1,53	2,38
T4b	40,6	41,1	160,7	419,3	1563,9	1,79	2,61
T4c	40,8	40,2	160,4	414,2	1572,9	1,71	2,59
T4d	41,9	40,1	160,2	458,0	1700,6	2,05	3,05
T4e	42,6	40,1	160,2	421,3	1540,0	1,66	2,41
T4f	41,4	41,0	160,3	417,3	1540,0	1,77	2,54
průměrné hodnoty							
T4a-f	41,2	40,4	160,4	425,5	1592,1	1,8	2,6

Krychle

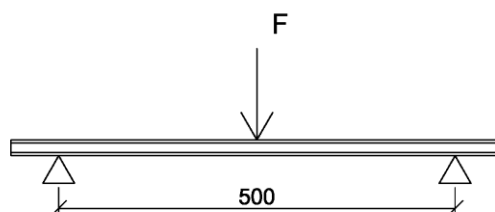
Krychle o rozměrech 150/150/150 mm byly zkoušeny v tlaku. Výsledky jsou zapsány v tabulce 16.

Tabulka 16 Výsledky zkoušek krychlí v tlaku

zkušební vzorky	rozměry tělesa			hmotnost [g]	objemová hmotnost [kg/m ³]	tlak	
	šířka [mm]	výška [mm]	délka [mm]			síla [kN]	pevnost [MPa]
K4a	147,3	149,4	149,5	5423,5	1649,3	652,36	29,65
K4b	147,2	149,4	149,6	5422,7	1648,9	690,0	31,4
K4c	149,7	149,4	149,5	5480,5	1639,5	724,8	32,4
průměrné hodnoty							
K4a-c	148,0	149,4	149,5	5442,2	1645,9	689,0	31,1

Desky

Pro zkoušení vyrobených desek bylo použito stroje pro zkoušky ohybem řízenou deformací. Rychlost nárůstu deformace byla stanovena v hodnotě 0,2 mm/min do průhybu 6 mm, z důvodu velmi vysoké únosnosti vzorků byla poté rychlost nárůstu deformace upravena na 0,5 mm/min. Vzhledem k charakteru výztuže byly vzorky desek zkoušeny tříbodovým uspořádáním, což i umožnil snadné měření průhybu uprostřed prvku. Vzdálenost podpor byla 500 mm. Schéma uspořádání zkoušky je vidět na obrázku 98.



Obr. 98 Schéma zatěžování desek při zkoušce v tahu za ohybu - tříbodový ohyb

Desky byly zkoušeny do vzniku první trhliny. Vzhledem k charakteru vyztužení a k průběhu viditelném na záznamu závislosti síly na průhybu v průběhu zkoušení bylo rozhodnuto ve zkoušce zatěžování desek pokračovat i po vzniku první trhliny. Desky byly zkoušeny do zvolených průhybů 14, 21 a 30 mm, což odpovídalo přibližně pětadvaceti, pětatřiceti a padesátinásobku průhybu při vzniku první trhliny. Z důvodu ověření chování desek po odtížení bylo přistoupeno k ukončení zkoušky pro desky před konečnou destrukcí prvku. Díky tomu bylo možné sledovat chování desek při odtížení.



Obr. 99 Deska při zkoušce ohybem (66)



Obr. 100 Detail porušení desky při zkoušce ohybem (66)

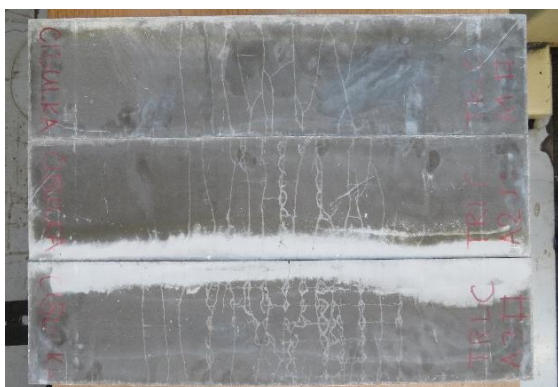
Zjištění

Po ukončení zkoušení desek tříbodovým ohybem a po vyjmutí z lisu bylo pozorováno uzavírání trhlin, a tak bylo přistoupeno k měření trvalého průhybu desek. Při vizuální kontrole vzorků bylo patrné, že dochází k uzavírání trhlin. Konkrétní hodnoty průhybů jsou zaznamenány v tabulce 17 s výsledky zkoušek.

Tabulka 17 Výsledky zkoušek desek 18/150/620 mm v tahu za ohybu

zkušební vzorky	síť	rozměry tělesa			hmotnost m [g]	objemová hmotnost ρ_v [kg/m ³]	první makrotrhlina			maximální hodnoty			deformace po odtížení	
		šířka [mm]	výška [mm]	délka [mm]			síla F_1 [kN]	pevnost σ_1 [MPa]	průhyb y_1 [mm]	síla F_{max} [kN]	pevnost σ_{max} [MPa]	průhyb y_{max} [mm]	průhyb y_{fin} [mm]	návrát [%]
D4a	A	150	19	621	2944	1632	0,27	3,57	0,43	0,57	7,6	14,2	4,5	68
D4b		151	18	620	2934	1701	0,22	3,22	0,55	0,61	8,9	20,7	9,0	56
D4c		150	19	620	3036	1707	0,26	3,54	0,63	0,96	13,1	30,4	13,0	57
D4d	B	150	19	620	2919	1641	0,24	3,28	0,54	0,77	10,5	15,2	5,6	57
D4e		150	19	621	2928	1625	0,27	3,56	0,70	1,25	16,7	21,3	4,4	63
D4f		150	19	619	2882	1659	0,22	3,19	0,50	1,26	18,1	30,4	12,5	80
průměrné hodnoty														
D4a-c	A	151	19	620	2971	1680	0,25	3,44	0,56	0,71	9,9	21,7	8,8	61
D4d-e	B	150	19	620	2910	1641	0,24	3,34	0,58	1,09	15,1	22,3	7,5	67

Napnutá vlákna vrátila odtíženou horizontálně betonovanou desku až o 80 % průhybu nazpět do její původní polohy. Z chování vzorků po odtížení a ze získaných dat lze usuzovat, že výztuž působí v desce jako v předem předjatém betonu. Z hodnot trvalých průhybů lze odvodit, že porušení způsobené vznikem trhlin může předpětí po odtížení v podstatě odstranit tak, že se deska vrátí do polohy před zatěžováním. Experiment prokázal, že při vzniku trhlin může předpětí z většiny odstranit průhyb a trhliny téměř kompletně uzavřít (viz obrázky 101 a 102).

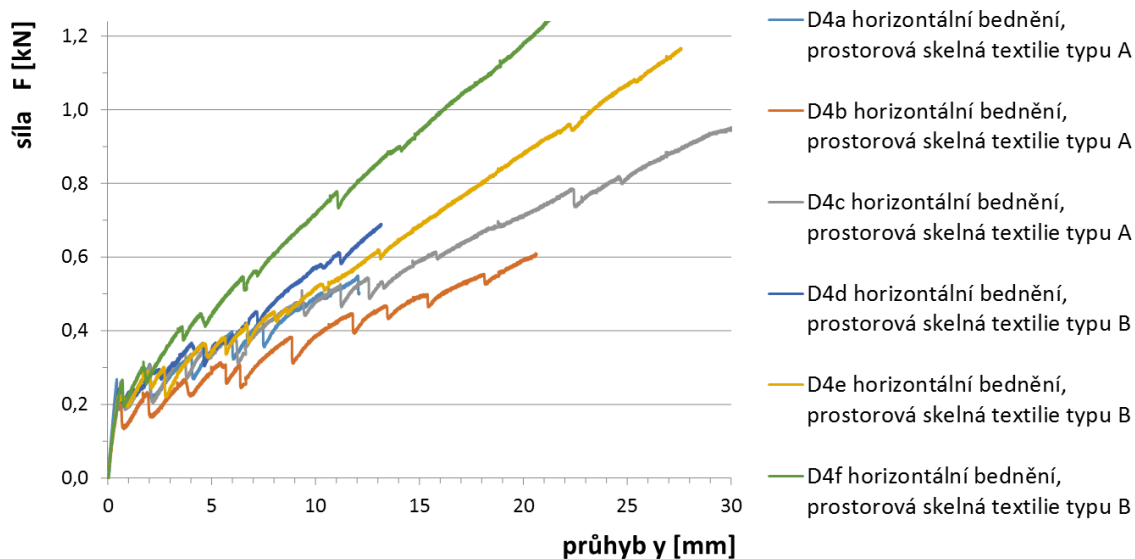


Obr. 101 Pohled na desky se sítí A s téměř uzavřenými trhlinami po zkouškách ohybem (66)

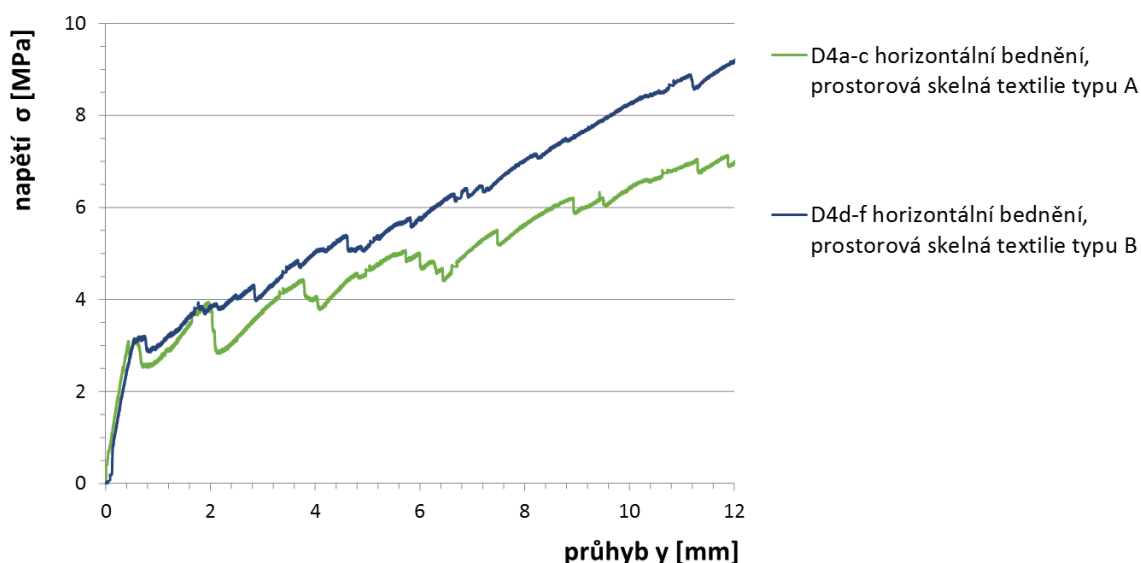


Obr. 102 Pohled na desky se sítí B s téměř uzavřenými trhlinami po zkouškách ohybem (66)

Desky vyztužené textilií s vyšší hustotou sítě dosahovaly dle očekávání vyšších pevností při zkoušce v tahu za ohybu. U obou sad desek se potvrdily vysoké únosnosti. Záznam průběhu zkoušky v tahu za ohybu pro desky lze vidět na obrázcích 103 a 104.



Obr. 103 Průběh zkoušky tahem za ohybu pro dvě sady desek vyztužených prostorovou skelnou textilií



Obr. 104 Porovnání průměrných hodnot při zkoušce tahem za ohybu do průhybu 12 mm pro dvě sady desek vyztužených prostorovou skelnou textilií

Vhodně zvolená receptura a postup betonáže i přes uložení do horizontálního bednění redukovaly separaci složek čerstvého betonu a bylo tedy dosaženo poměrně rovnoměrného rozmístění jednotlivých složek v betonu (viz obrázky 105 a 106). Zároveň bylo u desek docíleno hladkého, vizuálně i na dotek příjemného spodního povrchu bez známek rozvrstvení, ke kterému docházelo u betonáže do vertikálního bednění (viz obrázky 87 a 88).



Obr. 105 Vnitřní struktura na lomech trámů (66)



Obr. 106 Vnitřní struktura v řezu desky (66)

4.1.4. Shrnutí

V rámci několika etap experimentálního výzkumu zaměřeného na aplikaci textilní vyztuže do tenkých prvků z lehkého betonu s pórovitým kamenivem bylo vyrobeno a odzkoušeno několik sad vzorků. V praxi tak byly vyzkoušeny různé postupy betonáže do několika typů bednění s odlišnými způsoby fixace textilie a byly vyhodnoceny jejich

výhody a nedostatky, což vedlo k řešení, které přineslo uspokojivé výsledky z hlediska všech sledovaných parametrů.

Předně se jedná o snadnost výroby bednění pro desku a fixace textilní výztuže do ní vložené, což je žádoucí pro širší využití při výrobě obdobných prvků. Tento způsob betonáže zároveň neklade takové nároky na konzistenci čerstvého betonu při ukládání do bednění. Méně tekutá konzistence vyžadovaná pro horizontální bednění oproti vertikálnímu bednění v kombinaci s vhodnou recepturou a minimalizací doby hutnění vibrací omezuje segregaci jednotlivých složek čerstvého betonu (viz obrázky 105 a 106), k čemuž může docházet z důvodu tendence lehkého pórovitého kameniva vyplouvat k hornímu povrchu, v důsledku čehož se více cementového tmelu nachází u spodního povrchu prvku (viz obrázky 89 a 90).

Referenční vzorky v podobě desek s různými typy textilní výztuže vykázaly i přes nízkou objemovou hmotnost poměrně vysokou pevnost v tahu za ohybu (viz tabulky 6, 10, 14 a 17). Tímto způsobem vyrobené a vyztužené prvky prokázaly dostatečnou únosnost, čímž byla potvrzena jejich aplikovatelnost při návrhu nábytku či mobiliáře. Současně takto vyrobené prvky splňují požadavek na esteticky atraktivní subtilní vzezření prvku a nízkou objemovou hmotnost, což umožňuje jejich snazší manipulovatelnost.

Zásadním zjištěním je však efekt uzavírání trhlin po odtížení prvku z lehkého pórovitého kameniva vyztuženého prostorovou skelnou textilií (viz obrázky 84, 85, 101 a 102). Konkrétně bylo opakovaně pozorováno chování, kdy se desky po přetížení, vzniku trhlin a následujícím odtížením narovnávají zpětně do téměř původní, rovinné polohy a vzniklé trhliny se uzavírají (viz tabulky 14 a 17). Toto chování lze vysvětlit tak, že zatížením prvku je skrze průhyb vnášeno do podélných vláken předpětí, které způsobuje tendenci k redukci průhybu desky a k tedy uzavírání trhlin.

Výztužný profil, který je součástí prostorové ortogonální sítě, je vlivem působení momentu v rovině desky protažen nejen v místě trhliny, ale v celé délce mezi ostatními kolmými profily sítě, což je možné vzhledem k nižší hodnotě soudržnosti svazku vláken s cementovým kompozitem. Použitá prostorová skelná textilie obsahuje svazky vláken orientovaných ve dvou na sebe kolmých směrech a navzájem v křížení pevně spojených, čímž vytváří body ukotvení pro napínanou výztuž (viz obrázek 53). Tyto tuhé spoje nebrání protažení nosných prutů namáhaných ohybem a po odlehčení nedovolí prokluz předeprnutých prutů, který by jinak mohl nastat z důvodu již dříve zmíněné malé soudržnosti výztuže s cementovým kompozitem. Po odlehčení se tuhé spoje sítě vracejí do původní pozice, čímž zapojují do jakéhosi kvazi-předpětí ortogonální výztuž.

Pokud se zatížení nachází v pružné oblasti namáhání aplikovaných sítí, následuje po odlehčení uzavírání trhlin. Vzhledem ke korozivní odolnosti použitých materiálů textilních výztuží nemusí náhodné krátkodobé přetížení desek, které může v praxi při jejich užívání nastat, znamenat jejich znehodnocení a následný kolaps.

4.2. Lehký beton s pórovitým kamenivem vyztužený rozptýlenými vlákny

Úvodním impulzem k této etapě experimentálního výzkumu byly kromě zaměření na speciální výtzuže pro konstrukce z lehkého betonu zejména poznatky z předchozí výroby desek s textilní výtzuží, které poukázaly na problém značně nehomogenního rozmístění jednotlivých složek v cementovém kompozitu u vyrobených vzorků z lehkého betonu s pórovitým kamenivem (viz kapitola 4.1.2. - Vertikální i horizontální bednění, skelná prostorová textilie, lehký beton s pórovitým kamenivem). Lehké pórovité kamenivo má tendenci vyplouvat k hornímu povrchu. To lze ovlivnit recepturou, která však stále musí zohledňovat potřebu tekutější konzistence čerstvého betonu pro rovnoměrné naplnění bednění pro tenké prvky i z důvodu omezení hutnění z důvodu již dříve zmíněné tendence lehkého pórovitého kameniva vyplouvat. Kromě zlepšení pevnostních charakteristik betonu a ovlivnění primárně křehké charakteristiky lehkého betonu s pórovitým kamenivem při vhodném dávkování vláken byla tato část zaměřena na možnost pozitivně ovlivnit přidáním vláken jeho homogenitu.

Pro porovnání chování vzorků z lehkého betonu s pórovitým kamenivem s rozptýlenými vlákny (LWAFRC) bylo vyrobeno několik vyztužených desek a doprovodné zkušební vzorky. Tato etapa byla zahájena výrobou trámů a krychlí, po jejichž odzkoušení navázala výroba desek. Přehled desek, zkoušených v tahu za ohybu, je obsažen v tabulce 18.

Tabulka 18 Přehled desek zkoušených v tahu za ohybu

zkušební vzorky		materiál výtzuže	typ výtzuže	typ bednění	kusů
sada	rozměry [mm]				
LWAFRC	A	ocelová vysokopevnostní vlákna	rozptýlená	horizontální	3
	B				3
	C				3
	C	620/150/18			3

Receptura lehkého betonu s pórovitým kamenivem Liapor

Původní doporučená receptura poskytnutá společností Liapor byla v průběhu jednotlivých betonáží dle potřeby upravována za účelem dostatečného předmáčení pórovitého kameniva a pro dosažení vhodné konzistence do zamýšleného bednění (plastifikátor, voda).

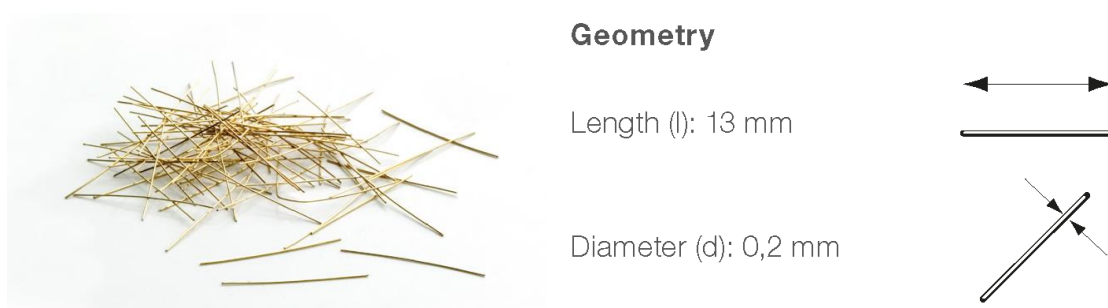
Pevnost výsledného betonu se odvíjí převážně od pevnosti použitého cementového pojiva z důvodu nižší pevnosti pórovitého kameniva v porovnání s cementovým tmelem. Z důvodu navýšení pevnostních charakteristik byla postupně vyzkoušeno několik receptur, ve kterých byla oproti původní receptuře dodané společností Liapor navýšeno poměrové množství pojiv.

Receptura byla navržena tak, aby docházelo k minimalizaci separace cementového tmelu a lehkých zrn Liaporu. V praxi bylo zároveň ověřeno, že konzistence směsi

bez výztuže s velikostí rozlití více než 270 mm jako průměr ve dvou na sebe kolmých směrech vytváří riziko segregace jednotlivých složek kompozitu.

Použitá rozptýlená výztuž

Jako poslední složka při výrobě čerstvého lehkého betonu s pórovitým kamenivem byly přidány drátky z vysokopevnostní ocele s označením Dramix OL 13/.20 od výrobce Bekaert. Výrobce udává, že jejich nominální pevnost v tahu odpovídá 2750 MPa, Youngův modul pružnosti 200 GPa, průměr vlákna 0,2 mm a délka 13 mm. Krátká délka těchto vláken je vhodná pro použití do tenkostěnných prvků. Dávka drátků byla stanovena na 100 kg/m³, což odpovídá 2/3 obvyklé dávky do vysokopevnostního betonu (HSC).



Obr. 107 Vzhled a geometrie vláken (20)

Úvodní sady vzorků bez desek

V rámci úvodního experimentu byly zhotoveny tři sady vzorků za účelem ověření pozitivního vlivu drátků na materiálové charakteristiky lehkého betonu s pórovitým kamenivem a pro určení případné vhodné úpravy receptury pro aplikaci do tenkostěnných konstrukcí.

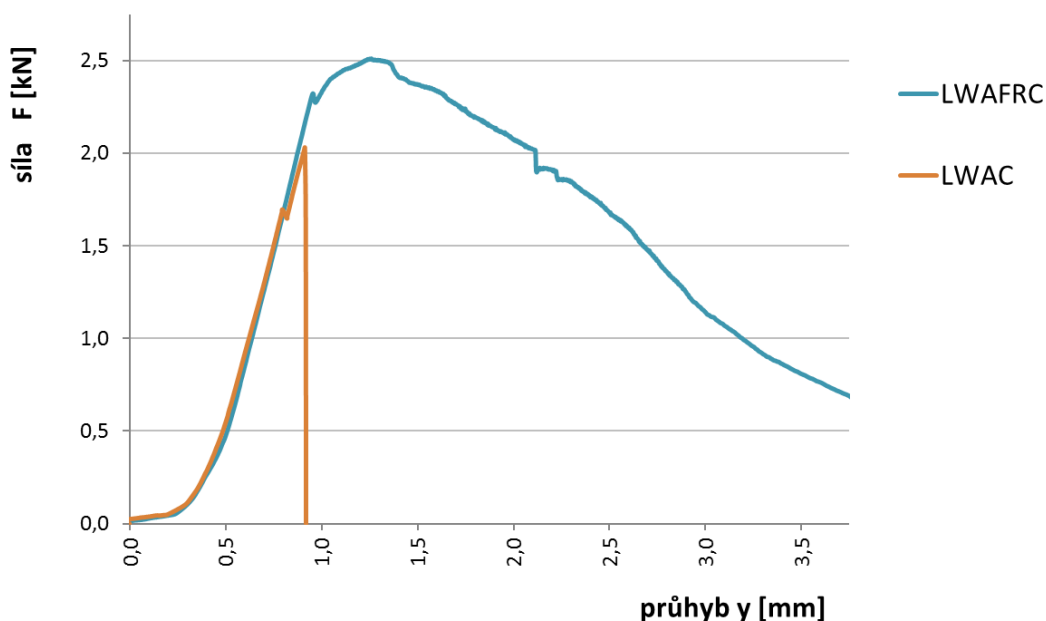
- sada úvodních vzorků č. 1 – původní receptura

První sada obsahovala tři vyztužené a pět nevyztužených trámů o rozměrech 40/40/160 mm. Při zkoušce v tahu za ohybu vykázaly vyztužené vzorky navýšení průměrné pevnosti o 35 % vůči nevyztuženým vzorkům. Výsledky zkoušky tříbodovým ohybem jsou uvedeny v tabulce 19.

Tabulka 19 Výsledky zkoušek trámců v tahu za ohybu první sady úvodních vzorků

sada	zkušební vzorky	rozměry tělesa			hmotnost [g]	objemová hmotnost [kg/m ³]	tah za ohybu		
		šířka [mm]	výška [mm]	délka [mm]			síla [kN]	pevnost [MPa]	
1	LWAC 1	39,6	40,3	160,0	408,0	1598	2,35	5,48	
	LWAC 2	39,7	40,6	160,0	393,0	1524	1,78	4,09	
	LWAC 3	40,6	40,2	160,0	417,0	1597	2,29	5,24	
	LWAC 4	39,8	40,3	160,0	410,0	1598	1,94	4,50	
	LWAC 5	40,3	40,4	160,0	405,0	1555	2,01	4,59	
	LWAFRC 1	40,8	40,3	160,0	427,0	1623	3,01	6,82	
	LWAFRC 2	41,2	40,3	160,0	422,0	1589	2,99	6,71	
	LWAFRC 3	40,8	40,0	160,0	421,0	1612	2,57	5,90	
	průměrné hodnoty								
		LWAC	40,0	40,4	160,0	406,6	1574	2,08	4,78
	LWAFRC	40,9	40,2	160,0	423,3	1608,0	2,9	6,5	

Na obrázku 108 je porovnání průběhu zkoušky v tahu za ohybu – průměrně pro nevyztužené a vyztužené trámce. Zkouška potvrdila, že v okamžiku, kdy nevyztužené vzorky náhle kolabují, ve vyztužených vzorcích betonu jsou postupně zapojeny drátky, čímž je zamezeno náhlému kolapsu. Drátky přenášejí zatížení i po vzniku trhlin.



Obr. 108 Porovnání průběhu zkoušky trámců v tahu za ohybu pro první sadu úvodních vzorků

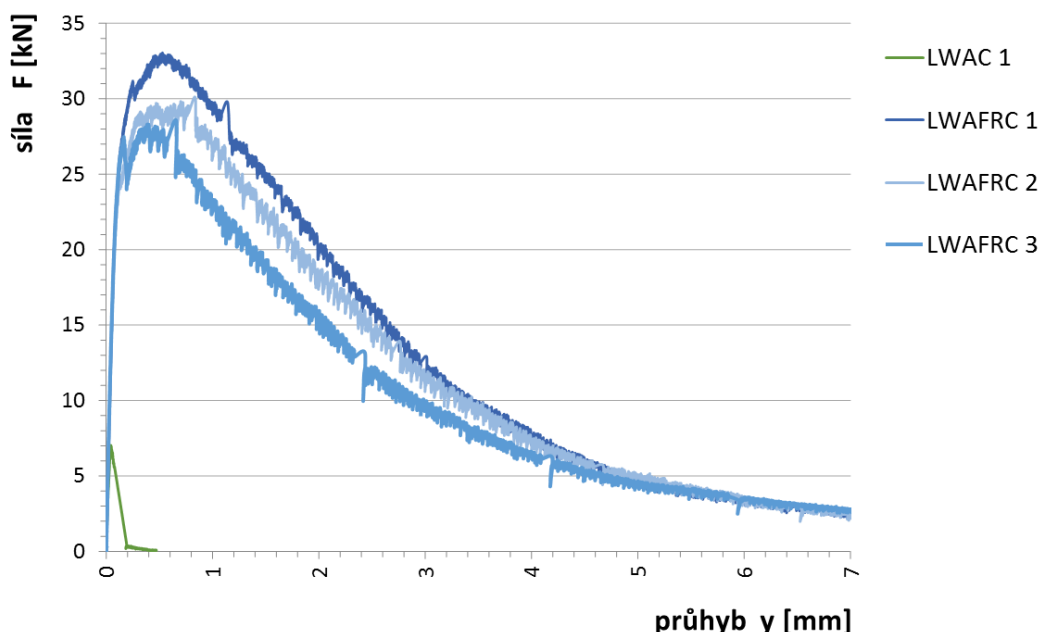
- sada úvodních vzorků č. 2 – receptura s nízkým vodním součinitelem

Vzhledem k faktům zjištěným v první sadě úvodních vzorků bylo přistoupeno k betonáži druhé sady. Vodní součinitel byl snížen při přípravě čerstvého betonu na nutné minimum tak, aby byla zachována dostatečná zpracovatelnost. Druhá sada obsahovala tři vyztužené a jeden nevyztužený trámec o rozměrech 100/100/400 mm a dále tři vyztužené a tři nevyztužené krychle o rozměrech 150/150/150 mm.

Vzhledem k možné nehomogenní povaze vzorků byly trávce v tomto případě zkoušeny čtyřbodovým ohybem. Při zkoušce vykázaly vyztužené trávce více než čtyřnásobné navýšení průměrné pevnosti v porovnání s nevyztuženými vzorky (viz tabulka 20).

Tabulka 20 Výsledky zkoušek trámců v tahu za ohybu pro druhou sadu úvodních vzorků

sada	zkušební vzorky	rozměry tělesa			hmotnost [g]	objemová hmotnost [kg/m ³]	tah za ohybu		
		šířka [mm]	výška [mm]	délka [mm]			síla [kN]	pevnost [MPa]	
2	LWAC 1	99,6	100,0	400,0	5958,0	1495,5	7,0	2,1	
	LWAFRC 1	101,7	100,0	400,0	6670,0	1640,0	33,0	9,7	
	LWAFRC 2	100,5	100,0	400,0	6690,0	1663,8	30,1	9,0	
	LWAFRC 3	101,4	100,0	400,0	6660,0	1641,6	28,5	8,4	
	průměrné hodnoty								
	LWAC	99,6	100,0	400,0	5958,0	1495,5	7,0	2,1	
	LWAFRC	101,2	100,0	400,0	6673,3	1648,5	30,6	9,1	

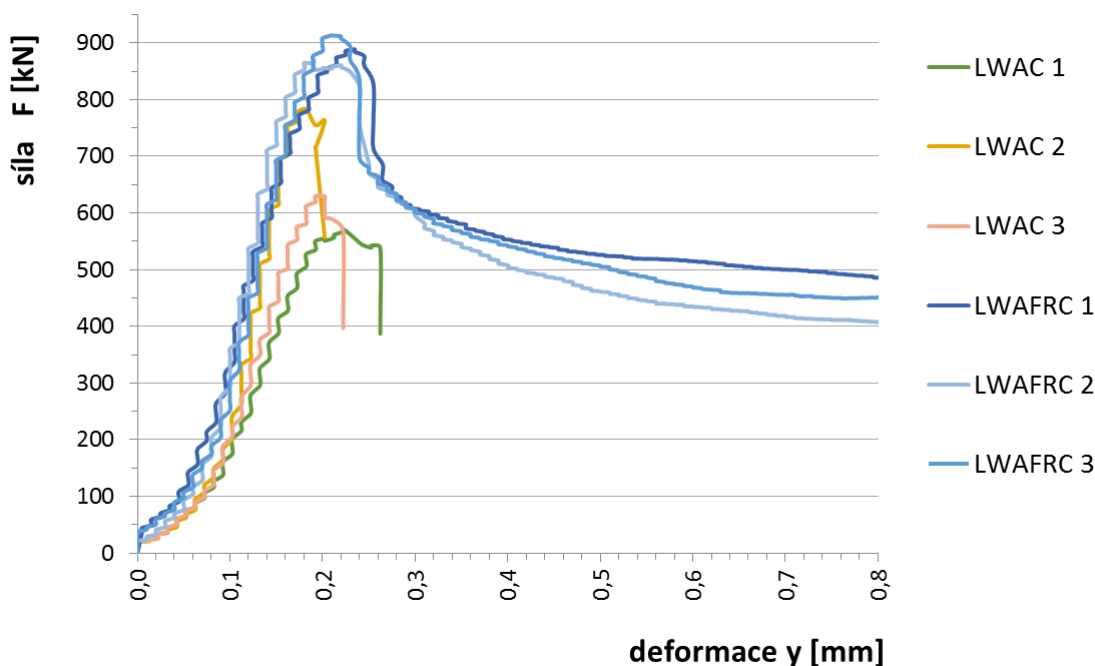


Obr. 109 Porovnání průběhu zkoušky trámců v tahu za ohybu pro druhou sadu úvodních vzorků
Vyztužené vzorky dosahovaly průměrně o 32 % vyšších pevností v tlaku v porovnání se vzorky bez vláken (viz tabulka 21). Vlákny vyztužené vzorky dále vykazovaly obdobné

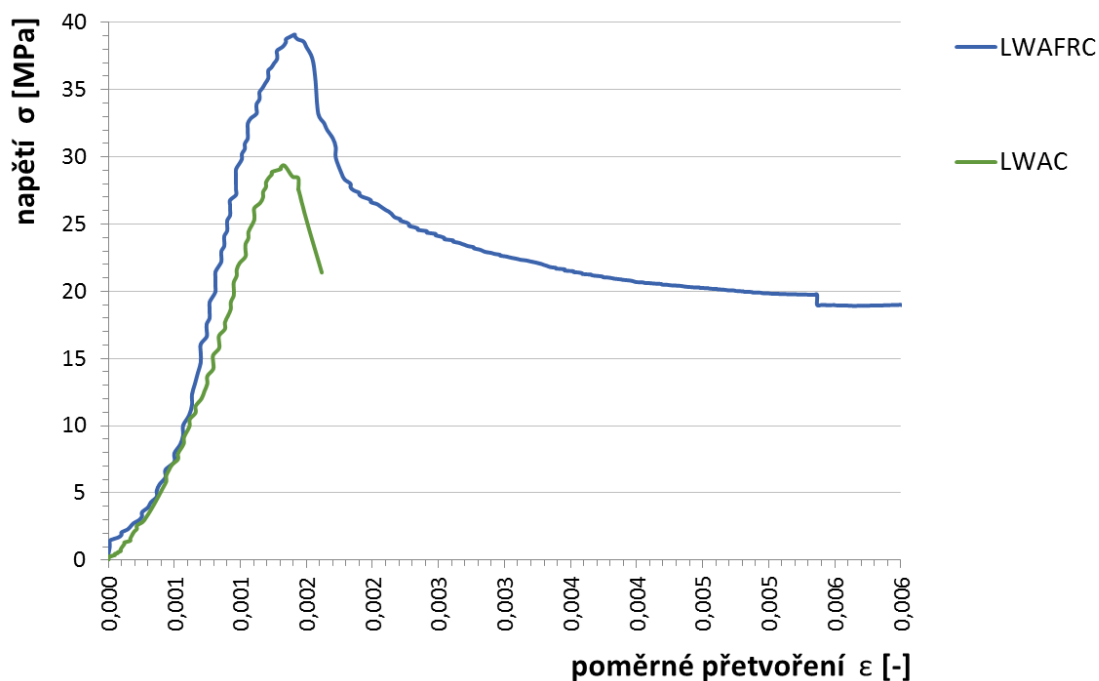
výsledky v porovnání s nevyztuženými vzorky, které vykazovaly značný rozptyl dosažených pevností (viz obrázek 110). Ani při stlačení vzorků vyztužených drátky o více než 10 mm nedošlo k jejich rozpadu (viz obrázek 113). Na obrázku 111 je vidět porovnání průběhu zkoušky v tlaku pro průměrné hodnoty krychlí druhé úvodní sady.

Tabulka 21 Výsledky zkoušek krychlí v tlaku pro druhou sadu úvodních vzorků

sada	zkušební vzorky	rozměry tělesa			hmotnost [g]	objemová hmotnost [kg/m ³]	tlak		
		šířka [mm]	výška [mm]	délka [mm]			síla [kN]	pevnost [MPa]	
2	LWAC 1	150,0	150,0	148,4	4990,0	1494	571,71	25,7	
	LWAC 2	150,0	150,0	148,6	5034,0	1506	781,96	35,1	
	LWAC 3	150,0	150,0	149,6	5042,0	1498	630,05	28,1	
	LWAFRC 1	150,0	150,0	151,6	5528,0	1621	888,11	39,1	
	LWAFRC 2	150,0	150,0	151,3	5538,0	1627	871,54	38,4	
	LWAFRC 3	150,0	150,0	153,0	5575,0	1619	913,49	39,8	
	průměrné hodnoty								
	LWAC	150,0	150,0	148,9	5022,0	1499	661,24	29,61	
	LWAFRC	150,0	150,0	152,0	5547,0	1622,3	891,0	39,1	



Obr. 110 Zkouška krychlí v tlaku pro druhou sadu úvodních vzorků



Obr. 111 Zkouška v tlaku pro druhou sadu úvodních vzorků – průměrné hodnoty



Obr. 112 Rozlomený vyztužený trámec (66)



Obr. 113 Vyztužené krychle po zkoušce v tlaku (66)

- **sada úvodních vzorků č. 3 – receptura vhodná pro tenkostěnné prvky**

Třetí sada obsahovala tři vyztužené a jeden nevyztužený trámec o rozměrech 100/100/400 mm a dále tři vyztužené a tři nevyztužené krychle o rozměrech 150/150/150 mm. Vodní součinitel byl upraven kvůli zajištění vhodné konzistence čerstvého betonu pro aplikaci do tenkostěnných prvků. Vyšší tekutosti bylo dále docíleno zdvojnásobením množství použitého plastifikátoru.

Trámce byly zkoušeny čtyřbodovým ohybem. Oproti nevyztuženým vzorkům dosáhly trámky s ocelovými vlákny dvojnásobné pevnosti v tahu za ohybu (viz tabulka 22).

Tabulka 22 Výsledky zkoušky trámčů v tahu za ohybu pro třetí sadu úvodních vzorků

sada	zkušební vzorky	rozměry tělesa			hmotnost [g]	objemová hmotnost [kg/m ³]	tah za ohybu		
		šířka [mm]	výška [mm]	délka [mm]			síla [kN]	pevnost [MPa]	
3	LWAC 1	100,9	100,0	400,0	6010,0	1488,7	7,8	2,3	
	LWAFRC 1	100,1	100,0	400,0	6165,0	1539,3	17,5	5,2	
	LWAFRC 2	100,3	100,0	400,0	6075,0	1515,0	15,3	4,6	
	LWAFRC 3	99,6	100,0	400,0	6130,0	1538,3	13,6	4,1	
	průměrné hodnoty								
	LWAC	100,9	100,0	400,0	6010,0	1488,7	7,8	2,3	
	LWAFRC	100,0	100,0	400,0	6123,3	1530,9	15,5	4,6	

LWAFRC vzorky třetí sady dosahovaly průměrně o 20 % vyšších pevností v tlaku v porovnání s nevyztuženými vzorky stejné sady (viz tabulka 23).

Tabulka 23 Výsledky zkoušky krychlí v tlaku pro třetí sadu úvodních vzorků

sada	zkušební vzorky	rozměry tělesa			hmotnost [g]	objemová hmotnost [kg/m ³]	tlak		
		šířka [mm]	výška [mm]	délka [mm]			síla [kN]	pevnost [MPa]	
3	LWAC 1	150,1	149,4	149,5	4960,0	1481	417,50	18,6	
	LWAC 2	152,4	149,5	149,2	4995,0	1470	418,31	18,4	
	LWAC 2	150,2	149,5	149,4	4945,0	1474	423,19	18,9	
	LWAFRC 1	149,4	149,7	150,0	5095,0	1518	485,50	21,7	
	LWAFRC 2	151,6	149,5	149,3	5115,0	1512	536,88	23,7	
	LWAFRC 3	149,2	149,3	150,7	5040,0	1501	491,61	21,9	
	průměrné hodnoty								
	LWAC	149,3	150,9	149,5	4966,7	1475,0	419,7	18,6	
	LWAFRC	150,0	150,1	149,5	5083,3	1510,6	504,7	22,4	

Porovnání výsledků ze zkoušek úvodních sad

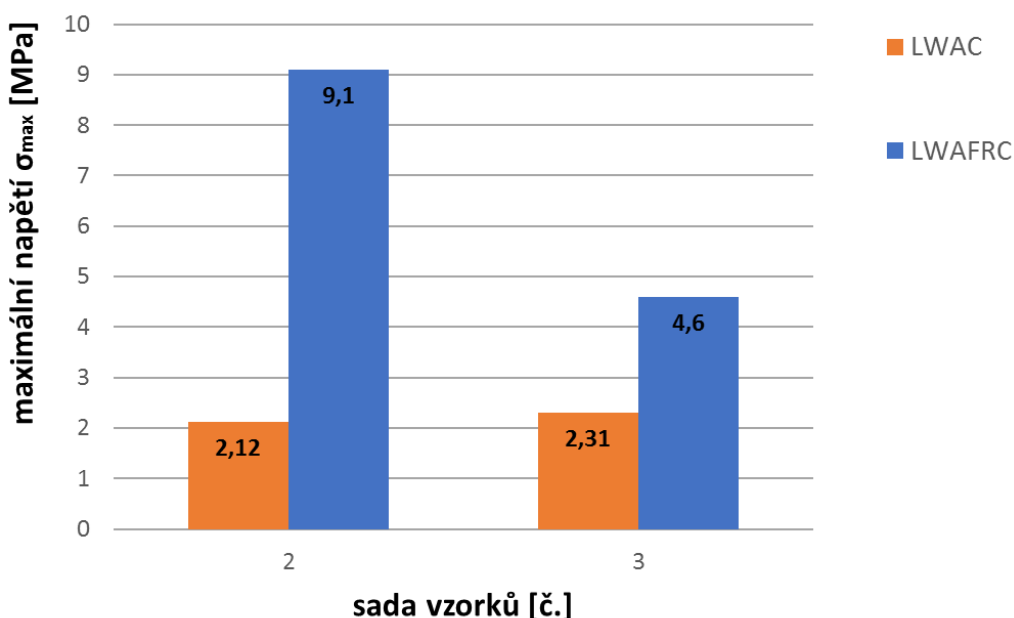
Tabulka 24 Srovnání průměrných výsledků zkoušek v tahu za ohybu pro úvodní sady vzorků

sada	zkušební vzorky	rozměry tělesa šířka/výška/délka [mm]	hmotnost [g]	objemová hmotnost [kg/m ³]	tah za ohybu	
					síla [kN]	pevnost [MPa]
1	LWAC	40/40/160	406,6	1574,2	2,1	4,8
	LWAFRC		423,3	1608,0	2,9	6,5
2	LWAC	100/100/400	5958,0	1495,5	7,0	2,1
	LWAFRC		6673,3	1648,5	30,6	9,1
3	LWAC	100/100/400	6010,0	1488,7	7,8	2,3
	LWAFRC		6123,3	1530,9	15,5	4,6

Tabulka 25 Průměrné výsledky zkoušek v tlaku pro druhou a třetí úvodní sadu vzorků

sada	zkušební vzorky	rozměry tělesa šířka/výška/délka [mm]	hmotnost [g]	objemová hmotnost [kg/m ³]	tlak	
					síla [kN]	pevnost [MPa]
2	LWAC	150/150/150	5022,0	1499,3	661,2	29,6
	LWAFRC		5547,0	1622,3	891,0	39,1
3	LWAC	150/150/150	4966,7	1475,0	419,7	18,6
	LWAFRC		5083,3	1510,6	504,7	22,4

Při zkoušce v tahu za ohybu vykázaly vzorky třetí úvodní sady přibližně poloviční pevnost v porovnání s druhou úvodní sadou vzorků. Výsledky pro LWAC trámce těchto sad jsou srovnatelné (viz obrázek 114).



Obr. 114 Porovnání průběhu zkoušky trámců v tahu za ohybu pro vzorky druhé a třetí úvodní sady

Oproti druhé úvodní sadě došlo u vzorků třetí úvodní sady vzorků u LWAC vzorků ke snížení pevnosti v tlaku o 37 % a u LWAFRC vzorků o 43 % (viz tabulka 25).

LWAFRC vzorky třetí úvodní sady mají shodně nižší objemovou hmotnost i nižší pevnosti. LWAC vzorky třetí úvodní sady vykazují ve srovnání se vzorky druhé sady téměř totožnou objemovou hmotnost, avšak výsledky zkoušky v tlaku se liší (viz tabulka 25).

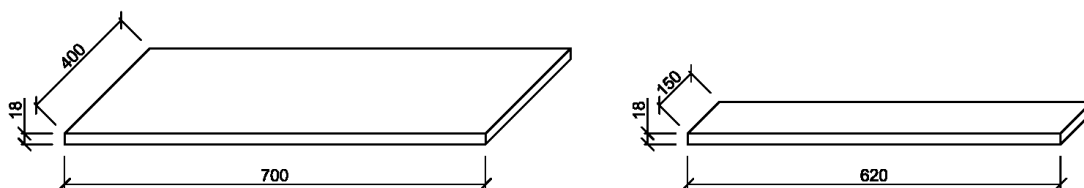
Zjištění

Úvodní sady vzorků potvrdily přínos ocelových vláken přidaných do betonové matrice lehkého betonu s pórovitým kamenivem. Při zkouškách v tlaku a zejména v tahu za ohybu vykázaly vzorky navýšení pevností. Bylo ověřeno několik receptur a vzorky vykazovaly homogennější strukturu než vzorky shodné receptury bez ocelových vláken. Pozitivním přínosem je rovněž přeměna křehkého materiálu na materiál duktilní.

4.2.1. Horizontální bednění, ocelová rozptýlená vlákna, lehký beton s pórovitým kamenivem

Po zhodnocení výsledků z tří úvodních sad vzorků bylo přistoupeno k betonáži desek s rozptýlenou ocelovou výztuží. Při rozhodování o vhodném typu bednění bylo využito předchozích zkušeností s výrobou desek s textilní výztuží (kapitola 4.1. – Lehký beton s pórovitým kamenivem vyztužený textilií). Zvolené horizontální bednění umožňuje snazší a rychlejší ukládání čerstvého betonu. Receptura vhodná pro tento typ bednění zohledňuje nižší požadavky na tekutou konzistenci čerstvého betonu v porovnání s vertikálním bedněním. Povrch bednění byl opatřen opět vodoodpudivou úpravou laminací.

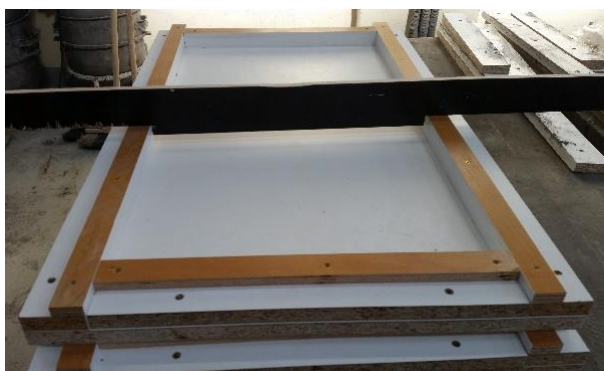
Postupně byly zhotoveny v rámci této etapy experimentálního výzkumu tři sady vyztužených desek a doprovodné vzorky. Pro rozlišení sad bude v textu použito písemné označení A-C. Pro desky sad A a B byla vyrobena bednění o totožných rozměrech, konkrétně šířce 400 mm, délce 700 mm a tloušťce 18 mm (viz obrázek 115 vlevo). Pro sadu C bylo pro desky z důvodu usnadnění manipulace se zkušebními tělesy zvoleno bednění o menších vnitřních rozměrech a to šířce 150 mm, délce 620 mm a tloušťce 18 mm (viz obrázek 115 vpravo).



Obr. 115 Geometrické rozměry desek sady A a B (vlevo) a C (vpravo)

Výroba zkušebních vzorků

Při přípravě čerstvého betonu byla ocelová vlákna přidána až jako poslední složka. Dávkování do předem promíchané směsi probíhalo postupně z důvodu redukce nežádoucího shlukování vláken a zajištění rovnoměrného rozptýlení vláken. Přidání vláken na konci procesu kromě lepší redistribuce vláken rovněž omezuje možné poškození vláken při míchání. Po umístění čerstvého betonu do bednění pro desky bylo přistoupeno ke krátkému hutnění vibrací. Horní povrch desky byl poté finálně uhlazen polaminovaným prknem. Doprovodné vzorky byly také krátce vibrovány.

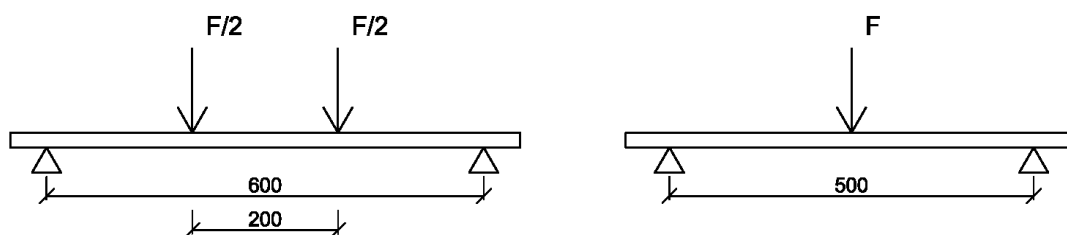


Obr. 116 Pohled na horizontální bednění (66)

Obr. 117 Pohled desku při odbedňování (66)

Destruktivní zkoušky

Desky sady A a B a trámce byly zkoušeny tahem za ohybu se čtyřbodovým uspořádáním, desky sady C uspořádáním třibodovým (viz obrázek 118). Průběh zkoušek byl řízen deformací vzorků. Rychlost nárůstu deformace byla obvykle stanovena standardně v hodnotě 0,2 mm/min, není-li zmíněno jinak. Zkouška byla ukončena zhruba při průhybu 5 mm pro trámce a 10 mm pro desky. Krychle, případně zbytky trámců, byly zkoušeny v tlaku. Následný text obsahuje výsledky získané zkouškami a doplňující text.



Obr. 118 Schéma zatěžování desek při zkoušce v tahu za ohybu – vlevo čtyřbodový (sady A, B) a vpravo třibodový ohyb (sada C)

Sada A obsahovala tato zkušební tělesa:

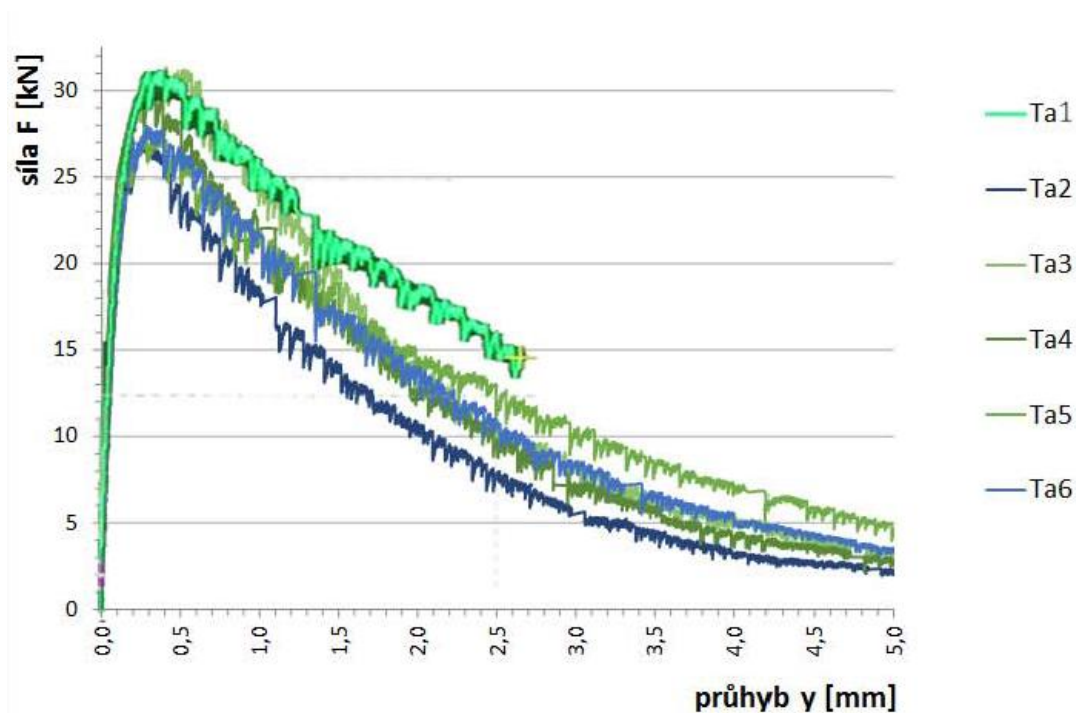
- 3 x deska s ocelovými rozptýlenými vlákny o rozměrech 400/700/19 mm
- 6 x trámec s ocelovými rozptýlenými vlákny o rozměrech 100/100/400 mm

Trámce sady A

Trámce sady A byly zkoušeny tahem za ohybu. Průměrná dosažená pevnost v tahu ohybem odpovídala 8,49 MPa. Výsledky zkoušky jsou zapsány v tabulce 26.

Tabulka 26 Výsledky zkoušek trámců sady A v tahu za ohybu

zkušební vzorky	rozměry tělesa			hmotnost [g]	objemová hmotnost [kg/m ³]	tahu za ohybu	
	šířka [mm]	výška [mm]	délka [mm]			síla [kN]	pevnost [MPa]
Ta1	105,4	100,1	399,8	7120	1689	31,25	8,89
Ta2	104,6	100,1	400,5	7015	1674	26,98	7,73
Ta3	103,7	100,2	400,0	6880	1656	31,33	9,03
Ta4	101,0	99,9	400,0	6695	1659	29,96	8,92
Ta5	101,1	100,3	400,2	6760	1666	27,86	8,22
Ta6	102,3	100,4	400,1	6835	1664	27,97	8,14
průměrné hodnoty							
Ta1-6	103,0	100,2	400,1	6884	1668	29,23	8,49



Obr. 119 Průběh zkoušky tahem za ohybu pro trámce s roztýlenými ocelovými vlákny sady A
 Částečně rozlomené trámce byly po ukončení zkoušky ohybem zkoušeny v tlaku. Z každého trámce byl takto zkoušen jeden vzorek, celkově bylo tedy odzkoušeno šest vzorků. Zatěžovaná plocha odpovídala 100 x 100 mm. Na obrázku 121 je vidět způsob provedení této zkoušky. Průměrná výsledná pevnost dosáhla hodnoty 50,9 MPa.



Obr. 120 Trámce po zkoušce tahem za ohybu (66)



Obr. 121 Zkouška v tlaku na zbytcích trámců (66)

Hodnoty získané při této zkoušce jsou uvedeny níže v tabulce 27.

Tabulka 27 Výsledky zkoušek v tlaku na zlomcích trámů sady A

zkušební vzorky	tlak	
	síla [kN]	pevnost [MPa]
Ta1	568,37	56,8
Ta2	492,15	49,2
Ta3	431,62	43,2
Ta4	524,49	52,4
Ta5	541,30	54,1
Ta6	495,50	49,5
průměrné hodnoty		
Ta1-6	508,9	50,9

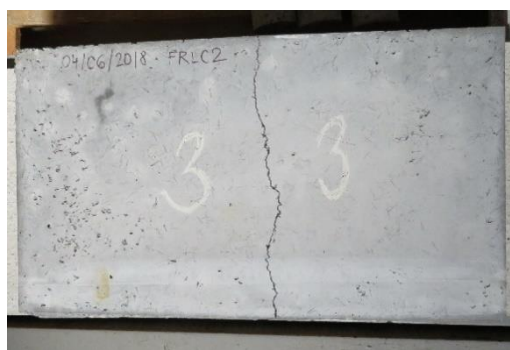
Desky sady A

Desky sady A byly zkoušeny čtyřbodovým ohybem (uspořádání zkoušky viz obrázek 118). Průhyb byl měřen v místě roznosu zatížení a odpovídá průměru reálného poklesu v místech zatížení desky, nejedná se tedy o reálný průhyb uprostřed desky (viz obrázek 122). Průběh zkoušek byl řízen deformací vzorků. Rychlost nárůstu deformace byla stanovena standardně v hodnotě 0,2 mm/min. Při dosažení průhybu 6 mm byla rychlost nárůstu deformace upravena na 0,4 mm/min. Zkouška byla ukončena zhruba při průhybu 10 mm. Vzorky dosáhly průměrné pevnosti 3,7 MPa. Výsledky zkoušky tahem za ohybu jsou zaneseny v tabulce 28.

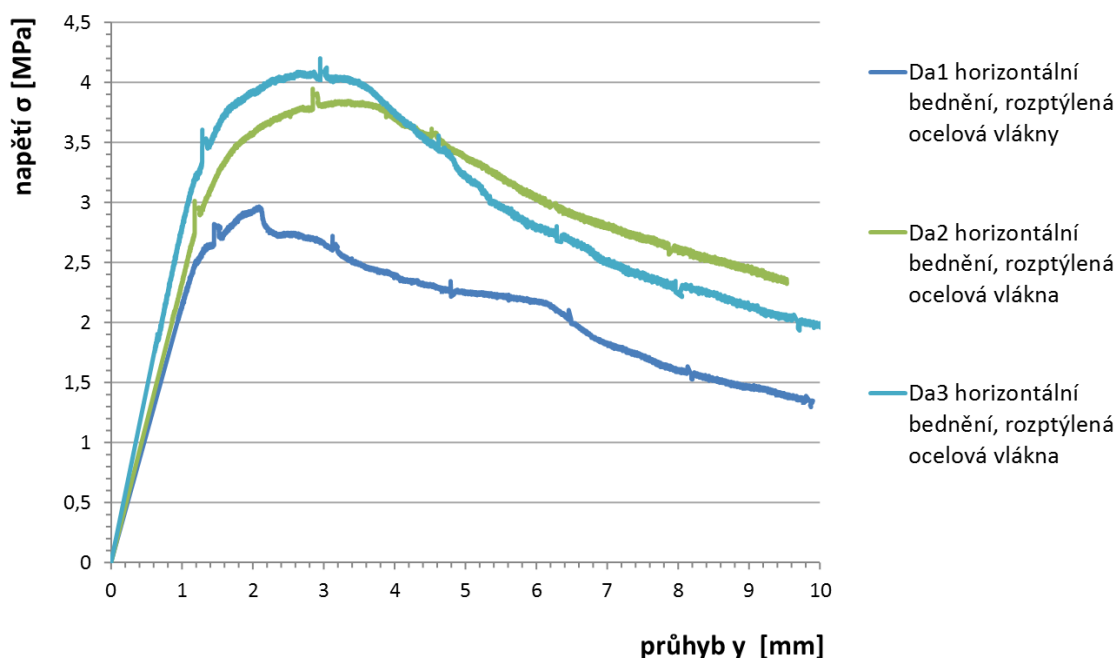
Tabulka 28 Výsledky zkoušek desek sady A v tahu za ohybu

zkušební vzorky	rozměry tělesa			hmotnost [g]	objemová hmotnost [kg/m ³]	tahu za ohybu	
	šířka [mm]	výška [mm]	délka [mm]			síla [kN]	pevnost [MPa]
Da1	400,8	19,3	700,7	8125	1499,5	0,72	2,97
Da2	400,0	19,2	700,1	8145	1512,0	1,06	3,95
Da3	400,1	19,3	700,2	8635	1598,2	0,91	4,20
průměrné hodnoty							
Da1-3	400,3	19,3	700,3	8302	1536,6	0,90	3,70

K porušení docházelo vytržením ocelových vláken z matrice betonu. Ocelová vlákna zamezují náhlému kolapsu prvku po dosažení meze pevnosti. I při tomto průhybu zůstávala vlákna blíže hornímu průřezu desky uchycena v matrici a obě části prvku tak zůstávaly spojeny (viz obrázek 123). Na obrázku 124 lze vidět duktilní chování desek.



Obr. 122 Deska po zkoušce tahem za ohybu (66) Obr. 123 Pohled na desku po vyjmutí z lisu (66)



Obr. 124 Průběh zkoušky tahem za ohybu pro desky s rozptýlenými ocelovými vlákny sady A

Sada B obsahovala tato zkušební tělesa:

- 6 x deska s ocelovými rozptýlenými vlákny o rozměrech 400/700/18 mm
- 6 x trámec s ocelovými rozptýlenými vlákny o rozměrech 40/40/160 mm
- 6 x trámec nevyztužený o rozměrech 40/40/160 mm
- 2 x krychle s ocelovými rozptýlenými vlákny o rozměrech 150/150/150 mm
- 3 x krychle nevyztužená o rozměrech 150/150/150 mm

Tato sada byla vyrobena ze záměsí dvou rozdílných receptur. Zatímco první receptura byla záměrně co možná nejsušší, ve druhé receptuře byl z důvodu snazšího ukládání čerstvého betonu do bednění navýšen vodní součinitel i množství plastifikátoru.

Trámce sady B

Trámce sady B byly zkoušeny tahem za ohybu. Průměrná dosažená pevnost v tahu ohybem odpovídala u první záměsi pro nevyztužené trámce 2,6 MPa a 12,01 MPa pro vyztužené trámce. U druhé záměsi bylo dosaženo u vyztužených trámců průměrné pevnosti 6,2 MPa. Výsledky zkoušek jsou zapsány v tabulkách 29, 30 a 31.



Obr. 125 Pohled na vnitřní strukturu trámce bez výztuže (66)



Obr. 126 Pohled na vnitřní strukturu trámce s výztuží (66)

Tabulka 29 Výsledky zkoušek nevyztužených trámců sady B v tahu za ohybu (první záměs)

	zkušební vzorky	rozměry tělesa			hmotnost [g]	objemová hmotnost [kg/m ³]	tah za ohybu	
		šířka [mm]	výška [mm]	délka [mm]			síla [kN]	pevnost [MPa]
LWAC	Tb1	40,1	40,1	160,6	422,9	1635,2	1,53	2,38
	Tb2	40,6	41,1	160,7	419,3	1563,9	1,79	2,61
	Tb3	40,8	40,2	160,4	414,2	1572,9	1,71	2,59
	Tb4	41,9	40,1	160,2	458,0	1700,6	2,05	3,05
	Tb5	42,6	40,1	160,2	421,3	1540,0	1,66	2,41
	Tb6	41,4	41,0	160,3	417,3	1540,0	1,77	2,54
	průměrné hodnoty							
	Tb1-6	41,2	40,4	160,4	425,5	1592,1	1,8	2,6

Tabulka 30 Výsledky zkoušek vyztužených trámců sady B v tahu za ohybu (první záměs)

	zkušební vzorky	rozměry tělesa			hmotnost [g]	objemová hmotnost [kg/m ³]	tah za ohybu		
		šířka [mm]	výška [mm]	délka [mm]			síla [kN]	pevnost [MPa]	
LWAFRC	Tb1	41,2	40,4	159,4	455,5	1717,7	8,86	13,18	
	Tb2	41,1	40,3	159,6	444,2	1682,4	7,98	11,98	
	Tb3	41,0	40,0	158,9	447,3	1715,0	7,13	10,86	
	průměrné hodnoty								
		Tb1-3	41,1	40,2	159,3	449,0	1705,0	7,99	12,01

Tabulka 31 Výsledky zkoušek vyztužených trámčů sady B v tahu za ohybu (druhá záměs)

LWAFRC	zkušební vzorky	rozměry tělesa			hmotnost [g]	objemová hmotnost [kg/m ³]	tah za ohybu	
		šířka [mm]	výška [mm]	délka [mm]			síla [kN]	pevnost [MPa]
	Tb4	39,8	40,5	160,6	345,1	1331,9	3,75	5,74
	Tb5	40,2	40,4	160,5	348,5	1335,8	4,29	6,53
	Tb6	39,3	40,6	160,2	348,2	1360,9	4,10	6,32
průměrné hodnoty								
	Tb4-6	39,8	40,5	160,4	347,3	1342,9	4,05	6,20

Krychle sady B

Výsledky zkoušky v tlaku na krychlích sady B jsou uvedeny v tabulkách 32 a 33.

Tabulka 32 Výsledky zkoušky v tlaku pro nevyztužené krychle sady B (první záměs)

LWAC	zkušební vzorky	rozměry tělesa			hmotnost [g]	objemová hmotnost [kg/m ³]	tlak	
		šířka [mm]	výška [mm]	délka [mm]			síla [kN]	pevnost [MPa]
	Kb1	147,3	149,4	149,5	5423,5	1649,3	652,36	29,65
	Kb2	147,2	149,4	149,6	5422,7	1648,9	690,0	31,4
	Kb3	149,7	149,4	149,5	5480,5	1639,5	724,8	32,4
průměrné hodnoty								
	Kb1-3	148,0	149,4	149,5	5442,2	1645,9	689,0	31,1

Tabulka 33 Výsledky zkoušky v tlaku pro vyztužené krychle sady B (druhá záměs)

LWAFRC	zkušební vzorky	rozměry tělesa			hmotnost [g]	objemová hmotnost [kg/m ³]	tlak	
		šířka [mm]	výška [mm]	délka [mm]			síla [kN]	pevnost [MPa]
	Kb4	149,7	149,4	149,5	4610,1	1379,1	449,9	20,1
	Kb5	139,7	149,6	149,8	4516,3	1442,6	479,4	22,9
průměrné hodnoty								
	Kb4-5	144,7	149,5	149,7	4563,2	1410,9	464,6	21,5

Desky sady B

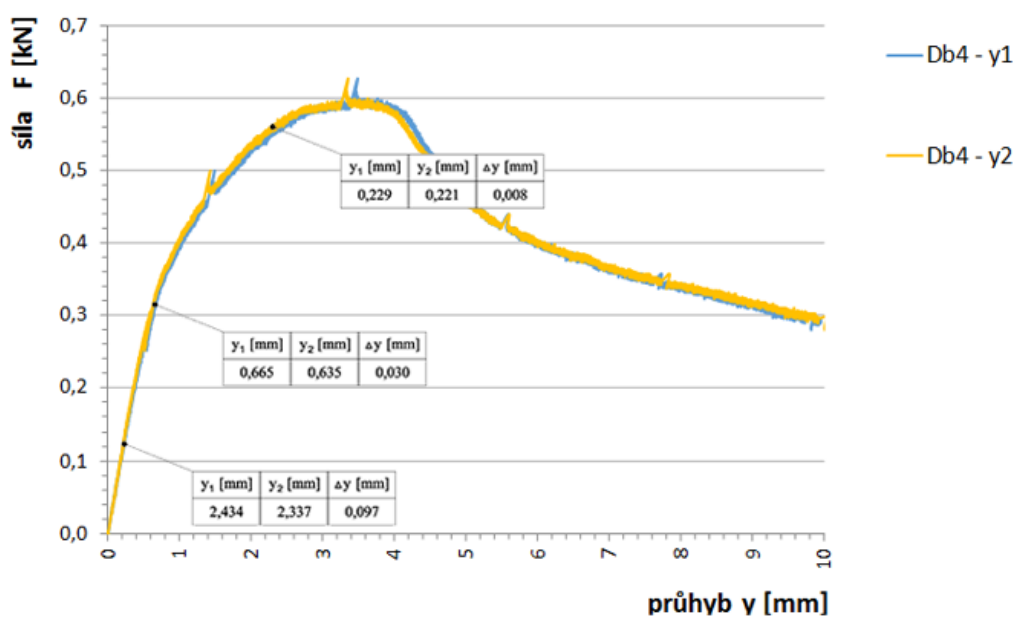
Desky sady B byly zkoušeny čtyřbodovým ohybem (uspořádání zkoušky viz obrázek 118). Průhyb byl měřen ve dvou místech ve středu rozponu a níže uvedené hodnoty odpovídají průměrnému poklesu uprostřed desky (osazení měřidel lze vidět na obrázku 128). V tabulce 34 jsou uvedeny a porovnány hodnoty měření v těchto dvou bodech pro desky druhé záměsi pro zvolené poměrové hodnoty maximální dosažené síly. Příkladem porovnání takto získaných hodnot ze dvou snímačů jsou na obrázku 129 vykreslené křivky závislosti síly na průhybu pro desku Db4. Vzorky dosáhly průměrné pevnosti 4,6 MPa u sušší receptury a 2,7 MPa u druhé receptury. Výsledky zkoušek tahem za ohybu jsou zaneseny v tabulkách 35 a 36.



Obr. 127 Pohled na desku po vyjmutí z lisu (66) Obr. 128 Deska při zkoušce tahem za ohybu (66)

Tabulka 34 Porovnání posunů měřených ve dvou bodech desek sady B v tahu za ohybu (druhá záměš)

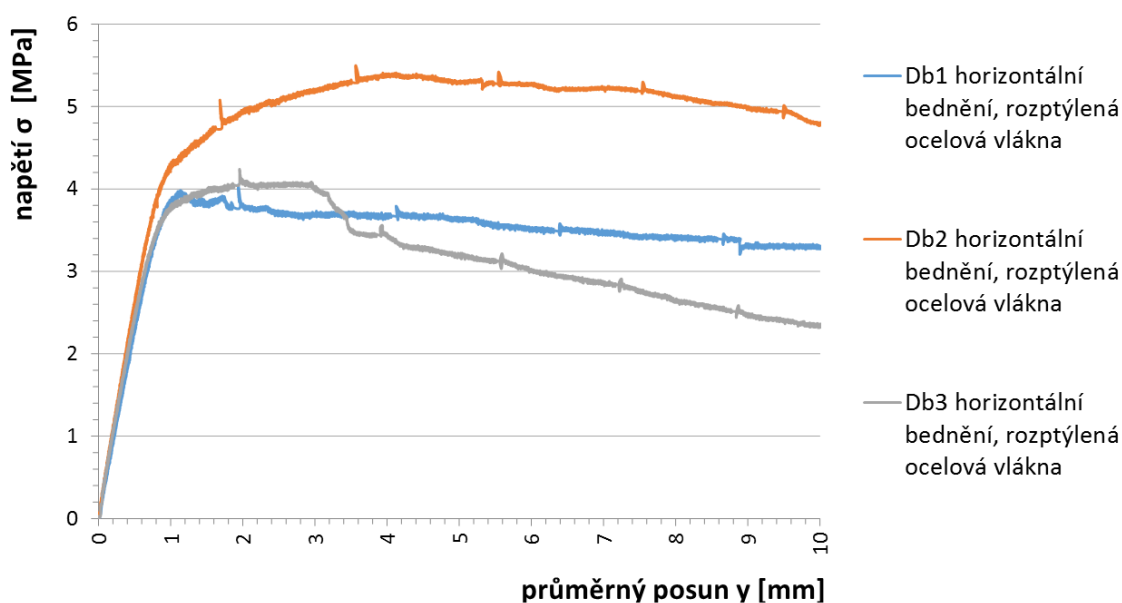
označení vzorku	20 % F_{max}			50 % F_{max}			90 % F_{max}		
	y_1 [mm]	y_2 [mm]	Δy [mm]	y_1 [mm]	y_2 [mm]	Δy [mm]	y_1 [mm]	y_2 [mm]	Δy [mm]
Db4	0,229	0,221	0,008	0,665	0,635	0,030	2,434	2,337	0,097
Db5	0,175	0,199	0,024	0,483	0,537	0,054	1,422	1,596	0,174
Db6	0,162	0,140	0,022	0,443	0,412	0,031	0,936	0,907	0,029
průměrné hodnoty									
Db4-6	0,189	0,187	0,018	0,530	0,528	0,038	1,597	1,613	0,100



Obr. 129 Závislost síly na průhybu pro dva snímače průhybu pro desku Db4 při zkoušce tahem za ohybu

Tabulka 35 Výsledky zkoušek vyztužených desek sady B v tahu za ohybu (první záměs)

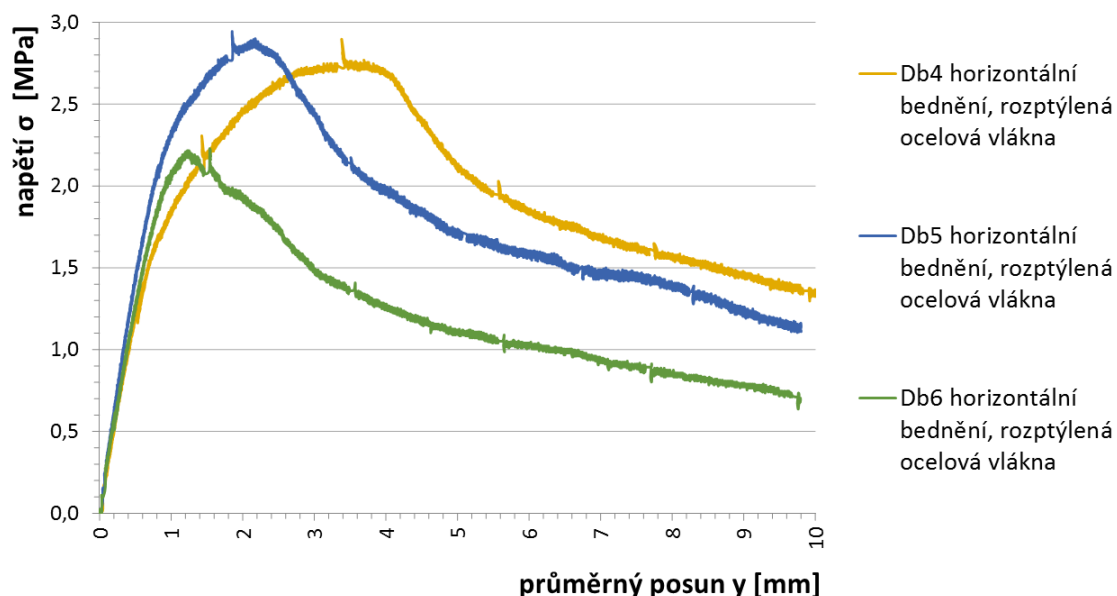
zkušební vzorky	rozměry tělesa			hmotnost [g]	objemová hmotnost [kg/m ³]	tahu za ohybu	
	šířka [mm]	výška [mm]	délka [mm]			síla [kN]	pevnost [MPa]
Db1	402,0	18,6	702,8	9130	1741	0,94	4,06
Db2	401,4	20,8	701,3	9710	1656	1,59	5,48
Db3	401,3	19,7	702,0	9200	1662	1,10	4,25
průměrné hodnoty							
Db1-3	401,6	19,7	702,0	9347	1686	1,2	4,6



Obr. 130 Průběh zkoušky tahem za ohybu pro desky s rozptýlenými ocelovými vlákny sady B, sušší receptura

Tabulka 36 Výsledky zkoušek vyztužených desek sady B v tahu za ohybu (druhá záměs)

zkušební vzorky	rozměry tělesa			hmotnost [g]	objemová hmotnost [kg/m ³]	tahu za ohybu	
	šířka [mm]	výška [mm]	délka [mm]			síla [kN]	pevnost [MPa]
Db4	401,0	18,0	702,3	6950,0	1373	0,63	2,90
Db5	401,8	19,8	701,3	7515,0	1346	0,77	2,93
Db6	401,5	19,3	702,0	7430,0	1365	0,56	2,23
průměrné hodnoty							
Db4-6	401,4	19,0	701,8	7298,3	1361	0,7	2,7



Obr. 131 Průběh zkoušky tahem za ohybu pro desky s rozptýlenými ocelovými vlákny sady B, tekutá konzistence



Obr. 132 Pohled na vnitřní strukturu rozříznuté desky sady B (66)

Sada C obsahovala tato zkušební tělesa:

- 3 x deska s ocelovými rozptýlenými vlákny o rozměrech 400/700/18 mm

Tato sada byla vyrobena za použití shodné receptury s druhou záměsí sady B.

Desky sady C

Desky sady C byly zkoušeny tříbodovým ohybem (uspořádání zkoušky viz obrázek 118). Průhyb byl měřen ve dvou místech ve středu rozponu a níže uvedené hodnoty odpovídají průměrnému reálnému poklesu uprostřed desky (osazení měřidel lze vidět na obrázku 133). Vzorke dosáhly průměrné pevnosti 4,42 MPa. Výsledky zkoušek tahem za ohybu jsou zaneseny v tabulce 37.



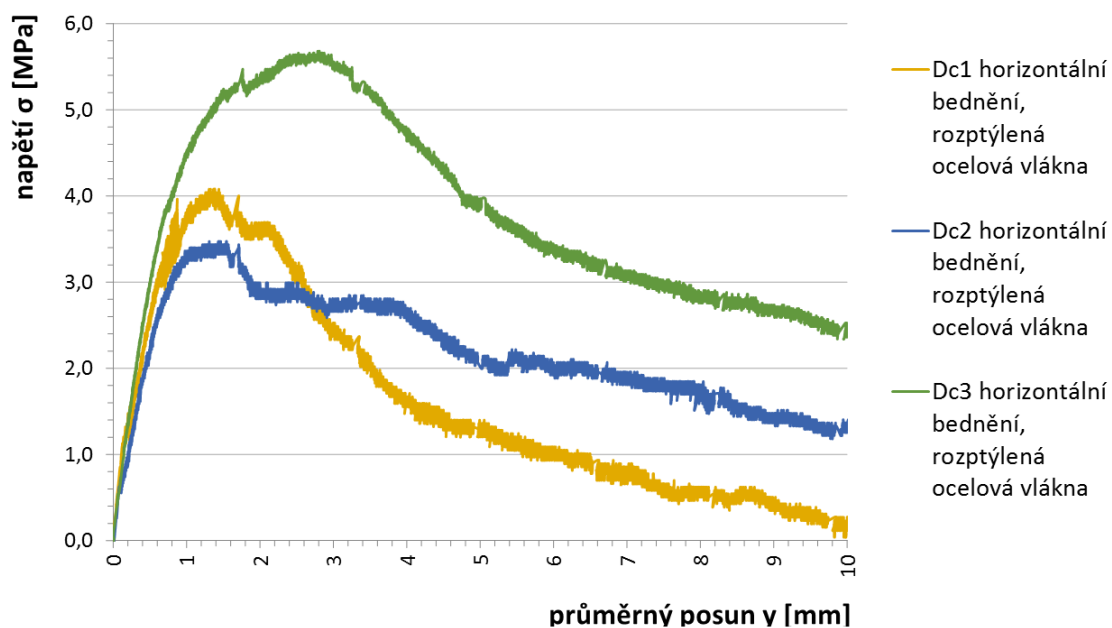
Obr. 133 Deska při zkoušce tahem za ohybu (66)



Obr. 134 Pohled na desky po vyjmutí ze zkušebního zařízení (66)

Tabulka 37 Výsledky zkoušek vyztužených desek sady C v tahu za ohybu

zkušební vzorky	rozměry tělesa			hmotnost [g]	objemová hmotnost [kg/m ³]	tahu za ohybu	
	šířka [mm]	výška [mm]	délka [mm]			síla [kN]	pevnost [MPa]
Dc1	150,42	19,79	619,5	2968,2	1610	0,32	4,07
Dc2	150,05	20,32	620,0	2898,7	1533	0,29	3,47
Dc3	150,18	19,05	619,0	2788,1	1574	0,42	5,71
průměrné hodnoty							
Dc1-3	150,22	19,72	619,5	2885,0	1572	0,34	4,42



Obr. 135 Průběh zkoušky tahem za ohybu pro desky s rozptýlenými ocelovými vlákny sady C, tekutá konzistence shodná s druhou záměsí sady B



Obr. 136 Pohled na vnitřní strukturu rozlomené desky sady C (66)

Zjištění

Zkouškami byl prokázán značný přínos vyztužení rozptýlenými ocelovými vlákny na výsledné pevnostní charakteristiky zkušebních vzorků, což je patrné u první záměsi sady B s více než čtyřapůlnásobným nárůstem ohybových pevností u trámců vyztužených oproti nevyztuženým (viz tabulky 29 a 30). Při vizuálním hodnocení vzorků je patrný další pozitivní vliv přidání rozptýlených ocelových vláken, a to rovnoměrné rozmístění jednotlivých složek ve vyztužených vzorcích, jak je patrné na obrázcích 125, 126, 132 a 136. Tomuto jevu byla v průběhu jednotlivých experimentů věnována zvýšená pozornost.

K porušení při zkoušce tahem za ohybu docházelo vytržením ocelových vláken z matrice betonu. Vzorky s rozptýlenými ocelovými vlákny vykazovaly duktilní chování, což je patrné z průběhu sestupné části křivky závislosti síly či napětí na průhybu. Ocelová vlákna zamezují náhlému kolapsu prvku po dosažení meze pevnosti. I při průhybu desek 10 mm zůstávala vlákna blíže hornímu průřezu uchycena v matrici a obě části prvku tak zůstávaly spojeny. Průměrné výsledky zkoušek jednotlivých sad desek v tahu za ohybu jsou uvedeny v tabulce 38.

Tabulka 38 Průměrné výsledky zkoušek vyztužených desek sad A-C v tahu za ohybu

zkušební vzorky	rozměry tělesa			hmotnost [g]	objemová hmotnost [kg/m ³]	tahu za ohybu	
	šířka [mm]	výška [mm]	délka [mm]			síla [kN]	pevnost [MPa]
Da1-3	400,3	19,3	700,3	8302,0	1537	0,90	3,70
Db1-3	401,6	19,7	702,0	9347,0	1686	1,2	4,6
Db4-6	401,4	19,0	701,8	7298,3	1361	0,7	2,7
Dc1-3	150,2	19,7	619,5	2885,0	1572	0,34	4,42

Rozdílné receptury sady B se projevily pozitivně nižší hmotností a lepší probetonovaností vzorků druhé záměsi, ovšem za cenu snížení pevností takto vyrobených prvků. To se projevilo jak u desek, tak trámců. Při porovnání dosahovaly trámce první, sušší, záměsi zhruba dvojnásobku průměrné ohybové pevnosti trámců druhé záměsi (viz tabulky 30 a 31). Dva vzorky desek (Db1, Db3) první záměsi byly nezáměrně krátkodobě ovlivněny při hutnění působením magnetického pole vibračních stolů, což se projevilo při zkouškách jak odlišným průběhem křivky napětí v závislosti na průhybu (viz obrázek 130), tak pravděpodobně i nižšími pevnostmi těchto vzorků.

Zvolené horizontální bednění se osvědčilo svou jednoduchostí, jak při výrobě, plnění čerstvým betonem, tak při odbedňování. Jak již bylo zmíněno, díky přidání rozptýlených

ocelových vláken nedocházelo k okem pozorovatelné segregaci, jako tomu bylo například u desek z lehkého betonu s pórovitým kamenivem vyztužených textiliemi (viz kapitola 4.1.2.). Spodní povrch vyrobených desek je hladký a příjemný pohledově i na dotek. U horního povrchu desek je možné přistoupit k povrchové úpravě, například nabetonávkou (viz obrázek 138).



Obr. 137 Detail horního povrchu desky (66) Obr. 138 Pohled na horní povrch desky – nahoře s úpravou nabetonávkou, dole bez úpravy (66)

4.2.2. Shrnutí

V průběhu experimentálního výzkumu zaměřeného na aplikaci rozptýlené výztuže do tenkých prvků z lehkého betonu s pórovitým kamenivem bylo vyrobeno a odzkoušeno několik sad vzorků. Jednalo se nejprve o tři úvodní sady vzorků bez desek a později o tři sady desek s doprovodnými vzorky. Pro desky bylo vyrobeno speciální horizontální bednění s povrchovou úpravou laminací. Hlavní předností zvoleného typu bednění je snadnost jeho výroby a použití, při splnění kladených požadavků na výsledný produkt, což je žádoucí pro širší aplikovatelnost tohoto způsobu výroby. Tento způsob betonáže zároveň neklade takové nároky na konzistenci čerstvého betonu při ukládání do bednění ve srovnání s vertikálním bedněním pro uvažovaný způsob aplikace do nábytku a mobiliáře.

Podstatnými sledovanými parametry byl vliv různě upravené receptury, zejména v souvislosti s konzistencí, na snadnost betonáže, únosnost prvků i estetické kvality vyráběných zkušebních vzorků. Bylo ověřeno, že tekutější receptura je výhodná z hlediska snazšího uložení do bednění, ovšem znamená i snížení pevnostních charakteristik takto vyrobených prvků (viz dvě záměsí sady B). Nižší pevnostní charakteristiky souvisí s nižší objemovou hmotností. To je patrné z průměrně dosažených hodnot jednotlivých sad desek uvedených v tabulce 38. Tímto způsobem vyrobené a vyztužené prvky celkově prokázaly i přes nízkou objemovou hmotnost dostatečnou únosnost pro zamýšlenou aplikaci. Vizualním hodnocením bylo potvrzeno, že takto vyrobené deskové prvky splňují očekávání z hlediska estetiky.

Kromě pozitivního vlivu rozptýlených ocelových vláken na pevnostní charakteristiky, zejména ohybové pevnosti (viz úvodní sady vzorků a trámce sady B), přeměňují rozptýlená ocelová vlákna povahou křehký lehký beton s pórovitým kamenivem na tvárnější materiál, čímž je při vhodném dávkování zabráněno náhlému kolapsu takto vyztužených prvků. Duktilní chování zkoušených vyztužených vzorků lze pozorovat na průběhu sestupné části křivky závislosti síly či napětí na průhybu.

Kromě výše vyjmenovaných parametrů byl sledován zejména vliv použitých rozptýlených ocelových vláken na homogenitu prvku. U prvků bez tohoto typu vláken byla při předchozích experimentech i přes minimalizaci doby hutnění čerstvého betonu v bednění pozorována segregace způsobená vyplouváním lehkého pórovitého kameniva k hornímu povrchu (viz kapitola 4.1.2. - obrázky 89 a 90). Předpokládaný účinek rovnoměrně rozptýlených drátků bylo vytvoření prostorové bariéry z vláken, která brání vzlínání lehkého pórovitého kameniva a tím přispívá k homogenitě kompozitu. Tento efekt by se měl projevit malými směrodatnými odchylkami měřených pevnostních charakteristik.

Za účelem prokázání pozitivního vlivu použitých vláken na homogenitu prvků byla sledována a hodnocena vnitřní struktura vyrobených vzorků. U vyztužených vzorků nebyla oproti vzorkům bez výztuže pozorována segregace (viz obrázky 125, 126, 132 a 136). Rovnoměrnost rozmístění jednotlivých složek se projevovала i při porovnání průběhu zkoušek vzorků s rozptýlenými ocelovými vlákny a nevyztužených vzorků. U vyztužených vzorků se dala pozorovat větší konzistence dosažených výsledků než u vzorků nevyztužených, což lze vidět například při zkoušce krychlí v tlaku u druhé sady úvodních vzorků (viz obrázek 110). Tento jev lze také pozorovat při porovnání hodnot měřených posunů u desek, kde byla umístěna dvě měřidla (viz tabulka 34 a obrázek 129). Na záznamu zkoušky ohybem lze sledovat, že průhyby na obou stranách desky šíře 400 mm byly téměř totožné. To dokumentuje rovnoměrný rozptyl ocelových vláken ve ztvrdlém kompozitu desky. Výsledky zkoušek rovněž ukazují, že prokázat homogenitu struktury u těchto lehkých pórovitých betonů lze až dle rozptylu výsledků destruktivních zkoušek.

Účinek disperzní ocelové výztuže ve struktuře lehkého betonu s pórovitým kamenivem je opačným efektem vlivu drátků v konstrukčních vláknobetonech s přírodním kamenivem, kde rozptýlené drátky ve struktuře vláknobetonu brání segregaci hrubým zrnům přírodního kameniva. Sedání hrubých zrn přírodního kameniva bývá častým důvodem nehomogenity struktur těchto kompozit.

Homogenní struktury zhutněného kompozita lehkého jemnozrného betonu s pórovitým kamenivem a rozptýlenými ocelovými vlákny lze dosáhnout za předpokladu výroby homogenní struktury čerstvého betonu v potřebné konzistenci měřené s použitím střešovacího stolku pro zkoušky konzistencí čerstvých malt. Experimentálně byla ověřena konzistence směsi bez výztuže, která by měla mít velikost rozlití v rozmezí 260-280 mm jako průměr ve dvou na sebe kolmých směrech, čímž se vytváří clona bránící vyplavování zrn lehkého kameniva k hornímu povrchu těles při zpracování, například vibrační kompozita.

Tento způsob technického řešení umožňuje analogický postup výroby prvků z lehkého betonu s pórovitým kamenivem jako při výrobě prvků z běžných hutných betonů, a to včetně hutnění v horizontální poloze. Díky ztužení struktury kompozita lehkého hutného betonu je toto experimentálně ověřené složení kompozita vhodné pro využití při výrobě nejen subtilních prvků mobiliáře, ale i jako nosné části vytipovaných prvků. Žádoucí součástí takto vyrobených prvků jsou různé povrchové úpravy nejen nosných částí.

5. Závěr

Jedním ze způsobů snížení vlastní tíhy betonového prvku je použití lehkého pórovitého kameniva. Za účelem použití lehkého betonu s pórovitým kamenivem v nosných konstrukcích lze prvky vyztužit i nekonvenčním způsobem. Tato speciální výztuž zahrnující vlákna rozptýlená nebo usměrněná v podobě sítě umožňuje vytvářet lehké a tenké betonové prvky s vysokou únosností.

Experimentální výzkum se zaměřoval na praktické ověřování různých způsobů a postupů výroby takto vyztužených tenkostěnných prvků pro uvažovanou aplikaci do mobiliáře. Nejen receptura, ale i způsob betonáže, má významný vliv na materiálové charakteristiky.

Vzhledem k uvažované aplikaci do tenkých prvků nábytku a mobiliáře byla jako referenční prvek zvolena deska. Při volbě a výrobě vhodného bednění bylo využito praktických zkušeností z předchozích betonáží tenkých prvků z hutného obyčejného betonu a HSC. Při vyztužení desek bylo postupně využito textilií plošných uhlíkových, prostorových skelných a později rozptýlených vysokopevnostních ocelových vláken. Pro vyztužení desek textiliemi bylo vyzkoušeno několik typů bednění, vertikálních i horizontálních. Pro vyztužení rozptýlenými ocelovými vlákny se jeví jako nevhodnější bednění horizontální.

Původní receptura jemnozrnného betonu vhodného do prvku s textilní výztuží byla upravována, zejména z důvodu zohlednění aktuálně potřebné konzistence změnou množství plastifikátoru a vodního součinitele, v některých případech bylo přistoupeno i k předem ověřené úpravě množství pojiv. Vzhledem k použitým recepturám s maximálním zrnem kameniva 4 mm umožňují zvolená ocelová vlákna délky 13 mm výrobu subtilních prvků i nosných částí prvků mobiliáře. Průměrná objemová hmotnost nevyztužených zkušebních těles se dle použité receptury pohybovala pod 1700 kg/m^3 , v některých případech klesla i pod hodnotu 1350 kg/m^3 .

Vyrobené zkušební vzorky, jak desky, tak doprovodné vzorky, byly zkoušeny destruktivním způsobem. Desky a trámce v tahu za ohybu, krychle a zbytky trámců v tlaku. Zejména zkoušky v tahu za ohybu potvrdily významné navýšení pevností u všech vyztužených vzorků. Použité vyztužení zásadním způsobem ovlivňuje chování prvků po dosažení meze pevnosti, kdy je zamezeno náhlému kolapsu prvku při přetížení díky aktivaci vláken při rozvoji trhlin. Zkoušky prokázaly vysokou únosnost desek vyztužených výše zmíněnými typy výztuže.

Při zkoušce v tahu za ohybu bylo u desek vyztužených prostorovou skelnou textilií pozorováno neobvyklé chování prvku po jejich odtížení, kdy došlo u desek k redukci průhybu a jejich navrácení do téměř rovinné polohy, čímž došlo k uzavírání trhlin. Tento jev nastal v důsledku nezáměrně vyvozeného předpětí v deskách velkými průhyby a jeho aktivací při odtížení. V případě těchto desek se toto kvazi-předpětí uplatní až při lokálním porušení desek, tj. při jejich přetížení. Toto předpětí lze nazvat také jako skryté předpětí desek, jelikož jeho vznik a aktivace je skrytá při výrobě desek. Aktivace předpětí a následné uzavírání trhlin v praxi znamená, že ani trhlinami porušené desky, i díky korozivní odolnosti použitých materiálů textilních výztuží, nemusí být nutně trvale

znehodnoceny a ohroženy následným kolapsem prvku, ale mohou dále sloužit svému účelu.

Spoje použité ortogonální výztuže působí jako kotevní body napínané výztuže a nemůže tak dojít k prokluzu prutů napínané výztuže z důvodu nízké soudržnosti mezi svazkem skelných vláken a betonovou matricí. Při napínání jsou využity výztužné pruty ve směru roviny působícího momentu, avšak při odlehčení se zapojuje kromě pevných spojů i výztuž kolmá na pruty vzdorující ohybu díky pevným spojům ortogonální výztuže. Ty lze považovat za hlavní nositele vzniku kvazi-předpětí, protože jejich absence by vedla po odlehčení desky ke ztrátě předpětí prokluzem. Napínání výztužných prutů ve směru působícího momentu vyvozené v důsledku zvětšujícího se průhybu nastává pouze mezi pevnými spoji ortogonální výztuže. Pevné spoje mají tendenci se vracet se s napínanou výztuží při odlehčení a zapojují do procesu příčné pruty ortogonální sítě. Tento efekt kvazi-předpětí může nastat i u výztuží z jiných materiálů, pokud předpětí hlavních nosných prutů bude v oblasti jejich pružného chování.

Jedním ze sledovaných parametrů byla homogenita zkušebních vzorků, která se v první fázi aplikace textilní výztuže jevila problematická, a to z důvodu tendence lehkého pórovitého kameniva vyplouvat k hornímu povrchu i při minimalizaci času potřebného k hutnění. To se projevilo zejména u tekutější konzistence čerstvého betonu vhodné pro výrobu tenkostěnných prvků a u desek vyráběných v horizontálním bednění. Tento pozorovaný jev vedl k další fázi experimentálního ověřování, tentokrát pro aplikace lehkého betonu s rozptýlenými vlákny. Od zvolené krátké vysokopevnostní oceli se očekávalo nejen zlepšení pevnostních charakteristik výsledného kompozitu, ale zejména eliminace výše zmíněné segregace. Dalším přínosem tohoto způsobu vyztužení je za předpokladu rovnoměrného rozmístění drátků vysoká pevnost matrice ve všech směrech, nejen vůči předpokládanému zatížení jako je tomu v případě směrově orientovaných vláken, například právě v textilní výztuži.

Účinek disperzní výztuže se projevuje tvorbou prostorové bariéry z rozptýlené výztuže, bránící při hutnění pohybu zrn lehkého pórovitého kameniva k horním povrchům vyráběných prvků. Tím je dosaženo homogenní struktury zhuštěného kompozita za předpokladu výroby homogenní struktury čerstvého betonu. Výsledky zkoušek vzorků s disperzní výztuží potvrzují přeměnu křehkého materiálu na materiál duktilní a navýšení jejich pevnostních charakteristik, především tahových. Rovnoměrné rozptýlení ocelových vláken přispívá k homogenitě tohoto kompozitu, což se projevuje mimo jiné malými směrodatnými odchylkami měřených pevnostních charakteristik.

Na referenčních vzorcích desek bylo ověřeno, že aplikace textilní i rozptýlené výztuže v kombinaci s lehkým betonem s pórovitým kamenivem do tenkostěnných prvků je reálná alternativa k dosud používaným materiálům a technologiím. Na zkušenosti s výrobou jednoduchých zkušebních vzorků lze navázat výrobu složitěji tvarovaných prvků. Snadná aplikovatelnost použitého technického řešení pro kvazi homogenní kompozit z jemnozrného lehkého betonu s pórovitým kamenivem a rozptýlenými ocelovými vlákny navíc rozšiřuje možnosti jejich využití ve stavební praxi. Kromě výroby uvažovaných tenkostěnných prvků mobiliáře je možná jejich aplikace i do nosných konstrukčních prvků staveb občanské vybavenosti, případně v netypických návrzích

stavebních výrobků. Experimentální výzkum zaměřený na vliv rozptýlené výztuže v konstrukcích z lehkého betonu s pórovitým kamenivem byl podkladem k podané patentové přihlášce s názvem „Kompozit z jemnozrnného hutného lehkého keramického betonu s lehkým kamenivem z expandovaného jílu“.

Reference

1. ČSN EN 13055 Pórovité kamenivo. str. 12 z 44.
2. Pytlík, Petr. *Technologie betonu*. 2. vyd. Brno : VUTIUM, 2000. str. 390. ISBN 80-214-1647-5.
3. Liapor. [Online] [Citace: 30. 12 2020.] <http://www.liapor.cz/>.
4. Drochytka, R. *Lehké stavební látky*. 1. vydání. Brno : Nakladatelství VUT, 1993. str. 124.
5. ČSN EN 206+A1 Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda.
6. ČSN EN 1097 Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva.
7. ČSN EN 1992-1-1 Eurokód 2 Navrhování betových konstrukcí - Část 1-1 Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby. str. 159 z 208.
8. Hela, Rudolf. *Technologie Betonu II*. Brno : učební opory VUT FAST Brno, 2007. str. 148.
9. Vakhshouri, Behnam a Nejadi, Shami. *Mix design of light-weight self-compacting concrete*. 10 2015. *Case Studies in Construction Materials*, Sv. 4.
10. CEMEX Příručka liaporbeton. [Online] 2006.
11. Hela, Rudolf. *Technologie betonu I*. 1. vyd. Brno : učební opory VUT FAST, 2005. str. 110.
12. Kohoutková, Alena. VLÁKNOBETONY – BLÝSKÁ SE NA LEPŠÍ ČASY? *BETON - technologie, konstrukce, sanace*. [Online] 2 2010. [Citace: 8. 5 2015.] str. 3-5. http://www.betontks.cz/sites/default/files/2010-2-03_0.pdf. ISSN 1213-3116.
13. ČSN P 73 2450 Vláknobeton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda.
14. Belendran, R. V., a další. Influence of steel fibers on strength and ductility of normal and lightweight high strength concrete. *Building and Environment*. 37, 2002, Sv. 12, 1361-1367.
15. Sachr, Pavel. Kompozitní materiály. [Online] http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/08/6_kompozitni-materialy.pdf.
16. Informační a vzdělávací centrum kompozitních technologií & Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky FS ČVUT. Kap. 1 Vláknové kompozitní materiály, jejich vlastnosti a výroba. [Online] 26. 10 2007. <https://docplayer.cz/4294044-Vlaknove-kompozitni-materialy-jejich-vlastnosti-a-vyroba.html>.
17. Fiala, Jiří. *Studium chování betonů při působení vysokých teplot*. Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců, 2015. str. 149, Diplomová práce. Vedoucí práce Ing. Lenka Bodnářová, Ph.D..
18. Plochý, Ondřej. *Lehké betony s rozptýlenou výztuží*. Brno : Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. Ústav technologie stavebních hmot a dílců., 2016. Bakalářská práce. Vedoucí práce Rudolf Hela..
19. Vítek, Jan L. a Vítek, Petr. Beton vyztužený vlákny a jeho aplikace v tunelech. [Online] č. 3 2017. https://www.ita-aites.cz/files/tunel/2017/tunel_3_17.pdf. ISSN 1211 – 0728.
20. Concrete reinforcement. *Bekaert.com*. [Online] <http://www.bekaert.com/en/products/construction/concrete-reinforcement/>.
21. Broukalová, Iva. *Aplikace cementových a betonových kompozitů v konstrukčních prvcích*. Praha : ČVUT v Praze, Fakulta stavební, 2017. Habilitační práce.
22. Krátký, Jiří, Vodička, Jan a Vašková, Jitka. NAVRHOVÁNÍ KONSTRUKČNÍCH PRVKŮ. *BETON - technologie, konstrukce, sanace*. [Online] 2 2010. str. 87-89. https://www.betontks.cz/sites/default/files/2010-2-87_0.pdf. ISSN 1213-3116.
23. Ju, Jiann-Wen Woody a Tehrani, F. M. Macro-element modeling of steel fiber-reinforced concrete. *Invited presentation, in Session on "Multi-Scale Description of Concrete Performance"*. Los Angeles, USA : sponsored by ACI Committee 236 (Concrete Material Science) in the Spring 2008 American Concrete Institute Conference, 30. Březen 2008.

24. Bartoš, Peter JM. Vláknobeton Fibre reinforced concrete. [Online] 14. 12 2012. <https://www.betontks.cz/sites/default/files/BETONOVE-KONSTRUKCE.pdf>. ISSN 1213 - 3116.
25. Hela, Rudolf. Technologie betonu II - přednášky. Brno : VUT Brno, 2016.
26. ACI Committee 554. State-of-the-art report on fiber reinforced concrete. *ACI Journal Proceedings*. 70, 1973, Sv. 11.
27. Petřík, Vojtěch a Helmut, Kurth. ZÁKLADNÍ ASPEKTY NAVRHOVÁNÍ VLÁKNOBETONOVÝCH KONSTRUKCÍ. *BETON - technologie, konstrukce, sanace*. [Online] 1 2007. [Citace: 8. 5 2015.] https://www.betontks.cz/sites/default/files/2007-1-46_0.pdf.
28. ČSN EN 14889-1 Vlákná do betonu - Část 1 : Ocelová vlákna. 2007.
29. Svaz výrobců betonu. Pojmy. *eBeton*. [Online] Sunnysoft.cz. [Citace: 23. 4 2016.] <http://ebeton.cz/pojmy/>.
30. Pavlíková, Milena. Vláknobeton - přednáška. [Online] 5. 10 2014. [Citace: 12. 10 2015.] <http://tpm.fsv.cvut.cz/student/documents/files/CHS/CHS7a.pdf>.
31. Krátký, Jiří, Trtík, Karel a Vodička, Jan. Drátkobetonové konstrukce: úvodní část a příklady použití: směrnice pro navrhování, provádění, kontrolu výroby a zkoušení drátkobetonových konstrukcí. 1. vyd Praha : Informační centrum České komory autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě, 1999. str. 107. ISBN 80-86364-00-3.
32. Fibre reinforced concrete - Typers, Properties and Advantages of Fibre Reinforce Concrete. <https://theconstructor.org>. [Online] 2012. [Citace: 23. 4 2016.] <https://theconstructor.org/concrete/fiber-reinforced-concrete/150/>.
33. <http://www.sklocement.cz/>. [Online] <http://www.sklocement.cz/>.
34. Základní princip výroby skleněných vláken SKLENĚNÉ PŘÍZE. *www.btto.cz*. [Online] [Citace: 1. 8 2018.] <http://www.btto.cz/cs/zakladni-princip-vyroby-sklenenych-vlaken> <https://www.btto.cz/cs/sklenena-prize>.
35. Legendre, André. *Uhlíkové materiály: Od černé keramiky k uhlíkovým vláknům*. Vyd. 1. Praha : Informatorium, 2001. str. 173. ISBN 80-86073-82-3.
36. Holub, Petr. Návrh jemnozrnné betonové směsi pro vyztužení uhlíkovými vlákny.
37. *Uhlíková vlákna*. Grégr, Jan. Trutnov : Muzeum Českého ráje v Turnově, 2005, Sborník Muzea Českého ráje v Turnově - Acta musei Turnoviensis 2005, MONOKRYSTALY, Sv. 1, stránky 107–119. ISBN 80-239-6435-6.
38. <http://sk.lft-pp.com/info/carbon-fiber-27889420.html>. [Online]
39. Karbon Idealny Material. <https://eco4friend.com/artukul.php?opi=8>. [Online]
40. <https://www.highconcrete.com/design-resources/design-tools-and-resources/c-grid/>. [Online]
41. Molter, M. a Hegger, J. Zum Tragverhalten von textilibewehrtem Beton. Aachen : Lehrstuhl und Inst. fuer Massivbau., 2005. ISBN 3-9807302-7-1.
42. ASTM International. ASTM C1609 / C1609M-19a, Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading). West Conshohocken, PA : autor neznámý, 2019.
43. Břejcha, Vladimír a Fidranský, Pavel. MOSTNÍ ŘÍMSA ZE SAMOZHUTNITELNÉHO VLÁKNOBETONU. *BETON - technologie, konstrukce, sanace*. [Online] 2 2010. str. 19-21. https://www.betontks.cz/sites/default/files/2010-2-19_0.pdf. ISSN 1213-3116.
44. <https://structurae.net/en/structures/bridges/fiber-reinforced-concrete-bridges>. [Online] <https://structurae.net/en/structures/bridges/fiber-reinforced-concrete-bridges>.
45. Hi-Con. STAIRCASES in ultra high performance concrete. [Online] <https://www.hi-con.com/media/zqiamq5w/hi-con-trappebrochure-gb-low-02-07.pdf>.
46. Šikola, P., Lajda, Š. a Černoch, J. Cyklopointy Chocenice. Praha : Architektonická kancelář DOMYJINAK s.r.o., 2013.

47. Cyklopoint u Vejsovského rybníka. [Online] <https://www.kudyznudy.cz/files/5f/5fd0d537-f751-49fd-ad30-373845163299.jpg?v=20200826070249>.
48. Plaggenborg. Textile-reinforced concrete with high-performance carbon fibre grids.
49. [Online] <http://www.textilbeton-aachen.de/information/textilbeton-was-ist-das/>.
50. Jesse, Frank a Curbach, Manfred. *Verstärken mit Textilbeton*. : Inst. für Massivbau, 2010. Sonderdruck aus dem Beton-Kalender 2010 (Studentenausgabe).
51. Kulas, Ch. a Hegger, J. *Zum Tragverhalten getraenkter textiler Bewehrungselemente fuer Betonbauteile*. Aachen : Lehrstuhl und Institut fuer Massivbau - IMB - Rhenisch-Westfalische Technische Hochschule Aachen, 2013. ISBN 978-3-939051-17-6.
52. Schlomski, Iris. Lightness, the key to the future; Techtexil Blog der Messe Frankfurt. *LIGHTNESS, THE KEY TO THE FUTURE*. [Online] 15. 07 2014. <https://www.techtexil-blog.com/en/lightness-the-key-to-the-future/>.
53. Winner of the Tudalit e.V. Architecture Contest. TUDALIT e.V. „Leichter Bauen – Zukunft formen“. 2015. Sv. 5.
54. Groz-Beckert AG. Textile-reinforced concrete bridge. Albstadt-Lautlingen, 2010.
55. Foto: van Stipriaan, Ulrich. *SLUB Lounger aus Textilbeton*. 23. 08 2013. TEXTILBETON-FORSCHUNG AN DER TU DRESDEN BETON/CAMPUS.
56. Foto: Roth, Lukas.
57. Designové výrobky z betonu - Dáváme betonu duši | Gravelli. <http://www.gravelli.com/cz/>. [Online]
58. Liapor Prohlášení o vlastnostech. *NR 17_2017*. 2017.
59. Vastl, František. *Návrh konferenčního stolku z lehkého betonu vyztuženého sítěmi*. Praha : České vysoké učení technické v Praze. Vypočetní a informační centrum., 2017. Bakalářská práce. Vedoucí práce doc. Ing. Jan Vodička, CSc.. KOS-587864730505.
60. ČSN EN 12350-8 (Zkoušení čerstvého betonu – Část 8: Samozhutnitelný beton – Zkouška sednutí-rozlitím).
61. EN 1015-3 (Zkušební metody malt pro zdivo – Část 3: Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím střešacího stolku)).
62. ČSN P 73 2451 (Vláknobeton – Zkoušení čerstvého vláknobetonu).
63. ČSN EN 12350-5 (Zkoušení čerstvého betonu - Část 5: Zkouška rozlitím) .
64. ČSN EN 12350-2 Zkoušení čerstvého betonu - Část 2: Zkouška sednutím.
65. ČSN EN 12350-3 Zkoušení čerstvého betonu - Část 3: Zkouška Vebe.
66. Soukromý archiv autorky.
67. ČSN EN 12390 - Zkoušení ztvrdlého betonu.
68. ČSN P 73 2452 (Vláknobeton – Zkoušení ztvrdlého vláknobetonu).
69. ČSN EN 12390-3 (Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles).
70. ČSN EN 12390-1 (Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 1: Tvar, rozměry a jiné požadavky na zkušební tělesa a formy).
71. ČSN EN 12390-5 (Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles).
72. ČSN EN 196-1 (Metody zkoušení cementu – Část 1: Stanovení pevnosti).
73. *Application of Prestressed CFRP Textiles for the Development of ThinWalled Concrete Structural Elements*. Osman-Letelier, Juan P., Hueckler, Alex and Schlaich, Mike. New York City : 2019 IABSE Congress – The Evolving Metropolis, 4-6 September 2019.

Reference

74. Lišková, Kateřina. *Chování tenkostěnných betonových desek vyztužených textilií*. Praha : České vysoké učení technické v Praze. Vypočetní a informační centrum., 2014. Vedoucí práce doc. Ing. Alena Kohoutková, CSc. KOS-512008970805.

75. Bydžovský, Jiří. *Vlastnosti a užití stavebních materiálů v konstrukcích*. Brno : autor neznámý, 2016.

76. Svaz výrobců betonu ČR. *Ocelová vlákna do betonu*. 2020.

Seznam obrázků

Obr. 1 Zrno Liaporu a jeho řez (3).....	4
Obr. 2 Zrna Liaporu frakce 8-16 (3)	5
Obr. 3 Struktura betonu: a) hutného lehkého betonu, b) mezerovitého lehkého betonu – přirozená mezerovitá struktura, c) mezerovitého lehkého betonu – napěněná struktura (8)	8
Obr. 4 Příklady uspořádání vláknové výztuže v kompozitech: a) jednosměrné uspořádání, b) tkanina, c) rohož, d) víceosá výztuž z kontinuálních vláken, e) krátká vlákna jednosměrně orientovaná, f) krátká vlákna s nahodilou orientací (15).....	13
Obr. 5 Princip přenesení tahového namáhání vláknem při vzniku trhliny ve vláknobetonu (20)	15
Obr. 6 Příklad pracovní diagram vláknobetonu s tahovým zpevněním a s tahovým změkčením (20).....	16
Obr. 7 Příklady ocelových vláken: (a) krátké drátky z vysokopevnostní oceli, (b) a (c) delší drátky se zahnutím na koncích (20)	18
Obr. 8 Příklady tvarů ocelových drátků a jejich koncových úprav (29)	19
Obr. 9 Nejběžnější povrchové úpravy ocelových vláken: (a) vlákna zahnutá na koncích, (b) vlákna nepravidelná, (c) vlákna deformovaná, (d) vlákna zvlněná, (e) vlákna leptaná, (f) vlákna pádlovitá (30)	19
Obr. 10 Pracovní diagram drátkobetonu (F) a prostého betonu (B) v tlaku (31)	20
Obr. 11 Pracovní diagram drátkobetonu (F) a prostého betonu (B) v tahu (31).....	20
Obr. 12 Porovnání běžných (vlevo) a alkalivzdorných skleněných vláken (vpravo) po několika týdnech v betonové matici (33).....	22
Obr. 13 Příklad skelných vláken v podobě sekaných pramenů (vlevo) a plošné výztuže z pramenů (33).....	22
Obr. 14 Princip výroby skelných vláken (34).....	23
Obr. 15 Schéma procesu spřádání a dlužení vláken PAN prekurzoru (35).....	25
Obr. 16 Příklad uhlíkových vláken ve formě sekaných krátkých vláken z cívky (38), plošné plné výztuže (39) a plošné síť s oky (40) (zleva doprava)	25
Obr. 17 Rozdělení vláknových kompozitních materiálů	26
Obr. 18 Příklad rozdílného způsobu vyztužení ve (b) vláknobetonu s rozptýlenými vlákny a v (c) textilním betonu v porovnání s (a) železobetonem (41)	27
Obr. 19 Diagram odolnosti v tahu za ohybu vláknobetonu s rozptýlenou výztuží (42).....	29
Obr. 20 Mostní římsa (43)	30
Obr. 21 Silniční svodidla (43)	30
Obr. 22 Most míru – Seonyu Bridge (21)	31
Obr. 23 Most André-Lévy (44).....	31
Obr. 24 Dřevěná forma bednění (21)	31
Obr. 25 Spojené plovoucí ostrůvky (21).....	31
Obr. 26 Zastřešení zastávky, Shawnessy (21)	32
Obr. 27 Mýtná brána, Millau (21)	32
Obr. 28 Pohled na lávku z UHPC (21)	32
Obr. 29 Fasádní panely muzea MuCEM (21)	32
Obr. 30 Schodiště pro Artíng (45)	33
Obr. 31 Schodiště ve škole Sydhavnsskolen (45)	33
Obr. 32 Architektonická studie cyklopointu (46).....	33

Seznam obrázků

Obr. 33 Realizace cyklopointu (47)	33
Obr. 34 Porovnání napětí na průřezích textilních vláken – bez úpravy a epoxidem spřažené (50)	35
Obr. 35 Pracovní diagram TRC v tahu (51).....	36
Obr. 36 Oblast IIa pracovního diagramu TRC v tahu – příklad idealizovaného a reálného průběhu (51)	37
Obr. 37 Pavilon v Löbau (52).....	38
Obr. 38 Betonová mřížka (53)	38
Obr. 39 Most pro pěší v Lautlingenu (54).....	38
Obr. 40 Detail vyztužení mostu pro pěší v Lautlingenu (54)	38
Obr. 41 SLUB lehátko (55)	39
Obr. 42 Lehátko (56)	39
Obr. 43 Gravelli (57)	39
Obr. 44 Gravelli (57)	39
Obr. 45 Gravelli (57)	39
Obr. 46 Gravelli (57)	39
Obr. 47 Příklad konzistence vhodné do horizontálního bednění s vloženou prostorovou skelnou textilií (66).....	43
Obr. 48 Příklad konzistence receptury pro LWAFC, bez rozptýlených ocelových vláken (66)	43
Obr. 49 Znárodnění zkoušky v tlaku na krychli o rozměrech 150/150/150 mm	44
Obr. 50 Uspořádání zkoušky v tahu za ohybu na hranolech o rozměrech 100/100/400 mm pro tříbodový (vlevo) a čtyřbodový ohyb (vpravo).....	45
Obr. 51 Uhlíková síť Solidian GRID Q142-CCE-25 (73)	46
Obr. 52 Geometrie uhlíkové sítě Solidian GRID Q142-CCE-25	46
Obr. 53 Srovnání hustoty sítí obou sad použitých skelných textilií (66).....	47
Obr. 54 Schéma umístění čedičové textilie v deskách jednostranně a oboustranně vyztužených	48
Obr. 55 Bednění desky s čerstvým betonem a vloženou čedičovou textilií (66).....	48
Obr. 56 Rozestavení zkoušky ohybem pro textilií jednostranně vyztužené desky (66)	48
Obr. 57 Vertikální bednění s vypnutou čedičovou textilií (66)	49
Obr. 58 Pohled na desku s čedičovou textilií po odbednění (66).....	49
Obr. 59 Porovnání průměrných výsledků zkoušek desek s čedičovou textilií v tahu za ohybu ..	49
Obr. 60 Schéma umístění uhlíkové textilie v deskách jednostranně a oboustranně vyztužených	50
Obr. 61 Bednění s uhlíkovou textilií (66)	50
Obr. 62 Detail distančních prvků (66).....	50
Obr. 63 Srovnání výsledků zkoušek v tahu za ohybu	51
Obr. 64 Vertikální bednění s nálevkou (66).....	52
Obr. 65 Boční pohled na vertikální bednění pro desku s nálevkou a fixovanou uhlíkovou textilií (66)	52
Obr. 66 Deska s plošnou uhlíkovou textilií po odbednění (66).....	52
Obr. 67 Trámce po odbednění (66).....	52
Obr. 68 Schéma zatěžování desek při zkoušce v tahu za ohybu - čtyřbodový ohyb	53

Obr. 69 Vyztužená deska při zkoušce v tahu za ohybu (66).....	53
Obr. 70 Průběh trhlin v deskách (66)	53
Obr. 71 Umístění plošné uhlíkové textilie v desce tl. 25 mm	54
Obr. 72 Srovnání průběhu zkoušek desek tl. 25 mm v tahu za ohybu	55
Obr. 73 Umístění plošné uhlíkové textilie v desce tl. 20 mm	56
Obr. 74 Srovnání průběhu zkoušek desek tl. 20 mm v tahu za ohybu	57
Obr. 75 Porovnání průměrných průběhů zkoušek v tahu za ohybu pro desky vyztužené uhlíkovou textilií a nevyztužené	57
Obr. 76 Vertikální bednění s nálevkou (59)	59
Obr. 77 Horizontální bednění s vloženou prostorovou skelnou textilií (59)	59
Obr. 78 Kávový stůl (59).....	59
Obr. 79 Způsob uložení výztuže ve vertikálním bednění pro desku (59).....	59
Obr. 80 Umístění skelné textilie v desce tl. 18 mm	60
Obr. 81 Schéma zatěžování desek při zkoušce v tahu za ohybu - tříbodový ohyb	61
Obr. 82 Pohled na uspořádání zkoušky tříbodovým ohybem (66).....	61
Obr. 83 Pohled na namáhaný povrch v okamžiku ukončení zkoušky (66)	61
Obr. 84 Pohled na desku s téměř uzavřenými trhlinami po ukončení zkoušky ohybem (66)	62
Obr. 85 Pohled na desku s redukovanou trvalou deformací po odtížení (66)	62
Obr. 86 Porovnání průběhu zkoušky v tahu za ohybu pro desky horizontálně a vertikálně betonované vyztužené prostorovou skelnou textilií – závislost napětí na průhybu	63
Obr. 87 Deska z vertikálního bednění s patrným rozvrstvením (59).....	63
Obr. 88 Detail povrchu desky z vertikálního bednění s patrným rozvrstvením (59)	63
Obr. 89 Nerovnoměrné rozmístění složek betonu v desce z horizontálního bednění (59).....	64
Obr. 90 Nerovnoměrné rozmístění složek betonu v trámci (59)	64
Obr. 91 Umístění prostorové skelné textilie v desce tl. 18 mm.....	65
Obr. 92 Umístění prostorových skelných textilií v horizontálním bednění (66).....	65
Obr. 93 Detail distačního prvku (66)	65
Obr. 94 Pohled na čerstvě uložený beton do bednění desek (66).....	65
Obr. 95 Pohled na vybetonované vzorky desek zakryté folií (66).....	65
Obr. 96 Pohled na spodní strany odbedněných desek se sítí A (66)	66
Obr. 97 Pohled na spodní strany odbedněných desek se sítí B (66)	66
Obr. 98 Schéma zatěžování desek při zkoušce v tahu za ohybu - tříbodový ohyb	67
Obr. 99 Deska při zkoušce ohybem (66).....	67
Obr. 100 Detail porušení desky při zkoušce ohybem (66).....	67
Obr. 101 Pohled na desky se sítí A s téměř uzavřenými trhlinami po zkouškách ohybem (66) .	69
Obr. 102 Pohled na desky se sítí B s téměř uzavřenými trhlinami po zkouškách ohybem (66) .	69
Obr. 103 Průběh zkoušky tahem za ohybu pro dvě sady desek vyztužených prostorovou skelnou textilií	69
Obr. 104 Porovnání průměrných hodnot při zkoušce tahem za ohybu do průhybu 12 mm pro dvě sady desek vyztužených prostorovou skelnou textilií	70
Obr. 105 Vnitřní struktura na lomech trámů (66).....	70
Obr. 106 Vnitřní struktura v řezu desky (66)	70
Obr. 107 Vzhled a geometrie vláken (20)	73

Seznam obrázků

Obr. 108 Porovnání průběhu zkoušky trámců v tahu za ohybu pro první sadu úvodních vzorků	74
Obr. 109 Porovnání průběhu zkoušky trámců v tahu za ohybu pro druhou sadu úvodních vzorků	75
Obr. 110 Zkouška krychlí v tlaku pro druhou sadu úvodních vzorků	76
Obr. 111 Zkouška v tlaku pro druhou sadu úvodních vzorků – průměrné hodnoty	77
Obr. 112 Rozlomený vyztužený trámec (66)	77
Obr. 113 Vyztužené krychle po zkoušce v tlaku (66)	77
Obr. 114 Porovnání průběhu zkoušky trámců v tahu za ohybu pro vzorky druhé a třetí úvodní sady	79
Obr. 115 Geometrické rozměry desek sady A a B (vlevo) a C (vpravo)	80
Obr. 116 Pohled na horizontální bednění (66)	80
Obr. 117 Pohled desku při odbedňování (66)	80
Obr. 118 Schéma zatěžování desek při zkoušce v tahu za ohybu – vlevo čtyřbodový (sady A, B) a vpravo třibodový ohyb (sada C)	81
Obr. 119 Průběh zkoušky tahem za ohybu pro trámce s rozptýlenými ocelovými vlákny sady A	82
Obr. 120 Trámce po zkoušce tahem za ohybu (66)	82
Obr. 121 Zkouška v tlaku na zbytcích trámců (66)	82
Obr. 122 Deska po zkoušce tahem za ohybu (66)	84
Obr. 123 Pohled na desku po vyjmutí z lisu (66)	84
Obr. 124 Průběh zkoušky tahem za ohybu pro desky s rozptýlenými ocelovými vlákny sady A	84
Obr. 125 Pohled na vnitřní strukturu trámce bez výztuže (66)	85
Obr. 126 Pohled na vnitřní strukturu trámce s výztuží (66)	85
Obr. 127 Pohled na desku po vyjmutí z lisu (66)	87
Obr. 128 Deska při zkoušce tahem za ohybu (66)	87
Obr. 129 Závislost síly na průhybu pro dva snímače průhybu pro desku Db4 při zkoušce tahem za ohybu	87
Obr. 130 Průběh zkoušky tahem za ohybu pro desky s rozptýlenými ocelovými vlákny sady B, sušší receptura	88
Obr. 131 Průběh zkoušky tahem za ohybu pro desky s rozptýlenými ocelovými vlákny sady B, tekutá konzistence	89
Obr. 132 Pohled na vnitřní strukturu rozříznuté desky sady B (66)	89
Obr. 133 Deska při zkoušce tahem za ohybu (66)	90
Obr. 134 Pohled na desky po vyjmutí ze zkušebního zařízení (66)	90
Obr. 135 Průběh zkoušky tahem za ohybu pro desky s rozptýlenými ocelovými vlákny sady C, tekutá konzistence shodná s druhou záměsí sady B	90
Obr. 136 Pohled na vnitřní strukturu rozlomené desky sady C (66)	91
Obr. 137 Detail horního povrchu desky (66)	92
Obr. 138 Pohled na horní povrch desky – nahoře s úpravou nabetonávkou, dole bez úpravy (66)	92

Seznam tabulek

Tabulka 1 Klasifikace lehkého betonu podle objemové hmotnosti	7
Tabulka 2 Třídy pevnosti v tlaku lehkého betonu.....	7
Tabulka 3 Porovnání mechanických vlastností vláken a kompaktních materiálů (15)	14
Tabulka 4 Přehled desek zkoušených v tahu za ohybu.....	45
Tabulka 5 Výsledky zkoušek trámců v tahu za ohybu	54
Tabulka 6 Výsledky zkoušek vyztužených desek tl. 25 mm v tahu za ohybu.....	54
Tabulka 7 Výsledky zkoušky nevyztužené desky tl. 25 mm v tahu za ohybu.....	55
Tabulka 8 Výsledky zkoušek trámců v tahu za ohybu	55
Tabulka 9 Výsledky zkoušek v tlaku na zlomcích trámců	56
Tabulka 10 Výsledky zkoušek vyztužených desek tl. 20 mm v tahu za ohybu.....	56
Tabulka 11 Výsledky zkoušky trámce o rozměrech 100/100/400 mm v tahu za ohybu	60
Tabulka 12 Výsledky zkoušek trámců o rozměrech 40/40/160 mm v tahu za ohybu.....	60
Tabulka 13 Výsledky zkoušek na krychlích o rozměrech 100/100/100 mm v tlaku.....	61
Tabulka 14 Výsledky zkoušek desek v tahu za ohybu.....	62
Tabulka 15 Výsledky zkoušek trámců o rozměrech 40/40/160 mm v tahu za ohybu.....	66
Tabulka 16 Výsledky zkoušek krychlí v tlaku.....	67
Tabulka 17 Výsledky zkoušek desek 18/150/620 mm v tahu za ohybu	68
Tabulka 18 Přehled desek zkoušených v tahu za ohybu.....	72
Tabulka 19 Výsledky zkoušek trámců v tahu za ohybu první sady úvodních vzorků	74
Tabulka 20 Výsledky zkoušek trámců v tahu za ohybu pro druhou sadu úvodních vzorků	75
Tabulka 21 Výsledky zkoušek krychlí v tlaku pro druhou sadu úvodních vzorků	76
Tabulka 22 Výsledky zkoušky trámců v tahu za ohybu pro třetí sadu úvodních vzorků.....	78
Tabulka 23 Výsledky zkoušky krychlí v tlaku pro třetí sadu úvodních vzorků	78
Tabulka 24 Srovnání průměrných výsledků zkoušek v tahu za ohybu pro úvodní sady vzorků. 78	
Tabulka 25 Průměrné výsledky zkoušek v tlaku pro druhou a třetí úvodní sadu vzorků.....	79
Tabulka 26 Výsledky zkoušek trámců sady A v tahu za ohybu	81
Tabulka 27 Výsledky zkoušek v tlaku na zlomcích trámců sady A.....	83
Tabulka 28 Výsledky zkoušek desek sady A v tahu za ohybu	83
Tabulka 29 Výsledky zkoušek nevyztužených trámců sady B v tahu za ohybu (první záměs) ..	85
Tabulka 30 Výsledky zkoušek vyztužených trámců sady B v tahu za ohybu (první záměs)	85
Tabulka 31 Výsledky zkoušek vyztužených trámců sady B v tahu za ohybu (druhá záměs).....	86
Tabulka 32 Výsledky zkoušky v tlaku pro nevyztužené krychle sady B (první záměs)	86
Tabulka 33 Výsledky zkoušky v tlaku pro vyztužené krychle sady B (druhá záměs)	86
Tabulka 34 Porovnání posunů měřených ve dvou bodech desek sady B v tahu za ohybu (druhá záměs).....	87
Tabulka 35 Výsledky zkoušek vyztužených desek sady B v tahu za ohybu (první záměs)	88
Tabulka 36 Výsledky zkoušek vyztužených desek sady B v tahu za ohybu (druhá záměs)	88
Tabulka 37 Výsledky zkoušek vyztužených desek sady C v tahu za ohybu	90
Tabulka 38 Průměrné výsledky zkoušek vyztužených desek sad A-C v tahu za ohybu	91

Symbols

Symbol	Jednotka	Veličina
A	[m ²]	plocha
A _c	[m ²]	průřezová plocha betonu
A _t	[m ²]	průřezová plocha textilních vláken
b	[mm]	šířka průřezu
d	[m]	ekvivalentní průměr vlákna
D _{max}	[mm]	maximální velikost zrna kameniva
E _c	[GPa]	modul pružnosti betonu
E _{comp}	[GPa]	modul pružnosti kompozitu
E _t	[GPa]	modul pružnosti textilních vláken
f	[tex]	jemnost vlákna
F	[kN]	síla, zatížení
f _c	[MPa]	pevnost v tlaku
f _{ck, cube}	[MPa]	charakteristické pevnost v tlaku na krychli
f _{ck, cyl}	[MPa]	charakteristické pevnost v tlaku na válci
f _{ct,fl}	[MPa]	pevnost v tahu ohybem
f _{ctm}	[MPa]	průměrná hodnota pevnosti betonu v tahu za ohybu
F _{max}	[kN]	maximální síla, maximální zatížení
f _t	[MPa]	pevnost v tahu
F ₁	[kN]	absolutní hodnota tahové síly bezprostředně před vznikem trhlin vyvozených momentem na mezi vzniku trhlin
h	[mm]	výška průřezu
l	[mm]	vzdálenost mezi podpěrnými válečky
L	[m]	délka vlákna
l _c	[m]	kritická délka
m	[kg]	hmotnost
m _s	[kg]	hmotnost suché dávky
m _v	[kg]	hmotnost vlhké dávky
v	[%]	hmotnostní vlhkost
V _f	[m ³]	objem vláken ve vláknobetonu
V _{fc}	[m ³]	objem vláknobetonu
w ₁₂₀	[kg/m ²]	nasákavost po 120 h kontaktu materiálu s kapalnou vodou
y	[mm]	svislý posun
y _{fin}	[mm]	trvalá deformace

y_{\max}	[mm]	svislý posun odpovídající maximálnímu zatížení
y_1	[mm]	svislý posun bezprostředně před vznikem trhlin vyvozených momentem na mezi vzniku trhlin
σ	[MPa]	napětí
σ_{\max}	[MPa]	maximální napětí
σ_t	[MPa]	tahové napětí
σ_1	[MPa]	hodnota tahového napětí bezprostředně před vznikem trhlin vyvozených momentem na mezi vzniku trhlin
ε	[-]	poměrné přetvoření
ε_t	[-]	tahové poměrné přetvoření
$\rho_{v,f}$	[%]	objemový stupeň ztužení vlákniny
δ	[mm]	deformace
δ_1	[mm]	deformace bezprostředně před vznikem trhlin vyvozených momentem na mezi vzniku trhlin
$\delta_{F\max}$	[mm]	deformace odpovídající maximálnímu zatížení
ρ	[kg/m ³]	měrná hmotnost
ρ_v	[kg/m ³]	objemová hmotnost
ε_{cr}	[-]	poměrné přetvoření bezprostředně před vznikem trhlin
$\varepsilon_{cr,t}$	[-]	poměrné přetvoření vláken textilie bezprostředně před vznikem trhlin
$\varepsilon_{cr,c}$	[-]	poměrné přetvoření betonu bezprostředně před vznikem trhlin
ω_l	[-]	míra vyztužení

Zkratky

Zkratka	Popis
AR	odolný vůči alkáliím (alkali resistance)
C	beton (concrete)
CO ₂	oxid uhličitý
FRC	vláknobeton (fibre reinforced concrete)
HPC	vysokohodnotný beton (high performance concrete)
HSC	vysokopevnostní beton (high strength concrete)
LC	lehký beton (lightweight concrete)
LWA	pórovité kamenivo (lightweight aggregate)
LWAC	lehký beton s pórovitým kamenivem (lightweight aggregate concrete)
LWAFRC	lehký vláknobeton s pórovitým kamenivem (lightweight aggregate fibre reinforced concrete)
LWATRC	lehký textilní beton s pórovitým kamenivem (lightweight aggregate textile reinforced concrete)
PAN	polyakrylonitril
pH	vodíkový exponent (potential of hydrogen)
QLE	kvazilineárněpružný (quasilinear elastic)
QPL	kvaziplastický (quasi-plastic)
SCC	samozhutnitelný beton (self-compacting concrete)
SFRC	drátkobeton (steel fibre reinforced concrete)
SiC	karbid křemičitý
TRC	textilní beton (textile reinforced concrete)
UHPC	ultra-vysokohodnotný beton (ultra-high performance concrete)
1D	jednorozměrný (one-dimensional)
2D	dvourozměrný (two-dimensional)
3D	trojrozměrný (three-dimensional)

Přílohy

Příloha 1 Liapor	112
Příloha 2 Technický list Drátky Dramix	113
Příloha 3 Technický list Superplastifikační přísada Stachement 2095	116
Příloha 4 Technický list Prášková příměs Stachesil S	117



výrobce: Lis Vintřov, lehký stavební materiál k. s., CZ 357 35 Vintřov 176, DIČ: CZ46882324

20

1020-CPR-030028236 (PoV č.22)

a) ČSN EN 13055-1:2002/AC:2004 b) ČSN EN 13055-2:2004 *

Liapor

a) lehké kamenivo z expandovaného jílu pro použití jako kamenivo a filer do betonu, malty a injektážní malty

b) lehké kamenivo z expandovaného jílu pro nestmelené a stmelené aplikace

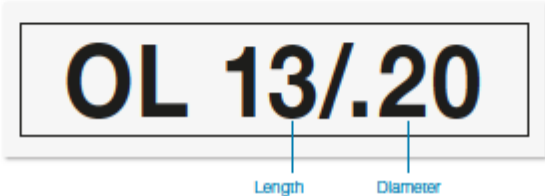
Druh	Liapor																	
	Liapor 5-10/20 *	Liapor 4-8/10 *	Liapor 4-8/40	Liapor 4-8/80	Liapor 1-4/100	Liapor 1-4/25	Liapor 0-1/20/0/25	Liapor 0-1/30/0/50	Liapor 0-1/30/0/25	Liapor 0-4/60/0/50	Liapor 0-10/10/0/25	Liapor 0-20/25	Liapor 0-40/50	Liapor 0-4/15/10	Liapor 0-1/10/0/25	Liapor 0-10/10/0/50		
Tvar zrn	Oválné až kulovité, uzzviřená zrna																	
Frakce	0/1	4/8	4/8	4/8	5/4	0/4	5/4	0/4	0/4	0/4	0/4	2/4	0/2	0/4	0/4	0/1	0-8	1/8
Sypná hmotnost (kg/m ³)	275	350	450	500	500	825	475	500	525	550	575	450	575	500	810	850	450	250
Tolerance sypné hmotnosti (%)	±10	±10																
Objemová hmotnost zrna	575	700	850	1150	525	1050	675	920	875	1000	1025	830	1050	1250	800	1900	1000	930
Tolerance objemové hmotnosti (%)	±10																	
Nasákavost w ₅ (% hm., max)	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	5	5	5	2	3
Nasákavost w ₁₀ (% hm., max)	5	6	4	4	4	4	4	4	5	5	5	4	5	6	6	6	3	4
Nasákavost w ₃₀ (% hm., max)	7	7	5	5	5	5	5	5	4	4	4	5	4	5	5	5	4	5
Nasákavost w ₆₀ (% hm., max)	8	8	6	6	6	6	6	6	5	5	5	6	5	6	6	6	4	6
Číselnost ovz. hran (třífázový materiál) (MPa, min)	0,9	1,2	1,7	4,2	3,0	4,2	2,3	3,0	3,4	3,7	3,0	2,1	4	-	-	-	-	-
Číselnost ovz. hran (zrnitá a rozptavená) (5 zrnky hm., max)	2,0																	
Číselnost ovz. hran (kolektivně měřeno) dle ČSN 721179	Dílčecí hodnota zkouška, rozptavená po 3 měsících < 0,05%, po 6 měsících < 0,1%																	
Čistota (% hm.)	< 0,02																	
Sílepy rozpustné v kyselině (% hm.)	< 0,8																	
Čulokovost (% hm.)	< 1,0																	
Chemické složení (% hm.)	SiO ₂ 65 ± 5, Al ₂ O ₃ 24 ± 5, Fe ₂ O ₃ 14 ± 5, CaO 6 ± 5, stopové prvky 2 ± 2																	
Součinitel tepelné vodivosti (W/m·K)	0,0	0,10	0,18	0,14	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,12	0,12	0,11	0,12	0,12	0,10	0,15	0,16	0,14
Třída izolace	A1 (EN 4102)																	
Radionuklid	F1 < 1, F2 < 100 Bq/kg																	
Procentní podíl fluoridů (h ₂ o (% h ₂ o))	< 0																	
Jerné záření (< 0,003 mm)	< 1,0																	

Doplňkové údaje

Zrnitost	Přesad (% hm.)																Síť (mm)			
	0/1	2	5	7	10	15	20	25	30	40	50	60	80	100	150	200	250	300	350	400
0/1	-	-	-	-	0,10	0,25	0,7	0,7	3	5	7	14	15	-	0,10	10,0	0,5	85,85	0,12	0,10
2	-	-	-	-	3	10	3	3	5	7	10	1	3	40	5	40	5	80	7,0	10
5	-	-	-	-	10	20	5	10	20	25	30	1	25	10	10	20,00	0,15	65,10	5,20	3,15
7	-	-	-	-	10	20	5	10	20	25	30	1	25	10	10	20,00	0,15	65,10	5,20	3,15
10	-	-	-	-	10	20	5	10	20	25	30	1	25	10	10	20,00	0,15	65,10	5,20	3,15
15	-	-	-	-	10	20	5	10	20	25	30	1	25	10	10	20,00	0,15	65,10	5,20	3,15
20	-	-	-	-	10	20	5	10	20	25	30	1	25	10	10	20,00	0,15	65,10	5,20	3,15
25	-	-	-	-	10	20	5	10	20	25	30	1	25	10	10	20,00	0,15	65,10	5,20	3,15
30	-	-	-	-	10	20	5	10	20	25	30	1	25	10	10	20,00	0,15	65,10	5,20	3,15
40	-	-	-	-	10	20	5	10	20	25	30	1	25	10	10	20,00	0,15	65,10	5,20	3,15
50	-	-	-	-	10	20	5	10	20	25	30	1	25	10	10	20,00	0,15	65,10	5,20	3,15
60	-	-	-	-	10	20	5	10	20	25	30	1	25	10	10	20,00	0,15	65,10	5,20	3,15
80	-	-	-	-	10	20	5	10	20	25	30	1	25	10	10	20,00	0,15	65,10	5,20	3,15
100	-	-	-	-	10	20	5	10	20	25	30	1	25	10	10	20,00	0,15	65,10	5,20	3,15
150	-	-	-	-	10	20	5	10	20	25	30	1	25	10	10	20,00	0,15	65,10	5,20	3,15
200	-	-	-	-	10	20	5	10	20	25	30	1	25	10	10	20,00	0,15	65,10	5,20	3,15
250	-	-	-	-	10	20	5	10	20	25	30	1	25	10	10	20,00	0,15	65,10	5,20	3,15
300	-	-	-	-	10	20	5	10	20	25	30	1	25	10	10	20,00	0,15	65,10	5,20	3,15

tel.: +420 357 37 41 44, fax: +420 352 66 58 08, e-mail: info@liapor.cz, www.liapor.cz
 Liapor 1020 CZ

strana: 1/1





DATASHEET

Characteristics

Material properties
Bright, High Carbon wire
Nom. tensile strength: 2.750 (N/mm²)
Young's modulus: 200.000 (N/mm²)

Geometry

Length (l): 13 mm 

Diameter (d): 0,2 mm 

Fibre network
220.394 m³/m³ at 60 kg/m³
282.558 fibres/kg



Product certificates*



Product conformity
Dramix® conforms to ASTM A820,
EN 14889-1.

System certificates



All Dramix® plants are ISO 9001 and ISO 14001 certified.

Packaging



kg / bag: 15
bags / pallet: 50
kg / pallet: 750




DRAMIX® OL 13/20

THE HIGH PERFORMANT STRENGTH




Dramix® OL is a high performant fiber to create optimal ductility in UHPC.

BEKAERT CONSTRUCTION SUPPORT

You can count on our support for each step of your project, from concept design to on-site quality support. Our services include recommendations on slab design, construction detailing, concrete optimization and automatic total quality control procedures. We are also happy to share our knowledge with you and your team. Feel free to ask us for a workshop or training on the topic of steel fiber reinforcement in your offices.

For recommendations on handling, dosing and mixing visit www.bekaert.com/dosingdramix. Any other specific document or certificate can be found on www.bekaert.com/doc/Dramix_OL.

Datasheet_Dramix OL 13/20_UK_20190320

EC Declaration of Performance DRAMIX® OL 13/20	CUSTOMER INFORMATION
<p>1. Unique identification code of the product: DRAMIX® OL 13/20</p> <p>2. Intended use : DRAMIX® OL 13/20 are steel fibres, made of cold-drawn wire, for STRUCTURAL USE in concrete, mortar and grout.</p> <p>3. Manufacturer: NV BEKAERT SA Bekaertstraat 2, B-8550 Zwevegem, Belgium</p> <p>5. System of assessment and verification of constancy of performance of the construction product: System n°1</p> <p>6a. Harmonized Standard: EN 14889-1: 2006.</p> <p>Notified Body: TZUS - registration nr: 1020 / CZ-19000 Praha 9, Prosecká 811/76a</p> <p>7. Declared performance: the essential characteristics per product type are listed in table 1.</p> <p>The performance of the products above and listed in table 1, is in conformity with the declared performance in point 7. This declaration of performance is issued, in accordance with regulation (EU) N°305/2011 under the sole responsibility of the manufacturer identified above.</p> <p>Signed for and on behalf of the manufacturer by: Tom Hautekiet, Vice President Building Products - NV Bekaert SA</p>	
	<p>Approved by: Tom Hautekiet</p>  <p>Issued and signed on version date, Zwevegem-Belgium.</p> 

Disclaimer: This Customer Information shall not constitute a guarantee for any specific product features. Final determination of suitability of this material is the sole responsibility of the user.

DOP_CI.00005.BKZW/Version-3: 2019/05/27

Building Products//Geert Demeyere/ Jan Kiska

Replaces: V2-2019/02/06

Creationdate 2019/07/17 – Language EN Page 1/2

Electronically approved

Off-line or printed copy is uncontrolled !

**EC Declaration of Performance
DRAMIX® OL 13/.20**

**CUSTOMER
INFORMATION**

Addendum to pt 7. Declared Performance on essential characteristics – see table 1

Table 1: Declaration on essential characteristics in accordance with EN 14889-1: 2006.	
Product type	DRAMIX® OL 13/.20
EC Certificate of constancy of performance Issued by notified body	1020-CPR-010034144
Fibre shape	Straight
Bundling	Loose
Coating	-
Length (mm)	13
Diameter (mm)	0,21
Aspect Ratio	62
Tensile Strength (N/mm ²)	2750
Effect on consistence (s)	10
Effect on strength of concrete (kg/m ³)	60
Release of dangerous substances	No
Durability	NPD
Modulus of elasticity (GPa)	200

Disclaimer: This Customer Information shall not constitute a guarantee or warranty for any specific product features. Final determination of suitability of this material is the sole responsibility of the user.

DOP_CI.00005.BKZW/Version-3: 2019/05/27

Building Products//Geert Demeyere/ Jan Kiska

Replaces: V2-2019/02/06

Creationdate 2019/07/17 – Language EN Page 2/2

Electronically approved

Off-line or printed copy is uncontrolled !

STACHEMENT 2095

Superplastifikační přísada



Popis výrobku

STACHEMENT 2095 je přísada na bázi polykarboxylátů s vysokým plastifikačním účinkem.

Použití

STACHEMENT 2095 se používá při výrobě prefabrikovaných betonových dílců. Výrobek lze po odzkoušení aplikovat i při výrobě transportbetonu, SCC, monolitických betonových konstrukcí, lehkého betonu a průmyslových podlah.

- Umožňuje výrobu betonů vysokých pevnostních tříd ze směsí tekuté konzistence při relativně nízké spotřebě cementu.
- Pokud se jeho ztekucující účinek využije pro snížení množství záměsové vody, zvyšuje počáteční i konečné pevnosti betonu. To umožňuje efektivnější využití bednění a forem, snížení nákladů na UTB ohřev nebo snížení dávky cementu.
- Zlepšuje čerpatelnost betonové směsi, která si uchovává i při tekuté konzistenci soudržnost bez segregace kameniva a odloučení vody.
- Zvyšuje pevnost, vodotěsnost a odolnost betonu vůči klimatickým i chemickým vlivům.
- Nezvyšuje obsah vzduchu ve směsi, neovlivňuje provzdušnění dosažené vhodnou provzdušňovací přísadou použitou pro zvýšení mrazuvzdornosti a odolnosti betonu vůči chemickým rozmrazovacím látkám.
- Nemění barvu betonu a nevytváří výkvěty.
- Je nehořlavý a fyziologicky neškodný.
- Neobsahuje chloridy, a je proto vhodný do armovaných a předpjatých betonů.

Používání přísady v kombinaci s jinými výrobky

STACHEMENT 2095 lze používat v kombinaci s ostatními výrobky společnosti STACHEMA CZ s.r.o. např. provzdušňovacími přísadami, zpomalovacími přísadami, stabilizátory betonových směsí, urychlovači tvrdnutí, odbedňovacími prostředky, ochranným nátěrem na beton apod. Pro konkrétní aplikaci se prosím obraťte na naše odborníky.

Vlastnosti výrobku

druh přísady

Superplastifikační přísada
EN 934-2: T 3.1/3.2

č. certifikátu

0921-CPR-2000

řízení výroby

Dle ČSN ISO 9001 a ČSN EN 934 – 2/6

vzhled

Červenohnědá homogenní kapalina

hustota

1065 ± 20 kg m⁻³

sušina

30 ± 1 hm. % (při 105°C po dobu 4 hod.)

pH

5 – 7

Maximální obsah chloridů:

0,1 % hm.

Maximální obsah alkálií:

1,5 % ekv. Na₂O

Korozivní vlastnosti:

Schváleno dle ČSN EN 934-1, obsahuje pouze složky uvedené v příloze A.1 z EN 934-1:2008

Dávkování

Dávku je třeba určit v rámci průkazných zkoušek. Doporučená dávka je od 0,4 – 1,4% z hmotnosti cementu. Přísada se dávkuje do záměsové vody nebo s výhodou vyššího účinku do už vlhké směsi ke konci míchání.

POZOR ! - Při použití Stachementu 2095 se při konstantní konzistenci může snížit dávka vody až o 30%. Vhodnost kombinace Stachementu 2095 s jinými přísadami musí být prokázáno průkazní zkouškou.

Stránka 1 z 2

dáváme betonu charakter

STACHEMA CZ s.r.o.
Divize Stavební chemie
Havelské 1, Zlín, 760 01, ČR
tel.: +420 321 722 335
stachema@stachema.cz
www.stachema.cz

STACHESIL S

Prášková příměs do betonových směsí



Popis výrobku

STACHESIL S je prášková bezchloridová příměs do betonových směsí výrazně zlepšující vlastnosti čerstvých i zatvrdlých betonů.

Použití

STACHESIL S se používá jako příměs do betonových směsí se všemi druhy cementu, především při výrobě vysokopevnostních betonů. Má vliv na:

- zlepšení reologických vlastností čerstvé směsi;
- snížení množství záměsové vody - má zásadní vliv na zvýšení pevnosti a umožňuje snížit obsah cementu;
- zvýšení vodotěsnosti a trvanlivosti betonu;
- zvýšení odolnosti betonu vůči agresivnímu prostředí - síranové vody, ropné produkty, posypové soli atd.;
- potlačení alkalicko-křemičité reakce a jejich důsledků při vyšším obsahu alkálií v betonu
- zlepšení adheze pojiva a kameniva, starého a čerstvého betonu;
- zlepšení koheze čerstvé směsi - snížení segregace kameniva (důležité například při betonáži, kdy hrozí odplavování betonu vodou).

Používání přísady v kombinaci s jinými výrobky

STACHESIL S lze používat v kombinaci s ostatními výrobky společnosti STACHEMA CZ s.r.o. např. plastifikátory, superplastifikátory, provzdušňovacími přísadami, zpomalovacími přísadami, stabilizátory betonových směsí, urychlovači tvrdnutí, odbedňovacími prostředky, ochranným nátěrem na beton apod. Pro konkrétní aplikace se prosím obraťte na naše odborníky.

Vlastnosti výrobku

druh výrobku	Prášková příměs do betonových směsí
č. certifikátu	060-049296 TZUS Praha, s.p.
řízení výroby	Dle ČSN ISO 9001
vzhled	Šedý prášek
sušina	98 ± 2 hm. %
Objemová sypná hmotnost:	200 - 250 kg.m ⁻³

Dávkování

Doporučená dávka je od 5 – 10 % z hmotnosti cementu. STACHESIL S se dávkuje s cementem. Optimální dávkování konzultujte s našimi odborníky.

Skladování

Skladovat v uzavřených originálních obalech 6 měsíců od data výroby. Skladovat na suchém a větraném místě. Materiál není hořlavý. Při skladování dodržujte platné právní předpisy BOZP a ochrany ŽP. Výrobek je vhodně pravidelně homogenizovat.

Balení a dodávání

velké vaky (big-bag) po 250 kg

PE pytle dle přání zákazníka v množství jednoho pytle max. 10 kg