

Univerzita Pardubice

Dopravní fakulta Jana Pernera

Experimentální analýza způsobů vyztužování betonu čedičovou tkaninou

Jan Fadrhons

Bakalářská práce

2018

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jan Fadrhons**
Osobní číslo: **D13247**
Studijní program: **B3607 Stavební inženýrství**
Studijní obor: **Dopravní stavitelství**
Název tématu: **Experimentální analýza způsobů vyztužování betonu
čedičovou (bazaltovou) tkaninou**
Zadávající katedra: **Katedra dopravního stavitelství**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

V tematice čedičových tkanin a možnostech vyztužování betonu se vyžaduje vypracovat rešerše stávající míry poznání v ČR a v zahraničí.

Požaduje se zhotovit vlastní zkušební tělesa / zmenšené modely, na kterých bude realizována experimentální část práce.

Doporučuje se přistoupit i k nestandardnímu způsobu vyztužování.

Požadované výstupy:

Úvod

1) Teoretická část

Analýza současného stavu poznání

2) Experimentální část

Zkoušení čerstvého betonu (stanovení konzistence, určení obsahu vzduchu, objemová hmotnost)

Zpracování čerstvého betonu

Vlastní aplikace vyztužování

Zkoušení ztvrdlého betonu (krychelná pevnost, pevnost v tahu ohybem, objemová hmotnost)

Vyhodnocení dosažených výsledků

Verifikace a závěr

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

ČSN EN 12 350-X. Zkoušení čerstvého betonu. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.

ČSN EN 12 390-X. Zkoušení ztvrdlého betonu. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.

ČSN EN 14488-5. Zkoušení stříkaného betonu - Část 5: Stanovení kapacity absorbované energie vláknobetonových deskových zkušebních těles. Praha: Český normalizační institut, 2006.

ČSN EN 206+A1. Beton: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.

ČSN P 73 2404. Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda - Doplnující informace. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.

ČSN 73 1328. Stanovení soudržnosti oceli s betonem. Praha: Úřad pro normalizaci a měření, 1972.

PYTLÍK, Petr. Technologie betonu. 2. vyd. Brno: VUTIUM, 2000, 390 s. ISBN 80-214-1647-5.

TKP staveb pozemních komunikací: Kapitola 18: Betonové konstrukce a mosty. Praha: Ministerstvo dopravy, 2016.

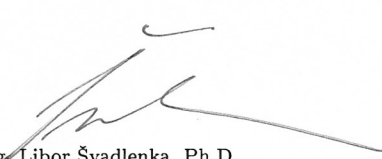
Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Vladimír Suchánek

Katedra dopravního stavitelství

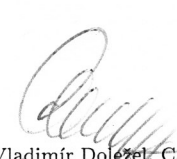
Datum zadání bakalářské práce: **20. prosince 2016**

Termín odevzdání bakalářské práce: **25. května 2018**


doc. Ing. Libor Švadlenka, Ph.D.

děkan

L.S.


doc. Ing. Vladimír Doležel, CSc.

vedoucí katedry

V Pardubicích dne 3. ledna 2018

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 9/2012, bude práce zveřejněna v Univerzitní knihovně a prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

Bakalářská práce byla vytvořena s technologickými prostředky Výukového a výzkumného centra v dopravě.

V Pardubicích dne

Jan Fadrhons

Poděkování:

Mé poděkování patří především vedoucímu bakalářské práce Panu Ing. Vladimírovi Suchánkovi za konzultační činnost, dále za pomoc se sháněním potřebných prostředků a materiálů. V neposlední řadě za spolupráci při provádění zkoušek a za provádění další navazující výzkumné činnosti v zadané tematice. Další poděkování patří zaměstnancům VVCD a Univerzity Pardubice speciálně Panu Ing. Pavlovi Svobodovi, Ph.D. za pomoc s úpravou překližek řezem a poskytnutí stolní kotoučové pily. Panu Martinu Řehákovi (VVCD - TSL) za následnou výrobu zkušebních těles určených k proražení. Panu doc. Ing. Pavlovi Švandovi, Ph.D. (KMMČS) za mikroskopické snímky, chemickou analýza čedičové sítě Alligard a snímání přetvoření systémem ARAMIS. Také bych rád poděkoval ostatním studentům za pomoc s betonováním či jinou pomoc při přípravě bakalářské práce.

Závěrečná práce byla zpracována v souvislosti s řešením vědeckovýzkumného projektu Univerzity Pardubice č. SGS-2018-023.

ANOTACE

Bakalářská práce se zabývá experimentální analýzou způsobů vyztužování betonu čedičovou tkaninou a současným stavem poznání. Experimentální část práce je věnována výrobě těles, provedení zkoušek čerstvého betonu a mechanickým vlastnostem betonu. Byly vyrobeny také tenké desky, které byly zkoušeny na pevnost v tahu ohybem a průraz. Dále došlo k porovnání pevnosti v tahu ohybem na vyztužených a nevyztužených tělesech. Výsledky zkoušek čerstvého betonu a pevnostních zkoušek jsou vyhodnoceny a porovnávány. Vše je podloženo fotodokumentací.

KLÍČOVÁ SLOVA

Vyztužování betonu, vlákny vyztužené polymery (FRP), čedič (bazalt), zkoušky čerstvého betonu, mechanické vlastnosti betonu

TITLE

Experimental analysis of methods of concrete reinforcement with basalt fiber

ANNOTATION

The bachelor thesis deals with an experimental analysis of methods of concrete reinforcement with basalt fiber and the current state of knowledge. The experimental part of the work is devoted to production of specimens for the testing fresh concrete and mechanical properties of concrete. They were also made some thin slabs what were tested for breakdown. There was also a comparison of flexural strength reinforcement and non - reinforcement specimens. Test results of fresh concrete and strength tests are evaluated and compared. Everything is based on photographs.

KEYWORDS

reinforcement of concrete, fiber reinforcement polymers (FRP), basalt, tests of fresh concrete, mechanical properties of concrete

OBSAH:

ÚVOD	16
CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE	17
TEORETICKÁ ČÁST	18
1. FRP (fiber reinforced polymers).....	18
1.1. VLÁKNA	18
1.1.1. Skleněná vlákna	18
Chemická struktura	18
Výroba	18
Druhy vláken.....	19
Charakteristické vlastnosti	19
1.1.2. Uhlíková vlákna	19
Chemická struktura	19
Druhy vláken.....	19
Výroba	20
Charakteristické vlastnosti	20
1.1.3. Aramidová vlákna	21
Chemická struktura	21
Výroba	21
Druhy vláken.....	21
Charakteristické vlastnosti	22
1.1.4. Čedičová vlákna	22
Chemická struktura	22
Výroba	22
Charakteristické vlastnosti	22
1.1.5. Další druhy vláken	23

1.2. POLYMERNÍ MATRICE.....	23
1.2.1. Epoxidová pryskyřice	24
Výroba	24
Charakteristické vlastnosti	24
1.2.2. Vinylesterová pryskyřice	25
Výroba	25
Charakteristické vlastnosti	25
1.2.3. Nenasycená polyesterová pryskyřice	25
Výroba	25
Charakteristické vlastnosti	25
2. FRP POLOTOVARY A VÝZTUŽNÉ PRVKY	26
Výroba a použití	26
3. FYZIKÁLNĚ MECHANICKÉ VLASTNOSTI.....	27
3.1. Dlouhodobé vlastnosti.....	27
3.2. Krátkodobé vlastnosti.....	28
4. KOTVENÍ FRP VÝZTUŽÍ	28
4.1. Externí lepené výztuže	29
4.2. Vnitřní vyztužení.....	30
4.3. Předepjaté výztuže.....	31
EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	32
5. MĚŘICÍ PŘÍSTROJE.....	32
5.1. Váha	32
5.2. Tlakový hrnec	32
5.3. Zhutňovací zařízení.....	33
5.4. Zatěžovací zařízení.....	33
5.5. Další nástroje a pomůcky	34
6. ZKOUŠENÍ ČERSTVÉHO BETONU - OBECNĚ	35

6.1.	Objemová hmotnost čerstvého betonu	35
6.2.	Obsah vzduchu	35
6.3.	Konzistence	36
7.	ZKOUŠENÍ ZTVRDLÉHO BETONU - OBECNĚ	37
7.1.	Objemová hmotnost ztvrdlého betonu	37
7.2.	Pevnost v tlaku	38
7.3.	Pevnost v tahu ohybem	39
8.	VLASTNÍ VYZTUŽOVÁNÍ KOMOZITNÍCH PRVKŮ	39
8.1.	Návrh vyztužení	40
8.1.1.	Vyztužení v neutrální ose	41
8.1.2.	Externí lepená výztuž	41
8.2.	Výroba zkušebních těles	42
8.2.1.	Výroba bednění	43
8.2.2.	Ukládání betonu	43
8.2.3.	Ošetřování betonu	44
8.3.	Zkoušky kompozitních prvků	44
8.3.1.	Zkoušení kompozitních prvků na pevnost v tahu ohybem	45
8.3.2.	Zkoušení desek na průraz	45
9.	VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	46
9.1.	Čerstvý beton	46
9.1.1.	Stanovení konzistence	47
9.1.2.	Zkouška objemové hmotnosti čerstvého betonu	48
9.1.3.	Zkouška obsahu vzduchu	48
9.2.	Ztvrdlý beton	48
9.2.1.	Objemová hmotnost	49
9.2.2.	Pevnost v tlaku	51
9.2.3.	Pevnost v tahu ohybem	52

9.2.4.	Pevnost v tahu ohybem nevyztužených betonových desek	54
9.2.5.	Zkoušení nevyztužených betonových desek na průraz	56
9.3.	Kompozitní prvky	59
9.3.1.	Pevnost v tahu ohybem	59
9.3.2.	Pevnost v tahu ohybem kompozitních desek	65
9.3.3.	Zkoušení kompozitních desek na průraz.....	71
9.4.	Ekonomické porovnání	78
9.5.	Použití ve stavební praxi	79
10.	POROVNÁVÁNÍ VÝSLEDKŮ.....	79
	POUŽITÁ LITERATURA	85
	SEZNAM PŘÍLOH:.....	87

SEZNAM ILUSTRACÍ:

Obrázek 1. – Schéma změny chemické struktury při výrobě karbonových vláken z PAN	20
Obrázek 2. – Strukturní vzorce PPTA (na levé straně) a MPTA (na pravé) [6]	21
Obrázek 3. – Chemická struktura dvoufunkční epoxidové pryskyřice (DGEBA) [6]	24
Obrázek 4. – Chemická struktura tetrafunkční epoxidová pryskyřice (TGDDM) [6]	24
Obrázek 5. – Chemická struktura vinylesterové pryskyřice na bázi bisfenolu A [6]	25
Obrázek 6. – Chemická struktura orthoftalové nenasycené polyesterové pryskyřice [6]	26
Obrázek 7. – Chemická struktura izoftalové nenasycené polyesterové pryskyřice [6]	26
Obrázek 8. – Vztah pevnosti v tahu a poměrného prodloužení u jednotlivých typů vláken a) karbon HM; b) karbon HS; c) aramid (Kevlar 49); d) S-glass; e) E-glass; f) basalt [2]	27
Obrázek 9. – Lamely pro vnější dodatečné zesilování (na levé straně) a Tkanina z uhlíkových vláken pro vnější dodatečné zesilování (na pravé straně) [6]	29
Obrázek 10. – Distribuce napětí pro GFRP a ocelovou výztuž betonu vyvážený návrh [10] ..	30
Obrázek 11. – Kotevní systém typu G (nahore) a Kotevní systém typu W (dole) [8]	31
Obrázek 12. – Váha s příslušenstvím	32
Obrázek 13. – Tlakový hrnec s příslušenstvím	33
Obrázek 14. – Vibrační stůl	33
Obrázek 15. – Zatěžovací zařízení	34
Obrázek 16. a) – Podkladní deska Abramhsův kužel a další nástroje	34
Obrázek 16. b) – Stolní kotoučová pila k řezání dřeva (na pravé straně dole) a betonu (na levé straně dole)	35
Obrázek 17. – Zkouška obsahu vzduchu	36
Obrázek 18. – Zkouška sednutím	37
Obrázek 19. – Lis určený ke zkouškám pevnosti v tlaku	38
Obrázek 20. – Lisovací rám pro zkoušky pevnosti tahu ohybem	39
Obrázek 21. – Výztužná síť Alligard (vlevo) a výztužné mřížka ROCKMESH (na pravé straně) Poznámka: čedičová síť / mřížka podložena listem papíru A4	40
Obrázek 22. – Výroba těles s vnitřním vyztužením	41
Obrázek 23. – Příprava povrchu na levé straně a lepení výztužné sítě na pravé straně	42
Obrázek 24. – Připravené klasické formy (před naplněním) a úprava zkušebních těles řezem (tělesa byla rozlomena při modifikované zkoušce pevnosti v tahu ohybem)	42
Obrázek 25. – Výroba bednění a vkládání výztužné vrstvy	43
Obrázek 26. – Ošetřování těles	44

Obrázek 27. – Zkoušení desek pevnost v tahu ohybem na levé straně, zkoušení desek na průraz na pravé straně	46
Obrázek 28. – Zkouška sednutím.....	47
Obrázek 29. – Zkouška obsahu vzduchu	48
Obrázek 30. – Zkouška objemové hmotnosti ztvrdlého betonu	49
Obrázek 31. – Zkouška pevnosti v tlaku (na levé straně), porušené krychle (na pravé straně)	51
Obrázek 32. – Zkouška pevnosti v tahu ohybem (nahore), porušena zkušební tělesa (dole) ...	53
Obrázek 33. – Kalibrace přístrojů před vlastními zkouškami pevnosti v tahu ohybem betonových desek (levý snímek) a snímání systémem ARAMIS (pravý snímek)	55
Obrázek 34. – Porušené zkušební těleso 3.1.	55
Obrázek 35. – Porušené zkušební těleso 3.2.	56
Obrázek 36. – Kalibrace přístrojů před vlastními zkouškami desek na proražení (levý snímek) a snímání systémem ARAMIS (pravý snímek)	57
Obrázek 37. – Porušené zkušební těleso 3.1.2.	57
Obrázek 38. – Porušené zkušební těleso 3.2.1.	58
Obrázek 39. – Porušené zkušební těleso 3.2.2.	58
Obrázek 40. – Zkouška pevnosti v tahu ohybem Alligard (nahore), porušena zkušební tělesa Alligard (dole).....	61
Obrázek 41. – Porušená zkušební tělesa Alligard a epoxidová pryskyřice	63
Obrázek 42. – Porušená zkušební tělesa ROCKMESH	65
Obrázek 43. a) – Výztužná síť, porušené zkušební těleso 1.1.	66
Obrázek 43. b) – Detail porušené zkušební těleso 1.1.	67
Obrázek 44. – Výztužná síť, porušené zkušební těleso a detail porušení tělesa 1.2.	67
Obrázek 45. – Výztužná síť, detail porušení zkušební tělesa 1.3.	68
Obrázek 46. – Porušené zkušební těleso 2.1.	69
Obrázek 47. – Porušené zkušební těleso 2.2.	70
Obrázek 48. – Detail porušené zkušební těleso 2.3.	70
Obrázek 49. – Porušené zkušební těleso 2.3.	71
Obrázek 50. – Výztužná síť a porušené zkušební těleso 1.1.2.(nahore), detail rozlomení tělesa (dole)	72
Obrázek 51. – Výztužná síť, porušené zkušební těleso 1.2.2.	73
Obrázek 52. – Výztužná síť, porušené zkušební těleso 1.3.2.	73
Obrázek 53. – Detail ukládání sítí a trhlin v deskách Alligard	74

Obrázek 54. – Porušené zkušební těleso 2.1.2. spodní povrch (nahore), horní povrch (uprostřed), proražení lisem a přizdvihování rohů (dole)	75
Obrázek 55. – Detail kruhové praskliny na horním povrchu, porušené zkušební těleso 2.1.1.	76
Obrázek 56. – Detail kruhové praskliny na horním povrchu, porušené zkušební těleso 2.3.2.	76
Obrázek 57. – Detail ukládání sítí a trhlin v deskách ROCKMESH	77

SEZNAM TABULEK A GRAFŮ:

Tabulka 1. – Základní mechanické vlastnosti skleněných vláken [2]	19
Tabulka 2. – Základní mechanické vlastnosti uhlíkových vláken [2]	21
Tabulka 3. – Základní mechanické vlastnosti aramidových vláken [2].....	22
Tabulka 4. – Základní mechanické vlastnosti čedičových vláken [2]	22
Tabulka 5. – Mechanické vlastnosti nejčastěji používaných matric [2]	24
Tabulka 6. – Základní mechanické vlastnosti FRP vnitřních výztuží (objemové množství vláken $V_f = 50 - 75 \%$) a jejich srovnání s běžnou betonářskou ocelí [2].....	28
Obrázek 10. – Distribuce napětí pro GFRP a ocelovou výztuž betonu vyvážený návrh [10] ..	30
Tabulka 7. – Rozměry zkušebního tělesa vzorek 1. zkouška objemové hmotnosti ZB.....	49
Tabulka 8. – Rozměry zkušebního tělesa vzorek 2. zkouška objemové hmotnosti ZB.....	50
Tabulka 9. – Rozměry zkušebního tělesa vzorek 3. zkouška objemové hmotnosti ZB.....	50
Tabulka 10. – Rozměry zkušebního tělesa vzorek 1. zkouška pevnost v tahu ohybem ZB	53
Tabulka 11. – Rozměry zkušebního tělesa vzorek 2. zkouška pevnost v tahu ohybem ZB	53
Tabulka 12. – Rozměry zkušebního tělesa vzorek 3. zkouška pevnost v tahu ohybem ZB	54
Tabulka 13. – Rozměry zkušebního tělesa Alligard 1. zkouška pevnost v tahu ohybem.....	60
Tabulka 14. – Rozměry zkušebního tělesa Alligard 2. zkouška pevnost v tahu ohybem.....	60
Tabulka 15. – Rozměry zkušebního tělesa Alligard 3. zkouška pevnost v tahu ohybem.....	60
Tabulka 16. – Rozměry zkušebního tělesa Alligard a epoxid 1. zkouška pevnost v tahu ohybem.....	62
Tabulka 17. – Rozměry zkušebního tělesa Alligard a epoxid 2. zkouška pevnost v tahu ohybem.....	62
Tabulka 18. – Rozměry zkušebního tělesa Alligard a epoxid 3. zkouška pevnost v tahu ohybem.....	62
Tabulka 19. – Rozměry zkušebního tělesa ROCKMESH 1. zkouška pevnost v tahu ohybem	64
Tabulka 20. – Rozměry zkušebního tělesa ROCKMESH 2. zkouška pevnost v tahu ohybem	64
Tabulka 21. – Rozměry zkušebního tělesa ROCKMESH 3. zkouška pevnost v tahu ohybem	64
Graf 1. a 2. – Zkouška pevnosti v tahu ohybem pro beton (na levé straně) a pro výztužnou síť Alligard (na pravé straně)	81
Graf 3. a 4. – Zkouška pevnosti v tahu ohybem pro výztužnou síť Alligard a epoxid (na levé straně) a pro výztužnou síť ROCKMESH (na pravé straně)	81
Graf 5. – Porovnávací graf zkoušek pevnosti v tahu ohybem	82

Graf 6. a 7. – Zkouška pevnosti v tahu ohybem desek pro výztužnou síť Alligard a epoxid (na levé straně) a pro výztužnou síť ROCKMESH (na pravé straně)	82
Graf 8. – Porovnávací graf zkoušek pevnosti v tahu ohybem desek	83
Graf 9. a 10. – Zkouška desek na průřez pro beton (na levé straně) a pro výztužnou síť Alligard (na pravé straně)	83
Graf 11. – Zkouška desek na průřez pro výztužnou síť ROCKMESH.....	84
Graf 12. – Porovnávací graf zkoušek desek na průřez.....	84

ÚVOD

Téma bakalářské práce je Experimentální analýza způsobů vyztužování betonu čedičovou tkaninou. Zadání se zaměřuje na vyztužování nekovovými výztužemi (FRP – fiber reinforced polymers). Na návrh a hodnocení vlastností navržených kompozitních prvků a jejich součástí. Práce je rozdělena do dvou částí teoretická a experimentální. První část se zabývá vlákny vyztužené polymery (FRP). Rozebírá jednotlivé druhy vláken a matric jejich výrobou, chemické složení a další jejich charakteristické vlastnosti. Dále pak vyráběné FRP polotovary a kompozity, jejich použití pro dané aplikace vyztužování betonu. V druhé části je návrh netradičního vyztužení a modifikované zkoušky navržených tenkostěnných kompozit, zkoušky vlastností čerstvého betonu a mechanických vlastností ztvrdlého betonu. Na konci textu je zhodnocení výsledků, porovnání jednotlivých způsobů vyztužení a způsobů porušení, finančních nákladů na jednotlivé kompozitní prvky. Experimentální část byla zpracována ve Výukovém a výzkumném centru v dopravě v Doubravících.

Tato bakalářská práce byla realizována s využitím technologií Výukového a výzkumného centra v dopravě.

Práce byla zpracována v souvislosti s řešením vědeckovýzkumného projektu Univerzity Pardubice č. SGS_2018_023.

CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Cílem zadané práce je shrnutí poznání o FRP vyztužování v oboru stavitelství. Zadání se zaměřuje na technologii výroby a hodnocení vlastností jednotlivých součástí FRP kompozitu a betonového kompozitního prvku. Dále pak návrh kompozitního prvku s co největší pevností v tahu za ohybu při použití dostupných prostředků a surovin. Cílem je porovnání chování jednotlivých netradičně vyztužených betonových prvků při zatěžování. Srovnání způsobů porušení a ověření soudržnosti výztuže s betonem dle jednotlivých způsobů vyztužení. Dalším cílem je popsat výhody a nevýhody jednotlivých druhů vyztužení a jejich další použití ve stavební praxi.

Zadání experimentální části se zaměřuje na analýzu metod vyztužování betonu pomocí čedičových vláken uspořádaných do výztužné sítě. Jedním z cílů bakalářské práce je návrh kompozitní betonové vrstvy s nejvhodnějšími vlastnostmi (maximální přetvoření, únosnost, chování při zatěžování, finanční náročnost, životnost konstrukce apod.).

Pro vytvoření vlastních kompozitních prvků byly opatřeny na trhu vybrané dostupné materiály. Materiál potřebný k realizaci experimentální části byl pro zhotovení bednění (vodotěsná překližka a spojovací materiál), výztužný materiál (předem impregnovaná čedičová armovací síť ROCKMESH, výztužná tkaná čedičová síť Alligard a epoxidový polymer) a čerstvý beton. Hodnoceny byly jednotlivé součásti kompozitu (dle výrobce či zkoušek) a vyrobené kompozitní prvky.

Návrh způsobů vyztužení se realizuje na zmenšených modelech (deskách, hranolech a krychlích), které jsou zkoušeny pomocí modifikovaných zkoušek. Cílem experimentální části práce je hodnocení součástí kompozitního prvku a celého kompozitu, dále pak porovnání jednotlivých vlastností netradičně vyztužených tenkostěnných kompozitních prvků a prvků s dostatečnou betonovou vrstvou. Porovnává se především způsob vyztužení, chování kompozitních desek při zatěžování, jednotlivé způsoby porušení, přetvoření a maximální zatížení.

TEORETICKÁ ČÁST

1. FRP (fiber reinforced polymers)

Nebo také vlákny vyztužené polymery jsou typické kombinací výztužných vláken a polymerní matrice. Spojením těchto materiálů vzniká kompozit, který má své vlastnosti dané kombinací druhů vláken a polymerů. Dnes se vyrábí FRP kompozity ve více typech výztužných prvků i v jejich dalších modifikacích. FRP se ve stavitelství používají především k zesilování stávajících konstrukcí, nebo pro vyztužování betonových stavebních prvků.

Nosná vlákna, která se používají, jsou především skleněná, uhlíková nebo aramidová. Používané matrice jsou vinylesterové, epoxidové pryskyřice nebo polyesterová [1].

Výztuže jsou většinou lepeny na povrch konstrukce do míst s tahovým namáháním nebo jsou použity jako vnitřní vyztužení. Návrhové metodiky při vyztužování FRP výztuže mi jsou pro Evropu fib Bulletin 14, v USA ACI 440 a v Kanadě CAN/CSA. [2]

1.1.VLÁKNA

Vlákna zpevňují kompozit ve směru, kterým jsou kladeny a tvoří hlavní nosný prvek. Relativní pevnost vlákna je větší čím je vlákno tenčí. Při namáhání tahem se všechna vlákna chovají lineárně pružně až do porušení.

Nejčastěji používaná jsou skleněná vlákna (GFRP - glass fiber reinforced polymer), uhlíková (CFRP - carbon fiber reinforced polymer) nebo aramidová (AFRP - aramid fiber reinforced polymer). Méně často se používají i jiná například čedičová (BFRP).

Tyto skupiny vláken lze dále rozdělit do podskupin dle jejich specifických vlastností.

1.1.1. Skleněná vlákna

Chemická struktura

Skleněná vlákna se vyrábí z oxidu křemíku (SiO_2), kde je obsah SiO_2 přes 50 % dle typu skla. Další složky obsahu tvoří oxidy vápníku (CaO do 20 %), hliníku (Al_2O_3 do 10%), hořčíku (MgO cca 5%) a oxidy alkalických kovů sodíku a draslíku (méně než 5%). Sklo má obecně chemickou strukturu homogenní a amorfní.

Výroba

Výroba vláken probíhá dlužením z proudu skelné taveniny vtékající z trysek. Průměr vláken je dán rychlostí tečení taveniny a rychlostí odtahování vláken. Po zvláknění se provádí povrchová úprava olejovou mlhovinou (tzv. sizing) po ztuhnutí se monovlákna spojují do svazků a navíjí na cívku [1].

Druhy vláken

Ve stavitelství jsou využívána skleněná vlákna ve čtyřech typech. A - glass (window glass), C - glass (nebo AR - alcali corrosion resistant glass), E - glass (electrical glass) a S – glass (strength glass).

Charakteristické vlastnosti

Skleněná vlákna jsou odolná proti chemikáliím, nevedou elektrický proud a jsou dobrými tepelnými izolátory. Vlákna mají relativně velkou pevnost v tahu a nízký modul pružnosti, ale jsou citlivá na vlhkost a pH. Při dlouhodobém vystavení zásaditému prostředí vlákna ztrácí pevnost v tahu. Další výhodou je nízká pořizovací cena skleněných vláken.

Vlákna	Typ	Hustota [kg/m ³]	Modul pružnosti [GPa]	Tahová pevnost [MPa]	Max přetvoření [%]	Teplota tavení [°C]
Skleněná	E	2570	72,5	3400	2,5	1100 – 1550
	A	2460	73	2760	2,5	
	C	2460	74	2350	2,5	
	S	2470	88	4600	3	

Tabulka 1. – Základní mechanické vlastnosti skleněných vláken [2]

1.1.2. Uhlíková vlákna

Chemická struktura

Uhlíková vlákna obsahují především atomy uhlíku, které jsou uspořádané do pevné dvojdimenzionální mřížky (tj. jako krystalická mřížka grafitu). Krystaly vzniklé spojením atomů jsou navzájem spojené a většinou orientovány paralelně k podélné ose vlákna. Uspořádání atomů do krystalů zajišťuje pevnost vlákna i při jeho malém průměru.

Druhy vláken

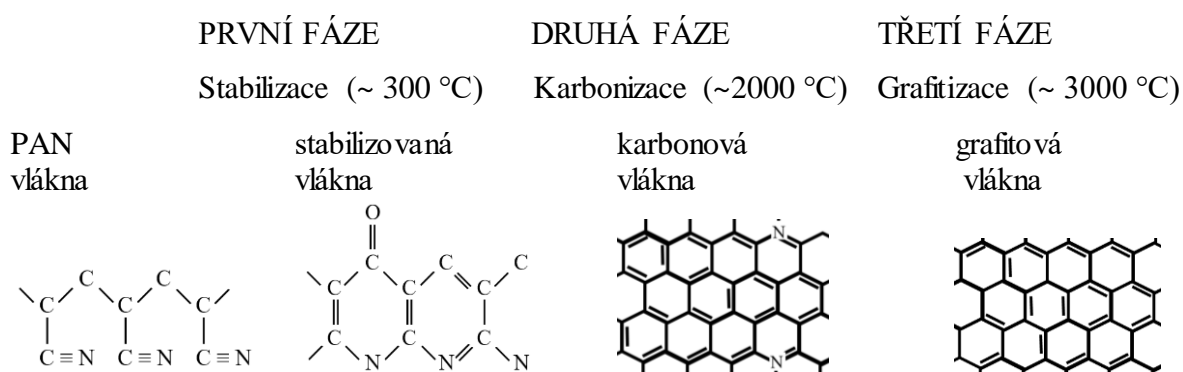
Uhlíková vlákna jsou ve čtyřech typech standardní SM (standart modulus), vysokopevnostní HS (high strenght), s vysokým modulem pružnosti HM (high modulus), vysokopevnostní se středním modulem pružnosti IM (Intermediate Modulus) a ultravysokomodulární uhlíková vlákna UHM (ultra high modulus).

Výroba

Vlákna se vyrábí průmyslově většinou z polyakrylonitrilu (PAN), méně pak z mezofázových smol, viskózy nebo fenolaldehydových prekurzorů. Výroba probíhá v několika fázích, začíná se přípravou materiálu zvlákňováním z roztoku, nebo tavným zvlákňováním. Po prodloužení na požadované průměry se vlákna stabilizují při teplotě 220 – 300 °C za přítomnosti vzduchu a stálém tahovém napětí. Při stabilizaci dojde k propojení a zesílení vazeb kyslíkovými můstky mezi makromolekulami. Díky tomu se vazby zacyklí a vzniknou paralelní žebříčkové makromolekuly. Vlákno je po stabilizaci netavitelné a získá svou typickou černou barvu.

Poté se vlákna dále zahřívají při teplotě 1000 – 1500 °C v ochranné atmosféře z čistého dusíku. Poté se vlákna karbonizují, dochází k odstranění vodíku a vytěsnění kyslíku a dusíku z vazeb. Po karbonizaci vlákno dosáhne maximální pevnosti v tahu (HS) a obsah uhlíku tvoří 80 – 90 %.

Další zvýšení obsahu uhlíku se zajistí při grafitizaci, více než 99% obsahu hmoty. Zvyšuje se teplota na 1800 – 3000 °C vlákna jsou stále v ochranné atmosféře. Vznikají větší mikrokrystaly, tvoří se vrstevnatá struktura, ale zvětšují se i defekty mezi nimi. Vlákno zvyšuje svou tuhost, ale ztrácí svou pevnost a stává se křehčím. U vláken s většími průřezy, lze při grafitizaci vlákna dlužit. Mikrokrystaly díky tomu zmenší svůj odklon od podélné osy vlákna (HM) [6]. V závěru výrobního procesu se provádí povrchová úprava. Vlákna jsou na povrchu oxidována, tím se zajistí lepší přilnavost a mechanické spojení s matricí.



Obrázek 1. – Schéma změny chemické struktury při výrobě karbonových vláken z PAN [6]

Charakteristické vlastnosti

Ve stavitelství se uhlíková vlákna používají na dodatečné zesilování, předepjaté konstrukce, nebo na exponovaných místech.

Uhlíková vlákna jsou objemově stálá, elektricky nevodivá, odolná proti chemikáliím a vysokým teplotám. Vzhledem ke složitému výrobnímu procesu jsou vlákna velmi drahá.

Vlákna	Typ	Hustota [kg/m ³]	Modul pružnosti [GPa]	Tahová pevnost [MPa]	Max přetvoření [%]	Teplota tavení [°C]
Uhlíková	SM	1700	250	3700	1,4	1200 – 2400
	HS	1800	250	4800	1,9	
	HM	1900	500	3000	0,6	
	UHM	2100	800	2400	0,3	

Tabulka 2. – Základní mechanické vlastnosti uhlíkových vláken [2]

1.1.3. Aramidová vlákna

Chemická struktura

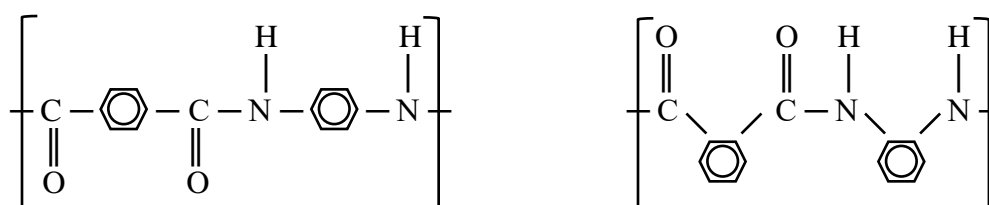
Aramid či aromatický polyamid (APA) tvoří syntetická vlákna, tak že dvojice polyamidů jsou periodicky opakovány v uhlíkovém řetězci. Přičemž alespoň 85 % vazeb má být spojeno se dvěma uhlíkovými arénymi [1].

Výroba

Pro výrobu vláken se používají polymery tvořené iontovou složkou a organického rozpouštědla. Materiál se zvlákní pomocí trysky, vlákna poté prochází lázní a následně se dluží a suší při teplotách 300 – 400 °C.

Druhy vláken

Polymerní vlákna se rozdělují do dvou základních skupin Meta-aramidy a Para-aramidy. Metafenylen-izoftalamidy (MPIA) jsou odolné proti vysokým teplotám a elektricky nevodivé. Zástupcem této skupiny je poly-metha-fenylizoftalamid (MPTA). P-fenylen-tereftalamidy mají vyšší pevnost v tahu a vyšší modul pružnosti. Vyráběná vlákna jsou například poly-parafenyltereftalamid (PPTA) také známá jako kevlar od firmy Du Pont [6].



Obrázek 2. – Strukturní vzorce PPTA (na levé straně) a MPTA (na pravě) [6]

Charakteristické vlastnosti

Všechny typy vláken jsou dále charakteristické odolností proti UV záření, chemikáliím a vlhkosti. Průmyslová výroba vláken je jednodušší než u karbonových. Vlákná jsou asi o řád dražší než skleněná vlákna.

Vlákná	Hustota [kg/m ³]	Modul pružnosti [GPa]	Tahová pevnost [MPa]	Teplota tavení [°C]
Aramidová	1440	70 - 125	3400 - 4100	cca 425

Tabulka 3. – Základní mechanické vlastnosti aramidových vláken [2]

1.1.4. Čedičová vlákna

Chemická struktura

Nebo také bazaltová vlákna se vyrábí z čediče, přičemž hornina musí obsahovat alespoň 46 % SiO₂ (oxidu křemičitého) zbytek obsahu tvoří oxidy hliníku, vápníku a hořčíku (aj.).

Výroba

Čedičová vlákna se vyrábí tavným zvlákněním podobně jako skleněná vlákna při teplotě 1500 - 1700 °C. Vlákná lze dloužit při teplotě kolem 1300 °C. Poté vlákna prochází zchlazovací lázní tak, aby nevznikaly mikrokrystaly, vzniká sklovitá hmota.

Charakteristické vlastnosti

Vlákná vyznačují vyšší pevností v tahu než ocel nebo laminát. Mají malé poměrné prodloužení při zatěžování tahem a jsou křehká vzhledem k jejich tuhosti. Dále jsou velmi vhodná pro vnitřní vyztužení betonu, protože odolávají trvalým deformacím a koeficient tepelné roztažnosti je podobný jako pro beton. Je také výrazně lehčí než klasická ocelová výztuž. Vlákná jsou netečná vůči chemikáliím, dokonce lépe odolávají alkáliím než GFRP. BFRP nejsou navlhavé na rozdíl od skleněných vláken a vedou elektrický proud (bez magnetické indukce) [1]. Cena vláken je dokonce ještě nižší než u skleněných.

Ve stavitelství jsou BFRP využívány na vodohospodářské stavby (působení mořské vody), dálnice (posypové soli) a v jiných aplikacích vystavených korozi (chemikálie, bludné proudy).

Vlákná	Hustota [kg/m ³]	Modul pružnosti [GPa]	Tahová pevnost [MPa]	Teplota tavení [°C]
Čedičová	2700	93 - 110	3000 - 4800	1450

Tabulka 4. – Základní mechanické vlastnosti čedičových vláken [2]

1.1.5. Další druhy vláken

Další druhy vláken jsou vyráběny například z modifikací uhlíku, z polymerů nebo z jiných organických či anorganických látek.

Jako nosná vlákna se používají se například polyetylenová vlákna především UHMWPE (Ultra High Molecular Weight Polyethylene), také známý pod názvem Dyneema SK76 od firmy DMS. Vlákna se vyrábí gelovým zvlákněním a jsou odolná proti UV záření, chemikáliím a mikroorganismům.

Další nosná vlákna se vyrábí z PIPD (polydiimidazopyridindihydroxyfenylen), pod obchodní značkou M5 do firem Magellan Systems International a DuPont. Základní látka k výrobě vláken se vyrábí kondenzační polymerizací (polymer). Polymer se následně zchladí a zvláknuje se přes trysky. Po zvláknění prochází vlákna čistící lázní a následně se dlouží za zvýšených teplot. Vlákna M5 jsou odolná především proti teplotám, kyselinám, vlhkosti a slunečnímu záření.

Dalším zástupcem vláken je PBO (polyfenylenbenzobisoxazol) neboli Zylon od firmy Toyobo. Zylon se vyrábí z kyseliny polyfosforečné, reaktivních rozpouštědel a dalších přísad a stabilizátorů. PBO je vyráběno ve dvou typech HS a HM [6]. Vlákna nejsou odolná proti slunečnímu záření a vlhkosti, odolná jsou proti teplotám.

Pro jiné specifické aplikace jsou vyráběny další druhy vláken s požadovanými charakteristickými vlastnostmi. Například borová vlákna, vlákna karbidu křemíku, piezoelektrická, proteinová nebo různé druhy nanovláken.

1.2. POLYMERNÍ MATRICE

Vyrábí se z organických nebo anorganických polymerů. Používané matrice nevedou teplo ani elektrický proud, nejsou odolné proti UV záření a vysokým teplotám. Ale jsou náchylné k dotvarování, při působení dlouhodobého konstantního zatížení.

Polymer spojuje jednotlivá vlákna kompozitu k sobě navzájem a chrání je před mechanickým poškozením či vlivům okolního prostředí. Polymer je vlákny vyztužený, jelikož je poddajnější a má nižší pevnost v tahu než samotná vlákna. Matrice zajistí pružné spojení s betonem a tahové namáhání se přenáší z betonu až do nosných vláken.

Používané polymery lze rozdělit do dvou skupin termoplastické a termosetové. Mezi zástupce první skupiny patří polypropyleny (PP) a polyamidy (PA). Ve stavitelství jsou nejpoužívanější termosetové matrice tedy epoxidy (EP), vinylestery (VE) a nenasycené polyestery (UP) [1].

VLASTNOST	TYP MATRICE		
	Polyesterová	Epoxidová	Vynilesterová
Objemová hmotnost [kg/m ³]	1200 – 1400	1200 – 1400	1150 – 1350
Tahová pevnost [MPa]	34,5 – 104	55 – 130	73 – 81
Youngův modul pružnosti [GPa]	2,10 – 3,45	2,75 – 4,10	3,00 – 3,50
Poissonův koeficient	0,35 – 0,39	0,38 – 0,40	0,36 – 0,39
Koeficient teplotní roztažnosti [10 ⁻⁶ /°C]	55 – 100	45 – 65	50 – 75

Tabulka 5. – Mechanické vlastnosti nejčastěji používaných matic [2]

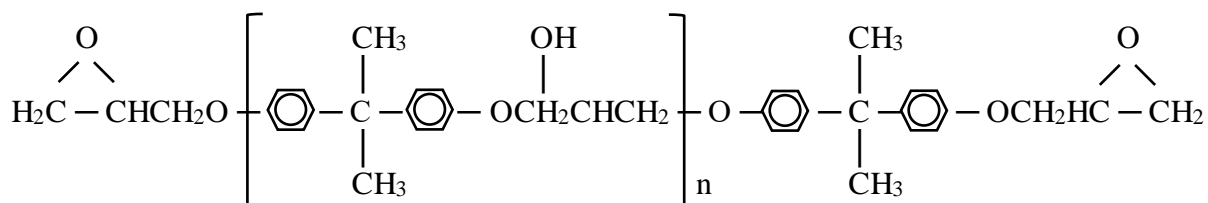
1.2.1. Epoxidová pryskyřice

Výroba

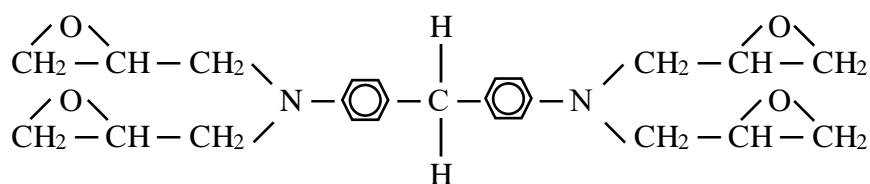
Epoxidové pryskyřice jsou reaktoplasty většinou se vyrábí ze dvou složek pryskyřičné látky a tvrdidla. Jako tvrdidla jsou užívány polyaminy případně formaldehydové pryskyřice. Případně se přidávají i další modifikující látky pro zlepšení dalších vlastností [1].

Charakteristické vlastnosti

EP je odolná proti únavě, chemikáliím a teplotám. Epoxid výborně přilne k vláknům a dochází pouze k malému smršťování při vytvrzování. Nevýhodou je, že jsou navlhavé, při zvlhnutí dochází ke zhoršení tepelné odolnosti [6].



Obrázek 3. – Chemická struktura dvoufunkční epoxidové pryskyřice (DGEBA) [6]



Obrázek 4. – Chemická struktura tetrafunkční epoxidová pryskyřice (TGDDM) [6]

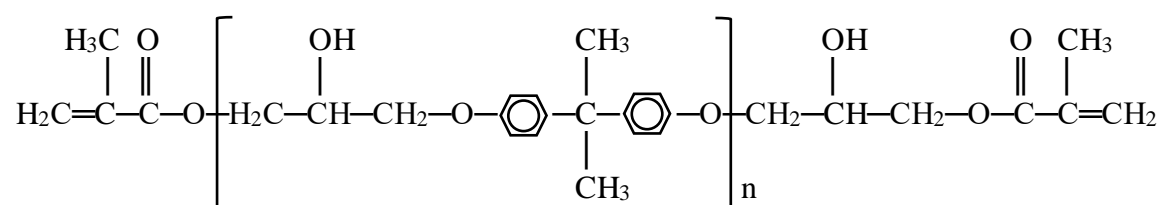
1.2.2. Vinylesterová pryskyřice

Výroba

Nenasycené estery epoxidových pryskyřic se vyrábí z novolakové pryskyřice nebo bisfenolu, kyseliny akrylové (nebo methakrylové) a rozpouštědla obvykle styrénu. Jako tvrdidla se používají organické peroxidy nejpoužívanějším je metyletylketonperoxid (MEKP), pro vyšší teploty se užívá dibenzoylperoxid.

Charakteristické vlastnosti

VE jsou charakteristické odolností proti chemikáliím, větší odolností proti tvorbě mikrotrhlin. Vykazují vyšší odolnost proti teplu, ale reakce při vytvrzování je pomalejší tím se prodlouží i technologický proces. Cena VE je vyšší než u jiných pryskyřic.



Obrázek 5. – Chemická struktura vinylesterové pryskyřice na bázi bisfenolu A [6]

1.2.3. Nenasycená polyesterová pryskyřice

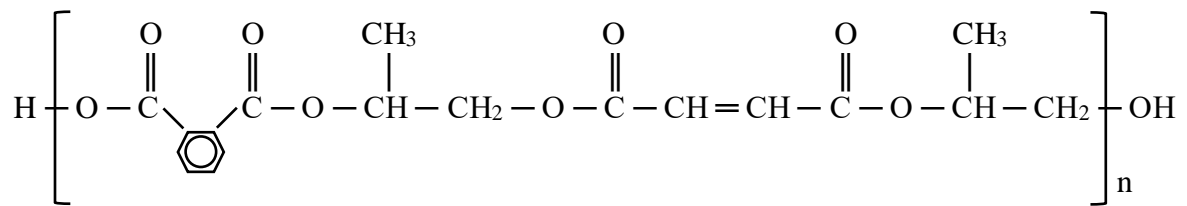
Výroba

Nenasycené polyesterové pryskyřice jsou nejužívanějšími z pryskyřic. Základní jsou dva druhy UP izoftalová a orthoftalová. Výroba UP je obdobná jako u EP sestává se ze dvou složek polypropylenglykolu a kyseliny (maleinové, ftalové apod.) nebo anhydridu (maleinanhydridu, ftalanhydridu). Vzniklý polymer je opět rozpouštěn ve styrénu. Tvrdidla jsou obdobná jako u VE a jako urychlovač vytvrzovací reakce se užívá naftenan kobaltnatý.

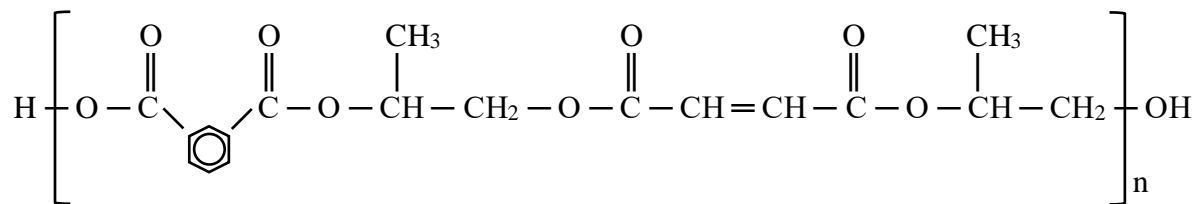
Charakteristické vlastnosti

Množství rozpouštědla určí tekutost polyesterové pryskyřice, což určí její použití v dalších aplikacích výroby FRP při injektážích, infúzích či navíjení. Nevýhodou je, že větší obsah rozpouštědla, což způsobí ztrátu pevnosti a odolnosti proti teplotě. Výhodou je jednoznačně jejich cena v porovnání s ostatními pryskyřicemi [6].

Strukturní vzorce dvou základních UP jsou zobrazeny na obrázcích 6. a 7.



Obrázek 6. – Chemická struktura orthoftalové nenasycené polyesterové pryskyřice [6]



Obrázek 7. – Chemická struktura izoftalové nenasycené polyesterové pryskyřice [6]

2. FRP POLOTOVARY A VÝZTUŽNÉ PRVKY

Výroba a použití

Výroba polotovarů se provádí zpravidla zpracováním nosných vláken. Vlákna jsou ve většině případů sdužována a vznikají prameny, které se dále zpracovávají. Z pramenů vláken se dále vyrábí mletá vlákna nebo sekané prameny, které se využívají pro přípravu vstřikovacích a lisovacích směsí, nebo pro vnitřní rozptýlenou výztuž (drátkobeton).

Dalšími polotovary jsou samotné prameny (bez zákrutu), nebo pramence (rovingy) s malým počtem zákrutů. Tyto polotovary jsou využívány především v technologii výroby tažením profilu (pultruzí) [1]. Výrobky jsou vnitřní FRP výztuže (nebo lamely) a lana určená k předepínání. Nebo se polotovary navíjí na válcové cívky. A následně se z nich vyrábí jednosměrné prepergy. Z pramenů lze jejich zkrucováním a dalším sdužováním vyrobit jednoduchou přízi, která se užívá při výrobě tkanin z příze (filtrační, izolační popř. geotextilie).

Z pramenců se dále vyrábějí tzv. rovingové tkaniny, které se navíjejí a jsou určeny ke kontaktnímu laminování. Popřípadě se zpracovávají na tažené profily nebo na tkaninové prepergy.

Další využití vláken je na rouna a netkané textilie (tzv. rohože). Vlákna jsou náhodně usprádaná v jedné rovině. Rohože jsou vyráběny buď z nekonečných vláken, nebo ze sekaných pramenů. Kontinuální vlákna jsou navzájem spletená a sekané prameny (dl. 25 – 50 mm) se spojí polymery rozpustných v pryskyřicích. Z rohoží se také vyrábí prepergy, které lze impregnovat matricí [6].

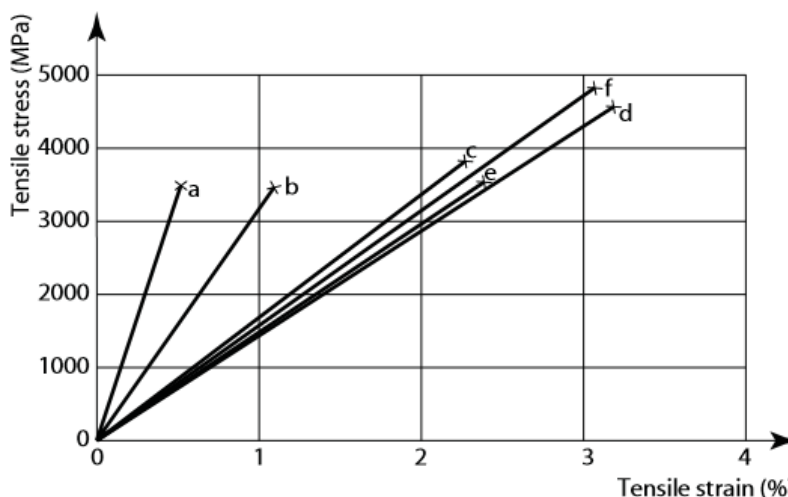
3. FYZIKÁLNĚ MECHANICKÉ VLASTNOSTI

Vlastnosti FRP výztuží určuje druh použitých vláken, nebo jejich kombinace. Dále záleží na druhu použité polymerní matrice. Vlastnosti ovlivní i poměr jednotlivých složek a podmínky při jejich zpracování a postup při výrobě FRP výztuží (teplota, vlhkost apod.).

Velikost průměru výztuže, má také vliv na mechanické vlastnosti. Relativní pevnost vláken je tím větší, čím je menší průměr vláken či průřez celého kompozitu. To znamená, že větší průřezy mívají horší mechanické vlastnosti.

Kompozitní prvky vykazují většinou ortotropní vlastnosti. V podélném směru vlastnosti určují převážně použitá vlákna, ale v kolmém směru v rámci průřezu záleží více na vlastnostech polymerní matrice, která spojuje jednotlivá vlákna. Udává se, že mechanické vlastnosti v podélném směru jsou o řád až dva vyšší, než ve směru na ně kolmý.

Obecně FRP nejsou magnetické, jsou odolné proti velice nízkým, teplotám chemicky stálé a velmi lehké oproti klasickým ocelovým výztužím. Dále vykazují minimální mechanické opotřebení při namáhání ve stanovených mezích [3].



Obrázek 8. – Vztah pevnosti v tahu a poměrného prodloužení u jednotlivých typů vláken
a) karbon HM; b) karbon HS; c) aramid (Kevlar 49); d) S-glass; e) E-glass; f) basalt [2]

3.1. Dlouhodobé vlastnosti

FRP výztuže se chovají jinak než ocelové při dotvarování za působení konstantního napětí. Zkoumá se především přetvoření konstrukce (počáteční, při porušení popř. průběh) a zbytková tahová pevnost. Nebo únavová pevnost, která je vyšší než u klasických předepjatých výztuží. Kompozity jsou náchylné k porušení vlivem únavy [3]. A další důležité faktory střídání teplot v průběhu dne a roku, vliv UV záření, působení chemikálií (alkálie, kyseliny, chloridy aj.), vliv vlhkosti a další. Sledována je změna chemické struktury matrice (nebo vláken) nebo přetvarování kompozitu. K porušení dochází na úrovni matrice (únavové trhliny, degradace),

na úrovni nosných vláken (přetržení), nebo porušení spojení mezi maticí a nosnými vlákny tzv. delaminace. Případně kombinací těchto způsobů porušení [4].

3.2. Krátkodobé vlastnosti

Stanovují se teoreticky nebo experimentálně, ale výsledky jsou platné pouze pro stejný postup a technologii výroby kompozitu.

Vlastnosti kompozitu jsou dané především druhem použitých vláken (nebo kombinace druhů) a použitým druhem polymerní matrice. Jednotlivé druhy vláken se chovají při zatěžování ve směru vláken lineárně elasticky. Při porušení vlákna, dochází ke křehkému lomu v místě s nejslabší strukturou.

Konkrétní údaje pro návrh vyztužení konstrukce dodává výrobce. Orientační údaje dle odborné literatury [2] jsou uvedeny v tabulce č. 5.:

VLASTNOST	MATERIÁL			
	OCEL	GFRP	CFRP	AFRP
Modul v podélném směru [GPa]	200	35 – 60	100 – 580	40 – 125
Modul v příčném směru [GPa]	200	cca 8 – 9	cca 10 – 12	cca 5 – 6
Tahová pevnost ve směru vláken [MPa]	300 – 600	450 – 1600	600 – 3500	1000 – 2500
Tlaková pevnost ve směru vláken [MPa]	300 – 600	225 – 800	300 – 1750	250 – 625
Příčná tahová pevnost [MPa]	300 – 600	30 – 40	30 – 40	30 – 40
Objemová hmotnost [kg/m ³]	7850	cca 2100	cca 1600	cca 1400

Tabulka 6. – Základní mechanické vlastnosti FRP vnitřních výztuží (objemové množství vláken $V_f = 50 - 75 \%$) a jejich srovnání s běžnou betonářskou ocelí [2]

4. KOTVENÍ FRP VÝZTUŽÍ

Důvody pro zesilování nebo vyztužování betonových konstrukcí pomocí FRP výztuží jsou různé například odolnost konstrukce proti vlivům prostředí, změna v užívání konstrukce, prodloužení provozuschopnosti (apod.).

Kotvení vnitřních FRP výztuží je podobné jako u klasických železobetonových nebo předepjatých konstrukcí. Důležité pro kotvení je především vliv krycí vrstvy a soudržnost

s betonem. U předepnutých konstrukcí se dále řeší způsob kotvení, počet kotev, kotevní délka, počáteční přetvoření konstrukce a velikost síly vnášené do výztuže [5].

Při dodatečném zesilování konstrukcí, které se provádí při sanaci poškození konstrukce nebo pro dodatečné zesílení prvků. Je rozhodující účinnost zesílení, druh zesílení (lamely, tkanina nebo pruty), příprava podkladního povrchu a kvalita provedení vlastního vyztužování k zesílení prvku.

4.1. Externí lepené výztuže

Používají se především při rekonstrukcích pro sanaci nosných částí, nebo pro zesilování při změně užívání stavby pro zvýšení únosnosti stávajících prvků.

Nejčastěji užívané jsou uhlíkové lamely nepředepjaté, nebo jsou předepjaté, pro zvýšení účinnosti zesílení. Často se používají i tkaniny z uhlíkových či ze skleněných vláken jsou většinou tkané jednosměrně případně ve dvou směrech (popř.: netkané textilie). Tkaniny se užívají především pro zesilování sloupů ovinutím.



Obrázek 9. – Lamely pro vnější dodatečné zesilování (na levé straně) a Tkanina z uhlíkových vláken pro vnější dodatečné zesilování (na pravé straně) [6]

Příprava povrchu před aplikací externích FRP výztuží se skládá z odstranění sorbovaných povrchových vrstev betonu a následného zdrsnění pevného povrchu. Povrch je po zdrsnění nutné zbavit prachu a odmastit. Připravený povrch je bez zbytečné vlhkosti a musí splnit zkoušky na minimální pevnost v přídržnosti [5].

K lepení FRP výztuží se nejčastěji využívá dvou složkový epoxid, který je podobný jako samotná matrice kompozitu. Lepení lze provádět při teplotách vyšších než 5 °C. Pokud jsou teploty nižší, tak se zpomaluje chemická reakce vytvrzování, až se při 0 °C reakce zastaví. Při delším vystavení nízkým teplotám při tvrdnutí se tvrdidlo se rozpadá na jiné meziproducty a nedojde k vytvrzení.

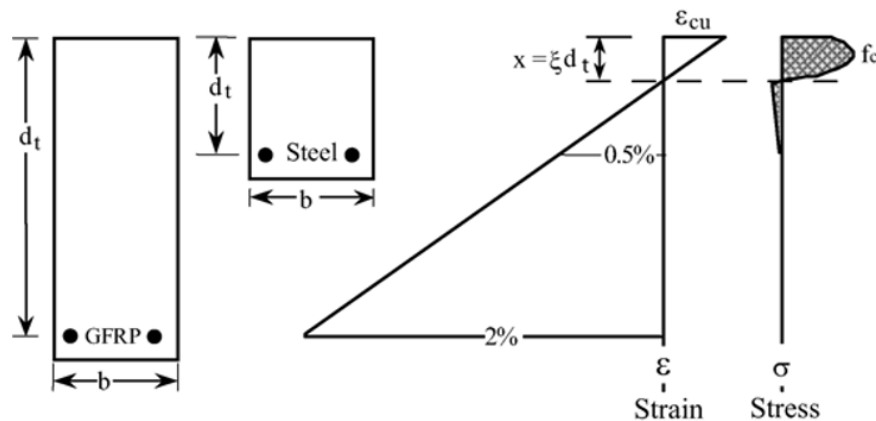
V případě lepení lamel do připravených drážek se odmastí i vlastní lamely čímž se její povrch lehce naleptá a tím je způsobena lepší soudržnost s lepidlem a podkladem. Při použití tkanin k zesilování je připraven celý povrch podkladu po nanesení lepidla se polymer protlačí tkaninou a poté je celý povrch znovu zalaminován. Vytvrzování polymerního lepidla obvykle trvá dva až tři dny, ale tento technologický proces lze zkrátit použitím jiného tvrdidla a za vyšších teplot (dle tvrdidla 60 °C) na cca 3 hodiny.

Při správném návrhu kompozitního vyztužení je nejslabším článkem podkladní betonová vrstva, která se při porušení odloučí společně s lamelou. Na zesilování nemá vliv tuhost průřezu, ani trhliny v ohýbané části konstrukce. Ale záleží na počátečním přetvoření zesilovaného prvku. Účinnost zesílení bude větší, když velikost přetvoření bude menší (konstrukce se odlehčí, nebo podepře). Pro další zvýšení únosnosti lze lamely předeprnout [9].

4.2. Vnitřní vyztužení

Tyčové nekovové vyztuže se vyrábí tažením profilu tzv. pultruzí jde o automatický kontinuální postup, při kterém se kombinuje samotná výroba s ovjíváním tj. pullwinding [1]. Během druhotné výroby dochází ke spojení nosných vláken s matricí a vyztužné prvky jsou tvarovány dle požadavků (tyčové prvky, vyztuže aj.). V závěru výrobního procesu jsou profily po vytvrzení a provedení povrchové úpravy rozřezány na požadované délky a následně zabaleny k expedici či uskladnění.

Nejčastěji se používají uhlíková nebo skleněná vlákna (popř. kombinace) [4]. Výsledné vlastnosti kompozitu jsou dané především druhem použitých vláken a druhem matrice. Pro soudržnost s betonem je nejdůležitější povrchová úprava vyztuží a tloušťka krytí vyztuže [7], která je většinou stejná s průměrem profilu (dle ACI), účinná výška průřezu je větší díky většímu poměrnému prodloužení vyztuže viz obr. 8. [10]. K určení soudržnosti vyztuží s betonem se využívá například postup dle americké normy ACI tzv. pull-out tests [5].



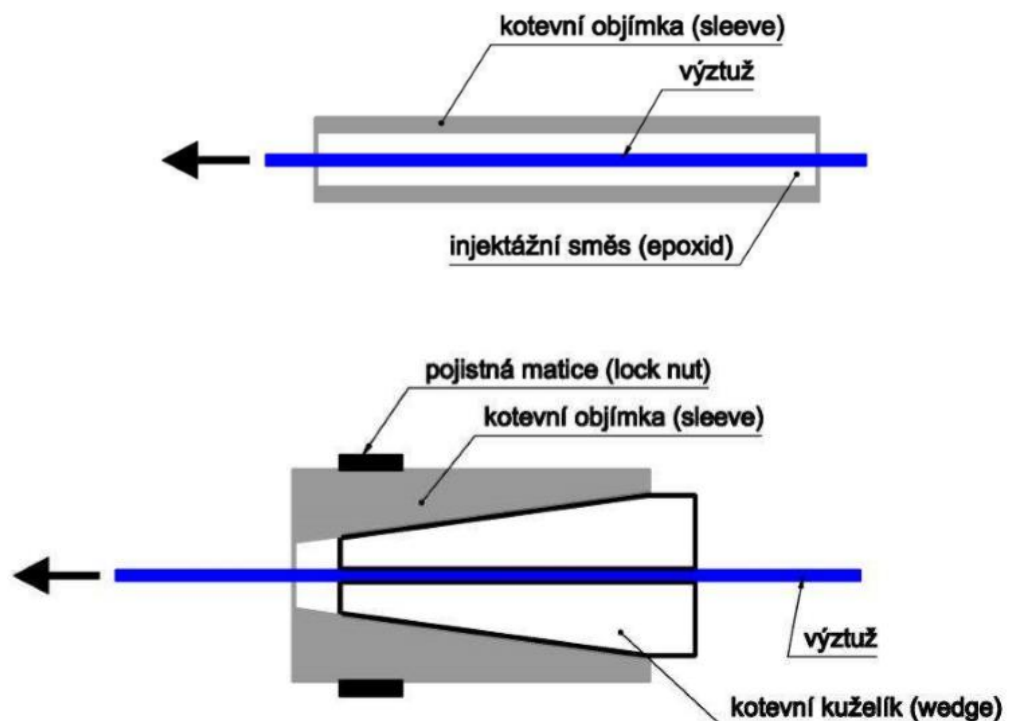
Obrázek 10. – Distribuce napětí pro GFRP a ocelovou vyztuž betonu vyvážený návrh [10]

4.3. Předepjaté výztuže

FRP výztuže mají nízký modul pružnosti proti klasickým ocelové. To znamená, že konstrukce se může při zatížení více přetvořit, ale dochází k rozvoji trhlin v ohýbané části a tím je narušena celistvost prvku. Pro odstranění nadbytečných deformací se výztuže předepnou obdobně jako u ocelových.

Kompozitní výztuže mohou přenášet značné síly vzhledem k jejich tahové pevnosti, ale je obtížné je předepnout a kotvit jelikož mají nízkou pevnost v tlaku kolmo na podélnou osu výztuže [8].

Kotvy používané pro předepnutí kompozitních výztuží jsou mechanické a chemické. Kotvy typu W (wedge systém - mechanické) jsou obdobné jako u ocelových. Nosné lano je kotveno do kotevního kuželíku pomocí smykového tření a dále upevněna do kotevní objímky a pojistné matice. U chemické kotvy typu G se předepnutá výztuž kotví přes injektážní směs do kotevní objímky a následně do betonu. Kotevní objímka je většinou nerezová trubka, která musí mít dostatečnou kotevní délku, tak aby byla schopna bezpečně přenést sílu z nosného lana. Vzhledem k výskytu kovových částí u klasických kotev jsou vyvinuty i kompozitní kotvy, které lze využít i v místech bludných proudů (chemické zátěže apod.).



Obrázek 11. – Kotevní systém typu G (nahore) a Kotevní systém typu W (dole) [8]

EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experimentální část byla zpracována ve Výukovém a výzkumném centru v dopravě v Doubravicích.

Závěrečná práce byla zpracována v souvislosti s řešením vědeckovýzkumného projektu Univerzity Pardubice č. SGS_2018_023.

5. MĚŘICÍ PŘÍSTROJE

K měření v rámci experimentální části byly použity přístroje a prostředky Výukového a výzkumného centra v Doubravicích a Univerzity Pardubice.

5.1. Váha

Pro vážení k určení objemových hmotností čerstvého a ztvrdlého betonu byla využita váha KERN DE60 K20. Na této váze lze vážit položením přípravků na horní zatěžovací desku. Samotná váha má rozsah do 60 kg a měří s přesností ± 20 g. Váha byla kalibrována příslušným úřadem pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.



Obrázek 12. – Váha s příslušenstvím

5.2. Tlakový hrnec

Při měření obsahu vzduchu čerstvého betonu tlakovou metodou byl použit tlakový hrnec vyhovující normě ČSN EN 12 350 – 7 [15]. Dle normy má být nádoba dostatečně tuhá (zkušební tlak 0,2 MPa), vodotěsná a nereagující s obsahem. Minimální objem nádoby byl stanoven na 5 l a poměr průměru k výšce této nádoby má být v rozsahu 0,75 – 1,25. Manometr přístroje má potřebnou stupnici od 0 % do 10 % stupnice je rozdělena, pro rozsah 0 – 3 % po 0,1 %, pro rozsah 3 – 6 % po 0,2 % a pro zbývající rozsah je stupnice dělena po 0,5 %. Tlakový hrnec, který byl využit při zjišťování objemové hmotnosti čerstvého betonu a zjišťování obsahu vzduchu, má naměřený objem nádoby 7,84 dm³ a její hmotnost je 4,34 kg.



Obrázek 13. – Tlakový hnec s příslušenstvím

5.3. Zhutňovací zařízení

Ke zhutňování dodaného čerstvého betonu byl použit vibrační stůl, který je součástí vybavení VVCD. Vibrační stůl se skládá z horní desky, ke které jsou tělesa přitlačována, dvou příložných vibrátorů, které jsou připojeny na kratších stranách desky. Pracovní frekvence příložných vibrátorů je určena frekvencí elektrorozvodné sítě, tj. 50Hz. Stůl je dále pružně oddělen od základu, tak že na nohy stolu nejsou přenášeny žádné vibrace ani síly vnášené na přístroj přitlačováním forem.



Obrázek 14. – Vibrační stůl

5.4. Zatěžovací zařízení

Při zkouškách pevnosti v tlaku byl využit zatěžovací lis od firmy Matest C089P262 s řídicí jednotkou Servotronic. Lis pro měření pevnosti v tlaku má rozsah do 3000 kN. Pro zjištění pevností v tahu ohybem a provádění dalších zkoušek kompozitních desek byl využit lisovací rám Matest C089P262 se shodnou řídicí jednotkou, který má maximální zatěžovací sílu do 150 kN.



Obrázek 15. – Zatěžovací zařízení

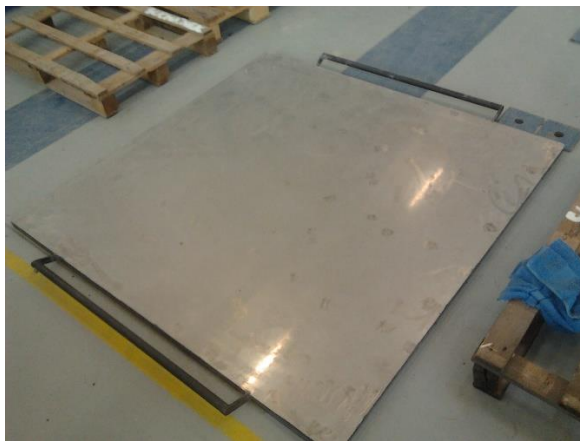
5.5. Další nástroje a pomůcky

Při přípravě bednění byly použity nástroje a pomůcky k řezání a následnému spojování bednění (kotoučová pila, stolní kotoučová pila, vrtačka, vruty, metr aj.).

Nástroje se používaly při zpracovávání betonu a zkouškách (zednické nářadí, stříčka na vodu, tyč ke zhutňování, Abramsův kužel, podkladní deska, stopky, gumová palička, nástroje a zařízení určené k recyklaci zbytků betonu a odpadních vod apod.).

Další nástroje a pomůcky byly používány k upravování výztužných sítí a jejich vkládání do forem, nebo při aplikaci výztužné sítě na povrch lepené pomocí polymeru či k označování zkušebních těles (štetce, nůžky k dělení výztužných sítí, barva, polymer, různé nádoby k mísení a uchovávání chemikálií, modelovací hmota, formovací olej atd.).

Při následné úpravě desek určených ke zkouškám průrazu byl použit permanentní fix, lepicí páska a barva k označení míst, kde budou tělesa oříznuta na daný rozměr. Pro vlastní řezání betonových desek byla použita stolní kotoučová pila určená k řezání betonu, která je dostupná ve VVCD.



Obrázek 16. a) – Podkladní deska Abramsův kužel a další nástroje



Obrázek 16. b) – Stolní kotoučová pila k řezání dřeva (na pravé straně dole) a betonu (na levé straně dole)

6. ZKOUŠENÍ ČERSTVÉHO BETONU - OBECNĚ

Ke zjištění vlastností dodané čerstvého betonu (pevnostní třídy C 30/37) byly použity základní kontrolní zkoušky čerstvého betonu. Dle TKP 18 [24] jde především o zkoušku objemové hmotnosti, obsahu vzduchu a konzistence.

6.1. Objemová hmotnost čerstvého betonu

Pro zjištění objemové hmotnosti čerstvého betonu se postupovalo dle příslušné normy pro zkoušení čerstvého betonu ČSN EN 12 350 – 6 [14].

Na počátku zkoušky se provádí kalibrace objemu měrné nádoby (V) pomocí přepočtu objemu vody ($\rho = 998 \text{ kg/m}^3$). Nádoba používaná ke zjištění objemové hmotnosti se dále používá při zkoušce obsahu vzduchu. Po určení objemu nádoby zjistíme hmotnost prázdné nádoby (m_1). Poté následuje plnění nádoby po vrstvách čerstvým betonem. Pro odstranění velkých bublin se poklepe na stěny gumovou paličkou. Po urovnání povrchu se nádoba se směsí znovu zváží (m_2). Poté vypočítáme objemovou hmotnost čerstvého betonu (D) dle vztahu:

$$D = \frac{m_2 - m_1}{V}$$

Na závěr se objemová hmotnost zaokrouhlí na nejbližších 10 kg/m^3 .

6.2. Obsah vzduchu

Při zjišťování obsahu vzduchu se zkouška provádí podle příslušné normy pro zkoušení čerstvého betonu ČSN EN 12 350 – 7 [15]. Dle normy lze obsah vzduchu měřit dvojím způsobem. Měří se změna stavu vodního sloupce vlivem definovaného tlaku vzduchu,

nebo se měří snížení tlaku vzduchu v přetlakové komoře, kdy je komora předem natlakovaná a volnému tlaku je vystaven povrch betonu (naš případ).

Nádoba naplněná ztuhlým betonem, u které odstraníme velké bubliny (poklepem) a urovnáme volný povrch betonu, se vzduchotěsně uzavře víkem zkušebního přístroje. Poté uzavřeme hlavní ventil přívodu vzduchu a otevřeme pomocné ventily. Do jednoho z pomocných ventilů začneme pomocí stříčky doplňovat vodu dokud volně nevytéká z druhého ventilu, který se uzavře. Pak uzavřeme i první pomocný ventil, tak aby došlo k odstranění vzduchu z přístroje. Následně se provádí kalibrace. Do přístroje se doplní vzduch, až hodnota přesáhne počáteční hodnotu. Po vyrovnání rozdílů v teplotách a ustálení tlaku se přístroj nastaví na počáteční hodnotu. Na manometr se poklepe pro případné zablokování ručičky.

Pokud je přístroj kalibrován, tak přikročíme k otevření hlavního ventilu. Po vystavení betonu vnějšímu tlaku se z manometru odečte hodnota obsahu vzduchu (A_1). Poté vypočítáme obsah vzduchu ve vzorku (A_c) dle vztahu:

$$A_c = A_1 - G$$

Pozn.: G – opravný součinitel pro kamenivo ($G = 0$ není-li změřen)

Obsah vzduchu čerstvého betonu se vyjadřuje v % objemu se zaokrouhlením na nejbližších 0,1 %.



Obrázek 17. – Zkouška obsahu vzduchu

6.3. Konzistence

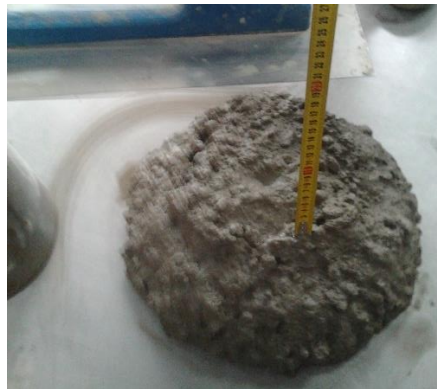
Pro určení konzistence čerstvého betonu se postupovalo dle příslušné normy pro zkoušení čerstvého betonu ČSN EN 12 350 – 2 a ČSN EN 12 350 – 8 [12 a 13]. Dle normy se hodnotí konzistence čerstvého betonu dvojím způsobem sednutím, nebo sednutím rozlítím, kdy se měří průměr největšího rozlítí a čas, za který beton dotече do průměru 500 mm T_{500} .

Na počátku zkoušky připravíme podkladní desku. Zkontrolujeme vodorovnost desky a očištěný povrch desky se navlhčí. Do středu desky položíme Abramsův kužel, který je během plnění betonem přitlačován k desce, plní najednou bez ztuhnutí (SCC) nebo po třech vrstvách

se zhuťováním (25x ocelovou tyčí). Volný povrch se zarovná a deska se očistí od zbytků betonu. Po naplnění kuželu se do 30 vteřin přikročí ke zdvižení kuželu svisle vzhůru během 1 – 3 sekund. Při zdvižení formy se spustí stopky a měří se čas, kdy se beton dotkne vyznačené kružnice (průměr 500 mm) v podkladní desce s přesností 0,1 sekundy. Výsledný čas (T_{500}) se zaokrouhlí na nejbližších 0,5 sekundy. Po dotečení betonu se pokračuje měřením sednutí kužele (S), nebo se měří průměr největšího rozlité (d_1). Poté se změří rozlité v kolmém směru na původní směr (d_2). Měření probíhá s přesností na 10 mm. V závěru zkoušky se beton vizuálně prohlédne, zda nevykazuje známky segregace. Hodnota sednutí rozlitém (SF) se vypočítá dle vztahu:

$$SF = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

Na závěr se hodnota SF (S) zaokrouhlí na nejbližších 10 mm.



Obrázek 18. – Zkouška sednutím

7. ZKOUŠENÍ ZTVRDLÉHO BETONU - OBECNĚ

Zkoušení ztvrdlého betonu se provádí destruktivní zkouškami. Zkoušky pevnosti se zkouší na zkušebních tělesech zhotovených dle ČSN EN 12390-1 [16] a ošetřují se podle normy ČSN EN 12390-2 [17]. Pro zkoušky pevnosti v tlaku se používají 3 tělesa krychle (150x150x150 mm) a 5x válce (Ø150x300 mm) pro stanovení statického modulu pružnosti v tlaku (Nebylo zadáním práce, pro úplnost zkoušku zpracoval Ing. Suchánek.). Pro zkoušku pevnosti v tahu ohybem se zhotovují 3 trámky (100x100x400 mm). Destruktivní zkoušky se provádí na lisech vyhovujících ČSN EN 12390-4 [XX].

7.1. Objemová hmotnost ztvrdlého betonu

Stanovení objemové hmotnosti ztvrdlého betonu se provádí dle ČSN EN 12390-7 [18]. Dle této normy se zkouška provádí na zkušebním tělese s minimálním objemem 0,785 l. Objem tělesa lze dle normy stanovit dvojnásobným způsobem ponořením do vody (nepřavidelný tvar tělesa), nebo výpočtem ze skutečně změřených rozměrů (zkušební tělesa). Objemová hmotnost se dále

stanoví dle daných vlhkostních podmínek zkušební vzorku. Ve stavu okamžité vlhkosti (před další zkouškou), nebo ve stavu vysušeném do ustálené hmotnosti (v sušárně při 105 ± 5 °C).

Zkouška objemové hmotnosti ztvrdlého betonu byla prováděna před destruktivními zkouškami. Pro zjištění hmotnosti (m) byla tělesa vážena po vyjmutí z vodní lázně ve stavu plně nasyceném vodou, pouze se odstranila přebytečná voda z povrchu zkušebních těles. Objem tělesa (V) byl zjišťován měřením skutečných rozměrů. Rozměry tělesa jsou určovány jako průměr ze tří měření. Nakonec se vypočítá objemová hmotnost ztvrdlého betonu (D) dle vztahu:

$$D = \frac{m}{V}$$

V závěru se výsledek zaokrouhluje na nejbližších 10 kg/m^3 .

7.2. Pevnost v tlaku

Zkoušky pevnosti v tlaku se provádí na zkušebních tělesech dle příslušné normy ČSN EN 12390-3 [19]. Lisovací zařízení, na kterém jsou zkoušky prováděny, odpovídá normě ČSN EN 12390-4 [20].

Na počátku zkoušky se připraví lisovací zařízení a zkušební tělesa. Nejprve se očistí dotykové plochy lisu od případných zbytků materiálu. Krychle se usadí tak, aby směr zatěžování byl kolmo na směr ukládání betonu. Těleso se položí na střed spodní lisovací desky. Případně se osadí přidavné desky, tak aby těleso bylo v rozsahu zatěžování. Poté se nastaví lisovací zařízení především rozměry tělesa, zatěžovací plocha (A_c) a rychlost zatěžování. Rychlost zatěžování ($0,6 \pm 0,2 \text{ MPa/s}$) je konstantní až do porušení. Po ukončení zatěžování je nutné posoudit způsob porušení, zda je vyhovující nebo nevyhovující. Z výsledků se zaznamená maximální síla při porušení (F). Poté se vypočítá pevnost v tlaku (f_c) se vypočítá dle vztahu:

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

Na závěr se výsledek pevnosti v tlaku zaokrouhlí na nejbližších $0,1 \text{ MPa/mm}^2$.



Obrázek 19. – Lis určený ke zkouškám pevnosti v tlaku

7.3. Pevnost v tahu ohybem

Při zkouškách pevnosti v tahu ohybem podle ČSN EN 12390-5 [21] jsou tělesa určena ke zkouškám hranoly. Norma uvádí, že zkoušku lze provádět dvojím způsobem dle způsobu zatížení s jedním břemenem, nebo dvěma zatěžovacími břemeny. Lisovací rám, na kterém jsou tělesa lámána, odpovídá normě pro zkušební zařízení ČSN EN 12390-4 [20].

Pro zkoušku pevnosti betonu v tahu ohybem bylo zvoleno zatěžování jedním zatěžovacím břemenem uprostřed. Jelikož zkoušky pevnosti v tahu ohybem betonu navazují na modifikované zkoušky pevnosti v tahu ohybem kompozitních prvků, které byly zatěžovány jedním břemenem uprostřed vzhledem k uspořádání jejich vyztužení.

Na počátku zkoušky se očistí zkušební tělesa od přebytečné vody na povrchu těles. Očistíme také dotykové plochy lisovacího zařízení. Zkušební tělesa se do lisovacího rámu ukládají centricky, tak aby podélná osa tělesa byla kolmo k osám válečků. Hranoly jsou uloženy tak, aby směr zatěžování byl kolmý na směr ukládání betonu. Poté se pokračuje nastavením lisovacího zařízení. Rychlost zatěžování je konstantní v rozsahu 0,04 – 0,06 MPa/s až do porušení. Po porušení zaznamenejme maximální zatížení (F) popř. porušení vně válečků. Na závěr vypočítáme pevnost v tahu za ohybu (s jedním břemenem f_{cf}) dle vztahu:

$$f_{cf} = \frac{3Fl}{2d_1d_2^2}$$

Pozn.: l – vzdálenost podpěrných válečků

d_1, d_2 – rozměry příčného řezu tělesa

pevnost v tahu ohybem se zaokrouhlí na nejbližších 0,1 MPa



Obrázek 20. – Lisovací rám pro zkoušky pevnosti tahu ohybem

8. VLASTNÍ VYZTUŽOVÁNÍ KOMOZITNÍCH PRVKŮ

Experimentální část se zaměřuje na vyztužování betonu pomocí výztužných sítí na bázi čediče. Vyztužování pomocí výztužných sítí slouží především k omezení rozvoje trhlin,

pro zvýšení únosnosti a také se použitím nekovových výztuží sníží celková hmotnost konstrukce, v porovnání s klasickým systémem vyztužování ocelovými prvky.

Pro vlastní vyztužování byly vybrány na trhu dostupné materiály určené k vyztužování betonu. Prvním zkoušeným materiálem je předem impregnovaná čedičová mřížka ROCKMESH (příloha 4.), která je určena k vnitřnímu vyztužování. Druhým byla čedičová síť Alligard (příloha 1., 2. a 3.), která byla pouze částečně impregnovaná polymerem rozpustným v pryskyřicích, lze ji použít ke kontaktnímu laminování. Beton vhodný pro výrobu tenkostěnných prvků vyztužených sítí byl volen SCC vzhledem k velikosti ok v síti, velikosti zrn největší frakce plniva a technologickému procesu výroby prvků (bez nutnosti zhutnění). Modifikované zkoušky probíhaly na zkušebních tělesech (deskách a hranolech), které byly vyztuženy různými způsoby, byla zkoušena odolnost desek proti proražení. Pro procentuální porovnání únosnosti vyztužených těles, byla vyrobena tělesa nevyztužená, která jsou brána jako základ k porovnání. Rozměry zkušebních těles a vkládání výztužných sítí viz příloha 11. a 12.

Pro zkoušky soudržnosti betonu s výztužnou sítí byly vyrobeny zkušební tělesa krychle, které byly vyztuženy obdobně jako desky a hranoly. Zkoušky byly modifikovány pro výztužné sítě a vychází z americké normy ACI tzv. pull-out tests [5] (nebylo zadáním práce, v rámci dalšího vědeckého výzkumu zkoušky zpracoval Ing. Suchánek).



Obrázek 21. – Výztužná síť Alligard (vlevo) a výztužné mřížka ROCKMESH (na pravé straně) Poznámka: čedičová síť / mřížka podložena listem papíru A4

8.1. Návrh vyztužení

Pro analýzu jednotlivých způsobů vyztužení a jejich chování při zatěžování byly navrženy tenkostěnné betonové desky a vyztužené hranoly. Kompozitní betonové prvky se skládají z betonové vrstvy a z výztužné vrstvy. Tloušťka tenké betonové vrstvy pro vnitřní vyztužení byla stanovena na 34 mm, tak aby došlo k dokonalému obalení výztuží a kameniva největší frakce (16 mm) v každé vrstvě betonu. Pro zkoušení chování výztužných sítí

s dostatečnou vrstvou betonu byly použity hranoly, které byly vyztuženy obdobně jako tenkostěnné desky. Při dodatečném kontaktním vyztužení byl použit stejný betonový trámek bez vnitřního vyztužení. Prvek byl pouze dodatečně vyztužen epoxidovým polymerem a výztužnou sítí v celé spodní ploše betonového prvku.

8.1.1. Vyztužení v neutrální ose

Při vyztužování betonové vrstvy vnitřní výztužnou sítí je výztužná vrstva vložena do středu betonu. Tak aby bylo zajištěno co největší spolupůsobení výztuže a betonu, tedy přenosu síly na nosná vlákna. Pro vyztužení vlastních kompozitních prvků vnitřními výztuhami byla použita vnitřní impregnovaná výztužná mřížka spojená v bodech sítě zámky ze speciální hmoty. A samotná vlákna uspořádaná do sítě spojených v bodech vlákny z PP (Polypropylén), která jsou částečně chráněná a spojená polymerem. Pro zachování krytí výztužné sítě se do středu desky vložilo distanční kolečko (Distančník 20 Clinch příloha 5.), které bylo z jedné strany seříznuté na tloušťku desky. Krytí bylo optimální vzhledem k menším průřezům prutů výztužných sítí.



Obrázek 22. – Výroba těles s vnitřním vyztužením

8.1.2. Externí lepená výztuž

Dalším způsobem vyztužení betonové vrstvy je zesílení pomocí přidané výztužné vrstvy lepené na povrch betonu. Přenos zatížení na nosná vlákna je v tomto případě zajištěn pomocí soudržnosti lepidla (dvousložkový epoxid) k vlastním nosným vláknům a betonové podkladní vrstvě. Pro vyztužení zkušebních desek byl použit dvousložkový epoxidový polymer (PES epoxidová pryskyřice 1200), který byl nanesen na celou plochu prvku současně s výztužnou sítí. Po aplikaci výztuže na povrch následuje technologická přestávka (48 hodin), kdy dochází k vytvrzování epoxidu. Po vytvrzení lepidla lze zkušební tělesa zatěžovat. Zkušebními tělesy pro porovnávání způsobu vyztužení byly standardizovaná tělesa hranoly a krychle určené k dalšímu výzkumu pull-out tests.



Obrázek 23. – Příprava povrchu na levé straně a lepení výztužné sítě na pravé straně

8.2. Výroba zkušebních těles

Zkušební tělesa určená pro zkoušky pevnosti se vyrábí a ošetřují dle ČSN EN 12390-2 [17]. Formy k výrobě těles (12x krychle, 5x válce, 12x trámky) odpovídají normě ČSN EN 12390-1 [16]. Pro vytvoření 9 kompozitních desek bylo předem vyrobeno bednění z vodotěsné překližky. Bednění bylo vyrobeno z více dílů, tak aby do poloviny tloušťky desky šla vložit výztužná vrstva. Rozměry zkoušených desek 1000 x 450 x 34 mm vychází ze zatěžovacích možností lisovacího rámu a rozměrů vodotěsné překližky. Tělesa určená ke zkouškám odolnosti proti proražení byla vytvořena ze zkušebních desek po provedení zkoušek pevnosti v tahu ohybem. Po vyhodnocení výsledků o porušení desek byl ze středu desek (v místě porušení) odříznut asi 10 cm pás, tak aby z jedné desky vznikla dvě další tělesa s rozměry 450 x 450 x 34 mm.



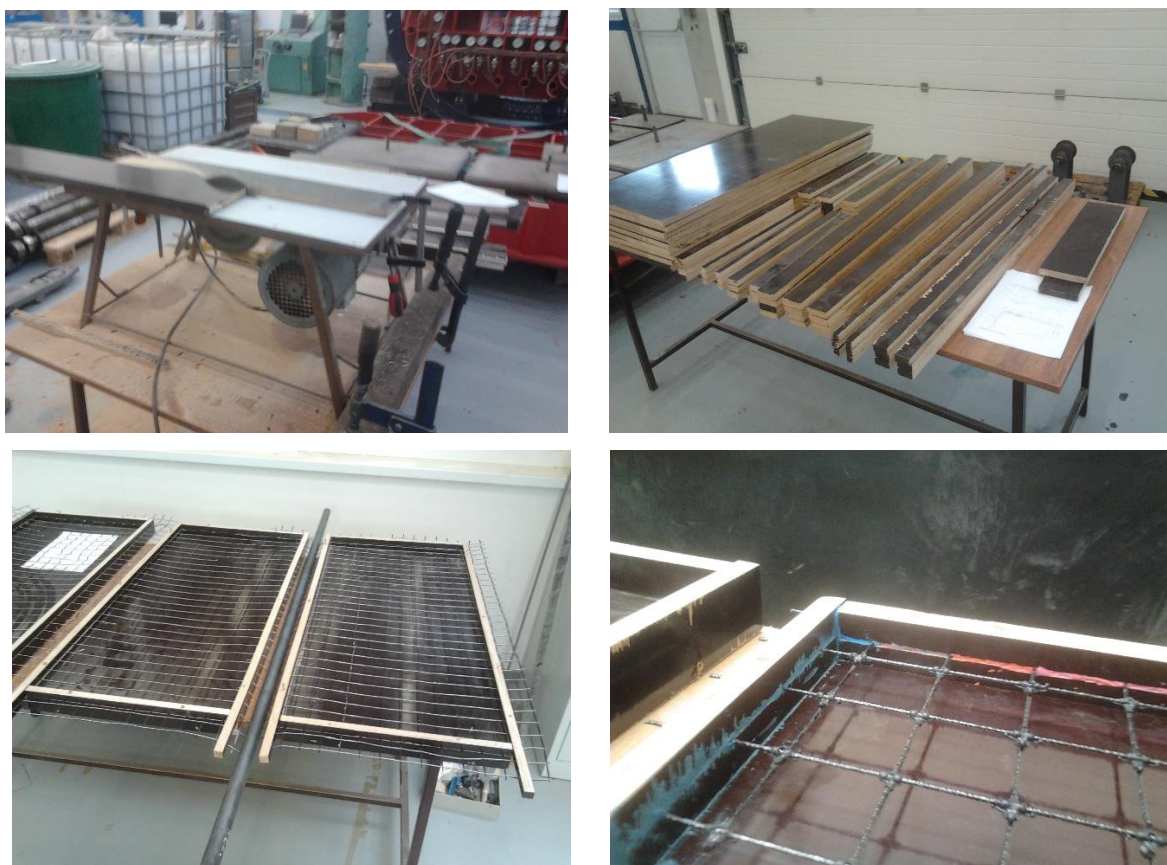
Obrázek 24. – Připravené klasické formy (před naplněním) a úprava zkušebních těles řezem (tělesa byla rozlomena při modifikované zkoušce pevnosti v tahu ohybem)

8.2.1. Výroba bednění

Materiálem pro výrobu bednění byla vodovzdorná překližka hladká topolová s rozměry 2500 x 1250 x 18 mm. Na vyrobení 9 forem bylo zapotřebí dvou formátových překližek. Překližky byly nejprve rozděleny ruční kotoučovou pilou na menší díly, které byly dále rozřezány na stolní kotoučové pile na příslušné díly bednění (viz obrázek 25.). Výkres dělení překližek je v přílohové části práce (příloha 14.).

Po přípravě příslušných dílů se pokračovalo jejich spojováním. Materiálem, kterým se spojovaly díly bednění, jsou vruty. Spojování desek se provádělo pomocí předem předvrtaných otvorů. Výkres sestavení příslušných forem je součástí přílohové části (příloha 15.).

Po sestavení forem docházelo ke vkládání vnitřní výztužné sítě Alligard a následně byla napínána a fixována k formám. Nebo byla vkládána vnitřní výztužná mřížka ROCKMESH. Na závěr byly formy dotěsněny modelovací hmotou v místě spáry určené pro vkládání výztužné vrstvy (viz obrázek 25.).



Obrázek 25. – Výroba bednění a vkládání výztužné vrstvy

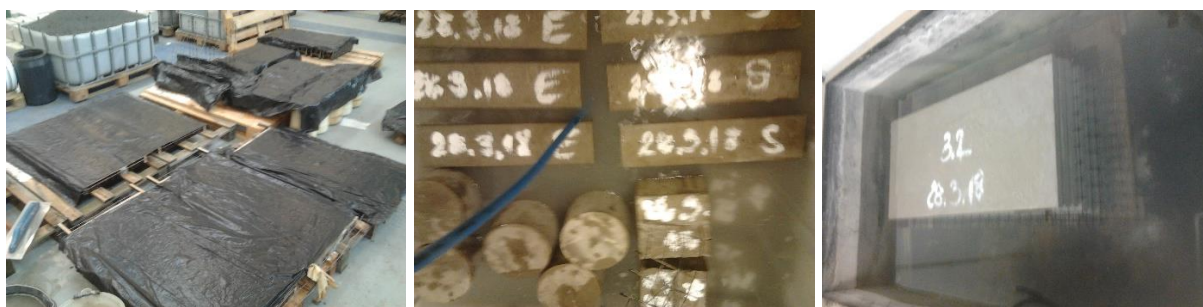
8.2.2. Ukládání betonu

Zkoušený čerstvý beton (SCC; C30/37; X0 (CZ, F.1.1.)) byl dovezen z blízké betonárny CEMEX v Pardubicích – Semtíně (příloha 6. a 7.). Zpracovatelnost byla betonárnou stanovena

na 90 minut. Doba potřebná na dodání a provedení zkoušek čerstvého betonu a zhotovení zkušebních těles byla odhadnuta na 60 minut. Tedy rezerva pro dodání čerstvého betonu 30 minut. Množství odebraného čerstvého betonu bylo odhadnuto na 0,26 m³. Beton byl využit na realizaci vlastní experimentální části a při další související výzkumné činnosti v oblasti čedičových vláken (pull-out tests). Čerstvý beton byl ukládán do předem připravených forem a bednění, které byly předem vytřeny separačním olejem. Plnění klasických forem probíhalo po vrstvách a zhutňování se provádělo ocelovou tyčí 25 vpichy na vrstvu. Po naplnění se odstranily velké bubliny poklepem na formu a povrch byl zarovnan hladítkem. Při výrobě kompozitních desek byly formy plněny ve směru budoucího zatěžování, proto se bednění plnila na vibračním stole, tak aby došlo k dokonalému zhutnění a vyplnění forem. Na závěr se tělesa uložila na vodorovnou podložku. Následně se pokračovalo ošetřováním zkušebních těles překrytím folií (dle kapitoly 8.2.3.).

8.2.3. Ošetřování betonu

Po uložení zkušebních těles se zabránilo odpařování vlhkosti z volného povrchu a nechají se v klidu při teplotě 20 ± 5 °C. Po 24 hodinách byla tělesa odformována a dále ošetřována ve vodní lázni s teplotou 20 ± 5 °C do doby charakteristického stáří 26 dní (vzhledem k technickým možnostem). Jediná odchylka při ošetřování zkušebních těles byla pro případ doposud nevyztužených desek. Která byla ve stáří 23 dní vyjmuta z vodní lázně, osušena a připravena k lepení výztužných sítí. Po vytvrdnutí epoxidového polymeru cca 48 hodin, kdy byla dodatečně vyztužená tělesa nechána na vzduchu do doby stáří těles 26 dní, se pokračuje přípravou ostatních těles na zkoušky pevnosti.



Obrázek 26. – Ošetřování těles

8.3. Zkoušky kompozitních prvků

Zkoušky kompozitních desek se skládaly ze dvou částí modifikovaných zkoušek betonu. V první části byla zkoušena pevnost v tahu ohybem. V druhé části, po upravení zbytků z desek na nová tělesa, se dále zkoušela odolnost desek na průraz. Zkoušky byly zaměřeny na chování

výztužných sítí při zatěžování, způsobu porušení dle způsobu vyztužení, hodnocena byla také síla při porušení, přetvoření a pevnost kompozitních prvků. Kontrolním vzorkem byly obdobné nevyztužené betonové prvky.

8.3.1. Zkoušení kompozitních prvků na pevnost v tahu ohybem

Zkoušky slouží k porovnání chování výztužných sítí při rozdílné mocnosti betonové vrstvy. Zkoušení zkušebních hranolů vychází ze zkoušek pevnosti v tahu ohybem podle ČSN EN 12390-5 [21]. Při zkoušení hranolů se postupovalo dle příslušné normy. Zkoušení tenkých kompozitních desek vychází také ze zkoušek pevnosti betonu v tahu ohybem, které byly dále modifikovány k testování plošného vyztužení. Zkušební zařízení lisovací rám odpovídá normě ČSN EN 12390-4 [20]. Zkušební tělesa (1000 x 450 x 34 mm) byla umístěna do lisu (dle obrázku 27. nebo dle přílohy 13.). Vzdálenost mezi podpěrnými válečky byla 860 mm (uložení na obou stranách 70 mm). Ztěžování zkušebních těles probíhalo jedním břemenem uprostřed. Zatěžovací plocha byla podložena pryžovou podložkou, tak aby zatížení bylo přenášeno na desky rovnoměrně a ne lokálně díky nerovnostem na povrchu desek. Zatížení bylo přenášeno přes podložku do betonu a následně do vláken sítě, které jsou kolmé k podpěrným válečkům a částečně díky tuhému spojení i do rovnoběžných vláken. Zkouška sloužila k ověření vlastností a chování kompozitních desek při vnášení napětí do podélných vláken uvnitř kompozitu až do porušení. Rychlost zatěžování byla zvolena 0,01 MPa/s vzhledem k možné citlivosti konstrukce a možnostem hodnocení přetvoření konstrukčního prvku.

8.3.2. Zkoušení desek na průraz

Zkoušení kompozitních desek na odolnost proti proražení vychází ze zkoušky pro stříkané betony, které byly následně modifikovány podle dostupných přípravků a rozměrových možností. Zkušební zařízení lis rám vyhovuje příslušné normě ČSN EN 12390-4 [20]. Zkušební přípravky pro tuto zkoušku, byly zhotoveny v rámci jiné experimentální činnosti VVCD, jsou zmenšené pro modifikované zkoušky vysokopevnostního betonu [22]. Přípravky byly redukovány o 18 %. Světlost dolního přípravku byla z normových 500 mm zmenšena na 410 mm. Horní zatěžovací přípravek byl také zmenšen ze 100 mm na 80 mm (opět redukce 18 %). Zkušební tělesa (450 x 450 x 34 mm) byla umístěna do lisovacího zařízení (dle obrázku 27. nebo příloha 13.). Zkouškou byly ověřovány vlastnosti a chování desek při rovnoměrném zatěžování kompozitu a sítě až do porušení. Rychlost zatěžování byla obdobná jako při zkoušení pevnosti v tahu ohybem tedy 0,01 MPa/s.



Obrázek 27. – Zkoušení desek pevnost v tahu ohybem na levé straně, zkoušení desek na průraz na pravé straně

9. VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

9.1. Čerstvý beton

Čerstvý beton SCC; C30/37; X0; $D_{\max}16$ (příloha 6. a 7.) byl odebrán z betonárny CEMEX v Pardubicích – Semtíně dne 28. 3. 2018 v cca 7:11. V prostorách výroby betonu došlo ke zdržení při nakládce na vlečný vozík přibližně 10 minut do 7:20. Do prostor VVCD byl čerstvý beton dovezen v cca 7:30. Stanovení konzistence, provedení dalších zkoušek a plnění forem bylo tedy zahájeno 30 minut od vyrobení čerstvého betonu v prostorách betonárny. Podrobnější informace o harmonogramu prováděných prací v prostorách VVCD naleznete v příloze Kontrolní a zkušební plán (příloha 8.).

Čerstvý beton se podle faktury tedy skládá z kameniva maximální frakce 16 mm, z cementu CEMI 42,5R, přísadou byl obecný mletý vápenec a příměsi CX Isoflex 833 a stabilizátor Isostab 6010. Obsah chloridů stanovený laboratoří betonárny je 0,2. Odebrané množství dle faktury je $0,26 \text{ m}^3$ (100 %) přičemž hmotnost činila 595 kg tedy objemová hmotnost je $2288,46 \text{ kg/m}^3$ což odpovídá hodnotě 2290 kg/m^3 .

Množství betonu potřebné na zkušební tělesa bylo stanovené na $0,2527 \text{ m}^3$ (97,19 %) bez redukce o výztužné sítě a zbylých $0,0073 \text{ m}^3$ (2,81 %) bylo určeno ke ztrátám. Skutečné množství čerstvého betonu bylo nedostatečné a nedošlo k vybetonování jedné z desek bez výztuže o objemu $0,0153 \text{ m}^3$ (5,88 %). Tedy množství betonu zpracovaného na tělesa bylo $0,2347 \text{ m}^3$ (91,31 %). Skutečné ztráty činily tedy $0,0226 \text{ m}^3$ (8,69 %). Ztráty byly způsobené nakládkou z nakladače na vlečný vozík v betonárně a další ztráty byly při plnění forem

a zpracovávání zkoušek čerstvého betonu. K recyklaci v prostorách VVCD zbylo minimální množství betonu přibližně 5 litrů ($0,005 \text{ m}^3$) a odpadních vod přibližně 20 litrů.

9.1.1. Stanovení konzistence

Okamžitě po dodání čerstvého betonu do prostor VVCD (přibližně 30 min od výroby) se pokračovalo stanovením konzistence. Dle ceníku CEMEXU pro betonárny Hradec Králové a Pardubice pro rok 2018 byla předpokládána konzistence SF2. Dle předpokládané konzistence SCC byla nejprve prováděna zkouška sednutím – rozlitím. Po vystředění navlhčeného Abramsova kužele s podkladní deskou, byl kužel naplněn najednou bez zhutnění. Volný povrch se urovnal hladítkem na definovaný objem a odstranily se přebytečné zbytky betonu na povrchu desky. Při zdvihání kužele byly spuštěny stopky. Bohužel nedošlo k dotečení betonu do stanovené hranice T_{500} . Změřeno bylo sednutí přibližně 220 mm S5 dále se změřilo rozlití 450×380 , které také neodpovídá normě pro SCC. Po zjištění této skutečnosti bylo rozhodnuto o nutnosti zhutňování čerstvého betonu při výrobě zkušebních těles a zkouškách. Další následná zkouška konzistence sednutím se prováděla obdobně, pouze při plnění kužele docházelo ke zhutňování ve třech vrstvách 25 vpichy ocelovou tyčí. Sednutí kužele bylo stanoveno na 210 mm S4 a bylo změřeno i rozlití 350×340 mm (viz. Obrázek 28.).

Horší zpracovatelnost mohla být způsobena časovou prodlevou od posledního míchání ve výrobě či dopravou na vlečném vozíku, ale čerstvý beton nevykazoval známky segregace ani ke konci zpracovatelnosti.



Obrázek 28. – Zkouška sednutím

9.1.2. Zkouška objemové hmotnosti čerstvého betonu

Předcházející den v rámci příprav před dodáním čerstvého betonu se prováděla kalibrace měrné nádoby pomocí přepočtu objemu vody 998 kg/m^3 při $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Objem nádoby V byl stanoven na $7,84 \text{ dm}^3 = 0,00784 \text{ m}^3$. Po určení konzistence se pokračovalo stanovením objemové hmotnosti čerstvého betonu. Nejprve se zvážila prázdná navlhčená měrná nádoba $m_1 = 4,34 \text{ kg}$. Poté se přistoupilo k plnění nádoby ve vrstvách zhutňovaných ocelovou tyčí po 25 vpichách na vrstvu. Odstranily se velké bubliny poklepem na nádobu a volný povrch byl zarovnan hladítkem. V závěru se odstranily přebytky betonu vně nádoby a pokračovalo se jejím vážením $m_2 = 22,34 \text{ kg}$. Výpočtem byla objemová hmotnost stanovena na 2300 kg/m^3 . Přičemž hodnota objemové hmotnosti stanovená na počátku betonárnou byla přibližně 2290 kg/m^3 .

$$D = \frac{m_2 - m_1}{V} = \frac{22,34 - 4,34}{0,00784} = 2295,92 \cong \mathbf{2300 \text{ kg/m}^3}$$

9.1.3. Zkouška obsahu vzduchu

Po zjištění objemové hmotnosti se pokračovalo změřením obsahu vzduchu v dodaném čerstvém betonu. Měrná nádoba byla již naplněna a zhutněna z předcházející zkoušky. K nádobě se připojila vrchní část přístroje a byla řádně dotěsněna po doplnění vody, natlakování přístroje na počáteční hodnotu a provedení potřebných kalibračních úkonů se prováděla vlastní zkouška. Při zkoušce obsahu vzduchu byla změřena hodnota provzdušnění čerstvého betonu **2,2 %** (viz. Obrázek 28.).



Obrázek 29. – Zkouška obsahu vzduchu

9.2. Ztvrdlý beton

Vzhledem k časové náročnosti příprav vlastních experimentů byly zkoušky ztvrdlého betonu prováděny ve dnech 23. 4. 2018, 24. 4. 2018 a 27. 4. 2018 (26, 27 a 30 dní

charakteristického stáří těles). První den zkoušek bylo ukončeno ošetřování ostatních těles ve vodní lázni. U těles dodatečně vyztužených polymerem bylo ošetřování ukončeno o dva dny dříve (technologická přestávka 48 hodin). Po ukončení ošetřování těles byla následně prováděna zkouška objemové hmotnosti a poté se zkoušela pevnost v tlaku na stejných tělesech (krychlích). Po zjištění krychelné pevnosti byla měřena pevnost v tahu ohybem u standardizovaných trámek nejprve byly zkoušeny pouze betonové hranoly a potom vyztužené hranoly. Následující den byly prováděna modifikovaná zkouška desek pevnosti v tahu ohybem. Poslední den zkoušek po upravení zbytků z rozlomených desek následovaly modifikované zkoušky desek na průraz.

9.2.1. Objemová hmotnost

Pro stanovení objemové hmotnosti ztvrdlého betonu dle ČSN EN 12390-7 [18] pro výpočet použita zkušební tělesa krychle (150 x 150 x 150 mm), na kterých následně byla prováděna zkouška pevnosti v tlaku ztvrdlého betonu. Objemová hmotnost se stanovovala na třech zkušebních tělesech měřením skutečných rozměrů posuvným měřítkem, které byly vždy průměrovány ze tří hodnot, přičemž každý z rozměrů těles byl také měřen třikrát. Po dokonalém osušení vody z povrchu byla tělesa zvážena pro stanovení objemové hmotnosti v plně saturovaném stavu (viz obrázek 30.).



Obrázek 30. – Zkouška objemové hmotnosti ztvrdlého betonu

Vzorek 1.

Měření	1.	2.	3.	Průměr
a ₁ [mm]	150,00	149,90	149,95	149,95
a ₂ [mm]	150,15	149,80	149,60	149,85
a ₃ [mm]	149,75	149,90	149,80	149,82

Tabulka 7. – Rozměry zkušebního tělesa vzorek 1. zkouška objemové hmotnosti ZB

Objem:

$$V_1 = a_1 \times a_2 \times a_3 = 149,95 \times 149,85 \times 149,82 = 3366456,52 \text{ mm}^3 = 0,003367 \text{ m}^3$$

Hmotnost:

$$m_1 = 7,86 \text{ kg}$$

Objemová hmotnost:

$$D_1 = \frac{m_1}{V_1} = \frac{7,86}{0,003367} = 2334,42 \cong \mathbf{2330 \text{ kg/m}^3}$$

Vzorek 2.

Měření	1.	2.	3.	Průměr
a ₁ [mm]	149,75	149,90	149,80	149,82
a ₂ [mm]	148,05	151,15	149,10	149,43
a ₃ [mm]	149,60	149,90	150,10	149,86

Tabulka 8. – Rozměry zkušební tělesa vzorek 2. zkouška objemové hmotnosti ZB

Objem:

$$V_2 = a_1 \times a_2 \times a_3 = 149,82 \times 149,43 \times 149,86 = 3355006,13 \text{ mm}^3 = 0,003355 \text{ m}^3$$

Hmotnost:

$$m_2 = 7,78 \text{ kg}$$

Objemová hmotnost:

$$D_2 = \frac{m_2}{V_2} = \frac{7,78}{0,003355} = 2318,93 \cong \mathbf{2320 \text{ kg/m}^3}$$

Vzorek 3.

Měření	1.	2.	3.	Průměr
a ₁ [mm]	149,20	149,65	150,10	149,65
a ₂ [mm]	149,45	150,00	151,00	150,15
a ₃ [mm]	149,20	149,50	150,20	149,63

Tabulka 9. – Rozměry zkušební tělesa vzorek 3. zkouška objemové hmotnosti ZB

Objem:

$$V_3 = a_1 \times a_2 \times a_3 = 149,65 \times 150,15 \times 149,63 = 3362178,24 \text{ mm}^3 = 0,003362 \text{ m}^3$$

Hmotnost:

$$m_3 = 7,86 \text{ kg}$$

Objemová hmotnost:

$$D_3 = \frac{m_3}{V_3} = \frac{7,86}{0,003362} = 2337,89 \cong \mathbf{2340 \text{ kg/m}^3}$$

Výsledná objemová hmotnost ztvrdlého betonu v plně saturovaném stavu:

$$D = \frac{D_1 + D_2 + D_3}{3} = \frac{2334,42 + 2318,93 + 2337,89}{3} = 2330,41 \cong \mathbf{2330 \text{ kg/m}^3}$$

9.2.2. Pevnost v tlaku

Pro zjištění pevnosti v tlaku byla provedena zkouška na zkušebních tělesech (krychlich 150 x 150 x 150 mm) dle příslušné normy ČSN EN 12390-3 [19]. Lis, na kterém byly zkoušky prováděny, odpovídá normě ČSN EN 12390-4 [20]. Rychlost zatěžování byla nastavena na normových 0,6 MPa/s. Krychelná pevnost byla měřena následně po stanovení objemové hmotnosti z důvodů zjištění rozměrů těles a zároveň stanovení zatěžovací plochy. Cílem zkoušky bylo změření síly působící při porušení a následné stanovení krychelné pevnosti. Vlastní pevnost v tlaku byla vypočítána jako průměr ze tří hodnot. Porušení u všech vzorků bylo vyhovující charakteristické trhlinkami ve směru zatěžování a po ukončení zatěžování zůstala celá krychle (viz obrázek 30.).

Porušení bylo typické zbytkovou pevností a současně štěpením ve směru zatěžování, které je způsobeno kompozitním makrodisperzním (granulárním) systémem betonu. Porušení bylo charakteristické, tím že v průběhu zatěžování docházelo k tvorbě mikrotrhlin (štěpením slabšími místy mezi zrný rovnoběžně se směrem zatěžování a drcením cementového tmelu mezi zrný), následným dosedáním zrn uvnitř kompozitu (zpevňování během zatěžování a šíření napětí uvnitř betonového kompozitu) a zároveň šířením trhlin až do porušení.



Obrázek 31. – Zkouška pevnosti v tlaku (na levé straně), porušené krychle (na pravé straně)

Vzorek 1.

Zatěžovací plocha:

$$a_{c1} = a_1 \times a_2 = 149,95 \times 149,85 = 22470,0075 \text{ mm}^2$$

Síla při porušení:

$$F_1 = 932,849 \text{ kN}$$

Krychelná pevnost v tlaku:

$$f_{c1} = \frac{F_1}{a_{c1}} = \frac{932849}{22470,0075} = 41,52 \cong \mathbf{41,5 \text{ MPa}}$$

Vzorek 2.

Zatěžovací plocha:

$$a_{c2} = a_1 \times a_2 = 149,82 \times 149,43 = 22387,6026 \text{ mm}^2$$

Síla při porušení:

$$F_2 = 883,349 \text{ kN}$$

Krychelná pevnost v tlaku:

$$f_{c2} = \frac{F_2}{a_{c2}} = \frac{88349}{22387,6026} = 39,46 \cong \mathbf{39,5 \text{ MPa}}$$

Vzorek 3.

Zatěžovací plocha:

$$a_{c3} = a_1 \times a_2 = 149,65 \times 150,15 = 22469,9475 \text{ mm}^2$$

Síla při porušení:

$$F_3 = 901,615 \text{ kN}$$

Krychelná pevnost v tlaku:

$$f_{c3} = \frac{F_3}{a_3} = \frac{901615}{22469,9475} = 40,13 \cong \mathbf{40,1 \text{ MPa}}$$

Výsledná krychelná pevnost:

$$f_c = \frac{f_{c1} + f_{c2} + f_{c3}}{3} = \frac{41,52 + 39,46 + 40,13}{3} = 40,37 \cong \mathbf{40,4 \text{ MPa}}$$

9.2.3. Pevnost v tahu ohybem

Zkoušky nevyztužených hranolů sloužily ke zjištění pevnosti v tahu ztvrdlého betonu a pro porovnávání s vyztuženými hranoly. Pevnost v tahu ohybem byla zkoušena dle ČSN EN 12390-5 [21]. Lisovací rám a zatěžovací zařízení vyhovuje normě ČSN EN 12390-4 [20]. Rychlost zatěžování byla dle normy 0,04 MPa/s. Zkoušena byla standardní zkušební tělesa s rozměry 100 x 100 x 400 mm. Vzdálenost podpěrných válečků byla doporučena 300 mm. Zkouška probíhala s jedním zatěžovacím břemenem uprostřed, jelikož zkoušky pevnosti v tahu ohybem navazují na zkoušky desek. Lis byl ovládán automaticky, pouze byly měněny parametry zatěžování podle potřeb jednotlivých druhů trámů pro stanovení optimálního nastavení lisovacího rámu. Z těchto důvodů je možné snížení pevnosti v tahu ohybem zkušební vzorku. Jelikož síla při porušení mohla být menší z důvodů cyklického zatěžování zkušebních těles, což mohlo být způsobeno pružností těles (zatěžování nebylo prováděno se správnými mezemi zatěžování kolem charakteristické hodnoty). Nejprve byly zkoušeny nevyztužené hranoly s původním nastavením lisu, v případě prvního tělesa byl zjištěn problém s nastavením charakteristické hodnoty, ale u ostatních dvou těles tento problém nebyl. Zaznamenané porušení bylo křehkým lomem způsobené vnitřní prací uložením pružné energie. Trhlina vznikla pod zatížením a směřovala směrem vzhůru. Porušení bylo částečně intergranulární (mezi zrný žuly, křemene apod.) a zároveň i intragranulární (přes zrna křemene a ostatní druhy méně pevných zrn viz obrázek 32.).



Obrázek 32. – Zkouška pevnosti v tahu ohybem (nahore), porušena zkušební tělesa (dole)

Vzorek 1.

Měření	1.	2.	3.	Průměr
a_1 [mm]	100,50	101,00	100,00	100,50
a_2 [mm]	100,00	100,00	99,50	99,83
b [mm]	399,60	399,50	399,42	399,51

Tabulka 10. – Rozměry zkušební tělesa vzorek 1. zkouška pevnost v tahu ohybem ZB
Síla při porušení:

$$F_1 = 11,235 \text{ kN}$$

Pevnost v tahu ohybem:

$$f_{cf1} = \frac{3Fl}{2a_1a_2^2} = \frac{3 \times 11235 \times 300}{2 \times 100,50 \times 99,83^2} = \frac{10111500}{2003171,8089} = 5,048 \cong \mathbf{5,1 \text{ MPa}}$$

Vzorek 2.

Měření	1.	2.	3.	Průměr
a_1 [mm]	99,90	100,50	101,10	100,50
a_2 [mm]	99,60	99,65	99,75	99,67
b [mm]	401,00	400,60	400,00	400,53

Tabulka 11. – Rozměry zkušební tělesa vzorek 2. zkouška pevnost v tahu ohybem ZB

Síla při porušení:

$$F_2 = 13,723 \text{ kN}$$

Pevnost v tahu ohybem:

$$f_{cf2} = \frac{3Fl}{2a_1a_2^2} = \frac{3 \times 13723 \times 300}{2 \times 100,50 \times 99,67^2} = \frac{12350700}{1996755,8889} = 6,185 \cong \mathbf{6,2 \text{ MPa}}$$

Vzorek 3.

Měření	1.	2.	3.	Průměr
a ₁ [mm]	100,10	101,15	99,60	100,28
a ₂ [mm]	99,30	99,80	99,50	99,53
b [mm]	401,00	401,60	400,90	401,17

Tabulka 12. – Rozměry zkušebního tělesa vzorek 3. zkouška pevnost v tahu ohybem ZB
Síla při porušení:

$$F_3 = 13,547 \text{ kN}$$

Pevnost v tahu ohybem:

$$f_{cf3} = \frac{3Fl}{2a_1a_2^2} = \frac{3 \times 13547 \times 300}{2 \times 100,28 \times 99,53^2} = \frac{12192300}{1986791,663704} = 6,137 \cong \mathbf{6,1 \text{ MPa}}$$

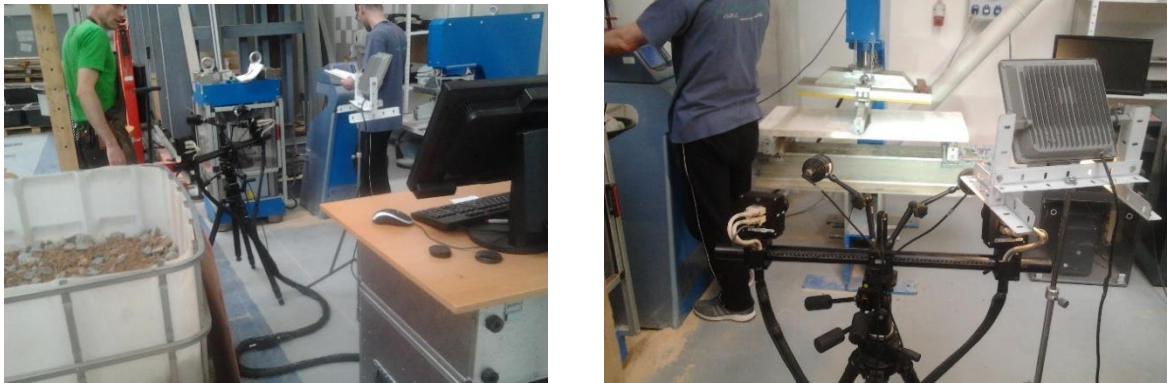
Výsledná pevnost v tahu ohybem:

$$f_c = \frac{f_{cf1} + f_{cf2} + f_{cf3}}{3} = \frac{5,048 + 6,185 + 6,137}{3} = 5,79 \cong \mathbf{5,8 \text{ MPa}}$$

9.2.4. Pevnost v tahu ohybem nevyztužených betonových desek

Zkoušky nevyztužených desek sloužily jako kontrolní vzorek pro porovnání s deskami s vnitřním vyztužením. Pevnost v tahu ohybem u betonových desek (1000 x 450 x 34 mm) byla zkoušena modifikovanými zkouškami dle ČSN EN 12390-5 [21]. Rozměry těles byly stanoveny měřením metrem a posuvným měřítkem (tloušťka) a průměrováním naměřených rozměrů zkušebních těles. Lisovací rám byl následně po zkouškách pevnosti v tahu ohybem upraven oddálením podpěrných válečků do stanovené vzdálenosti 860 mm. Zatěžovací zařízení a lis vyhovují normě ČSN EN 12390-4 [20]. Zatěžování bylo automatické, pouze se hledalo optimální nastavení lisu na prvním zatěžovaném tělese. Případná chybovost byla způsobena tím, že zatěžování nebylo ve správných mezích, a současně procentuální mezní výkyv hodnot při porušení mohl být mimo doporučený rozptyl hodnot. Popřípadě došlo ke křehkému lomu a nebyla změřena hodnota při porušení. Porušení bylo obdobné jako u betonových hranolů křehkým lomem. Přičemž trhлина byla inicializována při spodním povrchu a šířila se směrem k zatížení až do porušení. Hodnota branná jako základ pro porovnávání s vyztuženými deskami byla stanovena pouze z druhého vzorku, vzhledem k rázovému porušení prvního vzorku a nevyrobení třetího zkušebního tělesa (nedostatek materiálu). Nicméně druhá naměřená

hodnota byla dostatečně vysoká a podobná při porovnávání s vyztuženými deskami (obdobné hodnoty jako u tahu za ohybu klasických zkušebních těles). Navíc hodnota stanovená dle tabulek a předběžného výpočtu pro beton C30/37 byla cca 2,2 kN. Měření přetvoření probíhalo simultánně se zatěžováním. Přetvoření se měřilo optickým systémem ARAMIS, který pracuje na principu digitální korekce obrazů (DIC). Kamery byly zaměřeny, tak aby snímaly polovinu desky a oblast vzniku trhlin z důvodů symetričnosti desky. Snímkování probíhalo 1 snímek za sekundu pro dobré vyhodnocování systémem, kdy síla vnášená lisem do desek je 0,01 MPa/s.



Obrázek 33. – Kalibrace přístrojů před vlastními zkouškami pevnosti v tahu ohybem betonových desek (levý snímek) a snímání systémem ARAMIS (pravý snímek)

Vzorek 1.

Rozměry tělesa:

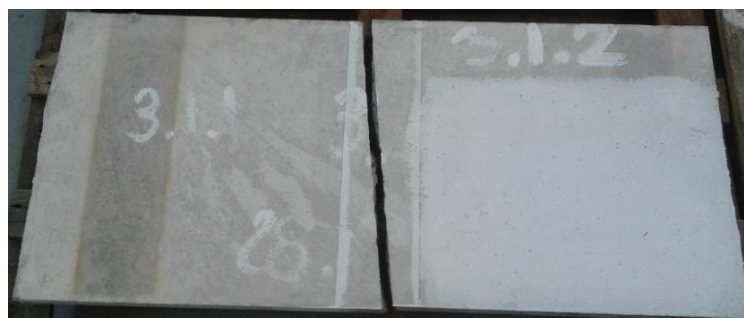
1001 x 449 x 34,53 mm

Síla při porušení:

Nebyla zaznamenána

Charakter porušení vzorku 1.:

Hodnota síly při porušení nebyla lisem změřena, v průběhu zatěžování došlo k porušení křehkým lomem, což bylo způsobeno rychlostí náběhu zatěžování. Porušení bylo charakteristické rázovým porušením prvku. Trhlina se šířila pod ostrým úhlem vzhledem k zatěžovacímu válečku (viz obrázek 34.).



Obrázek 34. – Porušené zkušební těleso 3.1.

Vzorek 2.

Rozměry tělesa:

1001 x 450 x 33,83 mm

Síla při porušení:

$$F_2 = 2,059 \text{ kN}$$

Pevnost v tahu ohybem betonových desek:

$$f_{cf} = \frac{3Fl}{2a_1a_2^2} = \frac{3 \times 2059 \times 860}{2 \times 450 \times 33,83^2} = \frac{5312220}{1030022,01} = 5,157 \cong \mathbf{5,2 \text{ MPa}}$$

Charakter porušení vzorku 2.:

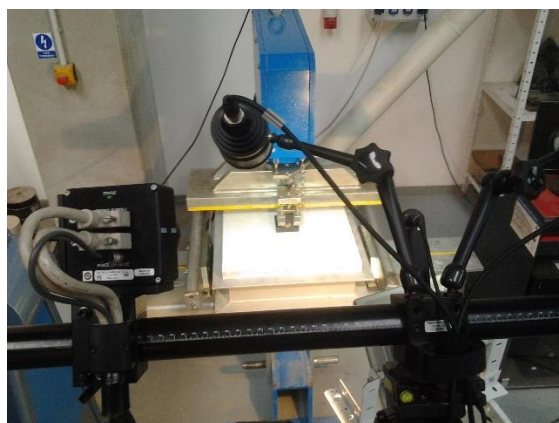
Porušení nevyztužené betonové desky bylo charakteristické křehkým lomem, kdy se trhlinka šířila od spodní tažené plochy desky směrem k tlačené části desky. Trhlinka se šířila neostrým lomem slabšími místy v betonu kolem zrn kameniva. Tedy jediné co ovlivnilo šíření trhliny v nevyztuženém prvku, byla nehomogenita betonu a anizotropie betonu. Přetvoření změřené systémem ARAMIS je v přílohové části (příloha 9.).



Obrázek 35. – Porušené zkušební těleso 3.2.

9.2.5. Zkoušení nevyztužených betonových desek na průraz

Zkoušky nevyztužených betonových desek jsou brány jako základ pro porovnávání s vyztuženými deskami. Zkoušky vychází z normy pro zkoušení stříkaných betonů ČSN EN 14488 – 5 [21], které byly dále modifikovány dle rozměrových možností zkušebních těles (450 x 450 x 34 mm) a vyrobených přípravků. Rozměry těles byly stanoveny měřením a následným průměrováním hodnot. Lisovací rám byl následně po provedení zkoušek pevnosti v tahu ohybem desek přestavěn na zkoušky průrazu desek. Horní zatěžovací válec byl nahrazen horním zatěžovacím přípravkem (80 x 80 mm) spodní podpůrné válečky byly posunuty do stran a byl k nim připevněn spodní přípravek (světlost spodního přípravku 410 x 410 mm). Zatěžovací zařízení a lisovací rám odpovídají normě na zkušební zařízení ČSN EN 12390-4 [20]. Rychlost zatěžování byla stanovena na 0,01 MPa/s. Společně se zatěžováním probíhalo měření přetvoření desek systémem ARAMIS podobně jako při zkouškách pevnosti v tahu ohybem desek. Kamerami byla sledována horní zatěžovaná plocha v rozsahu větším než polovina desky. Snímkování probíhalo s obdobnou rychlostí jako při předcházejících zkouškách 1 snímek/s. Měření přetvoření systémem ARAMIS nebylo součástí zadané práce. Měření přetvoření bylo prováděno v rámci dalšího vědeckého výzkumu Univerzity Pardubice.



Obrázek 36. – Kalibrace přístrojů před vlastními zkouškami desek na proražení (levý snímek) a snímání systémem ARAMIS (pravý snímek)

Vzorek 1.

Rozměry tělesa:

450 x 450 x 33,83 mm

Síla při porušení:

$$F_1 = 6,024 \text{ kN}$$



Obrázek 37. – Porušené zkušební těleso 3.1.2.

Vzorek 2.

Rozměry tělesa:

450 x 450 x 34,53 mm

Síla při porušení:

$$F_2 = 5,412 \text{ kN}$$



Obrázek 38. – Porušené zkušební těleso 3.2.1.

Vzorek 3.

Rozměry tělesa:

451 x 450 x 34,53 mm

Síla při porušení:

$$F_3 = 4,445 \text{ kN}$$



Obrázek 39. – Porušené zkušební těleso 3.2.2.

Výsledná průměrná síla při porušení:

$$F = \frac{F_1 + F_2 + F_3}{3} = \frac{6,024 + 5,412 + 4,445}{3} = 5,294 \text{ kN}$$

Charakter porušení:

Porušení nevyztužené desky při zkoušce průrazu desek, bylo charakteristické postupným šířením trhlin ze středu desky k uloženým stranám. Trhliny vznikaly nejdříve ve středu desky při ohýbaném povrchu, postupně v závislosti na zatížení se rozšiřovaly, šířily se skrz tloušťku desky a zároveň do stran. Trhliny byly charakteristické neostrým šířením mezi zrnky kameniva skrz tloušťku desky i do stran. Zaznamenané praskliny procházely kolmo přes betonovou vrstvu.

9.3. Kompozitní prvky

Tělesa, na která byla aplikována externí výztužná síť se ošetřovala ve vodní lázni do 20. 4. 2018 (23 dnů charakteristické stáří). Protože bylo nutné aplikovat externí lepenou výztuž a ponechat je neošetřované po dobu 48 hodin (vytvřování epoxidové pryskyřice). U ostatních těles vyztužených vnitřní výztuží bylo ošetřování ukončeno dne 23. 4. 2018 (26 dnů). Zkoušky kompozitních prvků byly prováděny obdobně jako u betonových těles ve dnech 23. 4. 2018 zkoušky kompozitních hranolů na pevnost v tahu ohybem. Dne 24. 4. 2018 (27 dnů) modifikované zkoušky pevnosti v tahu ohybem kompozitních desek a poslední den 27. 4. 2018 (30 dnů charakteristické stáří) modifikované zkoušky kompozitních desek na průraz. Zkoušky kompozitních prvků následovaly okamžitě po zkoušení betonových prvků ve shodné posloupnosti zkoušek. Jelikož bylo vždy nutné mezi jednotlivými zkouškami přestavět lis popřípadě vyměnit přípravky pro zkoušení desek na průraz.

9.3.1. Pevnost v tahu ohybem

Zkoušení pevnosti v tahu ohybem u vyztužených kompozitních těles vychází z normy ČSN EN 12390-5 [21] a slouží pro zjištění chování výztužných sítí při větších vrstvách betonu. Zatěžovací zařízení a lisovací rám a vyhovují normě pro zkušební zařízení ČSN EN 12390-4 [20]. Rychlost zatěžování byla stanovena na 0,04 MPa/s. Zkoušena byla standardní tělesa hranoly s rozměry 100 x 100 x 400 mm, které byly vyztužené různými způsoby. Sestavení lisu bylo obdobné jako při zkoušení betonových prvků vzdálenost podpěrných válečků 300 mm a zatěžování s jedním břemenem uprostřed. Protože zkoušky pevnosti v tahu ohybem navazují na modifikované zkoušky desek. Zatěžování lisem bylo opět automatické, pouze se měnily parametry zatěžování dle jednotlivých druhů vyztužení pro nastavení mezí zatěžování lisovacího rámu. Proto je možné snížení pevnosti v tahu ohybem u jednoho zkušební vzorku z důvodů cyklického zatěžování zkušebního tělesa. Toto bylo nejspíš způsobeno nastavením lisu (zatěžování kolem charakteristické hodnoty či stanovením mezí), nebo vlastnostmi zkušebních těles (vratnou elastickou deformací způsobenou pružností těles, nerovnostem

při dosedání na epoxidovou vrstvu). Zkoušení trámek vyztužených různými způsoby následovalo po zkoušení nevyztužených betonových trámek.

Vzorek Alligard 1.

Měření	1.	2.	3.	Průměr
a ₁ [mm]	102,00	102,50	101,85	102,12
a ₂ [mm]	102,00	101,00	101,50	101,50
b [mm]	401,00	401,50	401,50	401,33

Tabulka 13. – Rozměry zkušební tělesa Alligard 1. zkouška pevnost v tahu ohybem
Síla při porušení:

$$F_1 = 13,495 \text{ kN}$$

Pevnost v tahu ohybem:

$$f_{cf1} = \frac{3Fl}{2a_1a_2^2} = \frac{3 \times 13495 \times 300}{2 \times 102,12 \times 101,50^2} = \frac{12145500}{2104131,54} = 5,772 \cong \mathbf{5,8 \text{ MPa}}$$

Vzorek Alligard 2.

Měření	1.	2.	3.	Průměr
a ₁ [mm]	100,50	99,40	101,50	100,47
a ₂ [mm]	101,15	100,70	100,60	100,82
b [mm]	400,50	400,20	401,18	400,63

Tabulka 14. – Rozměry zkušební tělesa Alligard 2. zkouška pevnost v tahu ohybem
Síla při porušení:

$$F_2 = 9,858 \text{ kN}$$

Pevnost v tahu ohybem:

$$f_{cf2} = \frac{3Fl}{2a_1a_2^2} = \frac{3 \times 9858 \times 300}{2 \times 100,47 \times 100,82^2} = \frac{8872200}{2042489,272056} = 4,344 \cong \mathbf{4,3 \text{ MPa}}$$

Vzorek Alligard 3.

Měření	1.	2.	3.	Průměr
a ₁ [mm]	99,95	100,00	100,90	100,28
a ₂ [mm]	100,10	99,85	99,75	99,90
b [mm]	401,00	401,16	401,16	401,11

Tabulka 15. – Rozměry zkušební tělesa Alligard 3. zkouška pevnost v tahu ohybem
Síla při porušení:

$$F_3 = 13,450 \text{ kN}$$

Pevnost v tahu ohybem:

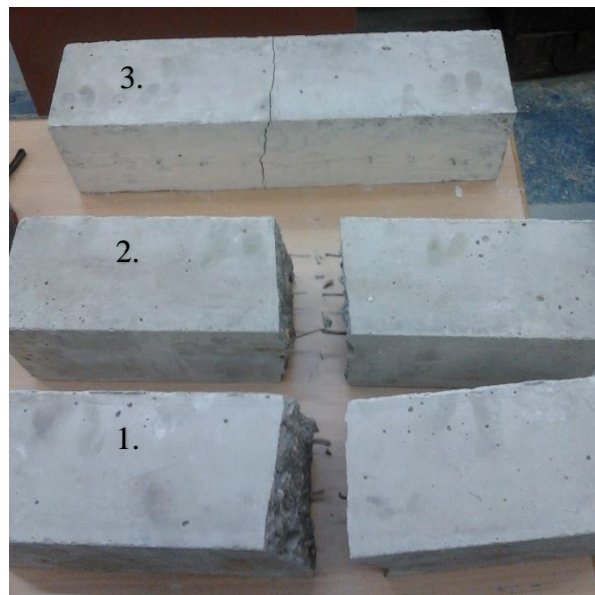
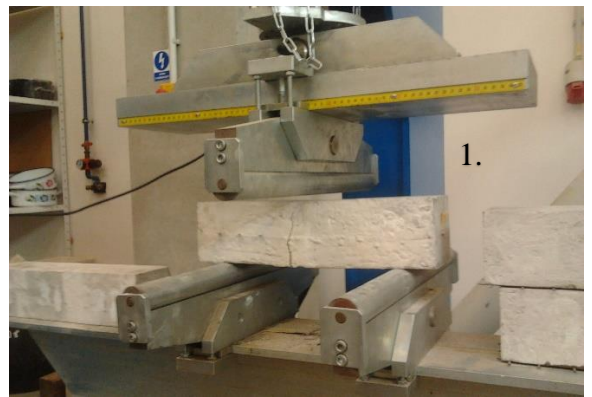
$$f_{cf3} = \frac{3Fl}{2a_1a_2^2} = \frac{3 \times 13450 \times 300}{2 \times 100,28 \times 99,90^2} = \frac{12105000}{2001590,8056} = 6,048 \cong \mathbf{6,1 \text{ MPa}}$$

Výsledná pevnost v tahu ohybem Alligard:

$$f_c = \frac{f_{cf1} + f_{cf2} + f_{cf3}}{3} = \frac{5,772 + 4,344 + 6,048}{3} = 5,388 \cong \mathbf{5,4 \text{ MPa}}$$

Charakter porušení:

Porušení hranolů bylo křehkým lomem napříč betonovou částí kompozitu způsobené uložení pružné energie. Nosná vlákna byla porušena prací rozhraní, původem je rozdíl v tahovém přetvoření a vytahováním vláken způsobené třecím prokluzem při zatěžování. Trhlina vznikla při spodním povrchu hranolu pod zatížením a směřovala napříč kompozitem směrem k zatížení až do porušení (viz obrázek 40.). Šíření trhliny bylo pouze nepatrně ovlivněno výztužnou sítí. K porušení došlo v místě mezi příčně uspořádanými vlákny a došlo k přetržení podélných nosných vláken v oblasti trhliny.



Obrázek 40. – Zkouška pevnosti v tahu ohybem Alligard (nahore), porušena zkušební tělesa Alligard (dole)

Vzorek Alligard a epoxid 1.

Měření	1.	2.	3.	Průměr
a ₁ [mm]	99,20	100,00	100,50	99,90
a [mm] ²	99,10	100,10	99,50	99,57
b [mm]	389,30	38,97	389,9	389,63

Tabulka 16. – Rozměry zkušební tělesa Alligard a epoxid 1. zkouška pevnost v tahu ohybem

Síla při porušení:

$$F_1 = 11,263 \text{ kN}$$

Pevnost v tahu ohybem:

$$f_{cf1} = \frac{3Fl}{2a_1a_2^2} = \frac{3 \times 11263 \times 300}{2 \times 99,90 \times 99,57^2} = \frac{10136700}{1980854,14302} = 5,117 \cong \mathbf{5,1 \text{ MPa}}$$

Vzorek Alligard a epoxid 2.

Měření	1.	2.	3.	Průměr
a ₁ [mm]	100,00	100,75	100,70	100,48
a [mm] ²	99,30	99,45	99,50	99,42
b [mm]	400,80	400,20	401,18	400,73

Tabulka 17. – Rozměry zkušební tělesa Alligard a epoxid 2. zkouška pevnost v tahu ohybem

Síla při porušení:

$$F_2 = 13,495 \text{ kN}$$

Pevnost v tahu ohybem:

$$f_{cf2} = \frac{3Fl}{2a_1a_2^2} = \frac{3 \times 13495 \times 300}{2 \times 100,48 \times 99,42^2} = \frac{12154500}{1986356,242944} = 6,115 \cong \mathbf{6,1 \text{ MPa}}$$

Vzorek Alligard a epoxid 3.

Měření	1.	2.	3.	Průměr
a ₁ [mm]	99,10	100,10	100,00	99,73
a ₂ [mm]	99,90	99,00	99,55	99,48
b [mm]	401,08	400,50	400,80	400,79

Tabulka 18. – Rozměry zkušební tělesa Alligard a epoxid 3. zkouška pevnost v tahu ohybem

Síla při porušení:

$$F_3 = 12,277 \text{ kN}$$

Pevnost v tahu ohybem:

$$f_{cf3} = \frac{3Fl}{2a_1a_2^2} = \frac{3 \times 12277 \times 300}{2 \times 99,73 \times 99,48^2} = \frac{11049300}{1973910,093984} = 5,598 \cong \mathbf{5,6 \text{ MPa}}$$

Výsledná pevnost v tahu ohybem Alligard a epoxid:

$$f_c = \frac{f_{cf1} + f_{cf2} + f_{cf3}}{3} = \frac{5,117 + 6,115 + 5,598}{3} = 5,61 \cong \mathbf{5,6 MPa}$$

Charakter porušení:

Porušení hranolů, vyztužených pomocí externí lepené výztužné sítě Alligard a epoxidovou pryskyřicí 1200 EPOLEX, bylo charakteristické porušením výztužné vrstvy v nejslabším místě na spodním povrchu ohýbaného hranolu. Šíření trhliny bylo tedy ovlivněno místem inicializace trhliny. Po porušení výztužné vrstvy pomocí práce rozhraní a matrice, rozštěpením matrice rovnoběžně s vlákny způsobené povrchovou energií matrice a vazebnou energií vláken, matrice a betonového rozhraní. Trhlina se poté šířila křehkým lomem skrz betonovou část kompozitního prvku směrem k zatěžovacímu válečku (viz obrázek 41.).



Obrázek 41. – Porušená zkušební tělesa Alligard a epoxidová pryskyřice

Vzorek ROCKMESH 1.

Měření	1.	2.	3.	Průměr
a ₁ [mm]	102,00	101,50	101,90	101,80
a ₂ [mm]	99,90	100,00	100,00	99,97
b [mm]	400,40	400,30	400,50	400,40

Tabulka 19. – Rozměry zkušebního tělesa ROCKMESH 1. zkouška pevnost v tahu ohybem
Síla při porušení:

$$F_1 = 13,226 \text{ kN}$$

Pevnost v tahu ohybem:

$$f_{cf1} = \frac{3Fl}{2a_1a_2^2} = \frac{3 \times 13226 \times 300}{2 \times 101,82 \times 99,97^2} = \frac{11903400}{2034778,58324} = 5,850 \cong \mathbf{5,9 \text{ MPa}}$$

Vzorek ROCKMESH 2.

Měření	1.	2.	3.	Průměr
a ₁ [mm]	101,10	100,45	100,20	100,58
a ₂ [mm]	100,25	100,75	100,25	100,42
b [mm]	400,80	400,80	400,60	400,73

Tabulka 20. – Rozměry zkušebního tělesa ROCKMESH 2. zkouška pevnost v tahu ohybem
Síla při porušení:

$$F_2 = 13,107 \text{ kN}$$

Pevnost v tahu ohybem:

$$f_{cf2} = \frac{3Fl}{2a_1a_2^2} = \frac{3 \times 13107 \times 300}{2 \times 100,58 \times 100,42^2} = \frac{11796300}{2028532,924624} = 5,815 \cong \mathbf{5,8 \text{ MPa}}$$

Vzorek ROCKMESH 3.

Měření	1.	2.	3.	Průměr
a ₁ [mm]	98,90	98,65	98,80	98,78
a ₂ [mm]	100,25	99,85	99,95	100,02
b [mm]	400	400	400	400

Tabulka 21. – Rozměry zkušebního tělesa ROCKMESH 3. zkouška pevnost v tahu ohybem
Síla při porušení:

$$F_3 = 13,509 \text{ kN}$$

Pevnost v tahu ohybem:

$$f_{cf3} = \frac{3Fl}{2a_1a_2^2} = \frac{3 \times 13509 \times 300}{2 \times 98,78 \times 100,02^2} = \frac{12158100}{1976390,319024} = 6,152 \cong \mathbf{6,2 \text{ MPa}}$$

Výsledná pevnost v tahu ohybem ROCKMESH:

$$f_c = \frac{f_{cf1} + f_{cf2} + f_{cf3}}{3} = \frac{5,850 + 5,815 + 6,152}{3} = 5,939 \cong \mathbf{5,9\ MPa}$$

Charakter porušení:

Zkušební tělesa, která byla vyztužena kompozitní sítí ROCKMESH, byla charakteristická porušením betonu křehkým lomem, šířením trhliny do cca 3/4 betonové vrstvy a zbytkovou pevností těles. Trhliny vznikaly pod zatížením při spodním povrchu hranolů a následně se šířily směrem vzhůru, kde byl směr šíření trhlin ovlivněn výztužnou sítí. V místě výztužné sítě se trhliny šířily mezi příčnými výztužnými pruty (viz obrázek 42.). Podélné nosné pruty nebyly rozlomeny, pouze se deformovaly vratnou elastickou deformací.



Obrázek 42. – Porušená zkušební tělesa ROCKMESH

9.3.2. Pevnost v tahu ohybem kompozitních desek

Zkoušení pevnosti v tahu ohybem kompozitních desek bylo prováděno následně po provedení zkoušek pevnosti v tahu ohybem hranolů a po zkouškách betonových desek. Zkoušky kompozitních desek v tahu ohybem vychází ze zkoušek dle ČSN EN 12390-5 [21], které byly dále modifikovány pro testování plošného vyztužení při tenkých vrstvách betonu. Zkouška dále sloužila k porovnání chování výztužných sítí při jednosměrném zatěžování

kompozitních desek. Zatěžovací zařízení a lisovací rám vyhovují ČSN EN 12390-4 [20]. Rozměry těles byly stanoveny obdobně jako u betonových desek měřením a průměrováním naměřených rozměrů zkušebních těles. Zatěžování bylo znovu automatické pouze se stanovilo nastavení lisu na prvním zatěžovaném tělese. Došlo k nastavení zatěžovacích mezích a procentuálního mezního výkyvu hodnot při porušení těles. Rychlost zatěžování byla stanovena na 0,01 MPa/s, přičemž proces zatěžování začal na hodnotě 0,3 kN zatěžovací síly. Zároveň se zatěžováním bylo měřeno přetváření konstrukce systémem ARAMIS. Snímání přetvoření bylo prováděno obdobně jako u nevyztužených desek. Rychlost snímání pro porovnávání přetvoření systémem byla stanovena na 1 snímek/s. Měření přetvoření systémem ARAMIS nebylo součástí zadané práce.

Vzorek Alligard 1.

Rozměry tělesa:

$$1002 \times 450 \times 34,69 \text{ mm}$$

Síla při porušení:

$$F_1 = 2,175 \text{ kN}$$

Pevnost v tahu ohybem Alligard 1.:

$$f_{cf1} = \frac{3Fl}{2a_1a_2^2} = \frac{3 \times 2175 \times 860}{2 \times 450 \times 34,69^2} = \frac{5611500}{1083056,49} = 5,181 \cong \mathbf{5,2 \text{ MPa}}$$



Obrázek 43. a) – Výztužná síť, porušené zkušební těleso 1.1.



Obrázek 43. b) – Detail porušené zkušební těleso 1.1.

Vzorek Alligard 2.

Rozměry tělesa:

$$999 \times 451 \times 35,22 \text{ mm}$$

Síla při porušení:

$$F_1 = 2,2 \text{ kN}$$

Pevnost v tahu ohybem Alligard 2.:

$$f_{cf2} = \frac{3Fl}{2a_1a_2^2} = \frac{3 \times 2200 \times 860}{2 \times 450 \times 35,22^2} = \frac{5676000}{1116403,56} = 5,084 \cong 5,1 \text{ MPa}$$



Obrázek 44. – Výztužná síť, porušené zkušební těleso a detail porušení tělesa 1.2.

Vzorek Alligard 3.

Rozměry tělesa:

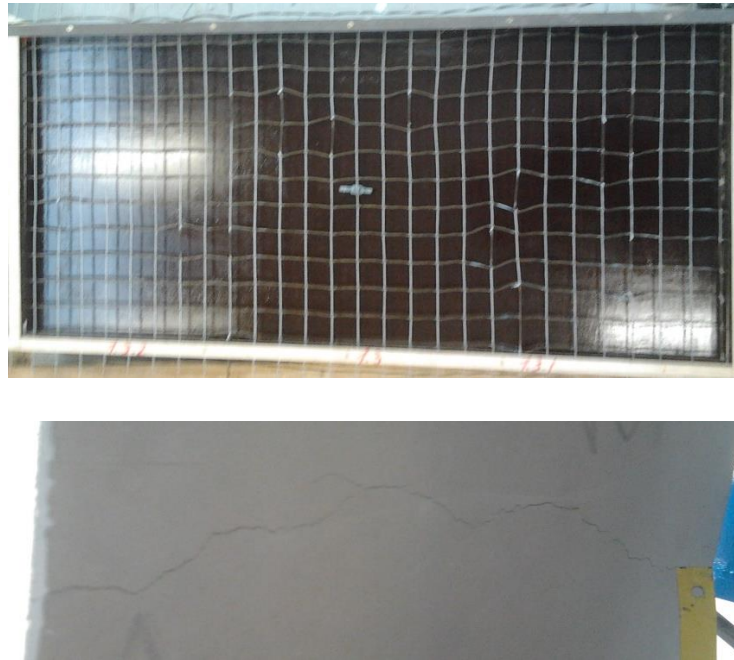
1001 x 449 x 35,10 mm

Síla při porušení:

$$F_1 = 2,159 \text{ kN}$$

Pevnost v tahu ohybem Alligard 3.:

$$f_{cf2} = \frac{3Fl}{2a_1a_2^2} = \frac{3 \times 2159 \times 860}{2 \times 449 \times 35,10^2} = \frac{5570220}{1106344,98} = 5,035 \cong \mathbf{5,0 \text{ MPa}}$$



Obrázek 45. – Výztužná síť, detail porušení zkušebního tělesa 1.3.

Výsledná pevnost v tahu ohybem vyztužených desek Alligard:

$$f_c = \frac{f_{cf1} + f_{cf2} + f_{cf3}}{3} = \frac{5,181 + 5,084 + 5,035}{3} = 5,100 \cong \mathbf{5,1 \text{ MPa}}$$

Charakter porušení:

Porušení desek při modifikované zkoušce pevnosti v tahu ohybem bylo křehkým lomem přes betonovou vrstvu kompozitu. Nosná vlákna byla porušena obdobně jako u vyztužených trámů prací rozhraní, původem byl rozdíl v tahovém přetvoření a vytahováním vláken způsobené třecím prokluzem v průběhu zatěžování. Trhlina vznikla na ohýbané spodní ploše napříč deskou rovnoběžně se zatížením a pod zatížením. Poté směřovala napříč kompozitem skrz beton směrem k zatížení až do porušení (viz obrázek 43.). Šíření trhliny bylo ovlivněno výztužnou sítí, k porušení došlo částečně v místě mezi příčně uspořádanými a částečně podél vláken (v místě oslabení kompozitu) uvnitř plochy desky. Při okrajích těles se trhlina většinou šířila podél příčných vláken nebo mezi nosnými vlákny. Při stanovování pevnosti v tahu ohybem bylo u posledního vzorku zaznamenáno šíření dvou trhlín ze středu desky (místo

koncentrace napětí) Následně došlo k přetržení podélných nosných vláken v oblasti trhliny a jejich následnému vytahování až do porušení tělesa.

Vzorek ROCKMESH 1.

Rozměry tělesa:

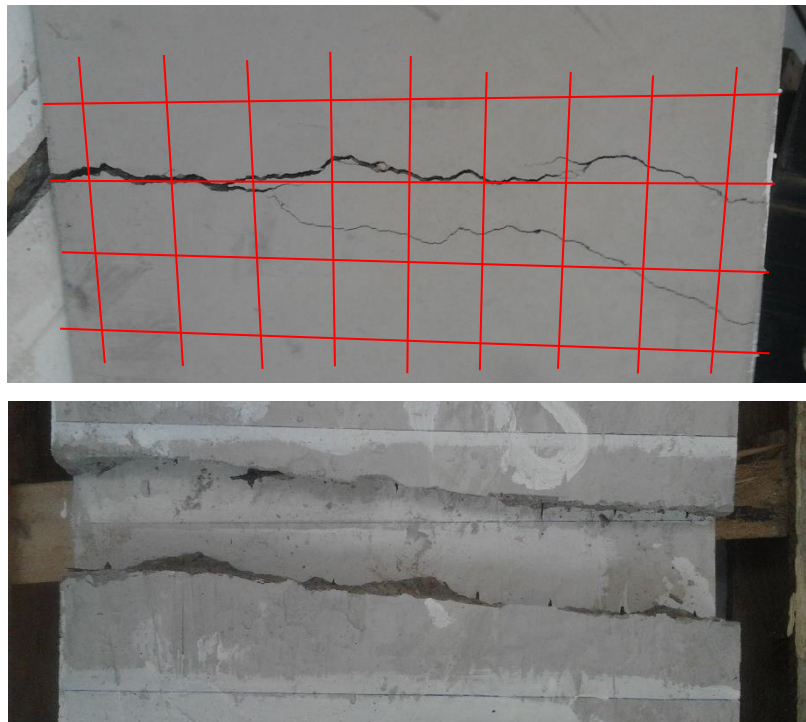
$$998 \times 450 \times 34,47 \text{ mm}$$

Síla při porušení:

$$F_1 = 2,806 \text{ kN}$$

Pevnost v tahu ohybem ROCKMESH 1.:

$$f_{cf1} = \frac{3Fl}{2a_1a_2^2} = \frac{3 \times 2806 \times 860}{2 \times 451 \times 35,22^2} = \frac{7239480}{1118884,4568} = 6,470 \cong \mathbf{6,5 \text{ MPa}}$$



Obrázek 46. – Porušené zkušební těleso 2.1.

Vzorek ROCKMESH 2.

Rozměry tělesa:

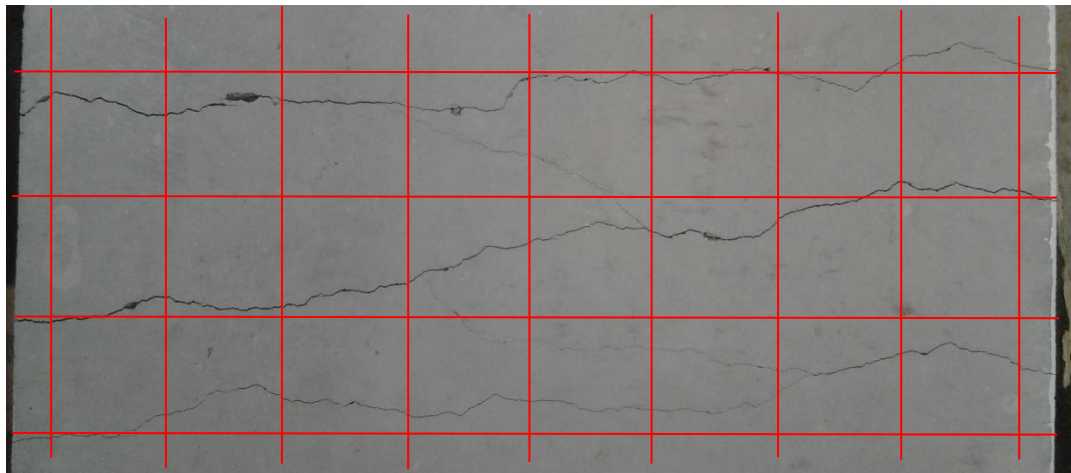
$$999 \times 450 \times 33,93 \text{ mm}$$

Síla při porušení:

$$F_2 = 3,1 \text{ kN}$$

Pevnost v tahu ohybem ROCKMESH 2.:

$$f_{cf2} = \frac{3Fl}{2a_1a_2^2} = \frac{3 \times 3100 \times 860}{2 \times 451 \times 33,93^2} = \frac{7998000}{1038422,8998} = 7,702 \cong \mathbf{8 \text{ MPa}}$$



Obrázek 47. – Porušené zkušební těleso 2.2.

Vzorek ROCKMESH 3.

Rozměry tělesa:

1000 x 450 x 33,450 mm

Síla při porušení:

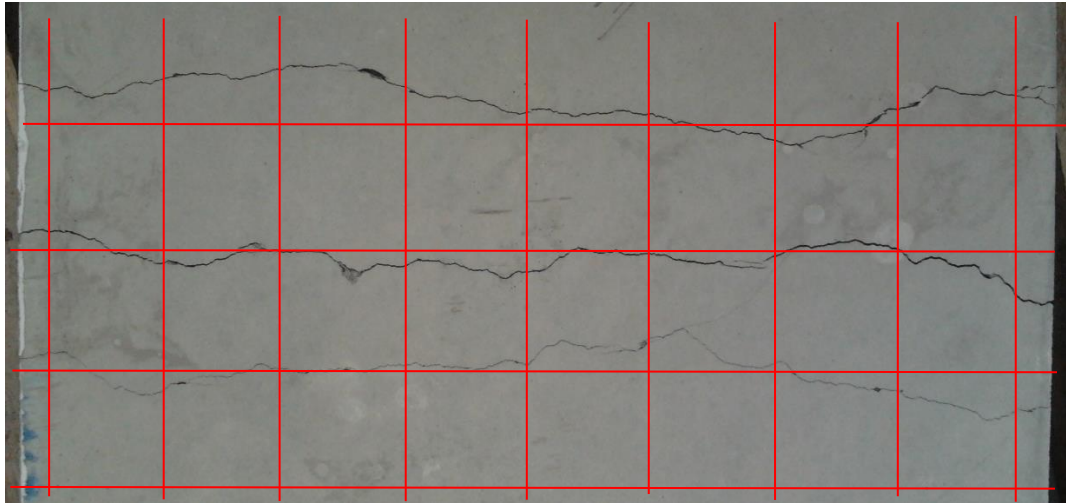
$$F_2 = 2,4 \text{ kN}$$

Pevnost v tahu ohybem ROCKMESH 3.:

$$f_{cf3} = \frac{3Fl}{2a_1 a_2^2} = \frac{3 \times 2400 \times 860}{2 \times 450 \times 33,45^2} = \frac{6192000}{1007012,25} = 6,149 \cong \mathbf{6,2 \text{ MPa}}$$



Obrázek 48. – Detail porušené zkušební těleso 2.3.



Obrázek 49. – Porušené zkušební těleso 2.3.

Výsledná pevnost v tahu ohybem ROCKMESH:

$$f_c = \frac{f_{cf1} + f_{cf2} + f_{cf3}}{3} = \frac{6,47 + 7,02 + 6,149}{3} = 6,774 \cong \mathbf{6,8 \text{ MPa}}$$

Charakter porušení:

Modifikovaná zkouška pevnosti v tahu ohybem byla prováděna následně na tělesech vyztužených sítí ROCKMESH. Porušení betonové vrstvy probíhalo tvorbou trhliny na spodním ohýbaném povrchu uprostřed desky. První trhlina se postupně se zatěžováním šířila skrz vrstvu betonu kolmo vzhůru k zatížení. V průběhu zatěžování docházelo ke skokové tvorbě dalších trhlin vodorovných s původní trhlinou (zatížením). Druhá trhlina se vytvořila kolem hodnoty 2,1 kN a třetí skoková prasklina kolem hodnoty 2,2 kN. Následné trhliny se napříč betonovou vrstvou šířily nejprve kolmo k povrchu a při dalším zatěžování (ohýbání prvku) směřovaly směrem k zatížení. Dále se vytvořily šikmé trhliny probíhající mezi rovnoběžnými trhlina mi. Vlastní praskliny probíhají podél příčných prutů nebo vrstvami betonu mezi pruty. Směrování trhlin bylo výrazně ovlivněno výztužnou sítí především zámky v uzlech sítě. V prvním případě byla pro zajímavost deska rozlomena a vyfocen detail porušení, ke zdvojení trhliny došlo v místě spojení prutů. K porušení výztužných prutů zřejmě nedošlo, vzhledem k tomu, že po odlehčení došlo ke zmenšení přetvoření a tělesa nebyla rozdělena na více kusů. Zatěžování bylo ukončeno předčasně, jelikož se trhliny začaly šířit mimo oblast určenou k oříznutí a kapacita lisu vzhledem ke značnému přetvoření desek byla vyčerpána.

9.3.3. Zkoušení kompozitních desek na průraz

Zkoušky vyztužených desek jsou porovnávány s nevyztuženými deskami. Zkoušky jsou prováděny dle normy pro stříkané betony ČSN EN 14488 – 5 [21], které byly modifikovány pro zkoušení plošného vyztužení. Zkouška sloužila k porovnání chování vyztužených kompozitních prvků při vnášení síly do středu desky a uložení po všech stranách (rovnoměrné

zatěžování desky). Stanovené rozměry těles byly měřeny a průměrovány přinejmenším ze tří hodnot. Zkoušky kompozitních desek se prováděly následně po zkouškách nevyztužených desek. Zatěžovací zařízení a lis byly připraveny z předcházejících zkoušek a odpovídají normě ČSN EN 12390-4 [20]. Rychlost zatěžování byla 0,01 MPa/s vzhledem k možné citlivosti konstrukčního prvku. Během zatěžování opět probíhalo měření systémem ARAMIS obdobně jako při zkouškách nevyztužených desek. Rychlost snímání byla nastavena na 1,5 snímku/s vzhledem k časovému průběhu zatěžování, které bylo delší než u betonových desek. Měření přetvoření bylo prováděno v rámci dalšího vědeckého výzkumu Univerzity Pardubice.

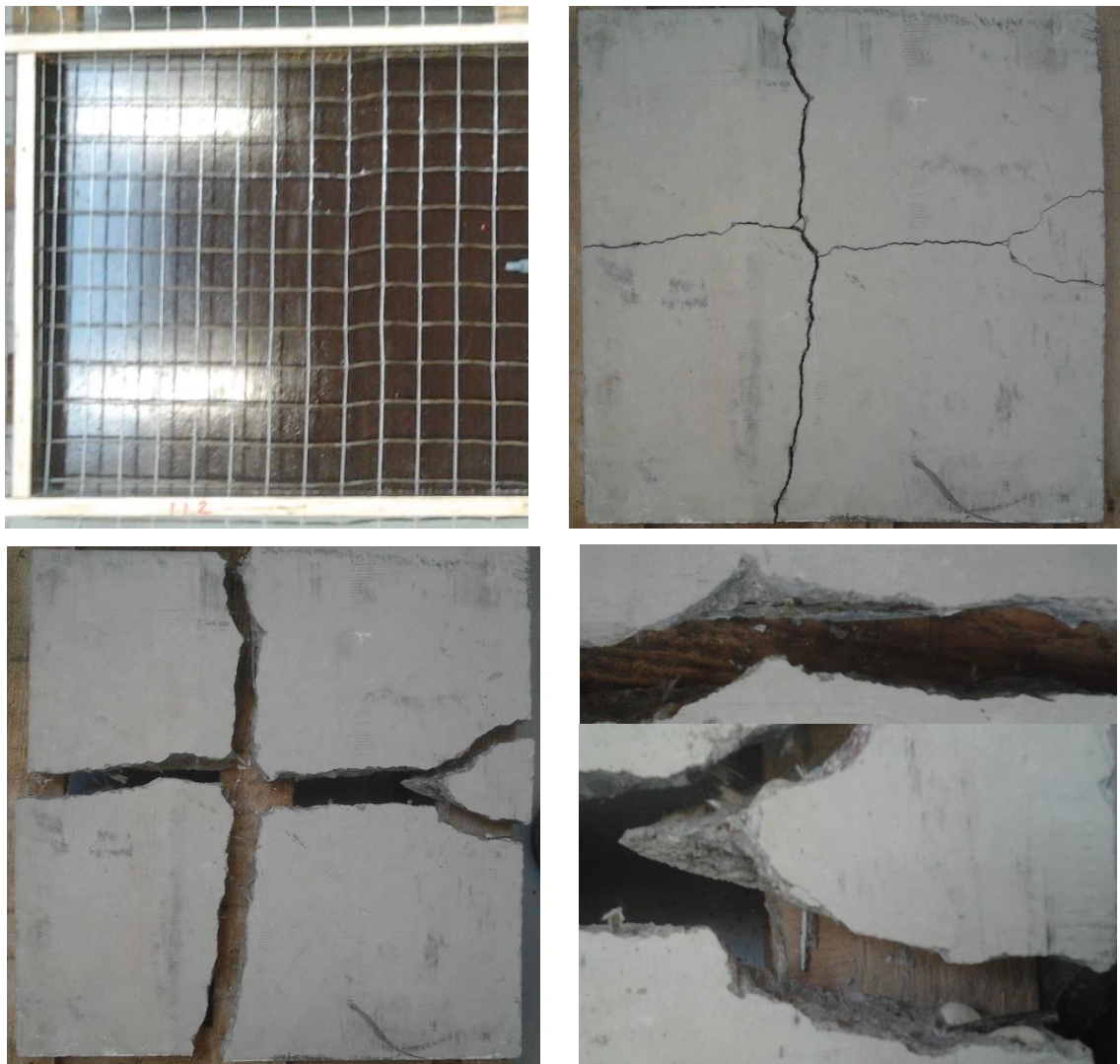
Vzorek Alligard 1.

Rozměry tělesa:

450 x 450 x 34,69 mm

Síla při porušení:

$$F_1 = 5,907 \text{ kN}$$



Obrázek 50. – Výztužná síť a porušené zkušební těleso 1.1.2.(nahore), detail rozlomení tělesa (dole)

Vzorek Alligard 2.

Rozměry tělesa:

451 x 451 x 35,22 mm

Síla při porušení:

$$F_2 = 5,796 \text{ kN}$$



Obrázek 51. – Výztužná síť, porušené zkušební těleso 1.2.2.

Vzorek Alligard 3.

Rozměry tělesa:

449 x 448 x 35,10 mm

Síla při porušení:

$$F_3 = 4,841 \text{ kN}$$



Obrázek 52. – Výztužná síť, porušené zkušební těleso 1.3.2.

Výsledná průměrná síla při porušení Alligard:

$$F = \frac{F_1 + F_2 + F_3}{3} = \frac{5,907 + 5,796 + 4,841}{3} = 5,515 \text{ kN}$$

Charakter porušení:

Porušení desek, při modifikované zkoušce průrazu desek, bylo křehkým lomem přes betonovou část kompozitu. Nosná vlákna byla v průběhu zatěžování napínána následně porušována prací rozhraní, původem byl rozdíl v tahovém přetvoření a vytahováním vláken bylo způsobené třecím prokluzem. Trhliny vznikly uprostřed spodní ohýbané plochy, následně se trhliny šířily do stran většinou rovnoběžně s vlákny. Poté se trhliny rozšiřovaly a směřovaly kolmo skrz tloušťku desky až do porušení (viz obrázek 52.). Pro ověření šíření trhlin a uložení výztužné sítě bylo první těleso rozlámáno. Výztužná síť byla během ukládání betonu deformována blíže ke spodnímu povrchu (10 mm) uprostřed desky a částečně v místě ořezání. Šíření trhlin bylo ovlivněno výztužnou sítí, k porušení došlo částečně mezi vlákny a částečně podél vláken (ve slabších místech kompozitu) uvnitř plochy desky. Místa spojení vláken byla pevnější, v prvním případě došlo k rozdvojení trhliny v místě spojení výztuží. Na okrajích zkušebních těles se trhliny většinou šířily mezi nosnými vlákny a méně často podél vláken.



Obrázek 53. – Detail ukládání sítě a trhlin v deskách Alligard

Vzorek ROCKMESH 1.

Rozměry tělesa:

450 x 448 x 34,47 mm

Síla při porušení:

$F_1 = 10,442 \text{ kN}$



Obrázek 54. – Porušené zkušební těleso 2.1.2. spodní povrch (nahore), horní povrch (uprostřed), proražení lisem a přízdvihování rohů (dole)

Vzorek ROCKMESH 2.

Rozměry tělesa:

450 x 447 x 34,47 mm

Síla při porušení:

$$F_2 = 10,900 \text{ kN}$$



Obrázek 55. – Detail kruhové praskliny na horním povrchu, porušené zkušební těleso 2.1.1.

Vzorek ROCKMESH 3.

Rozměry tělesa:

449 x 448 x 35,10 mm

Síla při porušení:

$$F_3 = 9,800 \text{ kN}$$



Obrázek 56. – Detail kruhové praskliny na horním povrchu, porušené zkušební těleso 2.3.2.

Výsledná průměrná síla při porušení ROCKMESH:

$$F = \frac{F_1 + F_2 + F_3}{3} = \frac{10,442 + 10,900 + 9,800}{3} = 10,381 \text{ kN}$$

Pozn.: přetvoření změřené systémem ARAMIS je v přílohové části (příloha 10.)

Charakter porušení:

Při modifikované zkoušce na průraz vyztužených desek bylo porušení charakteristické spolupůsobením betonu výztužné sítě ROCKMESH. V průběhu zatěžování byla síť napínána, ale vzhledem ke své tuhosti nebyla výrazně porušena. Porušována byla pouze betonová vrstva prací výztužných prutů a betonu, důsledkem bylo trhlinkování (rozštěpení) betonu způsobené povrchovou energií betonu a vazebnou energií sítě. Trhliny vznikly nejdříve ve středu desky na dolní ploše, následně se trhliny rozšířily do všech stran a během šíření se štěpily na další. Nejprve se trhliny rozšiřovaly a směřovaly kolmo skrz tloušťku desky, ale v průběhu zatěžování začaly směřovat směrem k zatížení (nejvíce ohýbaným prutům ve středu desky viz obrázek 55.). V průběhu zatěžování došlo k odštěpení spodní vrstvy betonu uprostřed desky. Na horním povrchu docházelo k vytvoření kruhové díry uprostřed v místě zatěžování a tvorbě kruhových prasklin v okolí otvoru. Šíření trhlin bylo výrazně ovlivněno výztužnou sítí. Porušení bylo částečně mezi vlákny sítě a částečně podél vláken uvnitř plochy desky. V místech spojení výztuží, která jsou dostatečně tuhá, docházelo ke štěpení trhlin. Na okrajích zkušebních těles se trhliny většinou šířily mezi nosnými pruty a méně často podél prutu.



Obrázek 57. – Detail ukládání sítí a trhlin v deskách ROCKMESH

9.4. Ekonomické porovnání

V rámci ekonomického porovnávání nebyly srovnávány pouze náklady na vytvoření konstrukčních prvků, ale i teoretická životnost a použitelnost.

Nevyztužený beton, který z ekonomického hlediska již není tak výhodný vzhledem k nutnosti výroby masivních prvků a dalším nákladům spojeným s dopravou a technologií výroby materiálu. Z těchto důvodů a ke zlepšení vlastností především tahových se začal beton vyztužovat ocelí. Konstrukce je možné v tomto případě vybudovat subtilnější nicméně vlastní hmotnost konstrukčního prvku a cena za pořízení zůstává relativně shodná. V případě výztužného betonu je celková cena navýšena o další náklady potřebné na pořízení ocelových prvků, dopravu a jejich přípravu na stavbě. Navíc vzhledem ke špatným korozivním vlastnostem většiny ocelí je životnost dána návrhem prvku (vliv prostředí, krytí výztuží, druhem použitého materiálu, kvalita zpracování apod.).

Díky špatným vlastnostem ocelových výztuží v korozivním prostředí (chemická zátěž, vlhkost, vliv elektromagnetického záření aj.) došlo v průběhu let k vývoji systému nekovových FRP výztuží. Náklady na pořízení FRP výztuží jsou sice vyšší než u klasických ocelových, což je dáno technologií výroby, ale zvýší se tím celková životnost konstrukčního prvku a sníží se procento vyztužení. Zároveň se sníží hmotnost konstrukčního prvku díky menším průměrům výztužných prutů a menšímu množství použitého betonu, na rozdíl od vyztužování klasickými ocelovými výztužemi. Navíc náklady spojené s dopravou výztuží se také sníží díky jejich menšímu množství a výrazně menší objemové hmotnosti. Díky specifickým vlastnostem FRP (které jsou dané procesem výroby, druhem použitých vláken apod.) lze konstrukční prvky stavět ještě subtilnější a zároveň je lze umisťovat do zatěžovaných prostředí (chemická, elektromagnetická aj.). Vyšší počáteční pořizovací cena FRP výztuží je výhodná vzhledem k prodloužení celkové teoretické životnosti.

Náklady spojené s vytvoření zmenšených modelů desek v rámci bakalářské práce byly stanoveny dle více nákladů na pořízení jednotlivého druhu vyztužení. To znamená, že betonová část kompozitu a náklady spojené s výrobou a přípravou bednění se zanedbávají. Tedy desky nevyztužené mají nejmenší pořizovací náklady. Nejnižší pořizovací cena u vyztužených desek byla stanovena u vnitřního vyztužení sítí Alligard. To bylo způsobeno jiným postupem při výrobě tkané sítě. Navíc celkové množství použitých vláken bylo výrazně menší a nosná vlákna byla impregnována pouze polymery rozpustných v pryskyřicích z výroby. Dražší variantou bylo použití výztužné sítě Alligard společně s epoxidovým polymerem. Náklady byly zvýšené o epoxidovou pryskyřici a výroba kompozitních prvků byla složitější s nutnou technologickou přestávkou. Ale tato varianta je výhodná následnou údržbou či opravami

v rámci povrchové výztužné vrstvy. Externí lepené výztuže jsou výhodné aplikací přímo do míst s tahovým napětím. Celkově nejdražší variantou je vyztužení pomocí výztužné sítě ROCKMESH. Cena sítě je dána vyšší cenou za výztužné pruty vyráběné technologií tažením profilu (pultruzí). Navíc výroba výztužné sítě je složitější o spojování prutů v uzlech sítě. U této varianty vyztužení bylo vyšší procento vyztužení. Ale výhodou této varianty je nejvyšší teoretická životnost díky dokonalé impregnaci prutů a také bylo dosaženo nejvyšších hodnot při zatěžování. To bylo způsobeno technologií výroby sítě a největšímu podílu nosných vláken.

9.5. Použití ve stavební praxi

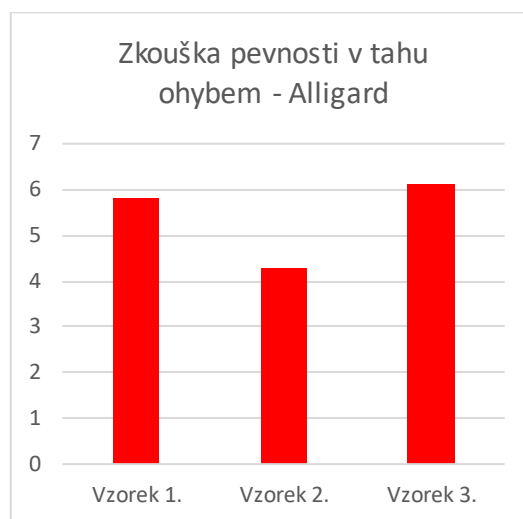
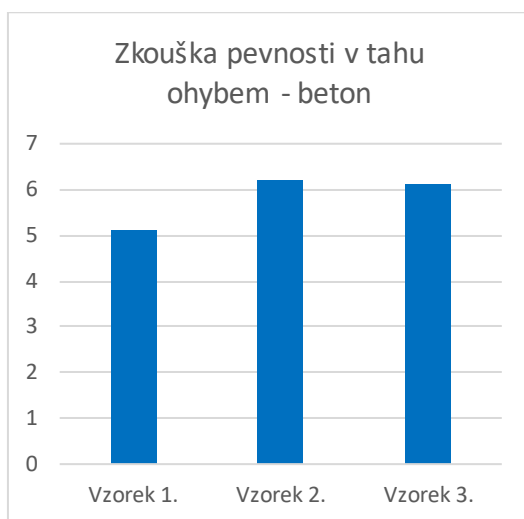
Dle statistik více než 60 % vyrobených vláknových kompozit se spotřebovává ve stavebnictví. Vlastní aplikace FRP výztuží jsou především pro zesilování konstrukčních prvků. Umísťují se do extrémně zatěžovaných míst, nemusí vždy jít o zatěžování silami zatížení může být různého druhu, ať už jde o chemickou, biologickou, elektromagnetickou zátěž či jiné vlivy prostředí. Použití vláknových kompozit ve stavební praxi je výhodné vzhledem k výsledným vlastnostem výztužného materiálu díky různým technologiím výroby a možnostem kombinovat různé druhy materiálů či organizovat jejich uspořádání. Tímto procesem lze získat kompozity přesně daných vlastností.

Klasické zesilování stávajících konstrukcí se obvykle provádí lepením externích lamel nebo tkanin míst namáhaných normálovou silou nebo do ohýbaných míst. Mohou být kladeny do drážek nově vytvořených v konstrukci, nebo jsou lepeny v celé ploše prvku. Vnitřní vyztužení lze také využít k zesilování stávajících konstrukcí například pro zesilování vodních děl či při různých rekonstrukcích v kombinaci se stříkanými betony. Vnitřní vyztužování pomocí výztužných prutů FRP se ve stavitelství používá pro vyztužování podlah (u stropů sendvičové konstrukce), silničních desek, letištních ploch, dálnic nebo mostů.

10. POROVNÁVÁNÍ VÝSLEDKŮ

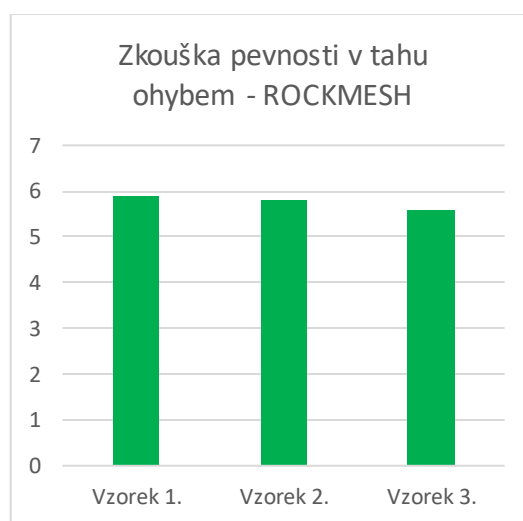
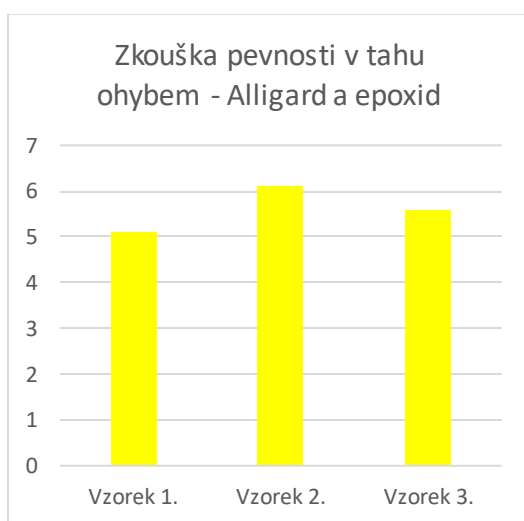
Pro porovnávání výsledků při zkouškách nestandardního vnitřního vyztužení byly zkoušky prováděny na zmenšených modelech. Samotné zkoušky se skládaly ze zkoušek nevyztužených prvků a vyztužených. Pro dodaný čerstvý beton z blízké betonárny CEMEX bylo stanoveno označení dle ČSN EN 206+A1 [23] C 30/37; X₀ (CZ); C10,20; D_{max} 16; S4. Dále byla stanovena objemová hmotnost čerstvého betonu na 2300 kg/m³ a obsah vzduch byl stanoven na 2,2 %. Při zkouškách ztvrdlého betonu se změřila krychelná pevnost 40,4 MPa a pevnost v tahu ohybem na klasických hranolech byla 5,8 MPa. Dále při modifikovaných zkouškách betonu se měřila pevnost v tahu ohybem desek 5,2 MPa

a síla při zkouškách průrazu nevyztužených desek 5,294 kN. Při zkouškách pevnosti v tahu ohybem vyztužených hranolů bylo zjištěno snížení ohybové pevnosti při použití výztužné sítě Alligard na 5,4 MPa. U trámů vyztužených externí lepenou sítí Alligard a epoxidovou pryskyřicí menší snížení ohybové pevnosti na 5,6 MPa. Snížení pevnosti bylo způsobeno vkládáním výztužné sítě bez dostatečného spolupůsobení s betonem tím byly do kompozitu vloženy jisté plochy nespojitosti. Naopak mírné zvýšení pevnosti v tahu ohybem bylo prokázáno při použití výztužné sítě ROCKMESH na 5,9 MPa navíc byl omezen i rozvoj trhliny napříč kompozitem a nedošlo k dokonalému rozlomení hranolu. Při vkládání výztužné sítě ROCKMESH bylo zjištěno vzájemné spolupůsobení jednotlivých rozhraní (soudržnost sítě s betonem). Díky tuhosti výztužné mřížky získal výsledný kompozitní prvek jistý druh elastického chování, což bylo prokázáno i při následných modifikovaných zkouškách vyztužených desek. Tedy při modifikované zkoušce pevnosti v tahu ohybem (jednosměrné napínání výztužné sítě) bylo zjištěno opět mírné snížení u výztužné sítě Alligard oproti nevyztuženým betonovým deskám na 5,1 MPa. Nebylo tedy prokázáno dobré spolupůsobení sítě Alligard a betonové vrstvy (soudržnost sítě s betonem) vzhledem k porušování vláken během zatěžování (napětí nebylo dostatečně roznášeno nosnými vlákny). A výrazné zvýšení pevnosti v tahu ohybem desek vyztužených sítí ROCKMESH až na 6,8 MPa. Zvýšení pevnosti bylo způsobeno dobrým roznosem sil podél sítě směrem od zatížení a byl zajištěn dobrý přenos sil z hlavních nosných vláken (zatěžovaných, podélných prutů) na příčně uspořádané pruty. I chování při zatěžování a porušování bylo výrazně odlišné od ostatních případů. Na závěr bylo ověřování chování výztužných sítí při obousměrném zatěžování sítě, modifikovanými zkouškami průrazu vyztužených desek. V tomto případě se ukázalo mírné zvýšení síly při porušení i u desek vyztužených sítí Alligard na hodnotu 5,515 kN. Tedy soudržnost sítě s betonovou vrstvou byla lepší při rovnoměrném obousměrném zatěžování sítě Alligard. U sítě ROCKMESH bylo zjištěno dokonce velmi výrazné zvýšení síly při poruše na 10,381 kN. Zvýšení pevnosti bylo způsobeno konstantním zatěžováním sítě (rovnoměrné napínání) a dobrou soudržností sítě s betonem. Potvrdila se tedy teoretická teze o výrazném zvýšení pevnosti při obousměrném zatěžování sítě. Jsou-li výztužné pruty uspořádány ve směru působících sil (napětí). V posledním případě bylo zaznamenáno mírné elastické chování při zatěžování. Tedy velké přetvoření v místě zatěžování a přizdvihování rohů desek zároveň byla betonová část kompozitu drcena na menší kusy.



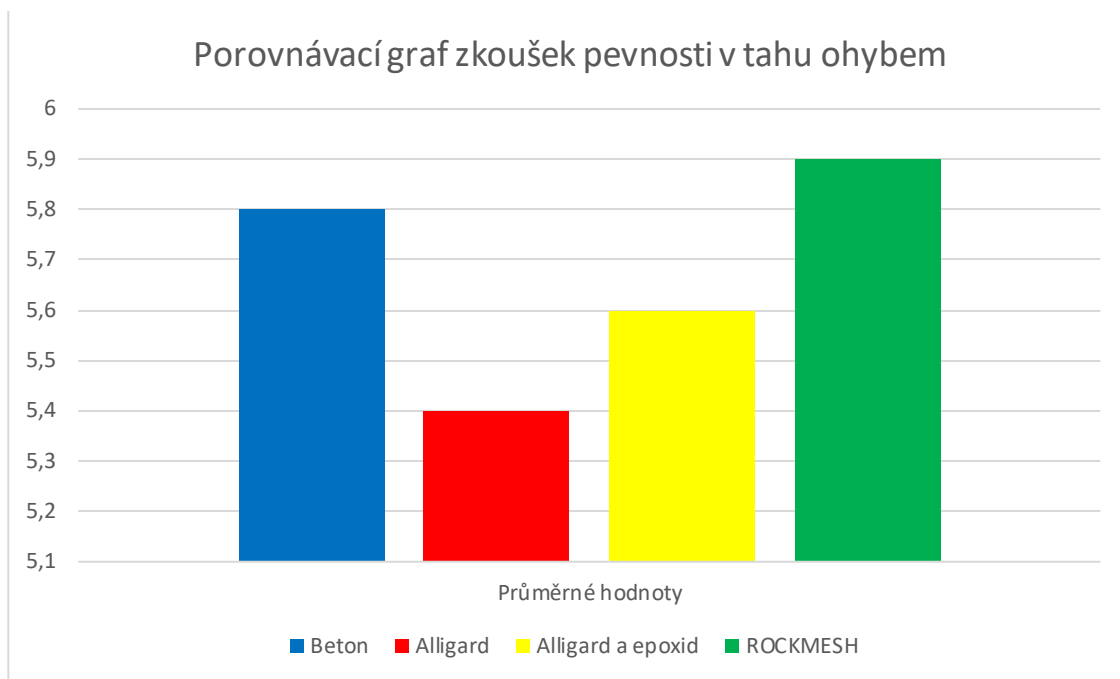
Graf 1. a 2. – Zkouška pevnosti v tahu ohybem pro beton (na levé straně) a pro výztužnou síť Alligard (na pravé straně)

Pozn.: uváděné hodnoty jsou v MPa



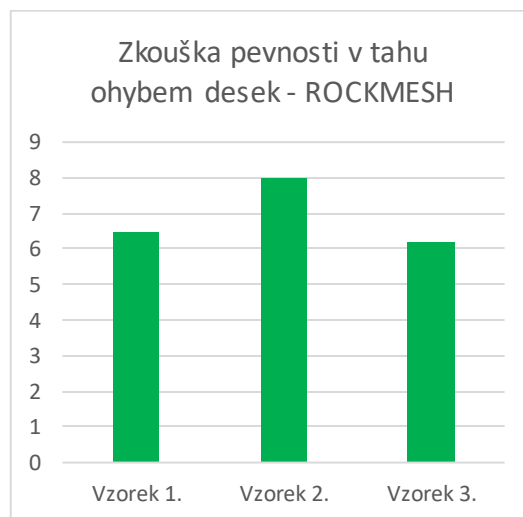
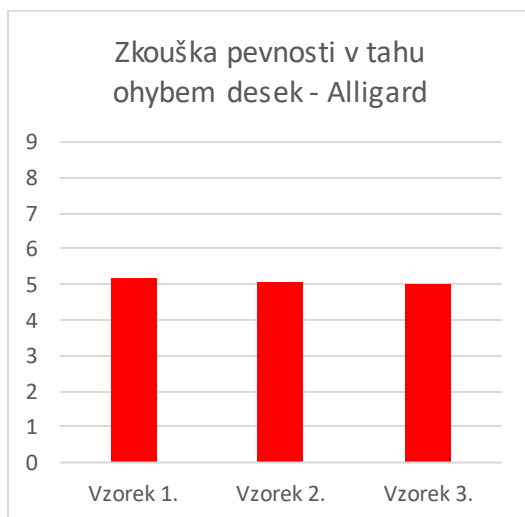
Graf 3. a 4. – Zkouška pevnosti v tahu ohybem pro výztužnou síť Alligard a epoxid (na levé straně) a pro výztužnou síť ROCKMESH (na pravé straně)

Pozn.: uváděné hodnoty jsou v MPa



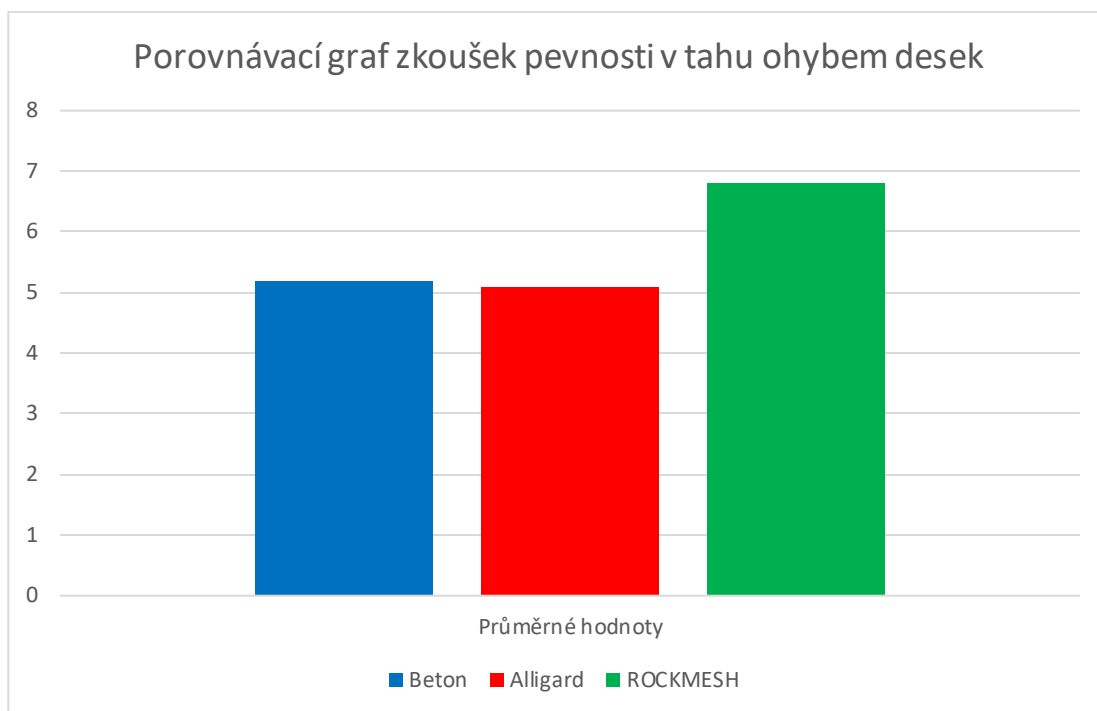
Graf 5. – Porovnávací graf zkoušek pevnosti v tahu ohybem

Pozn.: uváděné hodnoty jsou v MPa



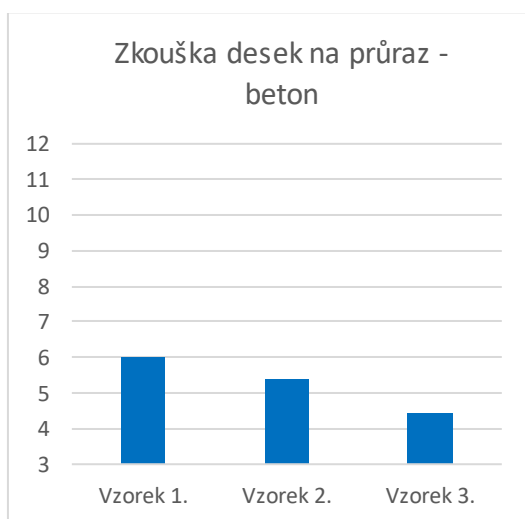
Graf 6. a 7. – Zkouška pevnosti v tahu ohybem desek pro výztužnou síť Alligard a epoxid (na levé straně) a pro výztužnou síť ROCKMESH (na pravé straně)

Pozn.: uváděné hodnoty jsou v MPa



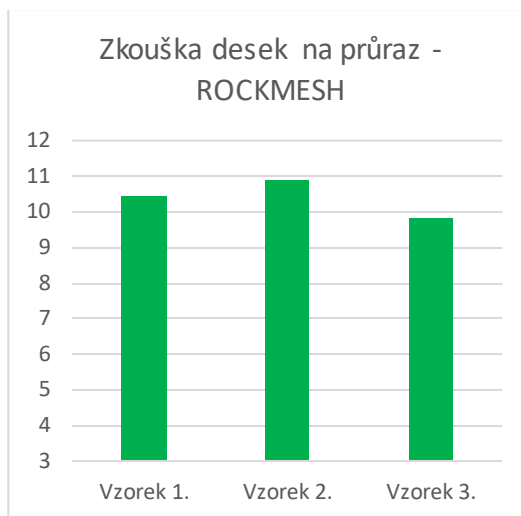
Graf 8. – Porovnávací graf zkoušek pevnosti v tahu ohybem desek

Pozn.: uváděné hodnoty u zkoušek tahu ohybem jsou v MPa

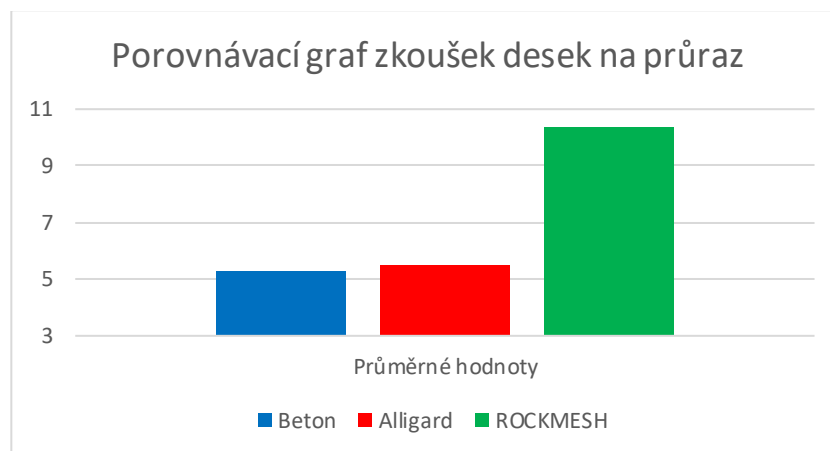


Graf 9. a 10. – Zkouška desek na průřez pro beton (na levé straně) a pro výztužnou síť Alligard (na pravé straně)

Pozn.: uváděné hodnoty u zkoušek desek na průřez jsou v kN



Graf 11. – Zkouška desek na průraz pro výztužnou síť ROCKMESH



Graf 12. – Porovnávací graf zkoušek desek na průraz

Pozn.: uváděné hodnoty u zkoušek desek na průraz jsou v kN

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] BANK, Lawrence Colin. *Composites for construction: structural design with FRP materials*. Hoboken, N.J.: John Wiley, 2006. ISBN 978-0471-68126-7.
- [2] *FRP reinforcement in RC structures: technical report prepared by a working party of Task Group 9.3, FRP (Fibre Reinforced Polymer) reinforcement for concrete structures*. Lausanne: International Federation for Structural Concrete, 2007. Bulletin Fédération internationale du béton. ISBN 978-2-88394-080-2.
- [3] ACI 440.1R-06. *Guide for the design and construction of concrete reinforced with FRP bars*. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute, 2003. ISBN 0-87031-118-2.
- [4] ACI 440.4R-04. *Prestressing concrete structures with FRP tendons*. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute, 2004. ISBN 0-87031-166-2.
- [5] ACI 440.3R-04. *Guide test methods for fiber-reinforced polymers (FRPs) for reinforcing or strengthening concrete structures*. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute, 2003. ISBN 978-0870-31162-8.
- [6] PROKEŠ, Jan a František GIRGLE. FRP výztuže – výroba, druhy výztuží, vlastnosti. *OKTAEDR: sborník seminář FRP výztuže. 29. 4. 2014*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2014, 17. ISBN 978-80-214-4925-1.
- [7] HORÁK, David a Petr ŠTĚPÁNEK. Vliv tloušťky krycí vrstvy na kotevní délku vnitřní FRP výztuže. *OKTAEDR: sborník seminář FRP výztuže. 29. 4. 2014*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2014, 13. ISBN 978-80-214-4925-1.
- [8] GIRGLE, František. Problematika kotvení předpjaté FRP výztuže. *OKTAEDR: sborník seminář FRP výztuže. 29. 4. 2014*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2014, 11. ISBN 978-80-214-4925-1.
- [9] ŠVAŘÍČKOVÁ, Ivana a Petr ŠTĚPÁNEK. Kotvení externí lepené výztuže. *OKTAEDR: sborník seminář FRP výztuže. 29. 4. 2014*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2014, 11. ISBN 978-80-214-4925-1.
- [10] GDOUTOS, E. E., K. PILAKOUTAS a C. A. RODOPOULOS. *Failure analysis of industrial composite materials*. New York: McGraw-Hill, 2000. ISBN 9780071345170.
- [11] ČSN EN 12 350 – 1. Zkoušení čerstvého betonu – Část 1: Odběr vzorků. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [12] ČSN EN 12 350 – 2. Zkoušení čerstvého betonu – Část 2: Zkouška sednutím. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [13] ČSN EN 12 350 – 8. Zkoušení čerstvého betonu – Část 8: Samozhutnitelný beton - Zkouška sednutí-rozlítím. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [14] ČSN EN 12 350 – 6. Zkoušení čerstvého betonu – Část 6: Objemová hmotnost. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.

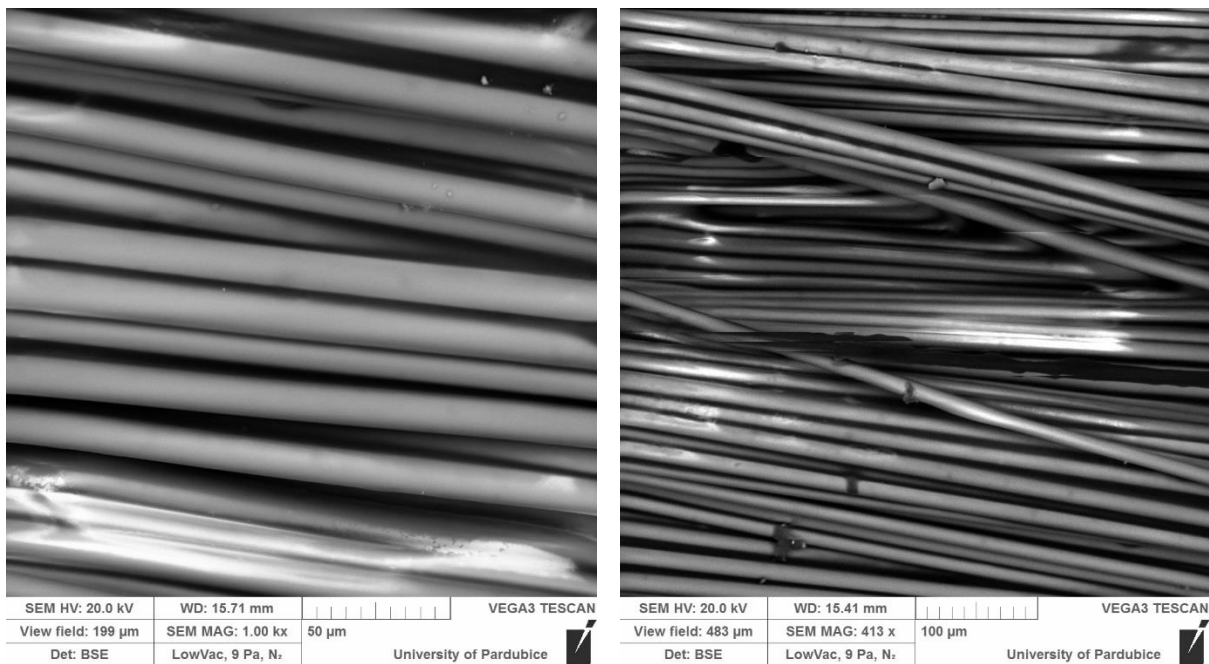
- [15] ČSN EN 12 350 – 7. Zkoušení čerstvého betonu – Část 7: Obsah vzduchu – Tlakové metody. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [16] ČSN EN 12 390 – 1. Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 1: Tvar, rozměry a jiné požadavky na zkušební tělesa a formy. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
- [17] ČSN EN 12 390 – 2. Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 2: Výroba a ošetřování zkušebních těles pro zkoušky pevnosti. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
- [18] ČSN EN 12 390 – 7. Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [19] ČSN EN 12 390 – 3. Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [20] ČSN EN 12 390 – 4. Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 4: Pevnost v tlaku – Požadavky na zkušební lisy. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2001.
- [21] ČSN EN 12 390 – 5. Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [22] ČSN EN 14 488 – 5. Zkoušení stříkaného betonu – Část 5: Stanovení kapacity absorbované energie vláknobetonových deskových zkušebních těles. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [23] ČSN EN 206 + A1. Beton: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.
- [24] TKP staveb pozemních komunikací: Kapitola 18: Betonové konstrukce a mosty. Praha: Ministerstvo dopravy, 2016.
- [25] ČSN 73 2404. Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda – Doplňující informace. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.
- [26] ČSN 73 1328. Stanovení soudržnosti oceli s betonem. Praha: Úřad pro normalizaci a měření, 1972.
- [27] PYTLÍK, Petr. Technologie betonu. 2. vyd. Brno: VUTIUM, 2000, 390 s. ISBN 80-214-1647-5.
- [28] BAREŠ, Richard. *Kompozitní materiály*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988.
- [29] SVOBODA, Luboš. *Stavební hmoty*. Bratislava: Jaga, 2004. ISBN 80-8076-007-1.

SEZNAM PŘÍLOH:

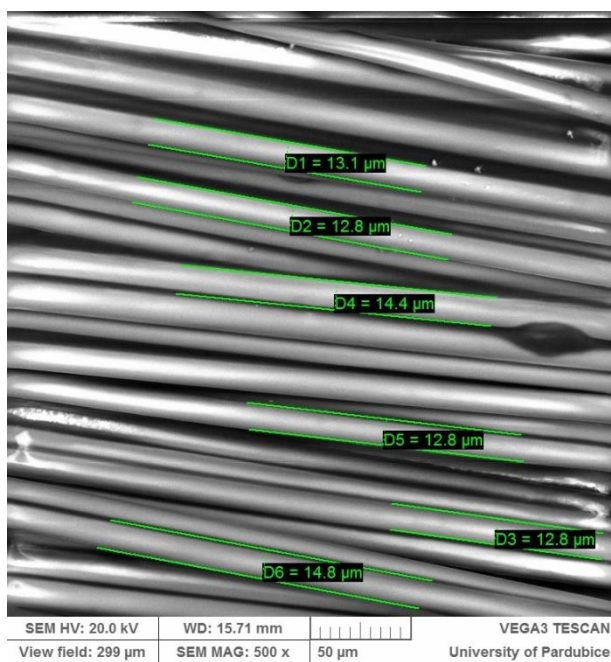
- Příloha 1. – Mikroskopické snímky čedičových vláken síť Alligard
- Příloha 2. – EXD chemická analýza čedičových vláken síť Alligard
- Příloha 3. – Technický list výztužná síť Alligard
- Příloha 4. – Kompozitní kari síť ROCKMESH:
- Příloha 5. – Distanční kolečka
- Příloha 6. – Faktura CEMEX
- Příloha 7. – Prohlášení o shodě, certifikáty systému řízení výroby
- Příloha 8. – Kontrolní a zkušební plán
- Příloha 9. – Měření přetvoření systémem ARAMIS (3.2.)
- Příloha 10. – Měření přetvoření systémem ARAMIS (2.3.2.)
- Příloha 11. – Zkušební tělesa (desky)
- Příloha 12. – Výztužné sítě (vyztužení desek)
- Příloha 13. – Zatěžování zkušebních těles (desky)
- Příloha 14. – Výkres řezání překližek
- Příloha 15. – Výkres sestavení bednění

Příloha 1. – Mikroskopické snímky čedičových vláken síť Alligard

Mikroskopické snímky čedičové síť Alligard:



Mikroskopické snímky čedičové síť Alligard zvětšené 1000 x (levý) a 400 x (pravý snímek)

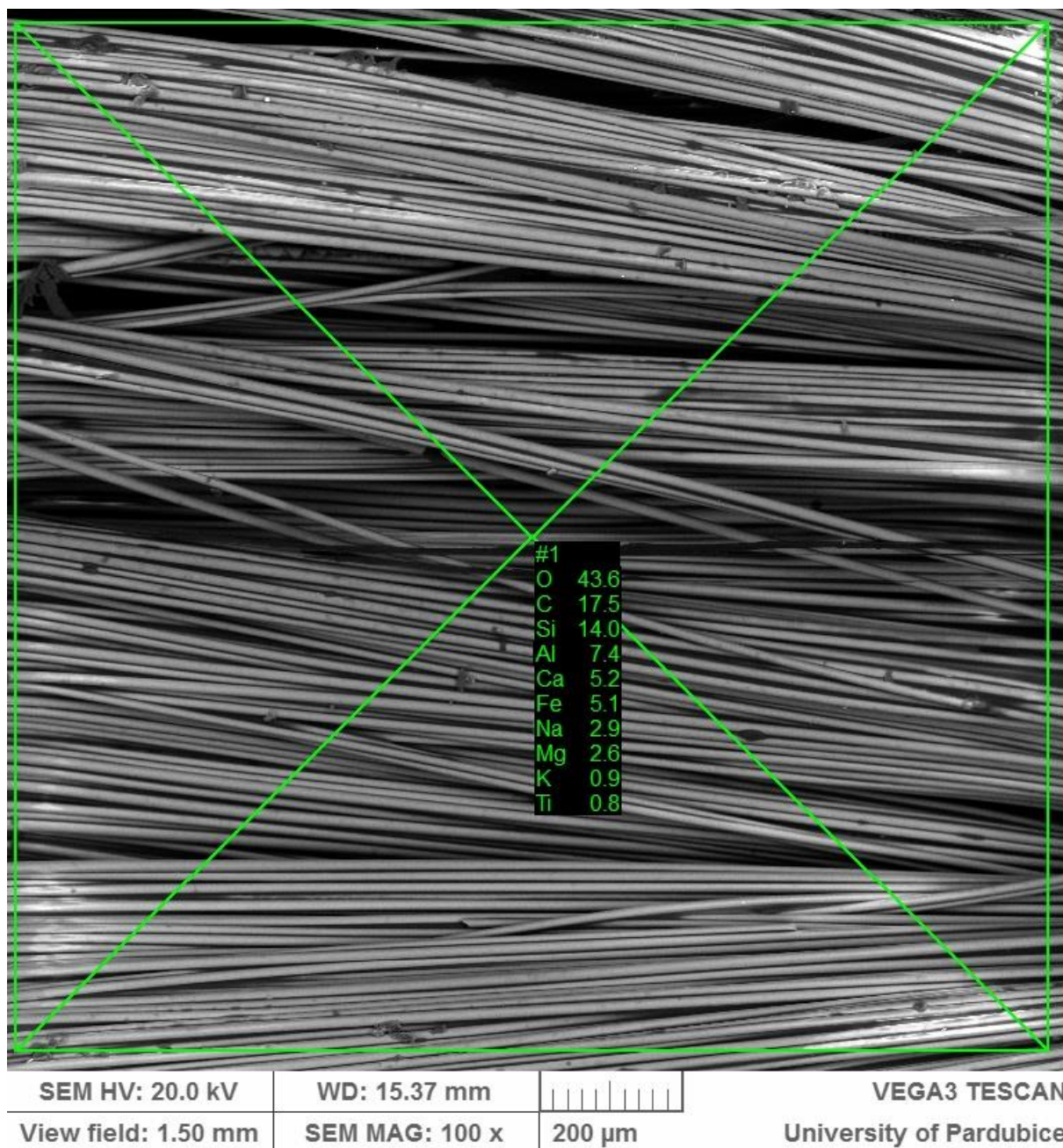


Mikroskopický snímek z měření průměrů čedičových vláken (síť Alligard)

Pozn.: Vlákná jsou monofilní s průměrem 13 mikrometrů.

Příloha 2. – EXD chemická analýza čedičových vláken síť Alligard

EDX analýza čedičové sítě Alligard:



Mikroskopický snímek z chemické analýzy polotovaru rohože z čedičových vláken částečně vyztužených polymerem (Alligard)

Pozn.:

Složení je uvedeno v hmotnostních procentech. Vzhledem k vysokému procentu uhlíku a tuhosti vláken lze říct, že jsou vlákna pojena nějakým polymerem.

Příloha 3. – Technický list výztužná síť Alligard



Art. 2470-17

Materiál , podélně :	Basalt 2400 Tex	Hustota : 2,75 g/cm ³
Materiál , příčně :	Basalt 2400 Tex	Hustota : 2,75 g/cm ³
Spojovací nit:	PP 110 dtex	
Hmotnost:	ca. 136 g/m ²	nepovrstvená
	ca. 153 g/m ²	povrstvená

Anzahl Faden / m längs : 25

Anzahl Faden / m quer : 26

Velikost oka podélně: 38 mm

Velikost oka příčně : 36 mm

Průřez výztuže : / m

podélně : 22 mm²

příčně : 23 mm²

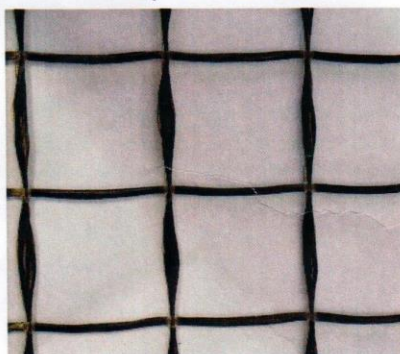
Orientierende Prüfung

Odolnost proti roztržení : 1567 N / mm² Str.Hodnota

Pevnost v tahu: 3%

Povrstvení:

Styrol - Butadien



Příloha 4. – Kompozitní kari síť ROCKMESH

Jedná se o jednu z nejlepších možností, jak nahradit ocelovou betonářskou žebříkovou výztuž. Kompozitní síť ROCKMESH je složená z čedičových prutů ROCKBAR o Ø 2,2 a 3 mm. Pruty jsou umístěny ve dvou vzájemně kolmých směrech spojených v kontaktním uzlu speciální hmotou. Sítě jsou dodávány v listech, nebo jsou navinuty v kotoučích, což urychluje pokládku a stavební práce.

Výhody kompozitních sítí oproti ocelovým třídy AIII:

- 3x pevnější – snižuje sílu betonu cca o 10% a tím i hmotnost konstrukce
- 7x lehčí – nižší náklady na dopravu a manipulaci na stavbě
- odolné proti korozi, nevodivé, nemagnetické a nevedou teplo
- chemicky odolné – mohou být použity v alkalickém prostředí

Možnosti využití kompozitních sítí:

Průmyslová výstavba:

- Výztuha průmyslových a betonových podlah
- Posílení vodních děl a pobřežních konstrukcí
- Výztuha sádrových, anhydritových podlah a výrobků

Silniční stavitelství:

- Výztuha silničních desek, dálnic a letištních ploch
- Výztuha mostů a mostních konstrukcí
- Zpevnění silničních a železničních svahů
- Oplocení a nekorodující zábrany

Kompozitní síť také nacházejí dobré uplatnění a využití v občanské výstavbě, ve výstavbě čistíren odpadních vod, v agresivním a vlhkém prostředí, v zemědělství a potravinářství.

Porovnávací tabulka kompozitních a ocelových kari sítí:

Údaje	ROCKMESH 50x50	Ocelová síť KH 30
Průměr - mm	2,2 mm	4 mm
Pevnost v tahu - Mpa	1550	570
Tažnost při max.síle %	2,5	2,5
Tepelná vodivost Wt/(mC)	0,46	56
Max.zatížení v tahu kg/F	760	720
Hustota - g/m2	360	2220
Elektrická vodivost	nevodivá	vodivá
Odolnost proti korozi a v alkalickém prostředí	velmi vysoká	nízká
Magnetická charakteristika	nemagnetická	magnetická

Pozn.: odkaz na web <http://zelex.cz/podrubrika.php?ID=112>

Příloha 5. – Distanční kolečka

KONDOR s.r.o.

Daňový doklad č.: 3181100965

DODAVATEL - sídlo a koresp. adresa:
 KONDOR, s.r.o. IČ: 41695747 DIČ: CZ41695747
 Výpadová 1538
 153 00 Praha 5, Radotín
 tel.: +420 257 888 888, fax: +420 257 888 844
 Výpis z Městského soudu v Praze, odd.C, vložka 3821

Provozovna: 11 - PARDUBICE
 Semtín č.p. 104, Pardubice 19
Vyřizuje: Markéta Ptáčková
 tel.: 466 822 666, 731 412 677
 fax: 466 822 666
Číslo zakázky: 9181101480

Datum vystavení: 27.03.2018
Datum zdan. pln: 27.03.2018
Způsob úhrady: UHRAZENO

ODBĚRATEL:
IČ: * DIČ:
 DROBNÝ PRODEJ

Korespondenční adresa:
 DROBNÝ PRODEJ

Česká republika

Česká republika

Název zboží	Množství	Cena Kč/MJ bez DPH	Cena celkem bez DPH	Sazba DPH
-------------	----------	-----------------------	------------------------	--------------

distančník 20 Clinch
 Dodací list č.: 5181101222

U ZBOŽÍ BYLA VÝROBCEM NEBO DODAVATELEM PROKÁZÁNA SHODA VLASTNOSTÍ S TECHNICKOU SPECIFIKACÍ



ZAPLACENO
 V HOTOVOSTI



Základ daně 21.0%:
 Zaokrouhlení:
 Celkem účtováno :

Režim tržby: běžný Čas:08:49:17 BKP:B1537937-84567C28-FF5FD761-EE28419C-833D1340
 ID provozovny: 71 ID pokladny: 11 FIK:63ebae8-64f3-4a55-99b0-93244d70caa3-02

Příloha 6. – Faktura CEMEX

		XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX CEMEX Cement, s.r.o. XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX Láruňova 2800/4-155 00 Praha - Stodůlky IČ: 15052320, DIČ: CZ15052320 XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX Pardubice - Semtín (3211)		DODACÍ LIST R911801921 Daňový doklad TR911800391	
CEMEX Cement, s.r.o., IČ: 15052320, DIČ: CZ15052320 Pardubice - Semtín (3211)		Místní soud v Praze, oddíl 5, ul. Na Příkopě 2468/3 Pardubice, Krajský soud v Hradci Králové, C 40886			
Betonárna: +420 602 186 298					
Datum (DUZP): 28.03.2018 Čas vystavení DL: 07:08 Obchodník / Telefon: Tomáš Blažek / +420 602 657 079 Číslo objednávky: Číslo smlouvy:		Prodej za hotové Pardubice - Semtín Průmyslová zóna 150 533 53 Pardubice			
Pardubice, Doubravice Stavba: 13 Pásmo:		IČ: DIČ: 0050117220 ID SAP zákazníka:			
Produkt: SCC;C30/37;X0(CZ, F.1.1) Receptura: 910000334 (91601XD1800000001) Příměsí: Obecný mletý vápenc		Dmax*: 16 Druh cementu: CEM I 42,5R Přísady: CX Isoflex 833, Isostab 6010		Množství: 0,260m3 Obsah chloridů: 0,2	
Vyráběné zboží je ve shodě s požadavky Prohlášení o shodě je vystaveno na základě certifikátu vydaného		ČSN EN 206 a ČSN P 73 2404 HD 227		Čas nakládky vozidla ve výrobě: 28.03.2018 07:11 Zpracovat do 90 min. od doby naložení Teplota (°C): 0	
Druh plnění SCC;C30/37;X0;Dmax16 Environment př		Množstevní jednotka m3 m3		K6/MJ 134,22	
Množství 3 3		DPH %		Celkem K6	
Základ DPH: Zaokrouhlení:		639,08 -0,30 DPH:		134,22 UHRAZENO V HOTOVOSTI	
Celkem s DPH:		Hmotnost: 595kg			
Jak jste byli spokojeni s dodávkou materiálu a s poskytnutými službami? Napište nám na info@cemex.cz nebo využijte formulář na www.cemex.cz/zpetna-vazba.aspx. Děkujeme! Přihlaste se nebo se registrujte na www.ecemex.cz a získáte komplexní přehled o všech přijatých fakturách a dodacích listech od společnosti CEMEX.					
RZ: [Redacted] Řidič: FADRHOUS JAN Podpis:		HŮLKOVÝM PÍSMEM		Příjezd (hh:mm): Konec vykládky (hh:mm): Začátek vykládky (hh:mm): Zdržné od příjezdu (po 1/4 hod.):	
Místo přejímky zboží:		Čerpáno: m ³ Přivezeno zpět: m ³ Reálná vzdálenost: km			
Převzetím zboží a podpisem tohoto dodacího listu dochází mezi kupujícím a prodávajícím k uzavření smlouvy, jejíž součástí jsou Všeobecné prodejní a dodací podmínky prodávajícího, které jsou uvedeny na druhé straně tohoto dodacího listu. Osoba podepsaná na tomto dodacím listu jako kupující/pověřená osoba, která převzala zboží, prohlašuje, že je osobou pověřenou kupujícím k uzavření smlouvy a převzetí zboží.					
Vystavil: CEMEX Cement, k.s. Tomáš Blažek, 538 04 Prácheň IČ: 15052320, DIČ: CZ15052320 Betonárna Pardubice - Semtín Semtín 150, 533 53 Prácheň Telefon: +420 602 186 298 email: betonarna.semtin@cemex.cz		HŮLKOVÝM PÍSMEM		Kupující / pověřená osoba: HŮLKOVÝM PÍSMEM	
Podpis:		Přidáno:		Podpis: Fadrhous	
Přidání vody zaniká odpovědnost prodávajícího za jakost a vady zboží.					

*Dmax = Maximální velikost zrn kamene v milimetrech

0862101

Vyrodek obsahuje cement, nutno zabránit styku s kůží a očima. Zpracovávejte v rukavicích a v ochranném oděvu, v případě potřeby použijte brýle nebo štít.

Příloha 7. – Prohlášení o shodě, certifikáty systému řízení výroby



PROHLÁŠENÍ O SHODĚ

podle § 13 zákona č. 22/1997 Sb. o technických požadavcích na výrobky a o změně a doplnění některých zákonů ve znění pozdějších předpisů a v souladu s § 13 nařízení vlády č. 163/2002 Sb., kterým se stanoví technické požadavky na vybrané stavební výrobky, ve znění nařízení vlády č. 312/2005 Sb. a č. 215/2016 Sb.

Firma CEMEX Czech Republic, s.r.o., se sídlem Laurinova 2800/4, 155 00 Praha 5 – Stodůlky, IČ 27892638, prohlašuje na svoji výlučnou zodpovědnost, že výrobky dodávané ze závodu

PARDUBICE – SEMTÍN

pevnostní třída	Beton dle ČSN EN 206:2014 a ČSN P 73 2404:2016		
	Tabulka F.1.1	Tabulka F.1.2	Tabulka F.2
C 12/15	X0	X0	
C 16/20	X0, XC1-2	X0	
C 20/25	X0, XC1-3	X0, XC1	
C 25/30	X0, XC1-4, XD1-2, XA1-2, XF1-3	X0, XC1-3, XD1-3, XA1-2, XF1-3	XM1-2
C 30/37	X0, XC1-4, XD1-3, XA1-3, XF1-4	X0, XC1-4, XD1-3, XA1-3, XF2,4	XM1-3
C 35/45	X0, XC1-4, XD1-3, XA1-3, XF1-4	X0, XC1-4, XD1-3, XA1-3, XF2,4	XM1-3
C 40/50	X0, XC1-4, XD1-3, XA1-3, XF1	X0, XC1-4, XD1-3, XA1-3, XF2,4	XM1-3
C 45/55	X0, XC1-4, XD1-3, XA1-3, XF1	X0, XC1-4, XD1-3, XA1-3, XF2,4	XM1-3
CB I, CB II dle ČSN 73 6123-1 (cementobetonový kryt)		C 30/37 XD1-3, XF1-4	

určené k použití jako beton připravený k uložení splňují základní požadavky podle nařízení vlády č. 163/2002 Sb. ve znění nařízení vlády č. 312/2005 Sb. a č. 215/2016 Sb. a jsou za podmínek stanovených v níže uvedených technických specifikacích a ve Všeobecných prodejních a dodacích podmínkách **bezpečné**. Výrobce přijal opatření, kterými zabezpečuje shodu výrobku uváděného na trh s technickou dokumentací a základními požadavky.

Posouzení shody bylo provedeno podle § 6 nařízení vlády č. 163/2002 Sb. ve znění nařízení vlády č. 312/2005 Sb. a č. 215/2016 Sb. a § 12 zákona č. 22/1997 Sb., o technických požadavcích na výrobky a o změně a doplnění některých zákonů ve znění pozdějších předpisů, s použitím následujících dokladů:

- Certifikát systému řízení výroby č. 227/C6/2016/0461 + příloha č. 1 ze dne 3.11. 2016 vydaný autorizovanou osobou č. 227 Výzkumný ústav pozemních staveb – Certifikační společnost, s.r.o.

Technické specifikace použité při posouzení shody

- ČSN EN 206:2014 Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda
- ČSN P 73 2404:2016 Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda – Doplnující informace
- ČSN EN 13877-1:2013 Cementobetonové kryty – Část 1: Materiály
- ČSN 73 6123-1:2014 Stavba vozovek – Cementobetonové kryty – Část 1: Provedení a kontrola shody
- Vyhláška č. 307/2002 Sb. SÚJB o radiační ochraně, ve znění vyhlášky č. 499/2005 Sb.
- Všeobecné prodejní a dodací podmínky společnosti CEMEX Czech Republic, s.r.o.

CEMEX Czech Republic, s.r.o.
CITY WEST, Laurinova 2800/4, 155 00 Praha 5
IČ: 27892638 – DIČ: CZ27892638

Milan Fenyk

představitel vedení pro integrovaný systém

V Praze dne 7.11. 2016


CEMEX Czech Republic, s.r.o.

Laurinova 2800/4, 155 00 Praha 5 – Stodůlky, tel. (+420) 257 257 400, www.cemex.cz

IČ: 27892638, DIČ: CZ27892638 Zápis v OR u Městského soudu v Praze, oddíl C, vložka 124693

Bankovní spojení: Raiffeisenbank a.s., č. ú. 5020017857/5500

Příloha 7. – Prohlášení o shodě, certifikáty systému řízení výroby



VÝZKUMNÝ ÚSTAV POZEMNÍCH STAVEB - CERTIFIKAČNÍ SPOLEČNOST, s.r.o.
Oznámený subjekt Certifikační orgán pro produkty, kvalifikaci, EPD, kvalitu budov a systémy managementu. Zkušební laboratoř
Rozhodnutí o autorizaci č. 32/2006 ze dne 31.8.2006
Autorizovaná osoba 227

PŘÍLOHA č. 1
Certifikátu systému řízení výroby
č. 227/C6/2016/0461

Vymezení rozsahu platnosti certifikátu:

Beton dle ČSN EN 206 + ČSN P 73 2404 dle tabulky F.1.1
C 12/15 X0
C 16/20 X0, XC1, XC2
C 20/25 X0, XC1, XC2, XC3
C 25/30 X0, XC1, XC2, XC3, XC4, XD1, XD2, XA1, XA2, XF1, XF2, XF3
C 30/37 X0, XC1, XC2, XC3, XC4, XD1, XD2, XD3, XA1, XA2, XA3, XF1, XF2, XF3, XF4
C 35/45 X0, XC1, XC2, XC3, XC4, XD1, XD2, XD3, XA1, XA2, XA3, XF1, XF2, XF3, XF4
C 40/50 X0, XC1, XC2, XC3, XC4, XD1, XD2, XD3, XA1, XA2, XA3, XF1
C 45/55 X0, XC1, XC2, XC3, XC4, XD1, XD2, XD3, XA1, XA2, XA3, XF1

Beton dle ČSN EN 206 + ČSN P 73 2404 dle tabulky F.1.2
C 12/15 X0
C 16/20 X0
C 20/25 X0, XC1
C 25/30 X0, XC1, XC2, XC3, XD1, XD2, XD3, XA1, XA2, XF1, XF2, XF3
C 30/37 X0, XC1, XC2, XC3, XC4, XD1, XD2, XD3, XA1, XA2, XA3, XF2, XF4
C 35/45 X0, XC1, XC2, XC3, XC4, XD1, XD2, XD3, XA1, XA2, XA3, XF2, XF4
C 40/50 X0, XC1, XC2, XC3, XC4, XD1, XD2, XD3, XA1, XA2, XA3, XF2, XF4
C 45/55 X0, XC1, XC2, XC3, XC4, XD1, XD2, XD3, XA1, XA2, XA3, XF2, XF4

Beton dle ČSN EN 206 + ČSN P 73 2404 dle tabulky F.2
C 25/30 XM1, XM2
C 30/37 XM1, XM2, XM3
C 35/45 XM1, XM2, XM3
C 40/50 XM1, XM2, XM3
C 45/55 XM1, XM2, XM3

Beton dle ČSN 73 6123-1 (cementobetonový kryt)
CB I C30/37 XD1, XD2, XD3, XF1, XF2, XF3, XF4
CB II C30/37 XD1, XD2, XD3, XF1, XF2, XF3, XF4

Tato příloha č. 1 je nedílnou součástí certifikátu č. 227/C6/2016/0461.



Ing. Lubomír Keim, CSc.
ředitel Autorizované osoby 227

Místo a datum vydání:
V Praze dne 03.11.2016

K: 15264/38

ČS-VÝZKUMNÝ ÚSTAV POZEMNÍCH STAVEB - CERTIFIKAČNÍ SPOLEČNOST, s.r.o. 102 21 Praha 10 - Hostivař, Pražská 810 / 16
IČ: 25052063 DIČ: CZ250 520 63 Tel.: 00421 271 751 148 Fax: 00241 281 017 241; E-mail: info@vups.cz www.vups.cz

Příloha 7. – Prohlášení o shodě, certifikáty systému řízení výroby

	
VÝZKUMNÝ ÚSTAV POZEMNÍCH STAVEB - CERTIFIKAČNÍ SPOLEČNOST, s.r.o. Oznámený subjekt Certifikační orgán pro produkty, kvalifikaci, EPD, kvalitu budov a systémy managementu Zkušební laboratoř Rozhodnutí o autorizaci č. 32/2006 ze dne 31.8.2006 Autorizovaná osoba 227	
<h1>CERTIFIKÁT</h1> <h2>systemu řízení výroby</h2> <p>č. 227/C6/2016/0461</p>	
<p>V souladu s ustanovením § 6 odst. 2 nařízení vlády č. 163/2002 Sb., kterým se stanoví technické požadavky na vybrané stavební výrobky, ve znění nařízení vlády č. 312/2005 Sb. a nařízení vlády č. 215/2016 Sb. (dále jen „nařízení vlády“) autorizovaná osoba č. 227 potvrzuje, že u stavebního výrobku</p>	
název výrobku:	Beton pevnostních tříd C 12/15 a vyšší v rozsahu technické specifikace dle Přílohy č. 1
určené použití:	pro konstrukce pozemních, inženýrských a dopravních staveb
výrobce:	CEMEX Czech Republic, s.r.o. Laurinova 2800/4, Stodůlky, 155 00 Praha 5 IČ: 27892638
výrobní závod:	Betonárna Pardubice - Semtín Semtín 102, 553 54 Pardubice IČ: 27892638
<p>posoudila systém řízení výroby, který odpovídá příslušným technickým podkladům podle § 6 odst. 1 písm. d) výše uvedeného nařízení vlády a zjistila, že systém řízení výroby zabezpečuje, aby výrobky uváděné na trh splňovaly požadavky stanovené určenou normou ČSN EN 206 + ČSN P 73 2404, ČSN 73 6123-1 a odpovídaly technické dokumentaci podle § 4 odst. 3 a dokladu vystavenému podle § 6 odst. 1 písm. a) o výsledcích počátečních zkoušek typu výrobku na vzorku.</p> <p>Tento certifikát zůstává v platnosti po dobu, po kterou se požadavky stanovené ve stavebním technickém osvědčení, na které byl uveden odkaz, nebo výrobní podmínky v místě výroby, či systém řízení výroby výrazně nezmění.</p> <p>Autorizovaná osoba 227 provádí nejméně jedenkrát za 12 měsíců dohled nad řádným fungováním systému řízení výroby v místě výroby. Pokud autorizovaná osoba zjistí nedostatky, je oprávněna zrušit nebo změnit ji vydaný certifikát.</p>	
Výtisk číslo:	1
Místo a datum vydání:	V Praze dne 03.11.2016
K: 15264/38	
	
 Ing. Lubomír Keim, CSc. ředitel Autorizované osoby 227	
<small>Výzkumný ústav pozemních staveb - Certifikační společnost, s.r.o. 102 21 Praha 10 - Hostivař, Pražská 610 / 16 IČ: 25052063 DIČ: CZ250 520 63 Tel.: 00420 271 761 146, Fax: 00420 281 017 241 E-mail: info@vups.cz www.vups.cz</small>	

Příloha 8. – Kontrolní a zkušební plán

1. Příprava forem a bednění
2. Dodání čerstvého betonu
3. Zkouška sednutí rozlítím
4. Objemová hmotnost čb
5. Obsah vzduchu
6. Výroba zkušebních těles
7. Ošetřování zkušebních těles
8. Odbednění forem
9. Vyhodnocení výsledků ze zkoušek čerstvého betonu
10. Lepení výztužných sítí
11. Objemová hmotnost ztvrdlého betonu
12. Zkoušky pevnosti v tlaku
13. Zkoušky pevnosti v tahu ohybem
14. Zkoušky pevnosti v tahu ohybem (pro kompozitní desky)
15. Výroba zkušebních těles pro zk desek na průraz
16. Zkoušení desek na průraz (modifikovaná)
17. Vyhodnocení výsledků ze zkoušek ztvrdlého betonu a kompozitních desek

Hrubý harmonogram prováděných činností:

Po 26. 3.	Út 27.3.	St 28.3.	Čt 29.3.	Pá 30.3.	So 31.3.	Ne 1.4.
1.	1.	2. 3. 4. 5. 6. 7.	7. 8.	7. 9.	7. 9.	7. 9.
Ošetřování zkušebních těles (7.) probíhá po následujících 26 dní.						
Po 23. 4.	Út 24.4.	St 25.4.	Čt 26.4.	Pá 27.4.	So 28.4.	Ne 29.4.
7. 10. 11. 12. 13	14. 15. 17.	17.	17.	16. 17.	17.	17.

Lepení výztužných sítí (10) probíhá po dobu 48 hodin (ode dne 20. 4. do 23. 4.), kdy již vybraná tělesa nejsou ošetřována ve vodní lázni.

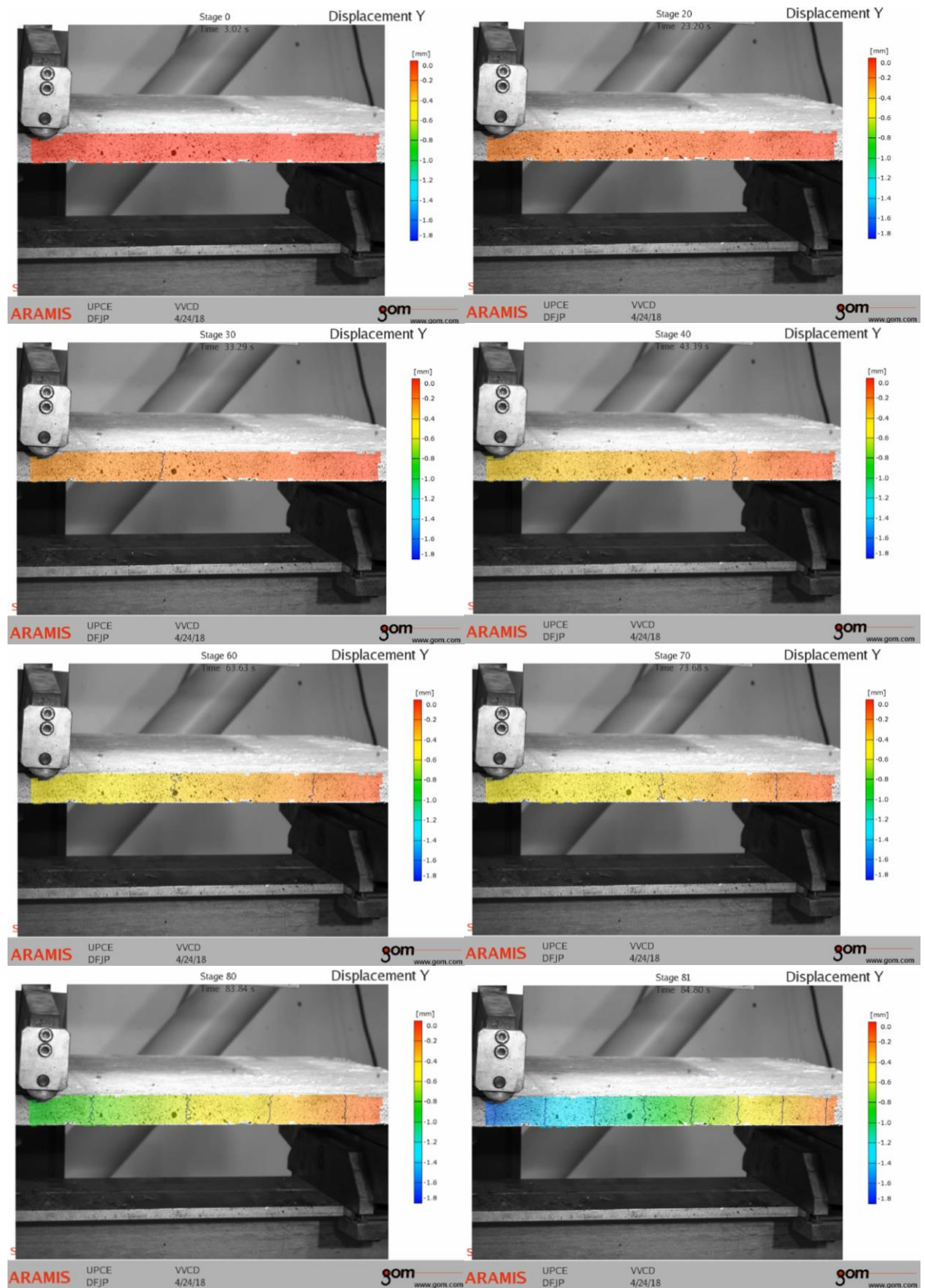
Podrobný harmonogram zkoušek čerstvého betonu:

Středa 28.3.			
Čas 0:00	0:00 – 0:20	0:20 - 0:40	0:40 – 0:60
Činnost 2.	3. 4. 6.	4. 5. 6.	6. 7.

Činnosti jsou řazeny v pořadí, ve kterém byly prováděny.

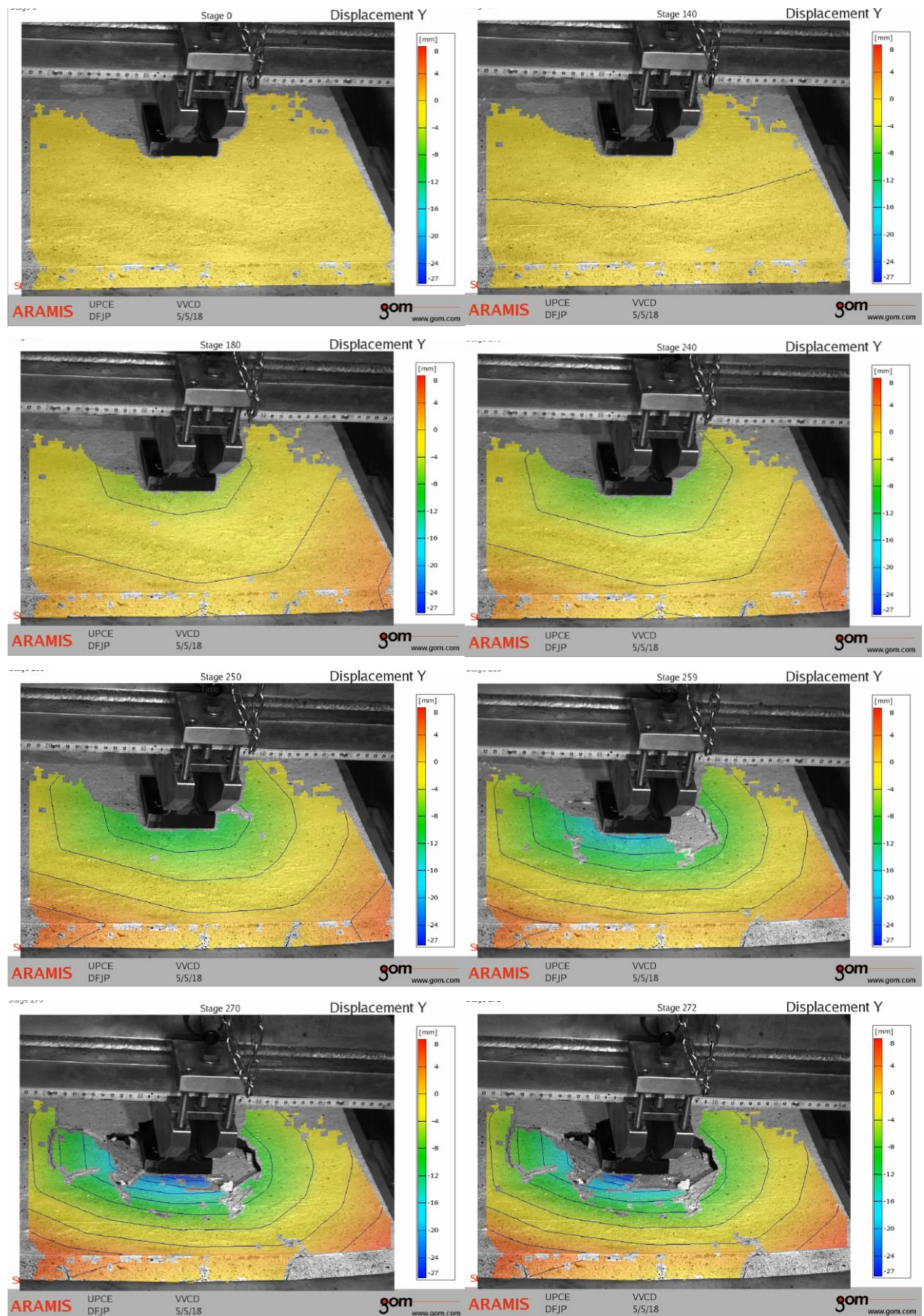
Příloha 9. – Měření přetvoření systémem ARAMIS (3.2.)

Vzorek 2. – nevyztužený beton (3.2.)

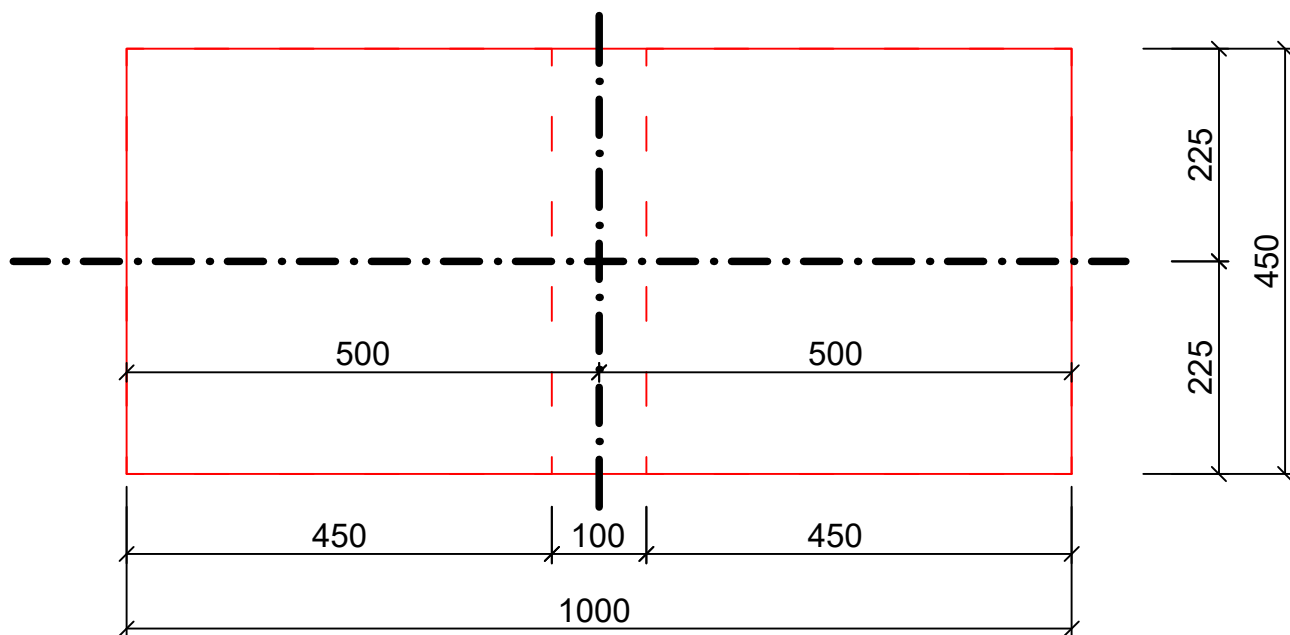


Příloha 10. – Měření přetvoření systémem ARAMIS (2.3.2.)

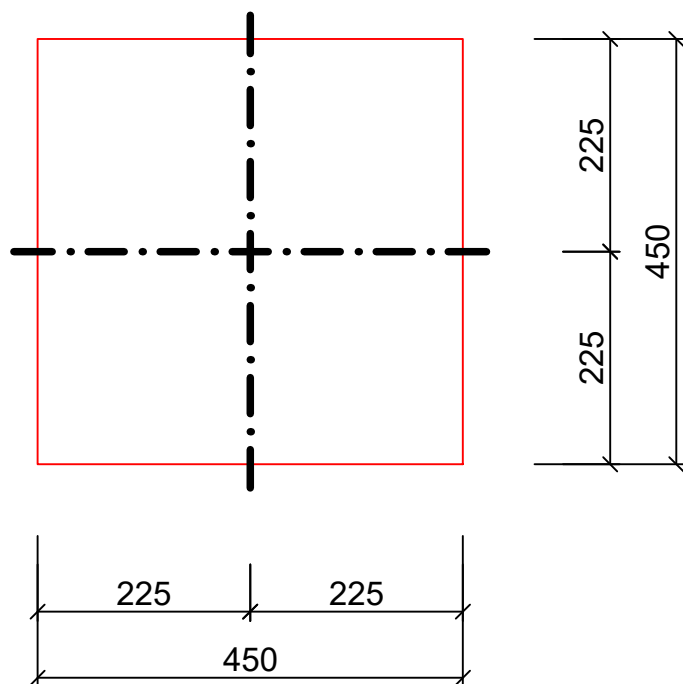
Vzorek 3. – ROCKMESH (2.3.2.)



ZKUŠEBNÍ TĚLESO PRO ZKOUŠKY PEVNOSTI V TAHU OHYBEM



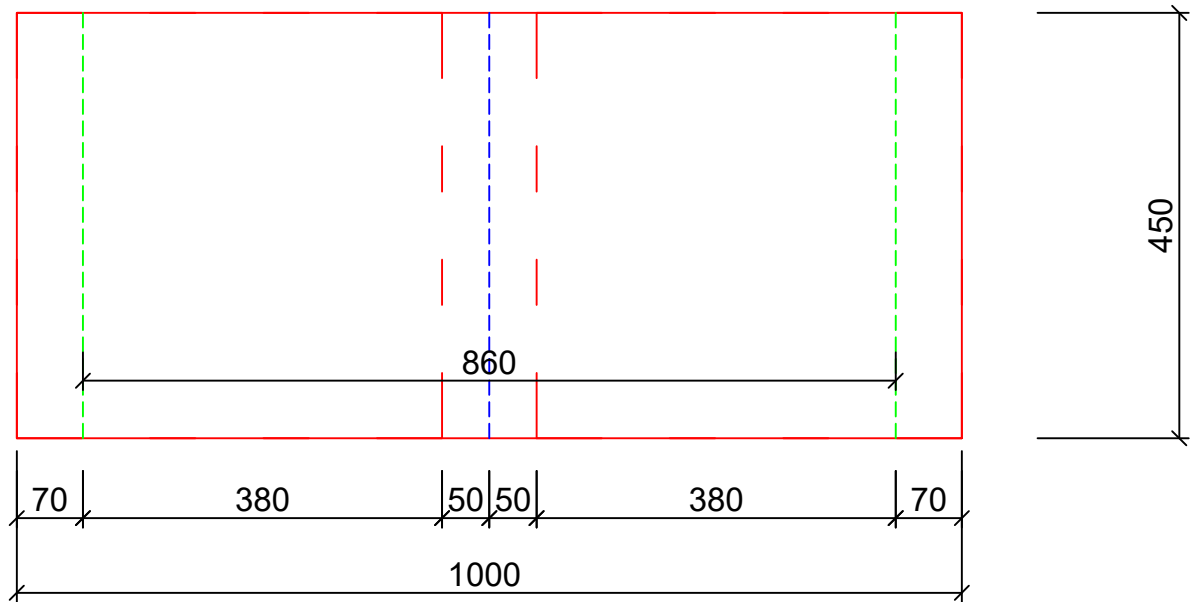
ZKUŠEBNÍ TĚLESO PRO ZKOUŠKY PRŮRAZU DESKY



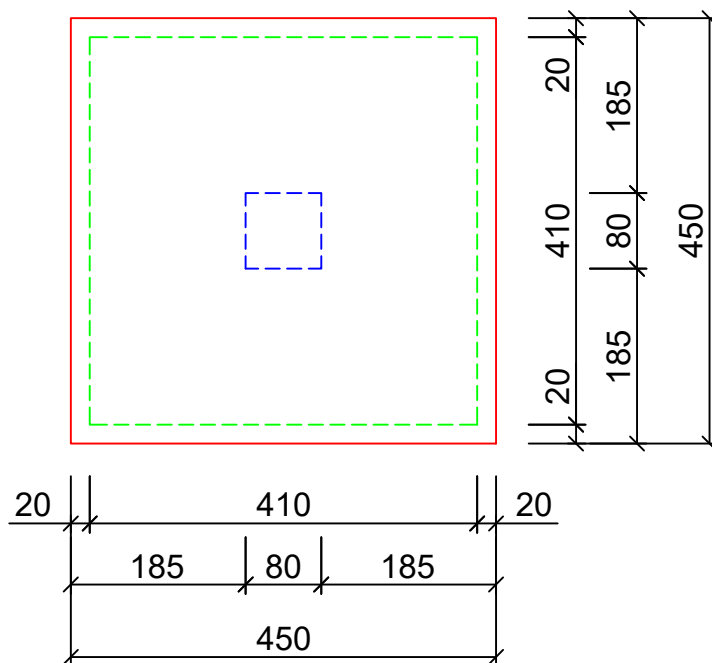
- · — OSY SYMETRIE
- ZKUŠEBNÍ TĚLESA
- — — NÁSLEDNÁ ÚPRAVA TĚLESA

NAVRHL	VYPRACOVAL	KONTROLOVAL	UNIVERZITA PARDUBICE	
	Jan Fadrhons	ing. Vladimír Suchánek	DOPRAVNÍ FAKULTA	
			JANA PERNERA	
ŠKOLNÍ ROK: 2017/2018			DATUM	
		KATEDRA: Dopravní stavitelství	FORMÁT	1xA4
BAKALÁŘSKÁ PRÁCE ZKUŠEBNÍ TĚLESA			ČÍSLO VÝKRESU	
			MĚŘÍTKO VÝKRESU 1:8	

ZATĚŽOVACÍ MODEL PRO ZKOUŠKY PEVNOSTI V TAHU OHYBEM



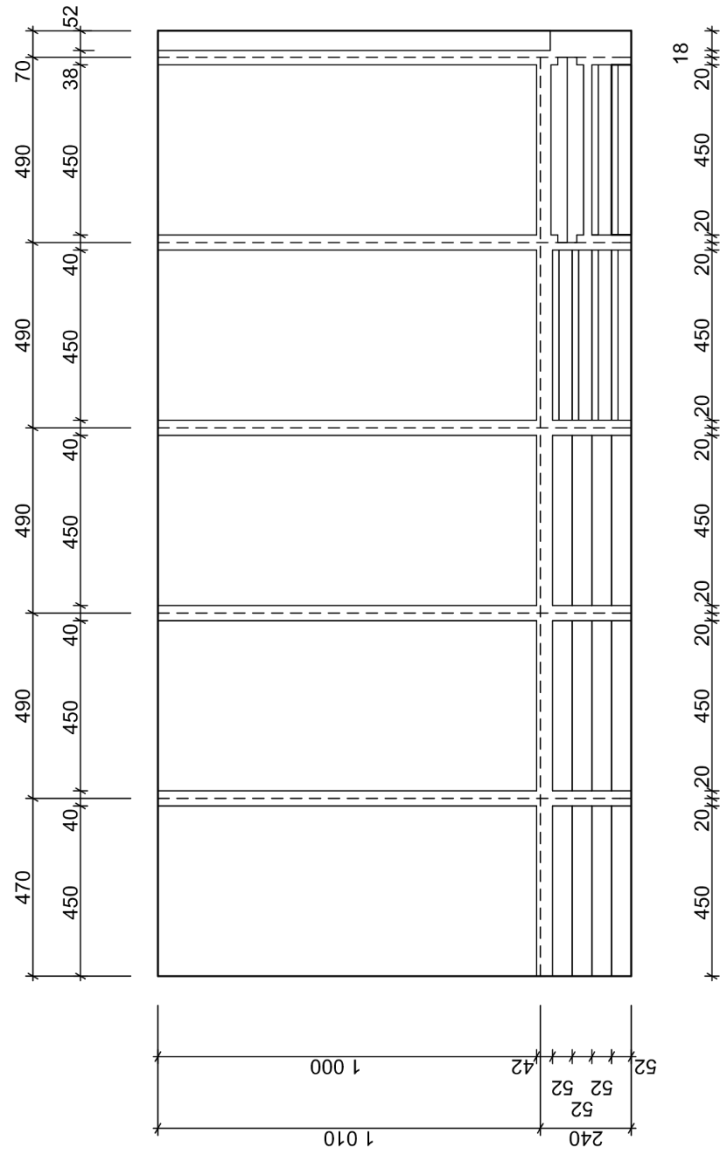
ZATĚŽOVACÍ MODEL PRO ZKOUŠKY PRŮRAZU DESKY



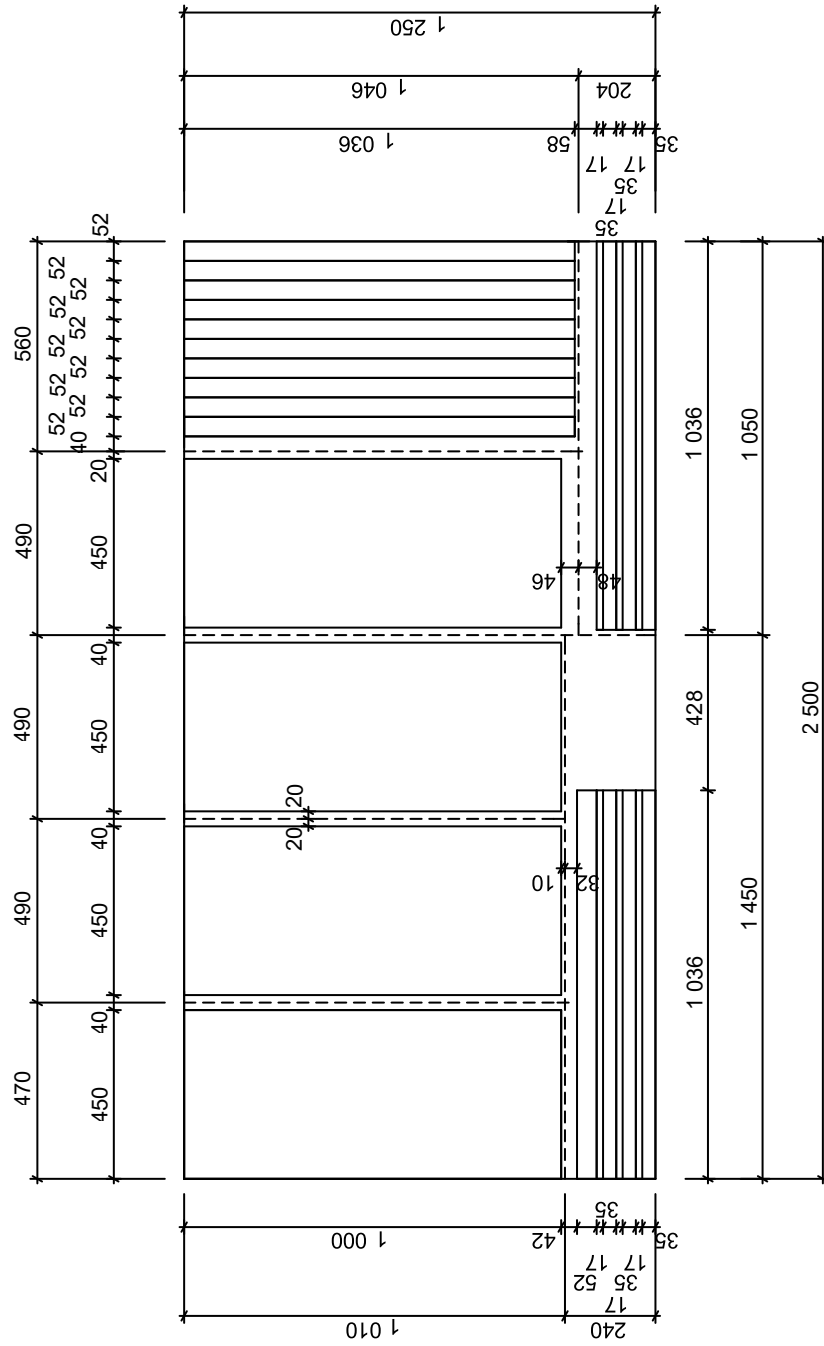
- MÍSTA ULOŽENÍ DO LISU
- ZKUŠEBNÍ TĚLESA
- MÍSTA ZATĚŽOVÁNÍ LISEM
- NÁSLEDNÁ ÚPRAVA TĚLESA

NAVRHL	VYPRACOVAL	KONTRLOVAL	UNIVERZITA PARDUBICE	
	Jan Fadrhons	ing. Vladimír Suchánek	DOPRAVNÍ FAKULTA	
			JANA PERNERA	
ŠKOLNÍ ROK: 2017/2018			DATUM	
KATEDRA: Dopravní stavitelství			FORMÁT	1xA4
BAKALÁŘSKÁ PRÁCE ZATĚŽOVÁNÍ ZKUŠEBNÍCH TĚLES			ČÍSLO VÝKRESU	
			MĚŘITKO VÝKRESU 1:8	

Příloha 14. – Výkres řezání překližek

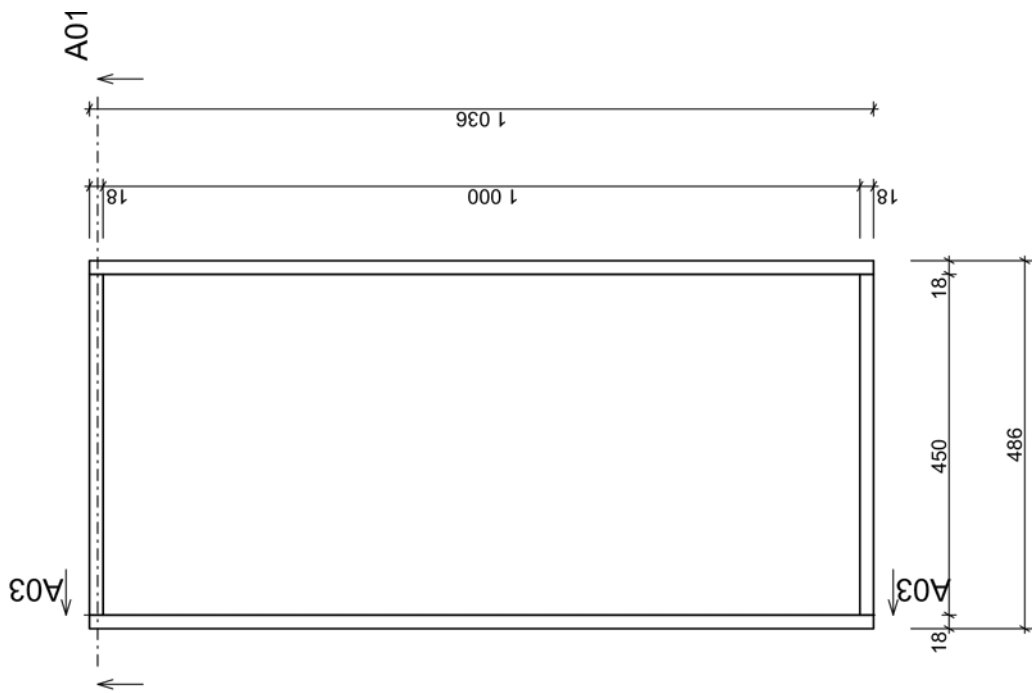


Příloha 14. – Výkres řezání překližek

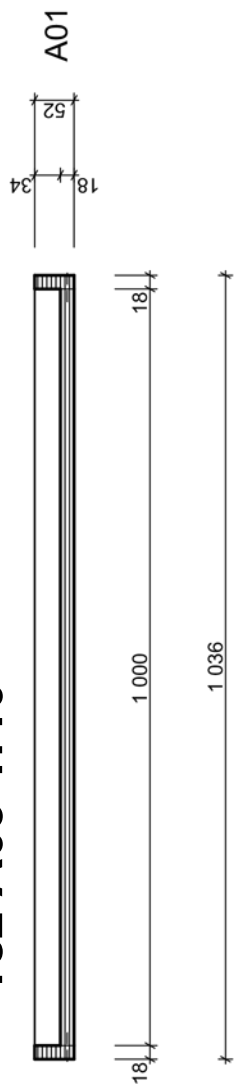


Příloha 15. – Výkres sestavení bedně

půdorys 1:10



řez A03 1:10



řez A01 1:10

