

Univerzita Pardubice

Dopravní fakulta Jana Pernera

Experimentální analýza (samozhutnitelných) drátkobetonů

Bc. Jan Fadrhons

Diplomová práce

2021

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera
Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan Fadrhons**
Osobní číslo: **D18436**
Studijní program: **N3607 Stavební inženýrství**
Studijní obor: **Dopravní stavitelství**
Téma práce: **Experimentální analýza (samozhutnitelných) drátkobetonů**
Zadávající katedra: **Katedra dopravního stavitelství**

Zásady pro vypracování

Požaduje se zpracovat rešerše stávající míry poznání v ČR a v zahraničí.

Pro potřeby vlastních experimentálních prací je možné provést modifikaci (referenční) receptury typového samozhutnitelného betonu.

V experimentální části práce, při zkoušení ztvrdlých drátkobetonů, je požadováno zaměřit se na výstižnější stanovení tahové pevnosti drátkobetonů – tj. aplikace kruhové singularity.

Vyžaduje se provést ohybové zkoušky drátkobetonových trámců – tj. reziduální pevnosti.

Doporučuje se stanovit kapacitu absorbované energie drátkobetonových deskových zkušebních těles.

Vlastní experimentální práce budou probíhat na autorem zhotovených zkušebních tělesech.

Požadované výstupy:

Úvod

Přehled stanovených cílů

1) Teoretická část

Analýza současného stavu poznání v ČR a v zahraničí

2) Experimentální část

Optimalizace receptury

Výroba samozhutnitelného drátkobetonu

Provedení zkoušek čerstvého SFRSCC (stanovení konzistence, objemová hmotnost)

Provedení zkoušek ztvrdlého SFRSCC (výstižnější stanovení tahové pevnosti drátkobetonů, ohybové zkoušky drátkobetonových trámců, stanovení kapacity absorbované energie drátkobetonových deskových zkušebních těles)

3) Vyhodnocení dosažených výsledků

Verifikace a závěr

Rozsah pracovní zprávy:

Rozsah grafických prací:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam doporučené literatury:

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 – Doplňující informace. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.

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 P 73 2450, 2015. Vláknobeton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.

ČSN P 73 2451, 2015. Vláknobeton – Zkoušení čerstvého vláknobetonu. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.

ČSN P 73 2452, 2015. Vláknobeton – Zkoušení ztvrdlého vláknobetonu. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.

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

TKP staveb státních drah: Kapitola 17: Beton pro konstrukce. Praha: Správa železniční dopravní cesty, 2013.

TP 187: Samozhutnitelný beton pro mostní objekty pozemních komunikací. In: Technické podmínky. Praha: Ministerstvo dopravy ČR: Odbor infrastruktury, 2008.

BAREŠ, Richard A., 1988. Kompozitní materiály. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury. Redakce stavební literatury. Typové číslo L17-B3-IV-31/72231.

KRÁTKÝ, J., K. TRTÍK a J. VODIČKA, 1999. Drátkobetonové konstrukce: Úvodní část a příklady použití: Směrnice pro navrhování, provádění, kontrolu výroby a zkoušení drátkobetonových konstrukcí. Praha: Informační centrum ČKAIT. Betonové stavitelství. ISBN 80-86364-00-3.

MEHTA, P. Kumar a Paulo J. M. MONTEIRO. Concrete: microstructure, properties, and materials. 4th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2014. ISBN 978-0-07-179787-0; MHID 0-07-179787-4.

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

SCHUTTER, Geert De, Peter J.M. BARTOS, Peter DOMONE, John GIBBS a Rudolf HELA, 2008. Samozhutnitelný beton. Praha: ČBS Servis. ISBN 978-1904445-30-2.

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Vladimír Suchánek, Ph.D.
Katedra dopravního stavitelství

Datum zadání diplomové práce:

26. října 2019

Termín odevzdání diplomové práce:

31. ledna 2020

L.S.

doc. Ing. Libor Švadlenka, Ph.D.
děkan

Ing. Aleš Šmejda, Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlašuji:

Práci s názvem Experimentální analýza (samozhutnitelných) drátkobetonů 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., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, 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. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice

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

V Pardubicích dne

Bc. Jan Fadrhons v.r.

Poděkování:

Mé poděkování patří především vedoucímu diplomové práce Panu Ing. Vladimíru Suchánkovi, Ph.D. 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 tematicce. Další poděkování patří zaměstnancům výroby prefabrikátů PREFA Nový Bydžov (M – SILNICE a.s.) speciálně Panu Miroslavu Klotzovi za pomoc při výrobě těles. Další poděkování patří zaměstnancům Betonárny CEMEX v Pardubicích – Semtíně především Ing. Martině Hankové a Michalu Konířovi za pomoc při zkoušení těles. Také bych rád poděkoval ostatním studentům za pomoc s betonováním či jinou pomoc při přípravě diplomové práce.

Závěrečná práce byla zpracována v souvislosti s řešením vědeckovýzkumného projektu Univerzity Pardubice č. SGS_2019_010, SGS_2020_009, SGS_2021_010.

ANOTACE

Diplomová práce se zabývá experimentální analýzou samozhutnitelných drátkobetonů a současným stavem poznání. Experimentální část práce je věnována výrobě těles, provedení zkoušek čerstvého samozhutnitelného betonu a mechanickým vlastnostem drátkobetonu. Zkoušena byla pevnost v tahu ohybem a kapacita absorbované energie. Dále došlo k porovnání nevyztužených tělesek s tělesy vyztuženými drátkovou rozptýlenou výztuží v různém množství. Výsledky zkoušek čerstvého betonu a pevnostních zkoušek jsou vyhodnoceny a porovnávány. Vše je podloženo fotodokumentací.

KLÍČOVÁ SLOVA

Vyztužování betonu, samozhutnitelný beton (SCC), drátkobeton (SFRC), samozhutnitelný drátkobeton (SFRSCC), zkoušky čerstvého betonu, mechanické vlastnosti betonu

TITLE

Experimental analysis of steel fiber reinforced self-compacting concrete

ANNOTATION

The thesis deals with an experimental analysis of steel fiber reinforced self-compacting concrete and the current state of knowledge. The experimental part of the work is devoted to production of specimens for the testing fresh self-compacting concrete and mechanical properties of steel fiber reinforced concrete. Flexural tensile strength and absorbed energy capacity were tested. There was also a comparison of unreinforced specimens and the specimens reinforced with scattered wires in different amounts. The Test results of fresh concrete and strength tests are evaluated and compared. Everything is based on photographs.

KEYWORDS

reinforcement of concrete, Self-Compacting Concrete SCC, Fiber Reinforced Concrete FRC, Steel Fiber Reinforced Self-Compacting Concrete SFRSCC, tests of fresh concrete, mechanical properties of concrete

OBSAH:

ÚVOD	13
CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE	15
TEORETICKÁ ČÁST	16
1. KOMPOZITNÍ MATERIÁLY	16
1.1. Historie	16
1.2. Základní druhy	17
2. SAMOZHUTNITELNÝ BETON.....	18
2.1. Vlastnosti.....	19
2.2. Složení.....	20
3. VLÁKNOBETON	21
3.1. Vlastnosti.....	22
3.2. Složení.....	23
4. SAMOZHUTNITELNÝ VLÁKNOBETON.....	24
4.1. Vlastnosti.....	25
4.2. Složení.....	26
4.3. Zkoušky čerstvého betonu.....	28
4.3.1. Objemová hmotnost čerstvého betonu	28
4.3.2. Obsah vzduchu	29
4.3.3. Odolnost proti segregaci.....	30
4.3.4. Sednutí – rozlitím	30
4.3.5. J – kroužek.....	31
4.3.6. V – nálevka.....	32
4.4. Zkoušky ztvrdlého betonu.....	33
4.4.1. Objemová hmotnost ztvrdlého betonu.....	34
4.4.2. Pevnost v prostém tlaku.....	34
4.4.3. Pevnost v tahu za ohybu	35

4.4.3.1. Nevyztužený beton	36
4.4.3.2. Tříbodová se zářezem	37
4.4.3.3. Čtyřbodová bez singularit.....	39
4.4.3.4. Čtyřbodová s kruhovou singularitou dle nové metodiky	41
4.4.4. Odolnost proti proražení, stanovení absorbované energie na deskách.....	42
4.4.5. Zkouška tahové pevnosti	43
4.5. Stanovení obsahu kovových vláken ve vzorcích	45
EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	46
5. OPTIMALIZACE SLOŽENÍ BETONU	46
6. ZKOUŠENÍ ČERSTVÉHO BETONU.....	47
6.1. Objemová hmotnost	48
6.2. Obsah vzduchu	48
6.3. Sednutí – rozlítím.....	48
7. ZKOUŠENÍ ZTVRDLÉHO BETONU	49
7.1. Objemová hmotnost	50
7.2. Orientace drátků a segregace složek betonu	51
7.3. Rovnoměrnost rozptýlení drátkové výztuže.....	52
7.4. Pevnost v prostém tlaku	53
8. ZKOUŠENÍ DLE NOVÉ METODIKY	56
8.1. Pevnost v tahu ohybem – čtyřbodová, kruhová singularita	56
8.1.1. Obsah kovových drátků ve vzorcích 25 kg/m ³	57
8.1.2. Obsah kovových drátků ve vzorcích 50 kg/m ³	60
8.1.3. Obsah kovových drátků ve vzorcích 75 kg/m ³	63
8.1.4. Nevyztužené hranoly	66
8.2. Pevnost v tahu ohybem – čtyřbodová, bez zářezu	69
8.2.1. Obsah kovových drátků ve vzorcích 25 kg/m ³	70
8.2.2. Obsah kovových drátků ve vzorcích 50 kg/m ³	73

8.2.3. Obsah kovových drátků ve vzorcích 75 kg/m ³	76
8.2.4. Nevyztužené hranoly	79
9. KAPACITA ABSORBOVANÉ ENERGIE DRÁTKOBETONOVÝCH DESEK	82
9.1. Obsah kovových drátků ve vzorcích 25 kg/m ³	83
9.2. Obsah kovových drátků ve vzorcích 50 kg/m ³	89
9.3. Obsah kovových drátků ve vzorcích 75 kg/m ³	95
10. ZÁVĚR	101
Pevnost v tahu ohybem – čtyřbodová, kruhová singularita	101
Pevnost v tahu ohybem – čtyřbodová, bez zářezu	105
Stanovení kapacity absorbované energie drátkobetonových desek	108
Vyhodnocení výsledků.....	111
Variabilita výsledků zkoušek z různých laboratoří.....	113
ODKAZY NA DALŠÍ LABORATORNÍ VÝSLEDKY	113
POUŽITÁ LITERATURA	118
SEZNAM PŘÍLOH.....	125

SEZNAM ILUSTRACÍ:

Obrázek 1. – Rozdělení kompozitních materiálů tradiční vlevo a novodobé napravo [1]	18
Obrázek 2. – Samozhutnitelný beton odběr na pravé straně zkušební tělesa na levé straně	21
Obrázek 3. – Samozhutnitelný drátkobeton zkušební tělesa na levé, porušení na pravé straně	27
Obrázek 4. – Zkušební přípravek obsah vzduchu.....	29
Obrázek 5. – Zkušební přípravek odolnosti proti segregaci	30
Obrázek 7. – Zkušební přípravek V – nálevka	33
Obrázek 8. – Zatěžovací zařízení nalevo a uložení zatěžovaných krychlí napravo	35
Obrázek 9. – Uložení zatěžovaných nevyztužených trámců zatěžované jedním břemenem na pravé straně a zatěžovaný dvěma břemeny na levé straně.....	37
Obrázek 10. – Sestavení zatěžovacího zařízení na levé straně a uložení zatěžovaných trámců se zářezem na pravé straně.....	39
Obrázek 11. – Rozdíl mezi skutečným a měřeným chováním ve středu na levé straně [42] a rozdílné šíření trhliny (těleso 19.9./75/1) na pravé straně	40
Obrázek 12. - Sestavení zatěžovacího zařízení na levé straně a rozměry a uložení trámců na pravé straně, upraveno dle [31].....	42
Obrázek 13. – Sestavení lisovacího zařízení nalevo a uložení zatěžovaných desek napravo ..	43
Obrázek 14. - Rozměry trámce na levé straně a úchyty uložení na pravé straně [32].....	44
Obrázek 15. – Přípravek pro separaci kovových vláken z čerstvého betonu	45
Obrázek 16. – Ošetřování zkušebních těles (vlevo) a převoz na vlečném vozíku (napravo) ...	47
Obrázek 17. – Jádrové odvrtávání (vlevo) a odvrtané hranoly (napravo)	49
Obrázek 18. – Detail poškození po zkouškách desek na odolnost proti výbuchu viz příloha C.	51
Obrázek 19. – Rovnoměrnost rozptýlení drátkové výztuže.....	52
Obrázek 20. – Rozdílné šíření trhlin na zadních stranách zkušebních hranolů	69
Obrázek 21. – Osazení zkušebních těles na levé straně a deformace a trhliny na pravé straně	82

SEZNAM TABULEK A GRAFŮ

Tabulka 1. – Objemová hmotnost zatvrdlého betonu s obsahem drátkové výztuže 25 kg/m ³ .50	.50
Tabulka 2. – Objemová hmotnost zatvrdlého betonu s obsahem drátkové výztuže 50 kg/m ³ .50	.50
Tabulka 3. – Objemová hmotnost zatvrdlého betonu s obsahem drátkové výztuže 75 kg/m ³ .50	.50
Tabulka 4. – Objemová hmotnost zatvrdlého betonu s obsahem drátkové výztuže 0 kg/m ³ ...51	...51
Tabulka 5. – objemová hmotnost ztvrdlého betonu podle obsahu drátkové výztuže .....51	.....51
Tabulka 6. – Pevnost v prostém tlaku SCC s obsahem drátkové výztuže 25 kg/m ³ .....53	.....53
Tabulka 7. – Pevnost v prostém tlaku SCC s obsahem drátkové výztuže 50 kg/m ³ .....54	.....54
Tabulka 8. – Pevnost v prostém tlaku SCC s obsahem drátkové výztuže 75 kg/m ³ .....55	.....55
Tabulka 9. – Pevnost v prostém tlaku SCC bez obsahu drátkové výztuže .....55	.....55
Tabulka 10. – Pevnost v prostém tlaku SCC podle obsahu drátkové výztuže .....55	.....55
Tabulka 11. – Pevnost v tahu ohybem čtyřbodová, singularita 25 kg/m ³ vzorek 1/3 .....57	.....57
Tabulka 12. – Pevnost v tahu ohybem čtyřbodová, singularita 25 kg/m ³ vzorek 2/3 .....58	.....58
Tabulka 13. – Pevnost v tahu ohybem čtyřbodová, singularita 25 kg/m ³ vzorek 3/3 .....59	.....59
Tabulka 14. – Pevnost v tahu ohybem čtyřbodová, singularita 50 kg/m ³ vzorek 1/3 .....60	.....60
Tabulka 15. – Pevnost v tahu ohybem čtyřbodová, singularita 50 kg/m ³ vzorek 2/3 .....61	.....61
Tabulka 16. – Pevnost v tahu ohybem čtyřbodová, singularita 50 kg/m ³ vzorek 3/3 .....62	.....62
Tabulka 17. – Pevnost v tahu ohybem čtyřbodová, singularita 75 kg/m ³ vzorek 1/3 .....63	.....63
Tabulka 18. – Pevnost v tahu ohybem čtyřbodová, singularita 75 kg/m ³ vzorek 2/3 .....64	.....64
Tabulka 19. – Pevnost v tahu ohybem čtyřbodová, singularita 75 kg/m ³ vzorek 3/3 .....65	.....65
Tabulka 20. – Pevnost v tahu ohybem čtyřbodová, singularita 0 kg/m ³ vzorek 1/3 .....66	.....66
Tabulka 21. – Pevnost v tahu ohybem čtyřbodová, singularita 0 kg/m ³ vzorek 2/3 .....67	.....67
Tabulka 22. – Pevnost v tahu ohybem čtyřbodová, singularita 0 kg/m ³ vzorek 3/3 .....68	.....68
Tabulka 23. – Pevnost v tahu ohybem čtyřbodová, bez zářezu 25 kg/m ³ vzorek 1/3 .....70	.....70
Tabulka 24. – Pevnost v tahu ohybem čtyřbodová, bez zářezu 25 kg/m ³ vzorek 2/3 .....71	.....71
Tabulka 25. – Pevnost v tahu ohybem čtyřbodová, bez zářezu 25 kg/m ³ vzorek 3/3 .....72	.....72
Tabulka 26. – Pevnost v tahu ohybem čtyřbodová, bez zářezu 50 kg/m ³ vzorek 1/3 .....73	.....73
Tabulka 27. – Pevnost v tahu ohybem čtyřbodová, bez zářezu 50 kg/m ³ vzorek 2/3 .....74	.....74

Tabulka 28. – Pevnost v tahu ohybem čtyřbodová, bez zářezu 50 kg/m ³ vzorek 3/3	75
Tabulka 29. – Pevnost v tahu ohybem čtyřbodová, bez zářezu 75 kg/m ³ vzorek 1/3	76
Tabulka 30. – Pevnost v tahu ohybem čtyřbodová, bez zářezu 75 kg/m ³ vzorek 2/3	77
Tabulka 31. – Pevnost v tahu ohybem čtyřbodová, bez zářezu 75 kg/m ³ vzorek 3/3	78
Tabulka 32. – Pevnost v tahu ohybem čtyřbodová, bez zářezu 0 kg/m ³ vzorek 1/3	79
Tabulka 33. – Pevnost v tahu ohybem čtyřbodová, bez zářezu 0 kg/m ³ vzorek 2/3	80
Tabulka 34. – Pevnost v tahu ohybem čtyřbodová, bez zářezu 0 kg/m ³ vzorek 3/3	81
Tabulka 35. – Stanovení absorbované energie 25 kg/m ³ vzorek 1/3.....	84
Tabulka 37. – Stanovení absorbované energie 25 kg/m ³ vzorek 3/3.....	88
Tabulka 38. – Stanovení absorbované energie 50 kg/m ³ vzorek 1/3.....	90
Tabulka 39. – Stanovení absorbované energie 50 kg/m ³ vzorek 2/3.....	92
Tabulka 40. – Stanovení absorbované energie 50 kg/m ³ vzorek 3/3.....	94
Tabulka 41. – Stanovení absorbované energie 75 kg/m ³ vzorek 1/3.....	96
Tabulka 42. – Stanovení absorbované energie 75 kg/m ³ vzorek 2/3.....	98
Tabulka 44. – Pevnost v tahu ohybem – čtyřbodová, kruhová singularita – 0 kg/m ³	101
Tabulka 45. – Pevnost v tahu ohybem – čtyřbodová, kruhová singularita – 25 kg/m ³	102
Tabulka 46. – Pevnost v tahu ohybem – čtyřbodová, kruhová singularita – 50 kg/m ³	102
Tabulka 47. – Pevnost v tahu ohybem – čtyřbodová, kruhová singularita – 75 kg/m ³	103
Tabulka 48. – Pevnost v tahu ohybem – čtyřbodová, kruhová singularita.....	103
Tabulka 49. – Pevnost v tahu ohybem – čtyřbodová, bez zářezu – 0 kg/m ³	105
Tabulka 50. – Pevnost v tahu ohybem – čtyřbodová, bez zářezu – 25 kg/m ³	105
Tabulka 51. – Pevnost v tahu ohybem – čtyřbodová, bez zářezu – 50 kg/m ³	106
Tabulka 52. – Pevnost v tahu ohybem – čtyřbodová, bez zářezu – 75 kg/m ³	106
Tabulka 53. – Pevnost v tahu ohybem – čtyřbodová, bez zářezu.....	107
Tabulka 54. – Stanovení kapacity absorbované energie drátkobetonových desek 25 kg/m ³ .	108
Tabulka 55. – Stanovení kapacity absorbované energie drátkobetonových desek 50 kg/m ³ .	109
Tabulka 56. – Stanovení kapacity absorbované energie drátkobetonových desek 75 kg/m ³ .	109
Tabulka 57. – Stanovení kapacity absorbované energie drátkobetonových desek.....	110

ÚVOD

Téma diplomové práce je zaměřeno na experimentální analýzu samozhutnitelných drátkobetonů (SFRSCC). Zadáni práce řeší složení čerstvého zbytkového samozhutnitelného betonu a drátkobetonu, vzniklého pomocí přidané rozptýlené výztuže, ocelové drátky v různém množství. Ohled je brán především na reologické vlastnosti čerstvého a ztvrdlého betonu. Diplomová práce je rozdělena podle zadání do dvou částí – teoretická a experimentální.

První teoretická část se dále dělí do čtyř celků **kompozitní materiály, samozhutnitelný beton (SCC), vláknobeton (FRC) a samozhutnitelný vláknobeton (FRSCC)**. Tématika kompozitních materiálů je zaměřena na nejpoužívanější stavební materiál – beton. Téma zahrnuje druhy kompozitních materiálů, jejich vlastnosti, uspořádání struktur, jejich kombinování a vzájemnou kompatibilitu. Teoretická část se věnuje samozhutnitelným betonům jejich vlastnostem a složení. Obdobně je zpracováno i další téma vláknobetonů, kde jsou řešeny druhy vláken, vlastnosti vláknobetonů a jejich složení. V závěru první části se rozebírají vlastnosti, složení a experimentální zkoušky FRSCC, které bylo možné provádět.

Na počátku druhé experimentální části je **optimalizace složení čerstvého SFRSCC**. Poté se práce dělí na další čtyři celky tedy na **zkoušky čerstvého betonu** (dle SCC), **zkoušky ztvrdlého betonu** (dle FRC), **zkoušení dle nových metodik a stanovení kapacity absorbované energie drátkobetonových desek** (podle normy na zkoušení stříkaných betonů).

Zkoušky čerstvého betonu sloužily v první fázi především pro optimalizaci složení s ohledem na **zpracovatelnost a nakypření v návaznosti na množství přidané rozptýlené výztuže**. Následně po zatvrdnutí byly vyhodnoceny pevnostní a přetvárné vlastnosti. Tedy na optimalizaci vzhledem k minimálnímu množství vláken a výslednou zbytkovou pevnost. Dále v rámci optimalizace byla hodnocena **pevnost v prostém tlaku** dle daných objemových podílů rozptýlené drátkové výztuže (popř. statický modul pružnosti a odolnost proti výbuchu).

V další fázi výroby zkoušky čerstvého samozhutnitelného betonu sloužily pro ověření kvality výroby a ověření zpracovatelnosti při stanoveném objemu ocelové rozptýlené výztuže. Další zkoušky byly zaměřeny na **pevnosti v tahu za ohybu**. Především **čtyřbodový bez místa oslabení** pro stanovení reziduálních pevností při dostředném tahu a pevnosti v tahu za ohybu při vzniku trhliny. Dále pak byly zkoušeny trámky se **čtyřbodovým uspořádáním a kruhovým otvorem** dle nové metodiky ČVUT FSv pro srovnání se zkouškami vláknobetonů.

Na závěr byly zkoušeny **vláknobetonové desky na stanovení kapacity absorbované energie**. A byly stanoveny přetvárné charakteristiky při zkouškách vláknobetonu v osovém tahu na tělesech tvaru „dog bone“ dle metodiky ČVUT FSv (externě prováděl Dr. Suchánek).

Tato diplomová práce byla realizována s využitím technologií Výukového a výzkumného centra v dopravě v Doubravících, Betonárny CEMEX v Pardubicích – Semtíně a Výrobny prefabrikátů PREFA Nový Bydžov (M – SILNICE a.s.).

Práce byla zpracována v souvislosti s řešením vědeckovýzkumného projektu Univerzity Pardubice č. SGS_2019_010, SGS_2020_009, SGS_2021_010.

CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Prvním z cílů je shrnutí současného stavu poznání v tématice výroby kompozitních materiálů se zaměřením na stavební materiály, především na samozhutnitelný vláknobeton.

Cílem je návrh makrogranulárního systému vyztuženému vláknovou výztuží s cementovou matricí s ohledem na zachování pozitivních vlastností zpracovatelnosti v čerstvém stavu.

Diplomová práce se tedy věnuje **optimalizaci složení čerstvého SCC** s přídavkem rozptýlené vláknové výztuže (ocelové drátky) s ohledem na výsledné reologické vlastnosti.

Optimalizace spočívá ve stanovení délky vláken a dostatečnému obsahu cementového tmelu, tak aby došlo k obalení jejich povrchu společně s limitovaným objemem kameniva.

Cílem je zachování tekutosti čerstvého betonu i po přidání vláknové výztuže. Zachování malé mezerovitosti a nízkého vodního součinitele tím dosáhnout odolnosti proti segregaci.

Dalším cílem práce je **zkoušení vláken a stanovení minimálního množství vláken v drátkobetonu**. Tak aby byl zachován charakter samozhutnitelného betonu s ohledem na mezerovitost, zpracovatelnost a na nakypření čerstvého betonu. Nebo při vyšších objemových podílech rozptýlené výztuže tvorbu nežádoucích shluků či sedimentaci kovových drátků.

Jedním z cílů je pro samozhutnitelný beton a drátkobeton **stanovit pevnosti v prostém tlaku a statický modul pružnosti** (není součástí zadání, externě prováděl Dr. Vladimír Suchánek).

Dalšími cíli práce jsou pro optimalizované navržené složení betonu **ověření zpracovatelnosti** a charakteristik čerstvého betonu a zjištění dalších charakteristik zatvrdlého betonu. Především jde o **pevnosti v tahu za ohybu** (při vzniku trhliny a reziduálních) na trámcích bez singularit. Pro porovnání s novou návrhovou metodikou ČVUT FSv (sílu při porušení a pevnost v osovém tahu), kde jsou trámkové opatřeny kruhovým otvorem. Principem nové metodiky je dosažení rovnoměrného rozložení napjatosti ve spodní tažené oblasti tedy čistý osový tah.

Jedním z posledních cílů je zkoušení čtvercových drátkobetonových desek uložených po obvodě a zatěžovaných ve středu pro **stanovení kapacity absorbované energie** nebo pro zjištění dalších pevnostních a přetvárných charakteristik drátkobetonových desek.

Dalším cílem bylo porovnání porušování drátkobetonů při provádění různých druhů zkoušek. Při porovnávání zkoušek je zásadní především **vliv procenta vyztužení na výsledné pevnostní a přetvárné charakteristiky samozhutnitelného drátkobetonu** (diagramy odolnosti).

Posledním cílem je **stanovení osových tahových pevností** a zjištění přetvárných charakteristik drátkobetonu při zatížení tahem na tvarově optimalizovaných trámcích (pouze výroba zkušebních těles jinak není součástí zadání, stanoveno externě Dr. Vladimír Suchánek).

TEORETICKÁ ČÁST

1. KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

Kompozitní materiály nebo také kompozity jsou charakteristické tím že se skládají alespoň ze dvou fází (jedna z fází musí být pevná), které mají odlišné fyzikální a chemické složení. Přičemž výsledný kompozitní systém je tvořen mezifázovými rozhraními a jednotlivými fázemi. Lze vytvořit mnohokompozitní materiály, které mají i značně odlišné vlastnosti než jejich základní složky. Obecně lze každý dnes užívaný průmyslový materiál uvažovat jako kompozitní vzhledem k jejich různé výrobě, vlastnostem, strukturám a složení. Většina kompozitních materiálů vykazuje anizotropní chování vzhledem k složení nejméně ze dvou fází a jejich zpracováním během výrobního procesu. Využívání kompozitních materiálů má dlouhou tradici, jelikož vlastnosti kompozit jsou daleko lepší než vlastnosti základních materiálů. Navíc lze vytvořit kompozitní materiály pro přesně daný účel v konstrukci, kdy lze definovat strukturu a výsledné vlastnosti. Kompozitní materiály jsou vhodné především pro jejich tvarovou a strukturální variabilitu, únavovou životnost, kontrolu rozvoje trhlin, zmenšení hmotnosti konstrukce možnost rychlých oprav a podobně [1].

1.1. Historie

Historicky první byly materiály, které vznikaly přirozeně při geologických procesech při vzniku sluneční soustavy a planety země. Další materiály pak vznikaly v souvislosti s organickými, živočišnými procesy a evolucí života. Kompozity vznikaly díky přirozenému přírodnímu výběru a na základě náhodného rozložení, kdy hybatelem procesů bylo měnící se prostředí a hledání optimálního složení, rozměrů a rovnováhy s prostředím.

Počátky lidské výroby materiálů spadají již do starověku a souvisí s potřebou vytvářet nástroje, umělé předměty a objekty. Na počátku byly využívány přírodní rostlinné, živočišné a anorganické materiály, které se využívaly na výrobu nástrojů například nádoby, sekyrky a luky a pro stavby obydlí. Principem bylo hledání vhodných materiálů tak aby bylo zajištěno kompozitní spolupůsobení tím i jejich funkčnost a trvanlivost. Ale vzhledem k omezenosti a kvalitě zdrojů materiálů, byly objeveny procesy jejich zpracování, ošetřování a kombinování. Tak aby nově vytvořené materiály dosahovaly lepších vlastností oproti materiálům základním. Navíc v průběhu tisíciletí byly objevovány jednotlivé kovy, způsoby jejich výroby a ošetřování.

Ve stavitelství byl dán vývoj staveb mohyl z kamenů a obydlí z materiálů jako hlína, jíl a rostlinných materiálů. Až k výrobě nepálených cihel s obsahem slámy (či jiných rostlinných vláken), pálených cihel a s tím souvisejícím vývojem různých druhů pojivových malt a betonů.

V průmyslové době bylo již dost znalostí pro opakovatelnou výrobu materiálů s charakteristickými vlastnostmi. Bylo to dáno především rozvojem ve všech oblastech výroby od těžby surovin přes jejich zpracování a výrobu nových průmyslových materiálů [1].

Znalosti byly aplikovány do základních oborů jako fyzika, chemie a mechanika apod. Tím byl dán základ nových vědních disciplín jako je metalurgie, biochemie, elektronika, aplikovaná chemie, astrofyzika aj. Později vznikla i nová moderní disciplína materiálová věda o kompozitech. Tento obor zahrnuje různé materiálové technologie jako je keramika, metalurgie, technologie polymerů a skla, organickou a anorganickou chemii, a především mezioborové přesahy chemie, fyzika, elektronika, mechanika, dynamika aj.

Ve stavitelství byl také největší rozvoj v posledním století souvisel s rozvojem vědy, průmyslu a ve všech oblastech výroby. Především díky betonu vyztuženému ocelí, předpjatému betonu, asfaltobetonu, lehčených betonů, samozhutnitelných betonů, vláknobetonů a s tím souvisejícími výrobky z polymerů, plastů vyztužených vlákny (tvrzené, vylehčované apod.).

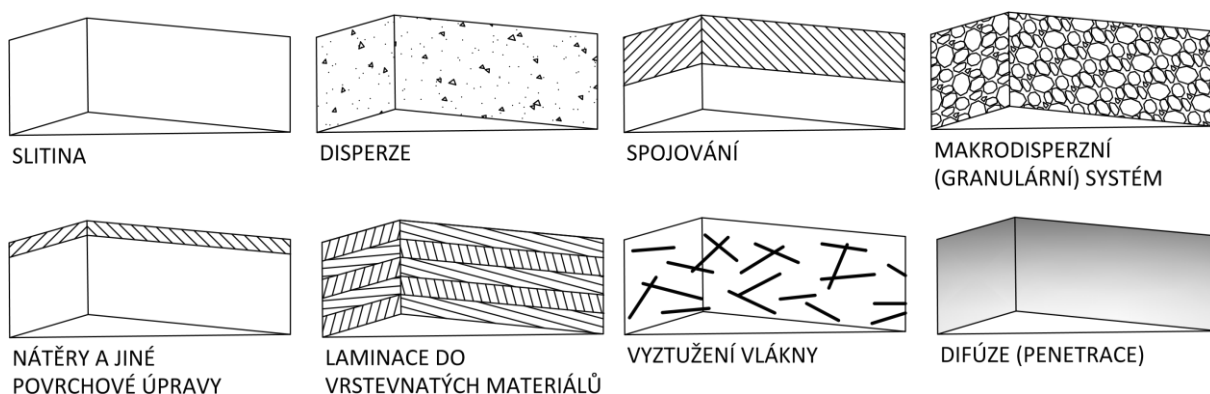
1.2. Základní druhy

V obecném smyslu lze každý materiál nazvat kompozitním vždy jde jen o úhel pohledu atomové, molekulární a makromolekulární měřítko. Ale vždy lze zkoumat prostorové uspořádání a typ struktury. Navíc čisté krystalické či amorfnní látky se v přírodě téměř nevyskytují. Materiály se obecně rozdělují na jednoduché tedy **homogenní** a složené nebo také **heterogenní** (kompozitní). Obecně se kompozity rozdělují dle technologie výroby na **tradiční** (slitina, nátěry a úpravy povrchů, disperzní systémy a laminace tedy vrstevnaté systémy) a **novodobé** (spojování, vyztužování vlákny, granulární systémy, difúze neboli penetrace či hybridní systémy). Dle **materiálu matrice** lze kompozity rozdělit na polymerní, kovové, keramické a jiné anorganické případně jejich vzájemné kombinace. Nebo podle **struktury vložené fáze** rozeznáváme částicové, vláknové a dispergované kompozity. Další rozdělení je podle **typu dispergované fáze**, kdy jsou rozděleny do tří skupin: kompozity I. druhu (pevná fáze), kompozity II. druhu (kapalná fáze), kompozity III. druhu (plynná fáze) [1].

Dále lze kompozity popisovat z mechanického hlediska v závislosti na množství, vlastnostech a složení matrice a vkládaných plniv. Navíc jsou popisovány i výsledné reologické vlastnosti kompozitu, které jsou mnohdy závislé na technologii, procesu a kvalitě výroby. A v mnohých případech jsou přidávána i další aditiva zlepšující zpracovatelnost nebo výsledné vlastnosti jde například o stabilizátory, urychlovače, lubrikanty, UV pohlčovače a obdobně. V těchto případech je klasifikace velmi obtížná vzhledem ke složitým procesům vyplívající

z výrobního procesu. Výsledné vlastnosti jsou také různorodé závislé na použitých materiálech a jejich vzájemném spojení a spolupůsobení tedy na vzájemné kompatibilitě [1, 2].

Z výsledných vlastností kompozitních materiálů je zřejmé, že kompozitní materiály jsou skládány tak, aby jejich pozitivní vlastnosti byly posíleny a negativní vlastnosti, aby se vzájemně vyrušily, pokud lze. Výsledný kompozitní materiál může převzít i negativní vlastnosti, nebo získá špatné vlastnosti při vzájemném kombinování a spojování materiálů. Optimální je sestavení do **synergického systému**, kdy jsou vzájemné disipace energií spolehlivě transportovány a eliminovány nebo absorbovány v různých fázích materiálu nebo ve strukturách jejich mezifázového rozhraní, přičemž mohou navíc způsobit i zlepšení daných vlastností. Synergickým účinkem mohou být posíleny i pouze vybrané pozitivní vlastnosti (dle způsobu následného využití), ale stejně tak mohou být posíleny i negativní účinky synergie (např. pevnost – křehkost). Účinnost systému je dána především uspořádáním struktur a fyzikálními, chemickými a fyzikálně chemickými interakcemi mezi nimi. I při vkládání materiálů s lineárními chováním jsou vlastnosti výsledného kompozitního materiálu značně nelineární, proto je i popis mechanických vlastností velmi obtížný [1].



Obrázek 1. – Rozdělení kompozitních materiálů tradiční vlevo a novodobé napravo [1]

2. SAMOZHUTNITELNÝ BETON

Vývoj samozhutnitelného betonu (Self-Compacting Concrete SCC) souvisí s potřebou výstavby konstrukcí, které se při výstavbě nedaly hutnit nebo pouze omezeně či velmi obtížně. Jde především o konstrukce zhotovené pod vodní hladinou, hustě vyztužené konstrukce, velkopřůměrové piloty, složité konstrukce, hlubinné a opěrné zdi (např. milánské zdi). Díky SCC odpadají problémy související se kvalitou zpracování betonu, které při klasickém hutnění ponornými nebo příložnými vibrátory závisely na pracovnících provádějící hutnění.

Navíc došlo ke zrychlení vlastní výstavby díky odpadajícímu technologickému procesu hutnění a byla zlepšena zpracovatelnost, mrazuvzdornost, trvanlivost konstrukcí, a navíc SCC lze použít jako pohledový beton. Při výrobě prefabrikátů se při použití SCC prodloužila životnost výrobních forem. Snahy o vytvoření betonu s optimálními reologickými vlastnostmi čerstvého betonu byly již od vlastního objevení technologie betonu. Úspěšné vytvoření samozhutnitelného betonu souvisí s vlastním rozvojem vědy a technologií současného průmyslového věku [3, 4].

První snahy o vytvoření technologie samozhutnitelného betonu byly během 60. let 20. století díky vynalezení plastifikačních přísad, které ovlivňují tekutost a množství potřebné přidávané vody do čerstvého betonu.

První beton, který lze nazývat samozhutnitelným byl vytvořen na akademické půdě Tokijské univerzity v 80. letech 20. století. Výzkumným týmem profesora H. Okamury, který zkoumal kvalitu betonových staveb, přičemž objevil vady způsobené nedostatečným hutněním. Snahy o odstranění nutnosti hutnění vedly výzkumný tým k vývoji technologie SCC.

V průběhu let bylo vyvinuto mnoho plastifikačních přísad a další druhy stavební chemie, což vedlo k vývoji mnoha receptur SCC, které se staly chráněným tajemstvím jednotlivých výrobců betonu.

2.1. Vlastnosti

K přednostem samozhutnitelného betonu patří především jeho reologické vlastnosti čerstvého betonu, jelikož reologické vlastnosti ztvrdlého betonu jsou obdobné jako u běžných používaných betonů. Hlavní výhodou SCC je tedy jeho **zpracovatelnost**. Charakteristické vlastnosti samozhutnitelných betonů jsou **vysoká tekutost** (schopnost vyplňovat bednění a kvalita povrchu), **propustnost** (nízké blokování – schopnost protéct skrz výztužné pruty bez rozmísení složek) a **odolnost proti segregaci** (odolnost proti rozplavování, stálá homogenní struktura čerstvého betonu při dopravě a ukládání). Segregace je ovlivněna křivkou zrnitosti (optimálně plynulá) a poměrem obsahu vody a cementu (nízký vodní součinitel), nebo obsahem cementového tmele či plastifikátory. Další souvisejícími reologickými vlastnostmi ztvrdlého betonu jsou mrazuvzdornost a vyšší pevnost než běžných betonů, které jsou způsobeny kvalitou povrchu a homogenní strukturou [3, 4]

Dalšími vlastnostmi jsou například **rychlost tečení** a chování při tečení (tixotropie), **čerpateľnost** (chování pod tlakem), **pohledovost** (po odbednění finální úprava povrchu), **samonivelační vlastnosti** (lité podlahy), negativní vlastnosti **krvácení betonu** (sedimentace oddělování pevné fáze od kapalné), **smršťování** (autogenní – samovysycháním je větší

než u běžných betonů díky nízkému vodním součiniteli a závislé na relativní humiditě prostředí) a dotvarování (je obdobné jako u běžných betonů).

Po zatvrdnutí SCC jsou výsledné pevnostní vlastnosti obdobné jako u klasických betonů a jsou úzce závislé na navržené receptuře, použitém druhu a objemovém podílu kameniv [3, 4, 5].

2.2. Složení

Složení samozhutnitelných betonů se příliš neliší od běžných betonů pouze v obsahu jednotlivých fázových složek a nízkém vodním součiniteli. Rozdíl je tedy v obsahu jemných částic (mletý vápenec (křemičitý úlet), či mleté vysokopecní strusky nebo popílký ze spalování apod.) a stavební chemie (plastifikátory aj.), které zajišťují optimální tixotropní vlastnosti při zpracování betonu. Množství těchto příměsí je závislé na množství a druhu použitého cementu, nebo také na druhu a granulometrii použitého kameniva.

Křivka zrnitosti by měla **optimálně plynulá** vzhledem k požadované výsledné zpracovatelnosti a náhodnému rozložení dispergované fáze uvnitř makogranulárního kompozitu. **Kamenivo** použité do SCC má funkci plniva, které **tvoří až 80 % objemu**, vytváří skelet s minimální mezerovitostí. **Maximální velikost** zrn kameniva vhodného do samozhutnitelných betonů je **22 a 16 mm**, ale lze navrhnout i receptury založené na $D_{max} = 8$ mm (neekonomické, větší specifický měrný povrch kameniva) [3, 4]. U kameniva je dále důležité určit obsah jemných částic (prach, jíl a organika), které vstupují do receptury, jelikož negativně ovlivňují odolnost proti segregaci a hydratační reakci.

Cement je hydraulické anorganické pojivo, tvoří multifázový materiál, který po přeměně na cementový kámen vytvoří křehkou matici granulárního systému. Cementy vhodné pro SCC odpovídají normě ČSN EN 197-1 [6]. **Množství cementu na 1 m³** by se mělo pohybovat **v rozmezí 350–500 kg**. Typ cementu ovlivní především charakteristiky vývoje hydratačního tepla a velikost smršťování.

Dalšími složkami samozhutnitelných betonů jsou **příměsí jemnozrnných částic**, která pomáhají odolnosti proti segregaci nebo rozplavování. Negativně však svým specifickým měrným povrchem ovlivňují množství záměsové vody a množství potřebného cementu, tak aby došlo k dokonalému obalení zrn kameniva. Příměsí se obecně dělí do dvou typů typ I jsou inertní (např. mletý vápenec, křemičitý úlet, pigmenty apod.) a typ II jsou pucolánové a latentně hydraulicky aktivní látky (popílek, mikrosilika, mletá vysokopecní struska aj.).

Voda, která se přidává do betonu odpovídá normě ČSN EN 1008 [7]. Sledován je především obsah chloridů, který negativně ovlivňuje výsledné vlastnosti betonu. **Vodní součinitel (w)** se u samozhutnitelných betonů pohybuje v rozsahu **od 0,35 do 0,6**.

Vodní součinitel lze snížit pomocí stavební chemie (plastifikátory případně superplastifikátory). Dalšími složkami SCC jsou přísady, které se přidávají pro zlepšení určitých specifických vlastností. Přísady se dělí na plastifikační (vodu redukující), superplastifikační (silně vodu redukující, mění povrchové napětí na zrnech cementu), stabilizační (zadržující vodu), provzdušňující (zadržení vzduchu v kulových pórech), urychlovače tvrdnutí cementu, zpomalovače tuhnutí a hydrofobizační (vodu odpuzující). Přísady do samozhutnitelného betonu odpovídají normě ČSN EN 934-2+A1 [8].

Všechny složky samozhutnitelného betonu musí odpovídat požadavkům jednotlivých norem (kamenivo, cement, příměsi, voda apod.) a beton musí být ve shodě s ČSN EN 206 + A1 [9].



Obrázek 2. – Samozhutnitelný beton odběr na pravé straně zkušební tělesa na levé straně

3. VLÁKNOBETON

Vláknobetony nebo také vlákny vyztužené betony (Fiber Reinforced Concrete FRC) jsou charakteristické přidávkou rozptýlené výztuže ve formě vláken. Vlákna se přidávají za účelem odstranění malých tahových pevností betonů, zvýšení odolnosti proti rázům a zlepšení charakteristik při smršťování, dotvarování či vlastním porušování materiálu.

FRC jsou kompozitní systémy založené na makrogranulárním systému s cementovou maticí, který je dále vyztužen rozptýlenou výztuží ve formě vláken. Vlákna přidávaná do betonů mohou být mnoha druhů **kovová** (SFRC), **skleněná** (GFRC), **uhlíková** (CFRC), **aramidová** (AFRC), **čedičová** (BFRC), **polymerová** nebo z jiných **organických** či **anorganických materiálů** [2]. Vláknobetony jsou vhodné především pro skořepinové konstrukce, pro extrémně zatěžované konstrukce (tunelová ostění, dopravní plochy), kde by při použití klasického železobetonu musela být konstrukce větší a masivnější.

Princip spojování křehké anorganické matrice s pružnými vlákny byl historicky známý již z výroby keramiky nebo ve stavitelství z výroby nepálených cihel s obsahem rostlinných

vláken. Ve stavitelství se principy spojení křehkého betonu a krátkovláknitých rozptýlených výztuží uplatňují od počátku 20. století. Jejich rozvoj byl největší v 60. a 90. letech a úzce souvisel s rozvojem průmyslu a výroby drátků, vláken a stavební chemie.

Obecně lze říct, že výsledné mechanické vlastnosti betonů s obsahem vláken jsou lepší ve srovnání s běžnými betony, ale vše je závislé na vzájemné kompatibilitě materiálů a objemových podílech jednotlivých složek.

3.1. Vlastnosti

Vlastnosti vláknobetonu lze rozdělit na vlastnosti čerstvého a ztvrdlého betonu. Požadavky na vlastnosti pro čerstvý beton vyplívají z jeho zpracovatelnosti a technologických požadavků při zpracování. Při klasickém zpracování se sledují především **tvorba shluků (ježků), rovnoměrnost rozptýlení vláken, nakypření, obsah vzduchu, čerpatelnost, postup zpracování, doba při zpracování** nebo například **prostupnost mezi ocelovými pruty**. Nebo se vláknobeton zpracovává technologií stříkaného betonu suchým nebo mokřým způsobem což klade další požadavky na čerstvý beton například jako **rovnoměrný materiálový tok k trysce** nebo směšovači bez shluků [10, 11].

Při zkouškách ztvrdlého betonu se provádí obvyklé zkoušky betonu a zkoušky modifikované v souvislosti s délkou rozptýlené vláknové výztuže. Zkoušky se modifikují způsobem ztěžování, geometrickými parametry nebo vkládáním oslabených míst (singularit). **Vlastnosti FRC jsou závislé na typu vláken** a jejich povrchová úprava má velký vliv na výsledné reologické vlastnosti zatvrdlého betonu. Materiály vkládané do cementové matrice by měly ideálně mít podobné vlastnosti vzhledem k trvanlivosti, objemovým změnám a povrchovým napětím. Tak aby po zatvrdnutí byly dokonale obalené cementovým kamenem a objemové změny v průběhu hydratace nezpůsobily příliš mikrotrhlin uvnitř křehké matrice. Při špatné smáčivosti vláken nebo jejich velkém objemovém podílu uvnitř matrice mohou vlákna působit jako místa oslabení (šíření trhlin napříč kompozitem). Vlákna jsou obecně považována za plochy nespojitosti což je dáno procesy během hydratace na rozhraních vláken a cementového tmelu. Na těchto rozhraních se usazují málo nasycené vrstvy tmelu, nežádoucí produkty hydratace a vzduchové nebo vodní póry. Nicméně v průběhu vysychání tmelu jsou vlákna schopná přenášet vznikající napětí od autogenního smršťování. **Vlákna tedy kladně ovlivňují průběh a velikost smršťování a dotvarování** [10, 12].

Vláknobetony jsou od běžných betonů odlišné především chováním při zatěžování. Běžné betony se vyznačují porušením křehkým lomem, ale FRC vykazují **pseudotvárné chování při zatěžování. Vlákna uvnitř kompozitu jsou schopná přenášet a absorbovat**

lokální tahová napětí (vzhledem k jejich vysoké tahové pevnosti), ale **nebrání šíření trhlin** napříč matricí. V průběhu zatěžování je aktivováno a tahem přetvářeno více vláken může docházet jejich vytahování až k přetržení vláken podle typu a objemu (pseudotvárné chování). Pevnost v prostém tlaku se přidáním vláken do betonu výrazně nezvýší, ale **zvýší se pevnost v tahu** za ohybu a po dosažení meze pevnosti se zlepší i chování FRC oproti klasickým betonům. Vláknobeton jsou charakteristické svým porušováním a po dosažení meze pevnosti zbytkovou pevností (reziduální). Odkazy na další laboratorní výsledky a stručný popis dosažených výsledků prováděných výzkumů jsou uvedeny v závěru práce [13, 14, 15, 16].

3.2. Složení

Složení FRC se určuje obdobně jako u běžných betonů odlišnosti ve stanovení receptury jsou dána především specifickým povrchem rozptýlené vláknové výztuže. Dále vlákna dle tvaru, typu a délky mohou způsobit nakypření betonu během mísení. Pak je nutné optimalizovat složení objemových podílů jednotlivých frakcí, cementu, příměsí a přísad, tak aby nakypření bylo minimální a **vlákna byla rovnoměrně rozložena v celém objemu**. V rámci optimalizace je nutné stanovit vlastní technologický postup výroby a doby jednotlivých fází technologického postupu, tak aby byla zajištěna co nejvyšší kvalita výroby. Technologické postupy se výrazně liší dle typu použitých vláken. Například **skleněná nebo polymerová vlákna se přidávají do suchých složek během míchání a kovová vlákna je lepší přidávat až po přidání vody** [2].

Složení vláknobetonů je tedy shodné s klasickými betony liší se pouze v obsahu vláken a použité stavební chemii. Kamenivo přidávané do FRC musí odpovídat druhu, množství vláken a jejich chování při směšování (křehké, tuhé a pružné). Například **větší množství dlouhých tuhých vláken eliminuje podíly hrubých frakcí kameniva**, ale chybějící podíly hrubé frakce snižují pevnost skeletu a zvyšují podíly drobných frakcí, cementu a příměsí. **Vhodné je především drcené kamenivo, které je ostrohranné, jelikož zvyšuje výsledné pevnosti vláknobetonů (drátkobetonů)**.

Cement, který se přidává do betonů odpovídá ČSN EN 197-1 [6]. Množství přidávaného **cementu má být vyšší než 240 kg/m³** z důvodu vlastní trvanlivosti betonu. Voda, která je vhodná pro výrobu betonu odpovídá normě ČSN EN 1008 [7]. Přičemž **vodní součinitel** se obvykle pohybuje **v rozmezí 0,4 – 0,5 pro ocelová vlákna**. Jinak je závislý na druhu použitých vláken má zajistit rovnoměrné rozptýlení vláken.

Příměsí se přidávají pro zlepšení reologických vlastností čerstvého nebo ztvrdlého betonu například nakypření, zpracovatelnost, barva apod. Pro změnu dalších vlastností se používají přísady do betonu odpovídající ČSN EN 934-2+A1 [8]. Do FRC lze přidávat mnoho

přísad měnících smáčivost betonu podle použité rozptýlené výztuže, plastifikační, stabilizační, provzdušňující, urychlovače, zpomalovače a jiné. Přísady jsou nezbytné při technologii stříkaného betonu, kde výrazně ovlivňují zpracovatelnost a materiálový tok k trysce.

Vlákna (drátky) jsou většinou specifikována svým tvarem, délkou a tahovými vlastnostmi. Nejdůležitější je zajistit vzájemné spolupůsobení povrchovou úpravou nebo mechanicky. **Množství přidávaných vláken se liší podle jejich typu** vzhledem k specifické objemové hmotnosti. U ocelových vláken je doporučeno **množství drátků v rozsahu od 20 do 100 kg/m³** přidávaných do drátkobetonu [10, 11].

4. SAMOZHUTNITELNÝ VLÁKNOBETON

Dalším vývojem v technologii samozhutnitelných betonů bylo vkládání rozptýlené výztuže do makrogranulárního systému s cementovou maticí, při zachování charakteru SCC. Vývoj úzce souvisel s vývojem stavební chemie, která upravuje povrchová napětí (smáčivost), chemickou kompatibilitu (odolnost proti korozi) či vlastní zpracovatelnost. Spojením SCC s vlákny vyztuženými betony vzniká mnohokompozitní materiál samozhutnitelný vláknobeton neboli Fiber Reinforced Self-Compacting Concrete (FRSCC).

Pro vyztužování samozhutnitelného betonu lze využít vlákna jednoho druhu, kdy je hledáno optimálního složení betonu (objemové podíly složek, stavební chemie, druh a délka vláken). Nebo se používají kombinace více druhů vláken, při němž lze použít vlákna jednoho druhu s odlišnými délkami velké obdobně jako frakce kameniva (hrubé a jemné). Případně se užívají kombinace více typů vláken (kovová, skleněná, polypropylénová apod.). Při použití více druhů vláken vznikají mnohokompozitní systémy se značně pseudotvárným chováním při zatěžování. Návrh receptury FRSCC je značně složitější liší se především ve stanovení zrnitosti, objemových podílů kameniva, typu a množství přísad a vláken [12].

Využití samozhutnitelného drátkobetonu (vláknobetonu) ve stavební praxi je vhodné například u podzemních staveb jako dočasná ostění či jako plnohodnotnou náhradu za železobetonová ostění. Vhodná jsou především z ekonomického hlediska (zkrácení technologických procesů při přípravě armatur a nástřiku betonové vrstvy. FRSCC lze použít jako stříkaný beton díky rovnoměrnému materiálovému toku k trysce nebo směšovači nebo také jako litý beton díky jeho „homogenitě“. Samozhutnitelný vláknobeton (drátkobeton) lze využít ve formě stříkaného betonu také při zesilování původních klenebních systémů. Dále jsou vhodné pro extrémně zatěžované konstrukce (dopravní plochy, letištní plochy, lité podlahy průmyslových hal), které nemusí být tak masivní vzhledem k velké odolnosti FRSCC (menší množství použitého betonu). Další využití je na subtilnější konstrukce či skořepinové

konstrukce nebo pro konstrukce, které nelze hutnit nebo pouze částečně případně složitě. Samozhutnitelný drátkobeton lze využít do kriticky namáhaných míst (střih, tah) železobetonové konstrukce (obvykle silně vyztužené železovými výztužemi) pro další dodatečné vyztužení konstrukce, omezení rozvoje a šíření trhlin. Navíc lze kombinovat různé typy vláken a tím dosáhnout vytvoření hybridních materiálů s pseudotvárným chováním během zatěžování (během životnosti konstrukce).

Vhodný je také pro konstrukce stavěné pod vodní hladinou vzhledem k odolnosti proti rozplavování a po zatvrdnutí k vysoké odolnosti povrchu. Díky své odolnosti a schopnosti dokonale vyplňovat bednění ho lze využít pro tvarově složitě konstrukce a betonové prvky. Využít lze SFRSCC jako pohledový beton u betonových konstrukcí nebo v brutalistní architektuře bez nutnosti dalších úprav povrchů.

Je také vhodný při výrobě betonových prefabrikátů, které se nemusejí dále vyztužovat ani hutnit při jejich výrobě dochází ke zkrácení technologických a výrobních procesů. Dále při výrobě tenkostěnných prefabrikátů nebo při výrobě sendvičových konstrukcí lze využít zvýšené odolnosti SFRSCC díky usměrnění vláken v tenké vrstvě betonu (tenké vzhledem k délce drátků). Další velkou výhodou je rychlost betonáže bez průběžného hutnění a samonivelační vlastnosti, kdy se po vylití provádí pouze finální úprava volného povrchu. Další využití samozhutnitelného drátkobetonu souvisí s jeho vysokou odolností proti rázovému zatížení a s jeho odolností proti výbuchu. Využívá se při dodatečném zesilování sloupů v prostorách metra či na prefabrikované veřejné odpadkové koše odolné proti výbuch (po teroristických útocích v Londýnském či Moskevském metru a Bostnu).

Ve výrobě **samozhutnitelného betonu jsou převládající výrobci** CEMEX, Breedon Group, Sika AG, Tarmac Trading, Unibeton Ready Mix, BASF and LafargeHolcim

Na trhu s ocelovými vlákny jsou **dominantními výrobci drátků** Bekaert, Kosteel Co. Ltd., ArcelorMittal, Hanson, Fibrometals, Nippon Seisen, Sunshine Steel Fiber, R. STAT, Onward Chemicals Pvt. Ltd., Green Steel Group, Zhejiang Boean Metal Products, and Yuthian Zhitai Steel Fiber Manufacturing

Další statistiky rozdělení produkce a vývoje využívání samozhutnitelného betonu a drátkobetonu jsou uvedeny v závěru práce (viz příloha D.).

4.1. Vlastnosti

Samozhutnitelný vláknobeton má optimální vlastnosti vzhledem k reologickým vlastnostem čerstvého betonu a zlepšené vlastnosti zatvrdlého betonu. V čerstvém stavu jde především o **homogenní strukturu**, jeho **snadnou zpracovatelnost**, **tixotropní vlastnosti**,

samonivelační vlastnosti a univerzálnost při jeho použití vyplývající z jeho složení (**odolnost proti rozměšování či sedimentaci, schopnost dokonale vyplňovat bednění**). Přičemž tekutost a odolnost proti segregaci čerstvého betonu se zajišťuje pomocí superplastifikátoru, **limitovaným objemem kameniva a nízkým vodním součinitelem**.

Dobře navržený makrogranulární systém s cementovou maticí, který byl dále vyztužený vlákny založený na receptuře SCC by měl převzít pozitivní vlastnosti zpracovatelnosti a charakter porušování po zatvrdnutí betonu. Tedy FRSCC by v čerstvém stavu měl mít charakteristiky samozhutnitelného betonu – SCC (viz kap. 2.1.) a v zatvrdlém stavu charakter vláknobetonu – FRC (viz kap. 3.1.).

V zatvrdlém stavu dochází ke zlepšení vlastností zatvrdlého FRSCC díky přidaným vláknům a charakteru samozhutnitelného betonu (**pohledovost povrchu a mrazuvzdornost**). Dále **vlákny lze odstranit lokální tahová napětí vznikající v důsledku autogenního smršťování**, která jsou u SCC větší díky nízkému vodnímu součiniteli a obsahu jemných podílů (silnější kapilární síly). Dále také **zvyšují odolnost proti požáru a rázovému zatížení, jsou schopná přenášet tahová napětí od zatížení, snižují vliv dotvarování, zvyšují nepropustnost betonu a prodlužují vlastní trvanlivost konstrukce** [12]. Pevnost v prostém tlaku se pomocí vláken příliš nezvýší spíše mírně sníží a pevnost v tahu za ohybu se přidáním vláken mírně zvýší. Vše v závislosti na druhu a množství použitých vláken. Po dosažení meze pevnosti tahu za ohybu dochází **při dalším zatěžování k pseudotvárnému chování**, které je závislé na druhu a množství vláken. **Vlákna naopak zhoršují reologické vlastnosti SCC, prodlužují dobu přípravy čerstvého betonu a zhoršují čerpatelnost. U dlouhých vláken se navíc zhoršuje prostupnost mezi ocelovými pruty**. Odkazy na další laboratorní výsledky a stručný popis dosažených výsledků výzkumů jsou uvedeny v závěru práce [17, 18, 19].

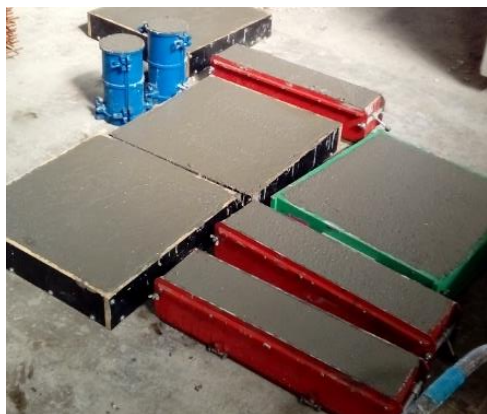
4.2. Složení

Od běžných betonů se FRSCC se liší především **plynulou křivkou zrnitosti, v obsahu jemnozrnných částic, v obsahu rozptýlené vláknové výztuže, použité stavební chemii a nízkém vodním součiniteli**. Složení samozhutnitelných vláknobetonů je dáno především požadovanou zpracovatelností čerstvého betonu. Vychází se tedy z receptury SCC, kterou je nutné dále upravit, tak aby po přidání vláken nedocházelo k nakypření při míchání čerstvého betonu a výraznému negativnímu ovlivnění tixotropních vlastností. Zajisti se musí především dokonalé obalení vláken a zrn cementovým tmelem [12]. Dále je důležitá **homogenní struktura FRSCC v čerstvém i zatvrdlém stavu**. Je nutné stanovit i správný technologický postup při mísení složek dle druhu použitých vláken a stavební chemie.

Křivka zrnitosti použitého kameniva by tedy měla být optimálně plynulá, tak aby byla zajištěna požadovaná zpracovatelnost a po zatvrdnutí byl vytvořen skelet s minimální mezerovitostí. Nutné je počítat s **vyšším obsahem jemnozrnných částic**, která zvyšují odolnost proti segregaci a rozplavování betonu. Částice také vyplňují nežádoucí mezerovitost skeletu **Vhodné je těžené kamenivo** vzhledem k menšímu specifickému povrchu oproti drcenému. Navíc těžené kamenivo napomáhá dobré zpracovatelnosti díky jejich tvarovému indexu. Navrhují se i receptury s obsahem drceného kameniva, které jsou ale citlivější na obsah jemných částic. Jemné částice negativně ovlivňují průběh hydratace a drcené kamenivo zhoršuje vlastní zpracovatelnost díky ostrohrannému tvaru zrn. **Maximální velikost zrn kameniva** vhodných do FRSCC je **22 mm a 16 mm**. Při použití dlouhých vláken jsou eliminovány hrubé podíly kameniva, lze ale navrhnout receptury založené na D_{max} 8 mm ale jsou většinou neekonomické vzhledem k většímu specifickému povrchu kameniva [10, 11, 12].

Do samozhutnitelného vláknobetonu jsou vhodné všechny druhy cementů, které odpovídají normě ČSN EN 197-1 [6]. **Množství cementu přidávaného do FRSCC by se mělo zvýšit cca o 10 % na rozdíl od receptury SCC**. Přídavek cementu slouží k obalení vláknových výztuží cementovým tmelem. **Množství cementu** se tedy pohybuje v **rozmezí 385–550 kg/m³**. Voda vhodná pro výrobu betonu odpovídá normě ČSN EN 1008 [7]. **Vodní součinitel (w)** se obvykle pohybuje v **rozmezí od 0,35 do 0,6** dle klasifikace SCC. Další specifikace vodního součinitele vyplývají z druhu použitých vláken například **0,4 – 0,5 pro ocelová vlákna**. Nízký vodní součinitel se zajišťuje pomocí plastifikačních přísad (vodu redukující). Přísady do samozhutnitelného betonu odpovídají normě ČSN EN 934-2+A1 [8].

Množství vláken přidávaných do betonu je dané výrobcem například doporučené množství ocelových drátků se pohybuje v **rozsahu od 20 do 100 kg vláken/m³ betonu** [10]. Samozhutnitelný vláknobeton musí být ve shodě s normou ČSN EN 206 + A1 [9].



Obrázek 3. – Samozhutnitelný drátkobeton zkušební tělesa na levé, porušení na pravé straně

4.3. Zkoušky čerstvého betonu

Pro ověření reologických vlastností čerstvého betonu byly využity základní kontrolní zkoušky. Podle TKP 17 a 18 [20, 21] či TP 187 [22] jde o zkoušky objemové hmotnosti, konzistence a obsahu vzduchu. Zkoušky čerstvého samozhutnitelného drátkobetonu vycházejí ze zkoušek zpracovatelnosti prováděných u samozhutnitelných betonů. Zkoušky byly dále přizpůsobené dle dostupného vybavení. Zkoušena mohla být **objemová hmotnost betonu, obsah vzduchu, odolnost proti segregaci, zkouška sednutím – rozlitím, J – ring a V – nálevka, stanovení obsahu kovových vláken**. Zkoušky čerstvého betonu nejprve sloužily ke stanovení zpracovatelnosti a pro optimalizaci složení s ohledem na zachování malé mezerovitosti a nízkého vodního součinitele tím i zachování odolnosti proti segregaci.

Dále optimalizace spočívala ve stanovení délky a množství vláken v poměru ke zbytkovému betonu tedy obsahu jemnozrnných částic, množství stavební chemie a obsahu cementového tmele, tak aby došlo k obalení povrchu vláken společně s limitovaným objemem kameniva. A zároveň by měly být zachovány tixotropní vlastnosti čerstvého samozhutnitelného vláknobetonu.

Později zkoušky čerstvého betonu sloužily pro ověření kvality výroby a ověření zpracovatelnosti při stanoveném objemu vláken. Tak aby při stanoveném objemu rozptýlené výztuže nedošlo k výraznému zhoršení konzistenčních vlastností drátkobetonu.

4.3.1. Objemová hmotnost čerstvého betonu

Při stanovení objemové hmotnosti čerstvého betonu se postupovalo podle příslušné normy ČSN EN 12 350 – 6 [23]. Princip zkoušky spočívá v naplnění nádoby o definovaném objemu a hmotnosti čerstvým betonem a následném přesném určení hmotnosti.

Pro zjištění objemové hmotnosti se používá tuhá, vodotěsná nádoba nereagující s cementovým tmelem. Která má minimální objem 5 l a nejmenší rozměr nádoby má být čtyřnásobek největšího zrna kameniva, avšak minimálně 150 mm. Nádoba použitá při zkouškách objemové hmotnosti čerstvého betonu se dále používá při zkouškách obsahu vzduchu.

Před vlastním zkoušením se provede kalibrace objemu nádoby pomocí přepočtu objemu vody $\rho = 998 \text{ kg/m}^3$ při teplotě vody $20 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ výsledný objem (V) zaokrouhlíme na $0,01 \text{ dm}^3$.

Při zkoušení čerstvého betonu se nejprve zváží prázdná nádoba (m_1) s přesností 0,01 kg. Poté se nádoba naplní čerstvým betonem bez hutnění (SCC) pouze se odstraní velké bubliny poklepem na stěny nádoby gumovou paličkou. Volný povrch nádoby se urovná na definovaný objem a nádoba s čerstvým betonem se opět zváží (m_2). V závěru zkoušky vypočteme výslednou hodnotu objemové hmotnosti čerstvého betonu (D) podle vzorce (viz další strana):

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

Na závěr se stanovená hodnota objemové hmotnosti se zaokrouhlí na nejbližších 10 kg/m³.

4.3.2. Obsah vzduchu

Pro stanovení obsahu vzduchu v čerstvém betonu se postupovalo dle příslušné normy pro zkoušení betonu ČSN EN 12 350 – 7 [24]. Podle této normy se obsah vzduchu může měřit dvěma způsoby. Prvním způsobem může být měřena změna výšky vodního sloupce v důsledku změny definovaného tlaku vzduchu. Nebo druhým častějším způsobem, kdy používá tlakoměrná metoda. Která je založena na principu měření změny tlaku vzduchu v tlakové nádobě. Přetlaková komora je předem natlakovaná dle kalibrace tlakového hrnce a následně povrch betonu vystavíme volnému tlaku okolního vzduchu. Měříme relativní snížení tlaku vzduchu v komoře. Zkoušky v rámci práce byly prováděné tlakoměrnou metodou.

Vodotěsná tuhá nereaktivní nádoba s objemem min. 5 l a poměrem průměru ku výšce nádoby v mezích od 0,75 až 1,25 má být odolná vnitřnímu tlaku cca 0,2 MPa (viz obr. 4.). Nádoba se naplní najednou čerstvým betonem bez hutnění (SCC) odstraní se velké bubliny poklepem gumovou paličkou na stěny nádoby. Volný povrch se zarovná hladítkem na definovaný objem čerstvého betonu. Následně se nádoba vzduchotěsně uzavře víkem zkušebního přístroje s ventily a manometrem. Následně po uzavření tlakového hrnce se do přístroje doplní voda a poté se provádí kalibrace manometru. Po zkalibrování přístroje pokračujeme otevřením hlavního ventilu, kdy vystavíme beton vnějšímu tlaku vzduchu a na manometru odečteme hodnotu obsahu vzduchu (A_1). Poté spočítáme obsah vzduchu (A_c) v betonu podle vzorce uvedeného níže, kde G je opravný součinitel kameniva ($G = 0$; pokud nebyl změřen).

$$A_c = A_1 - G$$

Na závěr zkoušky se obsah vzduchu stanoví s přesností 0,1 %.



Obrázek 4. – Zkušební přípravek obsah vzduchu

4.3.3. Odolnost proti segregaci

Zkouška segregace při prosévání se provádí dle normy pro zkoušení čerstvého betonu ČSN EN 12350-11 [25]. Podle této normy se nejprve odebere vzorek čerstvého betonu do nádoby na vzorek o objemu cca $10 \pm 0,5$ l. Po odebrání vzorku se určí jeho teplota a ponechá se zakrytý v klidu odpočinout po dobu 15 minut. Dále váhy položíme na vodorovný pevný povrch a nejprve zvážíme dno síta (m_p) o průměru nejméně 300 mm s přesností na gramy. Poté na váhy položíme i síto, které je stejného průměru a oka síta má čtvercová s velikostí 5 x 5 mm (viz obr. 5.). Následně po vložení dna a síta přípravku na váhy se váhy vynulují. Po uplynutí doby 15 minut se sejmeme víko z nádoby na vzorek. Poté z výšky cca 500 ± 50 mm se najednou rovnoměrně nalévá do středu síta čerstvý beton o hmotnosti přibližně $4,8 \pm 0,2$ kg. Následně se poznamená skutečná hmotnost betonu vloženého na síto (m_c) v gramech. Po dvou minutách v klidu se síto plynule svisle zvedne a zváží se hmotnost dna se segregovanou částí čerstvého betonu (m_{ps}) v gramech. Na závěr zkoušky vypočteme procentuální podíl segregované části betonu (SR) podle vzorce:

$$SR = \frac{((m_{ps} - m_p) \cdot 100)}{m_c}$$

Výsledek zkoušky se zaokrouhlí přesností na celá procenta.



Obrázek 5. – Zkušební přípravek odolnosti proti segregaci

4.3.4. Sednutí – rozlítím

Při určování konzistence čerstvého betonu byla využita zkouška sednutím rozlítím, která byla prováděna dle normy ČSN EN 12350-8 [26]. Podle této normy nejprve připravíme podkladní desku, která je hladká, tuhá, nereaguje s cementovým tmelem a má střed označen křížem a dvěma kružnicemi. První z kružnic s menším průměrem (210 mm) slouží pro vycentrování Abramsova kužele. Druhá kružnice má průměr 500 mm a označuje normovou hranici k určení času T_{500} . Podkladní deska se připraví, tak aby byla dokonale vodorovná, čistá

a navlhčená. Poté do středu desky na stanovenou hranici položíme navlhčený kužel, který je v průběhu plnění přitlačován k desce. Kužel je plněn najednou bez hutnění (SCC) k jeho naplnění postačí přibližně 5,5 l čerstvého betonu. Volný horní okraj kužele se zarovná hladítkem na definovaný objem betonu a přebytky betonu se očistí především z podkladní desky, tak aby tečení nic nebránilo. Zkouška spočívá ve plynulém zvednutí kužele svisle vzhůru a současně v okamžiku zdvihnutí se spustí stopky. Stopky zastavíme v okamžiku, kdy beton dotече k druhé z označených kružnic. Zaznamenáme si čas, kdy beton dotekl do stanovené hranice (T_{500}) s přesností na 0,1 vteřiny a výsledek se zaokrouhlí na nejbližších 0,5 sekund. Po ukončení tečení čerstvého betonu se změří největší rozměr (d_1) a kolmo k tomuto rozměru změříme druhý rozměr (d_2) rozteklého betonu. Vlastní měření rozměrů je prováděno s přesností na 10 mm. Pokud je rozdíl mezi rozměry větší než 50 mm, tak je zkouška opakována. V případě, že i napodruhé je mezi rozměry větší rozdíl, tak čerstvý beton nemá potřebnou konzistenci vhodnou pro zkoušku sednutím rozlitím. V závěru zkoušky vyhodnotíme vlastní sednutí rozlitím (SF) dle normového vzorce:

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

Na konec se hodnota sednutím rozlitím zaokrouhlí na nejbližších 10 mm.

4.3.5. J – kroužek

Pro určení průtokových vlastností čerstvého betonu mezi výztužnými pruty slouží zkouška sednutím rozlitím obohacená o J – kroužek. Vlastní zkoušení se řídí příslušnou normou ČSN EN 12350-12 [27]. Dle této normy nejprve připravíme podkladní desku, kterou srovnáme do vodorovné roviny, očistíme a navlhčíme. Nejprve se osadí navlhčený Abramsův kužel na stanovenou hranici ve středu desky. Poté osadíme J – kroužek na stanovený kříž označený na desce. J – kroužek se skládá z prutů z hladké oceli s průměrem prutů $18 \pm 0,5$ mm, které jsou uspořádány do kruhu o průměru 300 ± 2 mm. Při zkoušení lze použít J – ring dvojího typu úzkomezerový se vzdáleností prutů 41 ± 1 mm nebo případně širokomezerový 59 ± 1 mm (viz obrázek 6.). Po vycentrování kroužku a kuželu se přistoupí k naplnění kuželu samozhutnitelným betonem najednou bez zhutňování (SCC).

Kužel se zdvihne a zároveň se spustí stopky, které se zastaví v okamžiku kdy beton dosáhne stanovené hranice (T_{500}). Tento čas se zaokrouhlí s přesností na 0,5 sekundy. V průběhu tečení by nemělo docházet ke segregování složek betonu nebo zablokování mezer mezi výztužnými pruty. Následně po ukončení tečení betonu měříme největší rozměr roztečení (d_1) a kolmo k tomuto směru změříme druhý rozměr (d_2) s přesností na celé centimetry. Po měření vypočteme průměrné roztečení (SF_j) podle normového vzorce uvedeného na konci kapitoly.

V závěru zkoušky měříme relativní rozdíl výšek mezi horním povrchem prstence a povrchem betonu. Měří se bod ve středu prstence a současně i desky (Δh_0) a na okrajích prstence ve čtyřech referenčních bodech (Δh_{x1} , Δh_{x2} , Δh_{y1} , Δh_{y2}), tam kde je naznačen kříž, podle kterého byl prstenec centrován. Výšky se zaznamenávají s přesností na celé milimetry. Následně vypočítáme schopnost průtoku zjištěnou zablokováním (PJ) dle normového vzorce uvedeného níže:

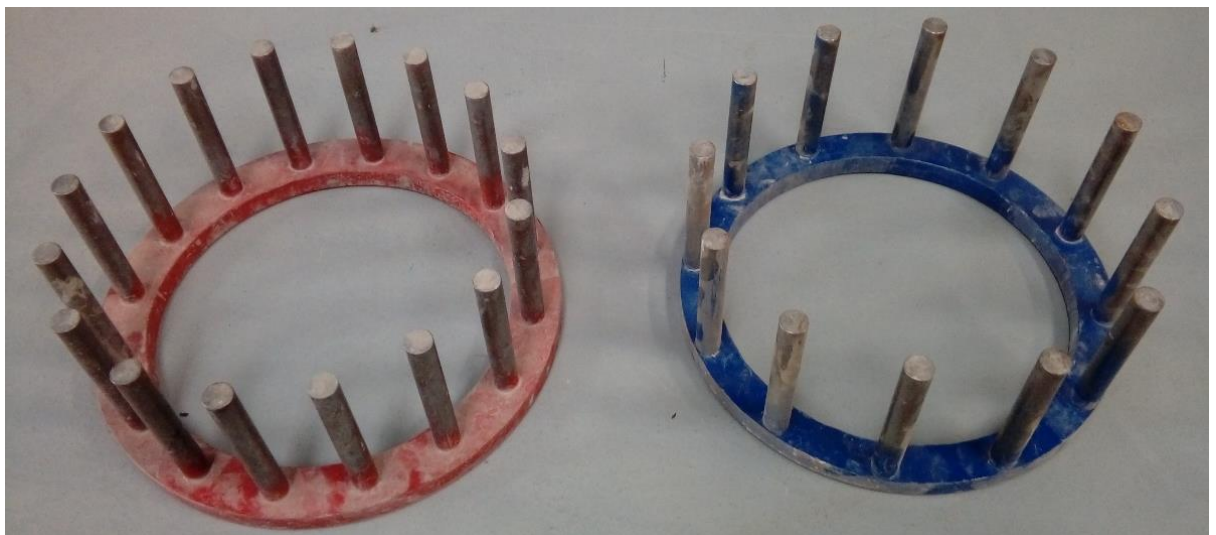
$$SF_j = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

Průměrné sednutí rozlitem při použití J – kroužku.

$$PJ = \frac{\Delta h_{x1} + \Delta h_{x2} + \Delta h_{y1} + \Delta h_{y2}}{4} - \Delta h_0$$

Schopnost průtoku při zablokování zjištěnou pomocí J – kroužku.

Nakonec se výsledek zaokrouhluje na celé desítky milimetrů.



Obrázek 6. – Úzkomezerový nebo širokomezerový J – kroužek

4.3.6. V – nálevka

Pro určení viskozity a schopnosti betonu vyplňovat bednění se využívá V – nálevky. Postup při zkoušení tekutosti čerstvého betonu se řídí normou ČSN EN 12350-9 [28]. Zkouška je založena na principu zužujícího se zásobníku na beton, který je ukončen krátkým pravoúhlým prostupem. Přípravek ke zkoušení je vyroben z dostatečně tuhého a nereaktivního materiálu (viz obrázek 7.). Na počátku zkoušky se připraví V – nálevka, která by měla být v dokonale svislé poloze a předem navlhčená. Pod prostup připravíme nádobu k zachycení propadlého betonu. Nejprve se uzavře prostup na konci nálevky a zahájíme její plnění. Zásobník je plněn najednou bez zhutnění k naplnění postačí přibližně 10,5 l čerstvého betonu. Podle dané normy

by velikost maximálního zrna (D_{max}) měla být maximálně 20 mm (jinak dojde ke zablokování prostupu). Po naplnění nálevky betonem urovnáme volný horní povrch hladítkem na definovaný objem. Poté do 10 ± 2 vteřinách od naplnění zásobníku se pokračuje rychlým otevřením spodního otvoru a současně se spustí stopky, které se zastaví v okamžiku vyprázdnění zásobníku. Poznamenejme si čas vyprázdnění $V -$ nálevky (T_v) s přesností na desetinu vteřiny. V případě zablokování prostupu je nutné dle normy zkoušku zopakovat. Pokud i napodruhé znovu dojde ke zablokování otvoru, tak beton nemá správnou tekutost.



Obrázek 7. – Zkušební přípravek $V -$ nálevka

4.4. Zkoušky ztvrdlého betonu

Zkoušky ztvrdlého betonu jsou obvykle prováděny destruktivní zkouškami méně často nedestruktivním. Pevnostní zkoušky se zkouší na zkušebních tělesech zhotovených podle ČSN EN 12390-1 [29], která jsou ošetřována dle normy ČSN EN 12390-2 [30]. Pevnostní zkoušky byly zaměřeny na stanovení objemové hmotnosti, pevnosti v prostém tlaku (modulu pružnosti a přetvárnosti), ohybových únosností při vzniku trhliny, mezní, zbytková, pevností v tahu za ohybu při vzniku trhliny, reziduální. Pro stanovení minimálního objemového podílu vláken přidaných do receptury SCC, při kterém bude dosaženo dostatečných reziduálních pevností v tahu ohybem a zachování dobré zpracovatelnosti při výrobě zkušebních těles. Zkoušky jsou obvykle prováděny v plně saturovaném stavu v době 28 dnů charakteristického stáří těles. Zkušební tělesa v našem případě byla ošetřována pod strečovou folií při vlastní vlhkosti až do provádění jednotlivých dílčích zkoušek v různém charakteristickém stáří těles. Dále byla zkoušena odolnost proti proražení a absorbovaná energie na vláknobetonových deskách. Zkoušky pevnosti v tahu za ohybu byly zkoušeny na tělesech se zářezem (místo

oslabení) a bez (singularit) pro srovnání s novou metodikou, kde se trámky upravují kruhovou singularitou pro dosažení režimu čistého osového tahu a rovnoměrné napjatosti v krčcích dle návrhové metodiky stavební fakulty ČVUT v Praze. Dále dle další nové návrhové metodiky pro stanovení tahové pevnosti s optimalizovaným tvarem tzv. dogbone [31, 32, 33, 34, 35, 36]. Odkazy na další laboratorní výsledky různých výzkumů jsou uvedeny v závěru práce. V závěru byla zkoušena tělesa destruktivními i nedestruktivními metodami pro stanovení objemového podílu vláken a rozložení vláken uvnitř vzorku. Lisovací zařízení použité při zkouškách ztvrdlého betonu odpovídá ČSN EN 12390-4 [37].

4.4.1. Objemová hmotnost ztvrdlého betonu

Zkouška objemové hmotnosti ztvrdlého betonu se provádí podle příslušné normy ČSN EN 12390-7 [38]. Podle této normy lze stanovit objemovou hmotnost před zkouškami ve stavu dodání, nebo ve stavech ustálené hmotnosti v plně saturovaném stavu (vodní lázeň) nebo ve vysušeném stavu (při 105 ± 5 °C). Zkušební tělesa, která jsou vhodná pro tuto zkoušku musejí mít minimální objem 0,785 l. Vlastní objem těles lze měřit dvěma způsoby ponořením do vody (v případě nepravidelného tvaru těles) nebo při přesně definovaných rozměrech těles (krychle 150 x 150 x 150 mm) měřením skutečných rozměrů zkušebních těles. V našem případě byla zkouška objemové hmotnosti stanovena před vlastními destruktivními zkouškami ztvrdlého betonu v plně saturovaném stavu. Před vlastní zkouškou se pouze odstranila voda z povrchu těles. Objem (V) byl stanoven průměrováním měřených rozměrů těles a hmotnost (m) byla změřena na kalibrovaných vahách. V závěru zkoušky byl stanoven výsledný objem zatvrdlého betonu (D) průměrování z vypočtených hodnot dle vzorce:

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

Výsledek zkoušky se zaokrouhlí na celé 10 kg/m³.

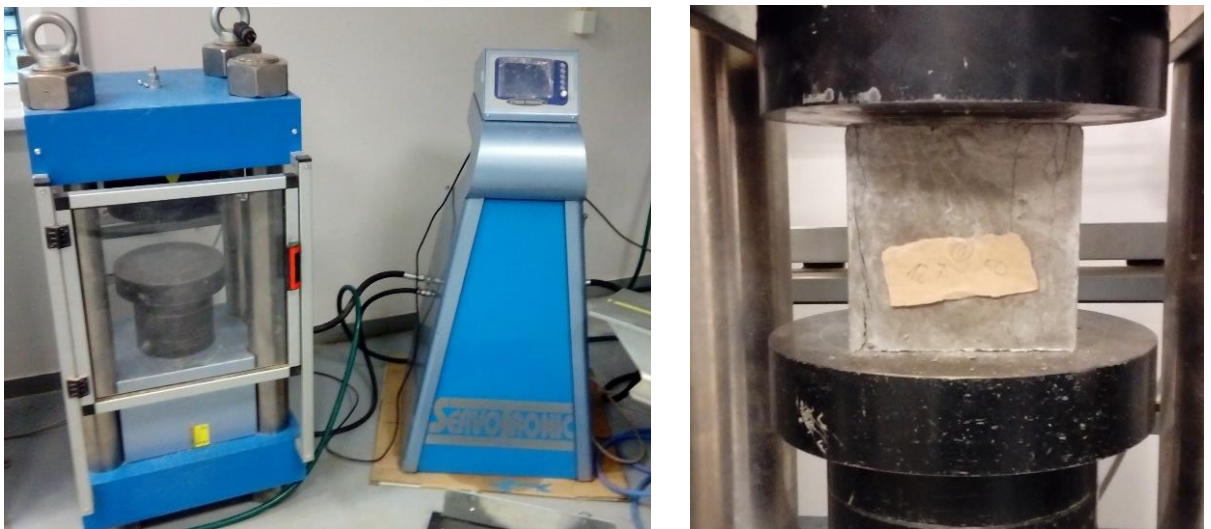
4.4.2. Pevnost v prostém tlaku

Pevnost v prostém tlaku se zkouší podle normy ČSN EN 12390-3 [39]. Dle této normy nejprve připravíme lisovací zařízení a zkušební vzorky (krychle 150 x 150 x 150 mm). Poté se očistí dotykové plochy lisovacího zařízení od zbytků betonu a zkušební vzorky se otrou od přebytečné vody z vodní lázně. Vzorky jsou vkládány do středu dolní lisovací plochy, tak aby směr působících sil byl kolmý ke směru ukládání betonu při výrobě zkušebních těles. Následně přistoupíme k vlastnímu nastavování řídicí jednotky lisovacího zařízení. Zadány jsou rozměry těles především zatěžovaná plocha (A_c) a rychlost zatěžování $0,6 \pm 0,2$ MPa/s. Zatěžování Rychlost by měla být konstantní až do významného poklesu pevnosti (porušení vzorku). Po

porušení zkušebního tělesa se posoudí způsob porušení a v případě vyhovujícího se zaznamená síla při porušení vzorku (F). Je-li porušení nevhovující pak se zaznamenává podrobný popis způsobu porušení. V závěru zkoušky se vypočítá pevnost v prostém tlaku (f_c) podle normového vzorce:

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

Výsledek zkoušky je na závěr zaokrouhlen na nejbližších 0,1 MPa. Zatěžovací zařízení a uložení krychlí do lisovacího zařízení je naznačeno níže (viz obrázek 8.).



Obrázek 8. – Zatěžovací zařízení nalevo a uložení zatěžovaných krychlí napravo

4.4.3. Pevnost v tahu za ohybu

Zkoušky pevnosti v tahu za ohybu sloužily v první fázi pro optimalizaci složení betonu tedy pro stanovení minimálního obsahu rozptýlené výztuže. Především pro dosažení reziduálních pevností 1,5 MPa při rozevření trhliny 0,5 mm a reziduálních pevností 1 MPa při šířce trhliny 3,5 mm. V druhé fázi zkoušky charakteristických pevností v tahu za ohybu sloužily pro ověření kvality výroby (pro optimalizované složení betonu) a pro srovnání s novou návrhovou metodikou. Zkoušky byly zaměřeny na nejběžnější zkoušky v tahu za ohybu pro vláknobetonu. Zkoušeny byly trávce bez zářezu ve čtyřbodovém uspořádání zatěžování (pevnost v tahu za ohybu při vzniku trhliny a reziduální), se zářezem ve třibodovém uspořádání (ohybové únosnosti při vzniku trhliny, mezní, zbytková) a dle nové metodiky (sílu při vzniku trhliny a pevnost v osovému tahu) s kruhovým otvorem uprostřed trávce a se čtyřbodovým uspořádáním při zatěžování. Nová metodika je zaměřena na vlastnosti vláknobetonu při dosažení režimu v čistého osového tahu a téměř rovnoměrném rozložení napjatosti v tažené oblasti prvku. Vlastní průběhy zkoušek byly automaticky průběžně strojově zaznamenávány pro sestavení jednotlivých diagramů závislosti působících sil a průhybů trávce. Vlastní lisovací

zařízení použité při zkouškách pevnosti v tahu za ohybu odpovídá 1. třídě dle příslušné normy na zkušební zařízení ČSN EN 12390-4 [37]. Při stanovení pevnosti vláknobetonu v prostém tahu ($f_{fct,ax}$) se vychází ze převodních vztahů $f_{fct,ax} = 0,6 \cdot f_{fct,fl}$ pro tříbodový ohyb se zářezem, kde $f_{fct,fl}$ je hodnota odolnosti zjištěná při zkoušce. Při čtyřbodovém uspořádání bez zářezu se použije vzorec $f_{fct,ax} = f_{fct,fl} / 1,45$ a v případě nové metodiky s kruhovým vývrtem je pevnost v tahu určována přímo z napětí v tažené oblasti.

4.4.3.1. Nevyztužený beton

Pro stanovení pevnosti v tahu za ohybu nevyztuženého betonu byla využita odpovídající norma pro zkoušení zatvrdlého betonu ČSN EN 12390-5 [40]. Podle této normy lze určit požadovanou pevnost v tahu za ohybu dvěma způsoby, buď je zkouška prováděna s jedním zatěžovacím břemenem (uprostřed rozpětí), nebo se zkouška provádí se dvěma zatěžovacími břemeny (v třetinách rozpětí). Po ukončení ošetřování zkušebních těles (ve vodní lázni, trámce s rozměry 100 x 100 x 400 mm) se tělesa očistí od přebytečné vody na povrchu. Očistí se také dotykové plochy lisovacího zkušebního rámu a trámce se osadí tak, aby směr zatěžování břemeny byl kolmý ke směru ukládání betonu během výroby těles. Zkušební tělesa se vkládají centricky mezi podpěrné válečky a podélná osa hranolu je kolmá k zatěžovacím a podpěrným válečkům. Po uložení těles se přistoupí k nastavování řídicí jednotky zatěžovacího zařízení nastaví se parametry těles (d_1 , d_2 – rozměry příčného řezu a l – vzdálenost podpor) a parametry zatěžování především rychlost zatěžování, která je konstantní v rozmezí 0,04 – 0,06 MPa/s. Následně po automatickém vyhodnocení výrazného poklesu pevnosti (porušení vzorku) řídicí jednotkou je zaznamenáno maximální zatížení (F) a případné nevyhovující porušení vzorku, kdy trhлина vznikla vně podporových válečků. Uspořádání zkoušky a uložení trámců je zobrazeno dále. V závěru zkoušky se vypočítá pevnost v tahu ohybem f_{cf} podle vzorce:

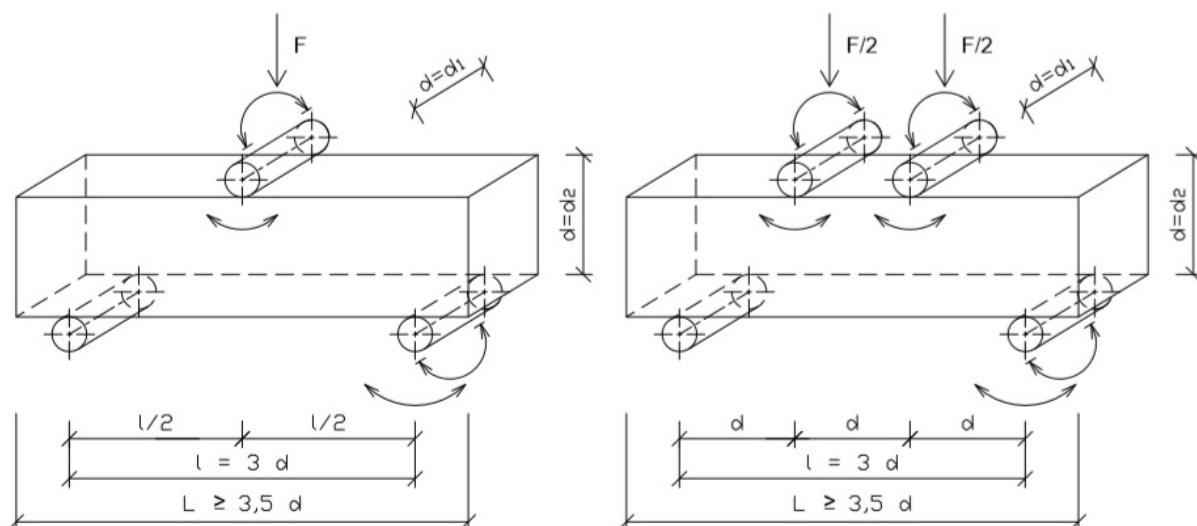
$$f_{cf} = \frac{3 \cdot F \cdot l}{2 \cdot d_1 \cdot d_2^2}$$

Při použití jednoho zatěžovacího břemene.

$$f_{cf} = \frac{F \cdot l}{d_1 \cdot d_2^2}$$

Při zatěžování se dvěma zatěžovacími břemeny.

Na konec se výsledná pevnost v tahu za ohybu zaokrouhlí na celé 0,1 MPa.



Obrázek 9. –Uložení zatěžovaných nevyztužených trámců zatěžované jedním břemenem na pravé straně a zatěžovaný dvěma břemeny na levé straně.

4.4.3.2. Tříbodová se zářezem

Zkušební metoda používaná pro stanovení meze úměrnosti a zbytkové pevnosti v tahu za ohybu se provádí podle normy ČSN EN 14651+A1 [41]. Zkoušku lze provádět dvojnásobným způsobem měří se průhyb tělesa nebo rozevření trhliny (CMOD). V rámci experimentální části byla zkouška prováděna pomocí měření rozevírání trhliny. Norma je vhodná betonové receptury s maximálním zrnem 32 mm, pro kovová vlákna do délky 60 mm nebo pro kombinaci kovových vláken s jinými (polymerová, skleněná, uhlíková čedičová a jiné). Zkouška spočívá v zatěžování prostě uloženého trámce (s rozměry 150 x 150 x 550 mm) jedním zatěžovacím břemenem. Zatěžování je prováděno s konstantním přírůstkem rozevření trhliny nebo průhybu.

Při výrobě těles normalizovaných trámců se plnění betonem provádí najednou bez hutnění nejprve je naplněn střed formy poté se plní konce trámců a volný povrch betonu se zarovná hladítkem (SCC). Tělesa jsou ošetřována pod folií do doby zkoušení. Ošetřování se ukončí nejdéle 3 hodiny před provedením zatěžování. V této době se připraví zářez uprostřed trámce (5 mm široký a 25 mm vysoký), který je kolmý na směr plnění betonu při výrobě těles. Šířka tělesa a účinná výška ($b = 150$ a $h_{sp} = 125$ mm) trámce uprostřed rozpětí se určuje průměrováním ze dvou měření s přesností 0,1 mm (posuvným měřidlem).

A v případě měření rozevření trhliny se dále v této době přilepí doprostřed zářezu destičky určené pro osazení snímače (5 mm mezi destičkami a maximálně $y = 5$ mm mezi spodní hranou tělesa a přímkou měření). V případě měření průhybu se na těleso se lineární

snímač umísťuje na tuhý rám, ktorý je pripevněn k tělesu nad podporami v polovině výšky na jedné straně s možností posunu a na druhé straně pootočení. Snímač je jedním koncem spojen s tuhým rámem a druhým koncem se spojí přes hliníkovou destičku (tl. 1 mm) s tělesem na spodní ploše uprostřed zářezu normalizovaného trámce (viz obrázek 10.). Zatěžování v průběhu měření rozevírání trhliny (CMOD) je konstantní rychlostí 0,05 mm/min do doby otevření trhliny 0,1 mm. Poté se zatěžování zvětší na 0,2 mm/min do ukončení zkoušky tedy do otevření trhliny minimálně 4 mm. Frekvence zaznamenávání údajů závislosti zatížení a CMOD je po dobu prvních dvou minut 5 Hz a následně se frekvence může snížit na 1 Hz.

Pro vyjádření průhybu (δ) nebo pro převod parametrů rychlosti zatěžování v případě měření zvětšování průhybu se použije vztah:

$$\delta = 0,85 \cdot CMOD + 0,04$$

Pokud se přímka měření nenachází na spodní ploše prvku ($y = 0$) pak se použije vztah pro převod s využitím naměřených hodnot rozevření trhliny ($CMOD_y$):

$$CMOD = CMOD_y \cdot \frac{h}{h + y}$$

Kde h je celková výška zkušební tělesa.

Mez úměrnosti ($f_{ct,L}^f$) se stanoví na základě zatížení odpovídající mezi úměrnosti (F_L) podle normového vztahu:

$$f_{ct,L}^f = \frac{3 \cdot F_L \cdot l}{2 \cdot b \cdot h_{sp}^2}$$

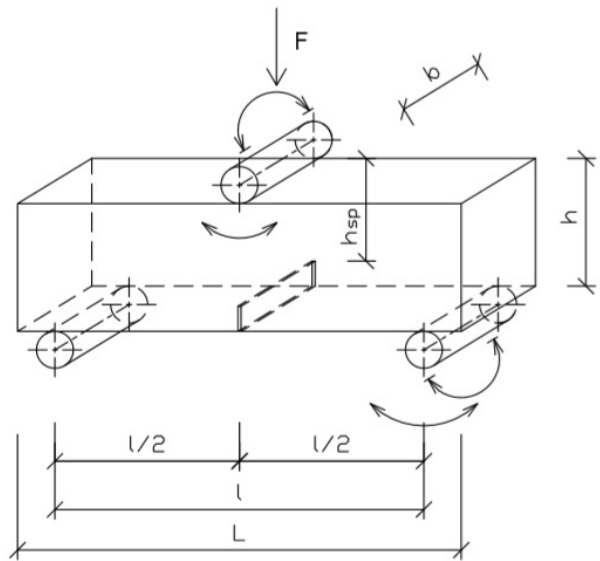
Kde l je délka rozpětí v milimetrech.

Přičemž zatížení na mezi úměrnosti se stanoví jako maximální zatížení v intervalu hodnot 0 – 0,05 mm (CMOD). Mez úměrnosti se stanoví z grafu závislosti F_L a CMOD s přesností na 0,1 N/mm. Zbytková pevnost tahu v ohybu ($f_{R,j}$) je dána vztahem:

$$f_{R,j} = \frac{3 \cdot F_j \cdot l}{2 \cdot b \cdot h_{sp}^2}$$

Kde F_j jsou hodnoty odpovídajícího zatížení CMOD (při otevření trhliny F_1 - 0,5 mm; F_2 - 1,5 mm; F_3 - 2,5 mm; F_4 - 3,5 mm).

Zbytková pevnost v tahu za ohybu se v závěru zaokrouhlí s přesností na 0,1 N/mm².



Obrázek 10. – Sestavení zatěžovacího zařízení na levé straně a uložení zatěžovaných trámců se zářezem na pravé straně

4.4.3.3. Čtyřbodová bez singularit

Zkoušení zatvrdlého vláknobetonu a zkouška ohybem prostého vláknobetonu byla prováděna dle příslušné předběžné normy ČSN P 73 2452 [42]. Princip stanovení pevnosti v tahu za ohybu vychází z normy. Normalizované trámce vhodné pro zkoušení vláknobetonu mají rozměry 150 x 150 x 700 mm. Zatěžování trámce probíhá s konstantní rychlostí růstu průhybu uprostřed trámce ($0,2 \pm 0,05$ mm / min) do průhybu minimálně $\delta_{ti} = 4$ mm podle vztahu $v_{tt} = \Delta\delta / \Delta t$. Vlastní zatěžování je prováděno se dvěma břemeny tedy čtyřbodové uspořádání dle obrázku číslo 11. zobrazeném ve spodní části. Průhyb tělesa je průběžně měřen s přesností 0,01 mm a zaznamenáván do diagramu odolnosti normalizovaných trámců. Po ukončení zatěžování se změří poloha makrotrhliny tedy vzdálenost od středu trámce v místě měření průhybu na úrovni podélné osy symetrie prvku. Vliv polohy makrotrhliny a pevnost vláknobetonu se určuje dle přílohy B příslušné normy [42]. Poloha vznikající makrotrhliny ovlivňuje chování prvku vzniká princip podobný trojkloubového mechanismu. Rozdíl mezi skutečným a měřeným chováním (ve středu prvku) odpovídá rozdílu v pootočeních v částech oddělených trhlinou (viz obrázek 11.).

V závěru se vyhodnocují jednotlivé diagramy odolnosti, které byli získány minimálně ze šesti měření v případě provádění průkazných zkoušek. U každého z diagramu určíme mez vzniku makrotrhliny (CLS_i) nebo stanovíme příslušnou sílu při vzniku makrotrhliny ($F_{Ri,cr}$) a deformaci ve středu trámce ($\delta_{ti,cr}$). Vyhodnocení lze provádět na základě získaných dat z průběhu zatěžování, nebo při přímém sledování chování trámce v průběhu zatěžování lze

zavést vliv polohy vznikající makrotrhliny. Ze všech získaných diagramů se statisticky vyhodnotí průměrný diagram odolností normalizovaných trámců, který je dále posuzován.

Z průměrného diagramu se stanoví především síla odolnosti při průhybu na vzniku trhliny ($F_{Rm,cr}$), při dohodnutém průhybu 0,5 mm ($F_{Rm,0,5}$) a dohodnutém mezním průhybu 3,5 mm ($F_{Rm,res,1}$). Dalším statistickým zpracováním všech diagramů pomocí 5 % kvantilu spolehlivosti získáme charakteristický diagram odolnosti vláknobetonových normalizovaných trámců [42]. Z charakteristického diagramu se určí charakteristická síla odolnosti při vzniku trhliny ($F_{Rk,cr}$), při dohodnutém průhybu 0,5 mm ($F_{Rk,0,5}$) a mezním průhybu 3,5 mm ($F_{Rk,res,1}$). Přičemž pro konstrukční betony platí podmínka $F_{Rk,res,i} \geq 1/3 \cdot F_{Rk,cr}$ tedy, aby všechny body reziduálních odolností charakteristického diagramu (do průhybu 3,5 mm) byly nad stanovenou hranicí třetiny charakteristické kritické síly při vzniku trhliny. Na závěr se vyhodnotí pevnosti v tahu za ohybu v dostředném tahu v jednotlivých fázích působení při vzniku makrotrhliny ze vzorce:

$$f_{fc,tk,fl} = \frac{F_{Rk,cr} \cdot l}{d_1 \cdot d_2^2}$$

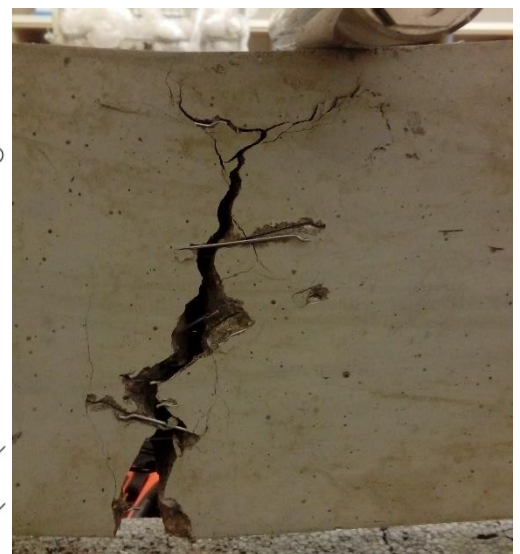
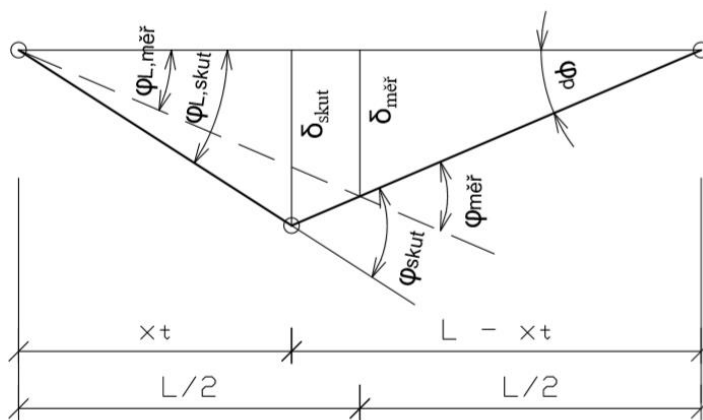
Po vzniku makrotrhliny při dohodnutém průhybu 0,5 mm podle vzorce:

$$f_{fc,tk,0,5} = 0,45 \cdot \frac{F_{Rk,0,5} \cdot l}{d_1 \cdot d_2^2}$$

Při dohodnutém mezním průhybu 3,5 mm dle vzorce:

$$f_{fc,tk,res,1} = 0,36 \cdot \frac{F_{Rk,cr} \cdot l}{d_1 \cdot d_2^2}$$

Kde l je rozpětí mezi podpěrnými válečky (600 mm) a rozměry d_1 a d_2 jsou rozměry příčného řezu.



Obrázek 11. – Rozdíl mezi skutečným a měřeným chováním ve středu na levé straně [42] a rozdílné šíření trhliny (těleso 19.9./75/1) na pravé straně

4.4.3.4. Čtyřbodová s kruhovou singularitou dle nové metodiky

Pro výstižnější stanovení tahových pevností vláknobetonu byla navržena nová metodika pro jejich určení [31]. Zkoušky vychází ze zkoušek v tahu za ohybu vláknobetonů pouze normalizované trámce (150 x 150 x 700 mm) jsou opatřeny kruhovým vývrtem (s průměrem 80 mm) uprostřed rozpětí trámce provedeným kolmo na směr ukládání betonu a rovnoběžně s místem zatěžování. Kruhový otvor slouží k dosažení lepšího stavu napjatosti, tedy rovnoměrného rozložení tahových napětí v oblasti krčků během zatěžování (jednoosé namáhání). Návrhová metodika odstraňuje nedostatky zkoušek tahu za ohybu vláknobetonů (čtyřbodový ohyb bez zářezu a třibodový ohyb se zářezem) především jde o jednoduchost, statistickou nejistotu ve stanovení nejslabšího místa (polohu makrotrhliny) a změnu rozložení napjatosti v průběhu zatěžování (během šíření trhliny). Zatěžování trámce s kruhovým otvorem je prováděno dvěma silami ve třetinách rozpětí (600 mm – čtyřbodové uspořádání viz obr. 12.).

Kolem povrchu vývrtnu dochází ke koncentraci napětí (trajektorie napětí plynule obíhají kolem kruhového otvoru) díky tomu je eliminován vliv lineárního rovinného rozložení napětí. Tím je dosaženo téměř rovnoměrného působení tahových sil ve spodní tažené a horní tlačené oblasti (v režimu čistého osového tahu viz obrázek 12.). Při výpočtu reálné napjatosti v oblasti s koncentrací tahových sil se vychází ze vzorců pro výpočet prostorové napjatosti a postup je založen na rovnováze vnějších sil a vzdorujících napětí. Nejprve se určí rameno vnitřních sil v závislosti na průměru kruhového otvoru:

$$r = h - 2 \cdot \frac{t}{2}$$

Kde t je výška krčku a h je výška průřezu.

(Pozn.: Při 80 mm průměru otvoru a 35 mm tloušťce krčků je rameno vnitřních sil (r) 115 mm.)

Síla v tažené ploše (N) je nepřímo úměrná ohybovému momentu (m) a ramenu sil:

$$N = \frac{m}{r} = \frac{0,2 \cdot F}{0,115} = 1,74 \cdot F$$

Napětí v taženém krčku (σ) lze stanovit pomocí síly působící na plochu krčku (A):

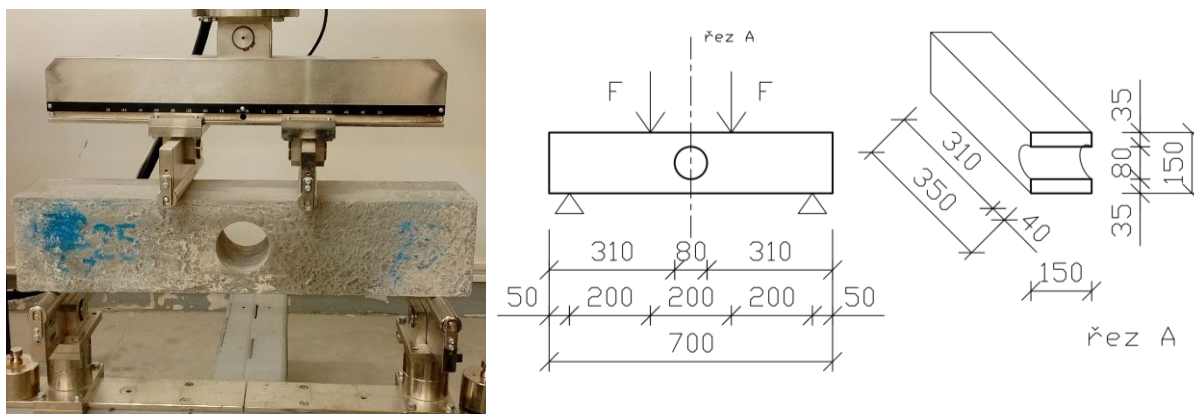
$$\sigma = \frac{N}{A} = \frac{1,47 \cdot F}{0,00525} = 331,43 \cdot F$$

Měření závislosti odolnosti vláknobetonových trámců a průhybu trámce je prováděno obdobně jako u plných normalizovaných trámců bez zářezu. Zatěžování se provádí konstantní rychlostí růstu průhybu uprostřed trámce $0,2 \pm 0,05$ mm / min do průhybu nejméně 4 mm. Průběh zatěžování je průběžně zaznamenáván do diagramů odolnosti průhyb je měřen s přesností na 0,01 mm. Ze získaných diagramů z více měření (šesti pro průkazní zkoušky) se

stanoví diagram průměrné odolnost trámů s otvorem. Z průměrného diagramu se určuje nejvyšší síla, při které vzniká trhlina F_{crack} , která se následně rozdělí na dvě zatěžovací břemena:

$$F = \frac{F_{crack}}{2}$$

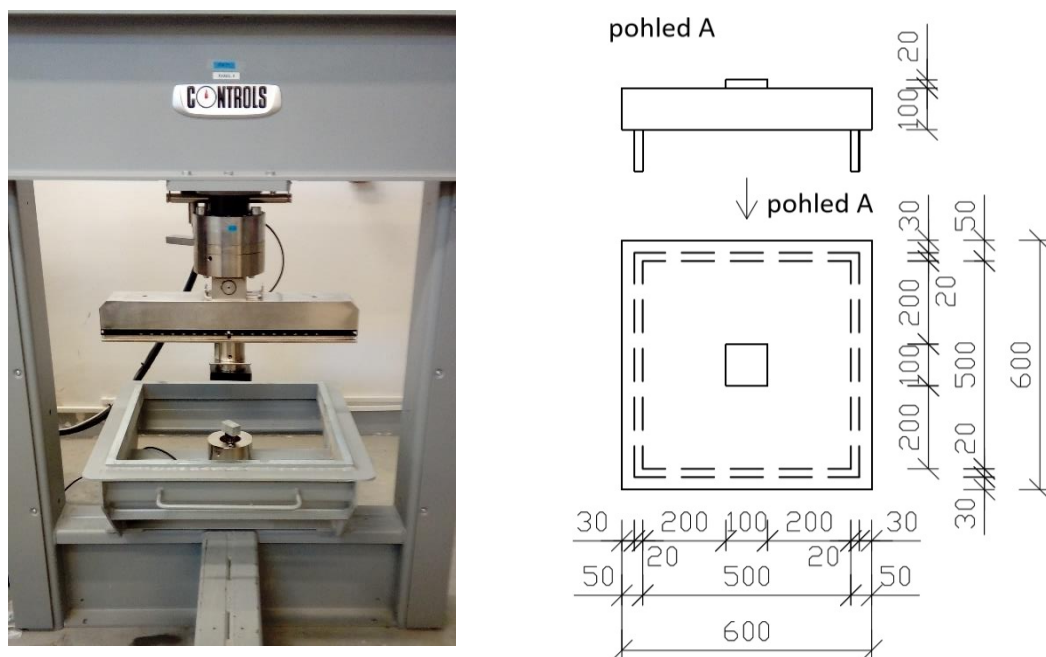
Tato síla v závěru zkoušky vstupuje do výpočtu napětí ve spodním taženém prvku.



Obrázek 12. - Sestavení zatěžovacího zařízení na levé straně a rozměry a uložení trámů na pravé straně, upraveno dle [31]

4.4.4. Odolnost proti proražení, stanovení absorbované energie na deskách

Při stanovování odolnosti proti proražení a kapacity absorbované energie na vláknobetonových deskách se postupovalo dle odpovídající normy pro zkoušení stříkaného betonu ČSN EN 14488-5 [43]. Princip zkoušky spočívá v zatěžování a měření deformací (minimálně do průhybu 30 mm) uprostřed desky (s rozměry 600 x 600 x 100 mm), která je uložena po svém obvodě. Dolní podporový přípravek je tvořen čtvercovým tuhým rámem širokým 20 ± 1 mm s vnitřním volným prostorem 500 ± 2 mm x 500 ± 2 mm. Horní zatěžovací přípravek vycentrovaný na střed horní zatěžované desky, s rozměry 100 ± 1 mm x 100 ± 1 mm a je 20 ± 1 mm tlustý. Vlastní zatěžování je probíhá pomocí řízené deformace ve středu desky s konstantní rychlostí $1 \pm 0,1$ mm/min. Průběh zatěžování tedy závislost zatížení a průhybu je průběžně zaznamenávána do diagramu odolnosti do minimálního průhybu. Ze získaného diagramu se stanoví maximální zatížení s přesností na celé kN a následně se z diagramu odolnosti vypočítá křivka absorbované energie v závislosti na dosaženém průhybu. A na závěr se z této křivky stanoví kapacita absorbované energie, která se nakonec zaokrouhluje na nejbližší 10 J. Z diagramů lze dále vyhodnocovat průběh zatěžování a popisovat šíření trhlin. Sestavení zatěžovacího zařízení a uložení zatěžovaných desek (viz obrázek 13.) jsou zobrazeny na ilustracích dále. Odkazy na další laboratorní výsledky a stručný popis dosažených výsledků prováděných výzkumů jsou uvedeny v závěru práce [44, 45, 46].



Obrázek 13. – Sestavení lisovacího zařízení nalevo a uložení zatěžovaných desek napravo

4.4.5. Zkouška tahové pevnosti

Zkoušky prosté osové tahové pevnosti se obvykle zkouší na tělesech tvaru válce, které mají uprostřed výšky zářez (definované místo porušení). Případně je tahová pevnost zkoušena na krychlích se zářezy klínovým testem, nebo na krychlích bez zářezu při zkouškách v příčném tahu. Optimalizovaná zkouška tahové pevnosti vychází z přípravků pro zkoušky v tahu za ohybu vláknobetonových trámců (viz kap. 4.4.3.4 a 4.4.3.3.) s rozměry 150 x 150 x 700 mm, které jsou vytvarovány do tvaru tzv. dogbone. Normalizované trámce jsou upraveny příčnými a podélnými vložkami, tak aby průběh napjatosti v okolí míst s uložením byl plynulý a z trámce vznikla dvě symetrická tělesa rozdělením na poloviny podél podélné osy. Oblasti a rozměry míst s uložením trámce do přípravku a oblasti uložení byly modelovány pokročilou analýzou MKP (viz literatura [32] detaily rozměrů trámce a uložení viz obrázek 14.).

Problematickým úsekem měření je jako obdobně u tahových zkoušek oblast deformací, která by měla být optimálně uprostřed trámce a deformovat se po délce rovnoměrně bez lokálních singularit materiálu. Obdobě jako u houževnatých materiálů, problémem je stanovení množství trhlin podél křehké matrice vyztužené vlákny. Rozsah a oblast nestability jsou závislé na druhu a typu použitých vláken a jejich objemovém množství či vzájemné kombinace vláken nebo kombinace materiálových struktur (tj.hybridní systémy případně vytvoření superstruktury aj.).

Zkoušku tahové pevnosti provádíme na zkušebním lisu metodou řízené deformace ve středu zkušebního tělesa doplněném o dva snímače podélných deformací. Snímače deformací jsou uloženy na protilehlých površích zkušebního tělesa ve středové oblasti, kde je

předpokládáno deformování tělesa. Rovnoměrné rozložení vnášené tahové síly je zajištěno pomocí lišt z tvrdého dřeva uložených na místa mezi ocelovými úchyty a zkušební těleso. Průběh zatěžování je zaznamenáván do diagramů závislosti působící síly (F) na délkové deformaci (δ) ve středu prvku. Tahovou pevnost při vzniku makrotrhliny ($f_{t,cr}$) stanovenou z diagramů odolnosti určíme ze vztahu:

$$f_{t,cr} = \frac{F_{cr}}{A}$$

Pro stanovení tahové pevnosti v jiných fázích zatěžování před a po vzniku makrotrhliny stanovíme z obdobného vzorce:

$$f_{t,i} = \frac{F_i}{A}$$

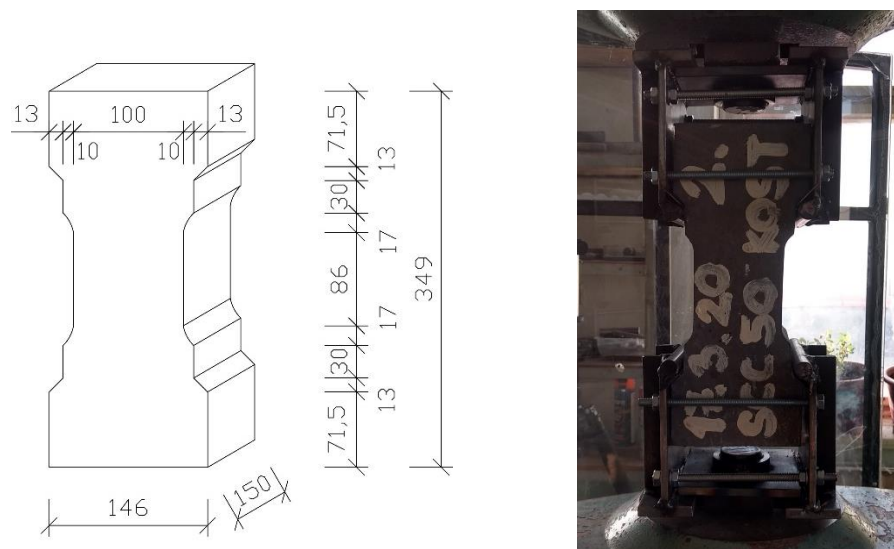
Pokud se zkušební těleso deformuje symetricky, pak neuvažujeme excentrický tah. V případě malých zanedbatelných rozdílů naměřených snímači na bocích tělesa můžeme také uvažovat osový tah a rozdíly v hodnotách průměrovat. Excentrický tah uvažujeme pouze pokud jsou rozdíly v hodnotách na snímačích větší především po vzniku trhliny:

$$f_{t,cr} = \frac{F_{cr}}{A} + \frac{F_{cr} \cdot e}{W} = \frac{F_{cr}}{b \cdot h} \cdot \left(1 + \frac{6 \cdot e}{h}\right)$$

Kde A je plocha oslabeného průřezu 100 x 150 mm, rozměry příčného řezu jsou b a h, excentricita působící síly je e ve směru rozměru příčného řezu h stanovené na základě hodnot deformací na snímačích δ_1 , δ_2 a dle vzorce:

$$e = \frac{h \cdot (\delta_2 - \delta_1)}{6 \cdot (\delta_1 + \delta_2)}$$

Tahovou pevnost stanovíme v MPa (zaokrouhlenou na dvě desetinná místa).



Obrázek 14. - Rozměry trávce na levé straně a úchyty uložení na pravé straně [32]

4.5. Stanovení obsahu kovových vláken ve vzorcích

Stanovení obsahu rozptýlené vláknové kovové výztuže se provádí dle příslušné normy ČSN EN 14721+A1 [47]. Podle této normy lze zjistit obsah vláken dvěma metodami v zatvrdlém i čerstvém stavu betonového vzorku.

Metoda A se zabývá stanovením obsahu vláken na vzorcích v zatvrdlém stavu (zkušební tělesa, jádrové vrty). Dle této metody nejprve stanovíme objem těles. Objem zjistíme měřením a průměrováním naměřených rozměrů (příp. po zjištění objemové hmotnosti zatvrdlého betonu). Vlastní obsah vláken stanovíme destruktivní zkouškou, kdy jsou tělesa rozdrcena a kovová vlákna extrahována pomocí magnetu. Následně se vlákna důkladně očistí a jsou zvážena, tak aby šlo stanovit jejich obsah v předem definovaném objemu.

Pro určení obsahu kovových vláken v čerstvém betonu se postupuje dle metody B. V tomto případě je odebrán čerstvý beton o stanoveném objemu (5 – 10 l), který je následně rozplaven pro lepší extrakci vláken od kameniva na sítu o vhodném velikosti ok. Při použití kovových vláken lze separaci vláken provést pomocí přístroje zobrazeného na obrázku 15. níže, kde jsou vlákna průběžně separována pomocí magnetu. Po odseparování vláken jsou vlákna osušena a zvážena pro stanovení jejich obsahu v odebraném objemu čerstvého betonu. Na závěr zkoušek jsou obsahy vláken přepočítány na kilogram vláken na 1 metr krychlový betonu.

Zkoušky stanovení obsahu vláken slouží k ověření kvality výroby během kontinuální betonáže nebo na hotových konstrukcích (jádrové odvrtý). Případně zkoušky slouží k ověření homogenity během odebírání z jednoho autodomíchávače, kdy jsou prováděny tři odběry vzorků na počátku v průběhu a na konci dodávky vláknobetonu.



Obrázek 15. – Přípravek pro separaci kovových vláken z čerstvého betonu

EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Tato diplomová práce byla realizována s využitím technologií Výukového a výzkumného centra v dopravě v Doubravících, Betonárny CEMEX v Pardubicích – Semtíně a Výrobní prefabrikátů PREFA Nový Bydžov (M – SILNICE a.s.).

Práce byla zpracována v souvislosti s řešením vědeckovýzkumného projektu Univerzity Pardubice č. SGS_2019_010, SGS_2020_009, SGS_2021_010.

5. OPTIMALIZACE SLOŽENÍ BETONU

Optimalizace složení SFRSCC spočívala ve stanovení dostatečného množství přidaných ocelových vláken (Dramix 3D 45/50 BL viz příloha A.) do zbytkového ČB SCC (viz zkoušky čerstvého betonu kapitoly 6.1, 6.2., 6.3.). Tak aby bylo dosaženo požadovaných vlastností zpracovatelnosti samozhutnitelných betonů a po zatvrdnutí pevnostních charakteristik drátkobetonů. Tedy optimalizace vzhledem k množství vláken a pro srovnání s ostatními normami a metodikami. Které se zabývají stanovením tahových pevností či přetvárných charakteristik vláknobetonových trámců či kapacity absorbované energie desek při zatěžování. Cílem bylo dokonalé obalení ocelových vláken, tak aby byl vytvořen skelet s minimální mezerovitostí a zároveň byly zachovány vlastnosti čerstvého samozhutnitelného drátkobetonu. Ocelová vlákna byla přidávána v rozsazích 0, 25, 50, 75 kg ocelových vláken na 1 m³ betonu.

Optimalizace nespočívala ve zlepšování složení čerstvého betonu (přídavkem cementu, jemnozrnných příměsí či jiné úpravy receptury samozhutnitelného betonu například úpravou křivky zrnitosti), ale ve sledování zhoršujících se reologických vlastností SFRSCC. Při vyšším obsahu drátků je již předem předpokládána mírně zhoršená zpracovatelnost a ovlivnění cementové matrice drátkovou rozptýlenou výztuží. Cílem bylo stanovení optimálního podílu cementového tmelu a rozptýlené drátkové výztuže tak, aby uvnitř kompozitního systému došlo k vytvoření superstruktur při krystalizaci na cementový kámen a dalších struktur souvisejících se vzájemným spolupůsobením s drátkovou výztuží [48]. Drátková výztuž má zajistit další vyztužení makrogranulárního systému a omezit vlivy autogenního smršťování, ale nemá příliš zhoršit tixotropní vlastnosti čerstvého SFRSCC.

Beton bez přídavku ocelových vláken byl určen k ověření samozhutnitelných vlastností v čerstvém stavu a po zatvrdnutí pro stanovení dalších vlastností nevyztuženého betonu. Nevyztužený beton také sloužil pro srovnání reologických vlastností betonové matrice neovlivněné drátkovou výztuží s maticí ovlivněnou drátkem. Především pro srovnání vlastností při zvyšujícím se podílu kovové drátkové rozptýlené výztuže.

6. ZKOUŠENÍ ČERSTVÉHO BETONU

Zkoušky čerstvého betonu byly prováděny externě ve výrobně prefabrikátů PREFA v Novém Bydžově (Laboratoř). Zkoušky byly provedeny hned po dodání SCC do výroby před vlastním vybetonováním předepjatých mostních nosníků. Odebíraný byl zbytkový čerstvý samozhutnitelný beton (SF2), určený pro výrobu mostních nosníků MS – I, pevnostní třídy C 45/55 a se stupněm vlivu prostředí XF2 (zkoušky zbytkového betonu viz kap. 6.1., 6.2., 6.3.).

Přebytky čerstvého betonu byly odebírány postupně během výroby mostních nosníků. Ze zbytkového samozhutnitelného betonu byla průběžně vyráběna tělesa bez rozptýlené kovové vláknové výztuže a tělesa s přidavkem podílů výztužných kovových drátků. Následně po dodání nevyztuženého čerstvého betonu byly přebytky betonu váženy a do jejich objemu byly vmíseny příslušné podíly kovových vláken (Dramix 3D 45/50 BL viz příloha A. v rozsazích od 0, 25, 50, 75 kg drátků na 1 m³ betonu). Vyráběna byla zkušební tělesa pro zkoušky zatvrdlého betonu (viz kapitola 7.). Vždy následující den po vybetonování zkušebních těles došlo k odbednění a očištění forem. Ihned po odformování těles byla namočena a ošetřována pod folií při vlastní vlhkosti (viz obrázek 16.). V průběhu následujícího týdne byla zabalená zkušební tělesa převezena do prostor VVCD (viz obrázek 16.), kde byla ošetřována při laboratorní teplotě. Součástí dokumentace je i kontrolní a zkušební plán (KZP) s harmonogramem prováděných prací (výroba a zkoušení zkušebních těles) viz příloha E.

Při výrobě a odběru čerstvého betonu bylo zapotřebí vybavení dostupné ve výrobně prefabrikátů PREFA Nový Bydžov (M-SILNICE a.s.). Především jde o materiál potřebný při výrobě a zpracování SCC (písek, jednotlivé frakce kameniva, cement, přísady, příměsi, voda, stavební chemie, vybavení laboratoří či vybavení potřebné při výrobě a dopravě materiálů). Další vybavení pro výrobu zkušebních těles (formy pro výrobu zkušebních těles a další vybavení) bylo zapůjčeno z betonárny CEMEX v Pardubicích a z VVCD Univerzity Pardubice případně z ČVUT v Praze (vločky pro výrobu přesně tvarovaných hranolů tzv.kostí).



Obrázek 16. – Ošetřování zkušebních těles (vlevo) a převoz na vlečném vozíku (napravo)

6.1. Objemová hmotnost

Zkouška objemové hmotnosti čerstvého betonu byla prováděna ke kontrole stavu zbytkového betonu při dodání před domícháním drátkové výztuže. Objemová hmotnost a ostatní zkoušky čerstvého samozhutnitelného betonu byly stanoveny v rámci druhého výrobního dne 12.7.2020. Ke zjištění objemové hmotnosti čerstvého betonu byla použita spodní část z tlakového hrnce určeného ke zjištění obsahu vzduchu v čerstvém betonu. Nádoba s hmotností $m_1 = 4,32$ kg a objemem $V = 0,00784$ m³ zjištěným pomocí přepočtu objemu vody 998 kg/m³ při 20 °C. Tlakový hrnc byl navlhčen a naplněn samozhutnitelným betonem najednou bez zhutňování. Pouze se poklepem gumovou paličkou na boky nádoby odstranily případné velké bubliny a volný povrch byl urovnán hladítkem na definovaný objem. Poté byla opět nádoba zvážena $m_2 = 22,02$ kg a v závěru zkoušky byla vypočítána objemová hmotnost čerstvého betonu (D) zaokrouhlená na celé desítky kg/m³.

$$D = \frac{m_2 - m_1}{V} = \frac{22,02 - 4,32}{0,00784} = 2257,65 \cong \mathbf{2260 \text{ kg/m}^3}$$

6.2. Obsah vzduchu

Zkouška obsahu vzduchu byla prováděna následně po zjištění objemové hmotnosti čerstvého betonu. Zkouška obsahu vzduchu čerstvého betonu byla stanovena pro zjištění provzdušnění zbytkového samozhutnitelného betonu při dodání a před domícháním drátků. Měrná nádoba byla naplněna SCC a připravena již z předcházející zkoušky objemové hmotnosti. K nádobě bylo přiloženo horní víko tlakového hrnce a po dotěsnění byly vnitřní prostory přípravku vyplněny vodou pomocí stříčky a pomocných ventilů. Následně po natlakování a kalibraci přístroje byla změřena hodnota obsahu vzduchu cca **1 %**.

6.3. Sednutí – rozlitím

Pro ověření konzistence zbytkového betonu při dodání a před vmísením výztužných drátků byla využita zkouška sednutí rozlitím vhodná pro samozhutnitelné betony. Zkouška byla prováděna ihned po dodání čerstvého zbytkového betonu. Abramsův kužel byl po navlhčení vycentrován na podkladní desku a naplněn najednou bez zhutňování. Volný povrch byl urovnán a přebytky betonu byly odstraněny. Zároveň se zdvihnutím kužele byly spuštěny stopky, které byly zastaveny při dotečení betonu k hranici **T₅₀₀ = 2,85 s**. Následně po úplném dotečení betonu byla změřena hodnota rozlití ve dvou na sebe kolmých hlavních směrech **650x650 mm**. Na závěr byla stanovena hodnota konzistence betonu na základě rozlití **SF1** a na základě času dotečení k hranici 500 mm **VS2**. Po vmísení požadovaných objemů rozptýlené drátkové výztuže nebyla již konzistence samozhutnitelného drátkobetonu výrazně zhoršena.

7. ZKOUŠENÍ ZTVRDLÉHO BETONU

Zkoušky ztvrdlého betonu byly provedeny v rámci Univerzity Pardubice (VVCD) a akreditované laboratoře betonárny CEMEX (Pardubice – Semtín). Harmonogram prací byl daný v závislosti na časových možnostech akreditované laboratoře, podle dostupnosti potřebného vybavení a zaměstnanců (viz KZP příloha E.). Zkoušky se tedy stanovovaly v různém charakteristickém stáří zkušebních těles a odchylky byly i v délce ošetřování. Vzhledem k nutnosti provádět jádrové odvrty kruhových singularit na zkušebních hranolech pro oddělení napjatosti v prvku (viz obrázek 17.). A potřebě označení zkušebních těles v místech odřezání krychlí (na koncích hranolů). Krychle byly určeny pro stanovení prosté pevnosti v tlaku, které se stanovili následně po zkouškách pevnosti v tahu za ohybu. Odchylky od normového postupu jsou vždy uvedeny v poznámce u jednotlivých zkušebních těles. Stejně tak jsou i vedena data o výrobě, charakteristickém stáří a hodnoty týkající se prosté pevnosti v tlaku, které byly prováděny vždy v návaznosti na ostatní zkoušky zatvrdlého betonu (vzhledem k různému charakteristickému stáří zkušebních těles při jejich zkoušení).

Zkoušení zatvrdlého betonu bylo naplánováno kolem 66 a 88 dnů charakteristického stáří pro drátkobetonové desky na stanovení kapacity absorbované energie. Dále byly zkoušeny betonové a drátkobetonové hranoly a přesně tvarované hranoly určené ke zkoušení tahových vlastností. Které byly zkoušeny v různém charakteristickém stáří vzhledem k jejich postupné výrobě a posloupnosti zkoušek zatvrdlého betonu. Prostá pevnost v tlaku byla stanovena na vybetonovaných kostkách následně po zkoušení drátkobetonových desek. Při zkoušení tvarovaných hranolů byla prostá pevnost zkoušena na kostkách, které byly vytvořeny po zkoušení tahu za ohybu ze zbytků hranolů odřezáním kotoučovou pilou na beton. Objemová hmotnost zatvrdlého betonu a drátkobetonu byla stanovena na válcích určených ke stanovení statického modulu pružnosti před zkoušením tahové pevnosti přesně tvarovaných hranolů.



Obrázek 17. – Jádrové odvrtávání (vlevo) a odvrtané hranoly (napravo)

7.1. Objemová hmotnost

Objemová hmotnost ztvrdlého betonu a drátkobetonu byla stanovena po zkoušení pevností tahu za ohybu a před zkoušením osových tahových pevností. Zkušebními tělesy byly válce s rozměry cca $d = 150$ mm; $v = 300$ mm. Zkouška byla prováděna s vlhkostí při dodání, pouze došlo k přerušení ošetřování zkušebních těles během jejich vážení a měření. Rozměry zkušebních těles byly měřeny posuvným měřítkem a průměrovány ze tří hodnot. Hmotnost byla zjištěna kalibrovanými váhami s přesností ± 20 g a také je dána průměrem hmotností tří těles. Pro zjištění objemové hmotnosti pro jednotlivá procenta vyztužení byla vždy využita tři tělesa, ze kterých byla určena průměrná výsledná hodnota. Válce byly následně využity pro zkoušky stanovení modulu pružnosti a přetvárnosti. Zkoušky objemové hmotnosti zatvrdlého betonu a drátkobetonu byly prováděny podle příslušné normy [25] (viz. kapitola 4.4.1.). Objemová hmotnost byla stanovena pro nevyztužený beton a také pro vyztužený beton dle obsahu kovových drátků (0, 25, 50, 75 kg/m³) v jednotlivých vzorcích drátkobetonu.

Druh zkoušky:	Objemová hmotnost ztvrdlého betonu		
Datum výroby:	4. 7. 2020	Procento vyztužení:	25 kg/m³
Datum zkoušení:	8. 4. 2020	Charakteristické stáří:	278 dnů
Rozměry tělesa:	$d = 150$ mm; $v = 300$ mm	Hmotnost:	12,16 kg
Objem tělesa:	0,0053 m ³	Objemová hmotnost:	2290 kg/m³

Tabulka 1. – Objemová hmotnost zatvrdlého betonu s obsahem drátkové výztuže 25 kg/m³

Druh zkoušky:	Objemová hmotnost ztvrdlého betonu		
Datum výroby:	12. 7. 2020	Procento vyztužení:	50 kg/m³
Datum zkoušení:	8. 4. 2020	Charakteristické stáří:	270 dnů
Rozměry tělesa:	$d = 150$ mm; $v = 300$ mm	Hmotnost:	12,40 kg
Objem tělesa:	0,0053 m ³	Objemová hmotnost:	2340 kg/m³

Tabulka 2. – Objemová hmotnost zatvrdlého betonu s obsahem drátkové výztuže 50 kg/m³

Druh zkoušky:	Objemová hmotnost ztvrdlého betonu		
Datum výroby:	19. 9. 2020	Procento vyztužení:	75 kg/m³
Datum zkoušení:	8. 4. 2020	Charakteristické stáří:	201 dnů
Rozměry tělesa:	$d = 150$ mm; $v = 300$ mm	Hmotnost:	12,70 kg
Objem tělesa:	0,0053 m ³	Objemová hmotnost:	2400 kg/m³

Tabulka 3. – Objemová hmotnost zatvrdlého betonu s obsahem drátkové výztuže 75 kg/m³

Druh zkoušky:	Objemová hmotnost ztvrdlého betonu		
Datum výroby:	27. 9. 2020	Procento vyztužení:	0 kg/m³
Datum zkoušení:	8. 4. 2020	Charakteristické stáří:	193 dnů
Rozměry tělesa:	d =150 mm; v =300 mm	Hmotnost:	11,95 kg
Objem tělesa:	0,0053 m ³	Objemová hmotnost:	2260 kg/m³

Tabulka 4. – Objemová hmotnost zatvrdlého betonu s obsahem drátkové výztuže 0 kg/m³

Procento vyztužení:	0 kg/m³	25 kg/m³	50 kg/m³	75 kg/m³
Průměrná hmotnost válce:	11,95 kg	12,16 kg	12,40 kg	12,70 kg
Objemová hmotnost:	2260 kg/m³	2290 kg/m³	2340 kg/m³	2400 kg/m³

Tabulka 5. – objemová hmotnost ztvrdlého betonu podle obsahu drátkové výztuže

7.2. Orientace drátků a segregace složek betonu

Při jednotlivých odběrech zbytkového betonu nedocházelo k výrazné sedimentaci betonu či segregaci jednotlivých složek. Výroba byla konzistentní v průběhu všech výrobních dnů a konzistence betonu byla vždy obdobná. Po vmísení drátků se **netvořily shluky tzv. ježky**, ale docházelo k mírné sedimentaci drátků u dna nádoby. **Orientace drátků byla všesměrná**, jelikož nedocházelo k jejich usměrňování během plnění forem a zhutňování (SCC). Rovnoměrnost rozptýlení drátkové výztuže byla způsobena recepturou SCC. Kdy je až 80 % objemu betonu tvořeno kamenivem, které je plnivem a vytváří skelet s minimální mezerovitostí. Poloha drátků byla omezena pouze okraji zkušebních těles, jinak byly rovnoměrně rozprostřeny v celém objemu. **Větší obsah ocelových drátků (75 kg/m³) způsobil nakypření betonu a větší obsah vzduchových pórů** což bylo způsobeno nevyužitím stavební chemie upravující smáčivost drátků či obsah vzduchu. Sedimentace drátků či segregace složek betou byla ověřena po zkouškách odolnosti proti výbuchu deskových těles (viz obrázek 18.).

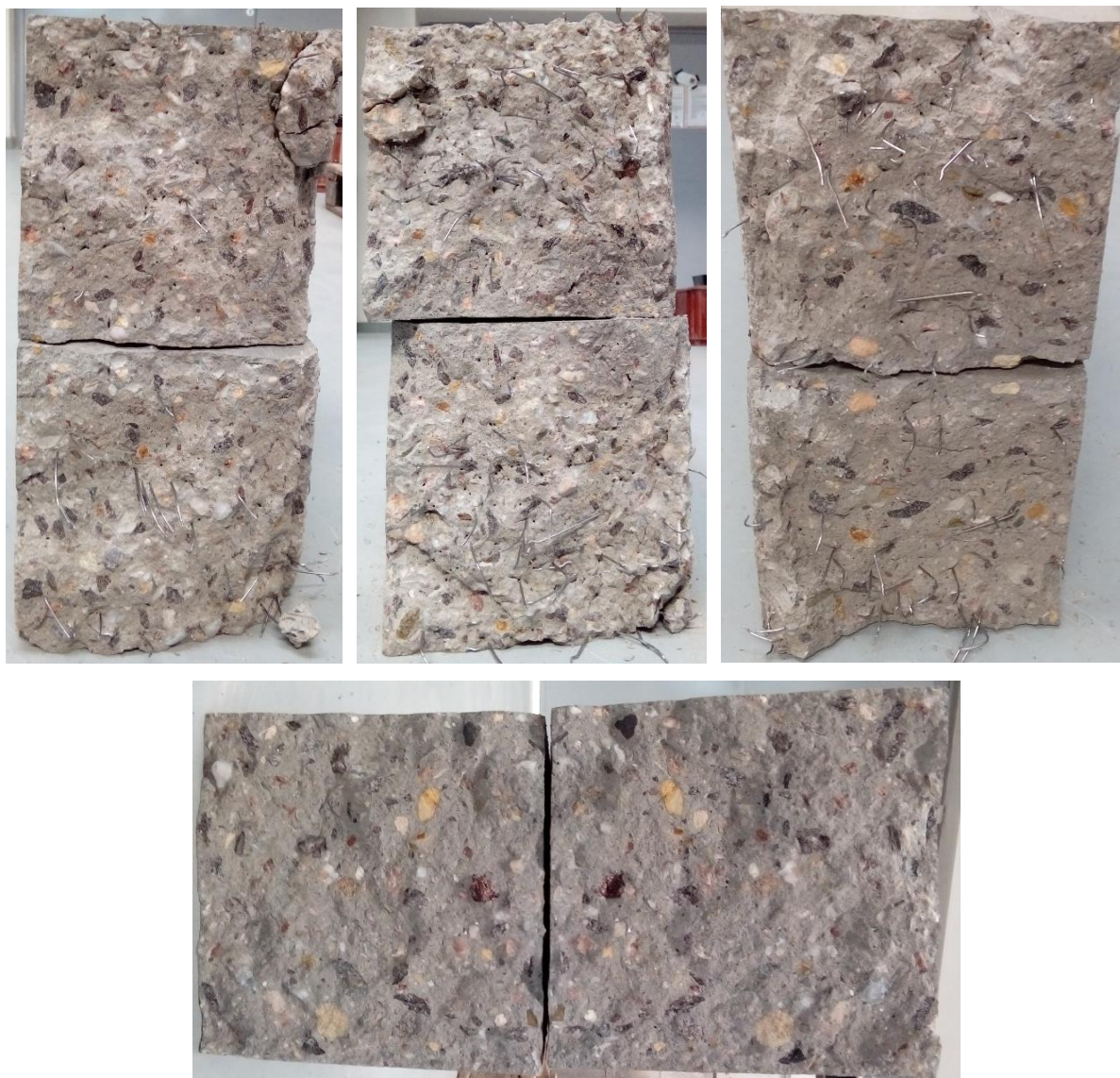


Obrázek 18. – Detail poškození po zkouškách desek na odolnost proti výbuchu viz příloha C.

7.3. Rovnoměrnost rozptýlení drátkové výztuže

Rovnoměrnost rozptýlení drátkové výztuže byla ověřena následně po provedení zkoušek tahu za ohybu bez zářezu. Rozlomené zkušební hranoly byly opětovně zatěžovány v místě trhliny do doby, dokud nedošlo k rozdělení hranolů na dvě části. Po oddělení částí hranolů byly hranoly přeloženy stranou volné hladiny betonu k sobě. Jednotlivé hranoly byly zdokumentovány na obrázcích níže (viz obrázek 19.). Dole je snímek nevyztuženého hranolu, v pravém horním rohu je snímek hranolu vyztuženého 25 kg/m³, uprostřed je snímek hranolu vyztuženého 50 kg/m³ a v pravém horním rohu je snímek hranolu vyztuženého drátky 75 kg/m³

U všech vyztužených hranolů došlo k **mírné sedimentaci drátků** u spodní plochy hranolu a menší koncentraci drátků u horního volného povrchu betonu. K sedimentaci drátků došlo po uložení drátkobetonu do forem, kdy těžší kamenivo sedalo ke dnu nádoby a strhávalo sebou část drátků, naopak jemnější podíly byly vyplavovány k volnému povrchu drátkobetonu.



Obrázek 19. – Rovnoměrnost rozptýlení drátkové výztuže

7.4. Pevnost v prostém tlaku

Zkoušky pevnosti v prostém tlaku byly stanovovány průběžně k ostatním zkouškám ztvrdlého betonu vzhledem k různému charakteristickému stáří těles při jejich zkoušení. Zkoušky byly prováděny na lisovacím zařízení v prostorách Univerzity Pardubice (VVCD). Pevnosti byly stanoveny především při zkouškách absorbované energie drátkobetonových desek, dále ke zkouškám pevností v tahu za ohybu a pevnosti v osovém tahu. Zkoušeny byly vyztužené vybetonované krychle 150 x 150 x 150 mm při zkouškách absorbované energie a při zkoušení tahových vlastností byla prostá pevnost stanovena i na nevyztužených krychlích. Prostá pevnost byla vždy zjišťována na třech vzorcích a výsledná hodnota byla dána jako aritmetický průměr. Rozměry těles byly měřeny posuvným měřítkem a výsledné hodnoty jsou průměrem ze tří hodnot. Zkoušení pevnosti v prostém tlaku bylo prováděno dle příslušné normy na zkoušení ztvrdlého betonu [26] (viz kapitola 4.4.2.). Jednotlivé výsledky jsou členěny podle množství přidávaných výztužných kovových drátků Dramix 3D 45/50 BL (viz příloha A.).

Druh zkoušky:	Pevnost v prostém tlaku		
Datum výroby:	4. 7. 2020	Procento vyztužení:	25 kg/m ³
Datum zkoušení:	10. 9. 2020	Charakteristické stáří:	68 dnů
Označení tělesa:	4.7./25/1	Kus / Celkem:	1 / 3
Rozměry tělesa:	150x150x150 mm	Porušení:	Vyhovující
Působící síla / napětí při porušení:	1677,825 kN		74,5 MPa
Datum výroby:	4. 7. 2020	Procento vyztužení:	25 kg/m ³
Datum zkoušení:	10. 9. 2020	Charakteristické stáří:	68 dnů
Označení tělesa:	4.7./25/2	Kus / Celkem:	2 / 3
Rozměry tělesa:	150x150x150 mm	Porušení:	Vyhovující
Působící síla / napětí při porušení:	1623,736 kN		72,2 MPa
Datum výroby:	4. 7. 2020	Procento vyztužení:	25 kg/m ³
Datum zkoušení:	10. 9. 2020	Charakteristické stáří:	68 dnů
Označení tělesa:	4.7./25/3	Kus / Celkem:	3 / 3
Rozměry tělesa:	150x150x150 mm	Porušení:	Vyhovující
Působící síla / napětí při porušení:	1634,922 kN		72,7 MPa
Průměrná působící síla / napětí při porušení:	1645,494 kN		73,1 MPa

Tabulka 6. – Pevnost v prostém tlaku SCC s obsahem drátkové výztuže 25 kg/m³

Druh zkoušky:	Pevnost v prostém tlaku		
Datum výroby:	12. 7. 2020	Procento vyztužení:	50 kg/m ³
Datum zkoušení:	10. 9. 2020	Charakteristické stáří:	61 dnů
Označení tělesa:	12.7./50/1	Kus / Celkem:	1 / 3
Rozměry tělesa:	150x150x150 mm	Porušení:	Vyhovující
Působící síla / napětí při porušení:	1574,131 kN		70,0 MPa
Datum výroby:	12. 7. 2020	Procento vyztužení:	50 kg/m ³
Datum zkoušení:	10. 9. 2020	Charakteristické stáří:	61 dnů
Označení tělesa:	12.7./50/2	Kus / Celkem:	2 / 3
Rozměry tělesa:	150x150x150 mm	Porušení:	Vyhovující
Působící síla / napětí při porušení:	1423,988 kN		63,3 MPa
Datum výroby:	12. 7. 2020	Procento vyztužení:	50 kg/m ³
Datum zkoušení:	10. 9. 2020	Charakteristické stáří:	61 dnů
Označení tělesa:	12.7./50/3	Kus / Celkem:	3 / 3
Rozměry tělesa:	150x150x150 mm	Porušení:	Vyhovující
Působící síla / napětí při porušení:	1441,467 kN		64,1 MPa
Průměrná působící síla / napětí při porušení:	1479,862 kN		65,8 MPa

Tabulka 7. – Pevnost v prostém tlaku SCC s obsahem drátkové vyztuže 50 kg/m³

Druh zkoušky:	Pevnost v prostém tlaku		
Datum výroby:	19. 9. 2020	Procento vyztužení:	75 kg/m ³
Datum zkoušení:	16. 12. 2020	Charakteristické stáří:	88 dnů
Označení tělesa:	19.9./75/1	Kus / Celkem:	1 / 3
Rozměry tělesa:	150x150x150 mm	Porušení:	Vyhovující
Působící síla / napětí při porušení:	1764,423 kN		78,4 MPa
Datum výroby:	19. 9. 2020	Procento vyztužení:	75 kg/m ³
Datum zkoušení:	16. 12. 2020	Charakteristické stáří:	88 dnů
Označení tělesa:	19.9./75/2	Kus / Celkem:	2 / 3
Rozměry tělesa:	150x150x150 mm	Porušení:	Vyhovující
Působící síla / napětí při porušení:	1837,863 kN		81,7 MPa

Datum výroby:	19. 9. 2020	Procento vyztužení:	75 kg/m ³
Datum zkoušení:	16. 12. 2020	Charakteristické stáří:	88 dnů
Označení tělesa:	19.9./75/3	Kus / Celkem:	3 / 3
Rozměry tělesa:	150x150x150 mm	Porušení:	Vyhovující
Působící síla / napětí při porušení:		1799,785 kN	80,0 MPa
Průměrná působící síla / napětí při porušení:		1800,690 kN	80,0 MPa

Tabulka 8. – Pevnost v prostém tlaku SCC s obsahem drátkové výztuže 75 kg/m³

Druh zkoušky:	Pevnost v prostém tlaku		
Datum výroby:	27. 9. 2020	Procento vyztužení:	0 kg/m ³
Datum zkoušení:	8. 4. 2021	Charakteristické stáří:	193 dnů
Označení tělesa:	27.9./0/1	Kus / Celkem:	1 / 3
Rozměry tělesa:	150x150x150 mm	Porušení:	Vyhovující
Působící síla / napětí při porušení:		1830,512 kN	81,4 MPa
Datum výroby:	27. 9. 2020	Procento vyztužení:	0 kg/m ³
Datum zkoušení:	8. 4. 2021	Charakteristické stáří:	193 dnů
Označení tělesa:	27.9./0/2	Kus / Celkem:	2 / 3
Rozměry tělesa:	150x150x150 mm	Porušení:	Vyhovující
Působící síla / napětí při porušení:		1771,371 kN	78,7 MPa
Datum výroby:	27. 9. 2020	Procento vyztužení:	0 kg/m ³
Datum zkoušení:	8. 4. 2021	Charakteristické stáří:	193 dnů
Označení tělesa:	27.9./0/3	Kus / Celkem:	3 / 3
Rozměry tělesa:	150x150x150 mm	Porušení:	Vyhovující
Působící síla / napětí při porušení:		1796,313 kN	79,8 MPa
Průměrná působící síla / napětí při porušení:		1799,399 kN	80,0 MPa

Tabulka 9. – Pevnost v prostém tlaku SCC bez obsahu drátkové výztuže

Procento vyztužení:	0 kg/m³	25 kg/m³	50 kg/m³	75 kg/m³
Průměrná působící síla:	1799,399 kN	1645,494 kN	1479,862 kN	1800,690 kN
Napětí při porušení:	80,0 MPa	73,1 MPa	65,8 MPa	80,0 MPa

Tabulka 10. – Pevnost v prostém tlaku SCC podle obsahu drátkové výztuže

8. ZKOUŠENÍ DLE NOVÉ METODIKY

Zkoušení bylo prováděno podle nově navrhovaných metodik fakulty stavební ČVUT v Praze pro stanovení tahových pevností betonu a vláknobetonu. Jedná se výzkum k určení čistého tahu při zkoušce pevnosti v tahu ohybem (čtyřbodová), kde jsou zkušební tělesa opatřena kruhovým vývrtem [30] (viz Kapitola 4.4.3.4.). Otvor slouží k oddělení napjatosti v krčících a určení tahové pevnosti ve spodní tažené oblasti. Pro výstižnější porovnání výsledků byla zkoušena nevyztužená i vyztužená (dělené podle objemových podílů kovových výztužných drátků 0, 25, 50, 75 kg/m³). Dále polovina tělesa byla bez kruhových vývrtů pro další srovnání chování zkušebních prvků při zatěžování.

Další optimalizovaná návrhová metodika (ČVUT FSv) se zabývá stanovením osového tahu betonu a vláknobetonu na zkušebních hranolech s třístupňovým místem oslabení tzv. dog bone [32] a optimalizovaným uložením zkušebních těles (viz Kapitola 4.4.5.). Zkoušena byla tělesa, která byla také rozdělena dle jednotlivých podílů přidávaných výztužných drátků 0, 25, 50, 75 kg/m³ přidávaných do receptury SCC. Diagramy odolnosti zkušebních těles sloužily pro srovnávání jednotlivých procent vyztužení. Chování betonu a drátkobetonu sloužilo dále při porovnávání různých druhů zatěžování a zkoušek.

8.1. Pevnost v tahu ohybem – čtyřbodová, kruhová singularita

Zkušební tělesa byla ošetřována pod fólií při vlastní vlhkosti až do destruktivního zkoušení hranolů. Ošetřování bylo přerušeno pouze dne 8. 10. 2020 vzhledem k nutnosti provést jádrové vývrty. Následně po odvrtání kruhových otvorů ve středové části hranolů byla tělesa opět zabalena a dále ošetřována pod fólií. Zkoušení hranolů s kruhovými vývrty probíhalo dle navrhované zkušební metodiky [30] s jedinou odchylkou od metodikou navrženého postupu (viz Kapitola 4.4.3.4.). Odchylka byla v rychlosti zatěžování zkušebních těles, která byla zvolena dvakrát vyšší tedy $0,4 \pm 0,05$ mm / min a byla dána technickými možnostmi lisovacího zařízení (citlivostí lineárního snímače přetvoření). Hranoly byly testovány na lisovacím rámu s řídicí jednotkou od výrobce Controls s rozsahem až 350 kN. Zkoušky těles probíhaly průběžně dle časových možností akreditované laboratoře betonárny CEMEX v Pardubicích. Průběh příprav a postup zkoušení je zanesen v harmonogramu prováděných činností, který je součástí kontrolního a zkušebního plánu (viz příloha E.). Všechny prováděné činnosti byly průběžně zaznamenávány a jsou podloženy vlastní fotodokumentací. Průměrné hodnoty síly či průhybu při porušení nebo napětí v taženém prvku či zbytkové síly dané na základě tří vzorků jsou rozděleny podle množství ocelových drátků. A společně s charakterem porušení těles jsou uvedeny v závěru práce (viz kapitola 10.).

8.1.1. Obsah kovových drátků ve vzorcích 25 kg/m³

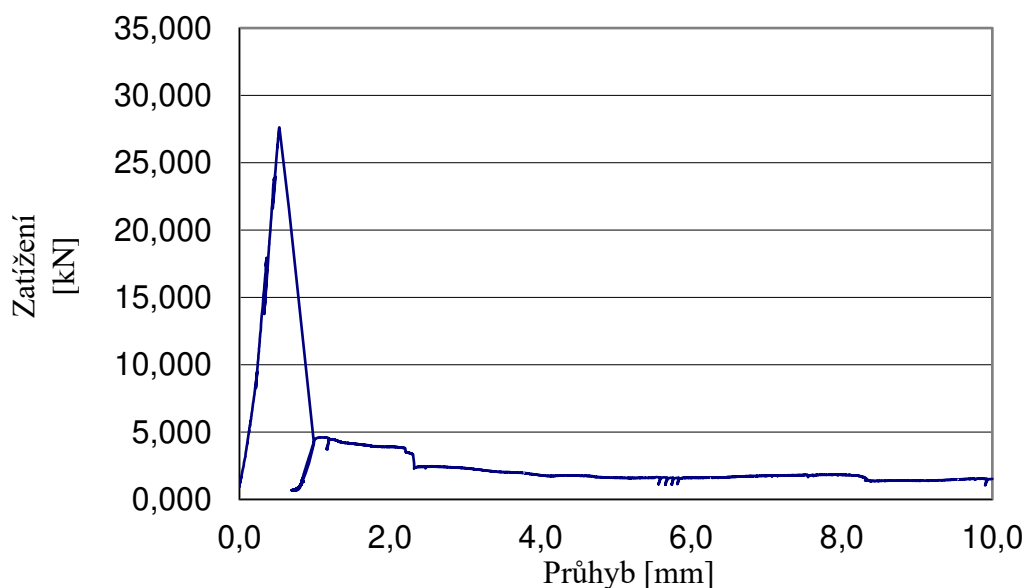
Druh zkoušky:	Pevnost v tahu ohybem – čtyřbodová, kruhová singularita		
Norma:	Návrhová nová metodika		
Datum výroby:	4. 7. 2020	Procento vyztužení:	25 kg/m ³
Datum zkoušení:	11. 3. 2021	Charakteristické stáří:	250 dnů
Označení tělesa:	4.7./25/1	Kus / Celkem:	1 / 3
Rozměry tělesa:	150x150x700 mm	Pevnost v tlaku:	73,1 MPa
Síla při porušení / Průhyb při porušení:	27,627 kN		0,5 mm
Napětí v taženém prvku / Zbytková síla:	4,578 MPa		1,520 kN

Pozn.: Pevnost v prostém tlaku byla stanovena v 68 dnech charakteristického stáří těles.

Fotodokumentace:



Diagram odolnosti:



Tabulka 11. – Pevnost v tahu ohybem čtyřbodová, singularita 25 kg/m³ vzorek 1/3

Druh zkoušky: Norma:	Pevnost v tahu ohybem – čtyřbodová, kruhová singularita Návrhová nová metodika		
Datum výroby:	4. 7. 2020	Procento vyztužení:	25 kg/m ³
Datum zkoušení:	11. 3. 2021	Charakteristické stáří:	250 dnů
Označení tělesa:	4.7./25/2	Kus / Celkem:	2 / 3
Rozměry tělesa:	150x150x700 mm	Pevnost v tlaku:	73,1 MPa
Síla při porušení / Průhyb při porušení:	31,314 kN		0,6 mm
Napětí v taženém prvku / Zbytková síla:	5,189 MPa		2,704 kN

Pozn.: Pevnost v prostém tlaku byla stanovena v 68 dnech charakteristického stáří těles.

Fotodokumentace:

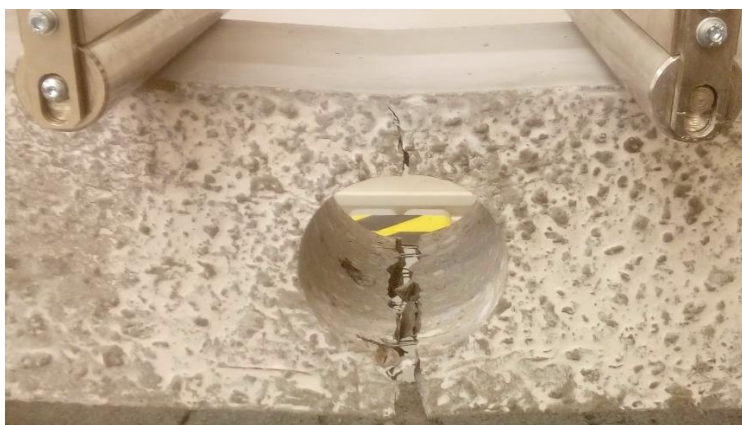
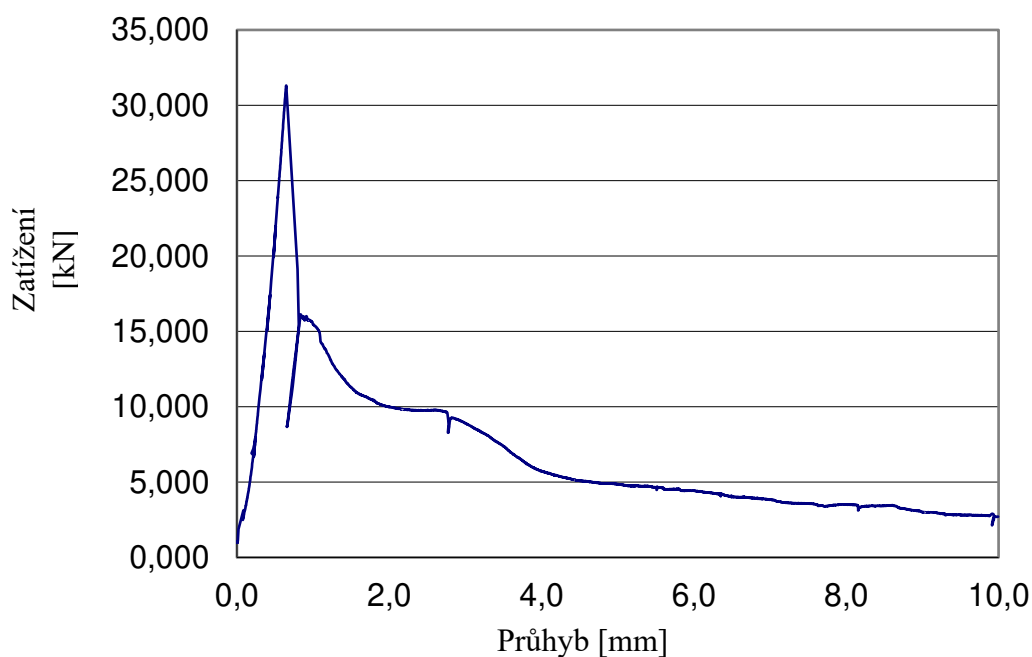


Diagram odolnosti:



Tabulka 12. – Pevnost v tahu ohybem čtyřbodová, singularita 25 kg/m³ vzorek 2/3

Druh zkoušky: Norma:	Pevnost v tahu ohybem – čtyřbodová, kruhová singularita Návrhová nová metodika		
Datum výroby:	4. 7. 2020	Procento vyztužení:	25 kg/m ³
Datum zkoušení:	11. 3. 2021	Charakteristické stáří:	250 dnů
Označení tělesa:	4.7./25/3	Kus / Celkem:	3 / 3
Rozměry tělesa:	150x150x700 mm	Pevnost v tlaku:	73,1 MPa
Síla při porušení / Průhyb při porušení:	33,120 kN		0,7 mm
Napětí v taženém prvku / Zbytková síla:	5,488 MPa		0,717 kN

Pozn.: Pevnost v prostém tlaku byla stanovena v 68 dnech charakteristického stáří těles.

Fotodokumentace:

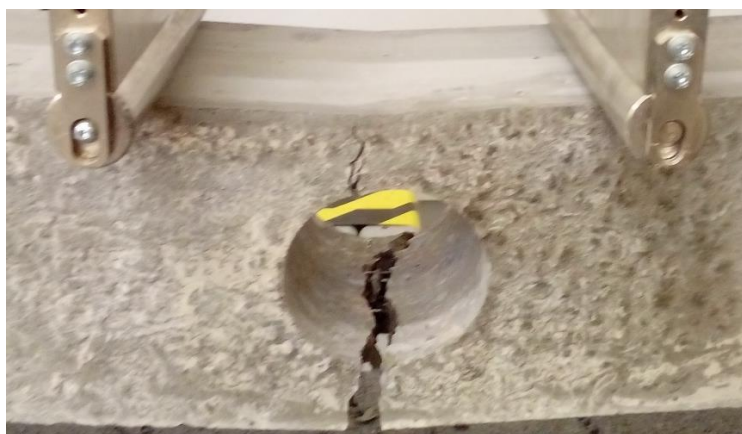
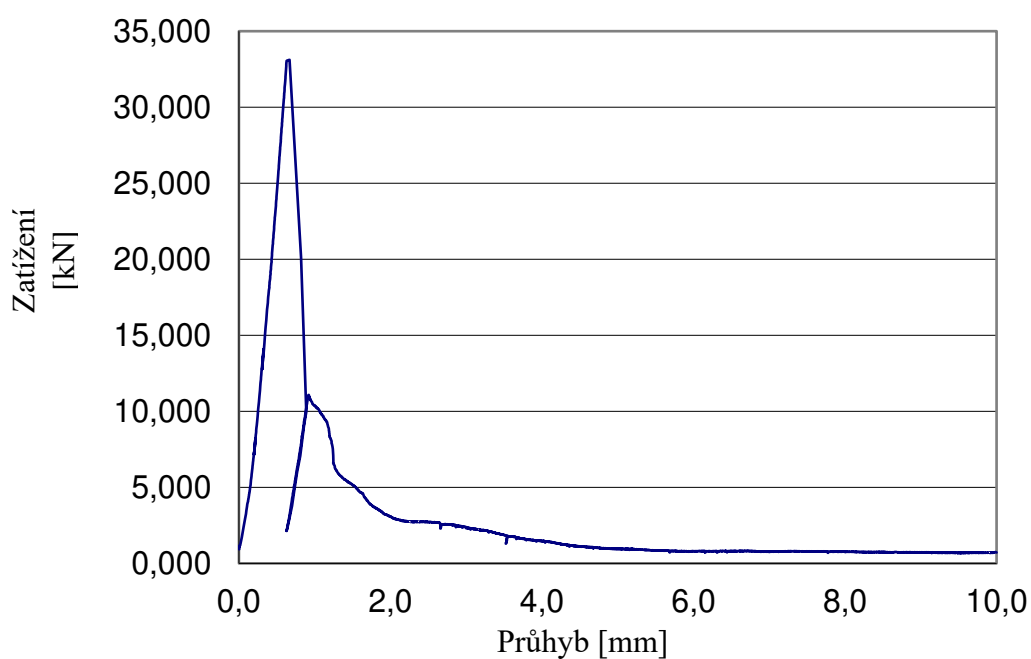


Diagram odolnosti:



Tabulka 13. – Pevnost v tahu ohybem čtyřbodová, singularita 25 kg/m³ vzorek 3/3

8.1.2. Obsah kovových drátků ve vzorcích 50 kg/m³

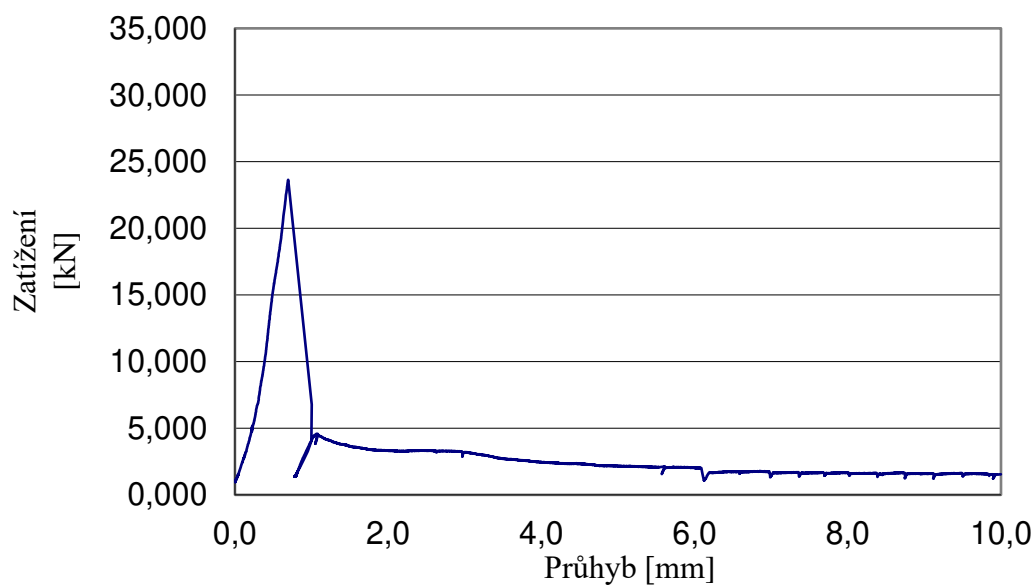
Druh zkoušky:	Pevnost v tahu ohybem – čtyřbodová, kruhová singularita		
Norma:	Návrhová nová metodika		
Datum výroby:	12. 7. 2020	Procento vyztužení:	50 kg/m ³
Datum zkoušení:	8. 4. 2021	Charakteristické stáří:	270 dnů
Označení tělesa:	12.7./50/1	Kus / Celkem:	1 / 3
Rozměry tělesa:	150x150x700 mm	Pevnost v tlaku:	65,8 MPa
Síla při porušení / Průhyb při porušení:	23,635 kN		0,7 mm
Napětí v taženém prvku / Zbytková síla:	3,917 MPa		1,543 kN

Pozn.: Pevnost v prostém tlaku byla stanovena v 61 dnech charakteristického stáří těles.

Fotodokumentace:



Diagram odolnosti:



Tabulka 14. – Pevnost v tahu ohybem čtyřbodová, singularita 50 kg/m³ vzorek 1/3

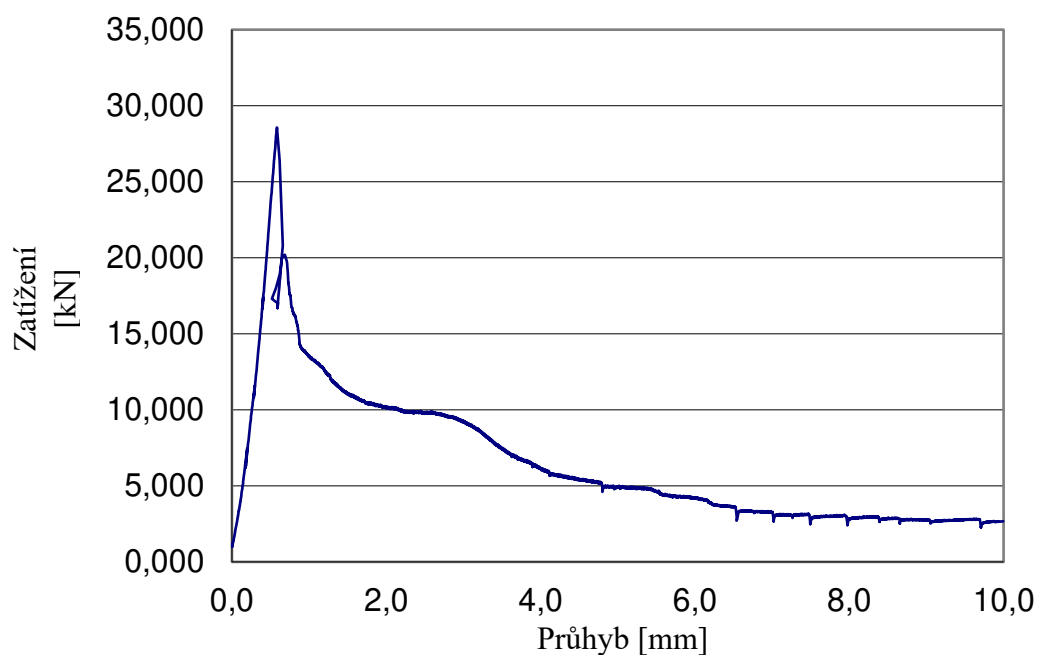
Druh zkoušky:	Pevnost v tahu ohybem – čtyřbodová, kruhová singularita		
Norma:	Návrhová nová metodika		
Datum výroby:	12. 7. 2020	Procento vyztužení:	50 kg/m ³
Datum zkoušení:	8. 4. 2021	Charakteristické stáří:	270 dnů
Označení tělesa:	12.7./75/2	Kus / Celkem:	2 / 3
Rozměry tělesa:	150x150x700 mm	Pevnost v tlaku:	65,8 MPa
Síla při porušení / Průhyb při porušení:	28,565 kN		0,6 mm
Napětí v taženém prvku / Zbytková síla:	4,734 MPa		2,675 kN

Pozn.: Pevnost v prostém tlaku byla stanovena v 61 dnech charakteristického stáří těles.

Fotodokumentace:



Diagram odolnosti:



Tabulka 15. – Pevnost v tahu ohybem čtyřbodová, singularita 50 kg/m³ vzorek 2/3

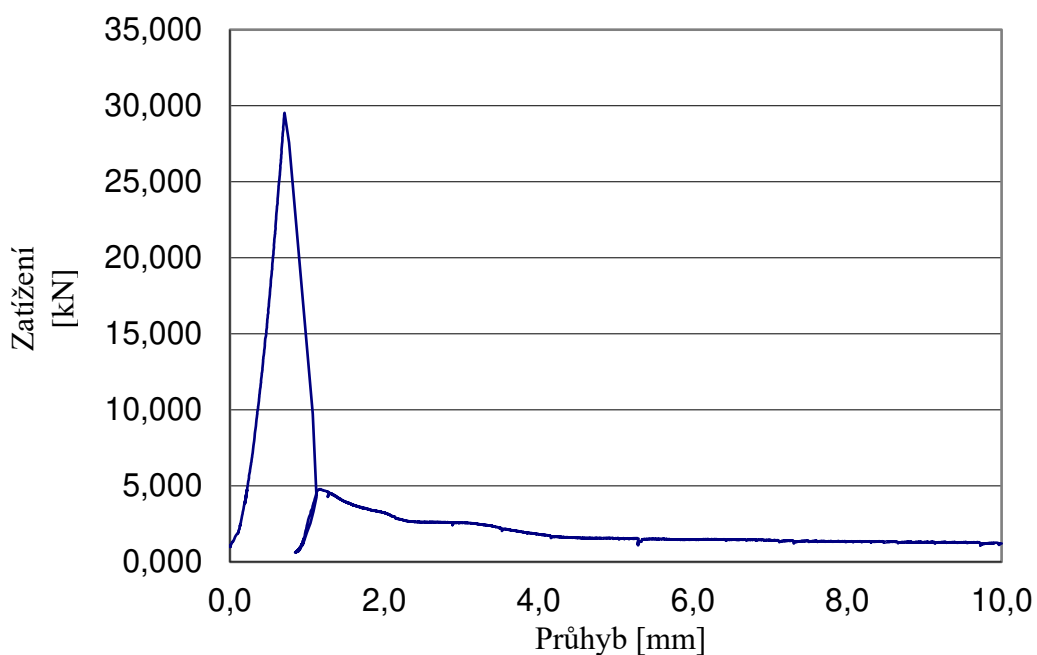
Druh zkoušky: Norma:	Pevnost v tahu ohybem – čtyřbodová, kruhová singularita Návrhová nová metodika		
Datum výroby:	12. 7. 2020	Procento vyztužení:	50 kg/m ³
Datum zkoušení:	8. 4. 2021	Charakteristické stáří:	270 dnů
Označení tělesa:	12.7./75/3	Kus / Celkem:	3 / 3
Rozměry tělesa:	150x150x700 mm	Pevnost v tlaku:	65,8 MPa
Síla při porušení / Průhyb při porušení:	29,531 kN		0,7 mm
Napětí v taženém prvku / Zbytková síla:	4,894 MPa		1,210 kN

Pozn.: Pevnost v prostém tlaku byla stanovena v 61 dnech charakteristického stáří těles.

Fotodokumentace:



Diagram odolnosti:



Tabulka 16. – Pevnost v tahu ohybem čtyřbodová, singularita 50 kg/m³ vzorek 3/3

8.1.3. Obsah kovových drátků ve vzorcích 75 kg/m³

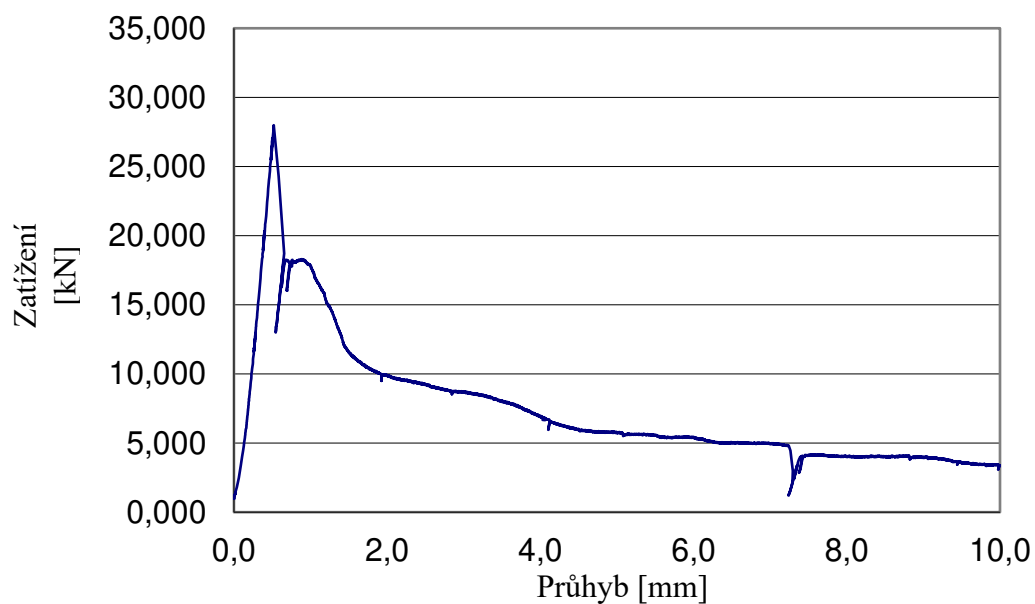
Druh zkoušky:	Pevnost v tahu ohybem – čtyřbodová, kruhová singularita		
Norma:	Návrhová nová metodika		
Datum výroby:	19. 9. 2020	Procento vyztužení:	75 kg/m ³
Datum zkoušení:	8. 4. 2021	Charakteristické stáří:	201 dnů
Označení tělesa:	19.9./75/1	Kus / Celkem:	1 / 3
Rozměry tělesa:	150x150x700 mm	Pevnost v tlaku:	80,0 MPa
Síla při porušení / Průhyb při porušení:	27,990 kN		0,5 mm
Napětí v taženém prvku / Zbytková síla:	4,638 MPa		3,396 kN

Pozn.: Pevnost v prostém tlaku byla stanovena v 88 dnech charakteristického stáří těles.

Fotodokumentace:



Diagram odolnosti:



Tabulka 17. – Pevnost v tahu ohybem čtyřbodová, singularita 75 kg/m³ vzorek 1/3

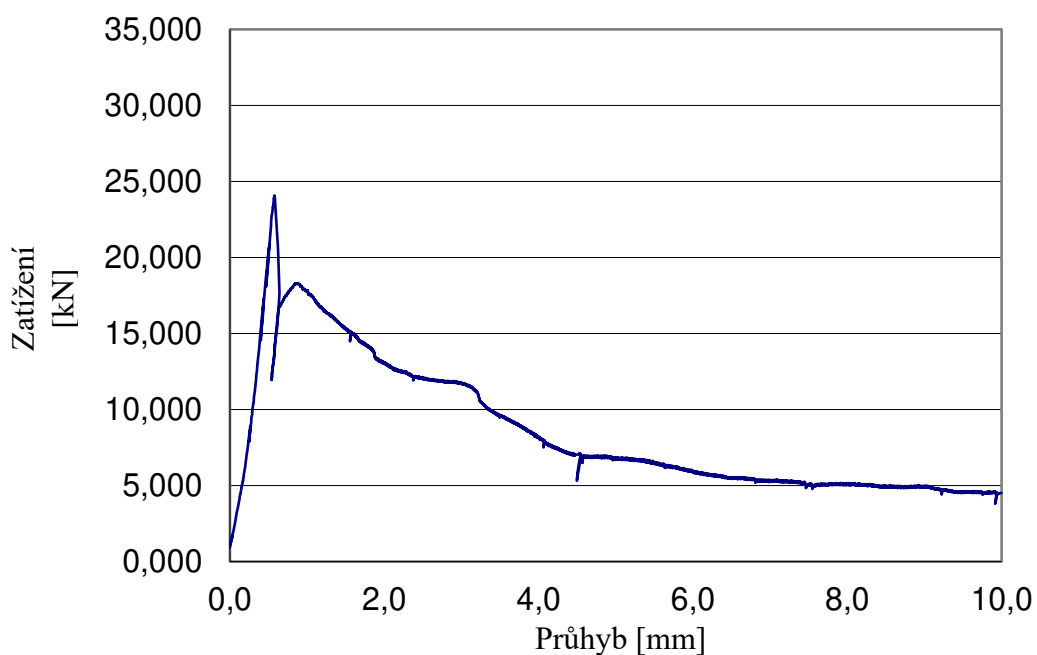
Druh zkoušky: Norma:	Pevnost v tahu ohybem – čtyřbodová, kruhová singularita Návrhová nová metodika		
Datum výroby:	19. 9. 2020	Procento vyztužení:	75 kg/m ³
Datum zkoušení:	8. 4. 2021	Charakteristické stáří:	201 dnů
Označení tělesa:	19.9./75/2	Kus / Celkem:	2 / 3
Rozměry tělesa:	150x150x700 mm	Pevnost v tlaku:	80,0 MPa
Síla při porušení / Průhyb při porušení:	24,073 kN		0,6 mm
Napětí v taženém prvku / Zbytková síla:	3,989 MPa		4,518 kN

Pozn.: Pevnost v prostém tlaku byla stanovena v 88 dnech charakteristického stáří těles.

Fotodokumentace:



Diagram odolnosti:



Tabulka 18. – Pevnost v tahu ohybem čtyřbodová, singularita 75 kg/m³ vzorek 2/3

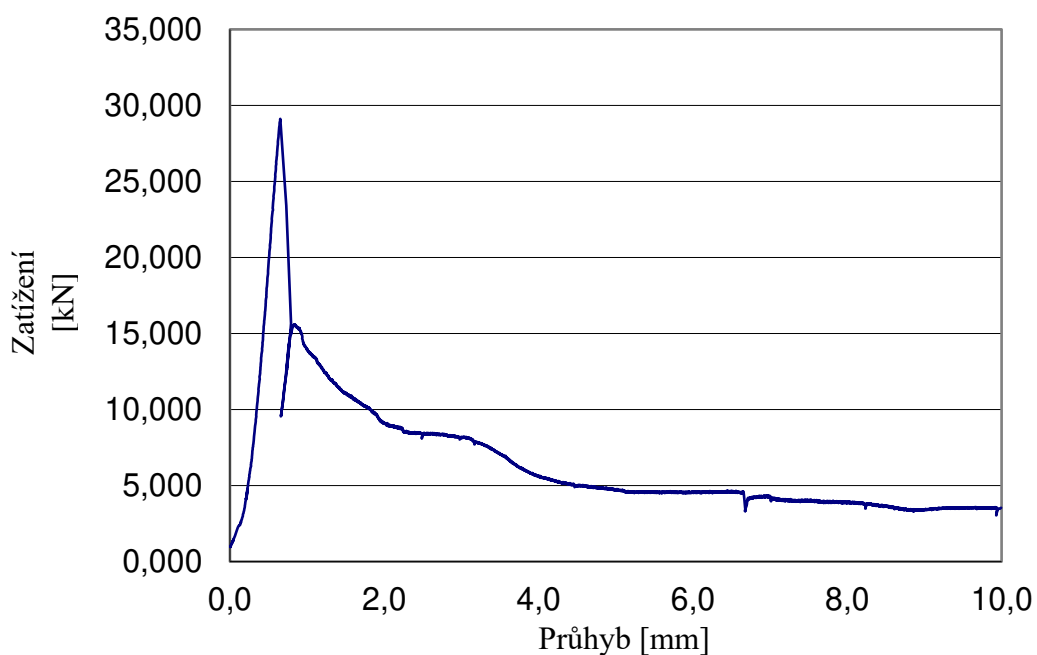
Druh zkoušky: Norma:	Pevnost v tahu ohybem – čtyřbodová, kruhová singularita Návrhová nová metodika		
Datum výroby:	19. 9. 2020	Procento vyztužení:	75 kg/m ³
Datum zkoušení:	8. 4. 2021	Charakteristické stáří:	201 dnů
Označení tělesa:	19.9./75/3	Kus / Celkem:	3 / 3
Rozměry tělesa:	150x150x700 mm	Pevnost v tlaku:	80,0 MPa
Síla při porušení / Průhyb při porušení:	29,117 kN		0,7 mm
Napětí v taženém prvku / Zbytková síla:	4,825 MPa		3,539 kN

Pozn.: Pevnost v prostém tlaku byla stanovena v 88 dnech charakteristického stáří těles.

Fotodokumentace:



Diagram odolnosti:



Tabulka 19. – Pevnost v tahu ohybem čtyřbodová, singularita 75 kg/m³ vzorek 3/3

8.1.4. Nevyztužené hranoly

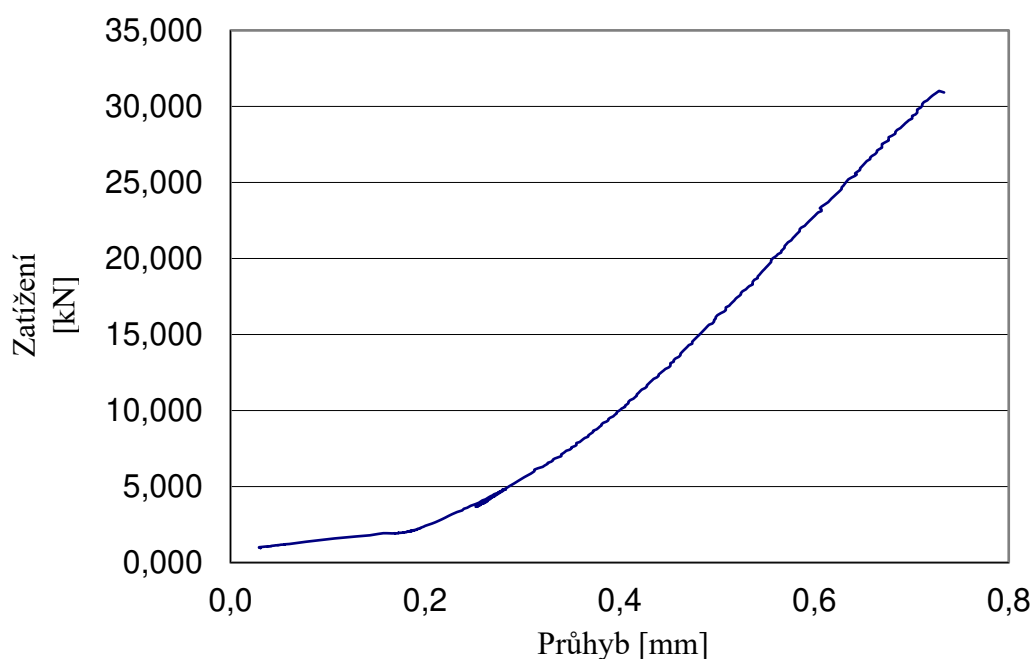
Druh zkoušky: Norma:	Pevnost v tahu ohybem – čtyřbodová, kruhová singularita Návrhová nová metodika		
Datum výroby:	12. 7. 2020	Procento vyztužení:	0 kg/m ³
Datum zkoušení:	8. 4. 2021	Charakteristické stáří:	270 dnů
Označení tělesa:	12.7./0/1	Kus / Celkem:	1 / 3
Rozměry tělesa:	150x150x700 mm	Pevnost v tlaku:	80,0 MPa
Síla při porušení / Průhyb při porušení:	31,021 kN		0,7 mm
Napětí v taženém prvku / Průhyb na konci:	5,141 MPa		2,1 mm

Pozn.: Pevnost v prostém tlaku byla stanovena v 193 dnech charakteristického stáří těles.

Fotodokumentace:



Diagram odolnosti:



Tabulka 20. – Pevnost v tahu ohybem čtyřbodová, singularita 0 kg/m³ vzorek 1/3

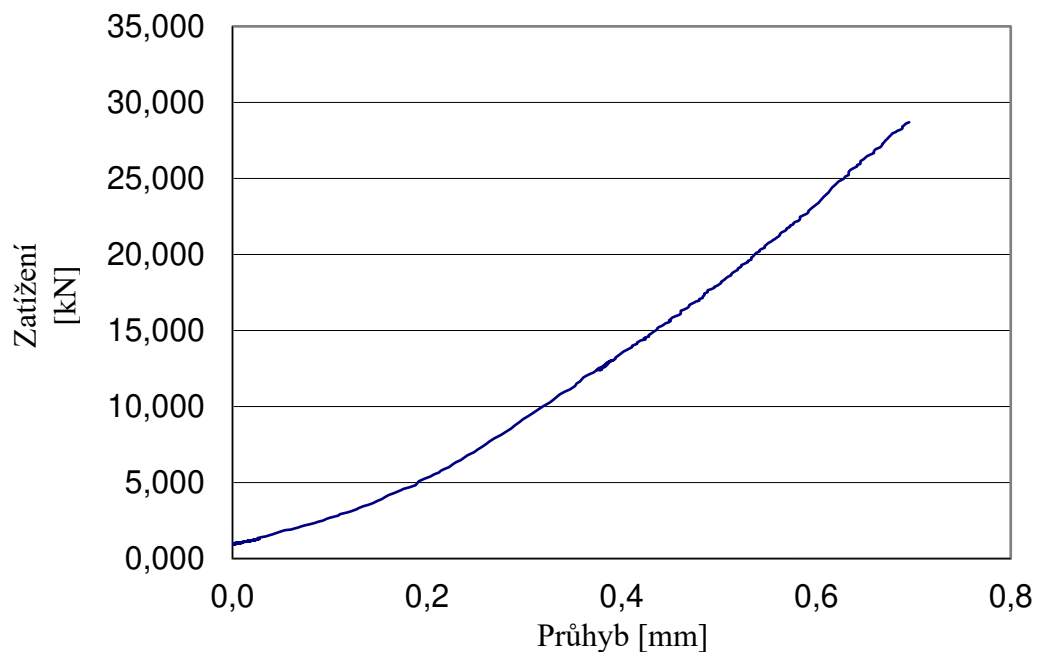
Druh zkoušky:	Pevnost v tahu ohybem – čtyřbodová, kruhová singularita		
Norma:	Návrhová nová metodika		
Datum výroby:	19. 9. 2020	Procento vyztužení:	0 kg/m ³
Datum zkoušení:	8. 4. 2021	Charakteristické stáří:	201 dnů
Označení tělesa:	19.9./0/2	Kus / Celkem:	2 / 3
Rozměry tělesa:	150x150x700 mm	Pevnost v tlaku:	80,0 MPa
Síla při porušení / Průhyb při porušení:	28,697 kN		0,7 mm
Napětí v taženém prvku /Průhyb na konci:	4,756 MPa		2,0 mm

Pozn.: Pevnost v prostém tlaku byla stanovena v 193 dnech charakteristického stáří těles.

Fotodokumentace:



Diagram odolnosti:



Tabulka 21. – Pevnost v tahu ohybem čtyřbodová, singularita 0 kg/m³ vzorek 2/3

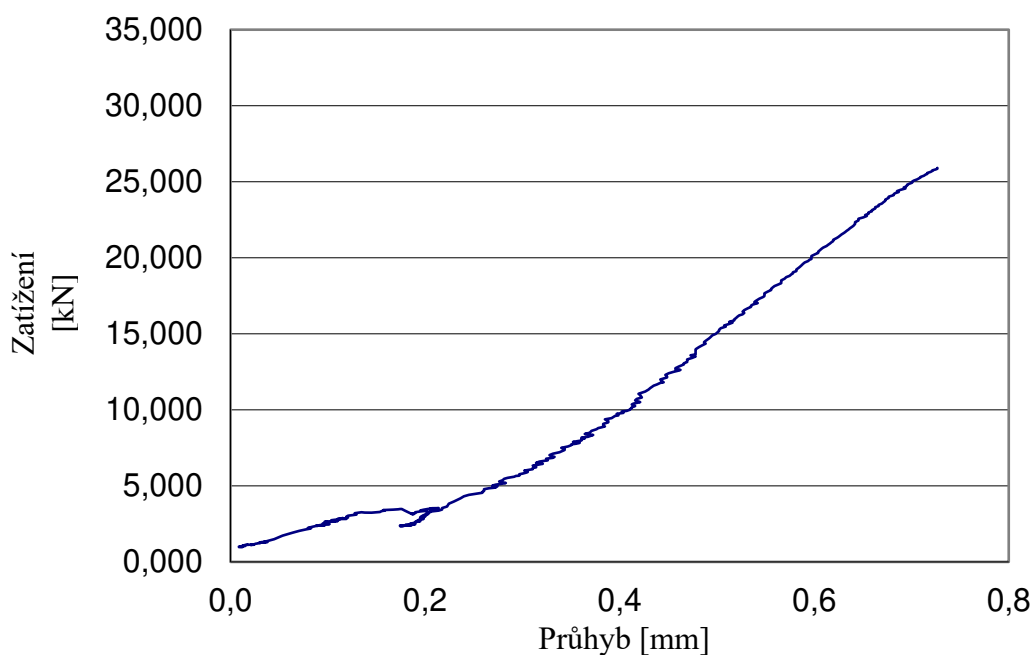
Druh zkoušky:	Pevnost v tahu ohybem – čtyřbodová, kruhová singularita		
Norma:	Návrhová nová metodika		
Datum výroby:	4. 7. 2020	Procento vyztužení:	0 kg/m ³
Datum zkoušení:	8. 4. 2021	Charakteristické stáří:	278 dnů
Označení tělesa:	19.9./0/3	Kus / Celkem:	3 / 3
Rozměry tělesa:	150x150x700 mm	Pevnost v tlaku:	80,0 MPa
Síla při porušení / Průhyb při porušení:	25,925 kN		0,7 mm
Napětí v taženém prvku / Průhyb na konci:	4,296 MPa		1,7 mm

Pozn.: Pevnost v prostém tlaku byla stanovena v 193 dnech charakteristického stáří těles.

Fotodokumentace:



Diagram odolnosti:



Tabulka 22. – Pevnost v tahu ohybem čtyřbodová, singularita 0 kg/m³ vzorek 3/3

8.2. Pevnost v tahu ohybem – čtyřbodová, bez zářezu

Zkušební hranoly byly ošetřovány ihned po odbednění tedy následující den po jejich vybetonování. Tělesa byla ošetřována při vlastní vlhkosti pod strečovou fólií až do doby jejich zkoušení. Postup zkoušení byl obdobný jako u těles s kruhovými vývrty ve středu trámku. Vlastní postup zkoušení (viz kapitola 4.4.3.3.) byl převzat z předběžné normy na zkoušení pevnosti v tahu vláknobetonu ČSN P 73 2452 [29]. Podle této normy jsou shodné rozměry těles a způsob zatěžování při srovnání s návrhovou metodikou [30] pro tělesa s kruhovým místem oslabení. Jediná odchylka od postupu byla dána rychlostí zatěžování $0,4 \pm 0,05$ mm / min. Která byla zvolena podle citlivosti snímače lineárního přetvoření lisovacího zařízení s řídicí jednotkou od výrobce Controls a rozsahem až 350 kN. Vlastní zkoušení probíhalo podle možností a dostupnosti potřebného vybavení v akreditované laboratoři betonárny CEMEX v Pardubicích. Vlastní práce byly průběžně dokumentovány, vyhodnocovány a jsou podloženy vlastní fotodokumentací. Postup prací a všech navazujících činností je součástí kontrolního zkušebního plánu s harmonogramem prováděných činností (viz příloha. E.).

Průměrné hodnoty síly a průhybu při porušení nebo pevnost při vzniku trhliny a zbytková síla, která je stanovena na konci zatěžování, jsou dány vždy na základě tří vzorků. Výsledky jsou rozděleny podle množství přidaných ocelových drátků. Průměrné výsledky a diagramy odolnosti jsou uvedeny v závěru práce (viz kapitola 10.).



Obrázek 20. – Rozdílné šíření trhlín na zadních stranách zkušebních hranolů

8.2.1. Obsah kovových drátků ve vzorcích 25 kg/m³

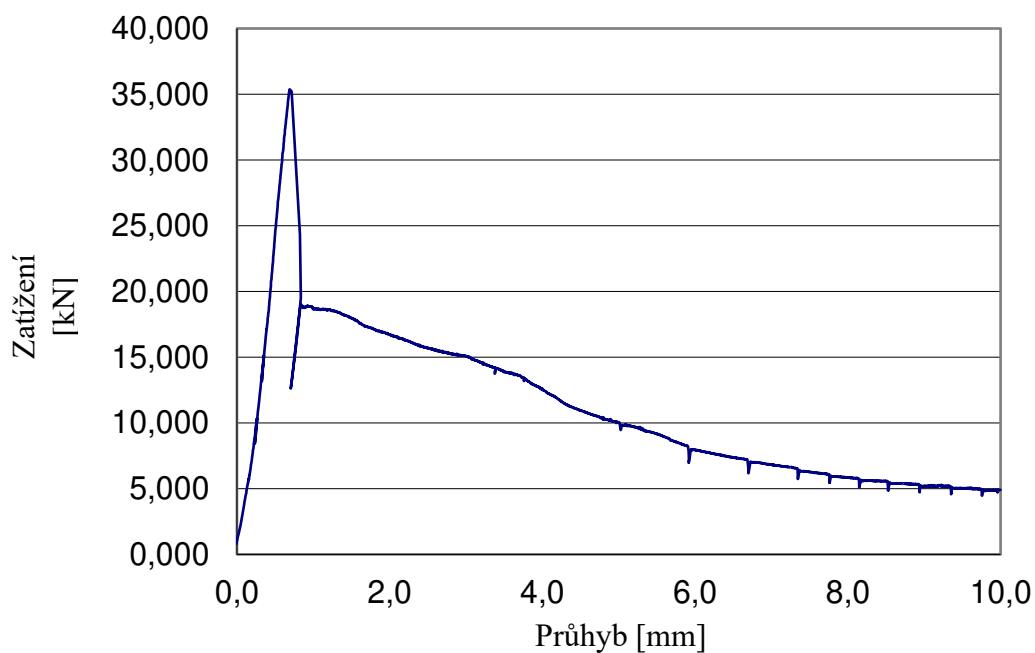
Druh zkoušky: Norma:	Pevnost v tahu ohybem – čtyřbodová, bez zářezu ČSN P 73 2452		
Datum výroby:	4. 7. 2020	Procento vyztužení:	25 kg/m ³
Datum zkoušení:	11. 3. 2021	Charakteristické stáří:	250 dnů
Označení tělesa:	4.7./25/1	Kus / Celkem:	1 / 3
Rozměry tělesa:	150x150x700 mm	Pevnost v tlaku:	73,1 MPa
Síla při porušení / Průhyb při porušení:		35,370 kN	0,7 mm
Pevnost při vzniku trhliny / Zbytková síla:		6,228 MPa	4,912 kN

Pozn.: Pevnost v prostém tlaku byla stanovena v 68 dnech charakteristického stáří těles.

Fotodokumentace:



Diagram odolnosti:



Tabulka 23. – Pevnost v tahu ohybem čtyřbodová, bez zářezu 25 kg/m³ vzorek 1/3

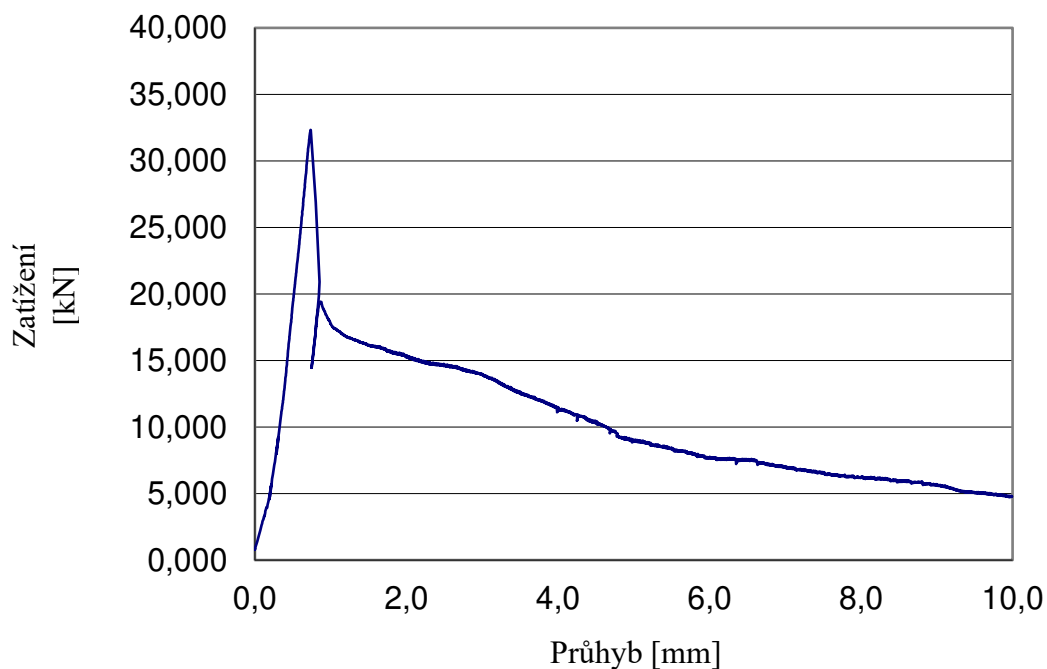
Druh zkoušky:	Pevnost v tahu ohybem – čtyřbodová, bez zářezu		
Norma:	ČSN P 73 2452		
Datum výroby:	4. 7. 2020	Procento vyztužení:	25 kg/m ³
Datum zkoušení:	11. 3. 2021	Charakteristické stáří:	250 dnů
Označení tělesa:	4.7./25/2	Kus / Celkem:	2 / 3
Rozměry tělesa:	150x150x700 mm	Pevnost v tlaku:	73,1 MPa
Síla při porušení / Průhyb při porušení:	32,333 kN		0,7 mm
Pevnost při vzniku trhliny / Zbytková síla:	5,748 MPa		4,786 kN

Pozn.: Pevnost v prostém tlaku byla stanovena v 68 dnech charakteristického stáří těles.

Fotodokumentace:



Diagram odolnosti:



Tabulka 24. – Pevnost v tahu ohybem čtyřbodová, bez zářezu 25 kg/m³ vzorek 2/3

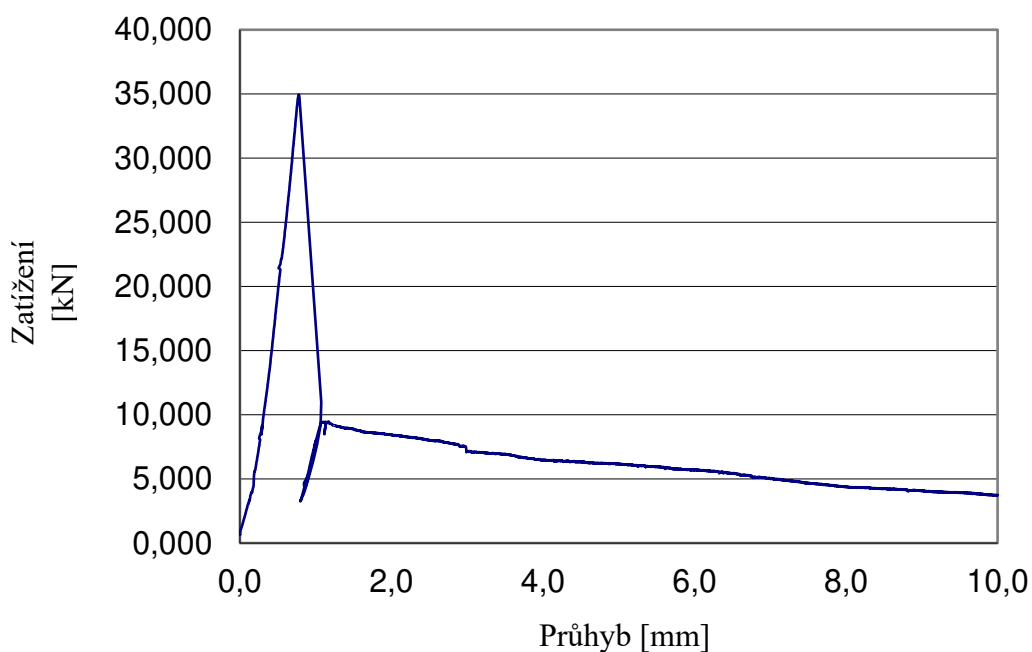
Druh zkoušky:	Pevnost v tahu ohybem – čtyřbodová, bez zářezu		
Norma:	ČSN P 73 2452		
Datum výroby:	4. 7. 2020	Procento vyztužení:	25 kg/m ³
Datum zkoušení:	11. 3. 2021	Charakteristické stáří:	250 dnů
Označení tělesa:	4.7./25/3	Kus / Celkem:	3 / 3
Rozměry tělesa:	150x150x700 mm	Pevnost v tlaku:	73,1 MPa
Síla při porušení / Průhyb při porušení:	34,961 kN	0,8 mm	
Pevnost při vzniku trhliny / Zbytková síla:	6,215 MPa	3,742 kN	

Pozn.: Pevnost v prostém tlaku byla stanovena v 68 dnech charakteristického stáří těles.

Fotodokumentace:



Diagram odolnosti:



Tabulka 25. – Pevnost v tahu ohybem čtyřbodová, bez zářezu 25 kg/m³ vzorek 3/3

8.2.2. Obsah kovových drátků ve vzorcích 50 kg/m³

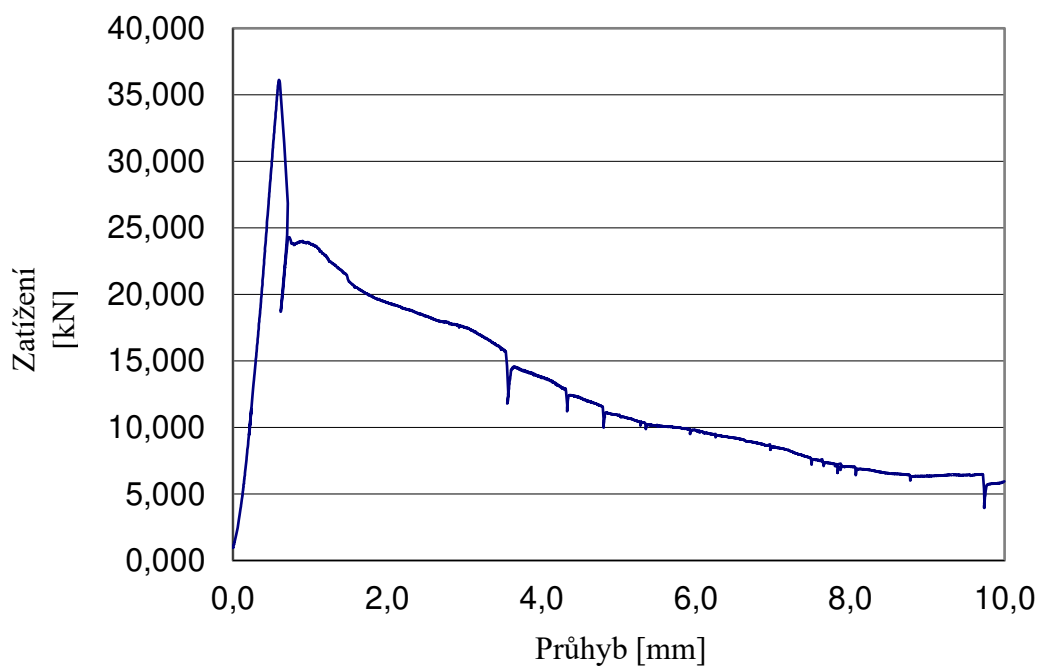
Druh zkoušky: Norma:	Pevnost v tahu ohybem – čtyřbodová, bez zářezu ČSN P 73 2452		
Datum výroby:	12. 7. 2020	Procento vyztužení:	50 kg/m ³
Datum zkoušení:	8. 4. 2021	Charakteristické stáří:	270 dnů
Označení tělesa:	12.7./50/1	Kus / Celkem:	1 / 3
Rozměry tělesa:	150x150x700 mm	Pevnost v tlaku:	65,8 MPa
Síla při porušení / Průhyb při porušení:		36,122 kN	0,6 mm
Pevnost při vzniku trhliny / Zbytková síla:		6,422 MPa	5,946 kN

Pozn.: Pevnost v prostém tlaku byla stanovena v 61 dnech charakteristického stáří těles.

Fotodokumentace:



Diagram odolnosti:



Tabulka 26. – Pevnost v tahu ohybem čtyřbodová, bez zářezu 50 kg/m³ vzorek 1/3

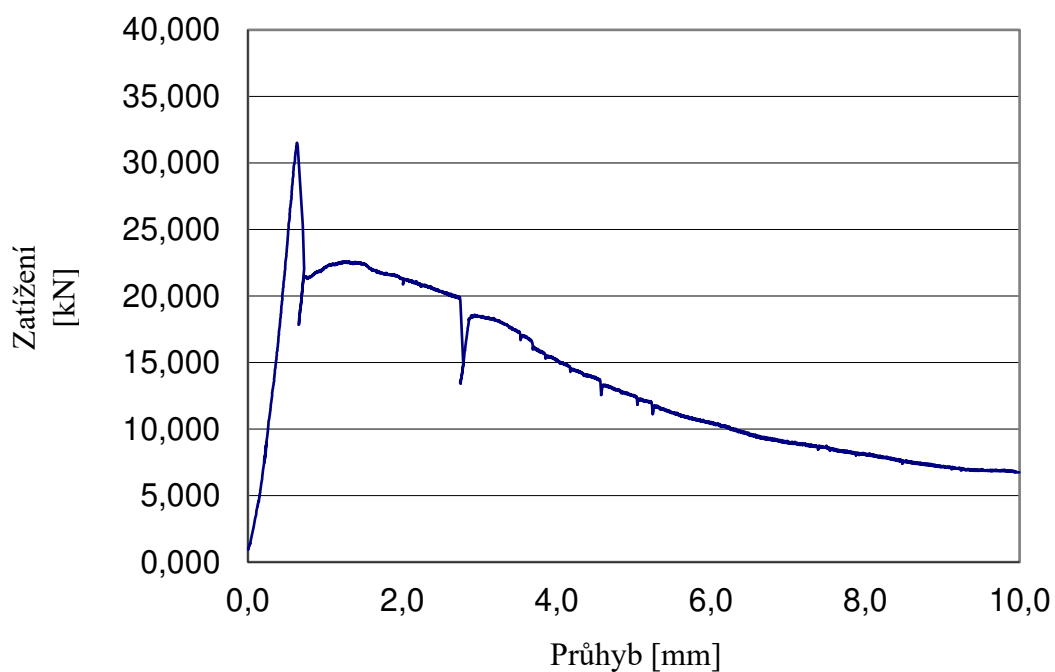
Druh zkoušky: Norma:	Pevnost v tahu ohybem – čtyřbodová, bez zářezu ČSN P 73 2452		
Datum výroby:	12. 7. 2020	Procento vyztužení:	50 kg/m ³
Datum zkoušení:	8. 4. 2021	Charakteristické stáří:	270 dnů
Označení tělesa:	12.7./50/2	Kus / Celkem:	2 / 3
Rozměry tělesa:	150x150x700 mm	Pevnost v tlaku:	65,8 MPa
Síla při porušení / Průhyb při porušení:	31,515 kN		0,6 mm
Pevnost při vzniku trhliny / Zbytková síla:	5,603 MPa		6,751 kN

Pozn.: Pevnost v prostém tlaku byla stanovena v 61 dnech charakteristického stáří těles.

Fotodokumentace:



Diagram odolnosti:



Tabulka 27. – Pevnost v tahu ohybem čtyřbodová, bez zářezu 50 kg/m³ vzorek 2/3

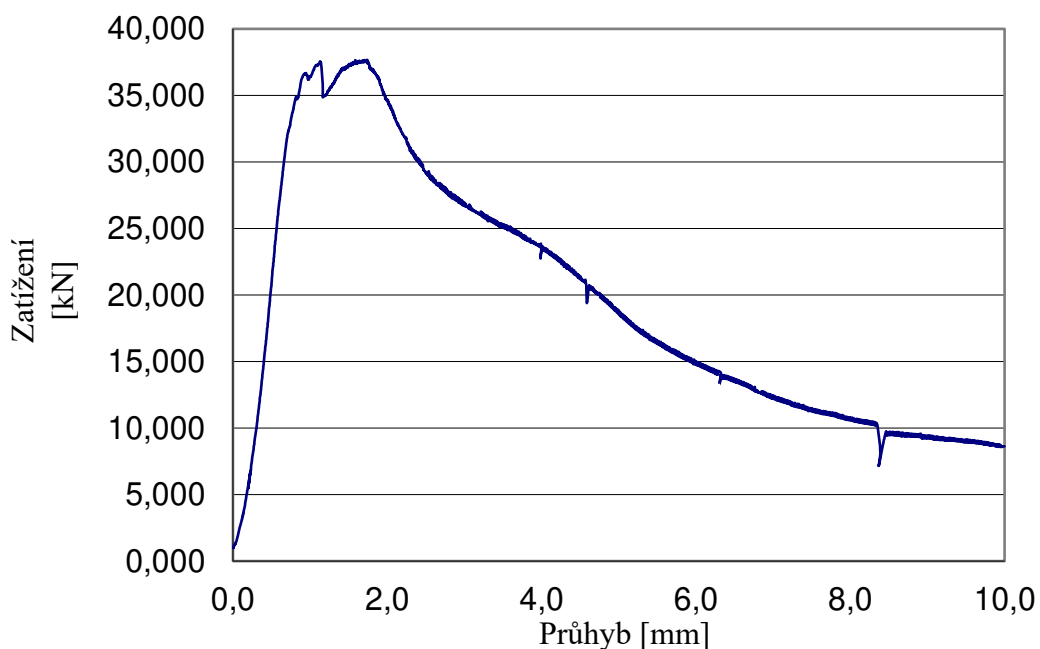
Druh zkoušky:	Pevnost v tahu ohybem – čtyřbodová, bez zářezu		
Norma:	ČSN P 73 2452		
Datum výroby:	12. 7. 2020	Procento vyztužení:	50 kg/m ³
Datum zkoušení:	8. 4. 2021	Charakteristické stáří:	270 dnů
Označení tělesa:	12.7./50/3	Kus / Celkem:	3 / 3
Rozměry tělesa:	150x150x700 mm	Pevnost v tlaku:	65,8 MPa
Síla při porušení / Průhyb při porušení:	36,680 kN		1,0 mm
Pevnost při vzniku trhliny / Zbytková síla:	6,521 MPa		8,626 kN

Pozn.: Pevnost v prostém tlaku byla stanovena v 61 dnech charakteristického stáří těles.

Fotodokumentace:



Diagram odolnosti:



Tabulka 28. – Pevnost v tahu ohybem čtyřbodová, bez zářezu 50 kg/m³ vzorek 3/3

8.2.3. Obsah kovových drátků ve vzorcích 75 kg/m³

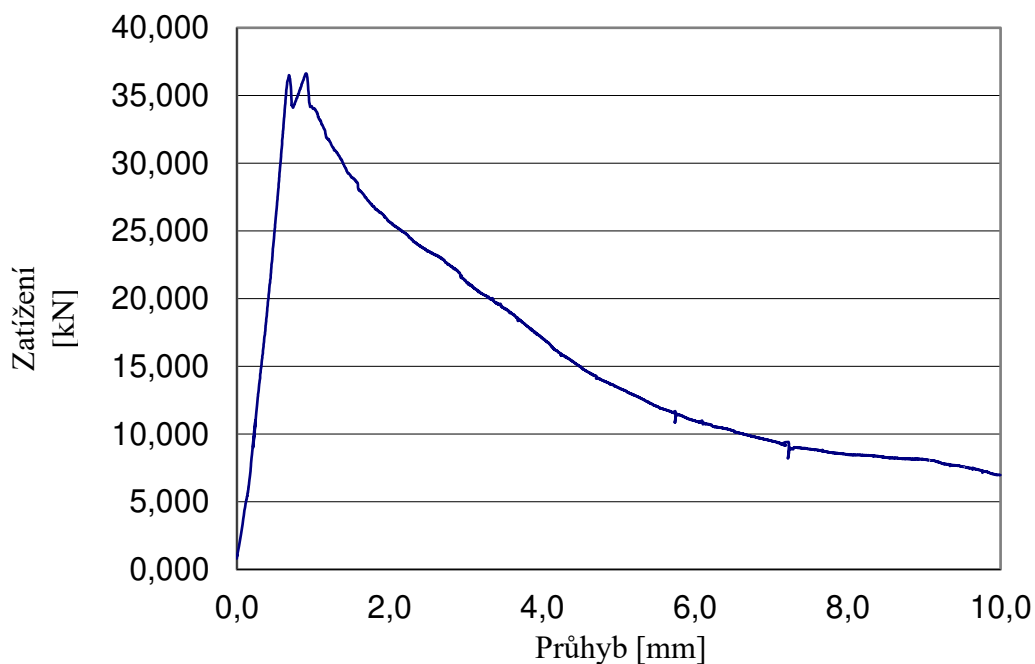
Druh zkoušky: Norma:	Pevnost v tahu ohybem – čtyřbodová, bez zářezu ČSN P 73 2452		
Datum výroby:	19. 9. 2020	Procento vyztužení:	75 kg/m ³
Datum zkoušení:	11. 3. 2021	Charakteristické stáří:	173 dnů
Označení tělesa:	19.9./75/1	Kus / Celkem:	1 / 3
Rozměry tělesa:	150x150x700 mm	Pevnost v tlaku:	80,0 MPa
Síla při porušení / Průhyb při porušení:		36,503 kN	0,7 mm
Pevnost při vzniku trhliny / Zbytková síla:		6,489 MPa	6,971 kN

Pozn.: Pevnost v prostém tlaku byla stanovena v 88 dnech charakteristického stáří těles.

Fotodokumentace:



Diagram odolnosti:



Tabulka 29. – Pevnost v tahu ohybem čtyřbodová, bez zářezu 75 kg/m³ vzorek 1/3

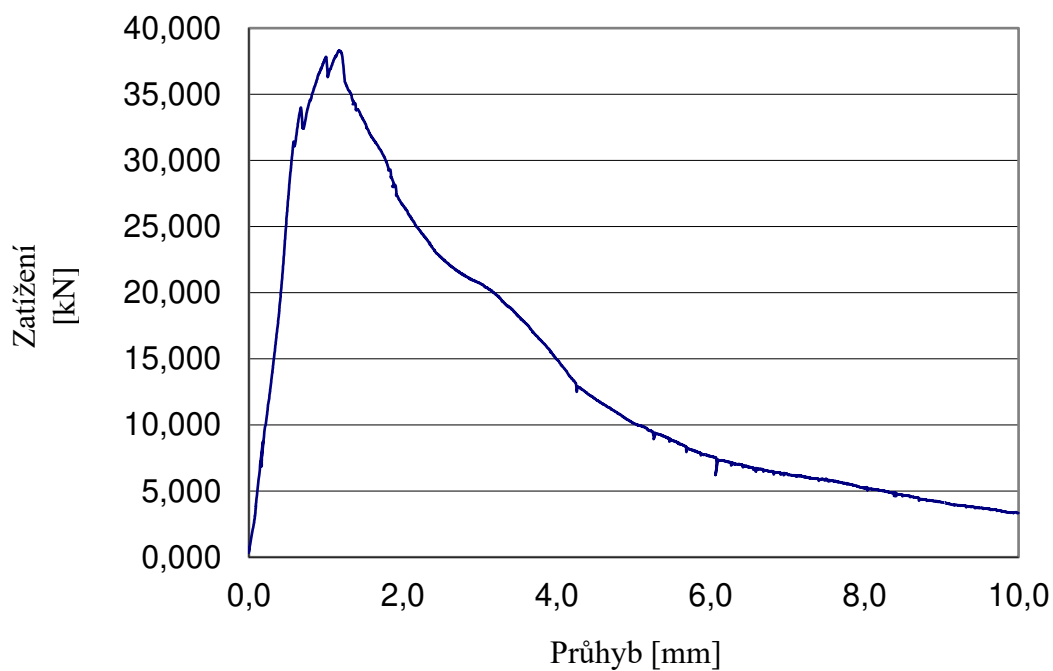
Druh zkoušky: Norma:	Pevnost v tahu ohybem – čtyřbodová, bez zářezu ČSN P 73 2452		
Datum výroby:	19. 9. 2020	Procento vyztužení:	75 kg/m ³
Datum zkoušení:	11. 3. 2021	Charakteristické stáří:	173 dnů
Označení tělesa:	19.9./25/2	Kus / Celkem:	2 / 3
Rozměry tělesa:	150x150x700 mm	Pevnost v tlaku:	80,0 MPa
Síla při porušení / Průhyb při porušení:	34,001 kN	0,7 mm	
Pevnost při vzniku trhliny / Zbytková síla:	6,045 MPa	3,342 kN	

Pozn.: Pevnost v prostém tlaku byla stanovena v 88 dnech charakteristického stáří těles.

Fotodokumentace:



Diagram odolnosti:



Tabulka 30. – Pevnost v tahu ohybem čtyřbodová, bez zářezu 75 kg/m³ vzorek 2/3

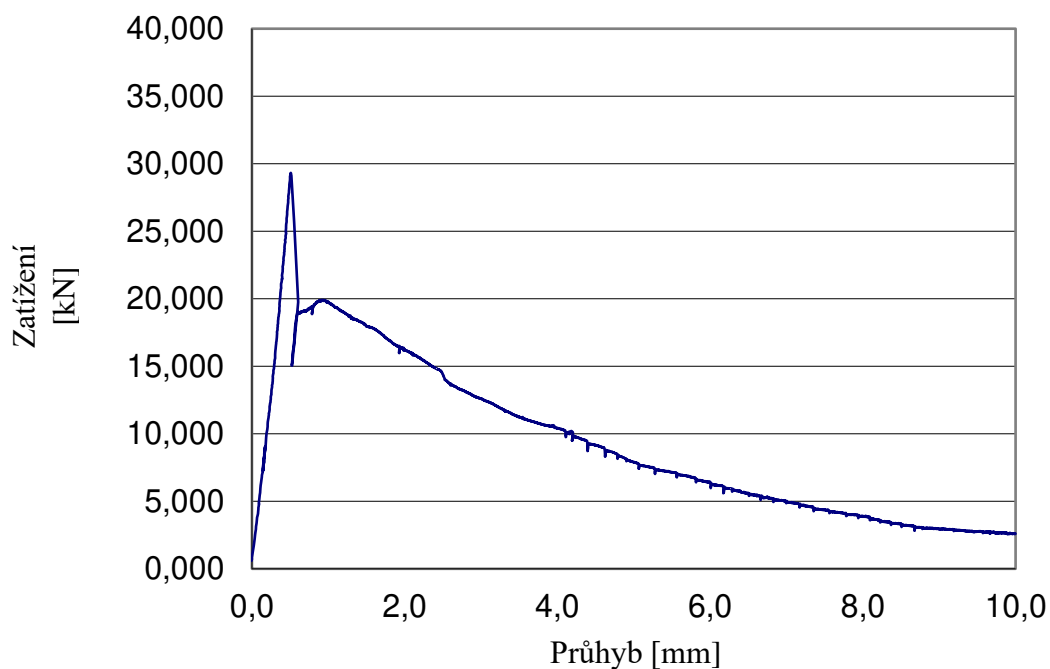
Druh zkoušky: Norma:	Pevnost v tahu ohybem – čtyřbodová, bez zářezu ČSN P 73 2452		
Datum výroby:	19. 9. 2020	Procento vyztužení:	75 kg/m ³
Datum zkoušení:	11. 3. 2021	Charakteristické stáří:	173 dnů
Označení tělesa:	19.9./25/3	Kus / Celkem:	3 / 3
Rozměry tělesa:	150x150x700 mm	Pevnost v tlaku:	80,0 MPa
Síla při porušení / Průhyb při porušení:	29,321 kN		0,5 mm
Pevnost při vzniku trhliny / Zbytková síla:	5,214 MPa		2,607 kN

Pozn.: Pevnost v prostém tlaku byla stanovena v 88 dnech charakteristického stáří těles.

Fotodokumentace:



Diagram odolnosti:



Tabulka 31. – Pevnost v tahu ohybem čtyřbodová, bez zářezu 75 kg/m³ vzorek 3/3

8.2.4. Nevyztužené hranoly

Druh zkoušky: Norma:	Pevnost v tahu ohybem – čtyřbodová, bez zářezu ČSN P 73 2452		
Datum výroby:	12. 7. 2020	Procento vyztužení:	0 kg/m ³
Datum zkoušení:	8. 4. 2021	Charakteristické stáří:	270 dnů
Označení tělesa:	12.7./0/1	Kus / Celkem:	1 / 3
Rozměry tělesa:	150x150x700 mm	Pevnost v tlaku:	80,0 MPa
Síla při porušení / Průhyb při porušení:	27,405 kN		0,5 mm
Pevnost při vzniku trhliny / Průhyb na konci:	4,872 MPa		1,8 mm

Pozn.: Pevnost v prostém tlaku byla stanovena v 193 dnech charakteristického stáří těles.

Fotodokumentace:

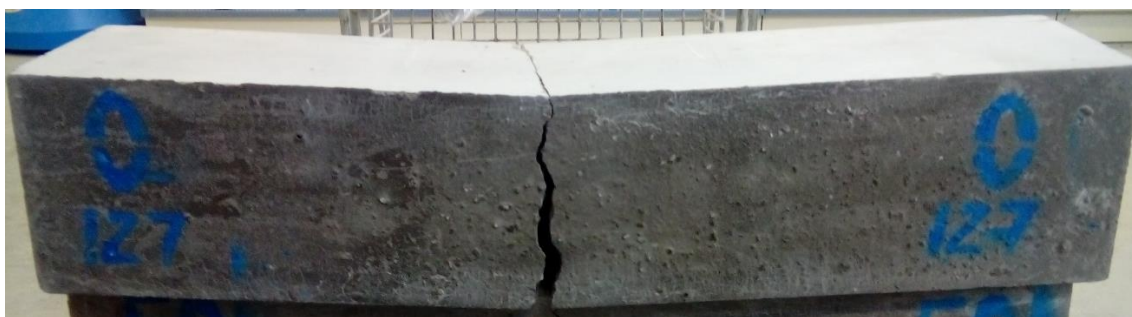
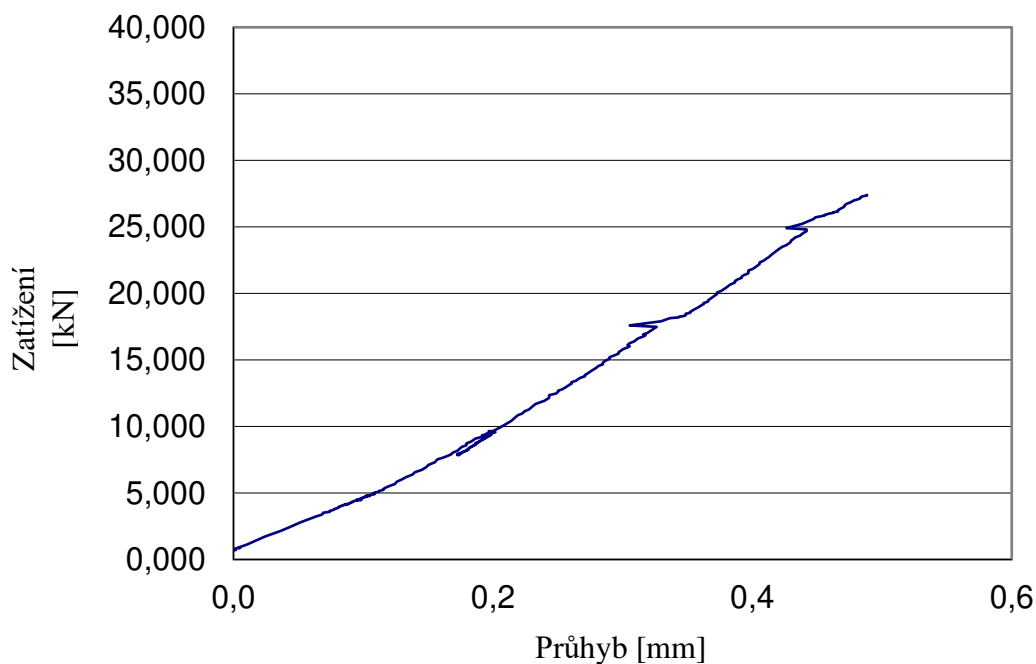


Diagram odolnosti:



Tabulka 32. – Pevnost v tahu ohybem čtyřbodová, bez zářezu 0 kg/m³ vzorek 1/3

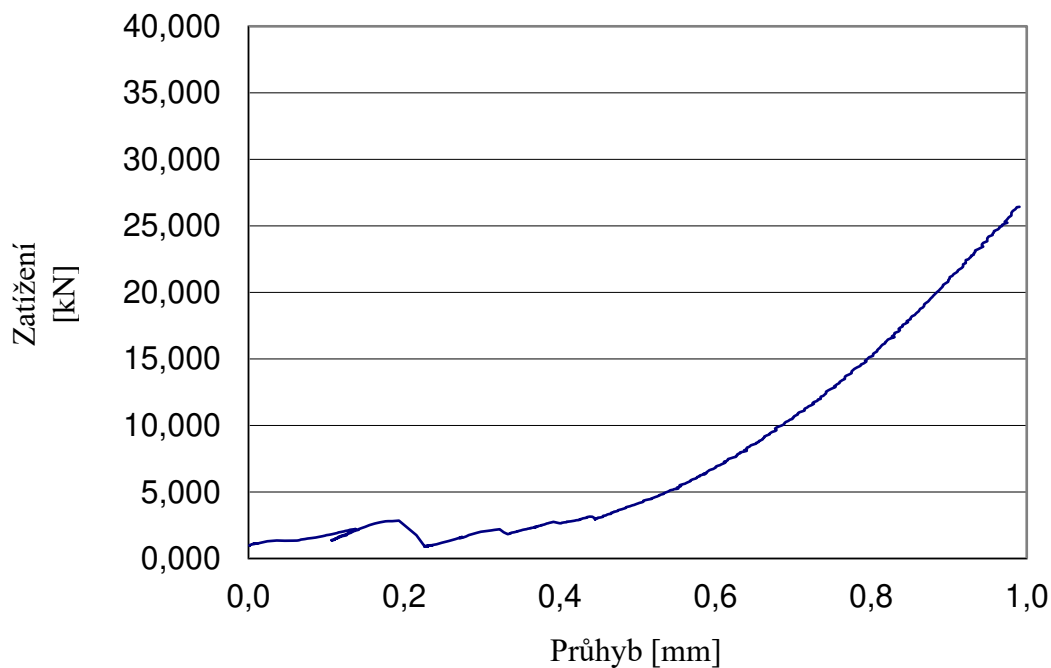
Druh zkoušky:	Pevnost v tahu ohybem – čtyřbodová, bez zářezu		
Norma:	ČSN P 73 2452		
Datum výroby:	19. 9. 2020	Procento vyztužení:	0 kg/m ³
Datum zkoušení:	8. 4. 2021	Charakteristické stáří:	201 dnů
Označení tělesa:	19.9./0/2	Kus / Celkem:	2 / 3
Rozměry tělesa:	150x150x700 mm	Pevnost v tlaku:	80,0 MPa
Síla při porušení / Průhyb při porušení:	26,431 kN		1,0 mm
Pevnost při vzniku trhliny / Průhyb na konci:	4,699MPa		2,1 mm

Pozn.: Pevnost v prostém tlaku byla stanovena v 193 dnech charakteristického stáří těles.

Fotodokumentace:



Diagram odolnosti:



Tabulka 33. – Pevnost v tahu ohybem čtyřbodová, bez zářezu 0 kg/m³ vzorek 2/3

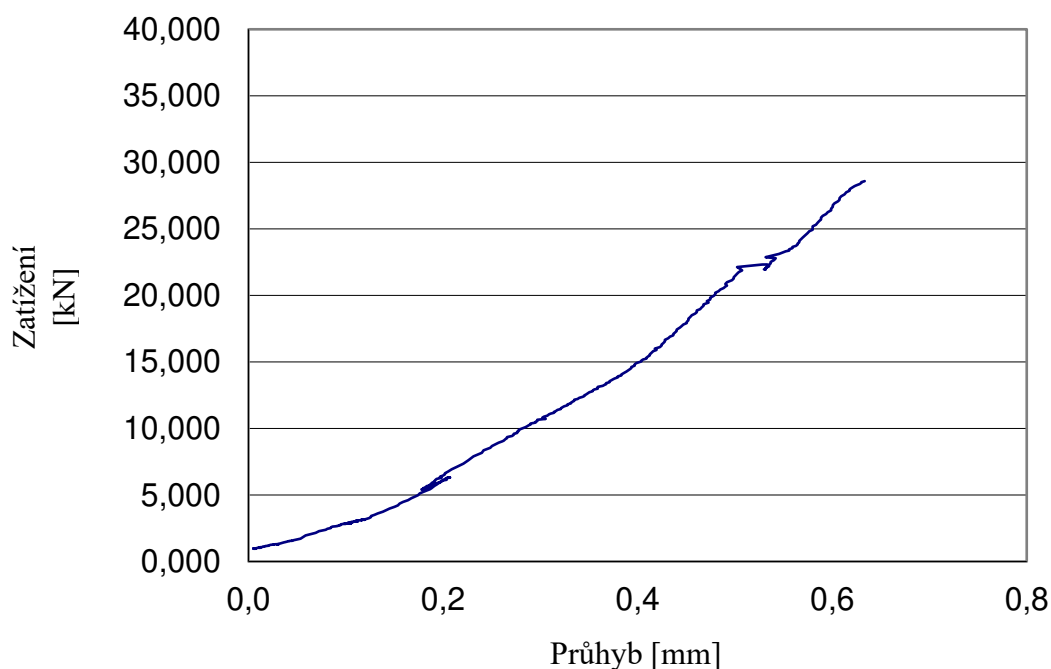
Druh zkoušky:	Pevnost v tahu ohybem – čtyřbodová, bez zářezu		
Norma:	ČSN P 73 2452		
Datum výroby:	4. 7. 2020	Procento vyztužení:	0 kg/m ³
Datum zkoušení:	8. 4. 2021	Charakteristické stáří:	278 dnů
Označení tělesa:	4.7./0/3	Kus / Celkem:	3 / 3
Rozměry tělesa:	150x150x700 mm	Pevnost v tlaku:	80,0 MPa
Síla při porušení / Průhyb při porušení:	28,588 kN		0,6 mm
Pevnost při vzniku trhliny / Průhyb na konci:	5,082 MPa		1,8 mm

Pozn.: Pevnost v prostém tlaku byla stanovena v 193 dnech charakteristického stáří těles.

Fotodokumentace:



Diagram odolnosti:



Tabulka 34. – Pevnost v tahu ohybem čtyřbodová, bez zářezu 0 kg/m³ vzorek 3/3

9. KAPACITA ABSORBOVANÉ ENERGIE DRÁTKOBETONOVÝCH DESEK

Zkušební tělesa pro stanovení kapacity absorbované energie drátkobetonových desek byla ošetřována pod strečovou folií po celou dobu až do provádění zkoušek. V den výroby zkušebních desek byly vybetonovány i zkušební krychle určené pro stanovení pevnosti v tlaku, tak aby měly stejné charakteristické stáří při jejich zkoušení. Odchylka od normového postupu při výrobě zkušebních drátkobetonových desek spočívala v aplikaci betonové vrstvy, která nebyla prováděna nástřikem dle normy pro stříkané betony. Zkušební tělesa byla tedy vytvořena dle normy pro samozhutnitelné betony tedy postupným plněním forem bez zhutňování a volný povrch byl urovnán hladítkem na přesně definovaný objem. Stanovení kapacity absorbované energie se provádělo dle normy na zkoušení stříkaného betonu [31] (viz kapitola 4.4.4.). Destruktivní zkoušky byly prováděny na lisovacím rámu, Controls s třídou přesnosti 1. a s rozsahem až 350 kN, v prostorách akreditované laboratoře CEMEX (obrázek 19.). Při osazování zkušebních těles byl podmazán horní povrch desky, který byl ve styku se zatěžovacím přípravkem. Pro podmazání byla využita rychle tuhnoucí vodotěsná cementová malta od výrobce Sika (Sika MonoTop 108 WaterPlung). Tloušťka desky (100 mm) byla ověřena ve středu desky v místě zatěžování. Přetvoření bylo měřeno lineárním snímačem osazeným ve středu spodní plochy desky pod zatížením. Postup a průběh zkoušení drátkobetonových desek je součástí KZP s harmonogramem prováděných prací (**příloha E.**).

Stanovené průměrné hodnoty pevností a přetvoření v jednotlivých fázích zatěžování či výsledný popis charakteru porušování stanovený na základě tří vzorků je uveden v závěru práce. **Průměrné výsledky v závěru práce jsou také rozděleny dle příslušných procent vyztužení zkušebních drátkobetonových desek (viz kapitola 10.).**



Obrázek 21. – Osazení zkušebních těles na levé straně a deformace a trhliny na pravé straně

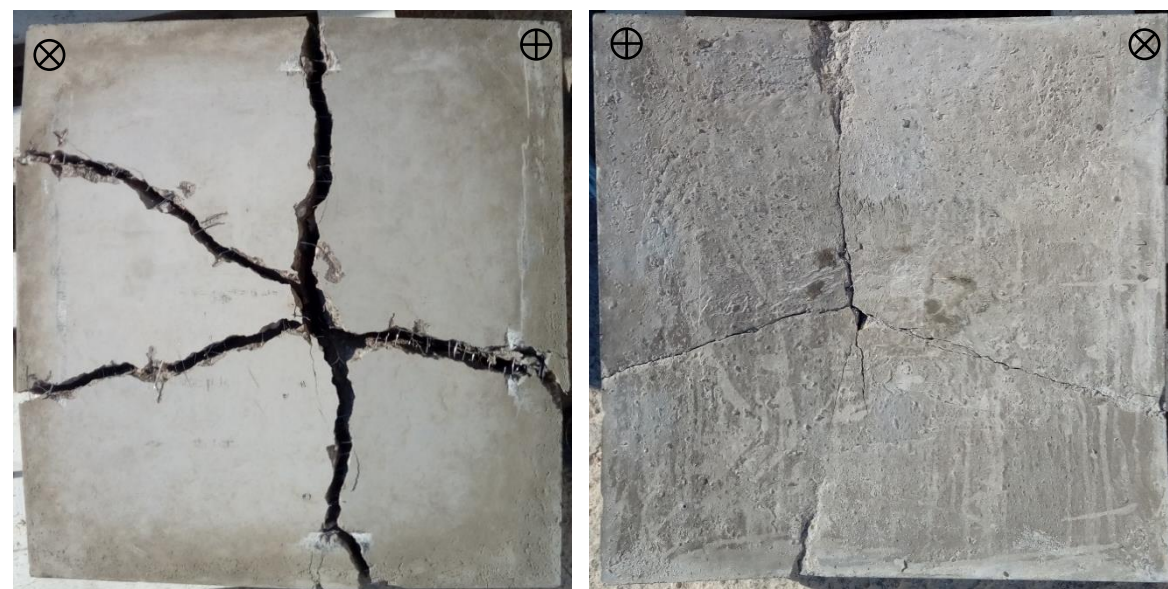
9.1. Obsah kovových drátků ve vzorcích 25 kg/m³

Druh zkoušky: Norma:	Stanovení kapacity absorbované energie drátkobetonových desek ČSN EN 14488-5		
Datum výroby:	4. 7. 2020	Procento vyztužení:	25 kg/m ³
Datum zkoušení:	9. 9. 2020	Charakteristické stáří:	67 dnů
Označení tělesa:	4.7./25/1	Kus / Celkem:	1 / 3
Rozměry tělesa:	600x600x100 mm	Pevnost v tlaku:	73,1 MPa
Maximální zatážení / Absorbovaná energie:	36,574 kN		177,418 J

Pozn.:

Pevnost v prostém tlaku byla stanovena v 68 dnech charakteristického stáří těles.

Fotodokumentace:



Charakter porušení:

Drátkobetonová deska dosáhla **maximální sílu při zatížení 37 kN** před vznikem poslední trhliny a průhybu přibližně **2,5 mm**. Od tohoto průhybu došlo k narušení betonové matrice napříč deskou a vytvoření **5 hlavních trhlin**. Během zatěžování docházelo k **velkým poklesům pevnosti** zkušebního prvku při vzniku trhlin. Poté napětí v tažené oblasti částečně přebírala ocelová vlákna, která se postupně napínala a přenášela napětí do okrajů trhlin. **Šířka hlavních trhlin** na konci zkoušky dosáhla šířky cca **1 – 2 cm** na spodním povrchu desky. Místa štěpení trhlin byla umístěna v místě největších deformací uprostřed desky pod působícím zatížením a u okrajů desky v místech uložení desky. Deska a napjatost byla rozdělena na **5 větších kusů**. Trhliny směřovaly od spodní tažené plochy v místě inicializace trhlin k okrajům desky. Zároveň procházely napříč deskou nejprve směrem k působícímu zatížení v centrální části a následně ke zdvihajícím se rohům desky v okrajových oblastech. **Od průhybu cca 13 mm byla únosnost desky vyčerpána** a přetvářela se při minimálním zatížení. Všechny trhliny se prokreslily na horní povrch navíc v místě trhlin u okrajů desky byl horní povrch drcen díky vzrůstajícím deformacím a uložení desky na podporový rám. **Kapacita absorbované energie** při průhybu ve středu **25 mm** je zaokrouhlena na **180 J**.

Křivka zatížení / průhyb:

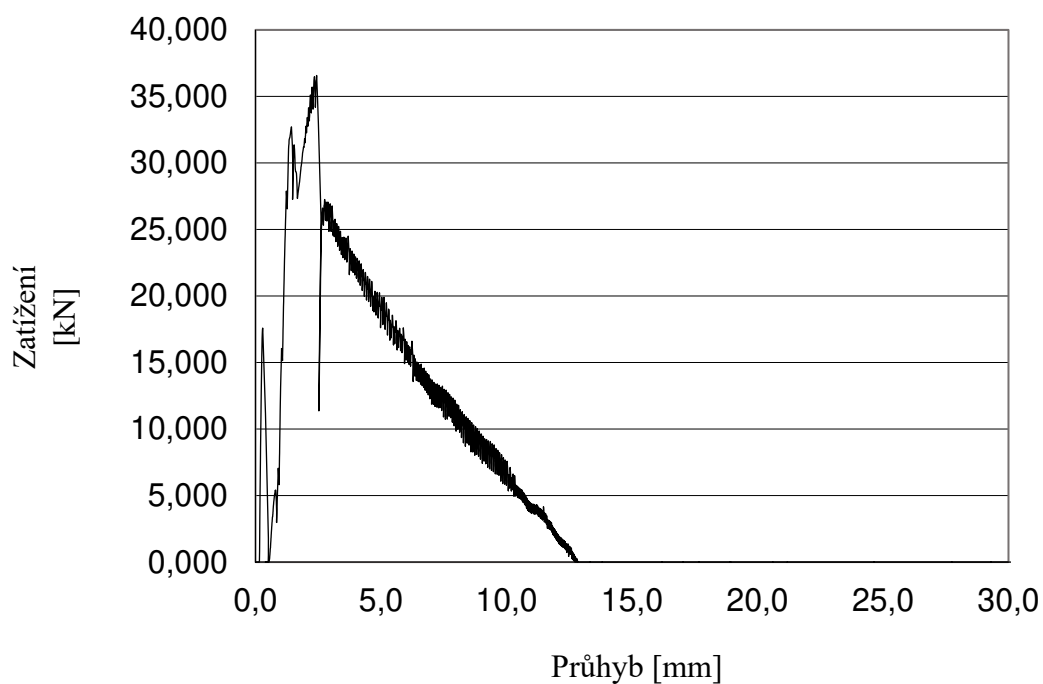
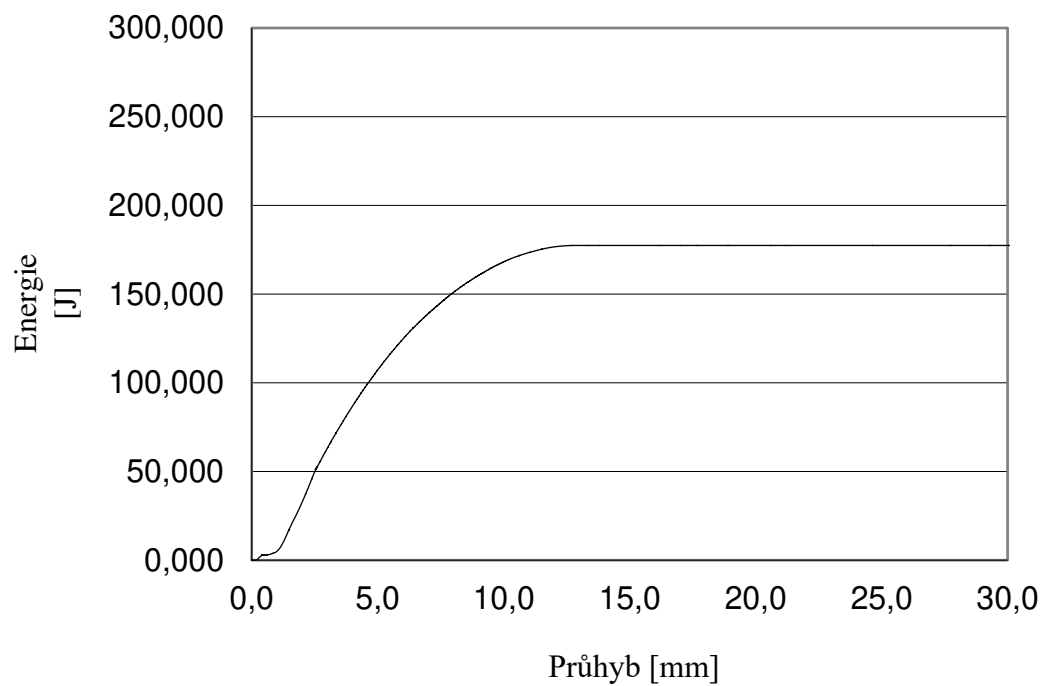


Diagram energie / průhyb:



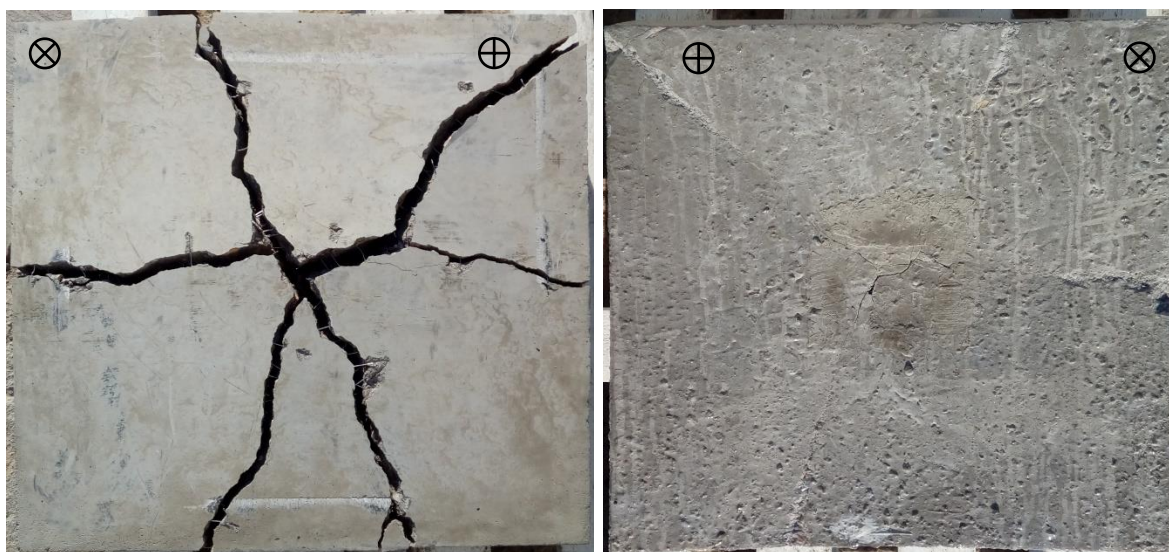
Tabulka 35. – Stanovení absorbované energie 25 kg/m³ vzorek 1/3

Druh zkoušky: Norma:	Stanovení kapacity absorbované energie drátkobetonových desek ČSN EN 14488-5		
Datum výroby:	4. 7. 2020	Procento vyztužení:	25 kg/m ³
Datum zkoušení:	9. 9. 2020	Charakteristické stáří:	67 dnů
Označení tělesa:	4.7./25/2	Kus / Celkem:	2 / 3
Rozměry tělesa:	600x600x100 mm	Pevnost v tlaku:	73,1 MPa
Maximální zatážení /Absorbovaná energie:	36,183 kN		250,298 J

Pozn.:

Pevnost v prostém tlaku byla stanovena v 68 dnech charakteristického stáří těles.

Fotodokumentace:



Charakter porušení:

Zkušební deska měla **maximální odpor** proti přetváření při zatížení **36 kN** a průhybu přibližně **2,1 mm**. Před dosažením maximální pevnosti docházelo k tvorbě trhlin spojenými s poklesy pevnosti prvku. Při tomto přetvoření došlo k porušení křehké betonové matrice a napříč deskou se vytvořilo **6 hlavních trhlin**. Následně zatížení převzala ocelová vlákna, která se postupně přetvářela a byla vytahována z betonové matrice. Délka drátků byla dostatečná k přemostění šířících se trhlin. **Šířka trhlin** na konci byla přibližně **0,5 – 2 cm** na spodní straně desky. Místa rozštěpení trhlin byla v místě největších deformací ve středu desky pod zatěžovanou plochou a na okrajích desky v místech uložení desky. Deska a napětí se rovnoměrně rozdělila na **6 větších částí**. Trhliny vznikaly na spodní tažené ploše v místě působícího zatížení a šířily se kolmo ke stranám nebo s odklonem cca 20° do kolmého směru. Zároveň směřovaly k hornímu povrchu nejprve směrem k zatížení ve středu desky a následně ke zdvihajícím se rohům a okrajům desky. **Při průhybu ve středu desky přibližně 21,5 mm byla únosnost desky minimální** a přetvářela se při malých hodnotách zatížení. Na horním povrchu desky byly znatelné pouze otevřené širší trhliny. Které se u okrajů desky drtily díky rostoucím deformacím zdvihajících se částí desky a uložení desky na podporu. **Kapacita absorbované energie** při středovém průhybu **25 mm** byla vypočítána a stanovena na **250 J**.

Křivka zatížení / průhyb:

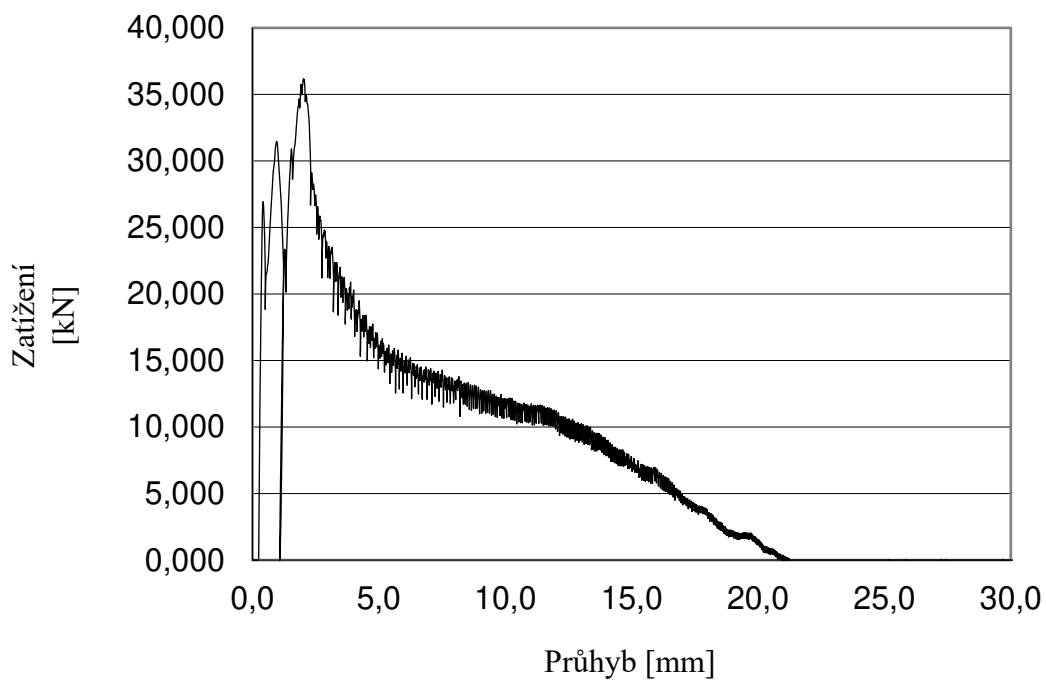
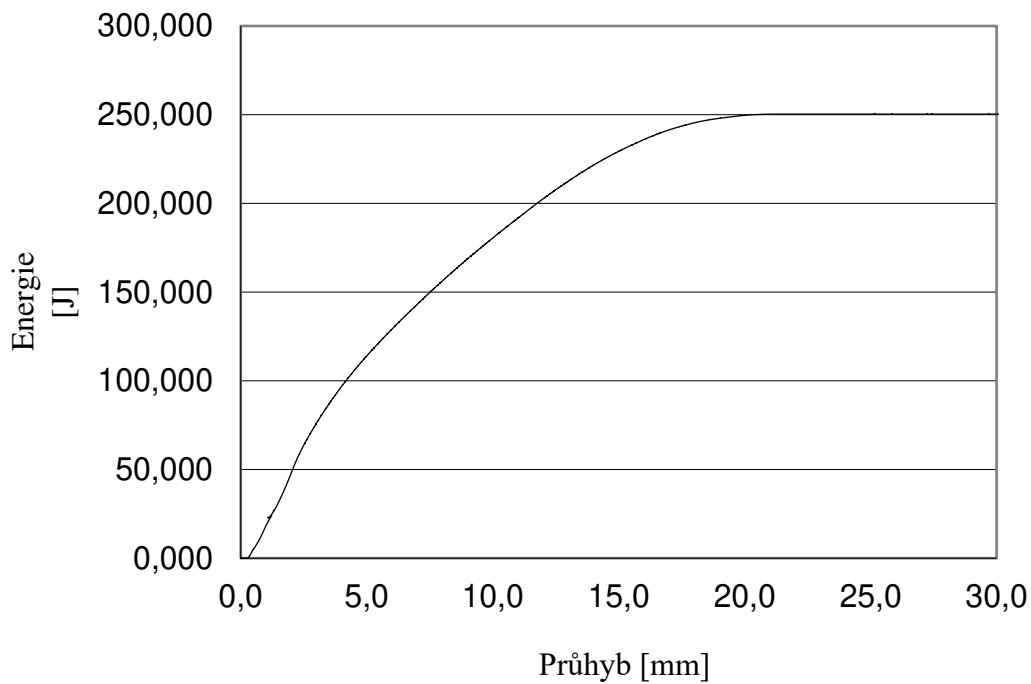


Diagram energie / průhyb:



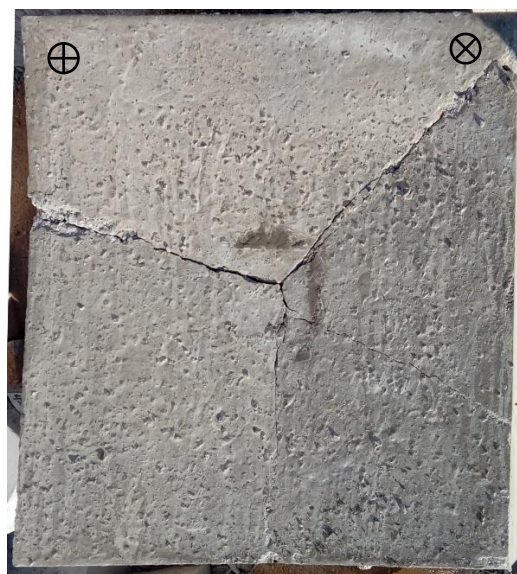
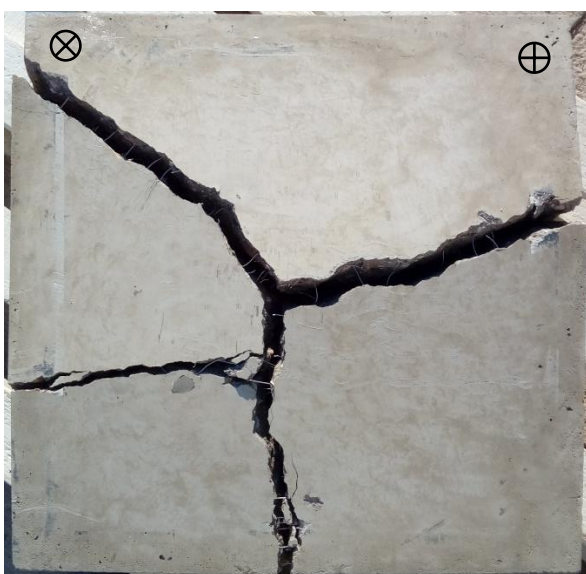
Tabulka 36. – Stanovení absorbované energie 25 kg/m³ vzorek 2/3

Druh zkoušky: Norma:	Stanovení kapacity absorbované energie drátkobetonových desek ČSN EN 14488-5		
Datum výroby:	4. 7. 2020	Procento vyztužení:	25 kg/m ³
Datum zkoušení:	9. 9. 2020	Charakteristické stáří:	67 dnů
Označení tělesa:	4.7./25/3	Kus / Celkem:	3 / 3
Rozměry tělesa:	600x600x100 mm	Pevnost v tlaku:	73,1 MPa
Maximální zatážení /Absorbovaná energie:	36,390 kN		44,851 J

Pozn.:

Pevnost v prostém tlaku byla stanovena v 68 dnech charakteristického stáří těles.

Fotodokumentace:



Charakter porušení:

Zkušební drátkobetonové těleso bylo porušeno při **maximálním zatížení 36 kN** a průhybu uprostřed desky **cca 0,4 mm**. Při tomto přetvoření došlo k narušení strukturální integrity betonového prvku a následně došlo k vytvoření **4 paprsků trhlin** a výraznému poklesu pevnosti, přičemž jedna ze stran desky nebyla zasažena. Vytvořily se pouze **4 kusy desky** a místo rozštěpení bylo pouze pod působícím zatížením. Trhliny směřovaly ze středu ke zdvihajícím se okrajům a rohům. Napříč deskou se šířily nejprve kolmo k působícímu zatížení a při okrajích směřovaly k více deformovaným rohům kusů desky. Následně po nerovnoměrném přerozdělení napjatosti v prvku převzala částečně napětí při dalším štěpení ocelová vlákna. Ocelové drátky, které zachycovaly lokální tahové účinky byly postupně deformovány, ve směrech působícího zatížení, napínány a vytahovány z betonové matrice. **Šířka trhlin** na konci zkoušky dosáhla šířky **0,5 – 2 cm** na spodní straně. Na horní straně desky byly všechny trhliny otevřené a při okrajích se s vzrůstajícími deformacemi navíc drtil horní betonový povrch. **Od průhybu pouze 6 mm byla odpor proti přetváření téměř vyčerpán** a deska se deformovala při malých zatíženích. Stanovená **kapacita absorbované energie** při průhybu ve středu desky odpovídajícímu **25 mm** byla po zaokrouhlení jen **40 J**.

Křivka zatížení / průhyb:

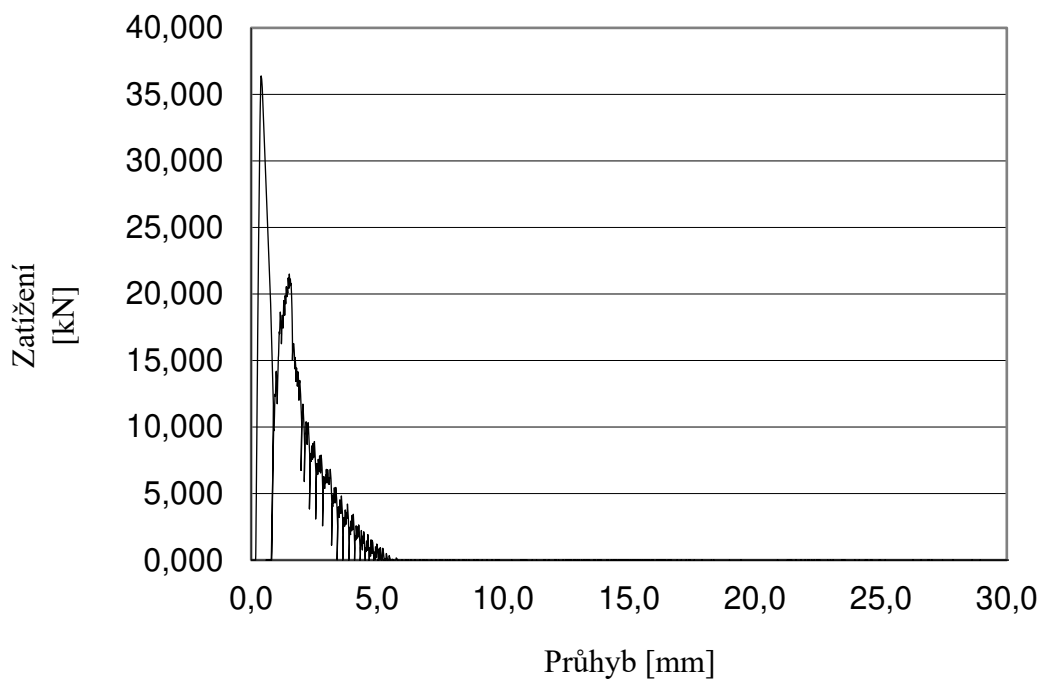
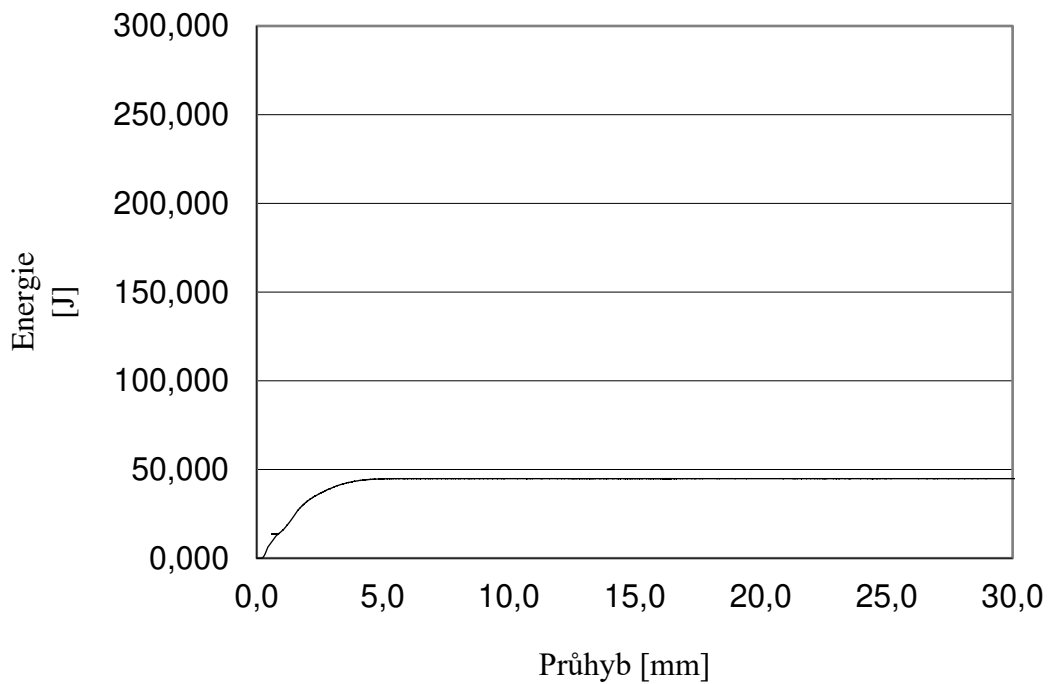


Diagram energie / průhyb:



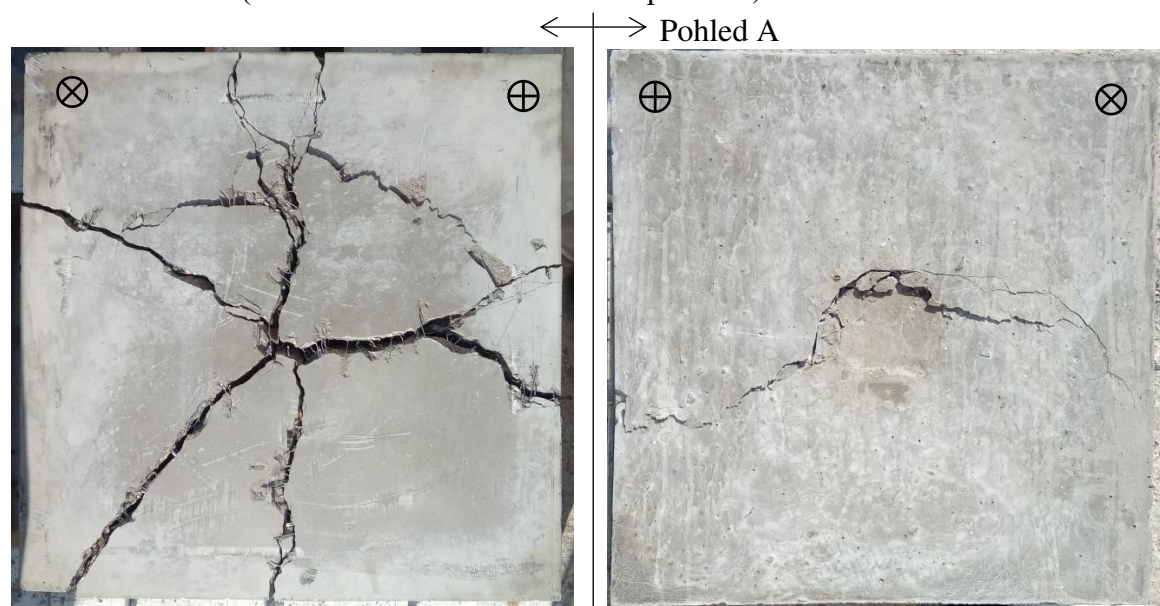
Tabulka 37. – Stanovení absorbované energie 25 kg/m³ vzorek 3/3

9.2. Obsah kovových drátků ve vzorcích 50 kg/m³

Druh zkoušky: Norma:	Stanovení kapacity absorbované energie drátkobetonových desek ČSN EN 14488-5		
Datum výroby:	11. 7. 2020	Procento vyztužení:	50 kg/m ³
Datum zkoušení:	15. 9. 2020	Charakteristické stáří:	66 dnů
Označení tělesa:	11.7./50/1	Kus / Celkem:	1 / 3
Rozměry tělesa:	600x600x100 mm	Pevnost v tlaku:	65,8 MPa
Maximální zatážení / Absorbovaná energie:	90,439 kN		1532,339 J

Pozn.: Pevnost v prostém tlaku byla stanovena v 61 dnech charakteristického stáří těles.

Fotodokumentace (+ Pohled A viz obrázek xx. Kapitola 9.):



Charakter porušení:

Drátkobetonová deska dosáhla **maximálního zatížení 90 kN** po vzniku první trhliny **při** průhybu ve středu asi **1,7 mm**. Následně při tomto zatížení docházelo k postupnému štěpení nejprve se vytvořilo **7 hlavních trhlin** směřujícím k okrajům. Později se vytvořily **další dvě trhliny**, které oddělily kusy v centrální oblasti díky tomu se vytvořilo celkem **9 kusů desky**. Místo štěpení trhlin bylo umístěno pod zatížením a v okrajových nepodporovaných oblastech centrální části prvku. Trhliny ve středu desky v průběhu přetváření směřovaly k působícímu zatížení zatím co po rozšíření trhlin k okrajům a jejich dalším rozštěpení směřovaly ke zdvihajícím se rohům a okrajům. Postupně napětí v tažené oblasti převzala ocelová vlákna, která se napínala a byla vytahována při deformování desky. Množství ocelových vláken bylo dostatečné, tak aby spolehlivě přenášely napětí, způsobily další štěpení trhlin ve středové oblasti a po ukončení zatěžování zbytkovou pevností prvku. **Šířka trhlin** po ukončení zatěžování byla **0,1 – 1 cm**. Na horním povrchu desky byla znatelná pouze jedna příčná trhlina procházející kolem zatěžovacího přípravku a ostatní trhliny neprošly na povrch. **Kapacita absorbované energie při průhybu 25 mm** byla stanovena na **1530 J**. **Reziduální síla** po ukončení zatěžování **při průhybu 30 mm** byla přibližně **29,610 kN**.

Křivka zatížení / průhyb:

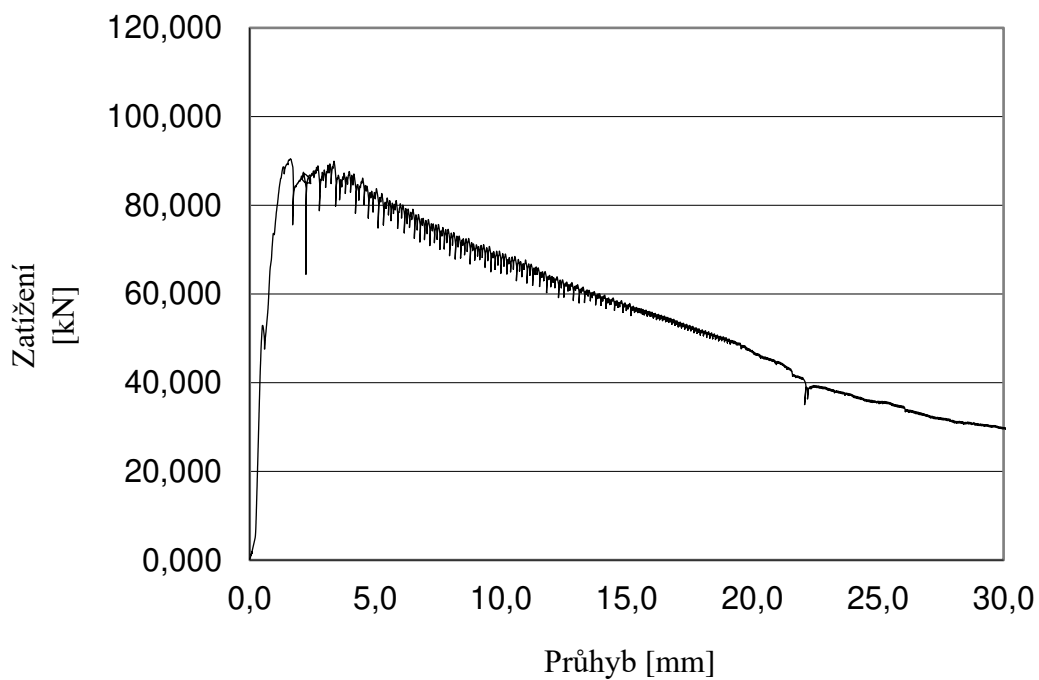
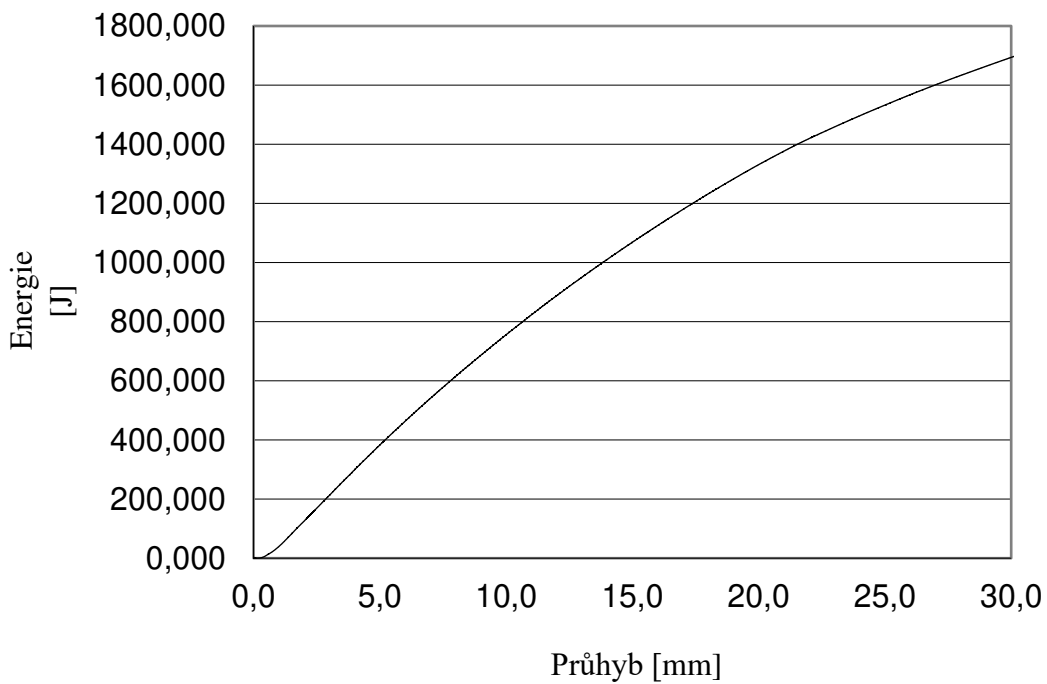


Diagram energie / průhyb:



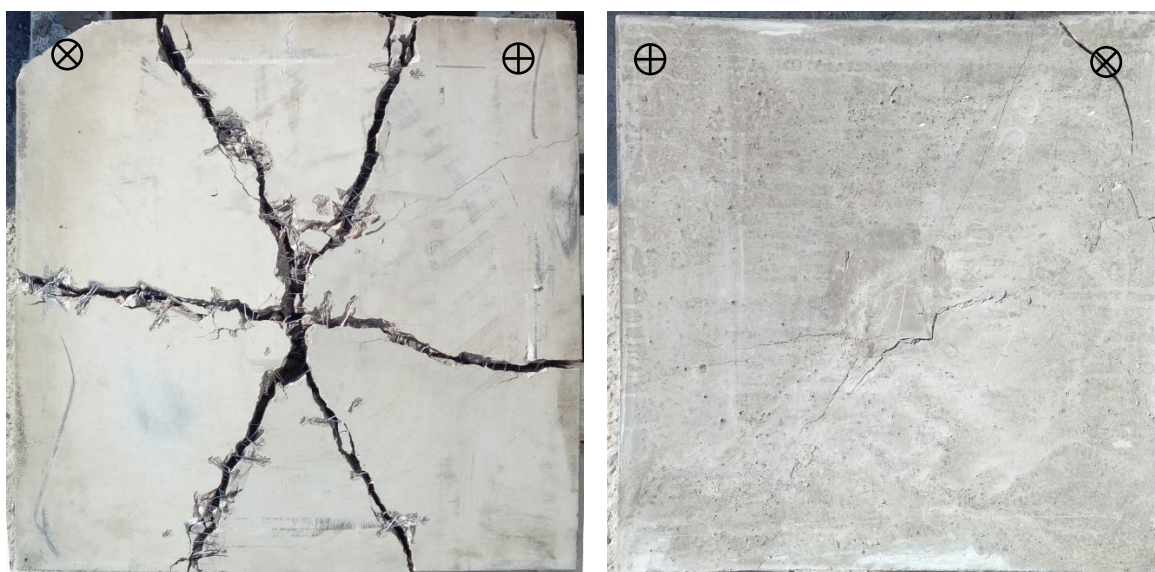
Tabulka 38. – Stanovení absorbované energie 50 kg/m³ vzorek 1/3

Druh zkoušky: Norma:	Stanovení kapacity absorbované energie drátkobetonových desek ČSN EN 14488-5		
Datum výroby:	11. 7. 2020	Procento vyztužení:	50 kg/m ³
Datum zkoušení:	15. 9. 2020	Charakteristické stáří:	66 dnů
Označení tělesa:	11.7./50/2	Kus / Celkem:	2 / 3
Rozměry tělesa:	600x600x100 mm	Pevnost v tlaku:	65,8 MPa
Maximální zatážení /Absorbovaná energie:	101,619 kN		1465,055 J

Pozn.:

Pevnost v prostém tlaku byla stanovena v 61 dnech charakteristického stáří těles.

Fotodokumentace:



Charakter porušení:

Zkušební těleso mělo **maximální zatížení 102 kN** po vzniku první trhliny při přetvoření ve středu desky **3,4 mm**. Následně po tomto přetvoření došlo k vytvoření **6 hlavních trhlín** a **v závěru zatěžování vznikla poslední tenčí trhlinka** na největším z kusů navíc došlo k odštěpení jednoho špatně vyztuženého rohu desky. Po rovnoměrném rozdělení napětí na desku došlo k vytvoření **7 obdobně velikých částí desky**. Místo rozštěpení bylo umístěno přímo pod zatěžovacím přípravkem trhliny se paprscovitě šířily do stran procházely téměř kolmo ke stranám a v případě dvou prasklin s odklonem až 20° od kolmice. Trhliny ve středu procházely kolmo skrz desku a v okrajových oblastech se při průchodu deskou odklonily do kolice a mířily do míst s největšími deformacemi tedy do rohů jednotlivých částí desky. Společně s růstem deformací bylo aktivováno více drátků v tažené spodní části desky, které spolehlivě přenášely napětí mezi kusy desky až do jejich porušení vytržením z betonové matrice. **Šířka hlavních trhlín** byla po ukončení zatěžování **od 0,005 – 1 cm** na spodním povrchu. Na horní povrch se prokreslilo pouze 5 trhlín ve formě nepatrně širokých prasklin. Stanovená **kapacita absorbované energie** při definovaném přetvoření **25 mm** byla **1470 J**. **Zbytková síla** určená při maximálním **průhybu 30 mm** byla stanovena na **20,450 kN**.

Křivka zatížení / průhyb:

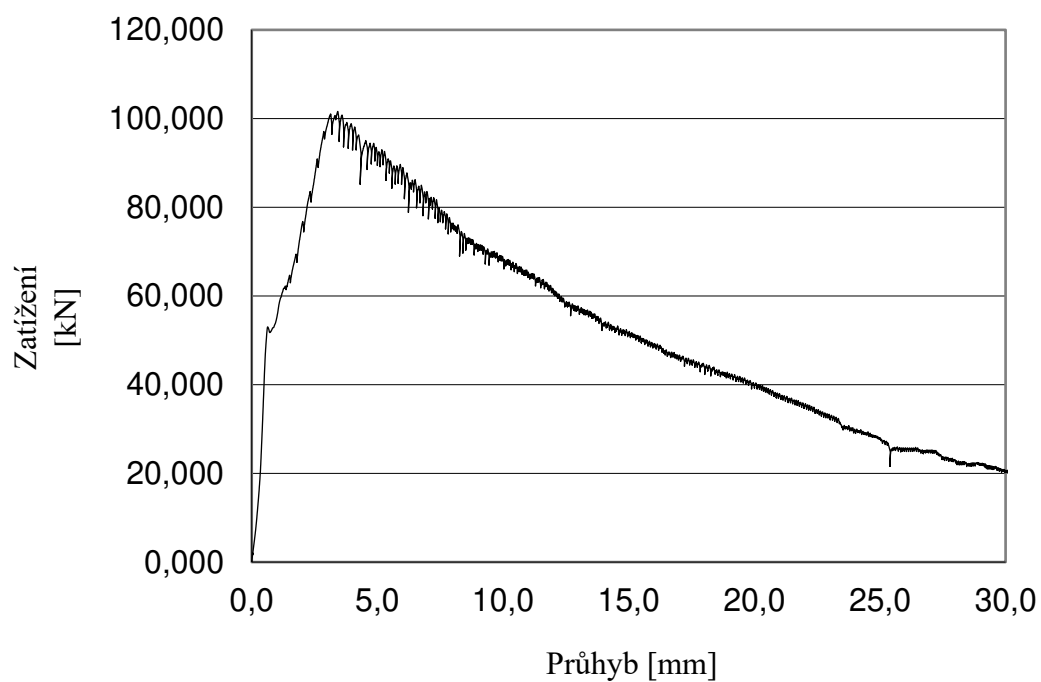
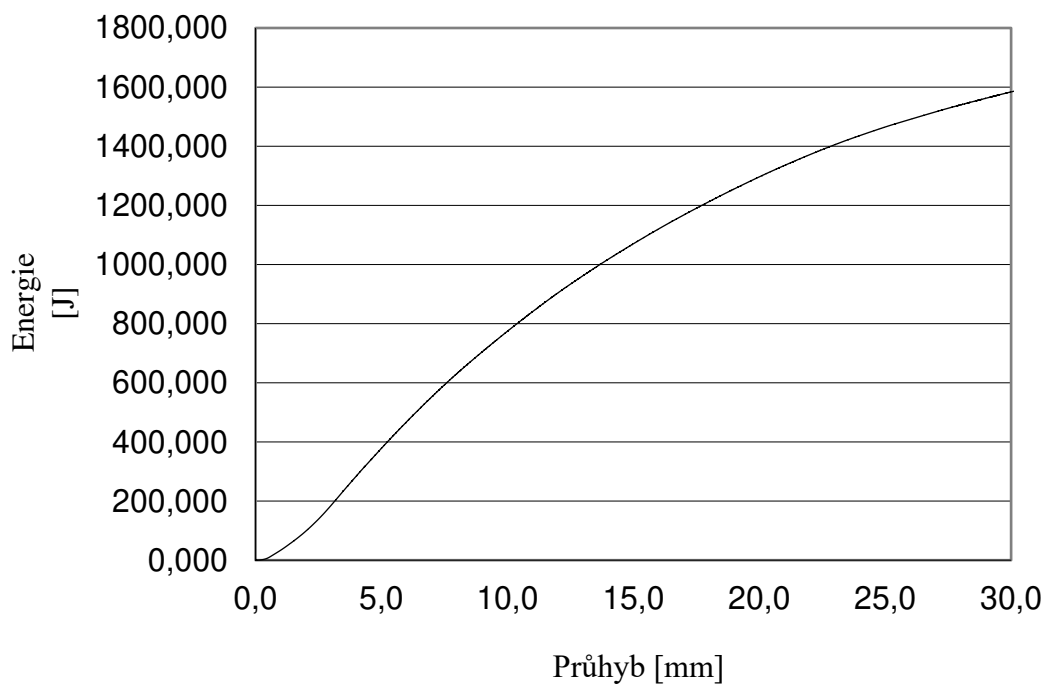


Diagram energie / průhyb:

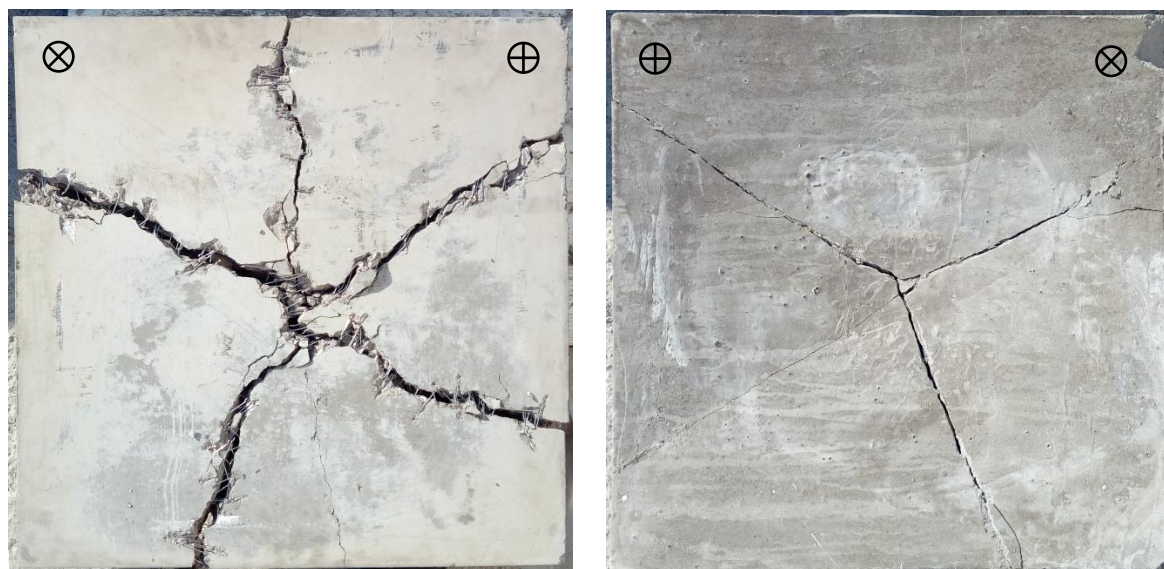


Tabulka 39. – Stanovení absorbované energie 50 kg/m³ vzorek 2/3

Druh zkoušky: Norma:	Stanovení kapacity absorbované energie drátkobetonových desek ČSN EN 14488-5		
Datum výroby:	11. 7. 2020	Procento vyztužení:	50 kg/m ³
Datum zkoušení:	15. 9. 2020	Charakteristické stáří:	66 dnů
Označení tělesa:	11.7./50/3	Kus / Celkem:	3 / 3
Rozměry tělesa:	600x600x100 mm	Pevnost v tlaku:	65,8 MPa
Maximální zatážení /Absorbovaná energie:	86,993 kN		1087,972 J

Pozn.: Pevnost v prostém tlaku byla stanovena v 61 dnech charakteristického stáří těles.

Fotodokumentace:



Charakter porušení:

Zkušební deskové těleso mělo **největší odpor proti přetváření 87 kN** po vzniku prvních trhlin **při průhybu 1,6 mm**. V místě inicializace trhlin umístěným přesně ve středu desky pod zatížením se vytvořily paprsky **5 hlavních trhlin**. V průběhu zatěžování vznikl ještě **jeden paprsek** trhliny tenčí pouze v tažené oblasti, který vznikl v důsledku přerozdělení napětí mezi kusy. Po ukončení zatěžování se celkem tedy deska rozdělila na **6 dílů**. Paprsky prasklin se rozšiřovaly ze středu k okrajům šířily se kolmo ke středu nebo s odklonem do 20° od kolmého směru. Trhliny byly inicializovány od spodního taženého povrchu a skrz desku se šířily nejprve kolmo ve středu a následně také s odklonem k ohýbaným rohům desky. Porušování drátkové výztuže vytrháváním jednotlivých drátků z betonové matrice také probíhalo od spodního povrchu společně s rozšiřováním trhlin. Snižovala se tím účinná výška desky směrem k původní neutrální ploše ve středu desky. Ale lokální tahové napětí byla transportována větším množstvím drátků a eliminována v betonové matrici. Až se nakonec snížila účinná výška příliš a došlo k postupným poklesům únosnosti zkušební desky společně se šířením trhlin k hornímu povrchu. **Rozměr hlavních trhlin** po zatěžování dosáhl **šířky od 0,005 – 1 cm**. Na horní povrch se prokreslily 4 praskliny ostatní nebyly znatelné. **Kapacita absorbované energie** byla stanovena na **1090 J při 25 mm** průhybu uprostřed desky. **Reziduální síla** po zatěžování desky určená při průhybu **30 mm** byla **16,430 kN**.

Křivka zatížení / průhyb:

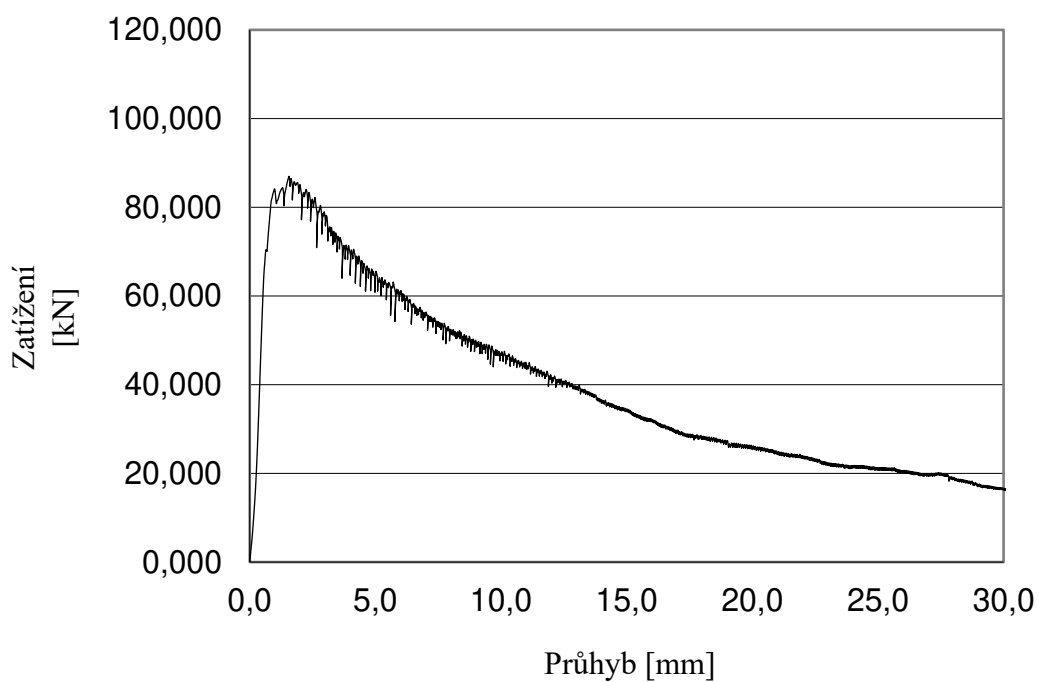
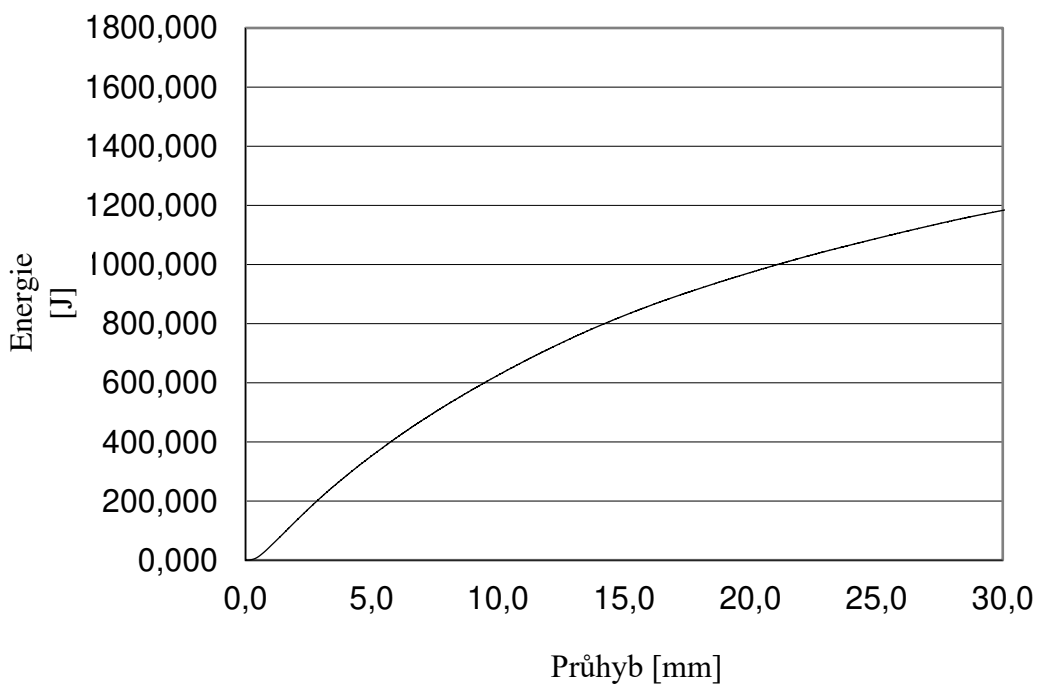


Diagram energie / průhyb:



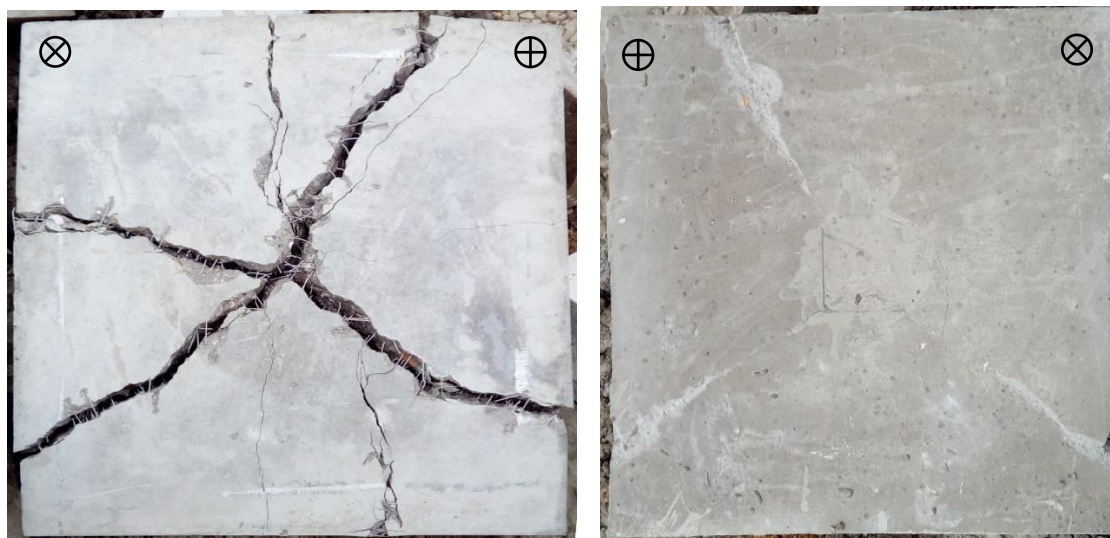
Tabulka 40. – Stanovení absorbované energie 50 kg/m³ vzorek 3/3

9.3. Obsah kovových drátků ve vzorcích 75 kg/m³

Druh zkoušky: Norma:	Stanovení kapacity absorbované energie drátkobetonových desek ČSN EN 14488-5		
Datum výroby:	19. 9. 2020	Procento vyztužení:	75 kg/m ³
Datum zkoušení:	16. 12. 2020	Charakteristické stáří:	88 dnů
Označení tělesa:	19.9./75/1	Kus / Celkem:	1 / 3
Rozměry tělesa:	600x600x100 mm	Pevnost v tlaku:	80,0 MPa
Maximální zatážení /Absorbovaná energie:	125,612 kN		2058,741 J

Pozn.: Pevnost v prostém tlaku byla stanovena v 88 dnech charakteristického stáří těles.

Fotodokumentace:



Charakter porušení:

Maximální únosnost zkušební desky byla **126 kN** po vzniku prvních trhlin při průhybu uprostřed desky přibližně **2,8 mm**. Trhliny byly inicializovány uprostřed desky při taženém povrchu nejprve se vytvořilo **6 paprsků hlavních trhlin** směřujícím k okrajům a později vznikly ještě **dvě tenké trhliny**. Následně po ukončení deformování byla deska rozdělena trhlinami na **8 dílů**. Trhliny se při svém šíření od spodního povrchu zpočátku šířily kolmo později odklonily k deformovaným rohům desky případně se rozdvojily. Otvírání a šíření trhlin bylo nejdříve spojené se značnými poklesy pevnosti desky později se deska deformovala rovnoměrně. Množství drátkové výztuže bylo dostatečné k přenesení sil mezi kusy a vytvoření drobných trhlin podél hlavních či jejich rozštěpení při šíření k tlačnému povrchu. Porušování vláken vytahováním z křehké betonové matrice bylo viditelné pouze u nejširších trhlin. **Šířka hlavních trhlin** po ukončení zatěžování byla přibližně **0,005 – 1 cm**. Na horním povrchu byly viditelné pouze tři z nejširších hlavních trhlin vycházející z rohu zatěžovacího přípravku a bylo patrné drcení horního betonového povrchu v místě uložení desky. Dále byla patrná kruhová trhlina, která se vytvořila kolem působícího zatížení. Všechny trhliny na horním povrchu zkušební desky byly uzavřené a téměř neznatelné. **Kapacita absorbované energie** při centrálním **průhybu 25 mm** byla stanovena na **2060 J**. **Zbytková síla** drátkobetonové desky po zatěžování a při průhybu **30 mm** je **34,313 kN**.

Křivka zatížení / průhyb:

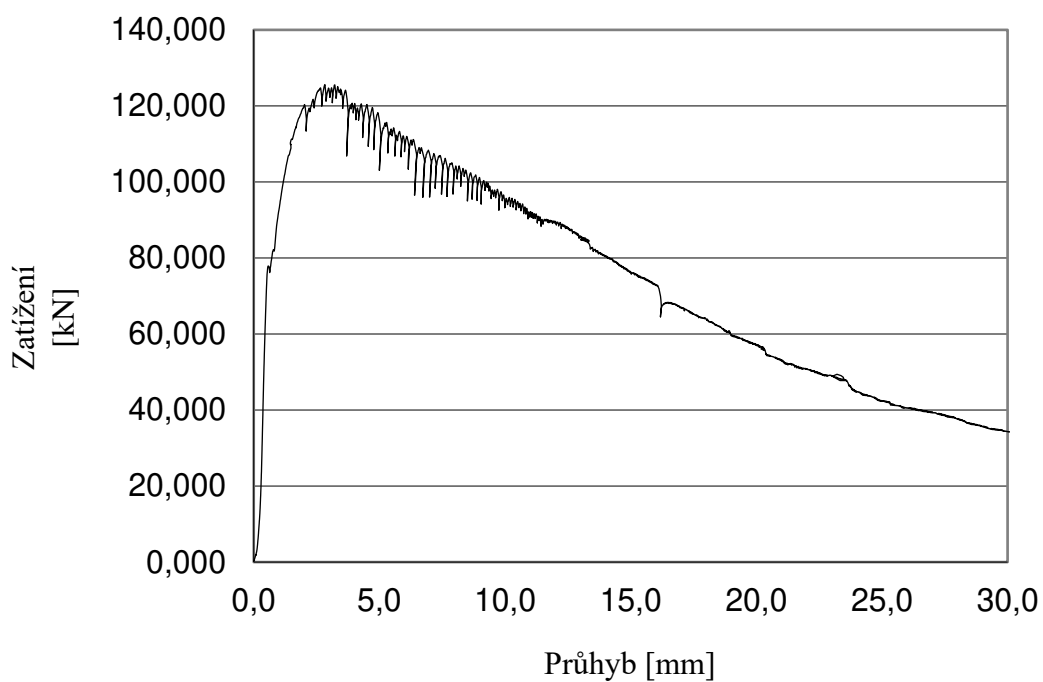
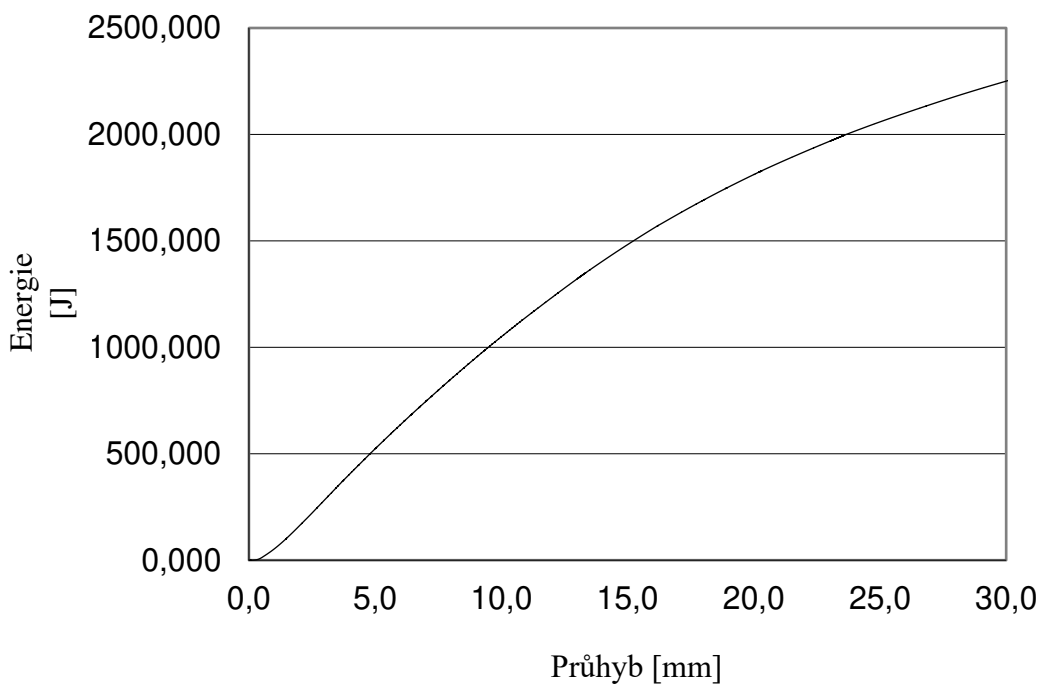


Diagram energie / průhyb:



Tabulka 41. – Stanovení absorbované energie 75 kg/m³ vzorek 1/3

Druh zkoušky: Norma:	Stanovení kapacity absorbované energie drátkobetonových desek ČSN EN 14488-5		
Datum výroby:	19. 9. 2020	Procento vyztužení:	75 kg/m ³
Datum zkoušení:	16. 12. 2020	Charakteristické stáří:	88 dnů
Označení tělesa:	19.9./75/2	Kus / Celkem:	2 / 3
Rozměry tělesa:	600x600x100 mm	Pevnost v tlaku:	80,0 MPa
Maximální zatážení /Absorbovaná energie:	123,091 kN		1752,691 J

Pozn.: Pevnost v prostém tlaku byla stanovena v 88 dnech charakteristického stáří těles.

Fotodokumentace:



Charakter porušení:

Zkušební drátkobetonové těleso dosáhlo **maximálního zatížení 123 kN** před vznikem prvních trhlin při středovém průhybu desky **2,1 mm**. Trhliny vznikající na spodním povrchu se paprskovitě šířily ze středu desky ke zdvihajícím se rohům desky s odklonem až 40° od kolmého směru. Po ukončení zatěžování zkušební desky bylo těleso rozděleno **5 hlavními trhlinami a jednou slabší** vzniklou později v průběhu zatěžování. U trhliny, která se šířila kolmo ke straně desky došlo k rozdělení trhliny v místě uložení desky. Deska byla tedy paprsky trhlin rozdělena na **6 větších kusu**. Trhliny dosáhly **šířky při spodním povrchu 0,005 – 1 cm**. Paprsky směřující do rohů desky se při svém šíření skrz tloušťku desky šířily kolmo pouze u horního tlačného povrchu se rozštěpily a odklonily. Trhliny směřující kolmo ke straně desky se také nejprve šířily kolmo k tloušťce desky, ale k jejich rozdělení, štěpení a změnu směřování docházelo již od poloviny tloušťky desky. Ocelová vlákna byla porušována od spodního taženého povrchu společně s rozšiřováním trhlin v betonové matici. V průběhu zatěžování bylo aktivováno tahem větší množství drátkové výztuže a docházelo ke štěpení trhlin. Horní povrch v místě trhlin byl většinou uzavřený byla viditelná pouze kruhová trhlina v místě působícího zatížení. Případně došlo pouze k odloupení tenké betonové povrchové vrstvy, ale horní povrch nebyl výrazně rozdrčen. **Kapacita absorbované mechanické energie** drátkobetonové desky **při 25 mm** průhybu byla **1750 J**. **Reziduální síla** na konci zatěžování **při průhybu 30 mm** ve středu desky je **31,765 kN**.

Křivka zatížení / průhyb:

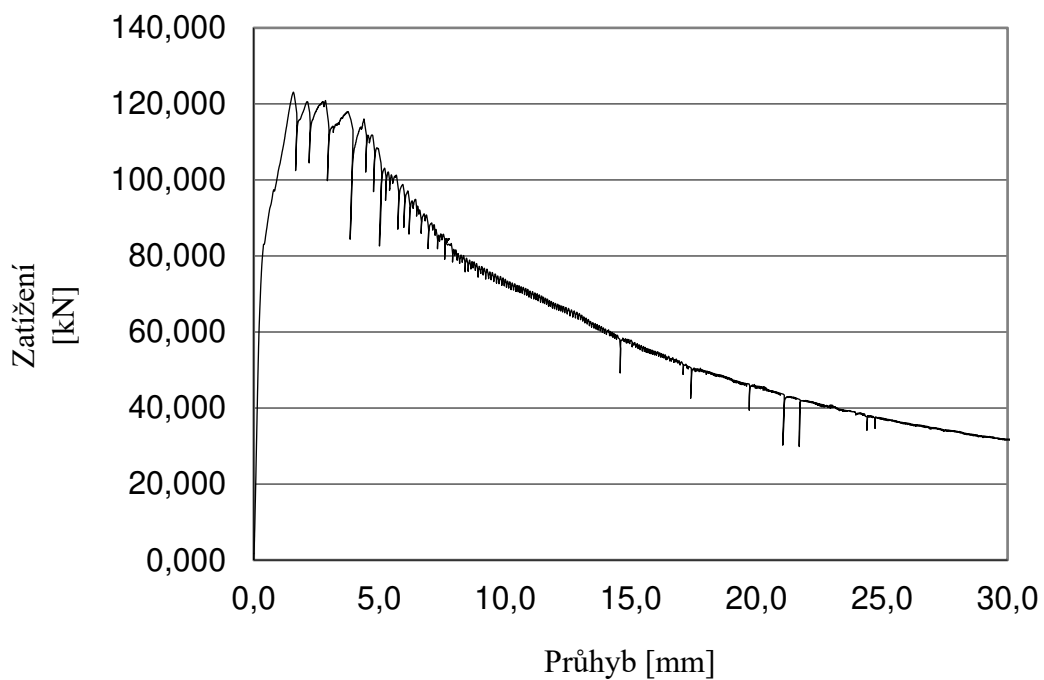
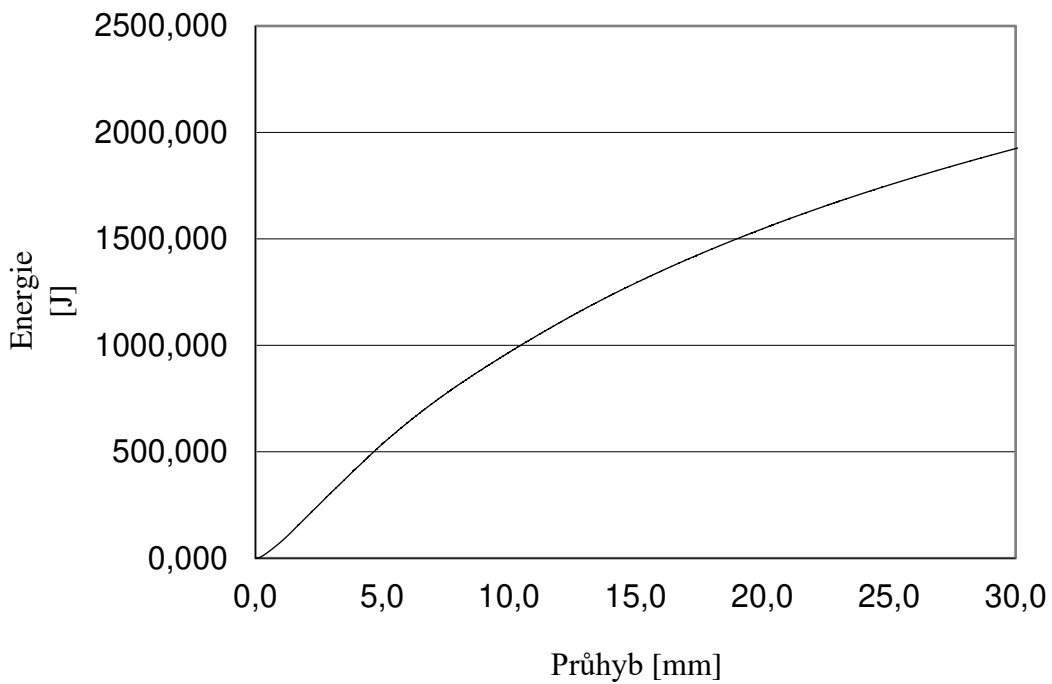


Diagram energie / průhyb:



Tabulka 42. – Stanovení absorbované energie 75 kg/m³ vzorek 2/3

Druh zkoušky: Norma:	Stanovení kapacity absorbované energie drátkobetonových desek ČSN EN 14488-5		
Datum výroby:	19. 9. 2020	Procento vyztužení:	75 kg/m ³
Datum zkoušení:	16. 12. 2020	Charakteristické stáří:	88 dnů
Označení tělesa:	19.9./75/3	Kus / Celkem:	3 / 3
Rozměry tělesa:	600x600x100 mm	Pevnost v tlaku:	80,0 MPa
Maximální zatážení / Absorbovaná energie:	109,173 kN		1706,831 J

Pozn.: Pevnost v prostém tlaku byla stanovena v 88 dnech charakteristického stáří těles.

Fotodokumentace:



Charakter porušení:

Zkušební deska měla **maximální síla zatížení** po vzniku prvních trhlin při zatížení **109 kN** a průhybu ve středu desky **2,8 mm**. Paprsky trhlin se postupně šířily ze středu z místa, kde bylo vnášeno lokální zatížení k uloženým okrajům desky. Společně s šířením trhlin do stran docházelo k rozšiřování šířky trhlin a skokovým poklesům pevnosti během trhání betonové matrice zatížení následně přenášela rozptýlená drátková výztuž. Dále v průběhu zatěžování zároveň s poklesem středové oblasti byly rohy desky naopak přizdvihovány. Deska po ukončení zatěžování byla **rozdělena 7 paprsky trhlin na 7 částí**. **Šířka trhlin** na spodním taženém povrchu desky byla **0,005 – 1 cm**. Trhliny při svém šíření od spodní tažené plochy k hornímu povrchu se nejprve šířily kolmo k zatížení. Později přibližně do poloviny desky docházelo k jejich rozdvíjení, štěpení betonové matrice podél hlavních trhlin a změnu směrování trhlin směrem ke zdvihajícím se rohům. Rozptýlená ocelová vláknová výztuž křehké betonové matrice byla porušována tahem díky rozdílu v tahovém přetvoření mezi výztužnými vlákny a betonem. Porušení drátkobetonu probíhalo od spodního povrchu třecím prokluzem ocelových drátků a následným vytažováním drátků z matrice. Na horním povrchu desky byly viditelné pouze nejširší z trhlin díky odlupování povrchové vrstvy betonu při ohýbání mezi částmi desky. Všechny trhliny byly uzavřené pouze kruhová trhlina v okolí zatížení byla otevřená. **Kapacita absorbované energie** při průhybu **25 mm** byla **1710 J**. **Zbytková síla** zkušební desky na konci zatěžování při průhybu **30 mm** byla **34,955 kN**.

Křivka zatížení / průhyb:

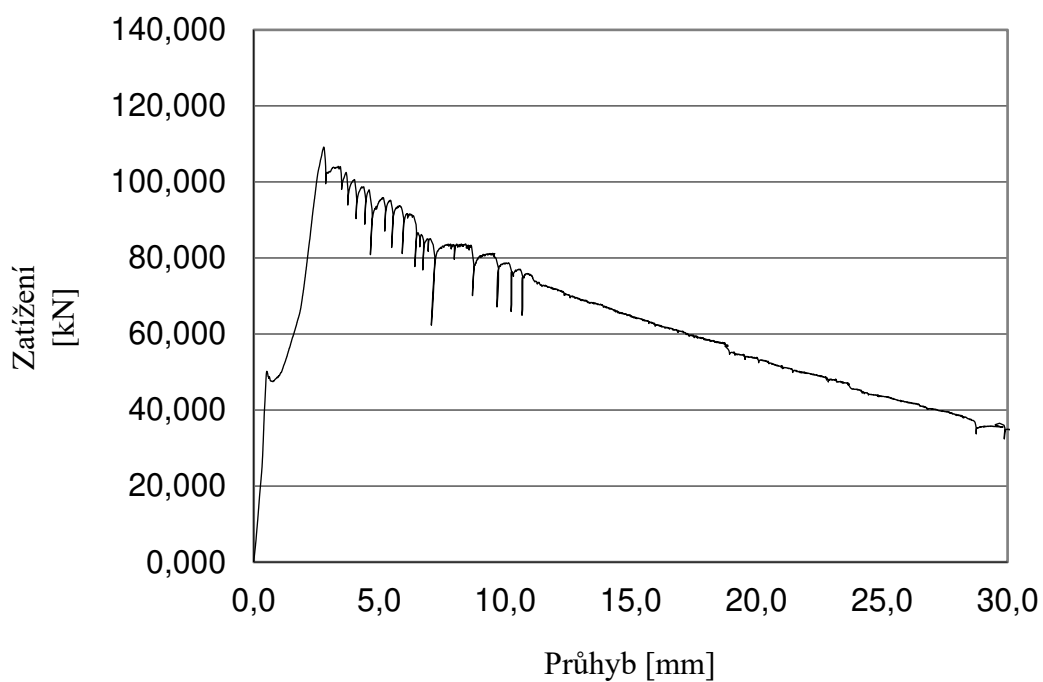
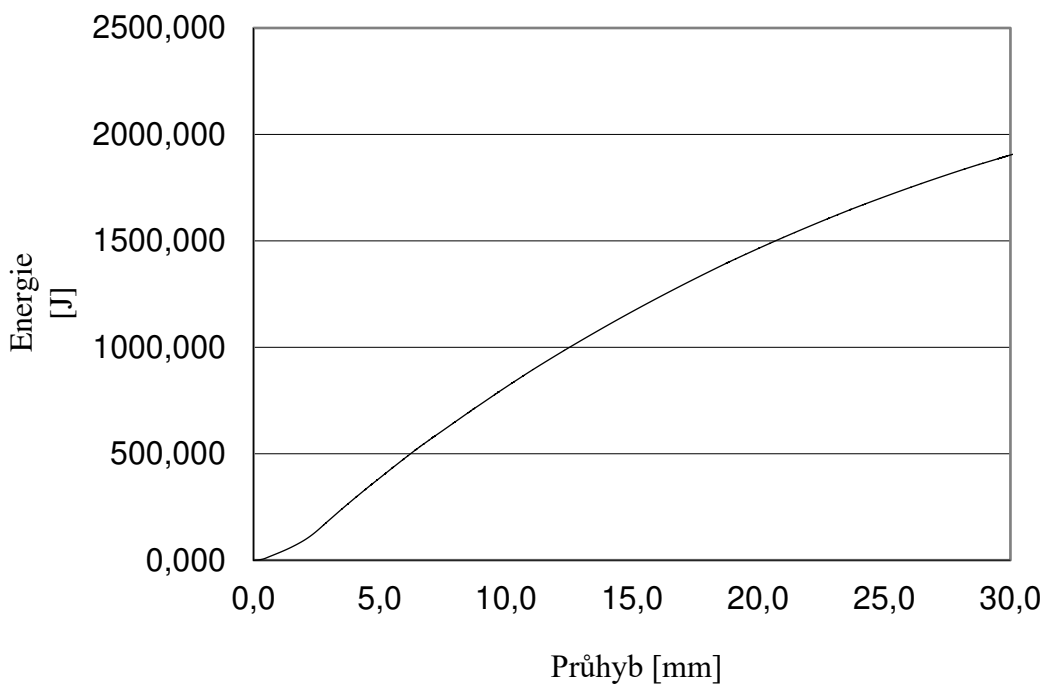


Diagram energie / průhyb:

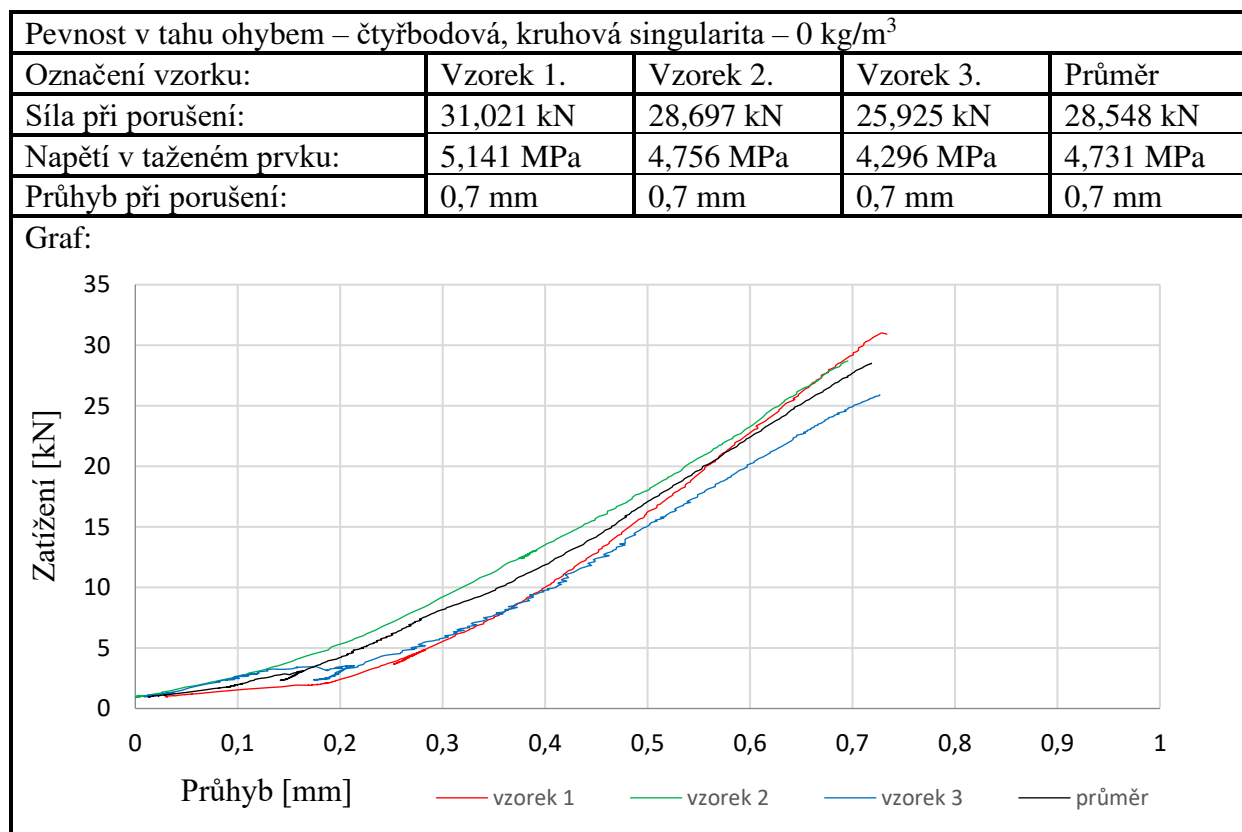


Tabulka 43. – Stanovení absorbované energie 75 kg/m³ vzorek 3/3

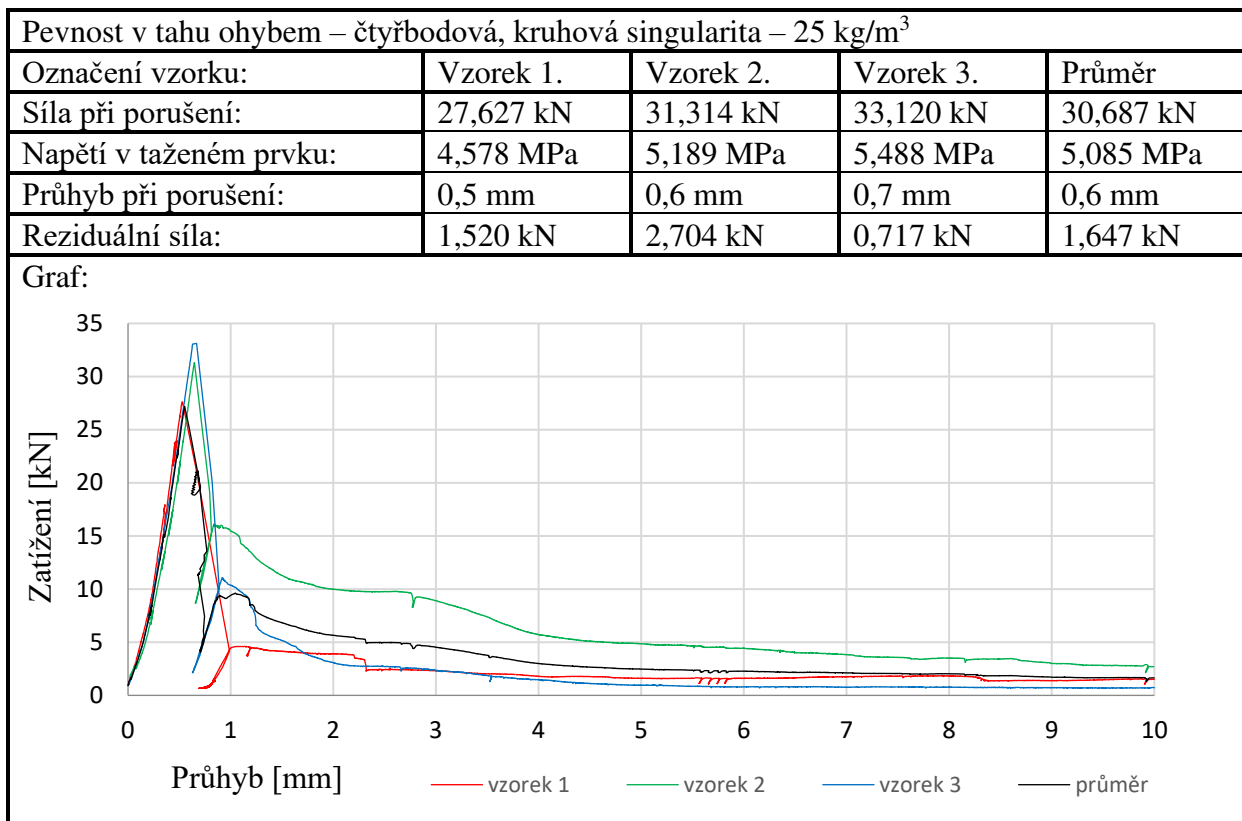
10. ZÁVĚR

Dosažené výsledky experimentální práce jsou v závěru rozděleny podle druhu zkoušek. Na zkoušky **v tahu za ohybu hranolů s kruhovým otvorem, plných hranolů bez otvoru** a zkoušky drátkobetonových desek při **stanovení kapacity absorbované energie**. Dále jsou výsledky rozděleny **podle množství přidaných ocelových drátků 0, 25, 50, 75 kg / m³ betonu**. Jednotlivé výsledky ze zkoušek jsou dány vždy **na základě tří vzorků** a průměrný diagram odolnosti je tedy odvozen z diagramů tří příslušných vzorků. **Výsledné průměrné diagramy odolnosti**, rozdělené podle daných objemů rozptýlené drátkové výztuže, jsou v závěru příslušných zkoušek porovnávány a hodnoceny jejich charakteristiky při zatěžování. Detailní protokoly k jednotlivým zkušebním tělesům a další doplňkové zkoušky čerstvého betonu (objemová hmotnost, obsah vzduchu, sednutí rozlitém) a ztvrdlého betonu (objemová hmotnost, prostá pevnost) jsou uvedeny v experimentální části práce (viz kapitola 6., 7., 8., 9.). Na konci jsou uvedeny podkapitoly týkající se praktických aplikací a problematiky variability dosažených výsledků. V závěru práce jsou uvedeny přílohy s kontrolním zkušebním plánem. Stanovení dalších charakteristik jako další zkoušky čerstvého betonu, tahová pevnost, statický modul pružnosti, odolnost proti výbuch a požáru byly stanoveny externě (Dr. Suchánek).

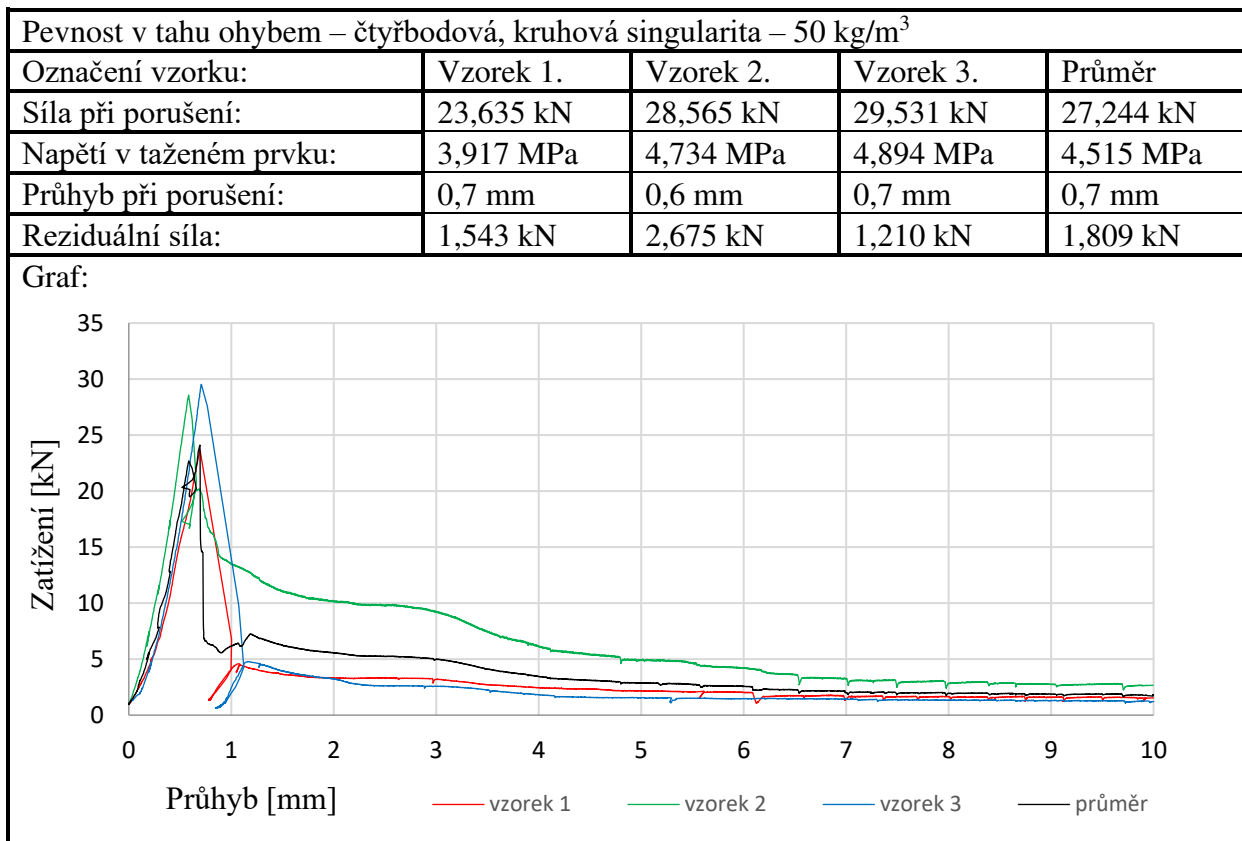
Pevnost v tahu ohybem – čtyřbodová, kruhová singularita



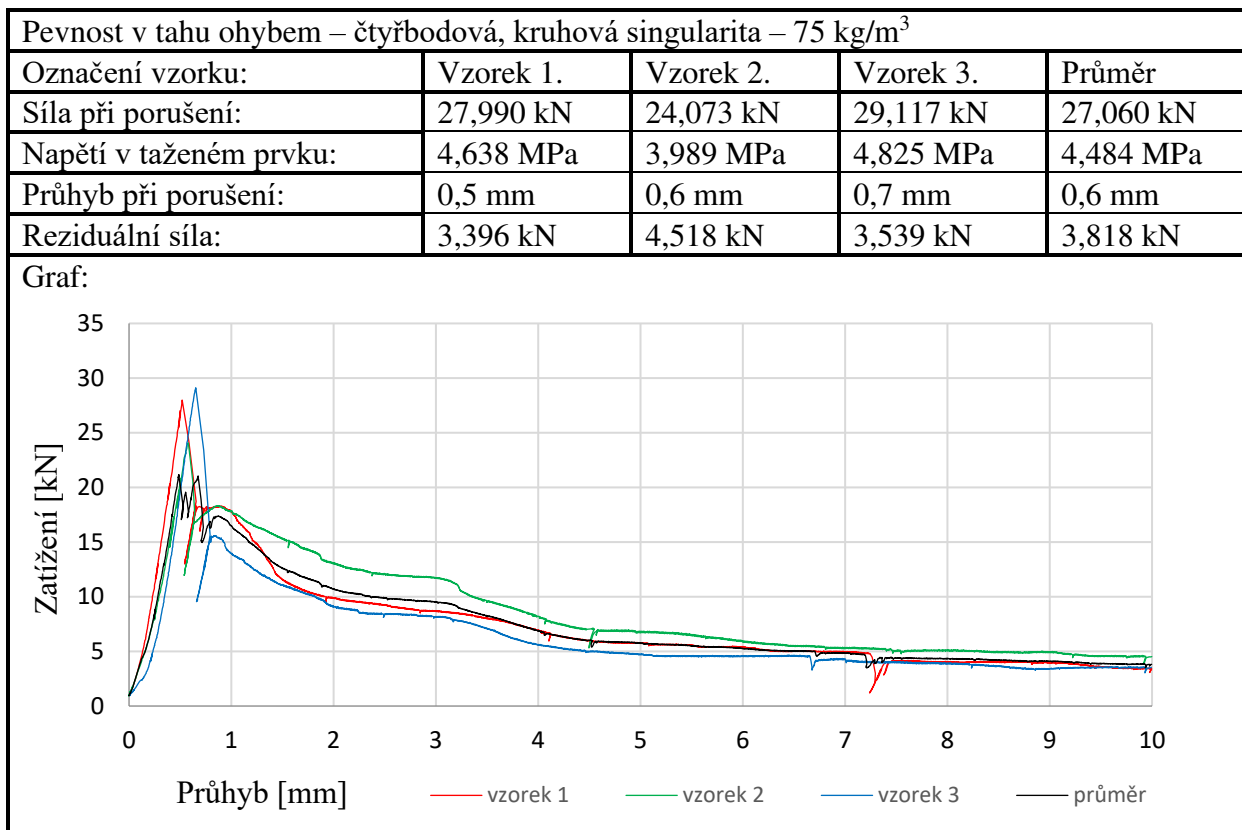
Tabulka 44. – Pevnost v tahu ohybem – čtyřbodová, kruhová singularita – 0 kg/m³



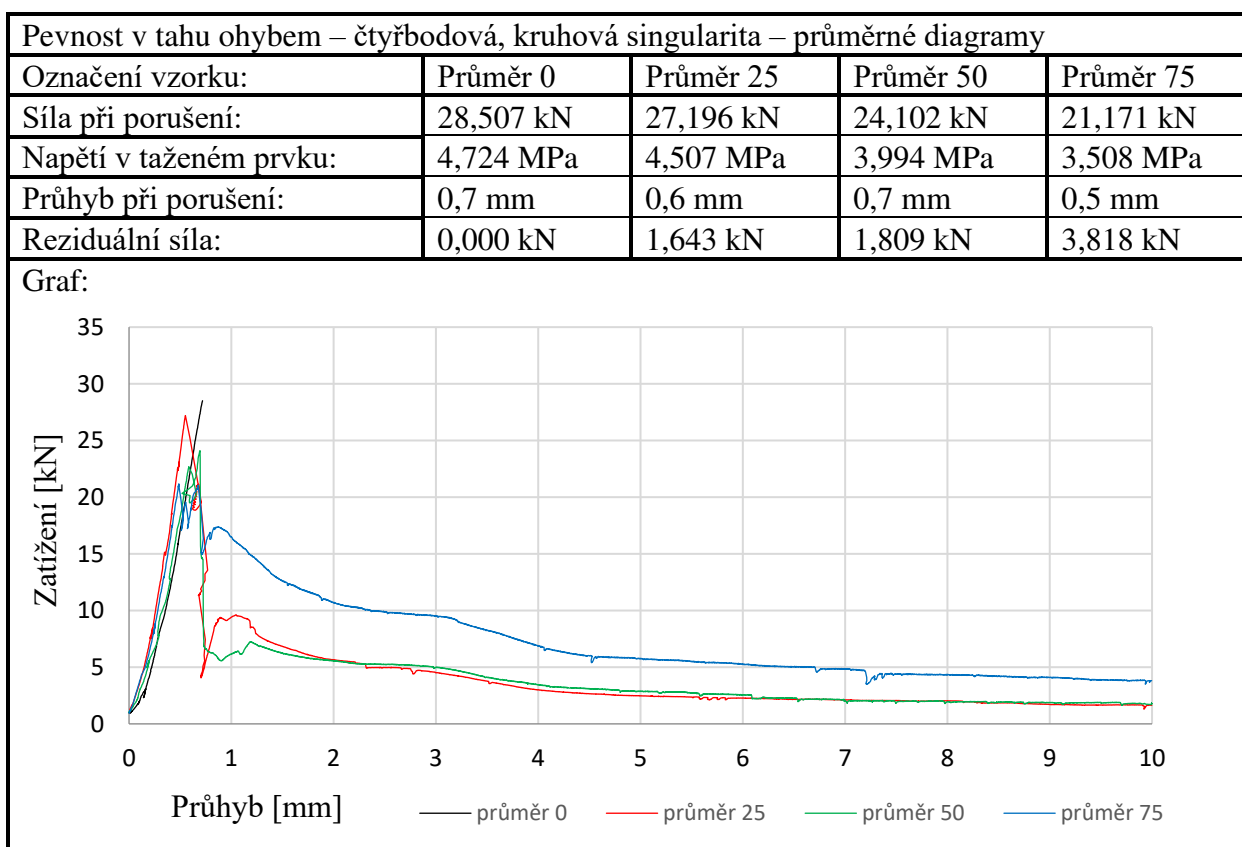
Tabulka 45. – Pevnost v tahu ohybem – čtyřbodová, kruhová singularita – 25 kg/m³



Tabulka 46. – Pevnost v tahu ohybem – čtyřbodová, kruhová singularita – 50 kg/m³



Tabulka 47. – Pevnost v tahu ohybem – čtyřbodová, kruhová singularita – 75 kg/m³



Tabulka 48. – Pevnost v tahu ohybem – čtyřbodová, kruhová singularita

Zkoušky pevnosti v tahu ohybem byly prováděné podle návrhové metodiky fakulty stavební ČVUT v Praze (kapitola 4.4.3.4., 8.1.) [30]. Zkoušení bylo zaměřeno na porovnávání různých druhů tahových zkoušek a vliv procenta vyztužení na výsledné diagramy odolnosti.

Nevyztužené hranoly s kruhovými vývrty dosáhly nejvyšší síly při porušení. Vzhledem k rázovému porušení obou krčků křehkým lomem bylo obtížné určit kdy došlo k porušení pouze ve spodní tažené oblasti. Navíc se díky změně napjatosti (kruhová singularita) u prvního vzorku trhlinka nešířila nejslabším místem krčku ale po obvodu vývrty (kap. 8.1.4.). Zkouška byla určena především pro vláknobetonu a drátkobetonu, pro nevyztužená tělesa nebyla určena.

Nevyztužené hranoly dosáhly průměrné hodnoty síly při vzniku trhliny **28,548 kN při průhybu 0,7 mm** a napětí v taženém krčku **4,731 MPa** (aritmetický průměr tří vzorků). Hodnoty odvozené z průměrných diagramů **28,507 kN** a **4,724 MPa** byly průměrovány v závislosti na průhybu a jsou nižší než hodnoty dané aritmetickým průměrem maximálních hodnot (porovnání hodnot je součástí práce viz příloha B.). Nevyztužené hranoly po vzniku trhliny neměly již žádnou zbytkovou pevnost vzhledem k porušení křehkým lomem.

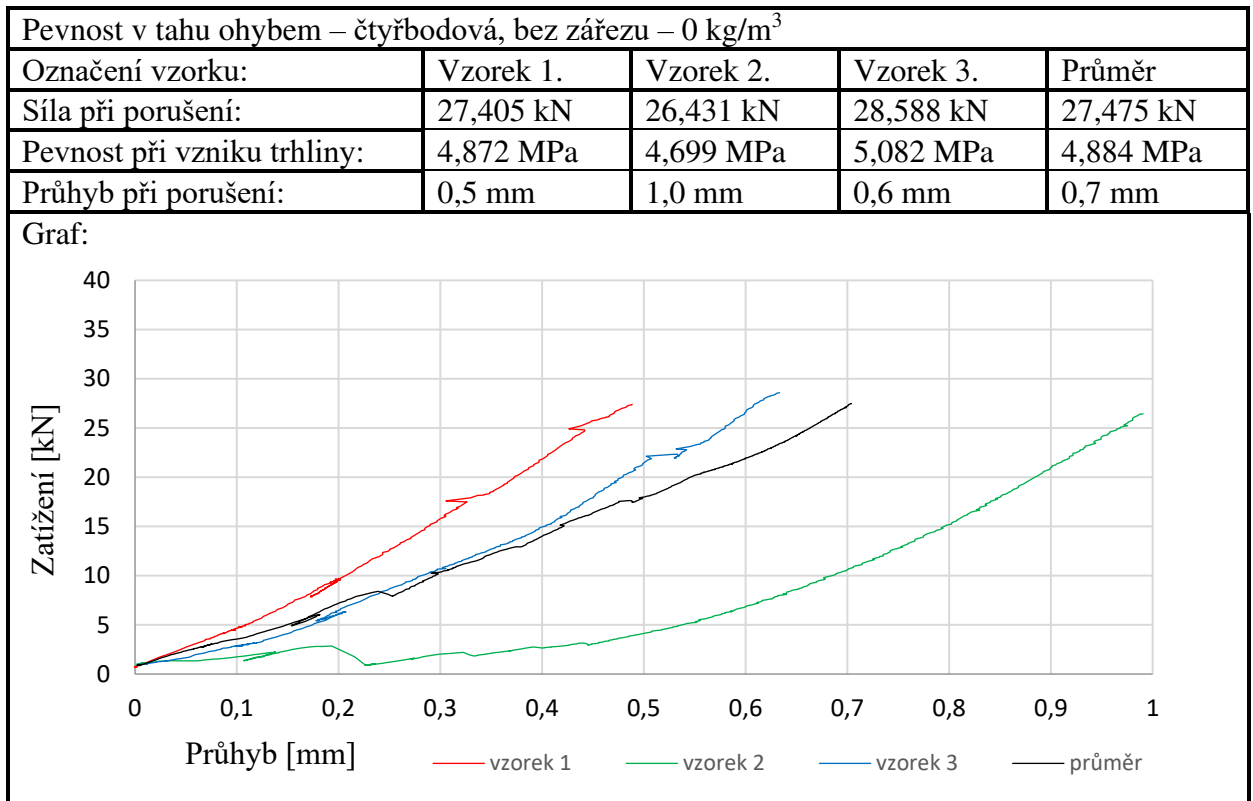
Hranoly vyztužené **25 kg/m³** měly maximální hodnoty síly při vzniku trhliny **30,687 kN (27,196 kN)** při průhybu **0,6 mm**, napětí v taženém krčku **5,085 MPa (4,507 MPa)** a reziduální sílu **1,647 kN (1,643 kN** v závorkách jsou hodnoty z průměrných diagramů).

Hranoly vyztužené **50 kg/m³** měly maximální hodnoty síly při vzniku trhliny **27,244 kN (24,102 kN)** při průhybu **0,7 mm**, napětí v taženém krčku **4,515 MPa (3,994 MPa)** a reziduální sílu **1,809 kN (1,809 kN** v závorkách jsou hodnoty z průměrných diagramů).

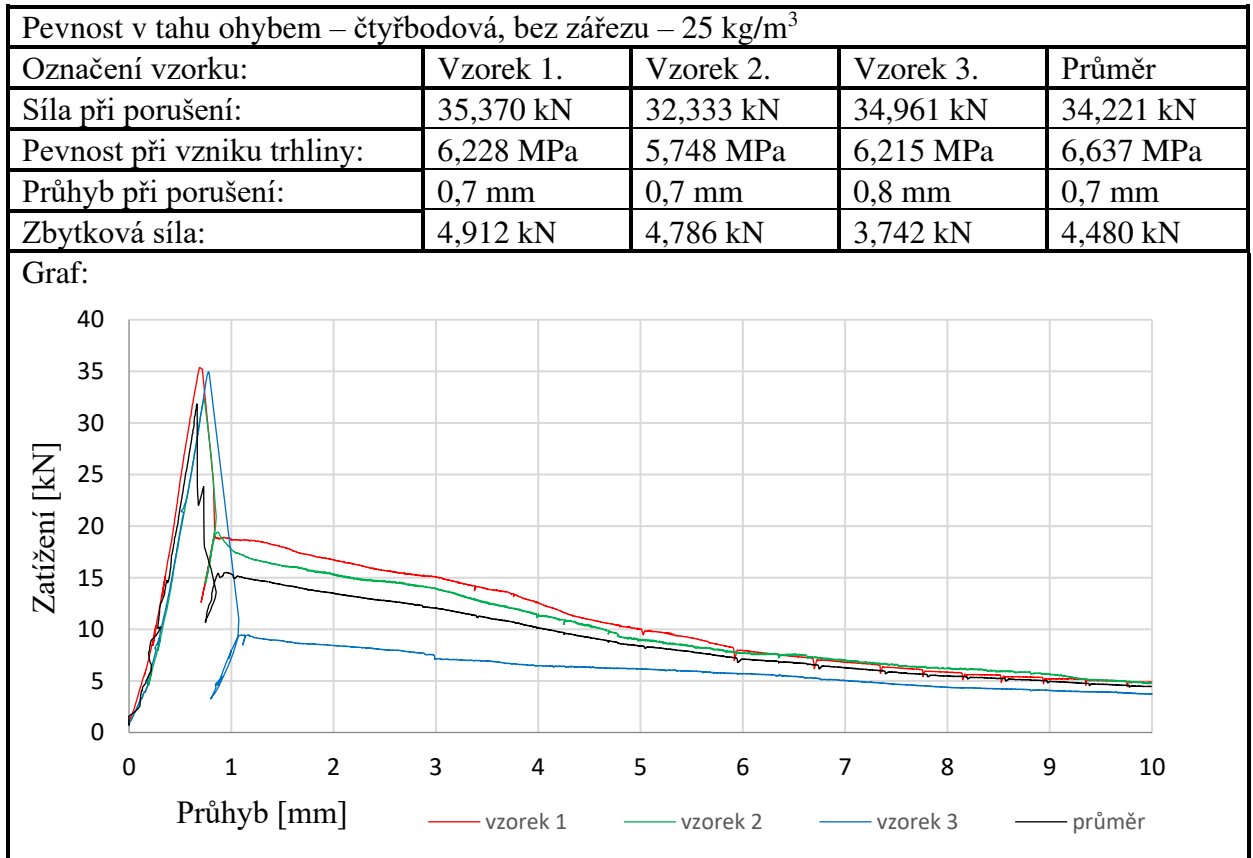
Hranoly vyztužené **75 kg/m³** měly maximální hodnoty síly při vzniku trhliny **27,060 kN (21,171 kN)** při průhybu **0,5 mm**, napětí v taženém krčku **4,484 MPa (4,507 MPa)** a reziduální sílu **3,818 kN (3,818 kN** v závorkách jsou hodnoty z průměrných diagramů).

Při zkouškách vyztužených hranolů bylo **patrné rovnoměrné snižování tahové pevnosti v závislosti na zvyšujících se dávkách vyztužných drátků**. Při první dávce drátku **25 kg/m³** byl patrný pokles síly o **1 kN** napjatosti o **0,2 MPa** proti nevyztuženým hranolům. Při dalším zvyšování obsahu drátků na **50, 75 kg/m³** betonu byl znatelný pokles síly o **3 kN** a **0,5 MPa** vždy mezi jednotlivými dávkami. Lze tedy uvažovat že jednotlivé **dávky drátků snižují tahovou pevnost o tuto hodnotu**. V další fázi experimentálních prací se nabízí myšlenka **úpravy návrhu délky drátků**. Předpoklad o výstižnějším popisu napětí v tahu je pravdivý, obtížnější je popis chování po porušení spodního taženého krčku. Po porušení spodního krčku dochází k přerozdělení napětí na spodním krčku dochází k porušování vláken tahem vytahováním z betonové matrice a na horním krčku působí kombinace horní tlačena a spodní tažená oblast.

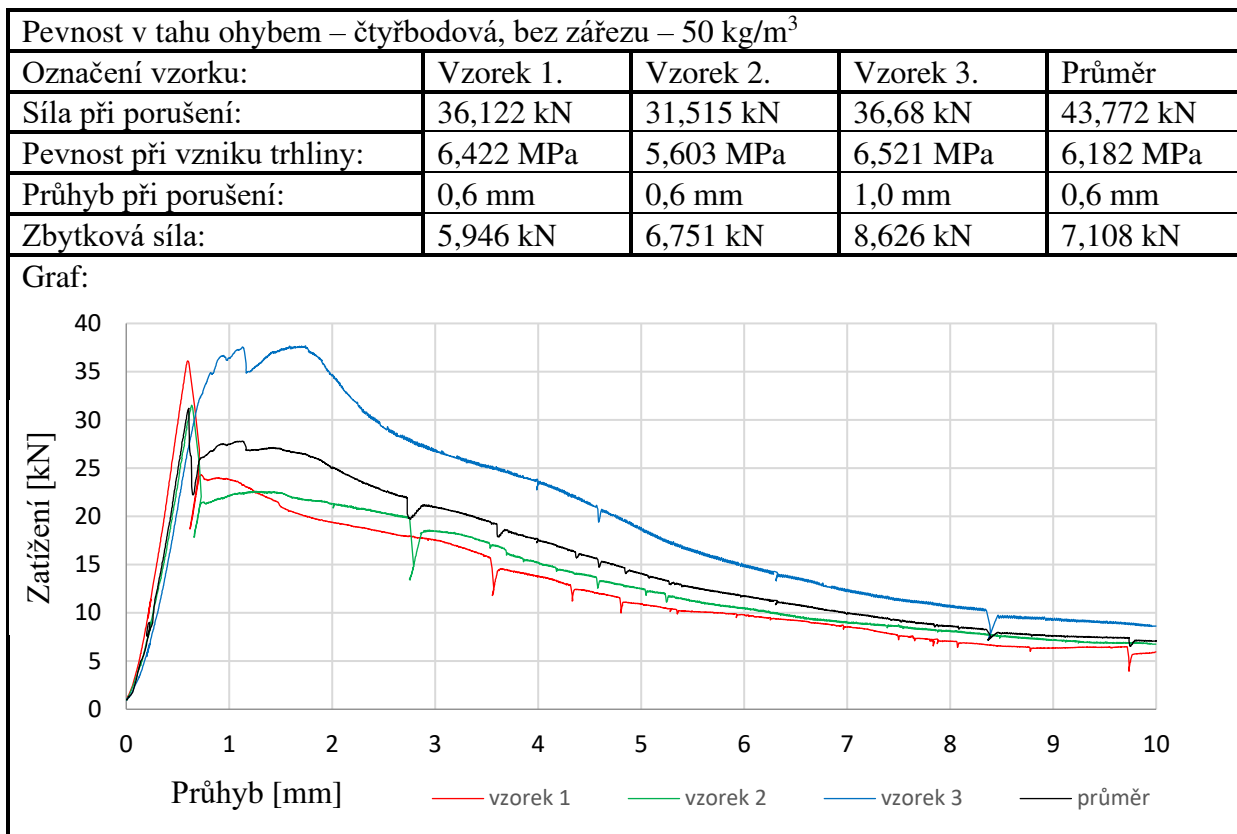
Pevnost v tahu ohybem – čtyřbodová, bez zářezu



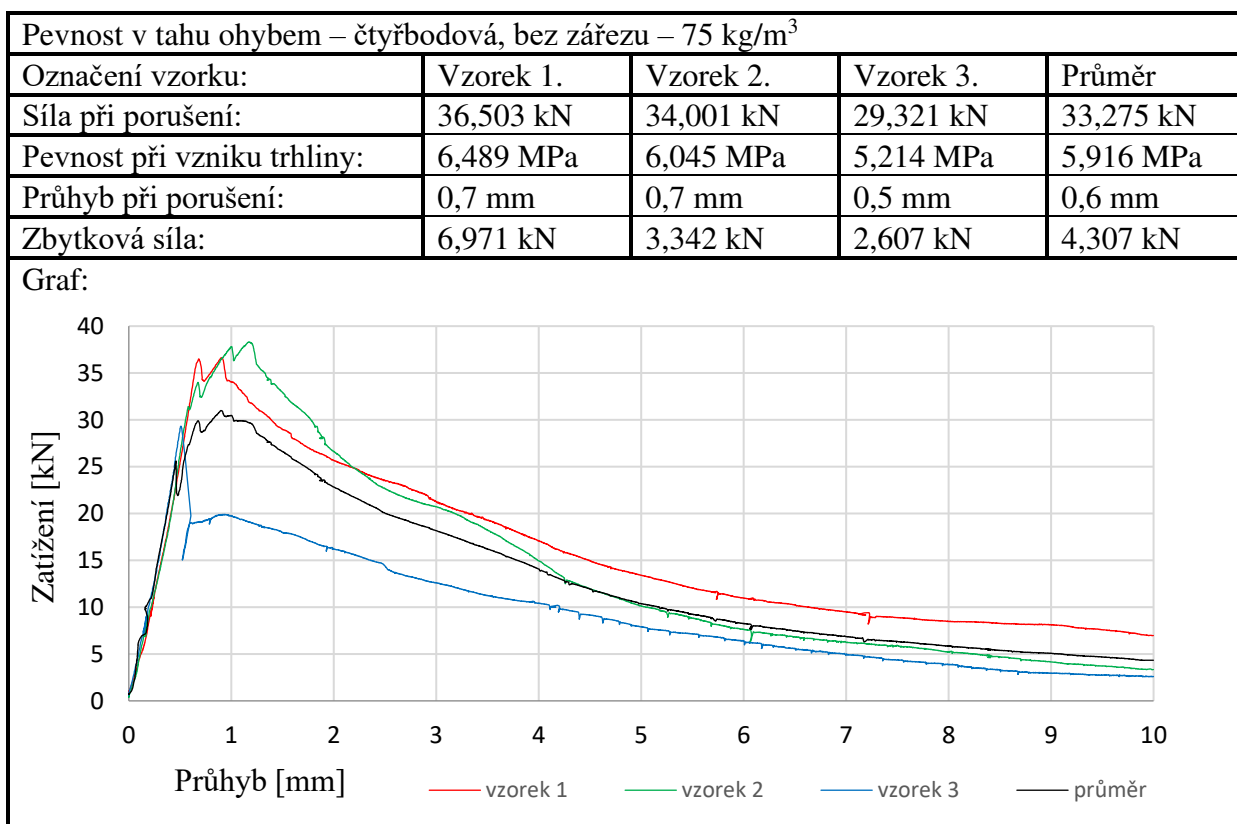
Tabulka 49. – Pevnost v tahu ohybem – čtyřbodová, bez zářezu – 0 kg/m³



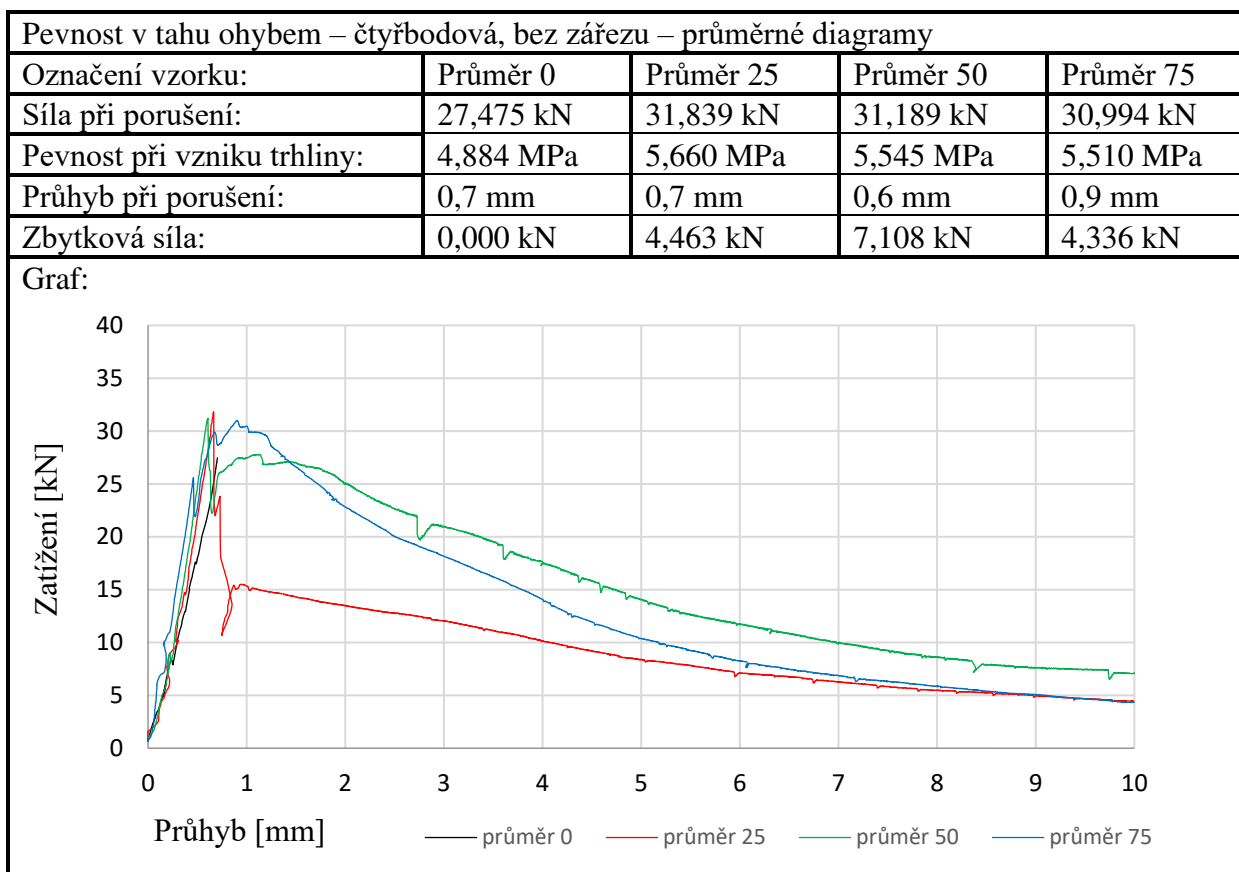
Tabulka 50. – Pevnost v tahu ohybem – čtyřbodová, bez zářezu – 25 kg/m³



Tabulka 51. – Pevnost v tahu ohybem – čtyřbodová, bez zářezu – 50 kg/m³



Tabulka 52. – Pevnost v tahu ohybem – čtyřbodová, bez zářezu – 75 kg/m³



Tabulka 53. – Pevnost v tahu ohybem – čtyřbodová, bez zářezu

Zkoušky pevnosti v tahu ohybem na plných hranolech (viz kapitola 4.4.3.3., 8.2.) prováděné podle ČSN P 73 2452 [29] sloužily pro porovnání se zkouškami podle návrhové metodiky s hranoly opatřenými kruhovými vývrty. Porovnávají jsou diagramy odolnosti a hodnoty pevnosti podle jednotlivých procent vyztužení a jejich charakteristik při zatěžování.

Nevyztužené hranoly dosáhly nejvyšší průměrné hodnoty síly při porušení **27,475 kN při průhybu 0,7 mm** a pevnosti při vzniku trhliny **4,884 MPa** (aritmetický průměr tří vzorků). Hodnoty odvozené z průměrných diagramů **27,475 kN** a **4,884 MPa** byly průměrovány v závislosti na průhybu a jsou nižší než hodnoty dané aritmetickým průměrem maximálních hodnot (porovnání průměrných hodnot je součástí práce viz příloha B.).

Hranoly vyztužené drátky **25 kg/m³** dosáhly maximální hodnoty při průhybu **0,7 mm**, síly při porušení **34,221 kN (31,839 kN)**, pevnosti při vzniku trhliny **6,637 MPa (5,660 MPa)** a zbytkovou sílu **4,463 kN (4,480 kN** v závorkách hodnoty průměrných diagramů).

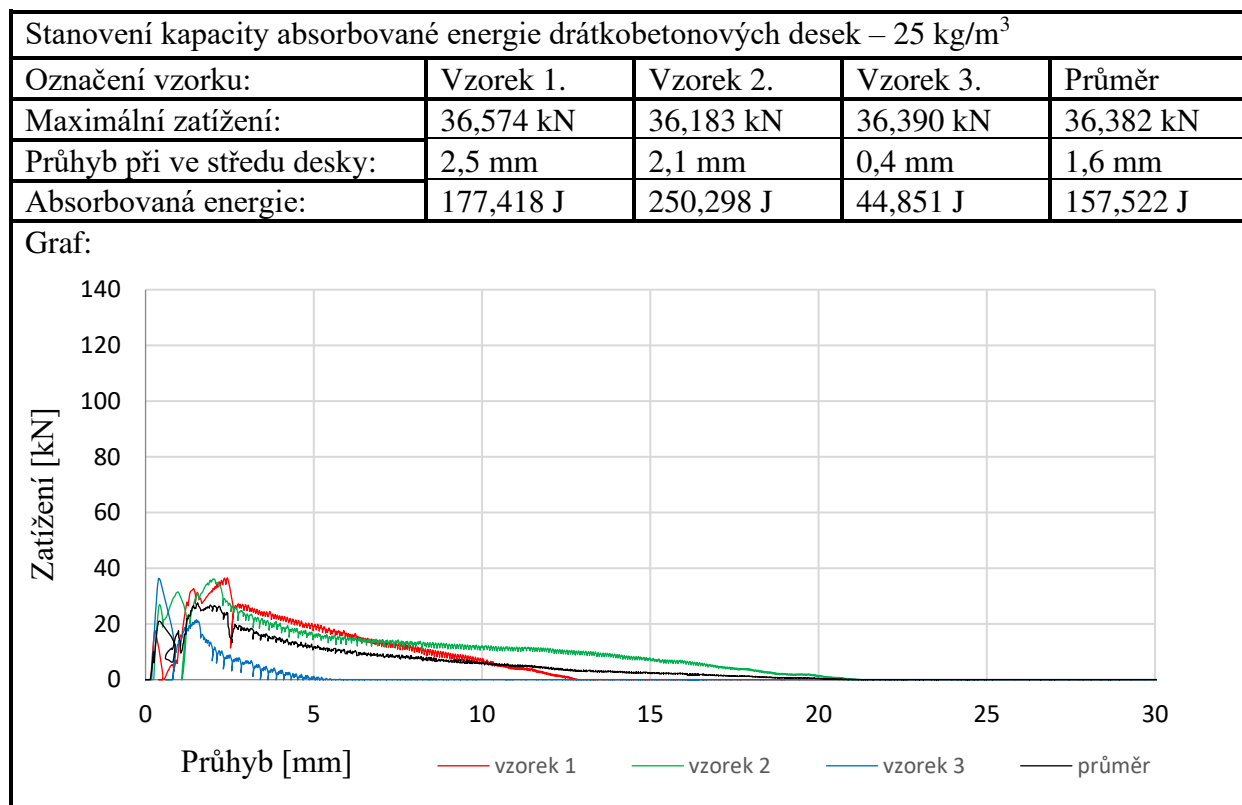
Hranoly vyztužené drátky **50 kg/m³** dosáhly maximální hodnoty při průhybu **0,6 mm**, síly při porušení **43,772 kN (31,189 kN)**, pevnosti při vzniku trhliny **6,182 MPa (5,545 MPa)** a zbytkovou sílu **7,108 kN (7,108 kN** v závorkách hodnoty průměrných diagramů).

Hranoly vyztužené drátky 75 kg/m^3 dosáhly maximální hodnoty při průhybu $0,6 \text{ mm}$, síly při porušení $33,275 \text{ kN}$ ($30,994 \text{ kN}$), pevnosti při vzniku trhliny $5,916 \text{ MPa}$ ($5,510 \text{ MPa}$) a zbytkovou sílu $4,307 \text{ kN}$ ($4,336 \text{ kN}$ v závorkách hodnoty průměrných diagramů).

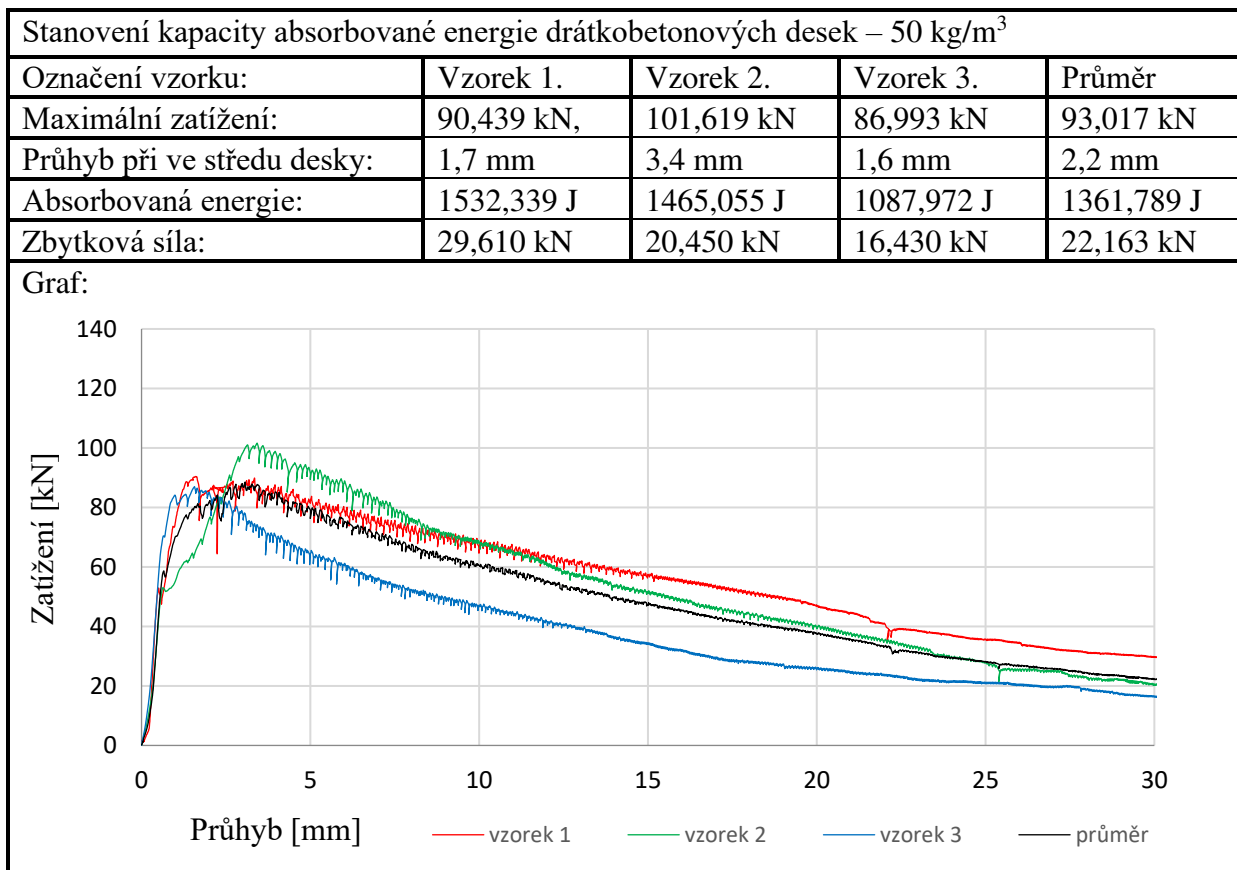
Nevyztužené hranoly dosáhly nejnižší hodnoty tahové pevnosti to odpovídá nízké tahové pevnosti betonu proti betonům s rozptýlenou drátkovou výztuží. Nevyztužené hranoly byly porušeny rázově křehkým lomem od spodní tažené plochy směrem nahoru k tlačené ploše.

Vyztužené hranoly vykazují pouze **malé rozdíly mezi silami (napětím) při jejich porušení (vzniku trhliny)**, ale **mají klesající tendenci v závislosti na rostoucím procentu vyztužení**. Rozdíl je patrný na **velikosti poklesů pevnosti při rázovém šíření trhliny při 25 kg/m^3 velké poklesy, při 50 kg/m^3 malé poklesy, při 75 kg/m^3 bez výrazných poklesů**. Drátkobetonové hranoly mají podle předpokladu **houževnatější chování při vyšším procentu vyztužení**. Diagramy odolnosti potvrzují výhodnost vyztužení 50 kg/m^3 vzhledem k množství přidaných drátků, síly při porušení, houževnaté chování a nejvyšší zbytkovou sílu. Z diagramů lze lépe popisovat charakter porušování v průběhu zatěžování (houževnaté chování, poklesy pevnosti při vzniku a šíření trhliny) než u hranolů s otvory. Problémem je nejistota v místě vzniku a šíření trhliny, která je inicializována v nejslabším místě hranolu.

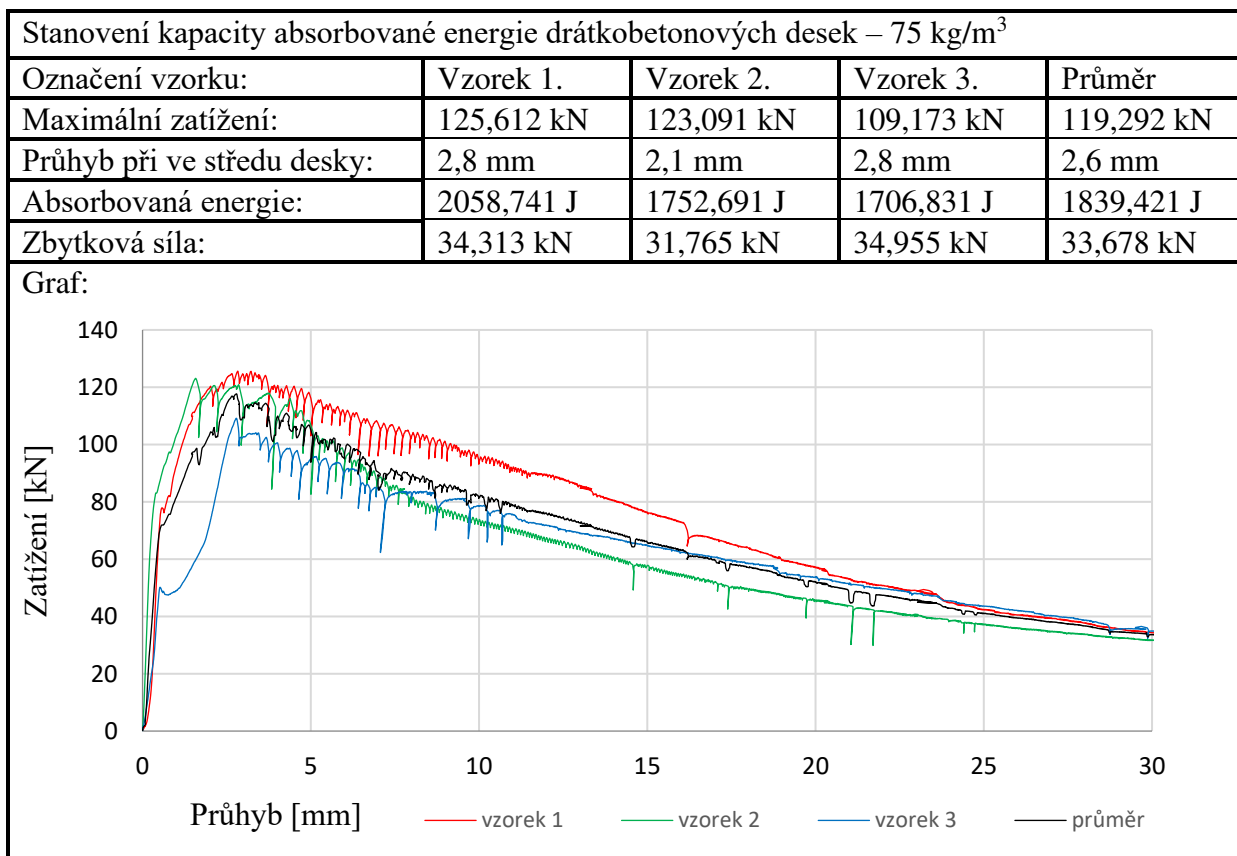
Stanovení kapacity absorbované energie drátkobetonových desek



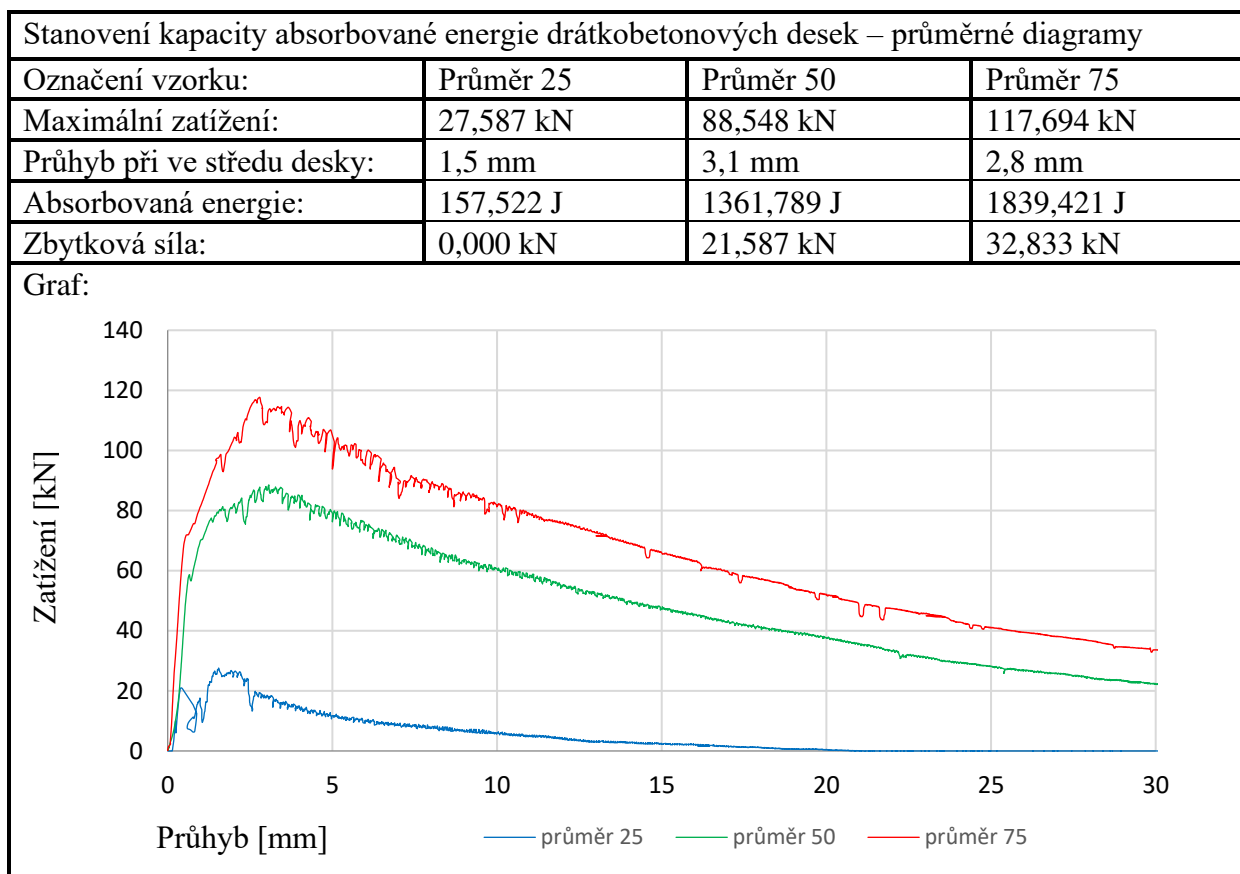
Tabulka 54. – Stanovení kapacity absorbované energie drátkobetonových desek 25 kg/m^3



Tabulka 55. – Stanovení kapacity absorbované energie drátkobetonových desek 50 kg/m³



Tabulka 56. – Stanovení kapacity absorbované energie drátkobetonových desek 75 kg/m³



Tabulka 57. – Stanovení kapacity absorbované energie drátkobetonových desek

Zkoušky drátkobetonových desek na stanovení kapacity absorbované energie byly stanovované podle normy na stříkané betony [31] (viz kapitola 4.4.4., 9.). Zkoušky sloužily pro porovnání chování drátkobetonu při různých dávkách kovové rozptýlené drátkové výztuže a pro porovnání diagramů odolnosti s ostatními tahovými zkouškami (tah za ohybu, prostý tah). Hodnoty odvozené z průměrných diagramů byly průměrovány v závislosti na průhybu a jsou nižší než hodnoty dané aritmetickým průměrem maximálních hodnot (hodnoty závislé na průhybu jsou uvedeny v závorkách za hodnotami danými průměrem maxim (porovnání průměrných hodnot je součástí práce viz příloha B.)).

Desky vyztužené **25 kg/m³** byly na konci zatěžování poškozeny průměrně **5 trhlinami**. Všechny trhliny se prokreslily až na horní povrch a docházelo k **velkým poklesům pevnosti** během jejich vzniku. Malé vyztužení způsobilo křehkost matrice a vyčerpání pevnosti (20 mm). Drátkobetonové desky dosáhly maximálního zatížení **36,382 kN (27,587 kN)** při centrálním průhybu **1,6 mm (1,5 mm)**. Během zatěžování desky absorbovaly **157,522 J** mechanické energie a zbytková síla byla malá lisovací rám ji nezaznamenal (mimo rozsah snímače).

Pro desky vyztužené **50 kg/m³** bylo charakteristické poškození průměrně **7 trhlinami**. Na horním povrchu byly patrné pouze tenké trhlinky u nejširších z hlavních trhlin. Během šíření

trhlin docházelo k **menším poklesům pevnosti** při vzniku trhlin a při jejich dalším šíření trhlin. Obsah drátků způsobil rozštěpování trhlin v místě uložení a byl dostatečný pro přenos napětí. Drátkobetonové desky dosáhly maximálního zatížení **93,017 kN (88,548 kN)** při centrálním průhybu **2,2 mm (1,3 mm)**. Během zatěžování desky absorbovaly **1361,789 J** mechanické energie a zbytková síla na konci zatěžování byla **22,163 kN (21,587 kN)**.

Zkušební desky s výztuží **75 kg/m³** byly také poškozeny průměrně **7 trhlinami**. Na horní ploše byly vidět pouze trhliny u zatěžovacího přípravku ostatní byly uzavřené. Trhliny se šířily ze středu a při šíření do stran a skrz desku docházelo k **velkým poklesům pevnosti**. Množství drátků bylo dostatečné pro další rozštěpení trhlin a vznik drobných podélných trhlin. Drátkobetonové desky dosáhly maximálního zatížení **119,292 kN (117,694 kN)** při centrálním průhybu **2,6 mm (1,8 mm)**. Během zatěžování desky absorbovaly **1839,421 J** mechanické energie a zbytková síla na konci zatěžování byla **33,678 kN (32,833 kN)**.

Detailní popis porušení zkušebních desek je uveden v protokolech (kapitola 9.1., 9.2., 9.3.).

Vyhodnocení výsledků

Z dosažených poznatků vyplývá výhodnost využití **hranolů s kruhovým vývrtem** ve středu hranolu k určení **pevnosti drátkobetonu v osovém tahu**. Díky standardnímu uspořádání ohybové zkoušky a rovnoměrnému rozložení napjatosti v tažené oblasti. Navržená metodika respektuje materiálové charakteristiky betonu i druh a obsah vláken. **Mezi výslednými hodnotami napětí jsou pravidelné rozestupy dané v závislosti na jednotlivých dávkách výztužných drátků**. Mírné zvýšení pracnosti při přípravě zkušebních těles – nutnost provádět přesné jádrové odvrty. Potvrdilo se, že zkouška není vhodná pro nevyztužené hranoly, vzhledem k rázovému porušení křehkým lomem obou krčků zároveň. Navíc u vyztužených hranolů po porušení spodního krčku (zjištění tahové pevnosti) bylo chování hranolů při dalším poškozování značně závislé na množství výztužných drátků. Další odolnost hranolů byla dána kombinací porušování horního krčku ohybem a vytahováním drátků ve spodním krčku.

U **hranolů bez zářezu** je výhodou, že **diagramy odolnosti jednoznačně popisují chování drátkobetonu během zatěžování**. Lze u nich popisovat nárůst odporu proti přetváření, dosažení kritické pevnosti při vzniku trhliny, následný pokles pevnosti případně houževnaté tvarování nebo zbytkovou pevnost. Dále můžeme sledovat polohu trhliny či její šíření, rozšiřování případně štěpení matrice způsobené rozptýlenou výztuží. U drátků lze sledovat, jak jsou v průběhu rozšiřování trhlin aktivována, poškozována třecím prokluzem i přes mechanické kotvení a vytahována z křehké betonové matrice. Zkoušku lze použít i pro zjištění pevnosti při vzniku trhliny i u nevyztužených hranolů. **Výsledné průměrné hodnoty**

pevnosti při vzniku trhliny dosahovaly podobných hodnot. Výrazné rozdíly byly v chování po vzniku trhliny, kdy u nejméně vyztužených hranolů docházelo k velkým poklesům pevnosti se zvyšujícím se objemem vláken se poklesy snižovaly a u nejvíce vyztužených již poklesy nebyly téměř patrné. Společně se zvyšujícím se objemem vláken (75 kg/m^3) se zvyšovalo i nakypření a obsah pórů vzduchu v samozhutnitelném drátkobetonu. Nevýhodou této zkoušky je nejistota v poloze vznikající trhliny a **nutnost používat korekční součinitele při převodu na osovou tahovou pevnost**. Korekční součinitelé nezohledňují materiálové charakteristiky betonu či druh, typ a množství použitých výztužných vláken [30].

Třibodová zkouška se zářezem vzhledem k jinému uspořádání a problematice **nelineárního chování materiálu v oblasti nad zářezem před inicializací trhliny** (vyšší hodnoty tahové pevnosti, **nutnost používat korekční součinitele při převodu na osovou tahovou pevnost**) byla vyřazena z experimentálního výzkumného programu.

Zkoušky na **stanovení absorbované energie** ilustrují poškozování drátkobetonových desek při plošném zatěžování oproti liniovému zatěžování (bodovému – zjednodušený model) u ohýbaných hranolů. Nicméně zkoušky jsou náročné na objem potřebného drátkobetonu. A po zatvrdnutí je obtížná manipulace s deskovými tělesy při následném ošetřování a zkoušení vzhledem k velké hmotnosti a velkému rozměru zkušebních těles.

Zkoušky byly nevhodné pro nevyztužené desky vzhledem k liniovému snímači umístěnému na spodní straně desky (možnost poškození snímače). Případně lze hodnotit pouze maximální zatížení při porušení bez diagramů. **Absorbovaná energie byla spotřebovaná na deformování drátkobetonové desky** (vznik a rozšiřování trhlin, přerozdělování napjatosti mezi částmi desky, porušování vláken třecím prokluzem a vytahováním vláken z křehké betonové matrice). Z toho vyplývá, že **při vzniku více trhlin bylo absorbováno více energie a při obsahu většího množství drátků bylo také absorbováno více energie**. **Trhliny vznikaly v místech koncentrace napětí (deformací) a slabých místech drátkobetonového kompozitu**. Trhliny jsou zóny absorpce mechanické energie, která je přerozdělena na deformování a poškozování betonu a drátkové výztuže. Na základě dosud provedených experimentálních prací lze konstatovat, že **poškození horní strany desky se s rostoucím procentem vyztužení zmenšovalo a poškození spodní strany se zvětšovalo**. **S rostoucím procentem vyztužení rostla i odolnost proti poškození i kapacita absorbované energie i zbytková pevnost**. Výrazné rozdíly byly ve stabilitě desky během šíření trhlin **u malého procenta vyztužení byly výrazné poklesy pevnosti, u středně vyztužených byly poklesy pouze malé a u nejvíce vyztužených docházelo k větším poklesům odolnosti** během trhání desek. Tento poznatek je shodný se zkouškami hranolů v tahu za ohybu bez zářezu.

Optimální množství drátků bylo v provedeném experimentálním programu stanoveno na 50 kg/m³ vzhledem k jejich množství, dosaženým hodnotám maximální pevnosti, porušování spojené s malými poklesy pevnosti během zatěžování a zbytková pevnost (tah za ohybu bez zářezu a absorbované energie).

Variabilita výsledků zkoušek z různých laboratoří

Zkoušky vláknobetonů jsou náročnější na potřebné zkušební lisy vzhledem k větší odolnosti zkušebních těles a potřebě větší citlivosti snímačů během zatěžování řízenými deformacemi a citlivostí těles na rychlost ztěžování. Různorodost výsledků je dána složením vláknobetonů (druh betonu, typ, množství a druh vláken či kombinace, rovnoměrnost rozptýlení výztuže), podmínkami při zpracování a výrobě vláknobetonu (pořadí složek při mísení vláknobetonu, způsob zhutňování aj.), ošetřováním těles nebo typem experimentální zkoušky. Pro další vyhodnocení výsledků je nutné doplnit externě stanovené hodnoty (tahovou pevnost, modul pevnosti a přetvárnosti (betonu a vláknobetonů)) a porovnat dosažené výsledky s dalšími laboratorními výsledky prováděnými v jiných laboratořích a výzkumných centrech. Z tohoto důvodu jsou v závěru práce uvedeny další odkazy na výsledky výzkumů betonů vyztužených rozptýlenou výztuží prováděné v různých výzkumných centrech.

ODKAZY NA DALŠÍ LABORATORNÍ VÝSLEDKY

Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Katedra dopravního stavitelství; Drátkobeton – porovnání vlivu délky drátků na pevnostní charakteristiky [11].

Porovnáván byl nevyztužený beton a vyztužený drátky v dávkách 30 kg/m³ betonu a o délce drátků 35 mm, 50 mm a 60 mm (Bekaert Dramix 3D 55/60 BL, ArcelorMittal HE 1/50 a HE 75/35). Výsledkem práce bylo, že delší drátky mají výraznější vliv na různé pevnostní charakteristiky drátkobetonu. Zlepšení charakteristik spočívalo v přenosu lokálních tahových napětí do vzdálenějších méně namáhaných částí drátkobetonu.

VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta stavební, Katedra stavebních hmot a diagnostiky staveb; Betony vyztužené vlákny pro podlahy s vysokým zatížením [13].

Práce byla zaměřena na zkoušení různých druhů drátků (Bekaert Dramix 3D 65/35 BG, Dramix 3D 80/60 BG v dávkách po 40 a 70 kg/m³) samostatně a v kombinaci se skleněnými vlákny (Cem – FIL Anti-Crack HD v dávkách po 0,6 kg/m³). Zkoumán byl jejich vliv na fyzikálně-mechanické vlastnosti výsledného drátkobetonu (vláknobetonu). Přídavek skleněné rozptýlené výztuže způsobuje snížení viskozity čerstvého betonu, v důsledku zvýšení obsahu vzduchu v jeho struktuře. Výsledky práce poukazují na skutečnost, že pro zvýšení tahové pevnosti má větší význam použití skleněných vláken než další zvyšování množství drátků.

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví;
Vliv rozptýlené výztuže na fyzikálně-mechanické parametry výsledného kompozitu [14].

Práce posuzuje vhodnost, účinnost a dávkování ocelových vláken (KrampeHarex DE 50/1,0 N v dávkách 20, 25 a 30 kg/m³ betonu) pro jednotlivé pevnostní třídy běžně používaných betonů (C 16/20, C 20/25, C 25/30, C 30/37). Výsledkem práce bylo, že při procesu míchání došlo ke zvýšení obsahu vzduchu ve směsi řádově o 20 %. Příměs ocelových vláken zvyšuje hodnoty pevnosti v příčném tahu řádově o 20 % v porovnání s prostým betonem.

České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Experimentální centrum;
Experimentální vyšetřování mechanické energie absorbované prvky z vysokohodnotného vlákny vyztuženého betonu [44].

Hlavním cílem práce je vytvoření nového experimentálního postupu pro zjištění absorbované mechanické energie v tahu ohybem při zatížení rázem. K vysokohodnotnému betonu byla přidávána přímá, vysokopevnostní, hladká ocelová vlákna (13×0,14 mm², 2800 MPa) v dávkách vláken 1 %; 0,5 %; 0,25 % a 0,125 %.

University of Minho, Azurém in Portugal, Civil Engineering,
Steel Fibre Reinforced Self-Compacting Concrete (from Micro-Mechanics to Composite Behaviour) [17].

Práce rozebírá fyzikálně-mechanické vlastnosti samozhutitelného drátkobetonu přidávána byla ocelová vysokopevnostní vlákna zahnutá ($l_f = 60$ mm, $d_f = 0.75$ mm, $l_f / d_f = 80$, 1100 MPa) v dávkách po 30 kg/m³ a 45 kg/m³. Výsledkem práce bylo porovnávání výsledků různých druhů zkoušek či vláken a jejich následnou aplikaci do simulací a modelů metody konečných prvků.

University of Minho, Azurém in Portugal, Civil Engineering,

Time-Dependent flexural behaviour of cracked steel fibre reinforced self-compacting concrete panels [18].

Práce rozebírá fyzikálně-mechanické vlastnosti samozhutnitelného drátkobetonu přidávána byla ocelová vysokopevnostní vlákna zahnutá ($l_f = 33$ mm, $d_f = 0.55$ mm, $l_f / d_f = 60$, 1100 MPa) po 60 kg/m³. Výsledkem bylo porovnávání pseudotvarného chování po vzniku trhliny při použití různých druhů zkoušek pro jejich zjištění.

University of Ioannina, Greece, Department of Materials Science and Engineering; Kyoto University, Nishikyo-ku Japan, Graduate School of Engineering
Acoustic emission behavior of steel fibre reinforced concrete under bending [15].

Cílem práce byla aplikace akustických emisí ke sledování šíření trhliny během zatěžování hranolů. Ocelová zahnutá vlákna ($l_f = 25$ mm, $d_f = 0.75$ mm) byla přidávána v dávkách po 0.5 %, 1 % a 1.5 % pro porovnání s nevyztuženými hranoly. Výsledkem práce je přesnější sledování šíření mikrotrhlin nejenom makrotrhliny.

Article, Materials and Structures,

Experimental investigation of surface crack initiation, propagation and tension stiffening in self-compacting steel–fibre-reinforced concrete [19].

Práce zahrnuje další různé druhy zkoušek ke zjištění napjatosti během inicializace a šíření trhlin při tahovém namáhání. Samozhutnitelný beton v provedeném výzkumu byl dále vyztužen drátky Dramix RC 65/35 (v jednotlivých dávkách 20, 40, 80 kg/m³).

Article, Construction and Building Materials, Flowability of fibre-reinforced concrete and its effect on the mechanical properties of the material [16].

Práce se zabývá vlivem tixotropních vlastností (tekutostí) betonu na fyzikálně-mechanické vlastnosti vláknobetonu. Použity byly zahnuté drátky ($l_f = 35$ mm, $d_f = 0.55$ mm, $l_f / d_f = 65$) a byly přidávány k jednotlivým recepturám po 40 kg/m³. Výsledkem bylo porovnání různých mechaniko-fyzikálních vlastností při použití různých druhů betonu (OC, FROC, HSC, FRHSC, SCC a FRSCC).

The Middle East Technical University, Natural and Applied Sciences, Civil Engineering,
Comparative evaluation of steel mesh, steel fibre and high-performance polypropylene fibre reinforced shotcrete in panel test [45].

Cílem bylo stanovení kapacity absorbované energie a přetvárných charakteristik deskových těles. Pro porovnání byly vybrány 4 druhy ocelových drátů (v dávkách od 30, 35, 40, 50 a 60 kg/m³) a HPP vláken (7 a 10 kg/m³) a jejich vzájemné kombinace při různých dávkách drátů a vláken navíc byla porovnání porovnávána i s výztužnou mříží.

The University of Hong Kong, Hong Kong, Department of Civil Engineering

Direct tension behaviour of steel fibre reinforced concrete measured by a new test method [35].

Zkoušeny byly fyzikálně-mechanické vlastnosti drátkobetonu. Použita byla ocelová zahnutá vlákna s různými rozměry ve 4 různých typech a byla přidávána v rozsazích od 0.0 %, 0.5 %, 1.0 %, 1.5 % až do 2.0 %. Zaváděna byla zkouška na čistý osový tah na tělesech s modifikovaným jednostupňovým místem porušení (tělesa tvaru tzv. dog bone).

State Polytechnic of Bengkalis, Indonesia, Department of Civil Engineering,

Effect the use of steel fibers (DRAMIX) on reinforced concrete slab [49].

Použité drátky byly Dramix RC65/35 BN přidávané k receptuře betonu v množství 1 – 5 %.

Zkoumány byly fyzikálně mechanické vlastnosti výsledných drátkobetonu

Article, Procedia Engineering

Investigation of Punching Behaviour of Steel and Polypropylene Fibre Reinforced Concrete Slabs under Normal Load [50].

Zkoušena byla ocelová vlákna k porovnání s polypropylénovými (vyztužení 0,5 %) a nevyztuženým betonem. Zkušební tělesa byla dále vyztužena ocelovými sítěmi. Desková tělesa fungovaly jako zmenšené modely oblastí uložení sloupů na stropy. Výsledkem byla zvýšená odolnost stropů vůči propíchnutí v oblasti sloupů.

Article, Cement and Concrete Research

Parameter-study on the influence of steel fibers and coarse aggregate content on the fresh properties of self-compacting concrete [51].

Zkoušeny byly drátky Dramix RL 45/30, Arbed/Eurosteel 50/50, Dramix RC 65/40 a Dramix RC 80/60 v dávkách po 20, 40, 60, 80, 100, 120 kg/m³ v různých variantách. Pozorovány a hodnoceny byly vlastnosti či charakteristiky čerstvého drátkobetonu. Hodnocena byla především prostupnost mezi ocelovými pruty při různých dávkách a druzích drátů.

Article, Southern African Transport Conference (SATC 2005)

Steel fibre reinforced concrete for road pavement applications [52].

Výzkum byl zaměřen na využití drátkobetonu na povrchy betonových vozovek či chodníků. Bylo prokázáno že při využití drátkobetonu na liniové stavby dochází ke značné úspoře betonu díky snížené ekvivalentní tloušťce vozovky tedy menší tloušťce výsledné konstrukce.

Article, International Journal of Concrete Structures and Materials

Anchorage Effects of Various Steel Fibre Architectures for Concrete Reinforcement [53].

Výzkum zabývající se tvarem kotevní oblasti ocelového drátku a jeho vlivem na výsledné fyzikálně-mechanické vlastnosti drátkobetonu. Zkoušena byly drátky Dramix 3D 65/35 BG, 3D 65/60 BG, 4D 65/60 BG a 5D 65/60 BG v dávkách 40 a 80 kg/m³. Výsledkem bylo potvrzení předpokladu o lepším kotvení drátků při složitějším tvaru kotevní oblasti.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] BAREŠ, Richard A. *Kompozitní materiály*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988. Typové číslo L17-B3-IV-31/72231.
- [2] FADRHONS, Jan. *Experimentální analýza způsobů vyztužování betonu čedičovou tkaninou*. Pardubice, 2018. <https://hdl.handle.net/10195/71397>. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Katedra dopravního stavitelství. Vedoucí práce Suchánek, Vladimír.
- [3] DE SCHUTTER, Geert. *Samozhutnitelný beton*. Praha: ČBS, Česká betonářská společnost ČSSI, 2008. ISBN 978-1904445-30-2.
- [4] DE SCHUTTER, Geert. *Samozhutnitelný beton*. Praha: ČBS, Česká betonářská společnost ČSSI, 2008. ISBN 978-80-87158-12-8.
- [5] DUHOŇ, Miroslav. *Experimentální analýza samozhutnitelného betonu*. Pardubice, 2017. <http://hdl.handle.net/10195/68928>. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Katedra dopravního stavitelství. Vedoucí práce Suchánek, Vladimír.
- [6] ČSN EN 197-1 ed. 2. *Cement – Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012. Třídící znak 722101.
- [7] ČSN EN 1008. *Záměsová voda do betonu – Specifikace pro odběr vzorků, zkoušení a posouzení vhodnosti vody, včetně vody získané při recyklaci v betonárně, jako záměsové vody do betonu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2003. Třídící znak 732028.
- [8] ČSN EN 934-2 + A1. *Přísady do betonu, malty a injektážní malty – Část 2: Přísady do betonu – Definice, požadavky, shoda, označování a značení štítkem*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012. Třídící znak 722326.
- [9] ČSN EN 206 + A1. *Beton: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.

- [10] KRÁTKÝ, Jiří, Jan VODIČKA a Karel TRTÍK. *Drátkobetonové konstrukce: úvodní část a příklady použití: směrnice pro navrhování, provádění, kontrolu výroby a zkoušení drátkobetonových konstrukcí*. Praha: Informační centrum České komory autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě, 1999. Betonové stavitelství. ISBN 80-86364-00-3.
- [11] KOSINKA, Filip. *Drátkobetony – porovnání vlivu délky drátků na pevnostní charakteristiky*. Pardubice, 2018. <https://hdl.handle.net/10195/71394>. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Katedra dopravního stavitelství. Vedoucí práce Suchánek, Vladimír.
- [12] FIALA, Ctislav. *Samozhutnitelný beton vyztužený vlákny: Vliv vláken na smršťování samozhutnitelného betonu*. Praha, 2006. <http://www.ctislav.wz.cz/publ/SCC-vlakna-smrsteni.pdf>. Příspěvek vznikl v rámci doktorského předmětu Materiálové inženýrství, 5/2006. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Katedra konstrukcí pozemních staveb.
- [13] BEDNÁŘ, Patrik. *Betony vyztužené vlákny pro podlahy s vysokým zatížením*. Ostrava, 2017. Diplomová práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta stavební, Katedra stavebních hmot a diagnostiky staveb. Vedoucí práce Šafrata, Jiří.
- [14] LÁNÍK, Jaromír. *Vliv rozptýlené výztuže na fyzikálně-mechanické parametry výsledného kompozitu*. Brno, 2014. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví. Vedoucí práce Schmid, Pavel.
- [15] SOULIOTI, D., N.M. BARKOULA, A. PAIPETIS, T. E. MATIKAS, T. SHIOTANI a D. G. AGGELIS. *Acoustic emission behavior of steel fibre reinforced concrete under bending*. Japan, 2009. Odborný výzkum. University of Ioannina, Greece, Department of Materials Science and Engineering; Kyoto University, Nishikyo-ku Japan, Graduate School of Engineering.
- [16] Flowability of fibre-reinforced concrete and its effect on the mechanical properties of the material. *Construction and Building Materials*. 2010, **24**(9), 1664–1671. ISSN 0950-0618. Dostupné také z: <http://link.springer.com/10.1617/s11527-012-9821-6>
- [17] DO COUTO FERNANDES DA CUNHA, Vítor Manuel. *Steel Fibre Reinforced Self-Compacting Concrete: from Micro-Mechanics to Composite Behaviour*. Portugal, 2010. Disertační práce. University of Minho in Azurém. Vedoucí práce Oliveira Barros, Joaquim António.

- [18] ABRISHAMBAF, Amin, Vítor Manuel DO COUTO FERNANDES DA CUNHA a Joaquim António OLIVEIRA BARROS. *Time-dependent flexural behaviour of cracked steel fibre reinforced self-compacting concrete panels*. Portugal, 2010. Odborný výzkum. University of Minho in Azurém.
- [19] JANSSON, Anette, Mathias FLANSBJER, Ingemar LÖFGREN, Karin LUNDGREN a Kent GYLLTOFT. Experimental investigation of surface crack initiation, propagation and tension stiffening in self-compacting steel–fibre-reinforced concrete. *Materials and Structures*. 2012, **45**(8), 1127-1143. ISSN 1359-5997. Dostupné z: doi:10.1617/s11527-012-9821-6
- [20] Technické kvalitativní podmínky staveb státních drah TKP 17. *Kapitola 17 – Beton pro konstrukce*. Praha: Správa železniční dopravní cesty, státní organizace, 2013. Třetí vydání.
- [21] Technické kvalitativní podmínky staveb pozemních komunikací TKP 18. *Kapitola 18 – Betonové konstrukce a mosty*. Praha: Ministerstvo dopravy, Odbor pozemních komunikací, 2016.
- [22] Technické podmínky TP 187. *Samozhutnitelný beton pro mostní objekty pozemních komunikací*. Praha: Ministerstvo dopravy, Odbor infrastruktury, 2007.
- [23] ČSN EN 12 350 – 6. *Zkoušení čerstvého betonu – Část 6: Objemová hmotnost*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [24] ČSN EN 12 350 – 7. *Zkoušení čerstvého betonu – Část 7: Obsah vzduchu – Tlakové metody*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [25] ČSN EN 12 350 – 11. *Zkoušení čerstvého betonu – Část 11: Samozhutnitelný beton – Zkouška segregace při prosévání*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [26] ČSN EN 12 350 – 8. *Zkoušení čerstvého betonu – Část 8: Samozhutnitelný beton – Zkouška sednutí-rozlitím*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [27] ČSN EN 12 350 – 12. *Zkouška čerstvého betonu – Část 12: Samozhutnitelný beton – Zkouška J-kroužkem*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.

- [28] ČSN EN 12 350 – 9. *Zkoušení čerstvého betonu – Část 9: Samozhutnitelný beton – Zkouška V-nálevkou*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] KŘÍSTEK, Vladimír, Jan VODIČKA, Hana HANZLOVÁ, Martin TIPKA a Helmut KURTH. *Ohybová zkouška pro výstižnější stanovení tahové pevnosti vláknobetonu*. In: 25. *Betonářské dny – konference s mezinárodní účastí: Sekce ST4B: Modelování a navrhování 1*. 2018. Pardubice: Česká betonářská společnost, 1993, s. 7. ISBN 978-80-906759-6-4.
- [32] TIPKA, Martin a Jan VODIČKA. *Optimalizace zkoušky cementových kompozit v osovém tahu*. In: *Konference zkoušení a jakost ve stavebnictví*. ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Katedra betonových a zděných konstrukcí, 2016, s. 10.
- [33] KŘÍSTEK, V, J VODIČKA, L MUSIL a H HANZLOVÁ. Improved methodology for determining tensile strength of fibre reinforced concrete. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019, **596**. ISSN 17578981. Dostupné z: doi:10.1088/1757-899X/596/1/012016
- [34] TIPKA, M, J VAŠKOVÁ, L MUSIL a H HANZLOVÁ. Tensile properties of structural fibre reinforced concrete. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017, **246**. ISSN 1757-8981. Dostupné z: doi:10.1088/1757-899X/246/1/012052
- [35] KWAN, A.K.H. a S.H. CHU. *Direct tension behaviour of steel fibre reinforced concrete measured by a new test method*. Hong Kong, 2018. Odborný výzkum. The University of Hong Kong.
- [36] TIPKA, Martin. *Tahové vlastnosti konstrukčních vláknobetonů*. Praha, 2017. Disertační práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Katedra betonových a zděných konstrukcí. Vedoucí práce Vašková, Jitka.

- [37] 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.
- [38] ČSN EN 12 390 – 7. *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [39] 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.
- [40] 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.
- [41] ČSN EN 14 651 + A1. *Vláknobeton – Zkušební metoda betonu s kovovými vlákny – Měření pevnosti v tahu za ohybu (mez úměrnosti, zbytková pevnost)*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2008.
- [42] ČSN P 73 2452. *Vláknobeton – Zkoušení ztvrdlého vláknobetonu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2015.
- [43] ČSN EN 14 488 – 5. *Zkoušení stříkaného betonu – Část 5: Stanovení kapacity absorbované energie vláknobetonových deskových zkušebních těles*. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [44] KONRÁD, Petr. *Experimentální vyšetřování mechanické energie absorbované prvky z vysokohodnotného vlákny vyztuženého betonu*. Praha, 2017. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Experimentální centrum. Vedoucí práce Sovják, Radoslav.
- [45] CENGIZ, Okan. *Comparative evaluation of steel mesh, steel fibre and high-performance polypropylene fibre reinforced shotcrete in panel test*. 2001. Diplomová práce. The Middle East Technical University, Natural and Applied Sciences, Civil Engineering,. Vedoucí práce Turanlı, Lütfullah.
- [46] DING, Yining a Wolfgang KUSTERLE. Comparative study of steel fibre-reinforced concrete and steel mesh-reinforced concrete at early ages in panel tests. *Cement and Concrete Research*. 1999, **29**(1999), 1827–1834.

- [47] ČSN EN 14721 + A1. *Zkušební metoda betonu s kovovými vlákny – Měření obsahu vláken v čerstvém a ztvrdlém betonu*. Praha: Český normalizační institut, 2008.
- [48] MEHTA, P. Kumar a Paulo J. M. MONTEIRO. *Concrete: microstructure, properties, and materials*. 4th ed. New York: McGraw-Hill Higher Education, c2014. ISBN 978-0-07-179787-0.
- [49] FAISAL, Ananda, Febriani ONI, Juli Ardita PRIBADI, JUNAIDI a GUNAWAN. Effect the use of steel fibers (DRAMIX) on reinforced concrete slab. *CSID Journal of Infrastructure Development*. 2019, **2**(2), 183-191. ISSN 2407-4438.
- [50] Investigation of Punching Behaviour of Steel and Polypropylene Fibre Reinforced Concrete Slabs under Normal Load. *Procedia Engineering*. 2016, **161**(2), 458-465. ISSN 18777058. Dostupné z: doi:10.1016/j.proeng.2016.08.590
- [51] GRÜNEWALD, Steffen a Joost C. WALRAVEN. Parameter-study on the influence of steel fibers and coarse aggregate content on the fresh properties of self-compacting concrete. *Cement and Concrete Research*. 2001, **31**(2001), 1793 – 1798.
- [52] ELSAIGH, W. A., E. P. KEARSLEY a J. M. ROBERTS. Steel fibre reinforced concrete for road pavement applications. *Southern African Transport Conference*. University of Pretoria, 2005, **24**(SATC 2005), 191-201. ISBN 1-920-01712-7.
- [53] ABDALLAH, Sadoon, Mizi FAN, Xiangming ZHOU a Simon LE GEYT. Anchorage Effects of Various Steel Fibre Architectures for Concrete Reinforcement. *International Journal of Concrete Structures and Materials* [online]. 2016, **10**(3), 325-335 [cit. 2021-8-7]. ISSN 1976-0485. Dostupné z: doi:10.1007/s40069-016-0148-5
- [54] *Concrete Reinforcing Fiber Market Size, Share & Trends Analysis Report By Product (PE, PP, Steel, Basalt), Application (Infrastructure, Residential & Commercial, Industrial), And Segment Forecasts, 2019 - 2025* [online]. 2019 [cit. 2021-7]. Dostupné z: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/concrete-reinforcing-fiber-market>
- [55] *Steel Fiber Market Size, Share & Trends Analysis Report By Application (Slabs & Flooring, Precast, Pavements & Tunneling), By Type (Hooked, Straight), By Region, And Segment Forecasts, 2019 - 2025* [online]. 2019 [cit. 2021-7]. Dostupné z: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/steel-fiber-market>

[56] *Self-Compacting Concrete Market size worth over \$30.2bn by 2024* [online]. 2019 [cit. 2021-7]. Dostupné z: <https://www.gminsights.com/pressrelease/self-compacting-concrete-market>

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A. – Technický list ocelového vlákna Dramix 3D 45/50 BL

Příloha B. – Porovnání dosažených výsledků jednotlivých zkoušek

Příloha C. – Poškození desky po zkouškách odolnosti proti výbuchu

Příloha D. – Statistiky rozdělení a vývoje produkce samozhutnitelného betonu a drátkobetonu

Příloha E. – Kontrolní a zkušební plán s harmonogramem prováděných činností



Dramix®



45 / 50 BL

Poměr stran

Délka

Bez povrchové úpravy (Bright)

Loose (Loose)

TECHNICKÝ LIST

Charakteristiky

Vlastnosti materiálu

Nom.pevnost v tahu:	1.115 (N/mm ²)
Youngův modul pružnosti:	200.000 (N/mm ²)
Napětí a max. pevnost:	0,8 %

Geometrie

Typ vlákna	3D	
Délka (l)	50 mm	
Průměr (d)	1,05 mm	
Poměr stran (l/d)	45	

Minimum EN 14889-1 - dávkování

20 kg/m³

Minimální dávkování

2.938 m³ na 20 kg/m³
2.858 vláknů / kg

Dramix® family

3D běžné aplikace vláknů vyztužených podlah
4D nejvyšší kontrola použití
5D pokročilé konstrukční aplikace

	5D	4D	3D
Tahová pevnost			
Houževnatost vlákna			
Pevnost kotvení			

Osvědčení výrobku *



* Certifikáty produktu jsou dány výrobní specifikací.

Prohlášení o shodě

Dramix® vyhovuje ASTM A820 a EN 14889-1 a ISO 13270, tř. A.

Osvědčení systému



Všechny závody vyrábějící Dramix® jsou certifikovány normami ISO 9001 a ISO 14001.

Balení



PYTEL á
20 kg



VELKÝ PYTEL á
800 - 1.100 kg

Skladování



DRAMIX® 3D 45/50BL

Originální kotvení

Dramix® 3D je nákladově efektivní vlákno pro standardní staticky neurčené betonové konstrukce, které jsou vystaveny pravidelným statickým, unavovým a dynamickým zatížením.

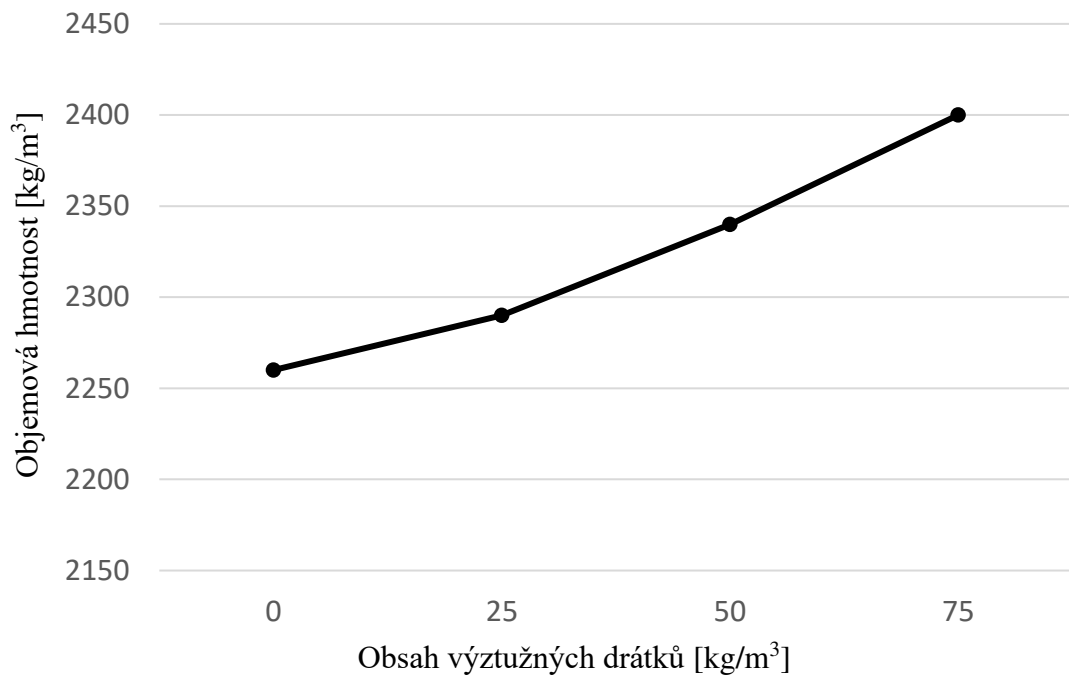
Bekaert Podpora u návrhu a realizace betonových konstrukcí

Můžete se spolehnout na naši podporu pro každý krok vašeho projektu, od návrhu konceptu až po podporu kvality na místě stavby. Naše služby zahrnují doporučení týkající se návrhu desek, detailů konstrukcí, konkrétních postupů řízení jakosti. Jsme také rádi, že s vámi a vašim týmem sdílíme naše znalosti. Neváhejte nás požádat o workshop nebo školení na téma vyztužení ocelových vláken ve vašich kancelářích.

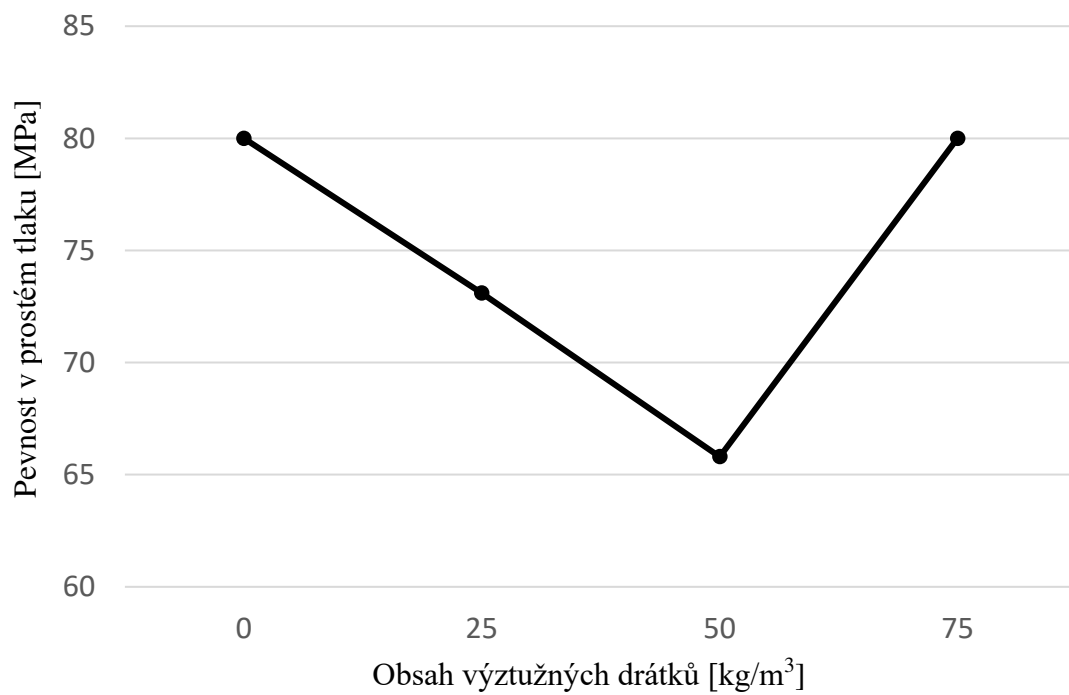
VPro doporučení k manipulaci, dávkování a míchání navštivte :
www.bekaert.com/dosingdramix.
Pro CE Prohlášení o vlastnostech:
www.bekaert.com/dramix/downloads.

Příloha B. – Porovnání dosažených výsledků jednotlivých zkoušek

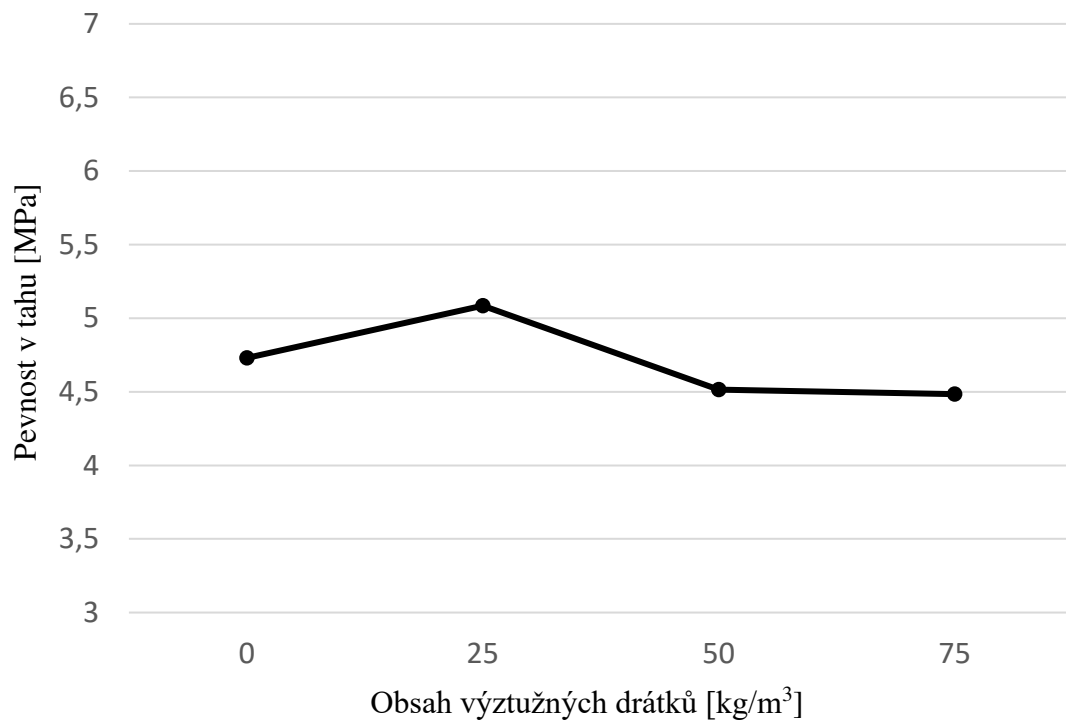
Objemová hmotnost čerstvého betonu



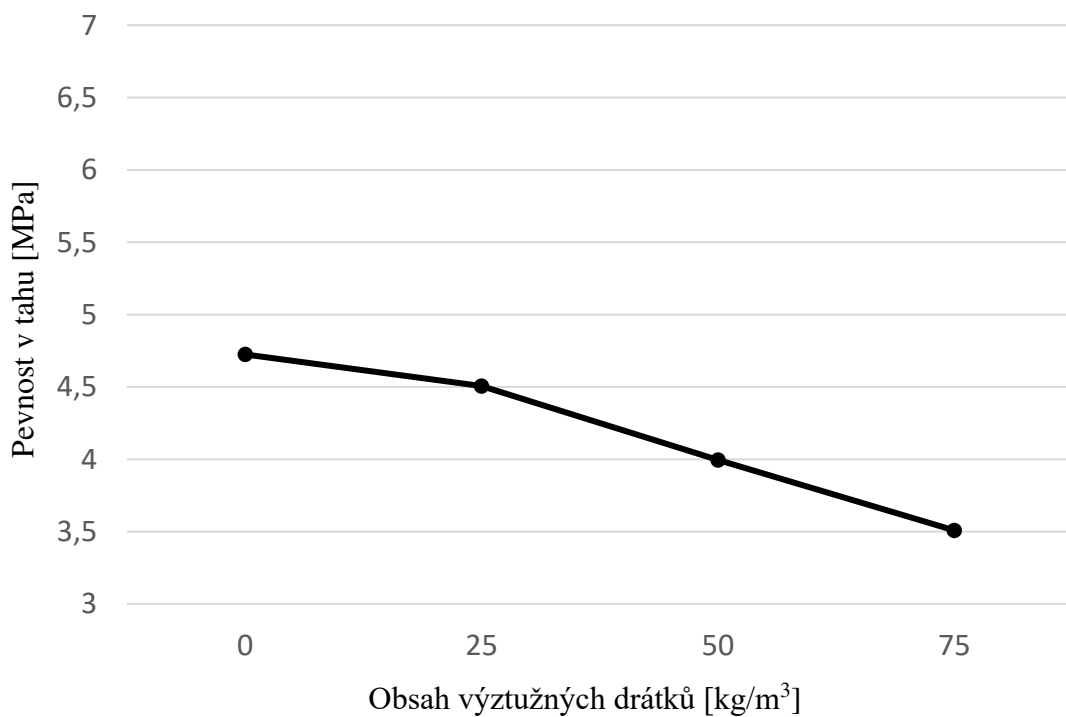
Pevnost v prostém tlaku



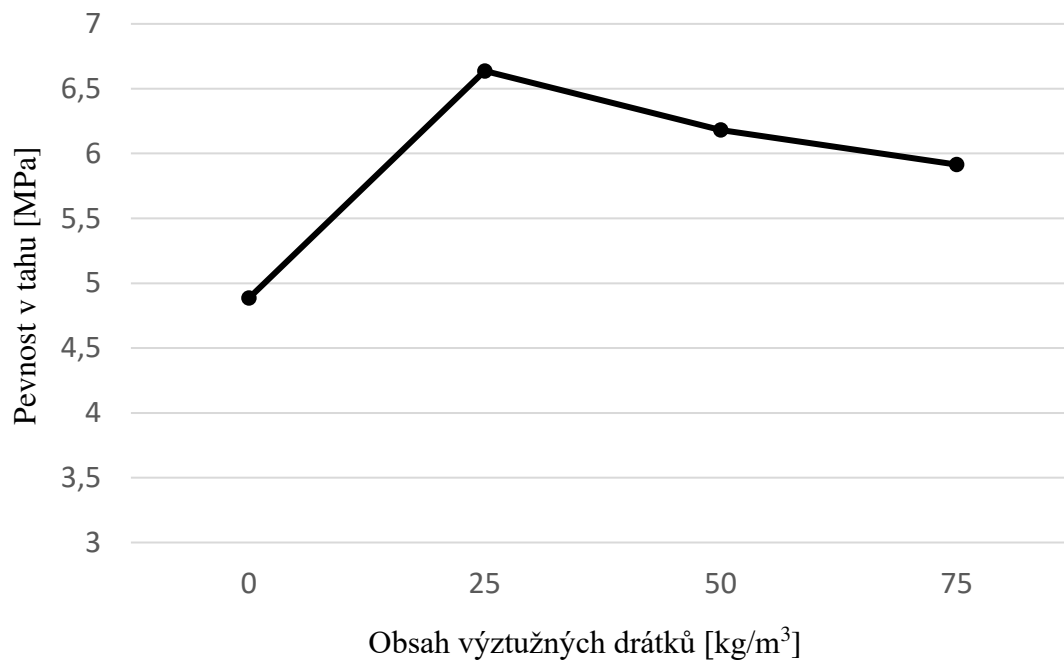
Pevnost v tahu ohybem kruhová singularita – průměr maximálních hodnot



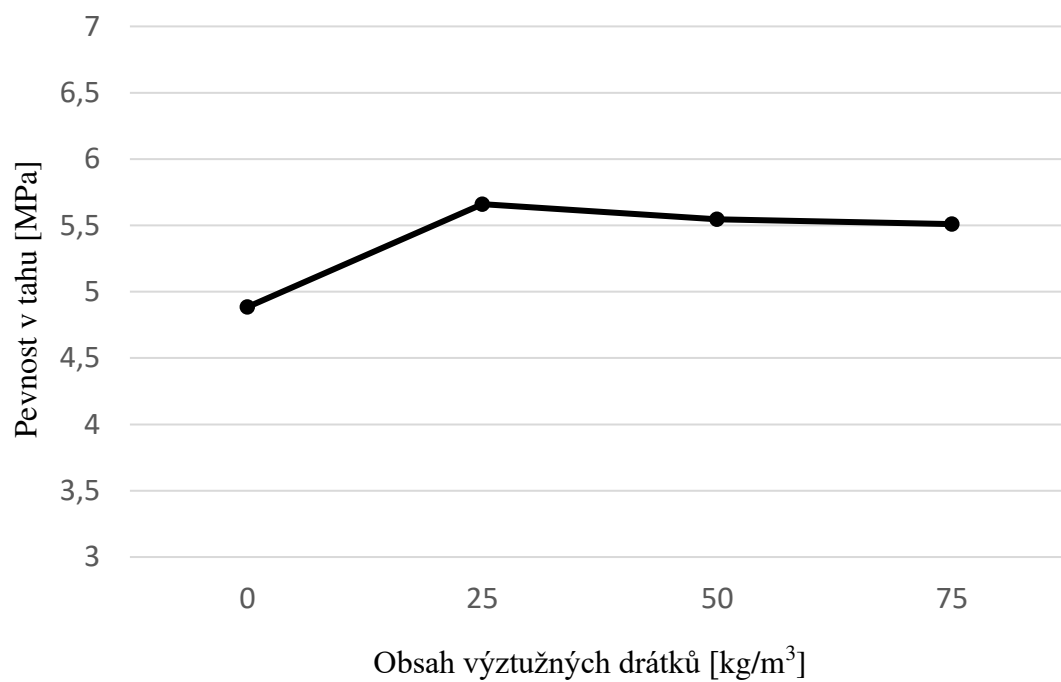
Pevnost v tahu ohybem kruhová singularita – maxima průměrných diagramů



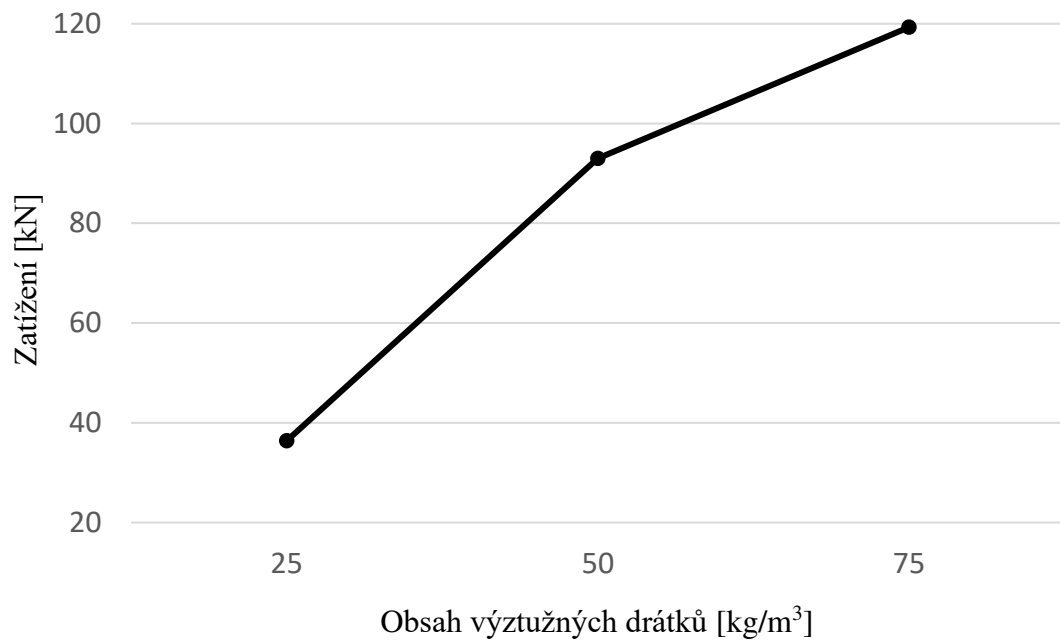
Pevnost v tahu ohybem bez zářezu – průměr maximálních hodnot



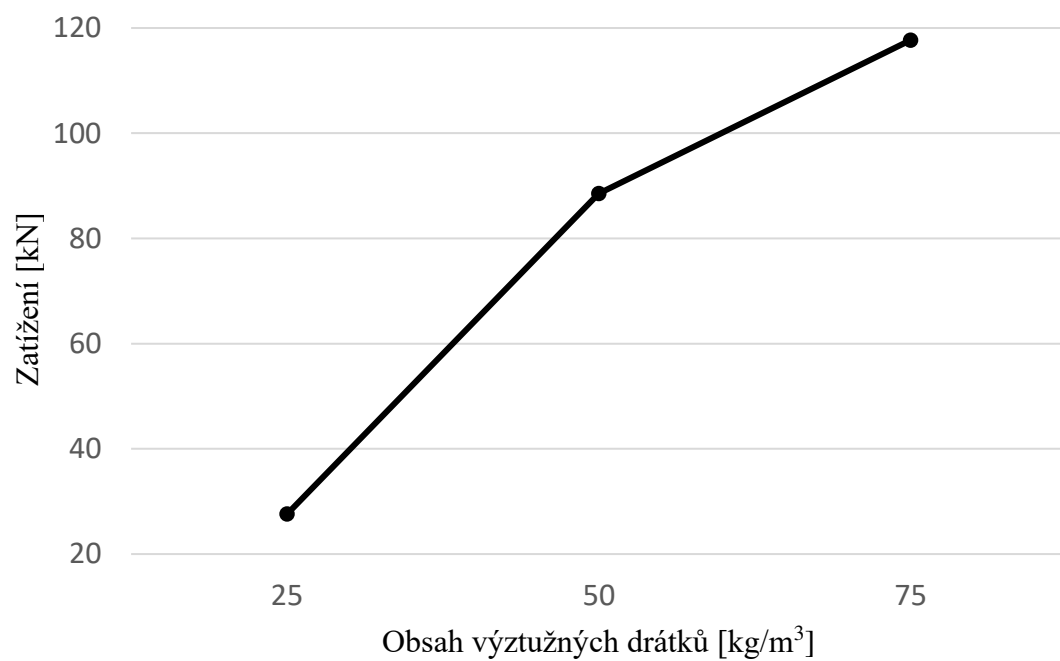
Pevnost v tahu ohybem bez zářezu – maxima průměrných diagramů



Stanovení absorbované energie – průměr maximálních hodnot



Stanovení absorbované energie – maxima průměrných diagramů



Příloha C. – Poškození desky po zkouškách odolnosti proti výbuchu

Trhavina Semtex A (150 g) byla umístěna na horní povrch ve středu desky a deska byla uložena po obvodě. Deska byla vyztužená ocelovými drátky 75 kg/m³ betonu. Vyhodnocení výsledků odolnosti proti výbuch bylo provedeno v rámci navazujících výzkumů.

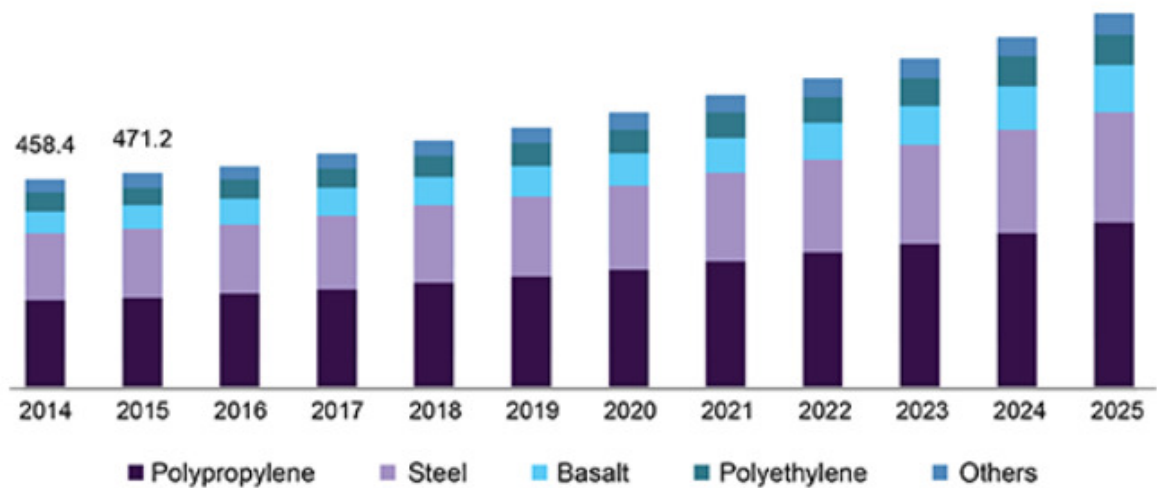
Horní povrch desky:



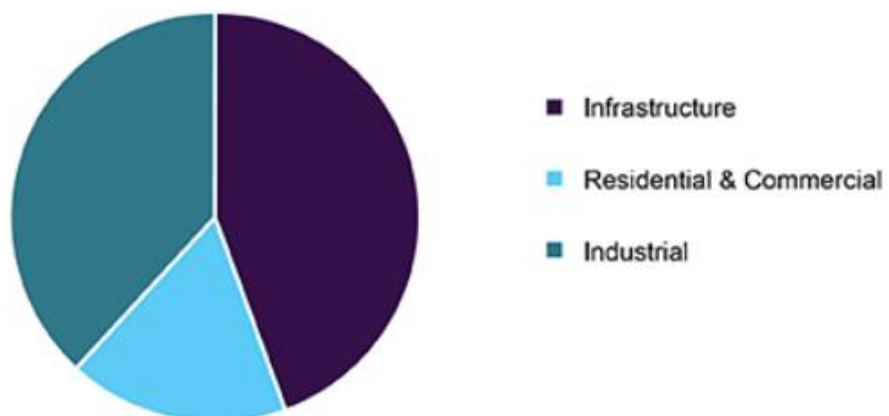
Spodní povrch desky:



U.S. concrete reinforcing fiber market size, by product, 2014 - 2025 (USD Million)

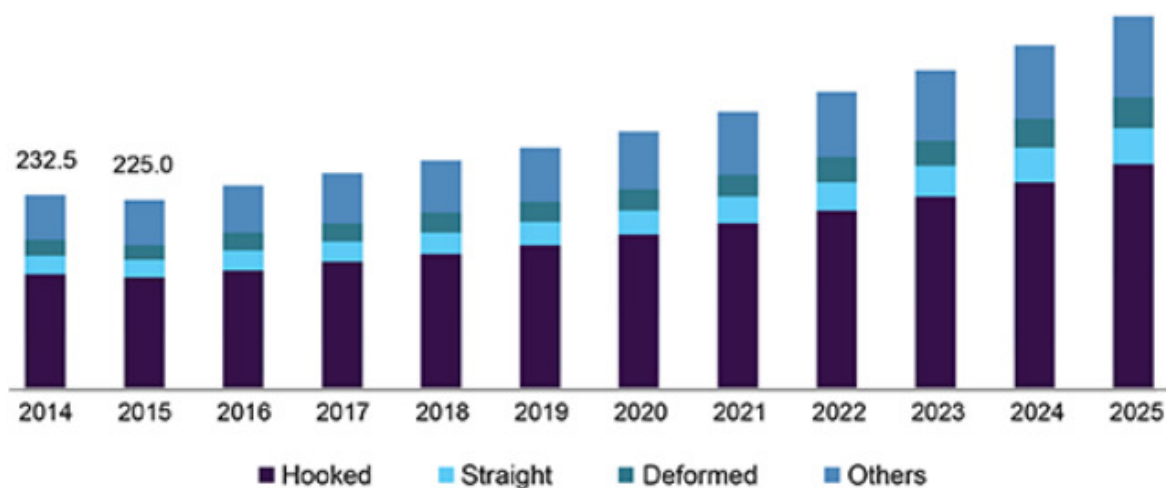


Global concrete reinforcing fiber market share, by application, 2017 (%)

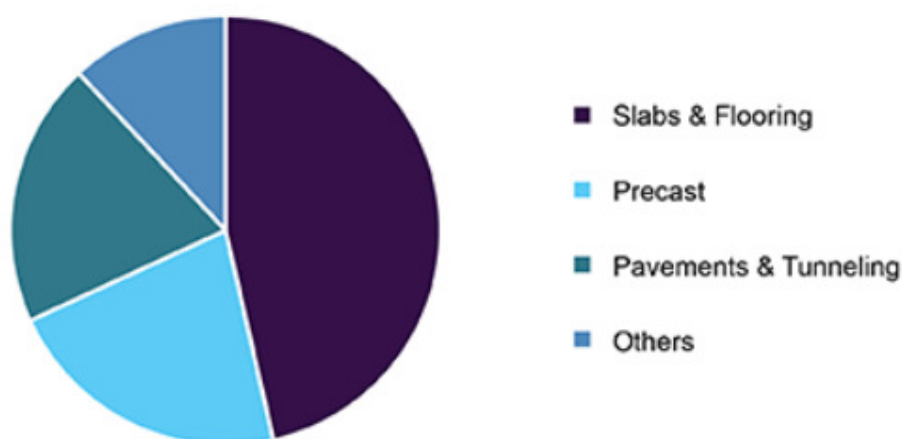


Zdroj: www.grandviewresearch.com [54]

U.S. steel fiber market size, by type, 2014 - 2025 (USD Million)

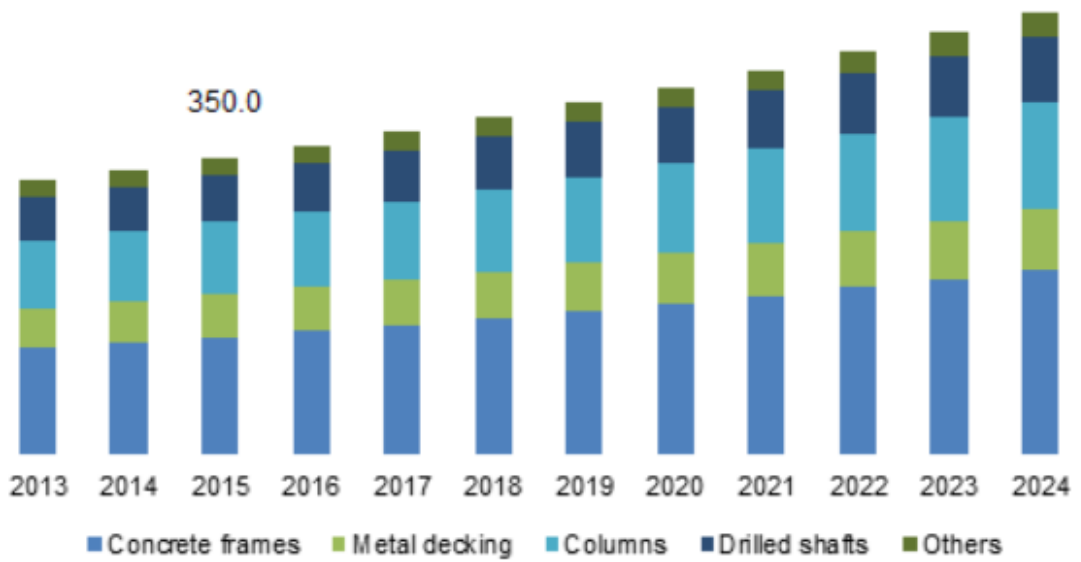


Global steel fiber market share, by application, 2018 (%)



Zdroj: www.grandviewresearch.com [55]

U.S. Self-Compacting Concrete Market Share, By Application, 2013 - 2024 (USD Million)



Source: www.gminsights.com

Zdroj: www.gminsights.com [56]

Příloha E.- Kontrolní a zkušební plán:

Seznam prováděných činností:

1. Příprava přípravků, vybavení a forem k odvezení do PREFA
2. Dovezení přípravků, vybavení a forem do PREFA – Nový Bydžov (M-SILNICE a.s.)
3. Příprava forem a bednění (maximum)

4x desky 600x600x100 mm,	$V_{1D} = 0,036 \text{ m}^3$
3x krychle 150x150x150 mm	$V_{3K} = 0,010125 \text{ m}^3$
5x válce $d = 150 \text{ mm}$; $v = 300 \text{ mm}$ – modul	$V_{1V} = 0,0053 \text{ m}^3$
1x trámek (2x kost) 150x150x700 mm	$V_{1T} = 0,01575 \text{ m}^3$
2x trámek (nevyztužený beton)	$V_{1T} = 0,01575 \text{ m}^3$
6x trámek (vyztužený beton)	$V_{1T} = 0,01575 \text{ m}^3$
4. Dodání / výroba čerstvého betonu (PREFA – Receptura SSC*)
5. Výroba zkušebních těles (dle počtu těles viz. tabulka)
6. Čištění přípravků a vybavení (recyklace zbytkového betonu)
7. Odbednění forem
8. Ošetřování vodou zkušebních těles pod folií
9. Čištění forem
10. Odvezení vyrobených těles (2x paleta)
11. Odvezení přípravků, vybavení a forem z PREFA – VVCD
12. Vyhodnocení výsledků ze zkoušek čerstvého betonu (Laboratoř PREFA*)
13. Ukončení ošetřování zkušebních těles
14. Výroba singularit pro zkoušky čistého osového tahu (VVCD)
15. Převoz zkušebních těles z VVCD – CEMEX (výpůjčka přívěs)
16. Objemová hmotnost ztvrdlého betonu (VVCD)
17. Zkoušky pevnosti v tlaku krychle (VVCD)
18. Zkoušky pevnosti v tahu ohybem – nevyztužené plné trámce (CEMEX)
19. Zkoušky pevnosti v tahu ohybem – nevyztužené trámce se singularitami (CEMEX)
20. Sestavování a nastavování lisovacího zařízení před zkouškami (VVCD nebo CEMEX)
21. Zkoušky pevnosti v tahu ohybem – plné vyztužené trámce (CEMEX)
22. Zkoušky pevnosti v tahu ohybem – vyztužené trámce se singularitami (CEMEX)
23. Převoz zbytků vyztužených trámců z CEMEXU do VVCD k vytvoření krychlí pro zkoušky pevnosti v tlaku (protipožární odolnost*)
24. Výroba vyztužených krychlí – ořezáním zbytků trámců (TSL-VVCD*)
25. Zkoušení desek na průraz – absorbovaná energie (CEMEX)
26. Zkoušky tahových pevností – kosti (USZ*)
27. Stanovení modulu pružnosti a přetvárnosti (Ing. Vladimír Suchánek, Ph.D. (VVCD*))
28. Zkoušky desek v odolnosti proti výbuchu (UEM*)
29. Recyklace zbytkového ztvrdlého betonu
30. Vyhodnocení výsledků ze zkoušek ztvrdlého betonu

Pozn.: *Externě pro diplomovou práci a navazující výzkumy.

Harmonogram prováděných činností:

Den v týdnu; Místo: Datum; Čas:	Pátek; VVCD 3.7.2020; 17:00
Činnost:	1.
Den v týdnu; Místo: Datum; Čas:	Sobota; PREFA 4.7.2020; 6:00 – 9:30
Činnost:	2., 3., 4., 5.; 6.
Den v týdnu; Místo: Datum; Čas:	Neděle; PREFA 5.7.2020; 9:00 – 12:30
Činnost:	7.; 8.; 9.; 10.
<p>Pozn.:</p> <p>1. – Výpůjčka VVCD (ocelové formy tvaru válce 5x; plastové formy tvaru krychle 3x; ocelové drátky DRAMIX 3D 2x pytel po 20 kg; Abramsův kužel; malá podkladní deska; J-ring; tlakový hrnec, stříčka na vodu, gumová palička, fanka) – Vlastní (2x palety, kolečko, lopata, folie, proklady, kbelík, prodlužovací přívod 230 V ~)</p> <p>5. – Bez / s drátky – 0 kg/m³ (V_{2T} (2x plné)) – 25 kg/m³ (V_{4D}; V_{3K}; V_{5V}; V_{7T} (3x plné, 3x s otvorem, 1x dvě kosti))</p> <p>10. – V průběhu následujícího pracovního týdne</p>	

Den v týdnu; Místo: Datum; Čas:	Sobota; Hradec králové 11.7.2020; 17:00
Činnost:	1.
Den v týdnu; Místo: Datum; Čas:	Neděle; PREFA 12.7.2020; 6:00 – 9:30
Činnost:	2., 3., 4., 5.; 6.
Den v týdnu; Místo: Datum; Čas:	Pondělí; PREFA 5.7.2020; 14:30 – 17:30
Činnost:	7.; 8.; 9.; 10.
<p>Pozn.:</p> <p>1. – Vlastní (2x palety, kolečko, lopata, folie, proklady, kbelík, prodlužovací přívod 230 V ~)</p> <p>5. – Bez / s drátky – 0 kg/m³ (V_{2T} (1x plné; 1x s otvorem)) – 25 kg/m³ (V_{1T} (1x dvě kosti)) – 50 kg/m³ (V_{3D}; V_{3K}; V_{5V}; V_{6T} (3x plné, 3x s otvorem))</p> <p>10. – V průběhu následujícího pracovního týdne</p>	

Pozn.: Všechny činnosti jsou průběžně zaznamenávány a podloženy vlastní fotodokumentací

Den v týdnu; Místo: Datum; Čas:	Středa; VVCD 9.9.2020; 9:30 – 13:00
Činnost:	15.; 20.
Den v týdnu; Místo: Datum; Čas:	Středa; CEMEX 9.9.2020; 13:00 – 15:00
Činnost:	20., 13., 25., 20.
Den v týdnu; Místo: Datum; Čas:	Středa; CEMEX 9.9.2020; 15:00 – 17:30
Činnost:	13.; 25.; 13.; 25.; 13.; 25.; 29.; 30.
Pozn.: 13. – tělesa byla ošetřována po dobu 67 dnů (charakteristické stáří) 25. – s drátky – 25 kg/m ³ (V _{4D} (1x testovací těleso, 3x zkušební těleso)) 30. - V průběhu následujícího pracovního týdne	

Den v týdnu; Místo: Datum; Čas:	Čtvrtek; VVCD 10.9.2020; 7:30 – 9:00
Činnost:	20.; 13.; 17.; 29.; 15.; 30.
Pozn.: 13. – 25 kg/m ³ tělesa byla ošetřována po dobu 68 dnů (charakteristické stáří) – (V _{3K}) – 50 kg/m ³ tělesa byla ošetřována po dobu 61 dnů (charakteristické stáří) – (V _{3K}) 17. – s drátky – 25 kg/m ³ (V _{3K}) – 50 kg/m ³ (V _{3K}) 30. - V průběhu následujícího pracovního týdne	

Den v týdnu; Místo: Datum; Čas:	Úterý; CEMEX 15.9.2020; 14:30 – 16:45
Činnost:	20.; 13.; 25.; 13.; 25.; 13.; 25.; 29.; 30.
Pozn.: 13. – 50 kg/m ³ tělesa byla ošetřována po dobu 66 dnů (charakteristické stáří) – (V _{3D}) 25. – s drátky – 50 kg/m ³ (V _{3D} (3x zkušební těleso)) 30. - V průběhu následujícího pracovního týdne	

Pozn.: Všechny činnosti jsou průběžně zaznamenávány a podloženy vlastní fotodokumentací

Den v týdnu; Místo: Datum; Čas:	Pátek; Hradec králové 18.9.2020; 17:00
Činnost:	1.
Den v týdnu; Místo: Datum; Čas:	Sobota; PREFA 19.9.2020; 6:30 – 10:00
Činnost:	2., 3., 4., 5.; 6.
Den v týdnu; Místo: Datum; Čas:	Neděle; PREFA 20.9.2020; 9:30 – 12:30
Činnost:	7.; 8.; 9.; 10.
Pozn.: 1. – Vlastní (2x palety, kolečko, lopata, folie, proklady, kbelík, prodlužovací přívod 230 V ~) 5. – Bez / s drátky – 0 kg/m ³ (V _{2T} (2x s otvorem)) – 75 kg/m ³ (V _{4D} ; V _{3K} ; V _{5V} ; V _{6T} (3x plné, 3x s otvorem), V _{1T} (1x dvě kosti)) 10. – V průběhu následujícího pracovního týdne	

Den v týdnu; Místo: Datum; Čas:	Sobota; Hradec králové 26.9.2020; 17:00
Činnost:	1.
Den v týdnu; Místo: Datum; Čas:	Neděle; PREFA 27.9.2020; 6:30 – 10:00
Činnost:	2., 3., 4., 5.; 6.
Den v týdnu; Místo: Datum; Čas:	Neděle; PREFA 28.9.2020; 7:30 – 12:30
Činnost:	7.; 8.; 9.; 10.; 11.
Pozn.: 1. – Vlastní (2x palety, kolečko, lopata, folie, proklady, kbelík, prodlužovací přívod 230 V ~) 5. – Bez / s drátky – 0 kg/m ³ (V _{3K} ; V _{5V} ; V _{2T} (2x dvě kosti)) – 25 kg/m ³ (V _{2T} ((1x plné, 1x s otvorem)) – 50 kg/m ³ (V _{2T} (2x dvě kosti)) – 75 kg/m ³ (V _{1D} ; V _{2T} (1x plné, 1x s otvorem), V _{1T} (1x dvě kosti))	

Pozn.: Všechny činnosti jsou průběžně zaznamenávány a podloženy vlastní fotodokumentací

Tabulka vyrobených zkušebních těles:

Těleso – Drátky	0 kg/m ³	25 kg/m ³	50 kg/m ³	75 kg/m ³
Deska	0x	4x	3x	5x
Trámek	6x	8x	6x	8x
Válec	5x	5x	5x	5x
Krychle	3x	3x	3x	3x
Kost	4x	4x	4x	4x

Den v týdnu; Místo: Datum; Čas:	Čtvrtek; VVCD 8.10.2020; 8:00 – 14:30
Činnost:	13.; 14.
Den v týdnu; Místo: Datum; Čas:	Pátek; VVCD 9.10.2020; 8:00 – 14:00
Činnost:	14.; 8.
Pozn.: 14. – pro jádrové odvrty byla určena polovina zkušebních hranolů (14 těles) nepovedené odvrty 2 (75 kg/m ³ , 25 kg/m ³) – druhá polovina z dvojice těles (14) odpovídající si procentem vyztužení a charakteristickým stářím byla ponechána bez vývrtů	

Den v týdnu; Místo: Datum; Čas:	Čtvrtek; VVCD 16.12.2020; 10:00 – 11:00
Činnost:	20.; 13.; 17.; 29.; 15.; 30.
Pozn.: 13. – 75 kg/m ³ tělesa byla ošetřována po dobu 88 dnů (charakteristické stáří) – (V _{3K}) 17. – s drátky – 75 kg/m ³ (V _{3K}) 30. - V průběhu následujícího pracovního týdne	

Den v týdnu; Místo: Datum; Čas:	Úterý; CEMEX 16.12.2020; 12:00 – 15:45
Činnost:	20.; 13.; 25.; 13.; 25.; 13.; 25.; 20.; 22.; 29.; 30.
Pozn.: 13. – 75 kg/m ³ tělesa byla ošetřována po dobu 88 dnů (charakteristické stáří) – (V _{3D}) 25. – s drátky – 75 kg/m ³ (V _{3D} (3x zkušební těleso)) 22. – s drátky – 50 kg/m ³ (V _{1T} (1x testovací těleso – nepovedený odvrt)) 30. - V průběhu následujícího pracovního týdne	

Pozn.: Všechny činnosti jsou průběžně zaznamenávány a podloženy vlastní fotodokumentací

Den v týdnu; Místo: Datum; Čas:	Úterý; CEMEX 11.3.2020; 10:00 – 15:45
Činnost:	15.; 20.; 13.; 21.; 13.; 21.; 13.; 22.; 20.; 29.; 23.; 30.;
Pozn.: 13. – 25 kg/m ³ tělesa byla ošetřována po dobu 250 dnů (charakteristické stáří) – (V _{6T}) – 75 kg/m ³ tělesa byla ošetřována po dobu 173 dnů (charakteristické stáří) – (V _{3T}) 21. – s drátky – 25 kg/m ³ (V _{3T} (3x zkušební těleso)), – 75 kg/m ³ (V _{3T} (3x zkušební těleso)) 22. – s drátky – 25 kg/m ³ (V _{3T} (3x zkušební těleso – s kruhovými odvrty)) 30. - V průběhu následujícího pracovního týdne	

Den v týdnu; Místo: Datum; Čas:	Čtvek; CEMEX 8.4.2021; 8:30 – 13:00
Činnost:	15.; 20.; 13.; 22.; 13.; 22.; 13.; 22.; 13.; 22.; 13.; 22.; 13.; 22.; 13.; 21.; 13.; 21.;13.; 21.; 23.; 30.
Pozn.: 13. – 75 kg/m ³ tělesa byla ošetřována po dobu 201 dnů (charakteristické stáří) – (V _{3T}) – 50 kg/m ³ tělesa byla ošetřována po dobu 270 dnů (charakteristické stáří) – (V _{6T}) 22. – s drátky – 75 kg/m ³ (V _{3T} (3x zkušební těleso – s kruhovými odvrty)), – 50 kg/m ³ (V _{3T} (3x zkušební těleso – s kruhovými odvrty)) 21. – s drátky – 50 kg/m ³ (V _{3T} (3x zkušební těleso)) 30. - V průběhu následujícího pracovního týdne	

Den v týdnu; Místo: Datum; Čas:	Čtvek; CEMEX 8.4.2021; 13:00 – 14:30
Činnost:	15.; 13.; 18.; 13.; 18.; 13.; 18.; 13.; 19.; 13.; 19.; 13.; 19.; 20.; 29.; 23.; 30.
Pozn.: 13. – 0 kg/m ³ tělesa byla ošetřována po dobu 278 dnů (charakteristické stáří) – (V _{2T}) – 0 kg/m ³ tělesa byla ošetřována po dobu 270 dnů (charakteristické stáří) – (V _{2T}) – 0 kg/m ³ tělesa byla ošetřována po dobu 201 dnů (charakteristické stáří) – (V _{2T}) 18. – s drátky – 0 kg/m ³ (V _{3T} (3x zkušební těleso)) 19. – s drátky – 0 kg/m ³ (V _{3T} (3x zkušební těleso – s kruhovými odvrty)) 30. - V průběhu následujícího pracovního týdne	

Pozn.: Všechny činnosti jsou průběžně zaznamenávány a podloženy vlastní fotodokumentací

Den v týdnu; Místo: Datum; Čas:	Čtvrtek; VVCD 8.4.2021; 14:30 – 15:00
Činnost:	20.; 13.; 17.; 29.; 16.;30.
Pozn.: 13. – 0 kg/m ³ tělesa byla ošetřována po dobu 193 dnů (charakteristické stáří) – (V _{3K}) 17. – s drátky – 0 kg/m ³ (V _{3K}) 16. – s drátky – 0, 25, 50, 75 kg/m ³ (V _{12V}) 30. - V průběhu následujícího pracovního týdne	

Den v týdnu; Místo: Datum; Čas:	Čtvrtek; VVCD 13.5.2021; 11:00 – 12:00
Činnost:	13.; 28.; 29.; 30.;
Pozn.: 13. – 75 kg/m ³ tělesa byla ošetřována po dobu 228 a 236 dnů (charakteristické stáří) – (V _{2D}) 28. – Semtex A v dávkách 100 a 150 g na povrchu ve středu desky, deska uložená po obvodu 30. – nebylo součástí zadané práce (viz Příloha C.)	

Místo:	USZ, Pardubice
Činnost:	26.; 30.;
Pozn.: 26. – 75 kg/m ³ (V _{4K}) – 50 kg/m ³ (V _{4K}) – 25 kg/m ³ (V _{4K}) – 0 kg/m ³ (V _{4K}) 30. – nebylo součástí zadané práce	

Pozn.: Všechny činnosti jsou průběžně zaznamenávány a podloženy vlastní fotodokumentací