

**RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE**

Būvniecības inženierzinātņu fakultāte

Būvražošanas institūts

**Artūrs LUKAŠENOKS**

Doktora studiju programmas “Būvniecība” doktorants

**KOMPOZĪTO ŠKIEDRU IZSTRĀDE UN  
IZRAUŠANAS UZVEDĪBAS IZPĒTE DAŽĀDAS  
STIPRĪBAS BETONOS**

**Promocijas darba kopsavilkums**

Zinātniskais vadītājs  
profesors *Dr. sc. ing.*  
Andrejs KRASŅIKOVŠ

RTU Izdevniecība  
Rīga 2018

Lukašenoks A. Kompozīto šķiedru izstrāde un izraušanas uzvedības izpēte dažādās stiprības betonos. Promocijas darba kopsavilkums. – Rīga: RTU Izdevniecība, 2018. 31 lpp.

ISBN 978-9934-22-126-2 (print)  
ISBN 978-9934-22-127-9 (pdf)

# PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2018. gada 14. septembrī Rīgas Tehniskās universitātē, Kaļķu ielā 1, 119. auditorijā, Rīgā, Latvijā.

## OFICIĀLIE RECENZENTI

Vadošais pētnieks *Dr. sc. ing. Jānis Andersons*,  
LU Polimēru mehānikas institūts, Latvija

Profesors *Dr. sc. ing. Janis Varna*,  
*Luleå University of Technology*, Zviedrija

Laboratorijas vadītājs *Dr. sc. ing. Valentin Antonovič*,  
*Vilnius Gediminas Technical University*, Lietuva

## APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis šo promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai. Promocijas darbs zinātniskā grāda iegūšanai nav iesniegts nevienā citā universitātē.

Artūrs Lukašenoks ..... (paraksts)

Datums: .....

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā, tajā ir ievads, piecas nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 141 attēls, 44 tabulas, divi pielikumi, kopā 153 lappuses. Literatūras sarakstā ir 155 nosaukumi.

## SATURA RĀDĪTĀJS

1. DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS.....	5
1.1. Ievads .....	5
1.2. Pētījuma mērķi .....	6
1.3. Pētījuma uzdevumi .....	6
1.4. Pētījuma metodoloģija.....	7
1.5. Zinātniskā novitāte .....	7
1.6. Promocijas darba struktūra.....	8
1.7. Konferenču un publikāciju saraksts .....	9
2. PROMOCIJAS DARBA SATURS.....	10
3. SECINĀJUMI .....	27
4. LITERATŪRAS SARAKSTS .....	30

# 1. DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

## 1.1. Ievads

Fibrobetons ir kompozītmateriāls – betona matrica, kas stiegota ar diskrētām šķiedrām. Tradicionāli tiek uzskatīts, ka šķiedras ir orientētas haotiski un vienmērīgi visā betona matricas tilpumā. Tomēr vairāki pētījumi ir pierādījuši, ka vienmērīga un haotiska šķiedru orientācija nav iespējama vairāku iemeslu dēļ – veidņa sienas efekts, betona plūsma, betona sablīvēšana [1–4]. Šķiedras betona tilpumā, atrodoties netālu no veidņu virsmas, novietojas virsmas garenvirzienā. Betona plūsma sūkņēšanas vai transportēšanas laikā noorientē šķiedras plūsmas virzienā, bet orientācija tiek sajaukta uzreiz pēc ievadīšanas veidnī vai stāvošā betona apjomā. Betonēšana un sablīvēšana lielā mērā ietekmē šķiedru pozicionēšanu tilpumā. Šķiedru divdimensiju orientāciju var panākt bez īpašiem pasākumiem, ja izvietošanas slānis ir nedaudz mazāks par šķiedras garumu. Šķiedru blīvēšana ar vibrējošajiem galdiem un dziļumvibratoriem izraisa betona plūsmu un tādējādi arī šķiedru orientāciju. Izpēte par šķiedru orientāciju un sadalījumu veikta, izmantojot attēlu apstrādi, induktīvos testus, rentgenstaru un THz elektromagnētiskos viļņus [5–7]. Daudzi pētnieki secināja, ka šķiedru atrašanās vietu un orientāciju betonēšanas laikā kontrolēt nevar [8]. Šis secinājums ir spēcīgs, ja šķiedrai ir jābūt novietotai (izvietotai un orientētai) ļoti precīzi. Pieredze būvniecības nozarē rāda, ka ir jānodrošina augstas prasības attiecībā uz betona matricas īpašībām, svaiga betona kontroli, lai radītu pietiekamu pārliecību par šķiedru atrašanās vietu un orientāciju. Svarīga ir svaiga betona maisījuma stabilitāte, kā arī nepieciešama laba betona iestrādājamība, lai samazinātu betona sablīvēšanas veidņos. Nekontrolēta sablīvēšana un vibrācijas rada nezināmu šķiedru izkārtojumu.

Fibrobetons ir ļoti interesants materiāls ražošanas un būvniecības procesu uzlabošanas un optimizācijas nolūkos. Lielu daļu būvdarbu varētu novirzīt no stiegrojuma ražošanas (sietu karkasu, stiegrojuma locījumu), transportēšanas (ceļšana, vešana), uzstādīšanas (karkasu siešanas, metināšanas) darbiem uz diskrētu šķiedru ievadīšanas un sajaukšanas procesu betonā. Tradicionālajā būvniecībā, kur betonēšanas darbi notiek būvlaukumā, stiegrošanas darbi ir otrajā vietā pēc veidņu veidošanas darba stundu patēriņa ziņā. Fibrobetona iestrādāšana, sablīvēšana un virsmas apstrāde var tikt mehanizēta ievērojami augstākā pakāpē nekā stiegrošanas darbi.

Tērauda šķiedras (ar dažādām ģeometriskām formām un izmēriem) visbiežāk izmanto kā dispersu stiegrojumu konstruktīviem elementiem [10]. Šķiedru formas ir taisnas vai deformētas, lai palielinātu izraušanas izturību (ar atlocījumiem galos, viļņota). Polimēru šķiedrām ir ievērojami zemāks stingums un stiprība, salīdzinot ar tēraudu, un tos galvenokārt izmanto, lai samazinātu rukuma plaisas konstruktīvos elementos [11]. Daudzveidīgu polimēru šķiedru tehnoloģiskā attīstība ir ļāvusi tās veiksmīgi izmantot cementa kompozītmateriālu izstrādei, kas ir izmantojami laukumu, ietjvu, grīdas segumu izgatavošanai, kā arī strukturālajos elementos [12–16].

Citiem sintētisko šķiedru veidiem, tādiem kā stikls, bazalts, aramīds un ogleklis, ir augsta stiprība, stingums un zems blīvums. Šīs šķiedras ir ķīmiski izturīgas agresīvos vides apstākļos.

Stikla, bazalta, aramīda un oglekļa šķiedras ir grūti ievadīt betonā, jo tām ir liela diametra un garuma attiecība. Izmantojot tradicionālās maisīšanas metodes, šķiedras maisīšanas laikā veido kamolus un veltnus. Problēma ar šķiedru pievienošanu maisījumam kļūst izteiktāka, palielinoties šķiedru dozācijai. Maisot ar ātrgaitas maisītājiem (*EIRICH*), visas minētās šķiedras tiek sarautas īsākos gabalos [17].

Pēdējos gados veiktie kompozītmateriālu pētījumi ir ievērojami uzlabojuši kompozītmateriālu un šķiedru ražošanas tehnoloģiju, tādējādi samazinot to izmaksas un palielinot to izmantošanu. Par kompozītām šķiedrām ir atrodama ļoti neliela informācija. Šobrīd tirgū ir pieejami bazalta šķiedru–polimēru matricas kompozītelementi ar taisnu ģeometriju, apaļu šķērsriezumu un gludām virsmu (*Minibar<sup>TM</sup>*). Šis produkts ir līdzīgs kompozītām šķiedrām. Lai sasniegtu jūtamu mehānisko īpašību pieaugumu, bazalta *Minibar<sup>TM</sup>* šķiedras ieteicams izmantot lielās dozācijās (1,5–3 %) [18, 19]. Garas oglekļa šķiedras, kas piesūcinātas ar epoksīda sveķiem, izmanto, lai palielinātu betona plāksņu pretestību pret sprādzieniem militārām vajadzībām [20–22].

Iepriekš minētie fibrobetona un šķiedras izraušanas pētījumi koncentrējas tikai uz vienu konkrētu matricas tipu vai spiedes stiprību [23–25]. Šis pētījums piedāvā trīs dažādu betona matricu stiprības. Katrs matricas stiprības līmenis ietver betona grupu, kas tiek izmantota betona un būvniecības nozarē. Zemas stiprības betons pētījumā atspoguļo betona grupu ar spiedes stiprības diapazonu 30–40 MPa, ko galvenokārt izmanto laukumiem, grīdām, pamatiem. Vidējas stiprības betons 50–75 MPa diapazonā atspoguļo betonu grupu, ko plaši lieto saliekamā dzelzsbetona nozarē nesošu sienu, iepriekšsaspriegtgu siju, plātņu, tiltu laidumu ražošanā. Augstas stiprības betons 90–125 MPa diapazonā tiek izmantots salīdzinoši mazāk nekā iepriekšējās divas grupas, un to lieto saliekamā dzelzsbetona ražošanā fasāžu elementos, balkonos, plānos čaulas elementos.

## 1.2. Pētījuma mērķi

Izstrādāt jauna tipa kompozītās šķiedras betona dispersai stiegrošanai; izpētīt vienas šķiedras izraušanas uzvedību, šķiedru izraušanas un plīšanas mehānismus betonā ar trim spiedes stiprības līmeņiem un izpētīt fibrobetona uzvedību liecē.

## 1.3. Pētījuma uzdevumi

Lai sasniegtu pētījuma mērķus, tika noteikti šādi uzdevumi:

- izstrādāt šķiedras ar augstu stiprību, diametru 0,9–2,7 mm, dažādu formu un virsmu;
- izstrādāt smalkgraudainus betonus ar trim betona spiedes stiprībām aptuveni 40 MPa, 75 MPa un 120 MPa;
- izgatavot šķiedras un paraugus, lai pētītu vienas šķiedru izraušanas uzvedību betona matricās ar mehānisku testēšanu;
- ievadīt kompozītās šķiedras betonā un izpētīt fibrobetona uzvedību liecē.

## 1.4. Pētījuma metodoloģija

Promocijas darba ievadā ir veikts literatūras apskats par šķiedrām, fibrobetonu un betona tehnoloģiju. Pieejamās zinātniskās publikācijas tika izmantotas, lai formulētu pētījuma mērķi un uzdevumus. Lai sasniegtu pētījuma mērķus, tika noteikti četri uzdevumi.

Pētījuma pirmais uzdevums ir šķiedru izstrāde. Lai izpildītu šo uzdevumu, tika atrasta atbilstoša šķiedru ražošanas tehnika katram šķiedru veidam: gludas, raupjas virsmas šķiedras, pītas šķiedras un hibrīdās šķiedras. Tika izstrādāšana izgatavošanas tehnoloģija, lai iegūtu atbilstošas šķiedru virsmas un ģeometriju atbilstošā kvalitātē.

Pētījuma otrais uzdevums bija izstrādāt betona matricas ar trim dažādiem stiprības līmeņiem. Tika izvēlēti izejmateriāli, no kuriem identificētas optimālas maisījuma proporcijas, pārbaudītas svaiga un sacietējuša betona īpašības. Pētījumā tika attēloti tikai tādi maisījumu veidi, kas atbilst nepieciešamajiem stiprības līmeņiem. Tika izmantotas standarta testēšanas metodes betona matricas īpašību noteikšanai (kona nosēduma plūstamība, spiedes stiprība, stiprības attīstība, rukums).

Trešais pētījuma uzdevums tika veikts, izgatavojot kompozītās šķiedras un vienas šķiedras izraušanas paraugus, tos mehāniski testējot, lai atrastu spēku-izraušanas pārvietojuma sakarības ar dažādiem parametriem (betona matricas stiprība, šķiedras dziļums, šķiedras konfigurācijas leņķis, šķiedras virsma un forma). Katrai šķiedras konfigurācijai izgatavoti vismaz septiņi paraugi. Vienas šķiedras izraušanas pārbaudes tika veiktas ar testēšanas iekārtu *Zwick Z150*, un pārvietojums noteikts, izmantojot bezkontakta mērīšanas ierīci – video ekstensometru *Messphysik*. Rezultāti tika apkopoti, izmantojot *Microsoft Excel* un programmatūru *MATLAB*. No iegūtajām spēka-pārvietojumu līknēm un datiem tika noskaidrotas vidējās dziļuma, leņķa konfigurācijas un matricas stiprības sakarības.

Pētījuma pēdējais uzdevums bija izgatavot kompozīto šķiedru nepieciešamo daudzumu, izgatavot siju paraugus un tos mehāniski testēt. Betons pirms šķiedras iemaisīšanas tika pārbaudīts, lai atbilstu svaiga betona īpašībām un gala stiprības prasībām. Siju paraugi tika pārbaudīti četru punktu liecē, kā arī tika apstrādāti iegūtie rezultāti. Fibrobetona ar kompozītām šķiedrām nestspēja un uzvedība liecē tika analizēta un salīdzināta ar zināmajām tērauda šķiedrām. No iegūtajiem rezultātiem tika iegūtas vidējās spēka-deformāciju sakarības dažādiem parametriem (šķiedru skaita plaisas plaknē, betona matricas stiprības un kompozīto šķiedru virsmā ietekme).

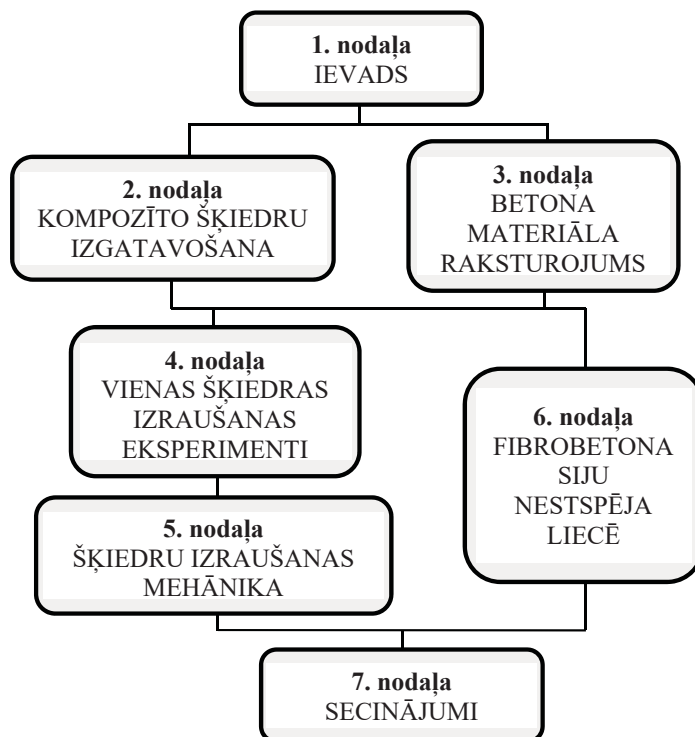
## 1.5. Zinātniskā novitāte

Šajā promocijas darbā ir atspoguļotas jauna tipa kompozītās stikla, oglekļa un hibrīdās šķiedras. Kompozīto šķiedru pētījumu ir ļoti maz, bet metodisks pētījums par šķiedras izraušanu no betona matricas vispār netika atrasts. Pētījumā tika veikti sistemātiski vienas šķiedras izraušanas testi betona matricās ar trim dažādiem spiedes stiprības līmeņiem (aptuveni 40 MPa, 75 MPa un 120 MPa). Minētie spiedes stiprības līmeņi izvēlēti, lai atspoguļotu trīs dažādu betonu grupas, kas tiek izmantotas būvniecības nozarē. Jaunas kompozītās šķiedras izstrādātas

ar krasi atšķirīgām virsmas īpašībām (gludas un raupjas), kā arī ar dažādu šķiedru formu (taisnas un pītas).

## 1.6. Promocijas darba struktūra

Promocijas darba uzbūve ir attēlota 1.1. attēlā. Līdzšinējie pētījumu rezultāti apzināti, un zinātniskā problēma ir formulēta ievadā. 2.–6. nodaļas ir veltītas promocijas darba uzdevumu izpildei. Galvenie secinājumi ir apkopoti un izklāstīti 7. nodaļā.



1.1. att. Promocijas darba struktūra.



## 1.7. Konferenču un publikāciju saraksts

Promocijas darba rezultāti prezentēti starptautiskās konferencēs un pilna teksta zinātniskajās publikācijās (iekļauti starptautiskās datubāzēs).

1. Šahmenko, G., Krasnikovs, A., Lukašenoks, A., Eiduks, M. Ultra high performance concrete reinforced with short steel and carbon fibers. Paper presented at the 10th International Scientific Practical Conference "Environment. Technology. Resources", 18–20 June 2015, Rezekne, Latvia, 193–199. doi:10.17770/etr2015vol1.196 Retrieved from [www.scopus.com](http://www.scopus.com) (autora ieguldījums 45 %).
2. Lukasenoks, A., Macanovskis, A., Krasnikovs, A., Lapsa, V. Composite fiber pull-out in concretes with various strengths. Paper presented at the 15th International Scientific Conference "Engineering for Rural Development", 25–27 May 2016, Jelgava, Latvia, 1417-1423. Retrieved from [www.scopus.com](http://www.scopus.com) (autora ieguldījums 90 %).
3. Lukasenoks, A., Macanovskis, A., Krasnikovs, A. Matrix strength influence on composite fibre reinforced concrete behaviour in flexure and single fibre pull-out. Paper presented at the 17th International Scientific Conference Engineering for Rural Development, 23–25 May 2018, Jelgava, Latvia, 1513–1520. DOI: 10.22616/ERDev2018.17.N365 Retrieved from [www.scopus.com](http://www.scopus.com) (autora ieguldījums 90 %).
4. Lukasenoks, A., Macanovskis, A., Krasnikovs, A. Composite carbon fibre embedment depth and angle configuration influence on single fibre pull-out from concrete. Paper presented at the 17th International Scientific Conference Engineering for Rural Development, 23–25 May 2018, Jelgava, Latvia, 1507–1512. DOI: 10.22616/ERDev2018.17.N364 Retrieved from [www.scopus.com](http://www.scopus.com) (autora ieguldījums 90 %).

Promocijas darba rezultāti prezentēti starptautiskās konferencēs un pilna teksta zinātniskajās publikācijās.

5. Šahmenko, G., Krasnikovs, A., Stonys, R., Lukašenoks, A., Eiduks, M. Nano-Modified Fibre Reinforced Concrete. In: 3rd All-Russia (International) Conference "Concrete and Reinforced Concrete – Glance at Future", Moscow, 12–16 May, 2014, Moscow: 2014, 230–238. ISBN 9785726408095. (autora ieguldījums 45 %).

Promocijas darba rezultāti prezentēti starptautiskās konferencēs un pilna teksta zinātniskajās publikācijās (apstiprināti publicēšani, tiks iekļauti starptautiskās datubāzēs).

6. Lukasenoks, A., Krasnikovs, A., Macanovskis, A., Kononova, O., Lapsa, V. Short Composite Fibres For Concrete Disperse Reinforcement. Paper presented at Euromech Colloquium 582 "Short Fibre Reinforced Cementitious Composites and Ceramics" (autora ieguldījums 85 %).

Promocijas darba rezultāti, kas atspoguļoti rakstā zinātniskajā žurnālā "American Concrete Institute (ACI) Materials Journal" (apstiprināts publicēšanai).

7. Macanovskis, A., Lukasenoks, A., Krasnikovs, A., Stonys, R., Lusiš, V. (2018) Composite fibers in concretes with various strengths. ACI Materials Journal (autora ieguldījums 75 %).

## 2. PROMOCIJAS DARBA SATURS

Promocijas darbā ir ievads, piecas nodaļas un secinājumi. Ievads sniedz plašu priekšstatu par tēmām, kas tiek izskatītas turpmākajās nodaļās.

**2. nodaļā** apskatīta kompozīto šķiedru izstrāde: šķiedru pavedienu materiālu izvēle, izgatavošanas metodes, kvalitātes kontrole un apkopota informācija par ģeometriju, virsmas īpašībām. Kompozīto šķiedru izstrādes mērķis: izstrādāt augsta stiprības šķiedras, dažādas šķiedru formas un uzlabotas šķiedras virsmas, lai palielinātu šķiedru izraušanas pretestību; izstrādāt tehnoloģiju, lai ražotu kompozītmateriālu šķiedras laboratorijas apstākļos, kā arī tehnoloģijas šķiedru rūpnieciskai ražošanai. Kompozīto šķiedru izstrāde ir nepieciešama, jo nav komerciāli pieejamu produktu ar vēlamu diametru un garumu. Par kompozītām šķiedrām šajā darbā tiek uzskatītas ar epoksīdsveķiem piesūcināti stikla, oglekļa vai kombinēti pavedieni. Tika definētas galvenās prasības kompozītām šķiedrām: augsta šķiedru stiprība, šķiedru virsma, kas rada labu saķeri ar betona matricu. Šķiedrām bija nepieciešama augsta stiprība, tāpēc tika izvēlēti stikla un oglekļa šķiedru materiāli. Vairākkārt tika atkārtoti šķiedru izgatavošanas soļi, lai iegūtu dažādu kompozīto šķiedru virsmu (gludu, raupju, viļņotu).

Šķiedru ražošana sastāv no šķiedru pavedienu un matricas (epoksīdsveķu) transformēšanu makro šķiedrās (0,5–3 mm diametrā). Šķiedru pavedieni tiek sagatavoti pirms makro šķiedru izgatavošanas, nepieciešamais pavedienu skaits tiek atdalīts no galvenā pavediena, nofīts no ruļļa vai savienots un uzglabāts nākamajām darbībām. Pītajām šķiedrām pavedieni ir savstarpēji savīti, lai izveidotu šķiedru pavedienu pinumus. Kompozīto šķiedru izgatavošanas galvenie posmi ir atspoguļoti 2.1. attēlā.



2.1. att. Neapstrādātas stikla šķiedras pārveidošana kompozītā šķiedrā.

Tika izveidoti trīs kompozīto šķiedru tipi, kas apzīmēti ar lielajiem burtiem CF (oglekļa šķiedras), GF (stikla šķiedras) un CG/GC (hibrīdās šķiedras). Katram šķiedru tipam ir apakštīps, kas ir numurēts. Kompozītās oglekļa šķiedras tiek iedalītas trīs apakštīpos: CF1 (gluda virsma), CF2 (raupja virsma) un CF3 (pīta šķiedra). Gludām un raupjām šķiedrām ir trīs dažādi diametri, ko iegūst, izmantojot atšķirīgu pavedienu daudzumu (24k, 16k un 8k).

Gludas kompozītās oglekļa šķiedras CF1, CF1-A un CF1-B ir attēlotas 2.2. attēlā. Shematiskais attēlojums 2.5. attēlā atspoguļo taisnas un gludas šķiedras ar trim dažādiem šķiedru diametriem.



2.2. att. Kompozītās oglekļa šķiedras: CF1, CF1-A un CF1-B (no kreisās puses).

Raupjas virsmas kompozītās oglekļa šķiedras CF2, CF2-A un CF2-B ir parādītas 2.3. attēlā. Shematiskais attēlojums 2.5. attēlā atspoguļo taisnu šķiedru ar raupju virsmu (trīs diametrus).



2.3. att. Kompozītās oglekļa šķiedras CF2, CF2-A un CF2-B (no kreisās puses).

Sapītas kompozītās oglekļa šķiedras ir parādītas 2.4. attēlā. Shematiskais attēlojums 2.5. attēlā atspoguļo viļņotas virsmas šķiedru, ko iegūst, savijot šķiedru pavedienus.



2.4. att. Sapīta kompozītā oglekļa šķiedra CF3.



2.5. att. Kompozīto oglekļa šķiedru shematiskais attēlojums: CF1, CF1-A, CF1-B (gluda); CF2, CF2-A, CF2-B (raupja) un CF3 (pīta) no kreisās puses.

Kompozītām stikla šķiedrām ir pieci apakštipi: GF1 (gluda virsma, nevienmērīga forma), GF2 (gluda virsma) un GF3 (raupja virsma), GF4 (pīta šķiedra ar 14 pavedieniem) un GF5 (pīta šķiedra ar septiņiem pavedieniem). Visām kompozītajām stikla šķiedrām ir vienāds pavedienu skaits, bet atšķirīga ražošanas tehnoloģija, kuras rezultātā iegūta atšķirīga forma un virsma.

Trīs kompozītās stikla šķiedras GF1, GF2 un GF3 ir attēlotas 2.6. attēlā. Šķiedras shematiski parādītas 2.8. attēlā.



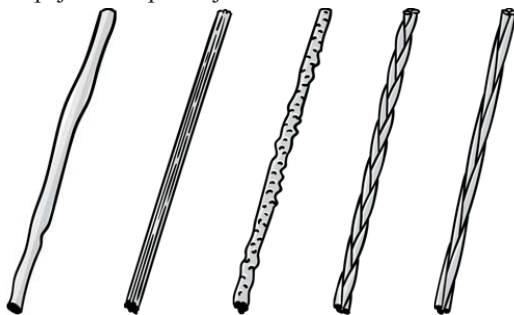
2.6. att. Kompozītās stikla šķiedras GF1, GF2 un GF3 (no kreisās puses).

Divas kompozītās stikla šķiedras GF4 un GF5 ir attēlotas 2.7. attēlā.



2.7. att. Kompozītās stikla šķiedras: GF4 un GF5 (no kreisās puses).

Šķiedras shematiski parādītas 2.8. attēlā, kas parāda to, ka šķiedras ir taisnas ar viļņotu virsmu un atšķirīgu savstarpēji savītu pinumju skaitu.



2.8. att. Shematisks kompozīto stikla šķiedru attēlojums: GF1, GF2 GF3, GF4 un GF5 (no kreisās puses).

Hibrīdām šķiedrām ir divi apakštipi; abiem ir viļņota virsma, kas radīta, sapinot oglekļa un stikla šķiedras pavedienus. Galvenā atšķirība starp divām šķiedrām ir kodola un apkārtējās šķiedras materiāls. Hibrīdā šķiedra CG1 satur oglekļa šķiedru pavedienus kodolā un stikla šķiedru, kas apvijas apkārt. Savukārt šķiedra GC1 satur stikla šķiedras pavedienus kodolā un oglekļa šķiedru, kas apvijas tam apkārt.

Šķiedras CG1 un GC1 ir attēlotas 2.9. attēlā. Šķiedras shematiski ir parādītas 2.10. attēlā, kas parāda to, ka šķiedras ir taisnas ar viļņotu virsmu un atšķirīgu kodolu no apkārtējās šķiedras materiāla.



2.9. att. Hibrīdas kompozītās šķiedras: CG1 un GC1 (no kreisās puses).



2.10. att. Hibrīdu kompozīto šķiedru shematisks attēlojums: CG1 un GC1 (no kreisās puses).

Šķiedru vidējā diametra un blīvuma kopsavilkums ir parādīts 2.1. tabulā ar kopumā 14 izstrādātām kompozītām šķiedrām. Visas šķiedras ir 50 mm garas ar 0,89–2,76 mm diametru. Šķiedras ir iedalītas trīs galvenajās grupās: kompozītās oglekļa šķiedras (CF), kompozītās stikla šķiedras (GF) un hibrīdās šķiedras (CG/GC). Šķiedrām ir dažādas formas: nevienmērīgas, taisnas un viļņotas. Šķiedru virsma galvenokārt ir gluda, bet ir viena kompozītā stikla šķiedra (GF3) un trīs kompozītās oglekļa šķiedras (CF2, CF2-A un CF2-B), kuru ārējā virsma ir uzlabota ar smalkiem kvarca smilšu graudiem, kā rezultātā iegūta raupjas šķiedras virsma (Latvijas patenta pieteikums P-16-101).

2.1. tabula

Kompozīto stikla, oglekļa un hibrīdo šķiedru īpašību kopsavilkums

Šķiedras veids	Marķējums	Šķiedras ģeometrija, virsma	Diametrs, mm	Blīvums, kg/m <sup>3</sup>
Oglekļa šķiedras	CF1	Taisna, gluda	1,77	1129
	CF1-A	Taisna, gluda	1,3	1291
	CF1-B	Taisna, gluda	0,89	1569
	CF2	Taisna, raupja	2,1	1397
	CF2-A	Taisna, raupja	1,79	1330
	CF2-B	Taisna, raupja	1,57	1183
	CF3	Viļņota, gluda	1,82	1101
Stikla šķiedras	GF1	Nevienmērīga, gluda	2,18	1195
	GF2	Taisna, gluda	1,52	1746
	GF3	Taisna, gluda	2,04	1507
	GF4	Viļņota, gluda	1,88	1310
	GF5	Viļņota, gluda	1,85	1270
Hibrīdās šķiedras	CG1	Viļņota	2,6	–
	GC1	Viļņota	2,76	–

**3. nodaļā** ietverta smalkgraudaina betona izstrāde ar trīs betona stiprībām: spiedes stiprība 40–120 MPa. Šīs nodaļas uzdevumi: atspoguļot izstrādātā smalkgraudainā betona izmantotos materiālus, to proporcijas un testēšanas metodes, kas raksturotu betona materiālu īpašības svaigā un sacietējušā stāvoklī. Betona matricas spiedes stiprības diapazons 40–120 MPa (M1, M2 un M3 matricas) ir balstīts uz pašreizējo situāciju un attīstības iespējām betona un būvniecības nozarē. Būvniecības nozarē betonus ar spiedes stiprību 40 MPa lieto ļoti plaši (plātnēm uz grunts, sienām, pamatiem). Betons ar spiedes stiprību 70–75 MPa tiek uzskatīts par augstas stiprības betonu būvniecības industrijā, un tam ir nepieciešami īpaši pasākumi (izmantojamie materiāli, ražošanas tehnoloģija, iekļāšanas un aprūpes metode). Betons ar 120 MPa spiedes stiprību ir īpašs betona izstrādājums, un tā izmantošanai nosaka īpašus pasākumus, un vairumā gadījumu tie būtiski atšķiras no tradicionālā betona ražošanas un lietošanas. Betona matricu M1, M2 un M3 maisījumi (materiālu kombinācijas) ir parādītas 2.2. tabulā.

Betona maisījuma proporcijas (M1, M2 un M3)

Materiāli	Blīvums, kg/m <sup>3</sup>	M1, kg/m <sup>3</sup>	M2, kg/m <sup>3</sup>	M3, kg/m <sup>3</sup>
Cements CEM I 52,5R	3130	800	550	400
Ūdens	1000	200	300	300
Smiltis 0–1 mm	2650	1100	1200	1400
Silīcija dioksīds	2220	133,3	50	0
Kvarca pulveris 0–120 μm	2650	66,5	250	250
Superplastifikators	1070	25	6,5	3
ū/c attiecība	–	0,25	0,55	0,75
ū/b attiecība	–	0,21	0,5	–
masas tilpums, l/m <sup>3</sup>	–	540,7	592,6	522,1

Pirms katras betona paraugu sērijas izgatavošanas tika veikti kona izplūdes testi pēc *ASTM C1437*. Izmantotais konusa veidnis un izplūdes diametrs parādīts 2.11. attēlā (pa labi un pa vidu). Testi tika veikti, lai kontrolētu betona iestrādājamību, kas savukārt nodrošina paraugu kvalitāti un rezultātu stabilitāti. Konsistences mērījumu rezultāti bija diapazonā no 220 līdz 295 mm visiem maisījumiem.



2.11. att. Betona konsistences mērījumi M1 betona matricai.

Svaiga betona īpašības tika noteiktas arī saskaņā ar EN 12350-8 pirms siju paraugu betonēšanas. Katram betona veidam (M1, M2 un M3) tika veikti četri mērījumi. Testēšanas process un izplūdes diametra mērījums ir attēlots 2.12. attēlā (pa labi), un rezultāti ir apkopoti 2.3. tabulā. Visas trīs betona matricas bija plūstošas: noteiktais izplūdes diametrs bija 580–770 mm. Šādas svaiga betona plūstamības īpašības ir projektētas tādēļ, lai varētu aizpildīt šaurus veidņus un atvieglotu betona iestrādi.

Betona maisījuma konsistences mērījumi pēc EN 12350-8

Betona maisījums	Izplūdes diametrs, mm	Standartnovirze, mm	Konsistences klase	Svaiga betona blīvums, kg/m <sup>3</sup>
M1	768	32	SF3	2296
M2	743	33	SF2	2164
M3	580	28	SF1	2157

Betona matricas M1 tipam ir augstākā vidējā stiprība  $f_c = 122,3$  MPa, M2 vidējā stiprība ir  $f_c = 74,86$  MPa un M3 ir zemākā vidējā stiprība  $f_c = 41,84$  MPa. M2 un M1 betona spiedes stiprība ir apmēram 1,8 un 2,9 reizes lielāka nekā M3. Betona rukums tika noteikts saskaņā ar *ASTM C157*. Tika sagatavoti trīs betona paraugi katram maisījumam (M1, M2 un M3) ar veidņu izmēru 75 mm × 75 mm × 275 mm. Paraugi tika iebetonēti un atveidoti pēc 23 ± 1 stundām, pēc atveidnošanas veikti sākotnējie uzmērījumi un uzglabāti ūdenī. Paraugi tika uzglabāti ūdenī (23 ± 0,5° C) 14 dienas, paraugi no 15. dienas izņemti un uzglabāti gaisā (RH 50 ± 4 %, 23 ± 2° C). Betona mitruma izmaiņas tika noteiktas, sverot paraugus pēc katra garuma izmaiņu mērījuma. Betona matricu M2 un M3 parauga svars palielinās pirmajās 14 dienās, pretēji betona matricai M1, visiem šiem paraugiem atrodoties ūdenī. M1 ir ar ļoti zemu ūdens-cementa attiecību un augstu iekšējās struktūras blīvumu. Betona matricu rukums 28 dienu vecumā: M1 – 130 με, M2 – 426 με un M3 – 188 με.

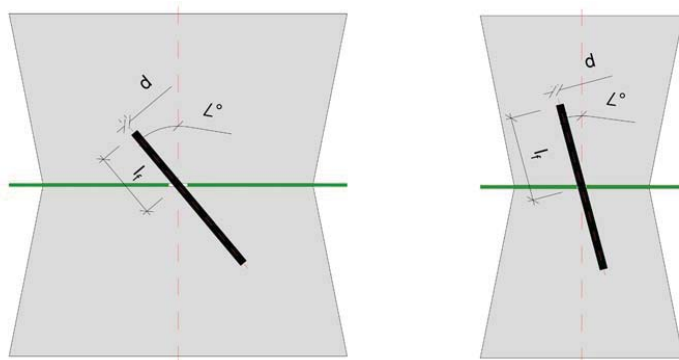
**4. nodaļa** atspoguļo vienas šķiedras izraušanas paraugu ražošanu un eksperimentālo programmu, kā arī nestandarta testēšanas metodes aprakstu, paraugu ģeometriju, šķiedru konfigurāciju un testēšanu. Šajā nodaļā tiek veikts vispārējs šķiedru izraušanas darba režīma salīdzinājums attiecībā uz visām pārbaudītajām šķiedrām (kopumā 14 šķiedrām) ar vienādiem šķiedru konfigurācijas parametriem.

Tika izgatavoti un testēti vienas šķiedras izraušanas paraugi, lai pētītu šķiedras uzvedību un izraušanās pretestību no betona matricas. Šķiedras izraušanas eksperimentu mērķis ir izpētīt dažādu kompozīto šķiedru un betona parametru (stiprības, diametra, ģeometrijas un virsmas) ietekmi uz šķiedru veiktspēju, kā arī šķiedru izraušanas un plīšanas mehānismiem.

Vienas šķiedras izraušanas paraugi izgatavoti katrai betona matricai (M1, M2, M3) un šķiedras veidam īpaši izstrādātos veidņos. Izstrādājot paraugu veidņus, tika noteikti vairāki mērķi: augsta paraugu kvalitāte (precīza ģeometrija, šķiedru novietošana un orientācija), veidņu salikšanas vienkāršība, veidņu tīrīšana un izjaukšana, otrreizēja izmantošana (izturība). Plastmasas starplika tika izmantota, lai pilnībā atdalītu divas pretējās betona daļas, paraugu ģeometrijas skice parādīta 2.12. attēlā. Neliels atvērums plastmasas starplikā ļauj ievietot kompozīto šķiedru un savienot abas betona daļas. Tika izmantoti divi veidņu izmēri – A tips (40 mm × 60 mm × 30 mm) un B tips (80 mm × 100 mm × 30 mm).

Betona parauga veids, kas atdalīts ar starpliku, izvēlēts, lai varētu testēt vienas šķiedras izraušanu konfigurētā dziļumā un leņķī, kā arī novērot šķiedras izraušanu, ja tāda veidojas, no abām betona matricas pusēm, kas pastāv reālā fibrobetona elementa uzvedībā.





2.12. att. Parauga ģeometrijas skice: A tips pa labi, B tips pa kreisi. Šķiedras konfigurācija – dziļums  $l_f = 25, 20, 15, 10$  un  $5$  mm; un leņķis  $\angle = 0, 15, 30, 45$  un  $60^\circ$ .

Vienas šķiedras izraušanas parauga betonēšanas procesā ietilpst veidņa sagatavošana (starplikas, šķiedras uzstādīšana) un betona iestrādāšana veidnī. Paraugu betonēšanas process notiek divos posmos. Betonu tiek uzmaisīts atbilstoši 3. nodaļā aprakstītajai maisīšanas procedūrai, un tiek testēta konsistence. Viena veidņa daļa tiek pilnībā aizpildīta ar betonu, šķiedras novietojums tiek pārbaudīts un, ja nepieciešams, noregulēts (dziļuma un leņķa konfigurācija norādīta 2.4. tabulā). 2.13. attēlā atspoguļoti paraugi ar šķiedras konfigurēšanu leņķī un dziļumā, kā arī betonēšanas process.



2.13. att. Šķiedras konfigurēšana leņķī, dziļumā un veidņu aizpildīšana ar betonu (no kreisās puses).

Šajā attēlā pa kreisi ir parādīta GF2 kompozītā stikla šķiedra B tipa veidnī. Šķiedra ir konfigurēta  $45^\circ$  leņķī un  $20$  mm dziļumā. Viena no parauga pusēm jau ir aizpildīta ar betonu. Otrajā attēlā pa kreisi ir CF1 kompozītā oglekļa šķiedra A tipa veidnī. Šķiedra ir konfigurēta  $0^\circ$  leņķī un  $15$  mm dziļumā. Viena no parauga pusēm jau pilnībā aizpildīta ar betonu, iesākta otrās parauga puses aizpildīšana. Attēlā pa labi ir parādīts betona iestrādāšanas process kompozītai oglekļa šķiedrai CF3, kas ir noregulēta  $0^\circ$  leņķī un  $25$  mm dziļumā. Attēlā norādītais betona maisījums ir ļoti plūstošs un piemērots nelielu betona paraugu izgatavošanai. Visi saražotie vienas šķiedras izraušanas paraugi tika marķēti ar izgatavošanas datumu, šķiedru veidu,

konfigurācijas parametriem (šķiedru leņķi un dziļumu) un betona matricu. Paraugi tika pārklāti ar plēvi un uzglabāti laboratorijas apstākļos vismaz 24 stundas, tad atveidnoti un uzglabāti standarta apstākļos. Paraugu atveidošana tika veikta ļoti uzmanīgi, lai nesabojātu šķiedru izraušanas paraugus. Katrai šķiedras konfigurācijai un betona matricai tika izgatavots septiņu paraugu komplekts. Kopējais izgatavoto un testēto paraugu daudzums – 1323.

2.4. tabula

Vienas šķiedras izraušanas konfigurācijas tabula (dziļums, leņķis un paraugu veids) katrai betona matricai M1, M2 un M3

Konfigurācijas leņķis Dziļums	A tipa paraugs – 0°	A tipa paraugs – 15°, 30°	B tipa paraugs – 45°, 60°
5 mm	CF1, CF1-A, CF1-B; CF2, CF2-A, CF2-B; CF3; SF1, SF2; GF2	–	–
10 mm	CF1, CF1-A, CF1-B; CF2, CF2-A, CF2-B; CF3; SF1, SF2; GF2	–	–
15 mm	CF1, CF1-A, CF1-B; CF2, CF2-A, CF2-B; CF3; SF1, SF2; GF2	CF2-B	CF2-B
20 mm	CF1, CF1-A, CF1-B; CF2, CF2-A, CF2-B; CF3; SF1, SF2; GF2	CF1, CF1-B, CF3 (tikai M3), GF2	CF1, CF1-B, CF3 (tikai M3), GF2
25 mm	CF1, CF1-A, CF1-B; CF2, CF2-A, CF2-B; CF3; SF1, SF2; GF2; GF1, GF3, GF4, GF5 (tikai M3); CG1, GC1 (tikai M3)	–	–

**5. nodaļā** tiek atspoguļoti vienas šķiedras izraušanas eksperimentālie rezultāti (10 šķiedru veidiem trīs betona matricās), izsmelīgi izdiskutēti šķiedru izraušanas un plīšanas mehānismi, kā arī izdarīti secinājumi par turpmāko šķiedru izstrādi un izmantošanu. Šīs nodaļas uzdevumi – izpētīt vienas šķiedras izraušanas un plīšanas mehānismus betona matricās M1, M2 un M3, kas konfigurētas dažādos dziļumos un leņķī. Šķiedras ir izgatavotas ar rokām, tāpēc tās nav ļoti vienvēidīgas. Tika analizēti rezultāti, šķiedru izraušanas un plīšanas veidi, kā arī meklēta iespējami augstākā šķiedru veiktspēja, kas norāda uz šķiedru potenciālu, ja tām nebūtu defektu vai iekšēju bojājumu, kas radušies no izvēlētās izgatavošanas metodes. Dažādi šķiedru plīšanas veidi norāda uz vairākiem šķiedru izraušanas un plīšanas mehānismiem, kā arī trūkumiem un defektiem šķiedru izgatavošanas procesā. Vispiemērotākā šķiedru izgatavošanas tehnoloģiskā procesa atrašana ļaus izstrādāt jaunas šķiedras un radīs iespēju to izmantot kā dispersu stiegrījumu betonā.

Nodaļa ir sadalīta, kā arī testu rezultāti apspriesti astoņās apakšnodaļās: (1) Oglekļa mikrošķiedru un oglekļa nanocauruļu (*MWCNT*) ietekme uz taisnas tērauda šķiedras izraušanas uzvedību; (2) Šķiedras iedziļinājuma ietekme uz izraušanu; (3) Šķiedras leņķa konfigurācijas ietekme uz izraušanas uzvedību; (4) Betona matricas stiprības ietekme uz vienas šķiedras

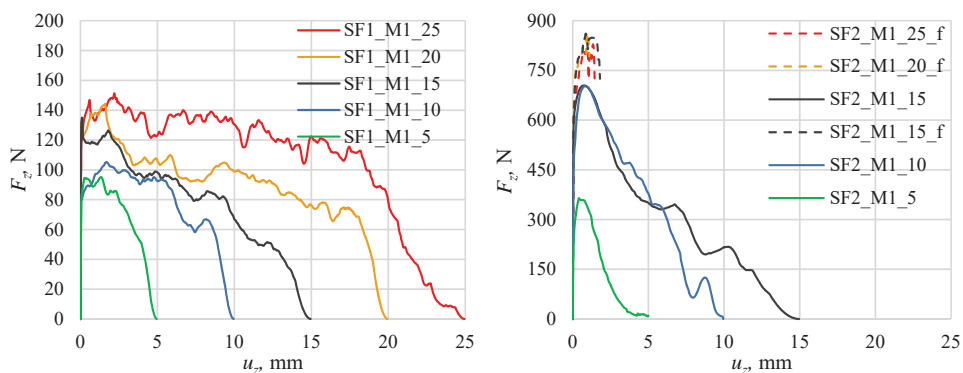
izraušanu; (5) Gludas kompozītās šķiedras diametra ietekme uz vienas šķiedras izraušanu; (6) Kompozītās šķiedras formas un virsmas ietekme uz izraušanu; (7) Sloģošanas ātruma ietekme uz izraušanas uzvedību; (8) Šķiedru plīšanas veidi.

Oglekļa mikrošķiedru un oglekļa nanocauruļu (MWCNT) ietekme uz taisnas tērauda šķiedras izraušanas uzvedību

Šķiedru izraušanas likņu un elektronu mikroskopa attēlu analīze liecina, ka MWCNT nesniedz ievērojamu uzlabojumu betona matricai – šķiedru kanāls ir iekļājis ar oglekļa nanocauruļiem un bez tām betona maisījumā. Betona matricas plaisāšana notiek, jo tērauda šķiedru ģeometrija ir stabila, šķiedrai ir augsts elastības modulis, bet betona matrica sarūk apkārt šķiedrai un plīst, kad pārsniedz robeždeformāciju. No tā var secināt, ka stieģrošanas hierarhija nav pietiekama, ja mikrolīmenī tiek izmantotas tikai oglekļa mikrošķiedras un nanolīmenī MWCNT. Starp abiem oglekļa stieģrojuma (mikrošķiedras un oglekļa nanocaurules) izmēriem ir milzīga atšķirība. Arī īsu oglekļa šķiedru (mikrošķiedru) pievienošana betona maisījumos nesniedz pozitīvus rezultātus. Eksperimentu rezultāti parāda, ka augstākos rezultātus vienas tērauda šķiedras izraušanas testos (dziļums – 25 mm, konfigurācijas leņķis 0°, diametrs – 0,79 mm) var sasniegt, kombinējot mikrošķiedras ar MWCNT un īpaši smalku pildvielu mikro un nanolīmenī – silīcija dioksīdu. Tomēr pozitīvais efekts dod tika aptuveni 8 % augstāku maksimālo izraušanas spēku un par 8 % lielāku izraušanas enerģiju.

Šķiedras dziļuma ietekme uz izraušanu

Vienas šķiedras izraušanas testi ir veikti divām tērauda šķiedrām (SF1, SF2), trim kompozītajām oglekļa šķiedrām (CF1, CF2 un CF3) un kompozītajai stikla šķiedrai (GF2). Visi minētie šķiedras izraušanas testi tika sistemātiski veikti betona matricās M1, M2 un M3. Citu šķiedru apakštipu rezultāti (CF1-A, CF1-B, CF2-A un CF2-B) ir izklāstīti promocijas darba 1. pielikumā. 5. nodaļā prezentētie rezultāti atspoguļo arī šķiedru izraušanas sakarības līdzīgajām šķiedrām CF1-A, CF1-B, CF2-A un CF2-B (vienādu formu un virsmu, dažādu diametru).

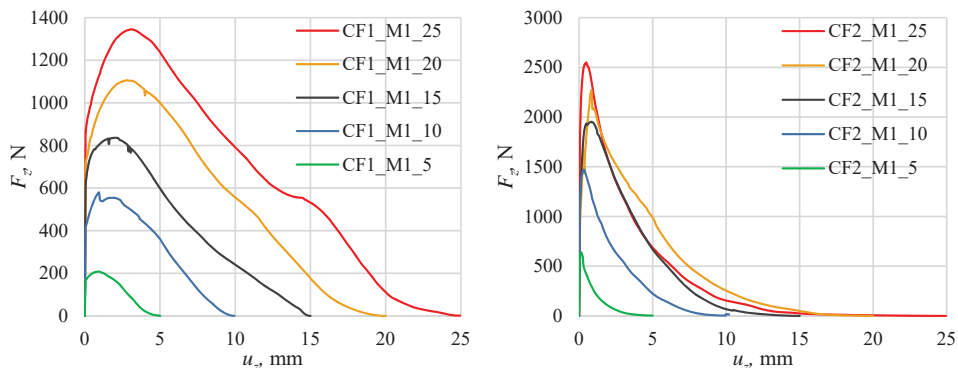


2.14. att. SF1 un SF2 vidējās vienas šķiedras izraušanas uzvedības līknes, konfigurācijas: 25, 20, 15, 10 un 5 mm dziļumā.

Visi sniegtie rezultāti attiecas uz šķiedru konfigurāciju: 5, 10, 15, 20 un 25 mm dziļumā, izraušanas spēka 0° leņķī. Promocijas darba kopsavilkumā ir parādīti tikai vienas šķiedras

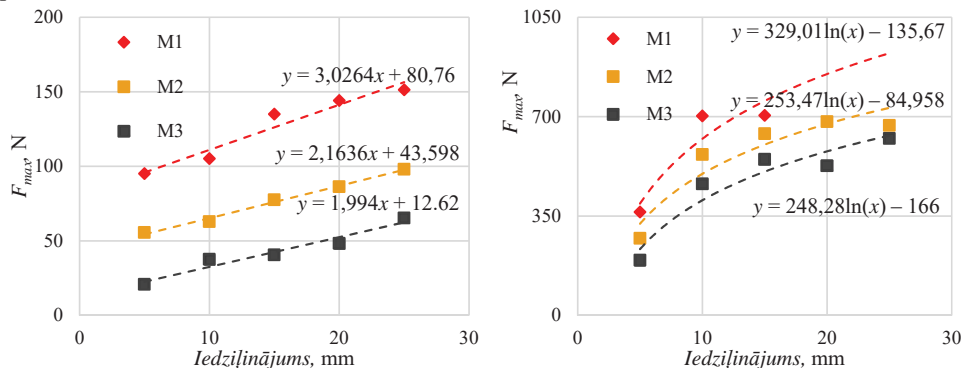
izraušanas līkņu piemēri ar dažādu iegulumu dziļumu. Tērauda šķiedras SF1, SF2 rezultāti ar betona matricu M1 ir atspoguļoti 2.14. attēlā.

Kompozīto šķiedru CF1 un CF2 izraušanas rezultātu piemēri betona matricā M1 atspoguļoti 2.15. attēlā.



2.15. att. Vidējās vienas šķiedras izraušanas uzvedības līknes CF1 un CF2, konfigurācijas: 25, 20, 15, 10 un 5 mm dziļumā.

No katra šķiedru dziļuma iegūtās maksimālā izraušanas spēka vērtības ir apkopotas un attēlotas trim betona matricām M1, M2 un M3. 2.16. attēlā pa kreisi redzams, ka starp taisnas, gludas tērauda šķiedras (SF1) maksimālo izraušanas spēku un šķiedru konfigurācijas dziļumu pastāv lineāra sakarība.

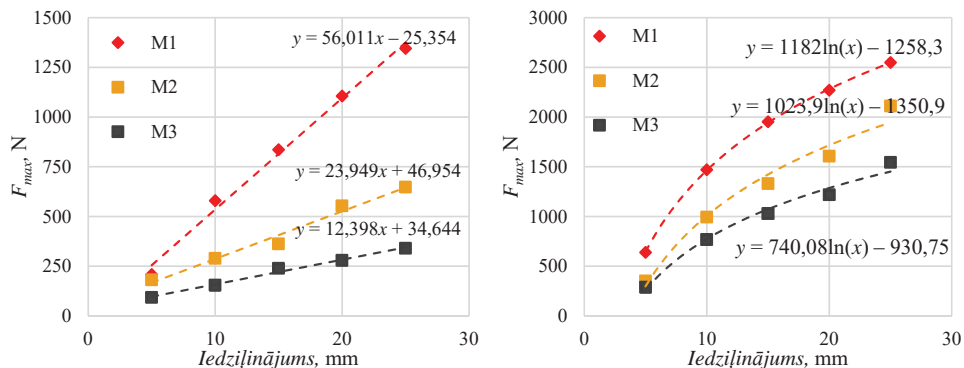


2.16. att. Vienas gludas tērauda šķiedras SF1 un viļņotas SF2 (no kreisās puses) maksimālais izraušanas spēks atkarībā no šķiedru dziļuma (5–25 mm) trijās betona matricās: M1, M2 un M3.

2.16. attēlā pa labi redzams, ka pastāv vienmērīga logaritmiska sakarība starp gludu, viļņotu tērauda šķiedru (SF2) maksimālo izraušanas spēku un šķiedru konfigurācijas dziļumu. Izraušanas pretestība betona matricā M1 nepārsniedz 700 N šķiedru stiepes stiprības dēļ – šķiedras viļņotā forma rada pārāk lielu enkurošanu, šķiedra neraujas ārā no betona, bet plīst.

2.17. attēlā pa kreisi redzams, ka pastāv lineāra attiecība starp gludas oglekļa šķiedras (CF1) maksimālo izraušanas spēku un šķiedru konfigurācijas dziļumu. Atšķirībā no gludās SF1 šķiedras, oglekļa šķiedrai (CF1) sakarība starp dziļuma konfigurāciju un maksimālo izraušanas

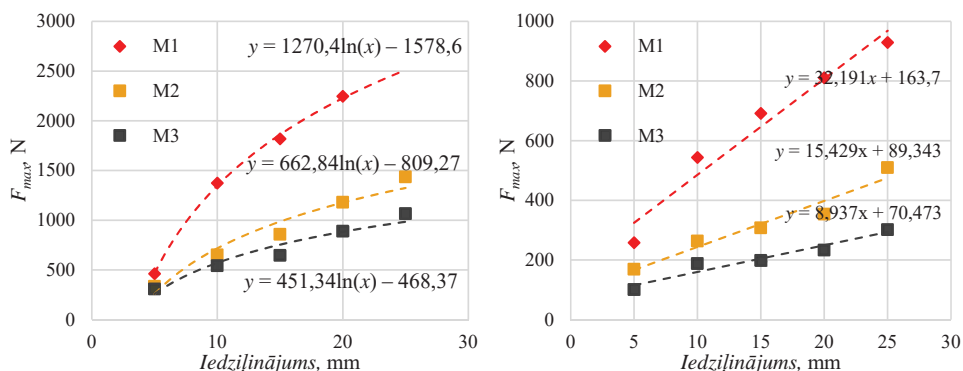
paralēla starp betona matricām. Betona matricai kļūstot stiprākai, šķiedras maksimālais izraušanas spēks palielinās straujāk, pieaugot šķiedru konfigurācijas dziļumam. Šķiedras izraušanas maksimālā spēka palielinājuma sakarība ir gandrīz divreiz straujāka M2 betonā, salīdzinot ar M3, un M1 betonā, salīdzinot ar M2.



2.17. att. Vienas kompozītās šķiedras CF1 un CF2 (no kreisās puses) maksimālais izraušanas spēks atkarībā no šķiedru dziļuma (5–25 mm) betona matricās: M1, M2 un M3.

Attēlā pa labi redzams, ka pastāv logaritmiska sakarība starp raupjas virsmas oglekļa šķiedras (CF2) maksimālo izraušanas spēku un šķiedru konfigurācijas iegulšanas dziļumu. Vidējie izraušanas izliekumi ir mazāk vienveidīgi un spēka samazināšanas posmā pārklājas ar citām šķiedru dziļuma konfigurācijām. Tas ir saistīts ar šķiedras virsmu, kur veidojas raupjš ārējais slānis, pievienojot epoksīdsveķiem smalkus smilšu graudus. Šķiedru virsmas raupjums ar graudiem nav pilnīgi vienveidīgs, un ražošanas process rada graudu pārsātināšanos un defektus daļējos šķiedras virsmas laukumos.

2.18. attēlā pa kreisi redzams, ka starp rievotu oglekļa šķiedru (CF3) maksimālo izraušanas spēku un šķiedru konfigurācijas iegulšanas dziļumu pastāv logaritmiska sakarība.



2.18. att. Vienas kompozītās šķiedras CF3 un GF2 (no kreisās puses) maksimālais izraušanas spēks atkarībā no šķiedru dziļuma (5–25 mm) betona matricās: M1, M2 un M3.

Oglekļa šķiedrai (CF3) ir līdzīgs ievērojams izraušanas maksimālā spēka pieaugums matricā M1, salīdzinot ar M2 un M3, līdzīgi kā gludai oglekļa šķiedrai (CF1). To var izskaidrot

ar šķiedras, epoksīda slāņa un betona matricas izraušanas mehānismu. Uz oglekļa šķiedras CF1, un CF3 virsmas ir plāns epoksīda slānis atšķirībā no CF2, kurai ir ievērojami biežāks epoksīda slānis ar smilšu graudiem, kas enkuro šķiedru betona matricā. Šķiedrām CF1 un CF3 ir līdzīgi starpslāņu (starp šķiedru un betonu) atdalīšanās un izraušanās mehānismi.

2.19. attēlā pa labi redzams, ka pastāv lineāra attiecība starp gludu stikla šķiedru (GF2) maksimālo izraušanas spēku un šķiedru konfigurācijas dziļumu.

#### Šķiedras leņķa konfigurācijas ietekme uz izraušanas uzvedību

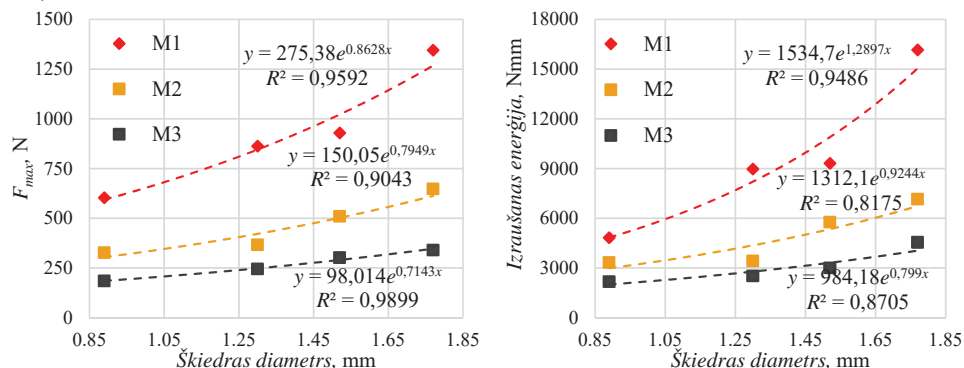
Vienas šķiedras izraušanas rezultāti (šķiedras, kas konfigurētas leņķī) prezentēti četrām kompozītām šķiedrām – CF1, CF1-B, CF2-B un GF2. Šķiedras ir konfigurētas piecos dažādos leņķos, sākot no 0, palielinot par 15° – 0, 15, 30, 45 un 60. Testi ar lielākiem konfigurācijas leņķiem netika veikti, jo lielais slīpums pret plaisas virsmu sarauj šķiedras. Gludās kompozītās šķiedras CF1, CF1-B, GF2 tika iedziļinātas betonā 20 mm dziļumā, bet raupjas virsmas šķiedra GF2-B tika iedziļinātas 15 mm dziļumā. Dziļums tika samazināts par 5 mm sakarā ar iespējamo šķiedru saraušanos (nespēju izrauties no betona matricas).

#### Betona matricas stiprības ietekme uz vienas šķiedras izraušanu

Kompozīto šķiedru konfigurācija tika iestatīta 0° leņķī pret izraušanas spēku un 25 mm iegulšanas dziļumu, lai noskaidrotu betona matricas stiprības ietekmi uz vienas šķiedras izraušanas uzvedību. Lai izpētītu betona stiprības ietekmi uz izraušanu, tika izmantotas kompozītās oglekļa šķiedras ar gludu virsmu CF1, CF1-A, CF1-B un raupju virsmu CF2, CF2-A, CF2-B, kā arī pītā kompozītā oglekļa šķiedra CF3 un gludā stikla šķiedra GF2.

#### Gludas kompozītās šķiedras diametra ietekme uz vienas šķiedras izraušanu

Kompozītās šķiedras ar gludu virsmu tika izvēlētas, konfigurācija tika uzstādīta 0° leņķī pret izraušanas spēku un 25 mm dziļumā, lai izpētītu šķiedru diametra ietekmi uz vienas šķiedras izraušanas uzvedību. Tika izmantotas kompozītās oglekļa šķiedras ar gludu virsmu CF1, CF1-A, CF1-B un kompozītā stikla šķiedra GF2. Pētījums tika veikts trīs betona matricās M1, M2 un M3.



2.19. att. Maksimālais izraušanas spēks un enerģija atkarībā no gludās kompozītu šķiedras (CF1, CF1-A, CF1-B un GF2) diametra trijās betona matricās: M1, M2 un M3.

2.19. attēlā atspoguļota maksimālā izraušanas spēka un šķiedru pilnīgas izraušanas enerģija atkarībā no šķiedru diametra. No abiem attēliem var redzēt, ka pastāv sakarības

(eksponenciālas) starp diametru un maksimālo šķiedru izraušanas spēku, kā arī diametru un pilnīgu šķiedras izraušanas enerģiju.

#### Kompozītās šķiedras formas un virsmas ietekme uz izraušanu

Tika izvēlētas trīs kompozītās oglekļa šķiedras CF1, CF2, CF3 un kompozītā stikla šķiedra GF2, lai izpētītu dažādo formas un virsmas ietekmi uz vienas šķiedras izraušanas uzvedību no trim betona matricām. 2.20. attēlā atspoguļotas šķiedras ar atšķirīgu formu un virsmu.



2.20. att. Kompozītās oglekļa un stikla šķiedras ar gludu, raupju virsmu un viļņotu formu: CF1, CF2, CF3 un GF2 (no kreisās puses).

#### Sloģošanas ātruma ietekme uz izraušanas uzvedību

Rezultāti parāda, ka slodzes ātrumam nav būtiskas ietekmes uz gludu kompozīto oglekļa šķiedru CF1 vienas šķiedras izraušanas uzvedību diapazonā no 1–20 mm/min. Tādēļ var secināt, ka šķiedru izturība fibrobeta sijās ir līdzīga tai, kas tiek pētīta vienas šķiedras izraušanas testa laikā. Tādā veidā vienas šķiedras izraušanas uzvedība un spēka-pārvietojuma līknes var tikt izmantotas, lai paskaidrotu fibrobeta mehānismus.

#### Šķiedru izraušanas un sabrukuma veidi

Vienas šķiedras izraušanas vai plīšanas veidu attēli pirms un pēc izraušanas tiek apskatīti promocijas darba apakšnodaļā. Visi vienas šķiedras izraušanas testi ir apkopoti divās galvenajās grupās: izraušanas dažādos dziļumos, 0° leņķa konfigurācijā attiecībā pret testēšanas spēku (1. grupa) un izraušanas 15 mm līdz 25 mm ieguluma dziļumā ar 15–60° leņķa konfigurāciju (2. grupa). Šķiedru plīšanas un izraušanas uzvedība promocijas darbā ir apskatīta abām 1. un 2. grupām atsevišķi, taču darba kopsavilkumā ir aprakstīti tikai atšķirīgie veidi.

Šķiedras izraušana – šis parauga sabrukuma veids tiek novērots galvenokārt kompozītām šķiedrām ar gludu virsmu un salīdzinoši plānu ārējo epoksīda slāni. Šķiedras ārējā virsma ir bez ievērojamiem defektiem, bet virsmas skrāpējumi ir redzami visas šķiedras garumā (CF1, CF1-A, CF1-B, CF3 betona M2 un M3 matricās, GF2). Daži šķiedras izraušanas testi atklāja, ka šķiedras virsmai piemīt neliels vilnains izskats, kas rodas, notiekot berzei starp šķiedras ārējo epoksīda slāni un betona matricas kanālu. Berze iekšējā slānī sabojā salīdzinoši mīksto epoksīda sveķu slāni (CF1-B betona M2 matricā).

Šķiedru izvilksana no epoksīda sveķu apvalka – šis sabrukuma veids ir novērots raupjas virsmas kompozītām šķiedrām ar salīdzinoši biezu epoksīda un smilšu graudu ārējo slāni (CF2, CF2-A, CF2-B, GF3 betona M3 matricā). Šķiedras ārējais slānis parasti tiek nolobīts šķiedras izraušanas laikā, un kompozītai šķiedrai ir vairāki virsmas bojājumi, tomēr šķiedru normālpavedieniem nav nekādu bojājumu, un šķiedras stiprība netiek ietekmēta. Šajā šķiedru izraušanas veidā vajākā vieta ir salīdzinoši biežais epoksīda slānis. Daļa no šķiedras ārējā slāņa, kā arī apvalks, ir iestiprināti betona matricā, un šķiedru kustība tiek nodrošināta ar epoksīda slāņa deformāciju un plīšanu.

Šķiedras saslāņošanās un izraušana – šis sabrukuma veids pārsvarā ir novērojams kompozītām šķiedrām ar gludu virsmu un 30–60° leņķi (CF1-B betona M2 un M3 matricās). Šķiedras saslāņošanās notiek izraušanas laikā šķiedras iekšējo defektu un liela leņķa konfigurācijas dēļ. Iekšējie defekti pārsvarā izgatavošanas procesā – šķiedras pavedieni nav pilnībā piesūcināti ar epoksīda sveķiem vai ir gaisa ieslēgums. Lielā leņķī konfigurētās šķiedras tiek pakļautas nepārtrauktai liecei, tādējādi ir lielāka iespējamība atslāņoties. Šķiedru izraušanas pretestība un šķiedras stingums ievērojami samazinās brīdī, kad šķiedras pavediens saslāņojas un atdalās divās vai vairākās daļās.

Šķiedras sadalīšanās un plīšana – šis sabrukuma veids tiek novērots kompozītām šķiedrām ar gludu virsmu un lielu leņķa konfigurāciju (CF1-B betona M2 matricā). Šķiedras sadalīšanās notiek tādu pašu iemeslu dēļ kā gadījumā ar izraušanu, bet šoreiz šķiedra plīst, beržoties gar betona kanāla šķautni. Šķiedra, atrodoties izraušanas procesā, tiek papildus bojāta beržoties, un šie bojājumi rodas gar šķiedras vienu pusi. Šķiedras plīsums notiek brīdī, kad bojājumu skaits palielinās un izraušanas spēks pārsniedz šķiedras stiepes stiprību;

Šķiedras pārrāvums – šis šķiedras sabrukuma veids novērojams kompozītām šķiedrām ar raupju un gludu virsmu betona matricās ar augstu stiprību (CF1-B betona M1 matricā, CF2-B). Kompozītās šķiedras ar raupju virsmu tiek pārlieku noenkurotas un papildu bīde, kas rodas no šķiedras konfigurācijas leņķa, rada pārrāvumu. Tas pats notiek ar gludo šķiedru augstas stiprības betonā. Promocijas darba 5.4. apakšnodaļā atrodama informācija par to, ka betona matricas stiprība palielina izraušanas pretestību un šķiedru iestiprināšanos gludu šķiedru gadījumā, kas ir izteiktākas, salīdzinot ar citām kompozītām šķiedrām, tādēļ pat gludas šķiedras ar 15–60° leņķa konfigurācijām rada pilnīgu šķiedras pārrāvumu.

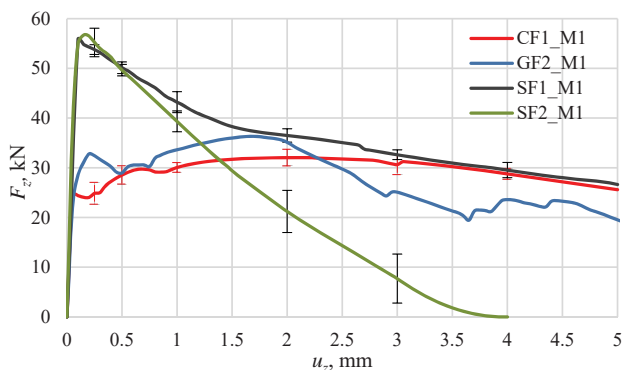
**6. nodaļā** tiek analizēta fibrobetona lieces nestspēja. Kompozīto šķiedru CF1, GF1 un GF2 siju paraugi (tilpuma dozāciju  $V_f = 1,5\%$ ) tika izgatavoti, lai izpētītu betona uzvedību liecē. Lai novērtētu un salīdzinātu kompozīto šķiedru un zināmo šķiedru veiktspēju, tika izgatavoti un testēti arī fibrobetona paraugi ar taisnām (SF1) un viļņotām tērauda šķiedrām (SF2). Betona matricas M1, M2 un M3 tika samaisītas saskaņā ar 2. nodaļā aprakstīto maisīšanas procedūru. Katrā solī tika izgatavots 7 litru betona maisījums, tika mērīta konsistence un ņemti spiedes stiprības paraugi. Katrā maisīšanas stadijā tika izgatavotas betona sijas ar izmēru 100 mm × 100 mm × 400 mm. Katram šķiedru veidam un betona matricai tika sagatavoti četri siju paraugi.

Šķiedru ģeometrija un aprēķinātā dozācija – kilogrami uz kubikmetru – ir attēloti 2.5. tabulā. Ir skaidri redzams, ka kompozītās šķiedras ir nepieciešamas 4,5–7 reizes mazāk to mazākā blīvuma dēļ, salīdzinot ar tēraudu. Kompozīto šķiedru svars CF1, GF1 ir tikai 15 % un



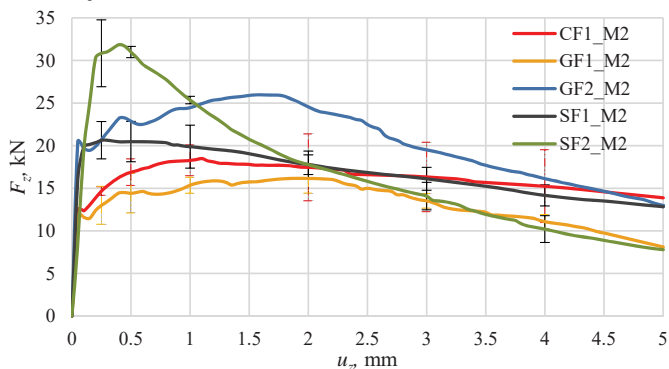
GF2 – 22 % no tērauda šķiedru svara, lai gan dozācija ir tāda pati – 1,5 % tilpuma. Šķiedras ar mazāku blīvumu ir vairāk piemērotas ļoti plūstošiem betona maisījumiem, un pastāv mazāka iespēja tām noslāņoties. Šķiedru dozācijas ar mazāku svaru arī mazina slodzi uz iekārtām, kad šķiedras tiek ievadītas betona maisītājā, sūkņos vai betonēšanas procesā.

Fibrobetona paraugi tika pārbaudīti četrus punktu liecē. Tika mērīts spēks un izliece laiduma vidū. Testēšana tika veikta ar slodzes ātrumu 0,25 mm/min. Vidējās spēka-izlieces līknes ir attēlotas 2.21., 2.22 un 2.23. attēlā.



2.21. att. Sijas (betona matrica M1) vidējās spēka un izlieces līknes liecē: CF1, GF1, GF2, SF1 un SF4.

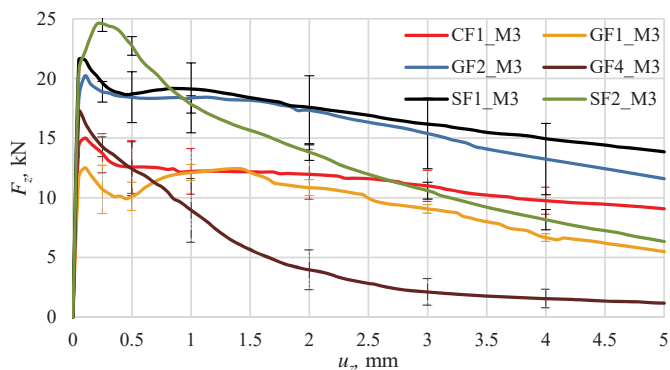
Kompozīto oglekļa šķiedru (CF1) fibrobetons rāda deformāciju nostiprināšanās uzvedību ar 1,5 tilpuma % dozāciju.



2.22. att. Sijas (betona matrica M2) vidējās spēka un izlieces līknes liecē: CF1, GF1, GF2, SF1 un SF2.

Visas trīs kompozītās šķiedras uzrāda deformāciju nostiprināšanās uzvedību betona matricā M2. Lai arī tērauda šķiedras palielina betona stiepes izturību liecē, slodze pakāpeniski samazinās pēc pirmās plaisas rašanās taisnā tērauda šķiedrā SF1 un strauji samazinās SF2.

Visi testētie fibrobetona paraugi (ar M3 matricu) var tikt kvalificēti kā materiāls ar deformāciju atlaidināšanos uzvedību liecē. GF4 un SF2 – šķiedru veidiem ir liela enkurošanās betonā (viļņota šķiedra un virsma). Vienas šķiedras izraušanas testos SF2 uzrāda augstu izraušanas pretestību, un kompozītā šķiedra GF4 neraujas ārā no betona, bet plīst.



2.23. att. Sijas (betona matrica M3) vidējās spēka un izlieces līknes liecē: CF1, GF1, GF2, SF1 un SF2.

Šķiedras ģeometrija (pīti stikla šķiedras pavedieni) un viļņota virsma rada lielu šķiedras enkurošanos betonā. Šķiedru stiepes stiprība nav salāgota ar enkurošanās spēku betona matricā, tādēļ pēc pirmās plaisas betona sijas paraugā kompozītās šķiedras GF4 pakāpeniski viena pēc otras pārraujas, un sijas nestspēja strauji samazinās.

2.5. tabula

Diametrs, dozācija un šķiedru skaits plaisas plaknē

Šķiedras veids	Diametrs, mm	$L/d$ attiecība	Dozācija, $\text{kg/m}^3$	Šķiedru skaits				$L/d$
				M1	M2	M3	Vid.	
CF1	1,77	28,3	16,9	54,5	37,5	43,7	45,2	28,3
GF1	2,18	22,9	17,9	26,3	25,8	28,5	26,8	22,9
GF2	1,52	32,9	26,2	42,3	39,8	39,5	40,5	32,9
GF4	1,88	27,66	19,7	–	–	37	–	26,6
SF1	0,79	63,4	117	146	155	155	152	63,4
SF2	1,0	50	117	117	113	125	118,3	50

Pēc lieces testu veikšanas siju paraugi tika pilnībā sadalīti, lai saskaitītu šķiedras plaisā, kas nodrošināja pēcplaisāšanas pretestību. 2.5. tabulā redzams, ka kompozīto šķiedru skaits ir ievērojami mazāks nekā tērauda šķiedru skaits. Kompozīto CF1 un GF2 šķiedru skaits plaisu plaknē ir aptuveni 3,5–3,8 reizes mazāks nekā SF1. Acīmredzams ir arī tas, ka lielāka garuma un diametra ( $L/d$ ) attiecība nodrošina lielāku šķiedru skaitu plaisas plaknē. Šķiedru skaits plaisas plaknē ir tieši saistīts ar lieces uzvedību. Paraugi ar lielāku šķiedru skaitu plaisas plaknē uzrāda augstāku lieces pretestību. Kompozītās šķiedras GF2 būtiska priekšrocība ir neliels šķiedru daudzums (ap 40,5), kas rada relatīvi lielu lieces pretestību. Liels šķiedru daudzums pasliktina betona reoloģiskās īpašības. Lai izmantotu augstāku šķiedru dozāciju, pieaug prasības betona maistījuma īpašībām (plūstamībai) un stabilitātei.

### 3. SECINĀJUMI

1. Tika izgatavotas kompozītās oglekļa un stikla, kā arī hibrīdās šķiedras ar diametru 0,89–2,76 mm. Tika testēti dažādi izgatavošanas paņēmieni, lai iegūtu gludas un raupjas šķiedru virsmas, kā arī viļņota forma. Tika noteikta vispiemērotākā izgatavošanas tehnoloģija, un pieteikts izgudrojuma patents, kas sniedz iespēju saražot gludas kompozītās šķiedras ar dažādu diametru un garumu, kā arī ar raupju virsmu, ko panāk ar smilšu graudiņu pievienošanu šķiedras ārējai virsmai. Pētās šķiedras ir iespējams izgatavot industriālā procesā, pateicoties nosacīti vienkāršajai pīšanas procesa automatizēšanai.

2. Oglekļa nanocauruļu (*MWCNT*) un oglekļa mikrošķiedru izmantošana nesniedz gaidāmo rezultātu. Eksperimenti atklāja, ka *MWCNT* ir pārāk mazas un oglekļa mikrošķiedras pārāk lielas, lai hierarhiski stiegtu betonu. Pastāv milzīga atšķirība *MWCNT* un mikrošķiedru izmēros, un stiegrošana nav efektīva – *SEM* attēlos bija novērojamas mikroplaisas šķiedras kanālā. Turklāt vienas šķiedras izraušanas pretestības pieaugums bija nenozīmīgs un paraugos sasniedza tikai 8 % maksimālo izraušanas spēka un enerģijas pieaugumu, kombinējot *MWCNT* un oglekļa mikrošķiedras.

3. Taisnās tērauda šķiedras (SF1) izraušanas pretestība ir ļoti atkarīga no betona matricas stiprības. Vienas šķiedras izraušanas maksimālais spēks ir divreiz lielāks betona matricā M2, salīdzinot ar M3 un salīdzinot M1 ar M2. Izraušanas pretestība betona matricā M2 un M3 pieaug līknes galā (pie 15–20 mm pārvietojuma), ko varētu izskaidrot ar betona putekļu un graudiņu korķa veidošanos izraušanas un kanālu drupšanas procesā. Izraušanas spēka pazemināšanās izraušanas procesā ir lēnāka betona matricā ar augstāku stiprību.

4. Viļņotai tērauda šķiedrai (SF2) betona matricā M1 ir ievērojama enkurošanās – 10, 15 mm iedziļinājums rada vairāk nekā 700 N maksimālo izraušanas spēku. Visas šķiedras, kas tika izvilktas no betona matricas M1 un M2, tika iztaisnotas. Šķiedrām betona matricā M3 ir neliela ietekme no dziļuma diapazonā 15–25 mm, jo lielākā daļa šķiedru nedaudz saglabāja savu viļņoto formu – šķiedras tika deformētas, un betona kanāls bojāts (betona zemās stiprības dēļ).

5. Kompozitajām oglekļa un stikla šķiedrām ar gludu virsmu (CF1, CF1-A, CF1-B un GF2) novērojams straujš spēka pieaugums, līdz šķiedra atslāņojas no betona matricas, un mērens pieaugums turpinās līdz maksimālā spēka sasniegšanai. Gludajām kompozītām šķiedrām novērojama gandrīz lineāra spēka samazināšanās pēc maksimālā spēka sasniegšanas visās dziļuma konfigurācijās. Gludās kompozītās šķiedras maksimālajam izraušanas spēkam ir lineāra atkarība no dziļuma konfigurācijas.

6. Kompozitajām oglekļa šķiedrām ar raupju virsmu (CF2, CF2-A, CF2-B) novērojams straujš spēka pieaugums līdz pat maksimālā izraušanas spēka sasniegšanai. Izraušanas spēka samazināšanās pēc virsotnes sasniegšanas notiek ļoti strauji un pakāpeniski kļūst mērena.

7. Kompozitajai oglekļa šķiedrai CF3 ar viļņainu formu un gludu virsmu ir līdzīga izraušanas uzvedība CF2 šķiedru grupai. Tai novērojama strauja izraušanas spēka palielināšanās līdz maksimālā spēka sasniegšanai, kam seko straujš kritums. Tomēr spēka palielināšanās līkne līdz virsotnei nesniedz iespēju noteikt šķiedras atslāņošanās brīdi. Tas ir saistīts ar šķiedras pīto uzbūvi, garenvirziena deformācijas var rasties šķiedras stiepes laikā.

Kompozīto šķiedru nav iespējams izraut no betona matricas M1 ar dziļumu 20–25 mm; šķiedra citās matricās atspoguļo konsekventu šķiedras izraušanas spēka atkarību no dziļuma.

8. Kompozītās šķiedras ar gludu virsmu uzrāda lielu pretestību pret izraušanu 15–30° konfigurācijās pret spēku, šāda šķiedru orientācija uzrāda ievērojami lielāku pretestību, salīdzinot ar 0°, 45° ir līdzīgi rādījumi, un 60° ir zemāka pretestība. Šķiedras ar mazāku diametru (CF1-B) tiek pārrautas gandrīz visās leņķu konfigurācijās betona matricā M1 zemas bīdes pretestības dēļ. Testu rezultāti parādīja, ka šķiedras iekšējie bojājumi ietekmē izraušanas pretestību un ir vairāk pakļauti šķiedras gareniskai atslāpošanai. Kompozītās šķiedras ar raupju virsmu nav tik izturīgas pret izraušanu leņķu konfigurācijās.

9. Kompozītām šķiedrām ar gludu virsmu izraušanas pretestība ir atkarīga no betona matricas stiprības. Vienas šķiedras izraušanas pretestība ir lielāka augstākas stiprības betona matricā. Šķiedrām CF1, CF1-A un CF1-B ir 1,85–2,35 reizes lielāks maksimālais izraušanas spēks betona matricā M1 nekā M2 un 1,5–1,9 reizes lielāks, salīdzinot M2 ar M3. Kompozītām šķiedrām ar raupju virsmu izraušanas spēks ir atkarīgs arī no matricas stiprības, bet ne tik lielā mērā kā gludām kompozītām šķiedrām. CF2 ir 1,17–1,3 reizes lielāks maksimālais izraušanas spēks betona matricā M1, salīdzinot ar M2 un salīdzinot M2 ar M3.

10. Kompozītām šķiedrām ar gludu virsmu ir eksponenciāla attiecība starp maksimālo izraušanas spēku un šķiedras diametru. Lielāks šķiedras diametrs (0,87–1,77 mm diapazonā) nodrošina augstāku maksimālo izraušanas spēku. Šī attiecība pastāv visās betona matricās, tomēr matricai ar augstāku stiprību ir augstāks maksimālā spēka pieaugums, šķiedras diametram palielinoties.

11. Kompozītās šķiedras formai un virsmai ir ievērojama ietekme uz šķiedras izraušanas uzvedību. Salīdzinājumā ar raupju virsmu šķiedrām, gludajām šķiedrām ir ievērojami zemāks maksimālais spēks visās matricās, tomēr betona matricā M1 tam ir vislielākā izraušanas enerģija, lai izrautu visu šķiedru. Kompozītām šķiedrām ar raupju virsmu ir lielāks izraušanas spēks visās trīs matricās, bet pilnīga šķiedras izņemšanas enerģija ir vienāda ar CF3 viļņotas formas M2 matricā un vislielākā starp šķiedrām M3 matricā. Kompozītām šķiedrām ar gludu virsmu ir labāka uzvedība augstas stiprības betona matricās, un šķiedras ar raupju virsmu ir piemērotākas zemākas stiprības betona matricām.

12. Tika novēroti pieci dažādi šķiedru izraušanas un sabrukuma veidi: (1) šķiedras izraušana, (2) šķiedras saslāpošanās un izraušana, (3) šķiedras izvilkšana no epoksīdsveķu apvalka, (4) šķiedras saslāpošanas un plīšana, kā arī (5) šķiedras pārrāvums.

13. Fibrobeta sijas uzrāda deformāciju nostiprināšanās uzvedību liecē ar kompozītajām šķiedrām CF1, GF2 un betona matricu M1, M2. Betona paraugu ar matricu M1 un stikla šķiedru GF1 plīst ļoti trausli šķiedras nevienmērīgas formas dēļ, kas nodrošina šķiedrai lielāku enkurošanos par stiepes stiprību. Visām kompozītajām šķiedrām ir ļoti zema L/d attiecība un šķiedru skaits plaisu plaknē, salīdzinot ar tērauda šķiedrām ar tādu pašu tilpuma dozāciju.

14. Betona matricas stiprībai ir liela ietekme uz fibrobeta siju uzvedību liecē. Augstas stiprības betona matricām jābūt stiegrotām ar augstas stiprības šķiedrām, lai iegūtu uzticamu materiālu un deformāciju nostiprināšanās uzvedību; zemas stiprības betona matricas jāstiegro ar šķiedrām, kas ir ļoti izturīgas pret izraušanu (augstu izraušanas pretestību). Rezultāti ar trim betona spiedes stiprības matricām ļauj interpolēt starprezultātus.

15. Šķiedru virsma var tikt izstrādāta, lai pielāgotu vienas šķiedras izraušanas pretestību un stiepes stiprību, lai panāktu vēlamu fibrobetona uzvedību liecē.

## 4. LITERATŪRAS SARAKSTS

1. Gettu, R., Gardner, D. R., Saldívar, H., Barragán, B. E. Study of the distribution and orientation of fibers in SFRC specimens. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions* 38, 2005, 31–37.
2. Herrmann, H., Pastorelli, E., Kallonen, A., Suuronen, J. Methods for fibre orientation analysis of X-ray tomography images of steel fibre reinforced concrete (SFRC). *Journal of Materials Science*, 51 (8), 2016, 3772-3783. doi:10.1007/s10853-015-9695-4.
3. Eik, M., Puttonen, J., Herrmann, H. An orthotropic material model for steel fibre reinforced concrete based on the orientation distribution of fibres. *Composite Structures*, 121, 2015, 324-336. doi:10.1016/j.compstruct.2014.11.018.
4. Péter, J. K. Determining the orientation of steel and synthetic fibres in fibre reinforced concrete. [Acél és szintetikus szálak orientációjának meghatározása szálerősíté su betonban] *Epites-Epiteszettudomany*, 46 (1–2), 2018, 221–238. doi:10.1556/096.2017.007.
5. Zhang, S., Liao, L., Song, S., Zhang, C. Experimental and analytical study of the fibre distribution in SFRC: A comparison between image processing and the inductive test. *Composite Structures*, 188, 2018, 78–88. doi:10.1016/j.compstruct.2018.01.006.
6. Kim, H., Kang, D., Oh, S. J., Joo, C. Nondestructive evaluation on dispersion of steel fibers in UHPC using THz electromagnetic waves. *Construction and Building Materials*, 172, 2018, 293–299. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.03.238.
7. Lim, S., Raju, R. A., Matsuda, M., Okamoto, T., Akiyama, M. Structural behavior prediction of SFRC beams by a novel integrated approach of X-ray imaging and finite element method. *Construction and Building Materials*, 170, 2018, 347–365. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.03.079.
8. Mínguez, J., González, D. C., Vicente, M. A. Fiber geometrical parameters of fiber-reinforced high strength concrete and their influence on the residual post-peak flexural tensile strength. *Construction and Building Materials*, 168, 2018, 906–922. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.02.095.
9. Löfgren, I. and Gylltoft, K.: In-situ cast concrete building: Important aspects of industrialised construction, *Nordic Concrete Research*, 1/2001, pp. 61–80.
10. Beddar, M. Fibre-reinforced concrete: Past, present and future. *Concrete (London)*, 38 (4), 2004, 47–49.
11. Naaman, A., Wongtanakitcharoen, T. and Hauser, G., Influence of different fibers on plastic shrinkage cracking of concrete, *ACI Mater J*, vol 32, 2, pp. 102–107, 2005.
12. Pereira, E. B., Fischer, G. and Barros, J. A. O., Direct assessment of tensile stress-crack opening behavior of Strain Hardening Cementitious Composites (SHCC). *Cement and Concrete Research*, 42, pp., 2012, 834–846.
13. Pereira, E. B., Fischer, G., Barros, J. A. O. Direct assessment of tensile stress-crack opening behavior of strain hardening cementitious composites (SHCC). *Cement and Concrete Research*, 42(6), 2012, 834–846.
14. Fischer, G., Lárusson, L. H., Jönsson, J. Prefabricated floor and roof panels with engineered cementitious composites (ECC). Paper presented at the Proceedings of the 2009

- Structures Congress – Don't Mess with Structural Engineers: Expanding our Role, 2009, 2199–2208. doi:10.1061/41031(341)241.
15. Fischer, G. Application of engineered cementitious composites (ECC) in prefabricated modular housing. Paper presented at the American Concrete Institute, ACI Special Publication, (268 SP), 2006, 17–27.
  16. Fischer, G., Li, V. C. Effect of fiber reinforcement on the response of structural members. *Engineering Fracture Mechanics*, 74 (1–2), 2007, 258–272. doi:10.1016/j.engfracmech.2006.01.027.
  17. Sahmenko, G., Krasnikovs, A., Lukasenoks, A., Eiduks, M. “Ultra High Performance Concrete Reinforced with Short Steel and Carbon Fibers.” In: *Environment. Technology. Resources: Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference*, Latvia, Rezekne, June 18–20, 2015, pp. 193–199.
  18. Patnaik A., Miller L., Adhikari S., Standal P. C. Basalt FRP Minibar reinforced concrete, *Fibre Concrete 2013*, September 12–13, 2013, Prague, Czech Republic.
  19. Patnaik A., Miller L., Standal P. C. Fiber reinforced concrete made from Basalt FRP Minibar, *Proceedings of the 1st Concrete Innovation Conference (CIC)*, 11–13 June 2014, Oslo, Norway, ISBN 978-82-8208- 0415.
  20. Tabatabaei, Z. S., Volz, J. S., Keener, D. I., and Gliha, B. P., Comparative Impact Behavior of Four Long Carbon Fiber Reinforced Concretes, *Materials & Design*, V. 55, March 2014, pp. 212–223.
  21. Tabatabaei, Z. S., Volz, J. S., Baird, J., Gliha, B. P., Keener, D. I. Experimental and numerical analyses of long carbon fiber reinforced concrete panels exposed to blast loading. *International Journal of Impact Engineering*, 57, 2013, 70–80.
  22. Tabatabaei, Z. S., Volz, J. S., Gliha, B. P., Keener, D. I. Development of long carbon fiber-reinforced concrete for dynamic strengthening. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(10), 2013, 1446–1455. doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000692.
  23. Pupurs A., Krasņikovs A., Pakrašiņš L. Micro-mechanical stress-state analysis of fibre reinforced concrete (FRC), *Scientific Proceedings of Riga Technical University (Architecture and Construction Science) – 7*, 2006, pp. 160–171.
  24. Krasnikovs A., Kononova O., Pupurs A. Steel Fiber Reinforced Concrete Strength. Sc. Proceedings of Riga Technical University. *Transport and Engineering*, 6. V.28. Riga, 2008., P. 142–150.
  25. Krasņikovs A., Kononova O., Pupurs A. Micromechanical Investigation of Steel Fiber Reinforced High-Performance Concrete Post-Cracking Behavior, *Proceedings of International scientific conference Fiber Concrete 2009*, Prague, Czech Republic, 2009, pp. 110–124.