

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta stavební

Katedra stavebních hmot a diagnostiky staveb

Aspekty testovania a mechanické vlastnosti drátkobetónu

Aspects of Testing and Mechanical Properties of Fiber Concrete

Študent:

Radoslav Gandel

Vedúci bakalárskej práce:

Ing. Bc. Oldřich Sucharda, Ph.D.

Ostrava 2021

Bakalářská práce
Aspekty testování a mechanické vlastnosti drátkobetonu

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta stavební
Katedra stavebních hmot a diagnostiky staveb

Zadání bakalářské práce

Student: **Radoslav Gandel**

Studijní program: B3607 Stavební inženýrství

Studijní obor: 3647R019 Stavební hmoty a diagnostika staveb

Téma: **Aspekty testování a mechanické vlastnosti drátkobetonu**
Aspects of Testing and Mechanical Properties of Fiber Concrete

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Zpracujte bakalářskou práci na téma mechanické vlastnosti drátkobetonu, kde zhodnotíte přístupy a možnosti testování. Experimentální program se zaměří zejména na srovnání zkoušek v příčném tahu, tří- a čtyřbodové zkoušky v ohybu, pevnosti v tlaku a modul pružnosti. V rámci práce se provede ucelené vyhodnocení se zhodnocením výhod a nevýhod. Experimentální program bude zahrnovat také vybrané typy nedestruktivního testování.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] <https://stavba.tzb-info.cz/beton-malty-omitky/18133-zkouseni-a-stanoveni-pevnosti-v-tahu-u-dratkobetonu>
- [2] ČSN P 732350: Vláknobeton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda. Předběžná česká technická norma. ÚNMZ, Praha, 2015.
- [3] TP FC 1-1 Technické podmínky 1: Vláknobeton – Část 1: Zkoušení vláknobetonu, vyhodnocení destruktivních zkoušek a stanovení charakteristického pracovního diagram vláknobetonu pro navrhování vláknobetonových konstrukcí; ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Katedra betonových a zděných konstrukcí, Praha 2007.
- [4] Krátký, J., Trtík, K., Vodička, J. Drátkobetonové konstrukce, Informační centrum ČKAIT ve spolupráci s Českou společností pro beton a zdivo, Praha 1999
- [5] DAfStb guidelines, 2011: DAfStbRichtlinie Stahlfaserbeton. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton DAfStb, Berlin, German. (In German)

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Bc. Oldřich Sucharda, Ph.D.**

Datum zadání: 30.10.2020

Datum odevzdání: 30.04.2021



doc. Ing. Vlastimil Bílek, Ph.D.

prof. Ing. Radim Čajka, CSc.

Bakalárska práca
Aspekty testovania a mechanické vlastnosti drátkobetónu

Prehlásenie študenta

Prehlasujem, že som celú bakalársku prácu vrátane príloh vypracoval samostatne pod vedením vedúceho bakalárskej práce a uviedol som všetky použité podklady a literatúru.

V Ostrave dňa

.....

podpis študenta

Bakalárska práca
Aspekty testovania a mechanické vlastnosti drátkobetónu

Prehlasujem, že:

- som bol oboznámený s tým, že na moju bakalársku prácu sa plne vzťahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, najmä § 35 – použitie diela v rámci občianskych a náboženských obradov, v rámci školských predstavení a použitia diela školského a § 60 – školského diela.
- beriem na vedomie, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (ďalej len VŠB-TUO) má právo nezárobkovo ku svojej vnútornej potrebe bakalársku prácu použiť (§ 35 odst. 3).
- súhlasím s tým, že jeden výtlačok bakalárskej práce bude uložený v Ústrednej knižnici VŠB-TUO k prezenčnému nahliadnutiu. Súhlasím s tým, že údaje o bakalárskej práci budú zverejnené v informačnom systéme VŠB-TUO.
- bolo dohodnuté, že s VŠB-TUO, v prípade záujmu z jej strany, uzavriem licenčnú zmluvu s oprávnením použiť toto dielo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bolo dohodnuté, že použiť svoje dielo – bakalársku prácu alebo poskytnúť licenciu k jej využitiu môžem len so súhlasom VŠB-TUO, ktorá je oprávnená v takomto prípade odo mňa požadovať primeraný príspevok na úhradu nákladov, ktoré boli VŠB-TUO na vytvorenie diela vynaložené (až do jej skutočnej výšky).
- beriem na vedomie, že odovzdaním svojej práce súhlasím so zverejnením svojej práce podľa zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o zmene a doplnení ďalších zákonov (zákon o vysokých školách), v znení neskorších predpisov, bez ohľadu na výsledok jej obhajoby.

V Ostrave dňa

Bakalárska práca
Aspekty testovania a mechanické vlastnosti drátkobetónu

Pod'akovanie

Ako prvému by som rád pod'akoval vedúcemu bakalárskej práce Ing. Bc. Oldřichovi Suchardovi, Ph.D. za odborné rady, pomoc a ústretovosť pri vedení bakalárskej práce a tvorbe a testovaní skúšobných vzoriek jej praktickej časti. Moje pod'akovanie ďalej patrí Ing. Radke Hédlovej a Ing. Davidovi Bujdošovi za poskytnutý čas a ochotu pri realizácii odborných skúšok v laboratóriu Fakulty stavebnej.

Bakalárska práca
Aspekty testovania a mechanické vlastnosti drátkobetónu

Anotácia

Predmetom predloženej bakalárskej práce je testovanie mechanických vlastností drátkobetónu a porovnanie výsledkov meraní s ohľadom na dávkovanie ocel'ových vlákien. Bakalárska práca sa skladá z dvoch častí. Teoretická časť práce popisuje základné rozdelenie drátkobetónu, technológiu výroby a možnosti skúšania. Praktická časť je zameraná na vybrané skúšobné metódy drátkobetónu, ako pevnosť v tlaku, pevnosť v priečnom ťahu, pevnosť v ťahu za ohybu, na meranie odolnosti voči mrazu a CHRL a priesaku tlakovou vodou na pripravených drátkobetónových vzorkách.

Kľúčové slová: drátkobetón, ocel'ové vlákna, mechanické vlastnosti

Annotation

The subject of the presented bachelor thesis is the testing of mechanical properties of steel fiber reinforced concrete and the comparison of measurement results with respect to the dosing of fibers. The bachelor thesis consists of two parts. The theoretical part of the thesis describes the basic division of steel fibre reinforced concrete, production technology and testing options. The practical part is focused on selected test methods of steel fiber reinforced concrete, such as compressive strength, split tensile strength, flexural tensile strength, to measure the resistance to frost and defrosting chemicals and seepage with pressurized water on prepared steel fibre reinforced concrete samples.

Keywords: steel fibre reinforced concrete, steel fibers, mechanical properties

Zoznam použitých skratiek

FRC	fiber-reinforced concrete (vláknobetón)
CHRL	chemické rozmrazovacie látky
SFRC	steel fiber-reinforced concrete (drátkobetón)

Zoznam použitých veličín

a	veľkosť hrany skúšobnej kocky [mm]
a_0	výška zárezu [mm]
B	priečny rozmer vzorky [mm]
d	priemer skúšobného valca [mm]
$f_{c,cube}$	kocková pevnosť v tlaku [MPa]
$f_{c,cyl}$	valcová pevnosť v tlaku [MPa]
f_{ct}	kocková pevnosť v priečnom ťahu [MPa]
$f_{ct,sp}$	valcová pevnosť v priečnom ťahu [MPa]
$f_{ct,ft,3B}$	pevnosť v ťahu za ohybu pri trojbodovom usporiadaní [MPa]
$f_{ct,ft,4B}$	pevnosť v ťahu za ohybu pri štvorbodovom usporiadaní [MPa]
h	priečny rozmer vzorky [mm]
l	dĺžka dotykovej priamky telesa [mm]
L	rozpätie vzorku [mm]
P_{max}	sila potrebná na porušenie vzorku [N]

Bakalárska práca
Aspekty testovania a mechanické vlastnosti drátkobetónu

Obsah

1	Úvod	10
2	Základné informácie	11
2.1	História	11
2.2	Charakteristika drátkobetónu a jeho využitie	11
2.3	Zložky drátkobetónu	14
2.3.1	Cement	14
2.3.2	Voda	14
2.3.3	Prísady a prímеси	14
2.3.4	Kamenivo	15
2.3.5	Rozptýlená výstuž	16
2.4	Technológia výroby drátkobetónu	16
2.4.1	Príprava, miešanie a transport drátkobetónovej zmesi	16
2.4.2	Spracovanie drátkobetónovej zmesi	17
2.5	Výrobcovia oceľových vlákien v ČR	18
3	Druhy vlákien do betónu	19
3.1	Oceľové vlákna	19
3.2	Polymérové vlákna	21
3.3	Sklenené vlákna	21
3.4	Iné druhy vlákien	22
4	Vybrané skúšobné metódy drátkobetónu	24
4.1	Pevnostné skúšky drátkobetónu	24
4.1.1	Pevnosť v tlaku	24
4.1.2	Pevnosť v priečnom ťahu	25
4.1.3	Pevnosť v ťahu za ohybu	26
4.2	Odolnosť betónu voči mrazu a CHRL	27
4.3	Hĺbka priesaku tlakovou vodou	28
5	Výsledky praktickej časti	30
5.1	Modul pružnosti	32
5.2	Pevnosť v tlaku	32
5.3	Pevnosť v priečnom ťahu	33
5.4	Pevnosť v ťahu za ohybu	35
5.5	Skúšky železobetónových nosníkov bez šmykovej výstuže	39
5.6	Odolnosť voči mrazu a CHRL	42
5.7	Hĺbka priesaku tlakovou vodou	45

Bakalárska práca
Aspekty testovania a mechanické vlastnosti drátkobetónu

5.8	Doplnkové skúšky	47
5.8.1	Objemové zmeny	47
5.8.2	Pevnostné charakteristiky vybraných druhov drátkobetónov	50
6	Záver.....	53
	Zoznam použitej literatúry	55
	Zoznam obrázkov	59
	Zoznam tabuliek	61

1 Úvod

Nielen v stavebníctve, ale aj v iných technických oblastiach sa usiluje o zníženie nákladov, či náročnosti pri výrobe určitého produktu a súčasne o zlepšenie niektorých jeho vlastností. S rozvojom moderných technológií prichádzajú aj nové možnosti pri vývoji a výrobe takýchto produktov. Jedným z nich je aj vláknobetón.

Po objavení významných vlastností železobetónu, Josephom Monierom v roku 1867, dochádzalo k jeho hojnému využívaniu v stavebnom priemysle. Postupom času sa však požiadavky na železobetón menili. Pri výrobe veľkých, vystužených, betónových plôch, ako napríklad podlahy priemyselných hál, hral dôležitú úlohu výrobný čas a tým pádom aj cena práce. Bolo preto nutné navrhnuť kompozit s nižšou časovou náročnosťou pri jeho príprave, než akú mal železobetón, zároveň bolo potrebné aby si ponechal časť jeho žiadúcich vlastností.

Vláknobetón síce plne nenahrádza železobetón, avšak, aj pri znížení ceny a produkčného času, disponuje určitou časťou vlastností železobetónu, čo sa dá využiť pri stavebných prvkoch, ktoré nepožadujú až také vysoké, pevnostné vlastnosti.

Cieľom tejto práce je dané mechanické vlastnosti vláknobetónu (konkrétne vláknobetónu s oceľovými vláknami) zhodnotiť a porovnať s vlastnosťami referenčnej betónovej zmesi. Pevnosť v tlaku, pevnosť v priečnom ťahu a pevnosť v ťahu za ohybu sa bude testovať na vzorkách drátkobetónu s drôtikmi MasterFiber 482, s dávkovaním 60 kg/m³ a 90 kg/m³. Taktiež sa bude pri daných vzorkách skúmať odolnosť proti mrazu a CHRL a hĺbka priesaku tlakovou vodou. Všetky skúšky budú prevedené v laboratórnych priestoroch Fakulty stavebnej. Pred praktickou časťou je nutné teoretické oboznámenie s danou problematikou.

2 Základné informácie

2.1 História

Počiatky vystužovania materiálov vláknami, za účelom zlepšenia vlastností, siahajú až do staroveku. Pridávaním konských vlasov, slamy, peria či rákosia do hlinených tehliel, naši predkovia položili základy moderného vláknobetónu [1].

Prvé použitie drátkobetónu sa datuje do 70. rokov 20. storočia. Do povedomia českej verejnosti sa však dostal až po roku 1989, kedy sa s príchodom zahraničných firiem začala vo väčšom rozsahu uplatňovať realizácia betónových podláh priemyselných hál vystužených oceľovými vláknami. Konceptom drátkobetónu sa začali zaoberať aj domáce firmy. Na začiatku však proti rozsiahlejšiemu využitiu stála ekonomická stránka drátkobetónu, ktorá bola značne vyššia než u betónu prostého. Faktorom, ktorý mohol verejnosť presvedčiť o jeho kladoch, bolo okrem zlepšenia vlastností aj zvýšenie jeho životnosti, čo sa v konečnom dôsledku odzrkadľuje aj na jeho cene. Aj keď sa v súčasnej dobe nájdú odporcovia drátkobetónu, s rozvojom technológií a s nárastom firiem produkujúcich rôzne druhy vlákien, sa čím ďalej, tým viac odborníkov prikláňa k jeho širšiemu využívaniu [1] [2].

2.2 Charakteristika drátkobetónu a jeho využitie

Vláknobetónom (FRC) sa rozumie kompozitný materiál zložený z cementovej matrice, v ktorej je náhodne priestorovo rozptýlená výstuž vo forme vlákien, zvyšujúca určité mechanické vlastnosti kompozitu, ako napr. redukovanie vzniku trhlin pri ťahovom namáhaní, minimalizovanie objemových zmien či zvýšenie odolnosti proti prudkým zmenám teplôt [3] [4].

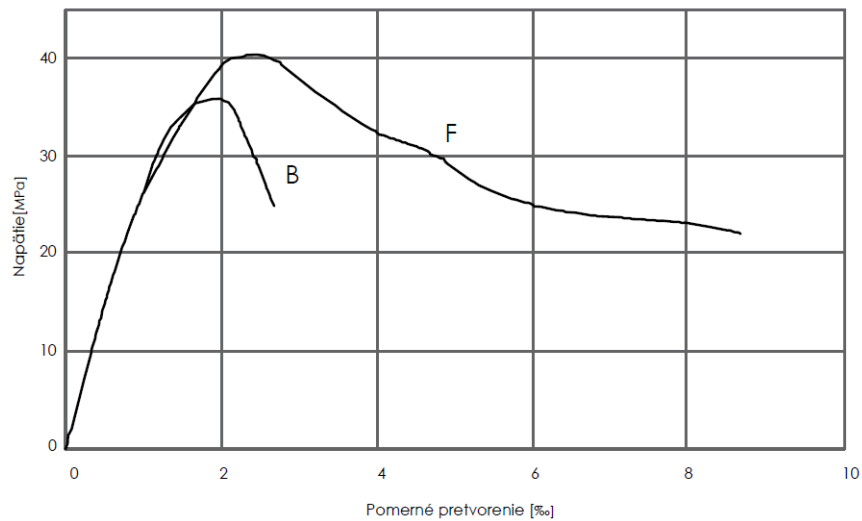
Podľa použitého materiálu rozdeľujeme vlákna na polymérové (polypropylénové, polyetylénové, polyakrylové, atd), sklenené, oceľové a iné [4].

Drátkobetón (SFRC) je typ vláknobetónu, v ktorom sú vlákna zastúpené oceľovými drôtkami. Tieto v spojení s cementovou matricou vytvárajú kompozitný materiál, ktorý má podobné mechanické vlastnosti ako železobetón, pričom znižuje pracovné náklady a čas. Na rozdiel od železobetónu, kedy sa betonárska výstuž vkladá do pripravenej betónovej zmesi, pri drátkobetóne sa drôtky pridávajú do zmesi počas procesu miešania. V súčasnej dobe sa jedná o druh vláknobetónu, ktorý ma na trhu najväčšie zastúpenie [2].

Bakalárska práca
Aspekty testovania a mechanické vlastnosti drátkobetónu

Použitie drátkobetónu závisí na špecifických požiadavkách pre daný konštrukčný prvok. Znáмым faktom zostáva, že prostý betón má porovnateľne menšiu pevnosť v ťahu než v tlaku (pevnosť v ťahu je cca 1/10 pevnosti v tlaku). Túto nepriaznivú vlastnosť, krehkú povahu porušenia pri ťahovom namáhaní a namáhaní v ťahu za ohybu, do istej miery obmedzuje prídanie výstužných prvkov [5].

Na obr. 2 môžeme vidieť porovnanie pracovného diagramu prostého betónu (B) a drátkobetónu (F):

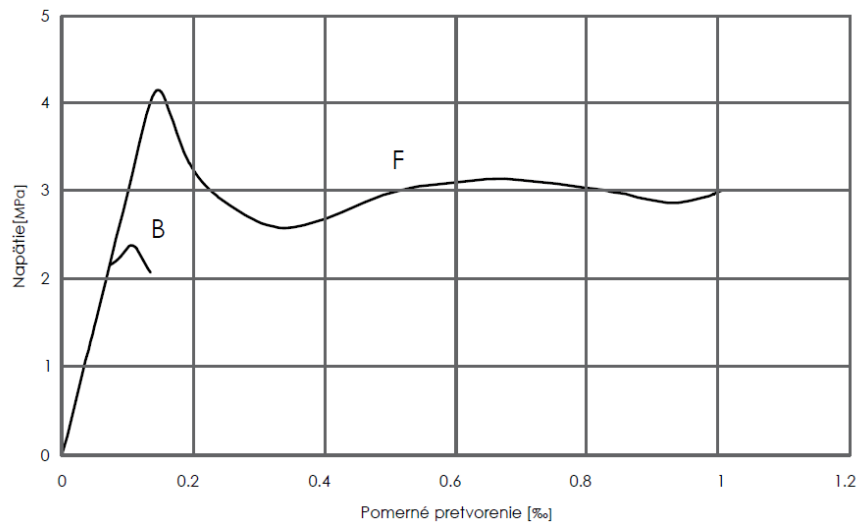


Obrázok 1 Pracovný diagram prostého betónu (B) a drátkobetónu (F) v tlaku, upravené podľa [7]

Z predošlého obrázku vyplýva, že prídanim ocelových vlákien do cementovej matrice nedochádza len k zvýšeniu tlakovej pevnosti drátkobetónu, ale aj k zlepšeniu schopnosti plastického pretvorenia po prekročení maximálneho napätia. Pri znížení napätia približne na polovicu, môžeme badať, že pracovný diagram drátkobetónu nadobúda viac-menej vodorovný charakter. Tento jav spôsobuje uvedenie drôtikov do činnosti po vzniku trhlin v kompozite. Pri prostom betóne porušenie nastáva vplyvom krehkých trhlín, ktoré vznikli pôsobením hlavných ťahových napätí [7].

Bakalárska práca
Aspekty testovania a mechanické vlastnosti drátkobetónu

Markantnejší rozdiel môžeme vidieť na obr. 3, v prípade pracovných diagramov prostého betónu (B) a drátkobetónu (F) v ťahu:



Obrázok 2 Pracovný diagram prostého betónu (B) a drátkobetónu (F) v ťahu, upravené podľa [7]

Z diagramov na obr. 3 vyplýva fakt, že nárast pevnosti v ťahu drátkobetónu oproti prostému betónu je značne vyšší než nárast pevnosti v tlaku daných kompozitov zobrazených pracovnými diagramami na obr. 2. Ďalej môžeme s istotou tvrdiť, že aj po vytvorení badateľných trhlin, sú vlákna drátkobetónu schopné prenášať určité zvyškové ťahové napätie. Toto reziduálne napätie je podmienené tvarom a kvantitou vlákien. V konečnom dôsledku je tak drátkobetónový konštrukčný prvok spôsobilý preniesť po určitý čas pôsobiace zaťaženie, aj po dosiahnutí maximálnej ťahovej pevnosti [7].

V špecifických typoch konštrukcií, ako sú podlahy priemyselných hál, mostovky, letiskové plochy a plochy skladov, je výhodnejšie použiť betón vystužený oceľovými vláknami, než klasickou betonárskou výstužou. Použitie tohto kompozitu v daných prípadoch poskytuje vysokú produktivitu pri samotnej pokládke drátkobetónovej plochy, zvyšuje jej húževnatosť, vodotesnosť, odolnosť voči rázu a dynamickému zaťaženiu. Taktiež lepšie odoláva teplotným zmenám a redukuje tvorbu mikrotrhlin, čím zvyšuje životnosť danej konštrukcie. Z týchto dôvodov je možné drátkobetón použiť aj na vodohospodárske stavby, ktoré kladú dôraz na zvýšenú nepriepustnosť, tunelové ostenia, pri stabilizácii svahov, dodatočnom posilnení stávajúcich objektov, či pri utesňovaní uzáverov podzemných nádrží [2] [5] [7].

2.3 Zložky drátkobetónu

2.3.1 Cement

Pri voľbe cementu do drátkobetónu sa postupuje obdobne ako pri voľbe cementu do prostého betónu. Požadované pevnosti v tlaku, agresivita prostredia, doba tuhnutia a tvrdnutia a cena hrajú pri výbere kľúčovú rolu. [10]

Norma ČSN EN 197-1 uvádza päť základných druhov cementu:

- **Portlandský cement (CEM I)**
- **Portlandský cement zmesový (CEM II)**
 - o Portlandský cement struskový
 - o Portlandský cement s kremičitým úletom
 - o Portlandský cement pucolánový
 - o Portlandský cement popolčekový
 - o Portlandský cement s kalcinovanou bridlicou
 - o Portlandský cement s vápencom
 - o Portlandský zmesový cement
- **Vysokopečný cement (CEM III)**
- **Pucolánový cement (CEM IV)**
- **Zmesový cement (CEM V) [10]**

Kompletné označenie cementu podľa uvedenej normy obsahuje: druh cementu, druhy a obsah hlavných zložiek, pevnostnú triedu a triedu nástupu počiatkovej pevnosti. [10]

2.3.2 Voda

Podstatným faktorom pri výbere vody do drátkobetónu je vodný súčiniteľ (v/c). Pre drátkobetóny je vhodný pomer s hodnotami 0,4 – 0,5, ktorý zamedzí vláknam sa zhlukovať a oddeľovať pri procese výroby, transportu a spracovania zmesi [7].

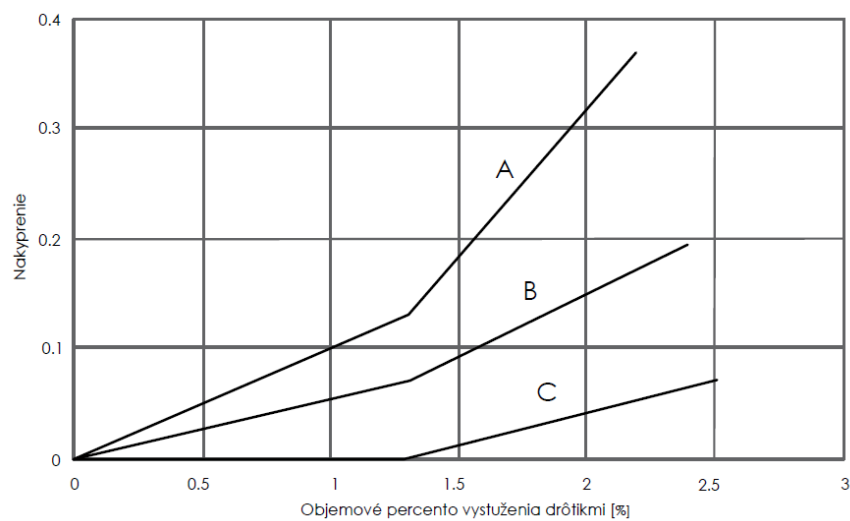
2.3.3 Prísady a prímеси

Voľba prísad a prímеси do drátkobetónu je v podstate rovnaká ako pri betóne prostom. Vďaka vysokému obsahu vlákien sú prísady zlepšujúce spracovateľnosť zmesi neoddeliteľnou súčasťou pri výrobe drátkobetónu. Poprípade sa ďalej môžu použiť

prevzdušňovacie prísady, prísady vplyvajúce na proces hydratácie či prísady ovplyvňujúce dobu tuhnutia, spravidla používané pri striekanom drátkobetóne. Čo sa týka prímiesí, môžeme v drátkobetóne, so zámerom zlepšenia niektorých vlastností kompozitu, použiť ako prímiesi inertné (nezúčastňujúce sa hydratácie; napr. filer), tak aj prímiesi latentne hydraulické (so skrytou schopnosťou hydratácie, napr. popolček) [7] [8].

2.3.4 Kamenivo

V prípade výberu vhodného kameniva do drátkobetónu, určeného na konštrukčné účely, je nutné, aby kvalita a zloženie kameniva boli rovnaké ako pri konštrukčnom prostom betóne. Dôležitú úlohu tu hrá nakyprenie drátkobetónovej zmesi (ozn. ako nakyprenie o objem V_n v objemovej jednotke), ovplyvnené podielom hrubej frakcie kameniva, ktoré zabraňuje zhukovaniu ocelových vlákien pri spracovaní zmesi. Ponúka sa teda možnosť vylúčiť hrubú frakciu z drátkobetónovej zmesi. To má však za následok zvýšenie ceny a zníženie výslednej pevnosti danej zmesi [7] [9] [11].



Obrázok 3 Nakyprenie V_n (m^3) na $1 m^3$ zmesi kameniva (s maximálnym priemerom zrna d_{max}) a ocelových vlákien, pre betón s objemovým stupňom vystuženia μ (%); závislosť A: $d_{max} = 22$ mm, závislosť B: $d_{max} = 8$ mm, závislosť C: $d_{max} = 4$ mm, upravené podľa [7]

Bakalárska práca
Aspekty testovania a mechanické vlastnosti drátkobetónu

Tabuľka 1 Rozdelenie kameniva určeného do betónu [27]

znak	delenie	príklad
objemová hmotnosť	do 2000 kg·m ⁻³ ľahké kamenivo od 2000 do 3000 kg·m ⁻³ hutné kamenivo od 3000 kg·m ⁻³ ťažké kamenivo	keramzit, expandovaný perilit magnetit, baryt
pôvod vznik	prírodné, umelé, recyklované ťažné, drtené, ťažené predrtené	
veľkosť zŕn	pod 0,063 mm do 0,25 mm od 0 do 4 mm od 4 do 63 mm zmes kameniva	filer múčka, filer, prímes piesok (0/4) drť, štrk (4/8, 8/16, 32/63) štrkopiseok, štrkodrť (0/16, 0/32)
frakcia	úzka (D/d ≤ 2) široká (D/d ≥ 2)	2/4, 4/8, 8/16, 16/32 4/11, 8/32

2.3.5 Rozptýlená výstuž

Určenie typu, kvality, parametrov a dávkovania (v kg·m⁻³) ocelových vlákien vychádza na základne preukázaných skúšok navrhovanej triedy drátkobetónu. Medzi charakteristiky, na ktoré je nutné v tomto prípade brať ohľad sú: tvar drôtikov, pevnosť drôtikov, dávkovanie drôtikov, rozpojiteľnosť a v neposlednej rade aj balenie a cena drôtikov. Všeobecne by sa dalo zhrnúť, že vlákna vhodné do drátkobetónu by mali mať patričnú povrchovú úpravu a tvarovanie, vďaka ktorým sa zabezpečí ich súdržnosť s cementovou maticou a mali by byť vyrobené technológiou, ktorá zaručí priaznivý pomer pevnosť/cena s ohľadom na kladené požiadavky. Cenová kategória sa dá v konečnom dôsledku zmeniť úpravou dávkovania vlákien do drátkobetónovej zmesi [9].

2.4 Technológia výroby drátkobetónu

2.4.1 Príprava, miešanie a transport drátkobetónovej zmesi

Kvalitné technické vybavenie drátkobetónových výrobní, ktoré je spravidla komplikovanejšie, než vybavenie výrobní prostého betónu, je základným pilierom produkcie a použitia drátkobetónu v praxi. V tomto bode je nutné dbať na niekoľko dôležitých faktorov výroby: skladovacie priestory, mechanizmus na prepravu, dávkovanie, popr. oddeľovanie vlákien a jeho vkladanie do miešačky, modifikácia miešačky zabraňujúca tvorbe zhlukov vlákien, zariadenie na transport zmesi drátkobetónu do debnenia a zariadenie určené na efektívne zhutňovanie hotovej zmesi [7] [8] [9].

Bakalárska práca
Aspekty testovania a mechanické vlastnosti drátkobetónu

Druhou nepostrádateľnou súčasťou výroby drátkobetónu je príprava zmesi. V tejto fáze sa apeluje na maximálne dodržiavanie pokynov súvisiacich s návrhom zmesi, voľby výrobného zariadenia a voľby a dávkovania jednotlivých zložiek [9].

Po úspešnej príprave drátkobetónovej zmesi je nutné zabezpečiť adekvátny spôsob dopravy s ohľadom na náročnosť a dobu trasy, na množstvo a konzistenciu zmesi a metódu spracovania zmesi v konštrukcii [9].



Obrázok 4 Pridávanie ocelových vlákien do betónu [autor]



Obrázok 5 Hotová drátkobetónová zmes [autor]

2.4.2 Spracovanie drátkobetónovej zmesi

Základným spôsobom spracovania drátkobetónovej zmesi v konštrukcii je ukladanie a následne zhutnenie zmesi. Keďže drátkobetón vykazuje vďaka výskytu vlákien zvýšený obsah vzduchu je možné, že bude potrebné ukladať zmes v menších vrstvách za trvalého zhutňovania, ktoré sa pri drátkobetónových zmesiach spravidla zabezpečuje vibrovaním [7] [9].

Striekany drátkobetón je druhou možnosťou spracovania drátkobetónovej zmesi. Možnosti nástreku sú dve: mokrý a suchý proces. Výhody striekania drátkobetónu mokrou metódou oproti suchej metóde sú podložené radom výsledkov mnohých skúšok. Technológiou striekania drátkobetónu za mokra sa docieli vyššia homogenita zmesi a menší rozptyl požadovaných, fyzikálne mechanických vlastností [9].

2.5 Výrobcovia oceľových vlákien v ČR

V súčasnosti sa drátkobetón, jeho výhody a využitie v praxi, pomaly dostáva do povedomia širšej verejnosti. To ma za následok, že sa čím ďalej, tým viac firiem začína zaoberať či už výrobou drôťkov alebo samotnou produkciou drátkobetónu. Medzi najväčších výrobcov oceľových vlákien v ČR patrí napr. firma Master Builders Solutions, ktorá vyrába rôzne druhy vlákien (nielen do drátkobetónu) pod značkou MasterFiber, firma Bakaert, s 20 ročnou praxou na českom trhu, vyrábajúca oceľové vlákna pod značkou Dramix, či jeden z najväčších výrobcov oceli na svete – ArcelorMittal [8] [12] [13].

3 Druhy vlákien do betónu

Aktuálne existuje na trhu niekoľko druhov vlákien do betónu, z ktorých najpoužívanejšími sú vlákna oceľové, polymérové a sklenené. Použitie konkrétneho druhu vlákien závisí na konštrukčných požiadavkách [4].

V tab. 2 môžeme vidieť jednotlivé typy vlákien a ich vlastnosti:

Tabuľka 2 Typy vlákien a ich vlastnosti [4]

Typ vlákien	Pevnosť v ťahu [MPa]	Modul pružnosti [GPa]	Medzné pretiahnutie [%]	Merná hmotnosť [kg.m ⁻³]
akrylové	200 - 400	2,07	25-45	1100
azbestové	550-960	82-138	cca 0,6	3200
bavlnené	400-690	4,83	3-10	1500
sklenené	1000-3800	69	1,5-3,5	2500
polyesterové	720-860	8,28	11-13	1400
polyetylenové	cca 690	0,14-0,41	cca 10	950
polypropylenové	550-750	3,45	cca 25	900
minerálne	480-750	69-117	cca 0,6	2700
oceľové	270-2700	200	0,5-35	7800
nylónové	750-820	4,14	16-20	1100
celulózové	400-620	6,9	10-25	1500
uhlíkové	8,3	0,386	-	1630

3.1 Oceľové vlákna

Podľa použitého materiálu oceľové vlákna rozdeľujeme na 5 základných skupín:


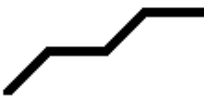
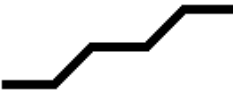
- **skupina I** – drôtky ťahané za studena
- **skupina II** – vlákna strihané z plechu
- **skupina III** – z taveniny oddeľované vlákna
- **skupina IV** – vlákna pretiahnuté zo za studena ťahaného drôtku
- **skupina V** – vlákna frézované z oceľových blokov [8]

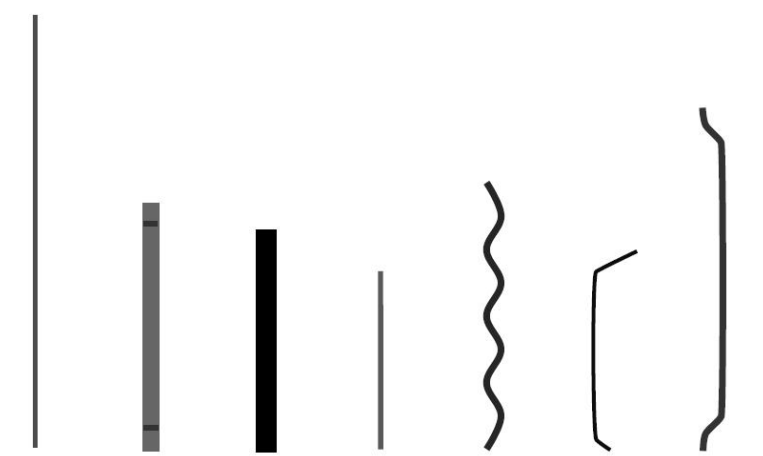
Bakalárska práca
Aspekty testovania a mechanické vlastnosti drátkobetónu

Podľa tvaru sa ďalej delia oceľové vlákna na:

- **priame** (s rozmermi 6 – 60 mm; s malým využitím)
- **tvarované**
 - zvlnené vlákna – char. dĺžka 30 – 60 mm
 - mikrovlákna – špecifické použitie v oblasti bezpečnostných trezorov
 - sploštené vlákna – hrúbka 0,15 – 0,41mm; šírka 0,25 – 1,14 mm
 - vlákna so zahnutými koncami (viď tab. 3) – v stavebníctve najpoužívanejšie [8]

Tabuľka 3 Tvarované oceľové vlákna so zahnutými koncami [8]

Typ vlákna	Schéma vlákna	Dĺžka [mm]	Pomer l/d [mm]	Pevnosť v ťahu [MPa]
s 1 koncovým ohybom		35 - 60	47 - 67	1100 - 2000
s 2 koncovými ohybmi		35 - 60	65 - 80	1450 - 1850
s 3 koncovými ohybmi		60	65	2300



Obrázok 6 Rôzne typy oceľových vlákien do drátkobetónu [14]

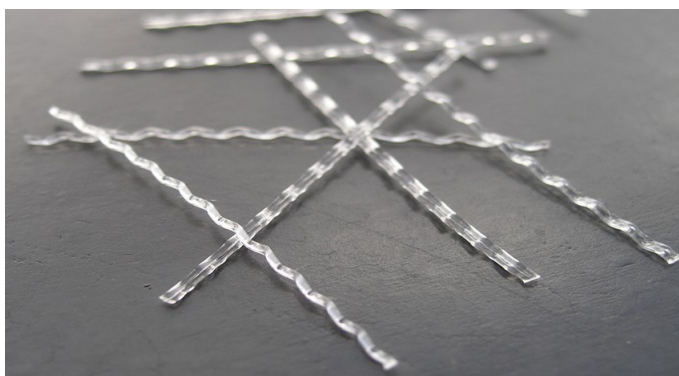
3.2 Polymérové vlákna

Polymérové vlákna sú vlákna na báze polymérových materiálov ako polypropylén (najpoužívanejší), polyetylén, polyakryl, polyester, nylon. PVA, aramid a ich zmesi. Polymérové vlákna musia vyhovovať požiadavkám normy ČSN EN 14889-2 Vlákna do betonu – Část 2: Polymerová vlákna – Definice, specifikace a shoda [1] [15].

Klasifikujeme ich do troch tried:

- **Trieda Ia** – Mikrovlákna s priemerom do 0,3 mm, jednovláknité
- **Trieda Ib** – Mikrovlákna s priemerom do 0,3 mm, vláknité
- **Trieda II** – Makrovlákna s priemerom od 0,3 mm [15]

Polymérové vlákna majú oproti ocelovým výhodu, že su nemagnetické, nepodliehajú korózií a alkalickému prostrediu a hodia sa do prostredia s vyšším rizikom požiaru. Okrem toho maju široké uplatnenie aj v iných druhoch betónu, napr. v prefabrikovanom a striekanom betóne [15].



Obrázok 7 Příklad polymérového vlákna do betónu [16]

3.3 Sklenené vlákna

Pre zvýšenie fyzikálno-mechanických vlastností betónu môžeme okrem spomínaných vlákien použiť aj vlákna sklenené. Tie majú v stavebnom priemysle rozsiahle využitie. Vlákna vyrábajú tzv. sekaním sklenených prameňov. Na prvý pohľad sú podobné polymérovým vláknam, avšak pevnosť v ťahu majú niekoľkonásobne väčšiu. Na sklenené vlákna sa, na rozdiel od iných, kladie dôraz na odolnosť voči silno alkalickému prostrediu (pH 12 – 14) [18].

Sklenené vlákna sa vyrábajú vo forme:

- **Priadze** – vzniká spriadaním vlákien
- **Nite** – zostavená z viacerých priadzí
- **Krátkych vlákien** – mleté vlákna dlhé 0,1 – 0,5 mm
- **Prameňa** – zložený z rovnobežne usporiadaných vlákien
- **Rohože** – vyrába sa sekaním nepravidelne uložených vlákien [17] [18]

Uplatnenie sklenených vlákien je výhodné najmä pri výrobe priemyselných podláh, letiskových plôch či samo-nivelačných podlahových stierok. Sklenené vlákna sa hodia taktiež do betónov, pri ktorých je požadovaná zvýšená rezistencia voči agresívnemu prostrediu [17] [18].

3.4 Iné druhy vlákien

- **Azbestové vlákna** – prvé vlákna používané ako rozptýlená výstuž do betónov. Vďaka ich vysokej pevnosti, modulu pružnosti a odolnosti voči vysokým teplotám sa používali od polovice minulého storočia až približne do konca storočia, kedy bolo zakázané azbest používať vďaka jeho zisteným karcinogénnym účinkom [19].
- **Celulóзовé vlákna** – prírodné vlákna, vyrábané chemicko-fyzikálnou syntézou vlákien z niekoľkých rastlinných druhov. Betóny vystužené celulóзовými vláknami disponujú zvýšenou príľnavosťou čerstvého kompozitu k podkladu, vysokou pevnosťou a modulom pružnosti. Jednou zo zaujímavých vlastností, ktorou disponujú celulóзовé vlákna, je schopnosť viazať vodu pri miešaní betónovej zmesi a uvoľňovať ju pri jej tvrdnutí, čím vzniká samo-ošetrovací účinok, zabraňujúci tvorbe trhlin v začiatkovej fáze tvrdnutia [20].
- **Karbónové vlákna** – vysokopevnostné pramene vlákien na báze uhlíka s priemerom niekoľko mikrometrov s výbornými fyzikálno-mechanickými vlastnosťami. Uhlíkové vlákna sú zdraviu nezávadné, odolné voči kyselinám a zásadám, nehorľavé a odolné voči extrémnym teplotám. Vďaka ich vysokej pevnosti v ťahu za ohybu, vysokému modulu pružnosti, únavovej odolnosti a faktu, že odolávajú plastickej deformácii, sa jedná o jedny z najkvalitnejších

Bakalárska práca

Aspekty testovania a mechanické vlastnosti drátkobetónu

vlákien, avšak vzhľadom na ich podstatne vyššiu cenu sa v stavebníctve ako rozptýlená výstuž do betónov nevyužívajú [17].

- **Kevlarové (aramidové) vlákna** – vlákna s pevnosťou a tuhosťou podobnou vláknam uhlíkovým [17].

4 Vybrané skúšobné metódy drátkobetónu

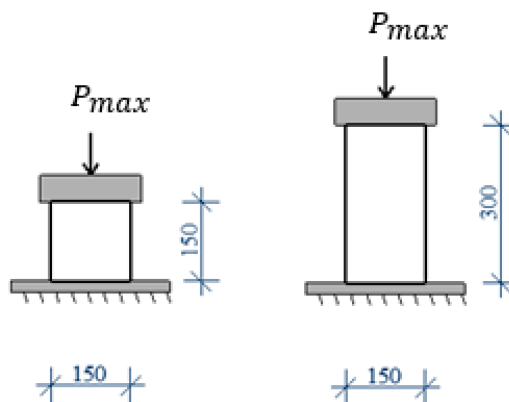
4.1 Pevnostné skúšky drátkobetónu

Pri drátkobetóne sa, podľa smernice pre drákobetónové konštrukcie, kladie dôraz na súčasné preukazovanie ako pevnosti v tlaku tak aj pevnosti v ťahu, príp. doplnené o stanovenie rovnocennej pevnosti v ťahu za ohybu po vzniku trhlín. S ohľadom na to, že prírastok kockovej pevnosti v tlaku, pevnosti v priečnom ťahu a rovnocennej pevnosti v ťahu ovplyvnenej výskytom drôtikov v drátkobetónovom zložení nie je totožný (pevnosť v ťahu sa oproti kockovej zmení zreteľnejšie), nemôžeme klasifikovať drátkobetón iba na základe kockovej pevnosti v tlaku [7].

4.1.1 Pevnosť v tlaku

Skúška pevnosti v tlaku je jednou zo základných pevnostných skúšok, ktorá sa na drátkobetóne vykonáva obdobne ako na betóne prostom. Pevnosť v tlaku určujeme na skúšobnom telese v tvare kocky, s rozmermi 150 x 150 x 150 mm, a na valcovom skúšobnom telese s výškou 300 mm a priemerom 150 mm, príp. na jadrových vývrtoch odobratých z konštrukcie, v minimálnom počte troch skúšobných vzoriek. Neodporúča sa používať telesá s menšími rozmermi (napr. kocky s dĺžkou hrany 100 mm), pretože je daný kompozit pomerne nepriaznivo ovplyvnený usporiadaním dlhých, oceľových vlákien. V tomto prípade je nutné, aby dĺžka hrany kocky bola minimálne dvojnásobná oproti dĺžke použitých vlákien [7] [21].

Vzorky vložíme kolmo v smere plnenia drátkobetónu medzi doštičky lisu a centricky zaťažujeme až do porušenia vzorku. (vid' obr. 8)



Obrázok 8 Meranie kockovej a valcovej pevnosti v tlaku [5]

Z nameraných hodnôt určíme pevnosť v tlaku podľa vzorca:

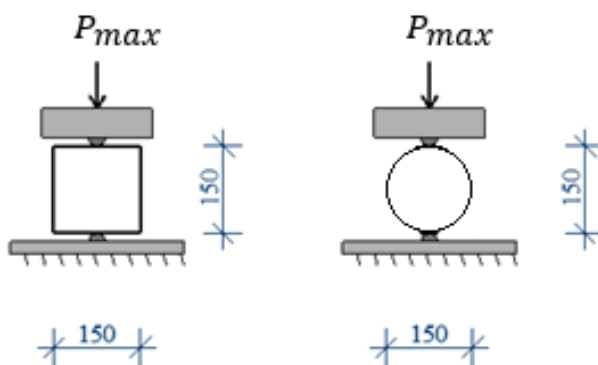
$$f_{c,cube} = \frac{P_{max}}{a^2} \quad \text{pre vzorku kocky} \quad (1)$$

$$f_{c,cyl} = \frac{P_{max}}{\frac{\pi \cdot d^2}{4}} \quad \text{pre vzorku valca} \quad (2)$$

4.1.2 Pevnosť v priečnom ťahu

Na rozdiel od prostého betónu, je skúška pevnosti v priečnom ťahu pri drátkobetóne dôležitou skúškou, nakoľko sa jedná o kompozit so zlepšenou schopnosťou odolávať pôsobeniu ťahového napätia. Skúška pevnosti v priečnom ťahu sa vykonáva na vzorkách v tvare kocky a valca, ktoré sa umiestnia do skúšobného lisu na meranie pevnosti v tlaku kolmo v smere plnenia danej zmesi. V hornej a dolnej časti sú potom umiestnené roznášacie pásy po celej dĺžke vzorky, ktoré prenášajú zaťaženie na vzorky. V takto zaťažovanej vzorke nastane priečne napätie v ťahu a dochádza k porušeniu vplyvom ťahovej sily, kolmej na vyvolané tlakové napätie [9] [22].

Schému zaťažovania možno vidieť na obr. 9.

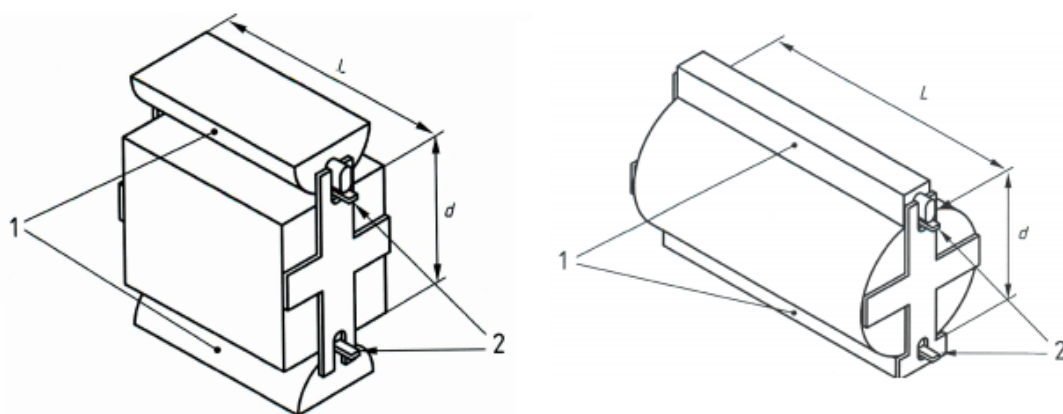


Obrázok 9 Meranie pevnosti v priečnom ťahu na vzorke kocky [5]

Z nameraných hodnôt dostaneme pevnosť v priečnom ťahu podľa vzorca:

$$f_{ct} = \frac{2 \cdot P_{max}}{\pi \cdot a^2} \quad \text{pre vzorku kocky} \quad (3)$$

$$f_{ct,sp} = \frac{2 \cdot P_{max}}{\pi \cdot l \cdot d} \quad \text{pre vzorku valca} \quad (4)$$



Legenda

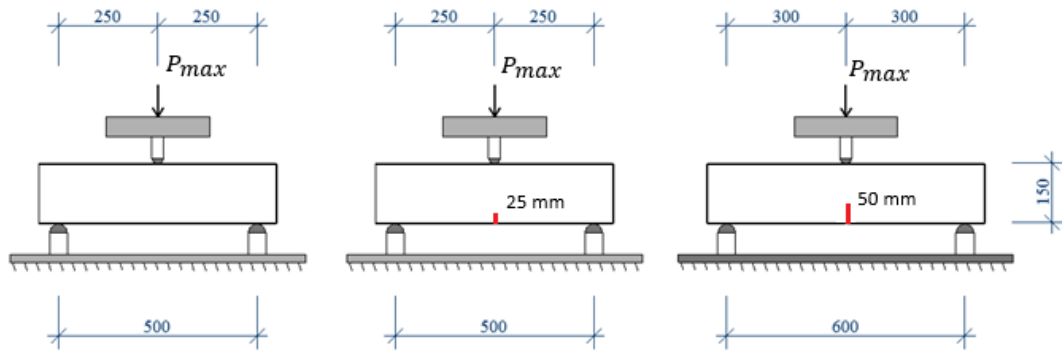
- 1 Ocelový zatěžovací trámeček
- 2 Roznášecí proužek z dřevovláknité desky
- L Délka zkušebního tělesa
- d Průměr zkušebního tělesa

Obrázok 10 Detail zaťaženia vzorky kocky a valca pri meraní pevnosti v priečnom ťahu [22]

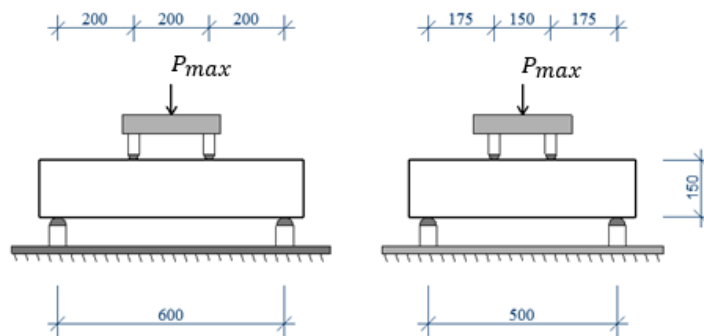
4.1.3 Pevnosť v ťahu za ohybu

Skúška pevnosti v ťahu za ohybu spočíva vo vystavení skúšobného drátkobetónového trámca ohybovému momentu pomocou horných zaťažovacích a dolných podporných valčekov. Existujú 2 spôsoby zaťažovania: trojbodová a štvorbodová ohybová skúška. Jednotlivé metódy sa líšia počtom a umiestnením valčekov a hĺbkou zárezu na spodnej strane skúšobného trámca. Hlavným rozdielom, ktorým sa trojbodová a štvorbodová metóda líšia je, že pri štvorbodovom usporiadaní sa skúšobný trámec poruší v strednej tretine medzi oboma silami vyvolanými hornými zaťažovacími valčekmi. Táto varianta je oproti trojbodovej ohybovej skúške spoľahlivejšia, pretože vieme pomerne presne určiť oslabené miesto na skúšobnom trávci. Jednotlivé metódy sú vyobrazené na obr. 11 a 12 [5] [23].

Bakalárska práca
Aspekty testovania a mechanické vlastnosti drátkobetónu



Obrázok 11 Trojbodová ohybová skúška [5]



Obrázok 12 Štvorbodová ohybová skúška [5]

Z nameraných hodnôt dostaneme pevnosť v ťahu za ohybu podľa vzorca:

$$f_{ct,ft,3B} = \frac{3 \cdot P_{max} \cdot L}{2 \cdot b \cdot (h - a_0)^2} \quad \text{v prípade trojbodového usporiadania} \quad (5)$$

$$f_{ct,ft,4B} = \frac{P_{max} \cdot L}{b \cdot h^2} \quad \text{v prípade štvorbodového usporiadania} \quad (6)$$

4.2 Odolnosť betónu voči mrazu a CHRL

V rámci testovania odolnosti betónu voči CHRL sa povrch betónových vzoriek ponorí do 3 % roztoku NaCl a vystaví sa zmrazovaciemu cyklu, čím vytvoríme prostredie podobné tomu, v ktorom sa by mala daná betónová konštrukcia nachádzať [24].

V Českej republike sa pri zisťovaní odolnosti voči CHRL používajú metódy A a C. Pri metóde A sa vzorka ponorí do misky 3 % roztoku NaCl do hĺbky 5 mm a vystaví sa cyklickému zmrazovaniu a rozmrazovaniu. V prvom cykle sa vzorka schladí na $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ a v tejto teplote pretrvá 15 min. Následne sa ohreje na $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a taktiež sa udržiava pri tejto teplote 15 min. Kompletný proces má 100 cyklov. Po každých 25 cykloch vzorky s miskou

Bakalárska práca
Aspekty testovania a mechanické vlastnosti drátkobetónu

vyberieme a prúdom vody opláchneme odpadnuté častice z povrchu vzorky do misky, následne odpadnuté častice vysušíme a odvážeme s presnosťou 0,1 g a určíme hmotnosť odpadnutých častíc vzhľadom na povrch skúšobného telesa v $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$. Jednotlivé hmotnostné úbytky spočítame a určíme celkové množstvo odpadu za predpísaný počet cyklov. Výsledok sa zapisuje v tvare dvoch čísel oddelených pomlčkou, kde prvé číslo predstavuje hodnotu odpadu v $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ a druhé číslo počet cyklov, za ktorý bola táto hodnota dosiahnutá (napr. 250,5 – 100 uvádza hmotnostný úbytok 250,5 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ dosiahnutý za 100 cyklov). Na podobnom princípe zisťujeme odolnosť betónu voči CHRL pomocou metódy C. Rozdiel spočíva v teplotách zmrazovania (pri metóde C je to $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$) a ohrievania (pri metóde C $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$). Kompletný proces trvá 75 cyklov [24] [25].



Obrázok 13 Mraziak určený na skúšku odolnosti voči mrazu a CHRL [autor]

4.3 Hĺbka priesaku tlakovou vodou

Význam merania hĺbky priesaku tlakovou vodou je podstatný najmä pre vodohospodárske stavby a predstavuje vlastne to, do akej miery je skúšaný betón vodotesný. Pri meraní hĺbky priesaku tlakovou vodou betónové vzorky ukladáme do špeciálneho skúšobného zariadenia v smere kolmom na smer plnenia pod vodným tlakom (500 ± 50) kPa po dobu (72 ± 2) hodín. V priebehu skúšky sa povrch skúšobných telies, ktorý nie je vystavený tlaku vody, pravidelne kontroluje a v prípade, že sa na týchto miestach objaví priesak, je nutné tento fakt brať do úvahy pri vyhodnocovaní výsledkov skúšky. Je taktiež nutné, aby vzorky pred zahájením skúšky mali najmenej 28 dní. Po uplynutí skúšobnej doby

Bakalárska práca
Aspekty testovania a mechanické vlastnosti drátkobetónu

sa vzorky zo zariadenia vyberú a plocha, na ktorú pôsobil vodný tlak sa utrie od prebytočnej vody. Následne sa vzorky rozdelia na polovicu kolmo k ploche vystavenej vodnému tlaku a odmeria sa hĺbka priesaku vody do vzorky v milimetroch [26].



Obrázok 14 Zariadenie určené na skúšku hĺbky priesaku tlakovou vodou [autor]

5 Výsledky praktickej časti

V praktickej časti som sa zaoberal radou pevnostných a trvanlivostných skúšok betónu vystuženého oceľovými vláknami MasterFiber 482 s dávkovaním 60 kg/m^3 a 90 kg/m^3 a porovnávaním zistených vlastností s referenčnou zmesou z prostého betónu. Všetky skúšky prebiehali v priestoroch laboratória Fakulty stavebnej, Vysokej školy báňskej – Technickej univerzity v Ostrave.

Druh betónu:

- Jemnozrnný betón s vyššou konečnou pevnosťou, odolný voči mrazu a posypovým soliam, certifikovaný pre styk s pitnou vodou a kamenivom frakcie do 4 mm. Betón je určený pre bežné a konštrukčné účely. [31]

Technické údaje oceľových vlákien MasterFiber:

- Materiál: oceľ potiahnutá mosadzou
- Prevedenie: monofilné
- Priemer vlákna: 0,20 mm (0,18 – 0,22 mm)
- Dĺžka vlákna: 13 mm (11,6 – 14,4 mm)
- Pomer dĺžka/priemer: 65
- Konečná pevnosť v ťahu: $\geq 2200 \text{ MPa}$
- Absorpcia vody: nízka
- Odolnosť voči zásadám: vysoká [29]



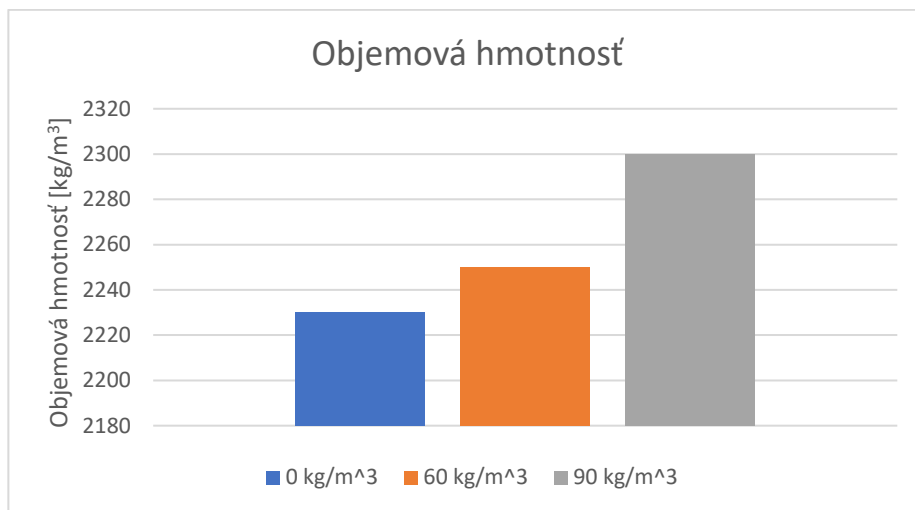
Obrázok 15 Oceľové vlákna MasterFiber 482 [autor]

Bakalárska práca
Aspekty testovania a mechanické vlastnosti drátkobetónu

Pre začatím pevnostných skúšok bola stanovená, pre každé dávkovanie zo 6 vzoriek, objemová hmotnosť. Výsledky priemerných hodnôt pre každý typ dávkovania môžeme vidieť v tab. 4 a na obr. 16, z ktorých jasne vyplýva, že s nárastom podielu drôtikov v betónovej zmesi stúpa aj jeho objemová hmotnosť. Variačné koeficienty nám prezrádzajú, že priemerné hodnoty objemových hmotností sú typickými hodnotami súborov dát.

Tabuľka 4 Objemové hmotnosti zmesi z prostého betónu a drátkobetónu [autor]

Séria	Dávkovanie [kg/m ³]	Priemerná objemová hmotnosť [kg/m ³]	Smerodajná odchýlka [kg/m ³]	Variačný koeficient [%]
1	0	2230	15,66	0,7
2	60	2250	53,91	2,4
3	90	2300	52,33	2,0



Obrázok 16 Stĺpcový graf objemovej hmotnosti zmesi z prostého betónu a drátkobetónu [autor]

Pre nedeštruktívne overenie mechanických vlastností prostého betónu a drátkobetónu sa využila taktiež ultrazvuková impulzívna metóda, pomocou ktorej sa pred pevnostnými skúškami vykonalo meranie šírenia ultrazvukového vlnenia. Rozdiel pre namerané hodnoty však bol nejednoznačný, kedy rozdiely medzi výsledkami referenčnej betónovej zmesi a drátkobetónu nešlo kvalitatívne jednoznačne stanoviť.

5.1 Modul pružnosti

Statický modul pružnosti bol stanovený len pre referenčnú betónovú zmes na valcoch o priemere 150 mm a nominálnej výške 300 mm. Skúška bola prevedená 28 dní po príprave zmesi na troch vzorkách v hydraulickom lise, kedy výsledná priemerná hodnota statického modulu dosahovala hodnotu 30,8 GPa. V tomto bode sa tiež vykonalo meranie pomocou ultrazvukovej impulzívnej metódy s porovnávacími drátkobetónovými vzorkami, kedy rozdiel medzi referenčnou betónovou zmesou a drátkobetónom nebolo možné kvalitatívne jednoznačne stanoviť.

5.2 Pevnosť v tlaku

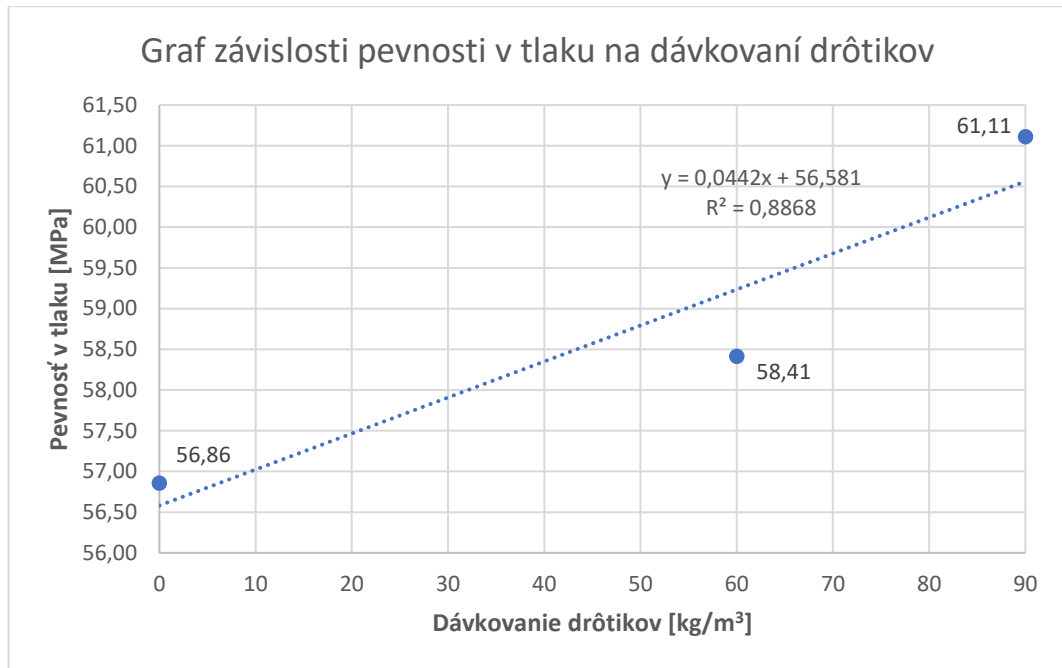
Pevnosť v tlaku bola stanovená na kockách s rozmermi 150 x 150 x 150 mm. Skúška bola prevedená 28 dní po príprave zmesi v hydraulickom lise (vid'. obr. 17) na 9 vzorkách (3 vzorky pre každý typ dávkovania). Z hodnôt uvedených v tab. 5 je jasné, že najväčšiu pevnosť v tlaku, 61,11 MPa, dosahovala séria drátkobetónu s dávkovaním 90 kg/m³. Podľa variačných koeficientov jednotlivých zmesí môžeme aritmetické priemery pevností v tlaku považovať za reprezentatívne hodnoty.

Tabuľka 5 Priemerné pevnosti v tlaku zmesí z prostého betónu a drátkobetónu [autor]

Séria	Dávkovanie [kg/m ³]	Priemerná pevnosť v tlaku [MPa]	Smerodajná odchýlka [MPa]	Variačný koeficient [%]
1	0	56,86	0,16	2,4
2	60	58,41	0,08	2,8
3	90	61,11	0,36	4,0



Obrázok 17 Skúška pevnosti v tlaku drátkobetónovej kocky v hydraulickom lise [autor]



Obrázok 18 Graf závislosti pevnosti v tlaku na dávkovaní drôtikov [autor]

Na obr. 18 je znázornený graf závislosti pevnosti v tlaku na dávkovaní drôtikov. Podľa koeficientu determinácie $R^2 = 88,68\%$ z regresnej analýzy vyplýva, že pevnosť v tlaku je relatívne závislá na dávkovaní drôtikov v zmesi, avšak pre presnejšie výsledky by bolo nutné porovnať hodnoty niekoľko ďalších drátkobetónových zmesí s rôznymi dávkovaniami drôtikov.

Funkcia závislosti pevnosti v tlaku na dávkovaní drôtikov má tvar:

$$y = 0,0442x + 56,581 \quad (7)$$

kde: y je pevnosť v tlaku [MPa]

x je dávkovanie drôtikov [kg/m³]

5.3 Pevnosť v priečnom ťahu

Pevnosť v priečnom ťahu bola obdobne ako pevnosť v tlaku stanovená po dobe 28 dní od prípravy zmesi v skúšobnom lise (vid' obr. 19) na vzorkách 9 kociek (3 kocky pre každý typ dávkovania) s rozmermi 150 x 150 x 150 mm. Namerané priemerné hodnoty pevností v ťahu sú zobrazené v tab. 6. Z variačných koeficientov vyplýva, že tieto hodnoty môžeme považovať za charakteristické hodnoty dátového súboru.

Bakalárska práca
Aspekty testovania a mechanické vlastnosti drátkobetónu

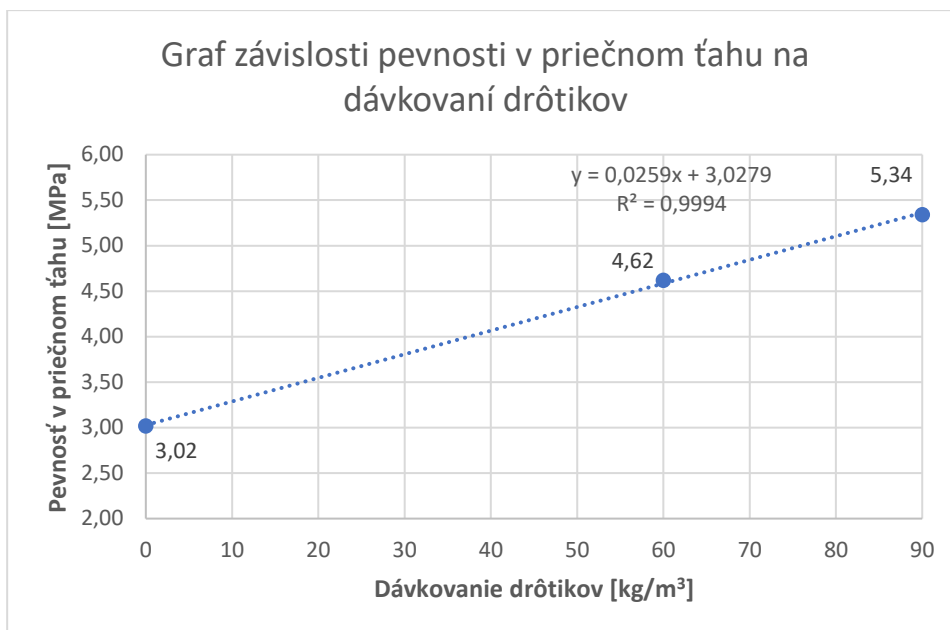


Obrázok 19 Vzorka drátkobetónu po skúške pevnosti v priečnom ťahu [autor]

Tabuľka 6 Priemerné pevnosti v priečnom ťahu zmesí z prostého betónu a drátkobetónu [autor]

Séria	Dávkovanie [kg/m ³]	Priemerná pevnosť v priečnom ťahu [MPa]	Smerodajná odchýlka [MPa]	Variačný koeficient [%]
1	0	3,02	0,16	5,4
2	60	4,62	0,08	1,8
3	90	5,34	0,36	7,0

Graf závislosti pevnosti v priečnom ťahu na dávkovaní drôtkov, zobrazený na obr. 20 jasne dokazuje, že s narastajúcim obsahom drôtkov v betónovej zmesi priamo úmerne stúpa jeho pevnosť v priečnom ťahu. Najvyššie hodnoty pevnosti v priečnom ťahu dosahovala séria s dávkovaním drôtkov 90 kg/m³ a to konkrétne 5,43 MPa. Podľa koeficientu determinácie $R^2 = 99,94 \%$ navyše vyplýva že závislosť medzi pevnosťou v priečnom ťahu a dávkovaním drôtkov je takmer priama, z čoho možno usudzovať, že oceľové vlákna plnia svoju úlohu výborne.



Obrázok 20 Graf závislosti pevnosti v priečnom ťahu na dávkovaní drôťkov [autor]

Funkcia závislosti pevnosti v priečnom ťahu na dávkovaní drôťkov má tvar:

$$y = 0,0259x + 3,0279 \quad (8)$$

kde: y je pevnosť v priečnom ťahu [MPa]

x je dávkovanie drôťkov [kg/m³]

5.4 Pevnosť v ťahu za ohybu

Pevnosť v ťahu za ohybu bola prevedená na 3 vzorkách drátkobetónu s dávkovaním drôťkov 60 kg/m³, 28 dní po dozretí zmesi. Skúšané boli nosníky s rozmermi 150 x 150 x 600 mm, s rozpätím 500 mm, metódou trojbodovej ohybovej skúšky so zárezom 25 mm v strede nosníkov (viď obr. 21). Výsledné pevnosti v ťahu za ohybu jednotlivých nosníkov sú zobrazené v tab. 7. Priemerná pevnosť v ťahu za ohybu dosahovala 5,3 MPa a variačný koeficient s hodnotou 8,8 % uvádza, že táto hodnota reprezentuje daný súbor dát.

Tabuľka 7 Priemerné pevnosti v ťahu za ohybu zmesi z prostého betónu a drátkobetónu [autor]

Séria	Vzorka	Dávkovanie [kg/m ³]	Pevnosť v ťahu za ohybu [MPa]	Smerodajná odchýlka [MPa]	Variačný koeficient [%]
2	1	60	5,95	0,47	8,8
	2		4,87		
	3		5,07		

Bakalárska práca
Aspekty testovania a mechanické vlastnosti drátkobetónu

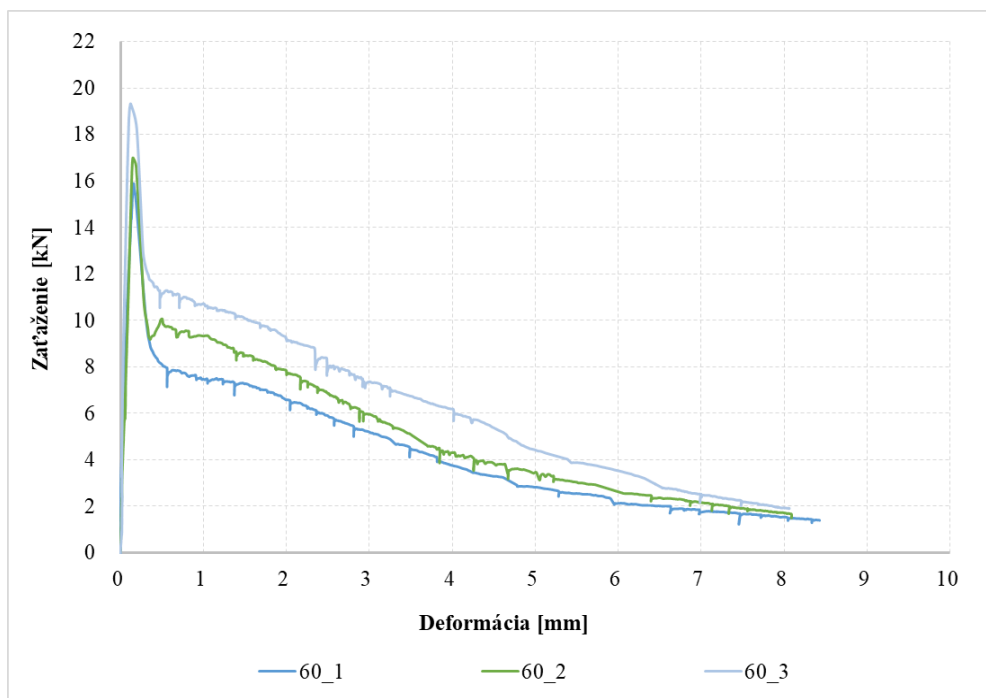


Obrázok 21 Trojbodová ohybová skúška drátkobetónového trámca s viditeľným zárezom 25 mm v strede trámca [autor]



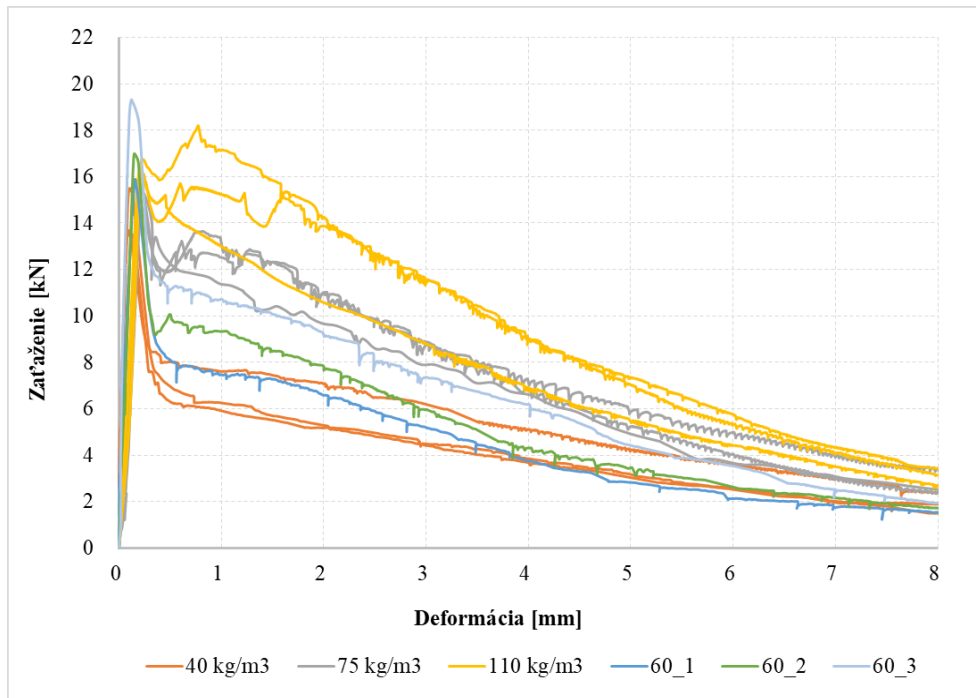
Obrázok 22 Trhlina po trojbodovej ohybovej skúške drátkobetónového trámca [autor]

Na nasledujúcom obrázku je spracovaný diagram odolnosti pre drátkobetón s dávkovaním drôtikov 60 kg/m^3 , ktorý bol následne porovnaný s dávkovaním drôtikov z predchádzajúceho experimentu (viď obr. 23 a 24). Pre overenie vplyvu konfigurácie ohybovej skúšky sa taktiež vykonali štvorbodové ohybové skúšky prostého betónu, kedy výsledný rozdiel v pevnosti v ťahu bol do 15 %.



Obrázok 23 Zaťažovací diagram odolnosti drátkobetónových nosníkov s dávkovaním drôtikov 60 kg/m^3 [autor]

Bakalárska práca
Aspekty testovania a mechanické vlastnosti drátkobetónu

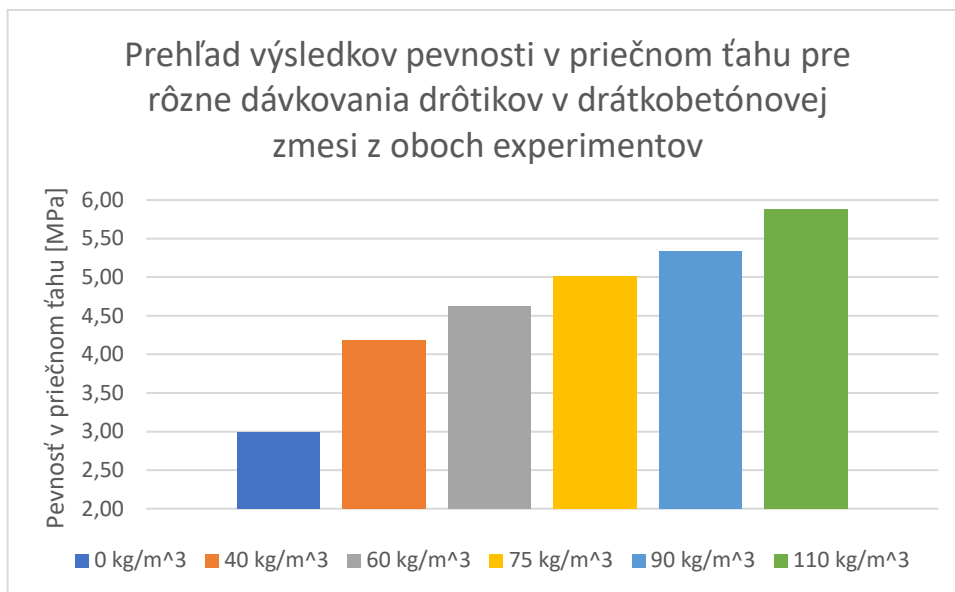


Obrázok 24 Zaťažovací diagram odolnosti porovnávajúci drátkobetónové nosníky s dávkovaním drôtikov 40, 60, 75 a 110 kg/m³, upravené podľa [30]

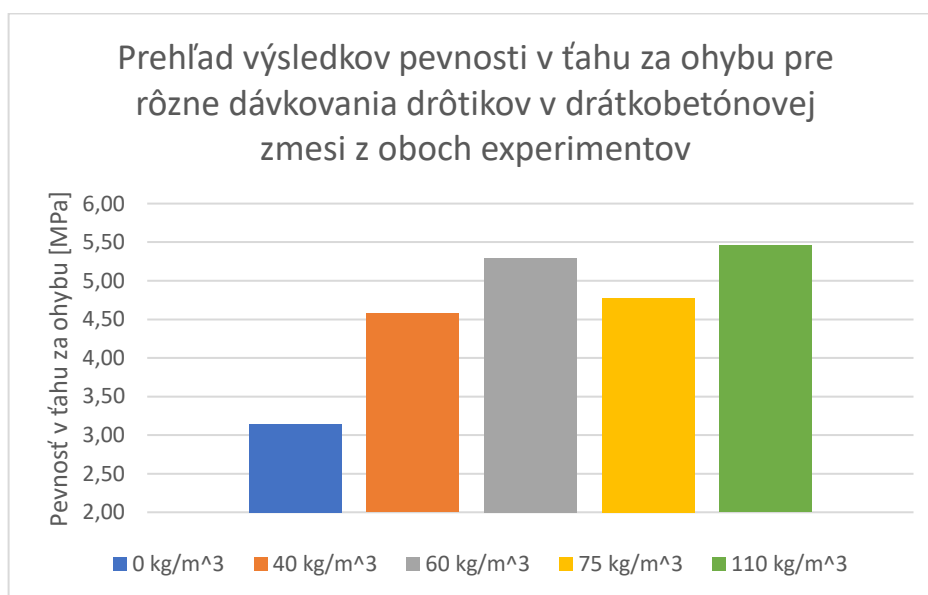
Z pracovného diagramu odolnosti drátkobetónových nosníkov pre rôzne typy dávkovania drôtikov vyplýva, že najvyššiu hodnotu zaťaženia pri porušení dosahoval drátkobetónový nosník s dávkovaním drôtikov 60 kg/m³, avšak v priemere najlepšie výsledky dosahovala drátkobetónová zmes s dávkovaním drôtikov 110 kg/m³, ktorá po vzniku makrotrhlín, spomedzi všetkých testovaných drátkobetónových zmesí, najlepšie odolávala reziduálnemu ťahovému zaťaženiu.

Bakalárska práca
Aspekty testovania a mechanické vlastnosti drátkobetónu

Prehľad výsledkov oboch experimentov je zhrnutý v stĺpcových grafoch na obr. 25 a 26.



Obrázok 25 Prehľad výsledkov pevností v priečnom ťahu pre rôzne dávkovania drôtikov v drátkobetónovej zmesi z oboch experimentov [autor], hodnoty doplnené z [30]



Obrázok 26 Prehľad výsledkov pevností v ťahu za ohybu pre rôzne dávkovania drôtikov v drátkobetónovej zmesi z oboch experimentov [autor], hodnoty doplnené z [30]

Z horeuvedených grafov vyplýva nasledujúce:

1. Pevnosť v priečnom ťahu drátkobetónových vzoriek narastá so stúpajúcim objemom oceľových vlákien MasterFiber 482 až do dávkovania 110 kg/m^3 . Dávkovanie drôtikov nad 110 kg/m^3 nebolo súčasťou experimentov. Dá sa však, podľa stúpajúceho trendu odhadnúť, že pevnosť v priečnom ťahu bude so zvyšujúcim sa podielom drôtikov v drátkobetónovej zmesi naďalej do určitého bodu stúpať.
2. Pevnosť v ťahu za ohybu drátkobetónových vzoriek narastá so stúpajúcim objemom oceľových vlákien MasterFiber 482 do dávkovania 60 kg/m^3 . Pevnosť v ťahu za ohybu má pre zmesi s dávkovaním drôtikov od 60 kg/m^3 kolísajúci charakter. V pomere odolnosť/cena sa javí práve dávkovanie 60 kg/m^3 drôtikov v drátkobetónových zmesiach určených do konštrukčných prvkov zaťažovaných na ohyb ako najpriaznivejšie. Drátkobetónová zmes s dávkovaním drôtikov 90 kg/m^3 nebola skúšaná na pevnosť v ťahu za ohybu.

5.5 Skúšky železobetónových nosníkov bez šmykovej výstuže

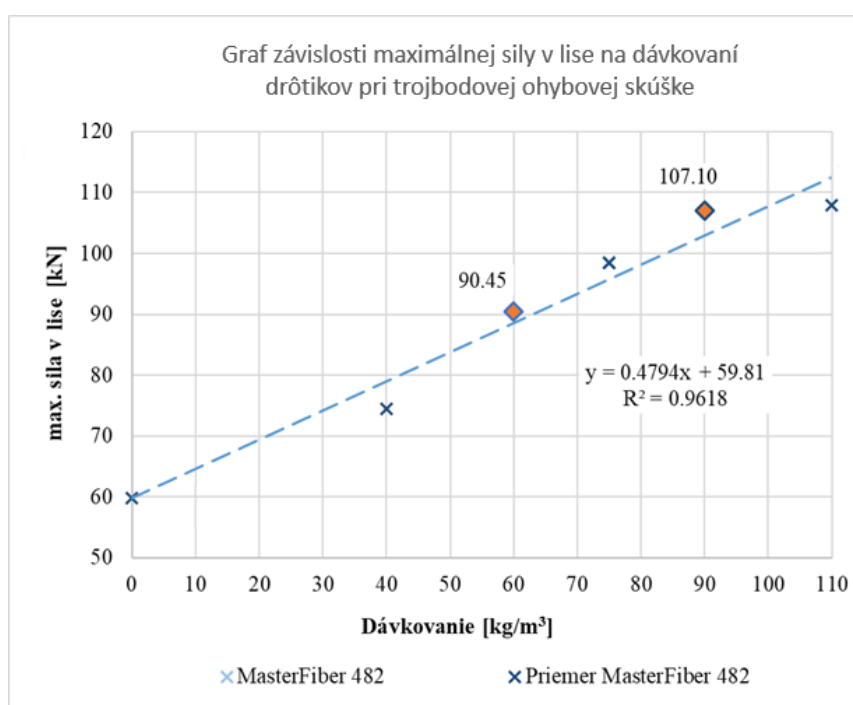
S prihliadnutím na výsledky experimentálneho programu pre drátkobetón [32], kde bolo prevedené ucelené zrovnanie vplyvu konfigurácie trojbodovej a štvorbodovej ohybovej skúšky drátkobetónu, bola vykonaná modifikácia skúšok na skúšky malých konštrukčných nosníkov a železobetónových nosníkov bez šmykovej výstuže, kedy charakter priebehu vnútorných síl, presnejšie ohybových momentov, mal v stredovej časti podobný charakter a umožňuje tak prípadnú bližšiu identifikáciu a popis mechanizmu porušenia (tlak, ťah, šmyk).

Prvou dodatočnou skúškou v tejto kapitole bola ohybová skúška drátkobetónových trámecov s rozmermi $150 \times 150 \times 700 \text{ mm}$ (s rozpätím 600 mm) s betonárskou výstužou B500B s priemerom 10 mm a v počte kusov 2 pri spodnom povrchu v každom trámci, s krytím danej výstuže 20 mm (viď obr. 27), ktorá skúmala závislosť maximálnej dosiahnutej sily v lise na dávkovaní drôtikov. Skúšané boli 2 trámce (1 pre sériu s dávkovaním 60 kg/m^3 a 1 pre sériu s dávkovaním 90 kg/m^3). Výsledky boli následne porovnané s hodnotami z predošlého experimentu [30] a pomohli doplniť celkový obraz horeuvedenej závislosti. (viď. obr. 28)

Bakalárska práca
Aspekty testovania a mechanické vlastnosti drátkobetónu



Obrázok 27 Vzorka porušeného drátkobetónového trámca s betonárskou výstužou s rozmermi 150 x 150 x 700 mm po trojbodovej ohybovej skúške; na fotke viditeľná šmyková trhlinka [autor]



Obrázok 28 Graf závislosti maximálnej sily v lise na dávkovaní drôtikov pri trojbodovej ohybovej skúške, prevzaté a doplnené z [30]

Maximálna sila pri skúšaní trámca s dávkovaním 60 kg/m³ nadobúdala hodnotu 90,45 kN a pri trámci s dávkovaním 90 kg/m³ 107,1 kN. Podľa determináčného koeficientu $R^2 = 96,18 \%$ môžeme predpokladať veľmi vysokú závislosť maximálnej sily na dávkovaní drôtikov MasterFiber 482.

Bakalárska práca
Aspekty testovania a mechanické vlastnosti drátkobetónu

Funkcia závislosti dosiahnutej maximálnej sily v lise na dávkovaní drôťkov pri trojbodovej ohybovej skúške ma nasledovný tvar:

$$y = 0,4794 + 59,81x \quad (9)$$

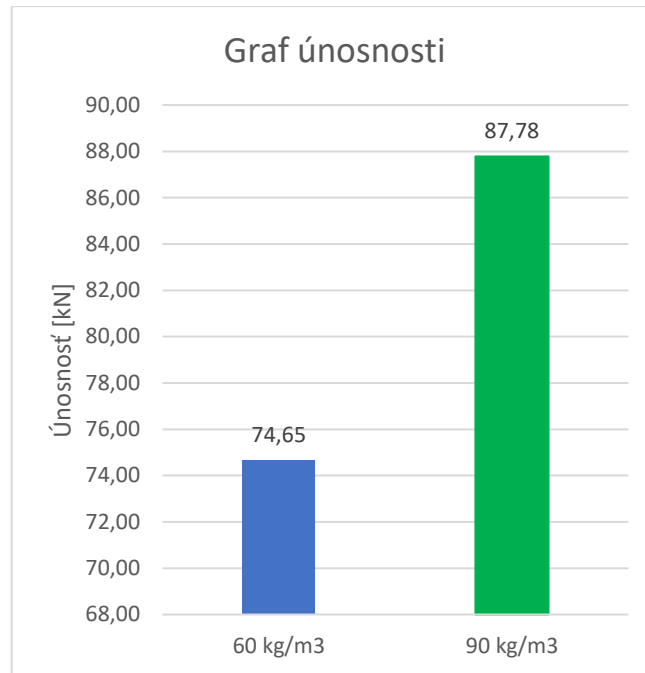
kde: y je maximálna sila v lise [MPa]

x je dávkovanie drôťkov [kg/m^3]

Druhou dodatkovou skúškou bola ohybová skúška drátkobetónových trámecov s rozmermi 190 x 100 x 1150 mm (s výškou 190 mm) a rozpätím 900 mm, rovnako ako v prvej doplnkovej úlohe, s betonárskou výstužou B500B s priemerom 10 mm a v počte kusov 2 pri spodnom povrchu v každom trámci, s krytím danej výstuže 20 mm (viď obr. 29). Taktiež boli skúšané 2 trámce (1 pre sériu s dávkovaním $60 \text{ kg}/\text{m}^3$ a 1 pre sériu s dávkovaním $90 \text{ kg}/\text{m}^3$). Táto skúška sledovala vplyv dávkovania drôťkov na únosnosť trámecov. Výsledok uvádza stĺpcový graf na obr. 30.



*Obrázok 29 Porušený trámec s rozmermi 190 x 100 x 1150 mm s betonárskou výstužou a dávkovaním drôťkov $60 \text{ kg}/\text{m}^3$ po trojbodovej ohybovej skúške s viditeľnou šmykovou trhlinou
[autor]*



Obrázok 30 Graf únosnosti drátkobetónových trémcov s rozmermi 190 x 110 x 1150 mm s betonárskou výstužou a dávkovaním drôtikov 60 kg/m³ a 90 kg/m³ [autor]

Výsledky z grafu na obr. 30 udávajú únosnosť drátkobetónového trémca s betonárskou výstužou a s dávkovaním drôtikov 90 kg/m³ o približne 13 kN väčšiu než u trémca s dávkovaním 60 kg/m³, čo predstavuje nárast únosnosti o približne 17,5 %.

Z výsledkov oboch dodatkových skúšok pevnosti v ťahu za ohybu môžeme vyvodit' záver, že prítomnosť ocel'ových vláknien v železobetónovom konštrukčnom prvku priaznivo prispieva k jeho odolnosti voči ohybovému zaťaženiu.

5.6 Odolnosť voči mrazu a CHRL

Skúška odolnosti voči mrazu a CHRL bola prevedená ako na vzorkách prostého betónu, tak aj na vzorkách drátkobetónu s ocel'ovými vláknami MasterFiber 482 s dávkovaním drôtikov 90 kg/m³. Meranie prebiehalo na 6 kockách (3 kockách z drátkobetónu a 3 kockách z prostého betónu), s rozmermi 150 x 150 x 150 mm, podľa vybranej skúšobnej metódy A. Vzorky boli namáhané cyklickým zmrazovaním a rozmrazovaním pri pôsobení roztoku NaCl po dobu 200 cyklov.

Bakalárska práca
Aspekty testovania a mechanické vlastnosti drátkobetónu



Obrázok 31 Vzorky prostého betónu (horný rad) a drátkobetónu (spodný rad) po skúške odolnosti voči mrazu a CHRL [autor]

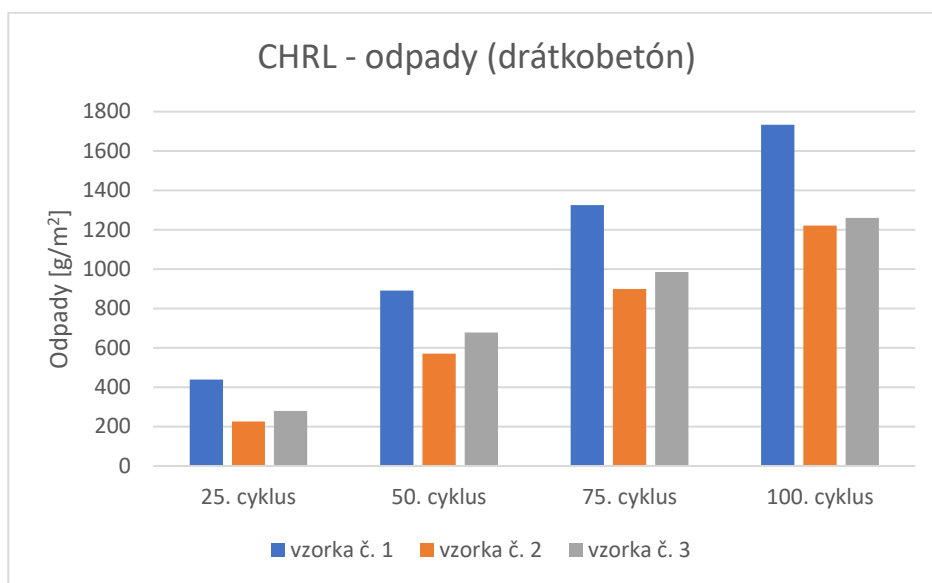
V tab. 8 je zobrazený súčet odpadov jednotlivých vzoriek za daný cyklus v gramoch. Podľa metódy A boli výsledky vyhodnocované po 100. cykle, ktorého hodnoty sú v tabuľke farebne vyznačené. Pre zaujímavosť sú v tabuľke ďalej uvedené odpady po 150 a 200 cykloch.

Tabuľka 8 Súčet odpadov jednotlivých vzoriek v gramoch [autor]

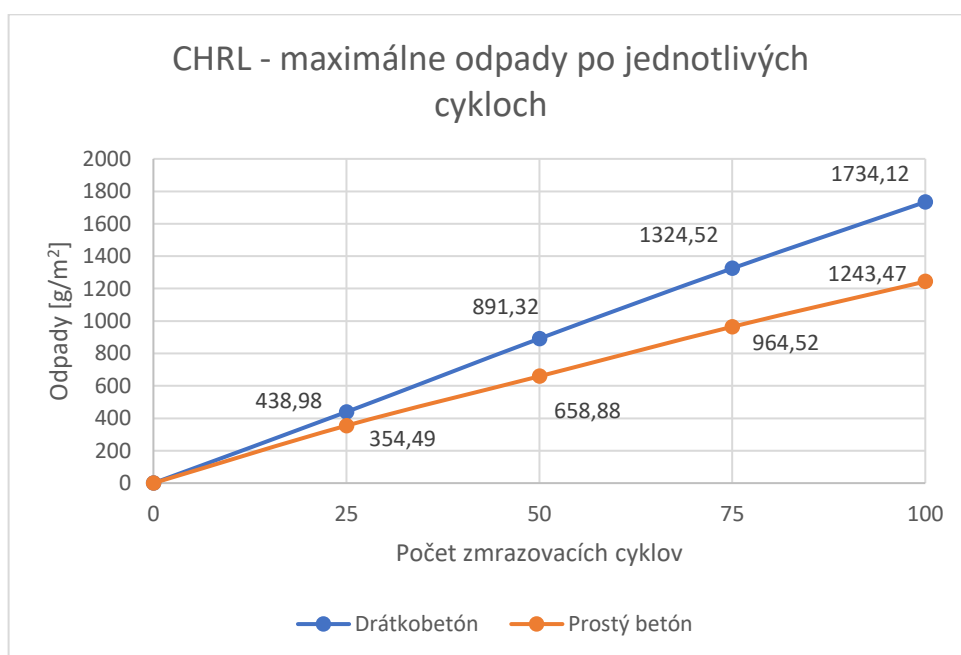
Druh vzorky	Číslo vzorky	Cyklus					
		25.	50.	75.	100.	150.	200.
Drátkobetón	1	9,86	20,02	29,75	38,95	52,36	76,60
	2	5,12	12,91	20,32	27,59	38,82	59,22
	3	6,27	15,17	22,03	28,19	38,16	58,54
Prostý betón	4	7,94	14,75	18,79	23,25	31,49	41,62
	5	6,55	14,81	21,68	27,95	40,34	63,73
	6	6,16	11,16	15,65	20,63	29,20	46,19

Bakalárska práca
Aspekty testovania a mechanické vlastnosti drátkobetónu

Na základe zistených výsledkov boli spracované nasledujúce grafy:



Obrázok 32 Graf hmotnostného úbytku drátkobetónu po 25., 50., 75. a 100. cykle [autor]



Obrázok 33 Graf maximálnych hmotnostných úbytkov drátkobetónu a prostého betónu po jednotlivých cykloch [autor]

Z horeuvedených grafov jednoznačne vyplýva, že odolnosť drátkobetónu voči mrazu a CHRL je menšia než u prostého betónu. Priemerná hodnota odpadov drátkobetónových vzoriek po 100 cykloch dosahovala 31,58 g, vzorky z prostého betónu mali priemernú hodnotu odpadu 23,94 g. Maximálny hmotnostný úbytok drátkobetónových vzoriek po 100

Bakalárska práca
Aspekty testovania a mechanické vlastnosti drátkobetónu

cykloch nadobúdala hodnotu 1734,12 g/m² a maximálny hmotnostný úbytok vzoriek z prostého betónu 1243,47 g/m².

Tabuľka 9 Priemer, smerodajná odchýlka a variačný koeficient hmotnostných úbytkov drátkobetónovej zmesi po jednotlivých cykloch [autor]

Druh vzorky	Jav	Cyklus					
		25.	50.	75.	100.	150.	200.
Drátkobetón	Priemerný hmotnostný úbytok [g/m ²]	315,34	713,74	1069,74	1405,38	1918,72	2883,28
	Smerodajná odchýlka [g/m ²]	90,14	132,93	183,51	233,00	291,67	372,70
	Variačný koeficient [%]	28,58	18,62	17,15	16,58	15,20	12,93

Variačné koeficienty z tabuľky 9 ukazujú, že rozptyl hmotnostných úbytkov drátkobetónových vzoriek bol po prvých cykloch väčší, čo mohlo byť zapríčinené nerovnosťou strán, ktorou boli vzorky v skúšobných miskách s roztokom NaCl ponorené. Po hlbšom postupe chloridov do drátkobetónových vzoriek sa rozptyl hmotnostných úbytkov začal pomaly znižovať, čo poskytlo relevantnejšie výsledky na zhodnotenie.

Zatriedenie na základe výsledných hmotnostných úbytkov, podľa normy ČSN EN 206-1: Beton - Část 1: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda, bude zrealizované spolu s výsledkami zo skúšok hĺbky priesaku tlakovou vodou v nadchádzajúcej kapitole [27].

5.7 Hĺbka priesaku tlakovou vodou

Hĺbka priesaku tlakovou vodou bola testovaná na 3 kockových vzorkách z prostého betónu a 3 drátkobetónových kockových vzorkách s dávkovaním drôtkov 90 kg/m³ a s hranou dĺžky 150 mm. Tabuľka 10 zobrazuje hodnoty priesaku tlakovou vodou jednotlivých vzoriek a ich priemer.

Bakalárska práca
Aspekty testovania a mechanické vlastnosti drátkobetónu

Tabuľka 10 Hĺbka priesaku tlakovou vodou v mm [autor]

Hĺbka priesaku	Drátkobetón	Prostý betón
Maximálna	7,03	6,80
	13,80	7,27
	6,88	5,73
Priemerná	9,24	6,60

Z nameraných hĺbok priesaku tlakovou vodou vyplýva, že prítomnosť drôtikov v betónovej zmesi nepriaznivo prispieva na jeho vodotesnosť, čo môže mať za následok zníženie jeho trvanlivosti. Na obrázku 34 možno vidieť meranie hĺbky priesaku tlakovou vodou na drátkobetónovej vzorke. Hĺbka priesaku, zobrazená na obr. 35 dosahovala lokálne na tejto vzorke vyššiu hodnotu a to 13,8 mm, čo bolo zapríčinené zhukom drôtikov v blízkosti povrchu vzorky (viď. na obr. 35 vyznačená oblasť).



Obrázok 34 Meranie hĺbky priesaku na drátkobetónovej vzorke [autor]



Obrázok 35 Maximálna hĺbka priesaku na drátkobetónovej vzorke v oblasti so zvýšenou koncentráciou drôtikov [autor]

Bakalárska práca
Aspekty testovania a mechanické vlastnosti drátkobetónu

Na základe výsledkov hodnôt zo skúšky odolnosti voči mrazu a CHRL a výsledkov z merania hĺbky priesaku tlakovou vodou môžeme podľa normy ČSN EN 206-1: Beton - Část 1: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda vyvodit' nasledovný záver:

1. Vďaka vysokým hmotnostným úbytkom, ako po 75 tak aj po 100 cykloch, nemohli byť drátkobetónové vzorky, spolu s hodnotou hĺbky priesaku tlakovou vodou, zatriedené do kategórie vplyvu prostredia podľa príslušnej metódy A. Pre kvalitatívne zatriedenie je nutné za prvé, pripraviť väčšie množstvo vzoriek a za druhé, dbať na zvýšenú pozornosť pri ich príprave, nakoľko dôkladné spracovanie kvalitných vzoriek pri drátkobetóne je náročnejšie oproti príprave vzoriek z prostého betónu, čo značne ovplyvňuje výsledné hodnoty odpadov. Maximálna hĺbka priesaku tlakovou vodou na týchto vzorkách je 13,8 mm, čo danú zmes, bez uváženia výsledkov z CHRL, zaraďuje do kategórie XA3, silne agresívneho chemického prostredia.
2. Priemerný hmotnostný úbytok vzoriek z prostého betónu bol taktiež po 100 cykloch väčší, ale na základe maximálneho hmotnostného úbytku 964,52 g/m² po 75 cykloch a maximálnej hĺbky priesaku tlakovou vodou 7,27 mm môžeme referenčnú betónovú zmes zaradiť do kategórie stupňa prostredia XF2, ktorá predstavuje prostredie s mierne nasýtenou vodou s rozmrazovacími prostriedkami. S prihliadnutím len na výsledky z merania hĺbky priesaku tlakovou vodou však môžeme referenčnú betónovú zmes zaradiť do kategórie vplyvu prostredia XA3.

5.8 Doplnkové skúšky

5.8.1 Objemové zmeny

Sledovanie objemových zmien prebiehalo v dvoch fázach. V prvej fáze od 16.12.2020 do 13.1.2021 boli zaznamenávané objemové zmeny prostého betónu. V druhej fáze od 3.3.2021 do 31.3.2021 boli zaznamenávané objemové zmeny drátkobetónovej zmesi s použitím oceľových vlákien MasterFiber 482 s dávkovaním 90 kg/m³.

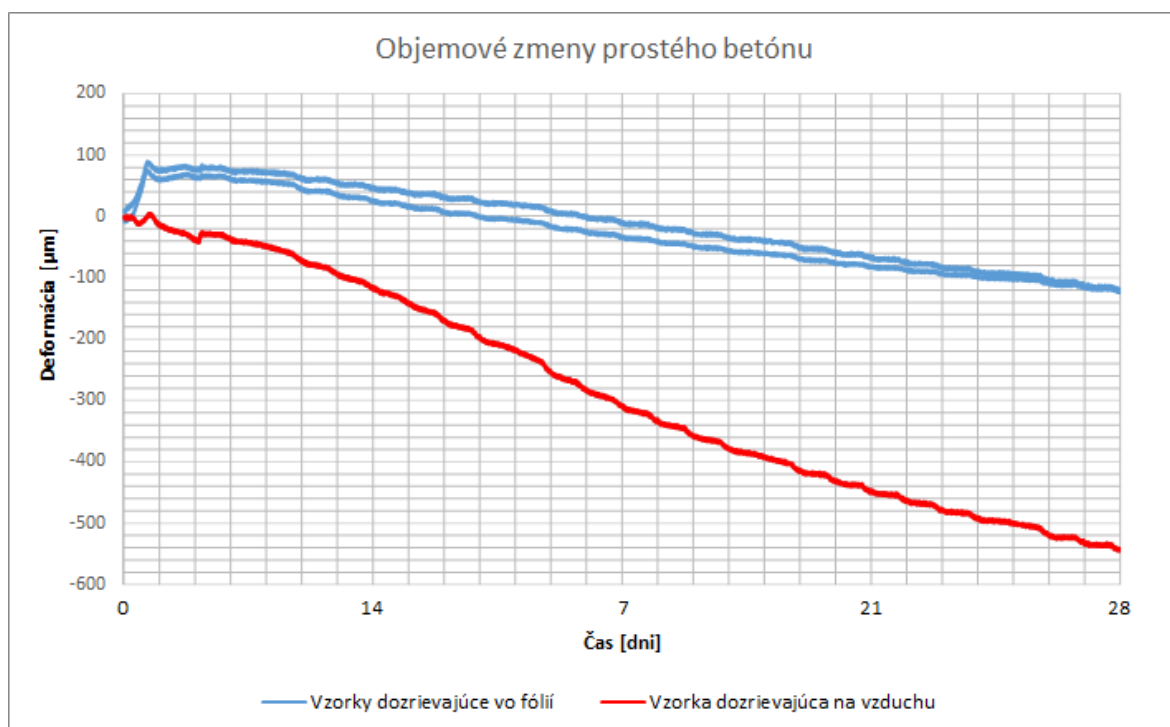
V oboch prípadoch boli objemové zmeny pozorované na 3 zmesiach v meracích žľaboch s rozmermi 60 x 100 x 1000 mm (kde výška je 60 mm) po dobu 28 dní, pričom zmesí v dvoch žľaboch boli po celý čas zrenia zabalené v ochrannej fólii a zmes v jednom žľabe dozrievala na vzduchu. (viď obr. 36)

Bakalárska práca
Aspekty testovania a mechanické vlastnosti drátkobetónu

Predmetom tejto skúšky bolo analyzovanie vplyvu drôtikov na deformácie spôsobené zmršťovaním a rozpínaním objemu.

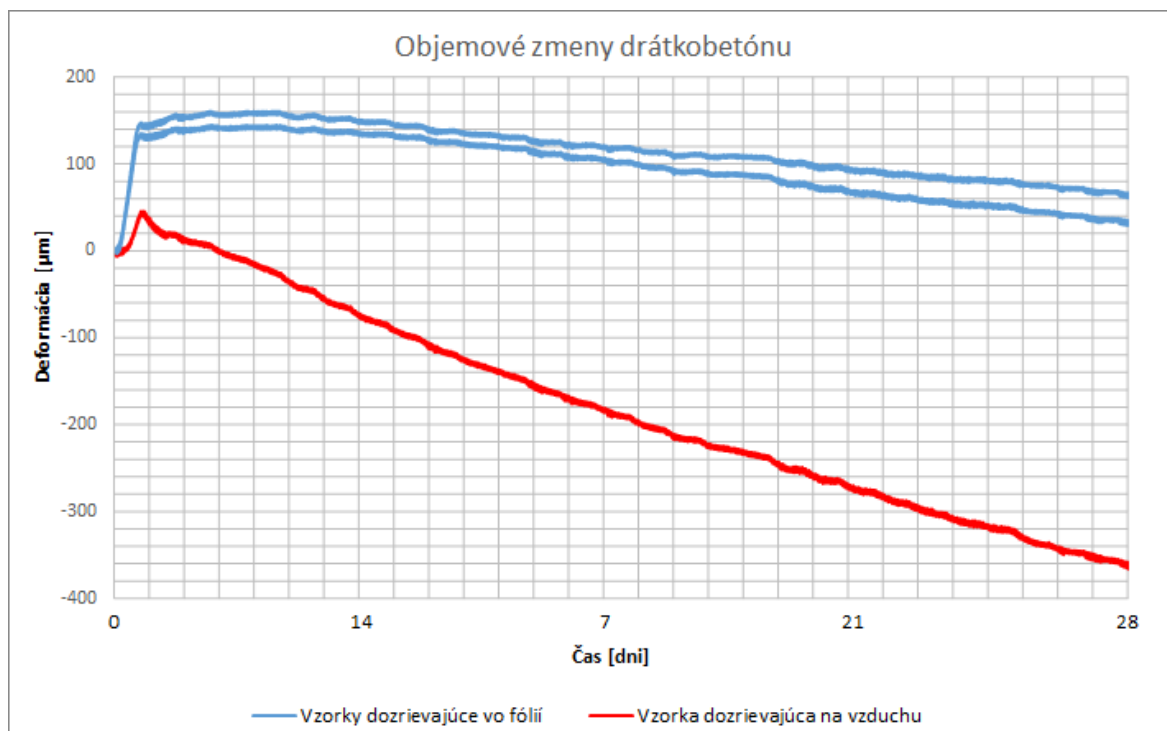


Obrázok 36 Skúšobné zariadenie behom merania objemových zmien v meracích žľaboch



Obrázok 37 Objemové zmeny prostého betónu v čase [autor]

Bakalárska práca
Aspekty testovania a mechanické vlastnosti drátkobetónu



Obrázok 38 Objemové zmeny drátkobetónu v čase [autor]

Z grafov jasne vyplýva, že u oboch zmesí ochranná fólia značne obmedzila objemové zmeny. V žľaboch, v ktorých bol povrch pozorovaných zmesí zakrytý fóliou, dochádzalo v počiatočnej fáze k výraznejšiemu rozpínaniu, než u zmesí nezakrytých fóliou. Rozpínanie drátkobetónových zmesí bolo v rannom štádiu takmer dvojnásobne väčšie než pri prostom betóne. Po dobe 28 dní však objemové zmeny prostého betónu vykazovali väčšie zmeny oproti drátkobetónu. Pri prostom betóne, po dobe 28 dní, došlo k zmršteniu oproti pôvodnému stavu, naopak pri drátkobetóne, k expanzii objemu oproti pôvodnému stavu.

Zmesí v žľaboch, ktoré dozrievali na vzduchu v oboch prípadoch dosahovali menší nárast rozpínania v prvých dňoch, avšak na konci skúšobnej doby boli hodnoty zmršťovania neporovnateľne väčšie oproti zmesiam v žľaboch opatrených na povrchu ochrannou fóliou. Drátkobetónová vzorka dosahovala menšie hodnoty zmrštenia oproti vzorke z prostého betónu.

V tab. 11 sú vyhodnotené konečné objemové zmeny oboch zmesí.

Tabuľka 11 Objemové zmeny drátkobetónu a prostého betónu [autor]

Druh zmesi	Drátkobetón			Prostý betón		
Prekrytie fóliou	ÁNO	ÁNO	NIE	ÁNO	ÁNO	NIE
Číslo vzorky	1	2	3	1	2	3
Objemová zmena [μm]	62	30	-365	-122	-120	-543

Bakalárska práca
Aspekty testovania a mechanické vlastnosti drátkobetónu

Vyhodnotenie výsledkov z tabuľky 11 (kde záporne hodnoty predstavujú zmršťovanie a kladné hodnoty rozpínanie objemu) dokazuje, že prítomnosť drôtikov v betónovej zmesi kladne vplýva na jeho objemové zmeny. Objemové zmeny drátkobetónu vo všetkých prípadoch dosahovali menšie rozdiely oproti pôvodnému stavu, než u betónu prostého. Najvyššie zmrštenie pri drátkobetóne malo 365 μm , pri prostom betóne 543 μm . Z tabuľky je taktiež jasné, že vzorky oboch zmesí prekryté fóliou dosahovali celkovo menšie hodnoty objemových zmien. Ošetrovanie daných kompozitov v dobe zrenia je teda dôležitou úlohou, ktorá signifikantne prispieva k zníženiu ich objemových zmien.

5.8.2 Pevnostné charakteristiky vybraných druhov drátkobetónov

V tejto kapitole sú pre zaujímavosť porovnané pevnosti v tlaku a pevnosti v priečnom ťahu piatich druhov drátkobetónov a referenčnej betónovej zmesi. Skúšobnými vzorkami boli kocky s hranou dĺžky 150 mm. Každá séria obsahovala 3 vzorky pre skúšku pevnosti v tlaku (referenčná betónová zmes obsahovala 6 vzoriek) a 3 vzorky pre skúšku pevnosti v priečnom ťahu. Je nutné uviesť, že betonáž všetkých vzoriek neprebíhala v rovnaký deň. Betonáž drátkobetónu s drôtikmi MasterFiber 482 prebiehala v marci 2021, ostatných zmesí v decembri 2020.

V tab. 12 sú zobrazené výsledné hodnoty pevností.

Tabuľka 12 Pevnosť v tlaku a v priečnom ťahu vybraných kompozitov [autor]

Séria	Dávkovanie [kg/m ³]	Počet vzoriek	Pevnosť v tlaku [MPa]	Pevnosť v ťahu [MPa]
Z0	0	3 na pevnosť v tlaku (6 u prostého betónu), 3 na pevnosť v priečnom ťahu	47,46	2,82
Z1	50		55,60	4,35
Z2			52,06	4,16
Z3			49,39	4,49
Z4			53,18	5,15
Z5			52,46	3,70

kde: Z0 – prostý betón (vlastnosti vid' kapitola 5, str. 30)

Z1 – drátkobetón, drôtičky Tabix 1/45, dávkovanie 50 kg/m³

Z2 – drátkobetón, drôtičky Dramix 3D 65/35 BG, dávkovanie 50 kg/m³

Z3 – drátkobetón, drôtičky Dramix 3D 45/35 BL, dávkovanie 50 kg/m³

Bakalárska práca
Aspekty testovania a mechanické vlastnosti drátkobetónu

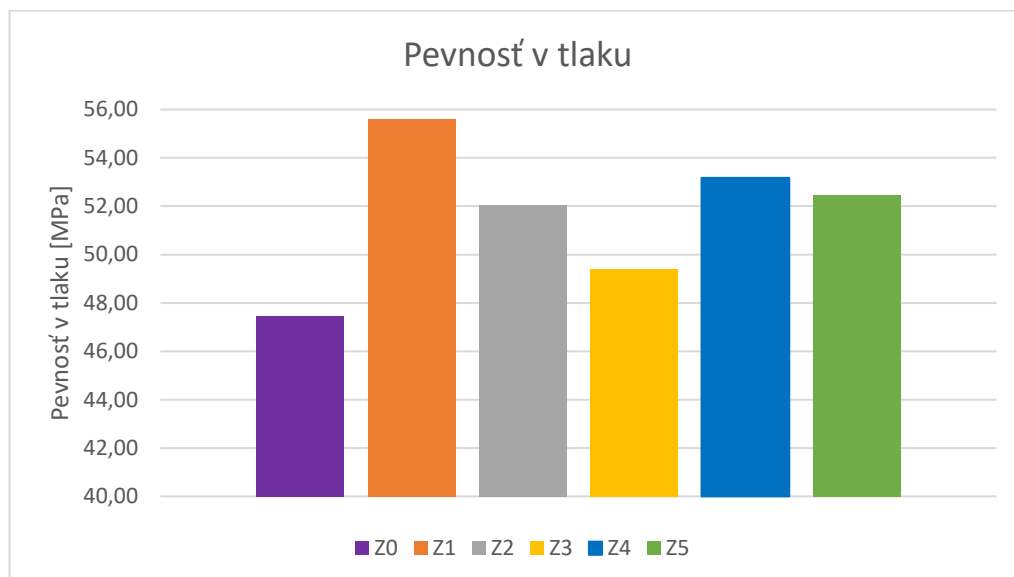
Z4 – drátkobetón, drôtky Dramix 3D 65/60 BG, dávkovanie 50 kg/m³

Z5 – drátkobetón, drôtky MasterFiber 482, dávkovanie 50 kg/m³



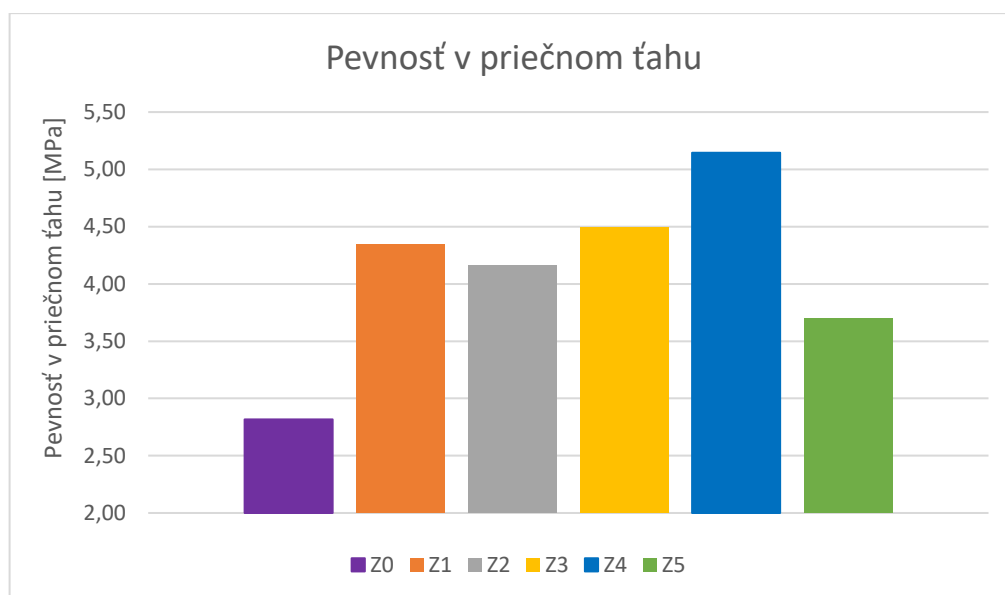
Obrázok 39 Použité ocelové vlákna (zľava doprava) – Dramix 3D 65/60 BG, Dramix 3D 65/35 GG, Dramix 3D 45/35 BL, Tabix 1/45, MasterFiber 482 [autor]

Porovnanie pevností v tlaku a pevností v ťahu vybraných kompozitov je uvedené na obr. 40 a 41.



Obrázok 40 Graf pevností v tlaku vybraných kompozitov

Bakalárska práca
Aspekty testovania a mechanické vlastnosti drátkobetónu



Obrázok 41 Graf pevností v priečnom ťahu vybraných kompozitov

Z horeuvedených grafov vyplýva, že najväčšie pevnosti v tlaku dosahoval drátkobetón s drôtikmi Tabix 1/45. Najväčšie pevnosti v ťahu naopak vykazoval drátkobetón s drôtikmi Dramix 3D 65/60 BG. Tento drátkobetón mal navyše druhé najväčšie pevnosti v tlaku, z čoho môžeme usudzovať, že sa z pomedzí všetkých testovaných drátkobetónových zmesí jedná o ten najuniverzálnejší. Najhoršími výsledkami pevnosti v tlaku (odhladnuc od zmesi z prostého betónu) disponoval drátkobetón s drôtikmi Dramix 3D 45/35 BL, v pevnosti v priečnom ťahu drátkobetón s drôtikmi MasterFiber 482, ktorý bol hlavným predmetom predošlých kapitol.

6 Záver

Náplňou teoretickej časti bakalárskej práce, ďalej len BP, bolo zoznámenie so základnými informáciami drátkobetónu ako jeho história, charakteristické vlastnosti, požiadavky na zložky a vybrané skúšobné metódy. Okrem toho boli okrajovo spomenuté rôzne typy vlákien používaných vo vláknobetónoch.

Praktická časť BP bola zameraná na stanovenie mechanických vlastností drátkobetónu, pričom pozorovaným javom bol vplyv dávkovania drôtikov na tieto vlastnosti. Okrem toho bola na porovnanie testovaná aj referenčná betónová zmes. Pevnostné skúšky obsahovali, okrem vzoriek z prostého betónu, drátkobetón s dvojakým dávkovaním ocel'ových vlákien MasterFiber 482 a to 60 kg/m^3 a 90 kg/m^3 . Z výsledkov pevností v tlaku môžeme tvrdiť, že so stúpajúcim podielom drôtikov v drátkobetónovej zmesi do istej miery stúpa aj jeho pevnosť v tlaku. S ohľadom na primárne použitie ocel'ových vlákien v betónoch sú relevantnejšími výsledky zo skúšok pevnosti v priečnom ťahu a v ťahu za ohybu. Namerané hodnoty pevností v priečnom ťahu jasne dokazujú takmer priamu závislosť na dávkovaní drôtikov v zmesi. Čo sa týka pevností v ťahu za ohybu, výsledky boli ďalej porovnávané s výsledkami predchádzajúceho experimentu [30], pre vytvorenie celkového obrazu závislosti danej pevnostnej charakteristiky na dávkovaní drôtikov. Najvhodnejším dávkovaním drôtikov v drátkobetónových konštrukčných prvkoch, primárne zaťažovaných na ohyb, sa javí dávkovanie 110 kg/m^3 , avšak s miernym poklesom za ním nasleduje dávkovanie 60 kg/m^3 , čo by mohlo hrať dôležitú úlohu pri finančnej stránke veci. Drátkobetónová zmes s dávkovaním drôtikov 90 kg/m^3 nebola súčasťou skúšok pevností v ťahu za ohybu. Súčasťou spomenutej skúšky boli aj dve dodatkové skúšky. Prvá pozorovala závislosť maximálnej vyvodenej sily v lise na dávkovaní drôtikov drátkobetónovej zmesi pri trojbodovej ohybovej skúške a následné porovnanie výsledkov s predchádzajúcim experimentom. Výsledky prezrádzajú, že existuje priama závislosť maximálnej vyvodenej sily v lise na dávkovaní drôtikov pri trojbodovej ohybovej skúške. Druhou dodatkovou skúškou bolo porovnanie únosnosti drátkobetónových trámčov s dávkovaním 60 a 90 kg/m^3 , opatrených betonárskou výstužou. Na základe výsledkov môžeme tvrdiť, že zvýšením obsahu ocel'ových vlákien zo 60 na 90 kg/m^3 v drátkobetónovej zmesi s výstužou sa jeho únosnosť zväčší približne o 17,5 %. Okrem spomenutých pevnostných skúšok praktická časť BP obsahovala aj skúšky trvanlivostné, ktorej súčasťou boli skúška odolnosti voči mrazu a CHRL a meranie hĺbky priesaku tlakovou vodou. Výsledky z oboch skúšok boli vyhodnocované spolu, podľa príslušnej normy a zatriedujú

Bakalárska práca
Aspekty testovania a mechanické vlastnosti drátkobetónu

danú referenčnú betónovú zmes do kategórie vplyvu prostredia XF2, s prihliadnutím len na výsledky merania hĺbky priesaku tlakovou vodou do kategórie XA3. Drátkobetónová zmes bola vzhľadom na nepriaznivé výsledky z odolnosti voči mrazu a CHRL zatriedená, len na základe maximálnej hĺbky priesaku tlakovou vodou, do kategórie vplyvu prostredia XA3. Doplnkovými skúškami praktickej časti BP boli pozorovanie objemových zmien drátkobetónovej zmesi a referenčnej betónovej zmesi a porovnanie niektorých pevnostných vlastností vybraných piatich druhov drátkobetónu.

V prípade dávkovania oceľových vlákien nad 90 kg/m^3 je nutné si uvedomiť, že sa výrazne zhoršuje spracovateľnosť betónovej zmesi. Je dôležité veľmi starostlivo sledovať taktiež rovnomerné rozmiestnenie drôtikov. Pri vzorkách môže nastať aj problematickejšie prevedenie povrchovej úpravy, ktorá súvisí a ovplyvňuje do značnej miery výsledky skúšky odolnosti voči mrazu a CHRL. Vznikajú taktiež problémy so samotným zhutňovaním danej zmesi.

Pri experimentoch zaoberajúcimi sa drátkobetónom, by som rád do budúcnosti navrhoval použitie väčšieho množstva skúšobných vzoriek, čím sa môže vylúčiť vysoký rozptyl nameraných hodnôt, spôsobený náhodným rozptýlením drôtikov v drátkobetónovej zmesi.

Zoznam použitej literatúry

- [1] *BETON - Technologie, Konstrukce, Sanace* [online]. [cit. 2021-02-18]. Dostupné z: https://www.betontks.cz/sites/default/files/BETON_TKS_2010-02.pdf
- [2] SLÁDEK, Marcel, *Experimentální analýza betonových kompozitních materiálů při extrémním teplotním namáhání*, 2013, [online]. [cit. 2021-02-18]. Dostupné z: https://dk.upce.cz/bitstream/handle/10195/52430/SladekM_Experimentalni%20analyza_AS_2013.pdf?sequence=3&isAllowed=y
- [3] *Ověřování materiálových vlastností vláknobetonu* [online]. [cit. 2021-02-18]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/beton-malty-omitky/15538-overovani-materialovych-vlastnosti-vlaknobetonu>
- [4] PYTLÍK, Petr. *Technologie betonu*. 2. vyd. Brno: VUTIUM, 2000. Učebnice (VUTIUM). ISBN isbn:80-214-1647-5.
- [5] *Zkoušení a stanovení pevnosti v tahu u drátkobetonu* [online]. [cit. 2021-02-18]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/beton-malty-omitky/18133-zkouseni-a-stanoveni-pevnosti-v-tahu-u-dratkobetonu>
- [6] *Ultra High-Performance Fiber-Reinforced Concrete (UHPFRC): a review of material properties and design procedures* [online]. [cit. 2021-02-18]. Dostupné z: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1983-41952017000400957
- [7] 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.
- [8] KOSINKA, Filip, *Drátkobeton – porovnání vlivu délky drátků na pevnostní charakteristiky*, 2018, [online]. [cit. 2021-02-18]. Dostupné z: https://dk.upce.cz/bitstream/handle/10195/71394/KosinkaF_DratkobetonPorovani_VS_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- [9] KRÁTKÝ, Jiří, Karel TRTÍK a Jan VODIČKA. *Komentář a příklady ke směrnici pro drátkobetonové konstrukce: Commentary and examples to steel fibre reinforced concrete structures directive*. Praha: Sdružení KTV, 1999.

Bakalářská práce
Aspekty testování a mechanické vlastnosti drátkobetonu

- [10] ČSN EN 197-1 ed. 2: *Cement - Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití*. 2012. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- [11] ČSN EN 12620 +A1: *Kamenivo do betonu*. 2008. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- [12] *MasterFiber – rozptýlená výztuž do betonu pro náhradu ocelové výztuže a omezení tvorby trhlin* [online]. [cit. 2021-02-20]. Dostupné z: <https://www.master-builders-solutions.com/cs-cz/products/masterfiber>
- [13] *BAKAERT opět pokročil vpřed s novou technologií vláken Dramix® 4D a 5D* [online]. [cit. 2021-02-20]. Dostupné z: <https://tvstav.cz/clanek/2851-bekaert-opet-pokrocil-vpred-s-novou-technologiei-vlaken-dramixr-4d-a-5d>
- [14] *Vláknobeton* [online]. [cit. 2021-02-20]. Dostupné z: <https://www.ebeton.cz/pojmy/vlaknobeton>
- [15] *Polymerová vlákna do betonu* [online]. [cit. 2021-02-20]. Dostupné z: <https://www.ebeton.cz/pojmy/polymerova-vlakna-do-betonu>
- [16] *Polymer fibre for concrete* [online]. [cit. 2021-02-20] <http://www.bautech.eu/en/products/reinforcing-fibres-for-making-floor/polymer-fiber.html>
- [17] BEDNÁŘ, Patrik, *Betony vyztužené vlákny pro podlahy s vysokým zatížením*. Ostrava, 2017. Diplomová práce, VŠB - TU Ostrava, Fakulta stavební. [online]. [cit. 2021-02-21]. Dostupné z: https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/129166/BED0110_FAST_N3607_3607T021_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [18] NOVÁK, Radim, *Vláknobeton v ochraně železobetonových konstrukcí za požáru*. Ostrava, 2008. Bakalářská práce. VŠB - TU Ostrava, Fakulta bezpečnostního inženýrství [online]. [cit. 2021-02-21]. Dostupné z: https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/73658/NOV625_FBI_B3908_3908R006_2009.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [19] PLOCHÝ, ODNDŘEJ. *Lehké betony s rozptýlenou výztuží*. Brno, 2016. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců, [online]. [cit. 2021-02-21]

Bakalářská práce
Aspekty testování a mechanické vlastnosti drátkobetonu

- [20] *Cellulose Fibres Used in Building Materials*, [online]. [cit. 2021-02-21].
Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/300400574_Cellulose_Fibres_Used_in_Building_Materials
- [21] ČSN EN 12390-3: *Zkoušení ztvrdlého betonu. Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*. Česká agentura pro standardizaci, 2020.
- [22] ČSN EN 12390-6 *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 6: Pevnost v příčném tahu zkušebních těles*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [23] ČSN EN 12390-5: *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles*. Český normalizační institut, 2020.
- [24] HOBZA, Jakub, *Odolnost betonu proti CHRL*. Praha, 2019. Diplomová práce. ČVUT, Fakulta stavební. [online]. [cit. 2021-02-22]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/81007/F1-DP-2019-Hobza-Jakub-Diplomova%20prace_Hobza.pdf?sequence=-1&isAllowed=y
- [25] ČSN 73 1326: *Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek*. Český normalizační institut, 1984
- [26] ČSN EN 12390-8: *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 8: Hloubka průsaku tlakovou vodou*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020.
- [27] *Příručka technologa – Beton – Suroviny, výroby, vlastnosti* [online]. [cit. 2021-02-22]. Dostupné z <https://www.transportbeton.cz/stahnout-soubor?id=3203>
- [28] ČSN 73 1371: *Nedestruktivní zkoušení betonu – Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [29] *Technický list MasterFiber* [online]. [cit. 2021-04-23].
Dostupné z: <https://assets.master-builders-solutions.com/cs-cz/mbs-masterfiber-482-tl.pdf>
- [30] RAČEK, Miroslav. *Mechanické vlastnosti drátkobetonu pro konstrukční návrh*. Ostrava, 2020. Bakalářská práce. VŠB - TU Ostrava, Fakulta stavební.
- [31] Baumit ProofBeton [online]. [cit. 2021-04-26]. Dostupné z: <https://baumit.cz/produkty/betonove-smesi/baumit-proofbeton>

Bakalárska práca
Aspekty testovania a mechanické vlastnosti drátkobetónu

[32] CAJKA, R.; MARCALIKOVA, Z.; KOZIELOVA, M.; MATECKOVA, P.; SUCHARDA, O. Experiments on Fiber Concrete Foundation Slabs in Interaction with the Subsoil. *Sustainability* 2020, 12, 3939. [online]. [cit. 2021-04-27]. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/su12093939>

Zoznam obrázkov

Obrázok 1 Pracovný diagram prostého betónu (B) a drátkobetónu (F) v tlaku, upravené podľa [7]	12
Obrázok 2 Pracovný diagram prostého betónu (B) a drátkobetónu (F) v ťahu, upravené podľa [7]	13
Obrázok 3 Nakyprenie V_n (m^3) na $1 m^3$ zmesi kameniva (s maximálnym priemerom zrna d_{max}) a oceľových vlákien, pre betón s objemovým stupňom vystuženia μ (%); závislosť A: $d_{max} = 22$ mm, závislosť B: $d_{max} = 8$ mm, závislosť C: $d_{max} = 4$ mm, upravené podľa [7]..	15
Obrázok 4 Pridávanie oceľových vlákien do betónu [autor]	17
Obrázok 5 Hotová drátkobetónová zmes [autor]	17
Obrázok 6 Rôzne typy oceľových vlákien do drátkobetónu [14].....	20
Obrázok 7 Príklad polymérového vlákna do betónu [16].....	21
Obrázok 8 Meranie kockovej a valcovej pevnosti v tlaku [5]	24
Obrázok 9 Meranie pevnosti v priečnom ťahu na vzorke kocky [5]	25
Obrázok 10 Detail zaťaženia vzorky kocky a valca pri meraní pevnosti v priečnom ťahu [22].....	26
Obrázok 11 Trojbodová ohybová skúška [5].....	27
Obrázok 12 Štvorbodová ohybová skúška [5]	27
Obrázok 13 Mraziak určený na skúšku odolnosti voči mrazu a CHRL [autor]	28
Obrázok 14 Zariadenie určené na skúšku hĺbky priesaku tlakovou vodou [autor]	29
Obrázok 15 Oceľové vlákna MasterFiber 482 [autor]	30
Obrázok 16 Stĺpcový graf objemovej hmotnosti zmesi z prostého betónu a drátkobetónu [autor]	31
Obrázok 17 Skúška pevnosti v tlaku drátkobetónovej kocky v hydraulickom lise [autor] ..	32
Obrázok 18 Graf závislosti pevnosti v tlaku na dávkovaní drôťkov [autor]	33
Obrázok 19 Vzorka drátkobetónu po skúške pevnosti v priečnom ťahu [autor]	34
Obrázok 20 Graf závislosti pevnosti v priečnom ťahu na dávkovaní drôťkov [autor]	35
Obrázok 21 Trojbodová ohybová skúška drátkobetónového trámca s viditeľným zárezom 25 mm v strede trámca [autor]	36
Obrázok 22 Trhlina po trojbodovej ohybovej skúške drátkobetónového trámca [autor] ...	36
Obrázok 23 Zaťažovací diagram odolnosti drátkobetónových nosníkov s dávkovaním drôťkov $60 kg/m^3$ [autor]	36

Bakalárska práca
Aspekty testovania a mechanické vlastnosti drátkobetónu

Obrázok 24 Zat'azovací diagram odolnosti porovnávajúci drátkobetónové nosníky s dávkovaním drôťkov 40, 60, 75 a 110 kg/m ³ , upravené podľa [30]	37
Obrázok 25 Prehľad výsledkov pevností v priečnom ťahu pre rôzne dávkovania drôťkov v drátkobetónovej zmesi z oboch experimentov [autor], hodnoty doplnené z [30]	38
Obrázok 26 Prehľad výsledkov pevností v ťahu za ohybu pre rôzne dávkovania drôťkov v drátkobetónovej zmesi z oboch experimentov [autor], hodnoty doplnené z [30]	38
Obrázok 27 Vzorka porušeného drátkobetónového trámca s betonárskou výstužou s rozmermi 150 x 150 x 700 mm po trojbodovej ohybovej skúške; na fotke viditeľná šmyková trhlinka [autor]	40
Obrázok 28 Graf závislosti maximálnej sily v lise na dávkovaní drôťkov pri trojbodovej ohybovej skúške, prevzaté a doplnené z [30]	40
Obrázok 29 Porušený trámec s rozmermi 190 x 100 x 1150 mm s betonárskou výstužou a dávkovaním drôťkov 60 kg/m ³ [autor]	41
Obrázok 30 Graf únosnosti drátkobetónových trámcov s rozmermi 190 x 110 x 1150 mm s betonárskou výstužou a dávkovaním drôťkov 60 kg/m ³ a 90 kg/m ³ [autor]	42
Obrázok 31 Vzorky prostého betónu (horný rad) a drátkobetónu (spodný rad) po skúške odolnosti voči mrazu a CHRL [autor]	43
Obrázok 32 Graf hmotnostného úbytku drátkobetónu po 25., 50., 75. a 100. cykle [autor]	44
Obrázok 33 Graf maximálnych hmotnostných úbytkov drátkobetónu a prostého betónu po jednotlivých cykloch [autor]	44
Obrázok 34 Meranie hĺbky priesaku tlakovou vodou [autor]	46
Obrázok 35 Maximálna hĺbka priesaku tlakovou vodou na drátkobetónovej vzorke v oblasti so zvýšenou koncentráciou drôťkov [autor]	46
Obrázok 36 Skúšobné zariadenie behom merania objemových zmien v meracích žľaboch [autor]	48
Obrázok 37 Objemové zmeny prostého betónu v čase [autor]	48
Obrázok 38 Objemové zmeny drátkobetónu v čase [autor]	49
Obrázok 39 Použité oceľové vlákna (zľava doprava) - Dramix 3D 65/60 BG, Dramix 3D 65/35 GG, Dramix 3D 45/35 BL, Tabix 1/45, MasterFiber 482 [autor]	51
Obrázok 40 Graf pevností v tlaku vybraných kompozitov [autor]	51
Obrázok 41 Graf pevností v priečnom ťahu vybraných kompozitov [autor]	52

Zoznam tabuliek

Tabuľka 1 Rozdelenie kameniva určeného do betónu [27]	16
Tabuľka 2 Typy vlákien a ich vlastnosti [4]	19
Tabuľka 3 Tvarované oceľové vlákna so zahnutými koncami [8]	20
Tabuľka 4 Objemové hmotnosti zmesi z prostého betónu a drátkobetónu [autor]	31
Tabuľka 5 Priemerné pevnosti v tlaku zmesi z prostého betónu a drátkobetónu [autor] ...	32
Tabuľka 6 Priemerné pevnosti v priečnom ťahu zmesi z prostého betónu a drátkobetónu [autor]	34
Tabuľka 7 Priemerné pevnosti v ťahu za ohybu zmesi z prostého betónu a drátkobetónu [autor]	35
Tabuľka 8 Súčet odpadov jednotlivých vzoriek v gramoch [autor]	43
Tabuľka 9 Priemer, smerodajná odchýlka a variačný koeficient hmotnostných úbytkov drátkobetónovej zmesi v jednotlivých cykloch [autor]	45
Tabuľka 10 Hĺbka priesaku tlakovou vodou [autor]	46
Tabuľka 11 Objemové zmeny drátkobetónu a prostého betónu [autor]	49
Tabuľka 12 Pevnosť v tlaku a v priečnom ťahu vybraných kompozitov [autor]	50