

Sandra Guzlēna

PLAISU NOVĒRŠANA KERAMIKAS UN CEMENTA BĀZES MATERIĀLOS

Promocijas darba kopsavilkums



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Materiālzinātnes un lietišķās ķīmijas fakultāte

Tehniskās fizikas institūts

Sandra Guzlēna

Doktora studiju programmas “Materiālzinātnes” doktorante

Plaisu novēršana keramikas un cementa bāzes materiālos

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskie vadītāji:

vadošā pētniece *Dr. sc. ing.* GITA ŠAKALE,

profesors *Dr. habil. phys.* MĀRIS KNITE

Zinātniskais konsultants

Dr. sc. ing. SERGEJS ČERTOKS

RTU Izdevniecība

Rīga 2022

Guzlēna, S. Plaisu novēršana keramikas un cementa bāzes materiālos. Promocijas darba kopsavilkums. Rīga: RTU Izdevniecība, 2022. 45 lpp.

Iespiests saskaņā ar promocijas padomes "RTU P-02" 2022. gada 4. jūlija lēmumu, protokols Nr. 04030-9.2.1/10.

<https://doi.org/10.7250/9789934228315>

ISBN 978-9934-22-831-5 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2022. gada 21. decembrī plkst. 11:30 Rīgas Tehniskās universitātes promocijas padomē “RTU P-02” tiešsaistē:

<https://rtucloud1.zoom.us/j/91056890359?pwd=dGtHYiRiT1dyL0Y3MnM3YUZYzZFdz09.>

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors *Dr. sc. ing.* Jānis Ločs,
Rīgas Tehniskā universitāte

Profesora asistente *Ph. D.* Marta Roig-Flores,
Jaume I Universitāte, Spānija

Dr. sc. ing. Līva Dzene,
Haute-Alsace Universitāte, France

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājusi šo promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai. Promocijas darbs zinātniskā grāda iegūšanai nav iesniegts nevienā citā universitātē.

Sandra Guzlēna..... (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs sagatavots kā tematiski vienota zinātnisko publikāciju kopa. Tajā ir kopsavilkums un piecas publikācijas. Publikācijas uzrakstītas angļu valodā, to kopējais apjoms ir 51 lpp.



LODE SIA

Lodes iela 1, Liepa, Liepas pagasts, Priekulu novads, LV-4128

Reģistrācijas numurs: 50003032071

Pievienotās vērtības nodokļa maksātāja numurs: LV50003032071

Tālrunis: 64195246, 64122512, fakss: 64107721

e-pasts: info@lode.lv, http://www.lode.lv

Mārketiņa un pārdošanas birojs: Brīvības iela 155, Rīga, LV-1012

Tālrunis: 67378020, fakss: 67378022

Apliecinājums no industrijas

Sandras Guzlēnas izstrādātā promocijas darba **“CRACK PREVENTION IN CERAMIC AND CEMENT BASED MATERIALS”** ietvaros veiktais pētījums ir nozīmīgs uzņēmuma attīstībā un produkta kvalitātes uzlabošanā. Promocijas darba ietvaros pētīta uzņēmumam aktuāla problemātika par veidiem kā samazināt plaisas pilnajos ķieģeļos, izmantojot inovatīvus risinājumus: pievienojot virsmas aktīvās vielas, izmantojot stikla šķiedras stiebrojumu, kā arī optimizējot mālu masas granulometrisko sastāvu balstoties uz mālu karjerā pieejamiem izejmateriāliem.

LODE SIA
Ānes ražošanas vadītājs
Sergejs Čertoks

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Sergejs Čertoks", written over a light blue horizontal line.

Apliecinājums no industrijas

Sandras Guzlēnas promocijas darba “**CRACK PREVENTION IN CERAMIC AND CEMENT BASED MATERIALS**” ietvaros veiktais pētījums, par stikla šķiedras armēta betona (GRC) papildināšanu ar polimēra piedevu un plaisu pašziedēšanas pēc kristalizējošas piedevas pievienošanas, ir nozīmīgs uzņēmuma attīstībā un nākotnes projektu iegūšanā.

Skonto Concrete Cladding
Ražošanas vadītājs
Roberts Gulbis

Jurid. adr.: E. Meingaila iela 1a, Rīga, LV 1010,
Fakt. adr.: Virskalu iela 78b, Jelgava, LV 3008

Tālrunis: +371 2663/211
E-pasts: info@skontocc.com



PATEICĪBA

Promocijas darbs izstrādāts, sadarbojoties ar divu Latvijas universitāšu institūtiem un fakultātēm: Rīgas Tehnisko universitāti (RTU) un Latvijas Lauksaimniecības universitāti (LLU) un sadarbībā ar diviem lieliem Latvijas uzņēmumiem: SIA "LODE" un SIA "Skonto *Concrete Cladding*". Šī sadarbība promocijas darbam devusi īpašu pienesumu, apvienojot teorētiskās zināšanas, kas pieejamas universitātēs, un nepieciešamību risināt praktiskas problēmas uzņēmumos.

Jau, izstrādājot savu maģistra darbu RTU Tehniskās fizikas institūtā, bija skaidrs, ka ar šādu radošu, talantīgu un zinātkāru kolēģu kolektīvu ir iespējams sasniegt virsotnes.

Pirmkārt, liels paldies manai darba vadītājai Gitai Šakalei, kas vienmēr mani ir atbalstījusi un iedrošinājusi visām izmaiņām, kas radās promocijas darba izstrādes laikā. Esmu pateicīga par padomiem, plānojot un formulējot darba uzdevumus, kā arī apstrādājot iegūtos datus un tos apkopojot. Paldies Tehniskās fizikas institūta Materiālu fizikas katedras profesoram Mārim Knitem par padomiem promocijas darba sagatavošanā, par iespēju apmeklēt starptautiskās konferences un iespēju piedalīties *COST CA 15202 "SARCOS"* rīkotajās doktorantu un jauno zinātnieku konferencēs, kā arī par iespēju strādāt Materiālu fizikas laboratorijā. Paldies Tehniskās fizikas institūta kolēģiem (Valdim Teterim, Astrīdai Bērziņai, Artim Linartam, Linardam Lapčinskim, Vijai Briltei), kuri izlīdzēja ar fizisku spēku, pārvietojot paraugus, ar padomu, realizējot eksperimentus, palīdzēja eksperimentālo datu ieguvē, izteica konstruktīvu kritiku par promocijas darbu, palīdzēja organizatorisku jautājumu risināšanā.

Liels paldies SIA "LODE" par iespēju izmantot karjera "Liepa" materiālus, kā arī rūpnīcā pieejamo laboratoriju un personāla sniegtos padomus. Īpašs paldies laborantei Guntai, Aijai Liepai un Sergejam Čertokam!

Liels paldies SIA "Skonto *Concrete Cladding*" par iespēju izmantot materiālus un iekārtas, izgatavojot un testējot paraugus, par noderīgajiem padomiem Oskaram Matisonam un par ieguldīto darbu paraugu testēšanā Inesei Žigalovai un Ernestam Matisonam.

Paldies LLU Augsnes un augu zinātņu institūtam, tā direktorei Ilzei Virčavai par atļauju izmantot Lauksaimniecības fakultātes laboratorijas telpas un iekārtas, īpašs paldies Inārai Dižakovai par iespēju noteikt mālu paraugu granulometriju.

Izsaku pateicību RTU Būvniecības inženierzinātņu fakultātei, Būvmateriālu un būvizstrādājumu katedrai. Paldies Ģirtam Būmanim par palīdzību izgatavot, testēt un analizēt betona paraugus!

Paldies RTU Rīgas Biomateriālu inovāciju un attīstības centram par *XRD* un *SEM* mērījumiem!

Paldies RTU Silikātu materiālu institūtam par iespēju izmantot laboratoriju un pieejamās iekārtas! Liels paldies Rutai Švinkai par sniegtajiem padomiem!

Paldies LU CFI pētniekam Pēterim Lesničenokam par *SEM* fotoattēlu iegūšanu!

Vislielākā pateicība manai ģimenei, kura šo gadu laikā ir kļuvusi kuplāka. Bez vīra, māsas un vecāku ticības maniem spēkiem, atbalsta un palīdzības nebūtu iespējams šo visu paveikt.

SATURS

Saīsinājumi	8
Darba vispārējs raksturojums	9
Publikāciju saraksts.....	11
Plaisu samazināšana fasādes materiālos	16
1. Ievads	16
2. Fasādes materiāli no keramikas	18
3. Cementa bāzes materiāli	29
3.1. Ar stikla šķiedru armēts betons (GRC)	30
Secinājumi	39
Izmantotā literatūra	40

Saīsinājumi

AR – sārmiturīgs

CMC – kritiskā micellu koncentrācija

LOP – proporcionalitātes līmenis

MOR – sagrūšanas modulis

OPC–Portlandcements

GRC – ar stikla šķiedru armēts betons

PGRC – ar stikla šķiedru armēts polimērbetons

SEM – skenējošais elektronmikroskops

XRD – rentgenstaru difraktometrs

FTIR–infrasarkanās Furjē transformācijas spektroskopija

DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

Darba mērķis

1. Identificēt iespējamās plaisu rašanās iemeslus keramiskajos un cementa bāzes apdares materiālos.
2. Atrast efektīvāko veidu defektu samazināšanai, izmantojot inertas un aktīvas pildvielas.

Darba uzdevumi

- 1) Apzināt un izpētīt karjerā “Liepa” pieejamo mālu veidus un to granulometrisko sastāvu:
 - 1.1. samazināt plaisu veidošanos pilnajos ķieģeļos žāvēšanas laikā, pievienot mālu masai virsmaktīvo vielu *Triton X-100*;
 - 1.2. samazināt plaisu veidošanos pilnajos ķieģeļos, pievienojot stikla šķiedru mālu masai maisīšanas laikā;
 - 1.3. samazināt plaisu veidošanos pilnajos ķieģeļos un apzināt optimālo granulometrisko sastāvu mālu masai, izmantojot izejmateriālus no Liepas karjera.
- 2) Izstrādāt ar stikla šķiedru armēta betona (*GRC*) sastāvus ar un bez pievienota akrilpolimēra un noteikt:
 - 1.1. ietekmi uz lieces īpašībām atkarībā no stikla šķiedras garuma un daudzuma sastāvā;
 - 1.2. apzināt betona autonomos pašdziedēšanās mehānismus, pievienot sastāvam kristalizējošas piedevas plaisu aizaugšanai pēc to ierosināšanas.

Darba zinātniskā novitāte

1. Pētīti veidi, kā samazināt plaisas ķieģeļos, kas izgatavoti no māliem un pieejami Latvijas lielākajā māla karjerā, izmantojot inovatīvus risinājumus: pievienotas virsmas aktīvās vielas, kā arī optimizēts mālu masas granulometriskais sastāvs.
2. Pirmo reizi pētīta kristalizējošo piedevu efektivitāte plaisu pašdziedēšanai cementa bāzes materiālos – *GRC* un *PGRC*.

Darba praktiskā nozīme

Keramikas un cementa bāzes materiālu izmantošana būvniecībā ir dabai draudzīgs risinājums. Šādi materiāli apvieno tādas īpašības kā augstu stiprību, ilgmūžību un spēju kontrolēt gaisa relatīvo mitrumu, radot telpās veselīgu mikroklimatu. Tomēr būvniecības materiālu ražošanas procesā ir salīdzinoši liels defektīvās produkcijas apjoms (30–40 %), ko rada plaisas, un to dēļ saražotā produkcija tiek brāķēta. Plaisas, kas radušās ekspluatācijas laikā apdares materiālos, ievērojami samazina arī to ilgmūžību.

Promocijas darbs ir ar būtisku praktisku ievirzi, jo izstrādāts sadarbībā ar diviem Latvijas uzņēmumiem – SIA “LODE” un SIA “Skonto *Concrete Cladding*”. Sadarbībā ar SIA “LODE” veikta karjera “Liepa” mālu analīze un novērtēta to ietekme uz plaisu veidošanos keramiskajos materiālos, kā arī meklēti risinājumi plaisu samazināšanai dažādos tehnoloģiskajos posmos. SIA “Skonto *Concrete Cladding*” ir uzņēmums, kas ražo inovatīvu produktu – ar stikla šķiedru

armētu betonu (*GRC*). Sadarbībā ar šo uzņēmumu veikta materiāla izpēte, mainot izejmateriālus un izpētot stikla šķiedras ietekmi uz lieces īpašībām. Lai radītu konkurētspējīgu materiālu nākotnē, izpētīta *GRC* plaisu pašdziedēšanās, izmantojot kristalizējošas piedevas. Šāds pētījums ir svarīgs jebkurai celtniecības materiālu ražotnei, lai spētu iepriekš paredzēt un novērst plaisu veidošanos materiālā, uzlabojot tā kvalitāti.

Darba sastāvs un apjoms

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā kā tematiski vienota zinātnisko publikāciju kopa, kurā pētīta plaisu samazināšana keramikas un cementa bāzes fasādes materiālos.

Darba aprobācija un publikācijas

Promocijas darba rezultāti publicēti 7 *SCI* publikācijās, no tām 5 pilna teksta publikācijas konferenču rakstu krājumos, un prezentēti 10 starptautiskās konferencēs.

PUBLIKĀCIJU SARAKSTS

Publikācijas nr.	Publikācijas dati
Publikācija I	S. Guzlēna , G. Šakale, S. Čertoks. Clayey Material Analysis for Assessment to be Used in Ceramic Building Materials. <i>Procedia Eng.</i> , Vol. 172, pp. 333–337, 2017 . https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.031 .
Publikācija II	S. Guzlēna , G. Sakale, S. Certoks, L. Grase. Sand size particle amount influence on the full brick quality and technical properties. <i>Constr. Build. Mater.</i> , Vol. 220, pp. 102–109, 2019 . https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.170 .
Publikācija III	Guzlēna S. , Sakale G. Alkali Resistant (AR) Glass Fibre Influence on Glass Fibre Reinforced Concrete (GRC) Flexural Properties. In: Fibre Reinforced Concrete: Improvements and Innovations. BEFIB 2021 . RILEM Bookseries, vol 30. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58482-5_24 .
Publikācija IV	S. Guzlēna , G. Sakale, S. Certoks, A. Spule. Crack Reduction during Drying Process by Using Surfactant. MATEC Web Conf., Vol. 278, pp. 2–5, 2019 . https://doi.org/10.1051/mateconf/201927801008 .
Publikācija V	S. Guzlēna , G. Sakale, S. Certoks, L. Grase. Effect of the Addition of Fibreglass Waste on the Properties of Dried and Fired Clay Bricks. <i>IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.</i> Vol. 251, pp. 1–7, 2017 , https://doi.org/10.1088/1757-899X/251/1/012014 .
Publikācija VI	S. Guzlēna , G. Sakale. Self-Healing Concrete with Crystalline Admixture—A. <i>Technol. Mater. Sci. Ed.</i> , Vol. 34, pp. 1143–1154, 2019 . https://doi.org/10.1088/1757-899X/660/1/012057 .
Publikācija VII	S. Guzlēna , G. Sakale. Self-healing of glass fibre reinforced concrete (GRC) and polymer glass fibre reinforced concrete (PGRC) using crystalline admixtures. <i>Constr. Build. Mater.</i> , vol. 30, p. 120963, 2021 . https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120963 .

Darba rezultāti prezentēti zinātniskajās konferencēs

1. S. Guzlēna, G. Sakale. Alkali resistant glass fibre influence on glass fibre reinforced concrete (GRC) flexural properties. *RILEM-fib International Symposium On FRC (BEFIB 2020)*. Valencia, Spain, September 21–23, 2020.
2. S. Guzlēna, G. Sakale, D. Bajare. Crack healing of glass fibre reinforced concrete using crystalline admixtures. *PhD Students' and Early Career Investigators' Meeting – Self-healing concrete structures*. NoviSad, Serbia, March 7–8, 2019.
3. S. Guzlēna, G. Sakale. Self-healing concrete with crystalline admixture – a review. *4th International Conference “Innovative Materials, Structures and Technologies” (IMST 2019)*. Riga, Latvia, September 25–27, 2019.
4. Guzlēna S, Sakale G. Self-healing concrete with crystalline additives. *20th International Conference on Fiber-Reinforced (ICFRC 2018)*. UK, London, November 19–20, 2018.

5. Guzlēna, S., Spule A. Šakale, G., Čertoks, S. Triton X100 addition influence on brick formation. *2nd International Conference on Building Materials and Materials Engineering – ICBMM 2018*, Portugal, Lisbon, September 26–28, 2018.
6. Guzlēna, S., Spule A., Šakale, G., Čertoks, S. Crack reduction in clay bricks by surfactants. *In 8th International Conference on Silicate Materials “Balt Silica”* Latvia, Riga, 30 May–1 June, 2018.
7. S. Guzlēna, G. Šakale, S. Čertoks. Fiberglass additive effects on the technological properties of the clay bricks. *The 3rd International Conference on Innovative Materials, Structures and Technologies (IMST 2017)*. Riga, Latvia, September 27–29, 2017.
8. S. Guzlēna, G. Šakale, S. Čertoks. Sand size particle amount influence on the ceramic building material properties *Riga Technical University 57th International Scientific Conference “Materials Science and Applied Chemistry”*. Riga, Latvia, October 21–22, 2016.
9. S. Guzlēna, G. Šakale, S. Čertoks. Clayey material analysis for assessment to be used in ceramic building materials. *12th International Conference “Modern Building Materials, Structures and Techniques*. Vilna, Lithuania, May 26–27, 2016.
10. Guzlēna, S., Šakale, G., Tirmale, D., Čertoks, S. Clay Granulometry Influence on the Formation of Cracks in the Ceramic Building Materials. *I starptautiskais starpdisciplinārais simpozījs “Māli un keramika”*, Latvia, Riga, January 28–29, 2016.

Autores apliecinājums par publikācijām

Sandra Guzlēna veica lielāko daļu eksperimentu, novērtēja rezultātus un uzrakstīja visus promocijas darbā pievienotos dokumentus. Līdzautori piedalījās eksperimentu plānošanā un sniedza konstruktīvu kritiku par iegūtajiem rezultātiem, kas paaugstināja publikāciju zinātnisko kvalitāti.

Publikācijas nr.	Publikācijas dati	Korespondējošais autors	S. Guzlēnas ieguldījuma novērtējums
1. publikācija	S. Guzlēna, G. Sakale, S. Certoks, "Clayey Material Analysis for Assessment to be Used in Ceramic Building Materials," <i>Procedia Eng.</i> , vol. 172, pp. 333–337, 2017.	S. Guzlēna	S. Guzlēna 100 % izstrādāja eksperimentālo darbu, analizēja un apkopoja visus pētījuma rezultātus atbilstoši žurnāla prasībām un iesniedza to žurnāla redakcijā kā korespondējošais autors.
2. publikācija	S. Guzlēna, G. Sakale, S. Certoks, L. Grase, "Sand size particle amount influence on the full brick quality and technical properties," <i>Constr. Build. Mater.</i> , vol. 220, pp. 102–109, 2019.	S. Guzlēna	S. Guzlēna 90 % izstrādāja eksperimentālo darbu, analizēja un apkopoja visus pētījuma rezultātus atbilstoši žurnāla prasībām un iesniedza to žurnāla redakcijā kā korespondējošais autors.
3. publikācija	S. Guzlēna and G. Sakale, "Alkali Resistant (AR) Glass Fibre Influence on Glass Fibre Reinforced Concrete (GRC) Flexural Properties," <i>RILEM Bookseries</i> , vol. 30, no. September, pp. 262–269, 2021.	S. Guzlēna	S. Guzlēna 100 % izstrādāja eksperimentālo darbu, analizēja un apkopoja visus pētījuma rezultātus atbilstoši žurnāla prasībām un iesniedza to žurnāla redakcijā kā korespondējošais autors.
4. publikācija	S. Guzlēna, G. Sakale, S. Certoks, A. Spule, "Crack Reduction during Drying Process by Using Surfactant," <i>MATEC Web Conf.</i> , vol. 278, p. 01008, 2019.	S. Guzlēna	S. Guzlēna izstrādāja 80 % no eksperimentālā darba, analizēja un apkopoja visus pētījuma rezultātus atbilstoši žurnāla prasībām un iesniedza to žurnāla redakcijā kā korespondējošais autors.
5. publikācija	S. Guzlēna, G. Sakale, S. Certoks, L. Grase, "Effect of the addition of fibreglass waste on the properties of dried and fired clay bricks," <i>IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.</i> , vol. 251, no. 1, 2017.	S. Guzlēna	S. Guzlēna 90 % izstrādāja eksperimentālo darbu, analizēja un apkopoja visus pētījuma rezultātus atbilstoši žurnāla prasībām un iesniedza to žurnāla redakcijā kā korespondējošais autors.

6. publikācija	S. Guzlēna, G. Sakale. Self-Healing Concrete with Crystalline Admixture—A Review. J. Wuhan Univ. Technol. Mater. Sci. Ed., Vol. 34, pp. 1143–1154, 2019.	S. Guzlēna	Ievērojot darba vadītāja norādījumus, S. Guzlēna 100 % sagatavoja recenzijas rakstu un atbilstoši žurnāla prasībām to žurnāla redakcijā kā korespondējošais autors.
7. publikācija	S. Guzlēna and G. Sakale, “Self-healing of glass fibre reinforced concrete (GRC) and polymer glass fibre reinforced concrete (PGRC) using crystalline admixtures,” <i>Constr. Build. Mater.</i> , vol. 30, no. September, p. 120963, 2019.	S. Guzlēna	S. Guzlēna 90 % izstrādāja eksperimentālo darbu, analizēja un apkopoja visus pētījuma rezultātus atbilstoši žurnāla prasībām un iesniedza to žurnāla redakcijā kā korespondējošais autors.

Zinātniskā vadītāja

Dr. sc. ing. Gita Šakale

Aizstāvamās tēzes

- 1) Keramikas būvniecības materiālos plaisu novēršana ir komplikēts process, kas atkarīgs no šādiem tehnoloģiskajiem posmiem: materiālu granulometriskā sastāva; maisīšanas un formēšanas; žāvēšanas un apdedzināšanas:
 - a) plaisu laukums pilnajiem ķieģeļiem žāvēšanas laikā samazinās par 30 %, ja virsmaktīvās vielas *Triton X-100* koncentrācija tiek pietuvināta kritiskajai micellu koncentrācijai (*CMC*), jo virsmaktīvo vielu molekulas palīdz ūdens molekulām vieglāk pārvietoties no ķieģeļu centra uz virsmu, samazinot mehāniskos spriegumus starp sausu ķieģeļu virsmu un mitro ķieģeļu centru;
 - b) smilts frakcijas daļiņu daudzuma palielināšana līdz 59 % ne tikai samazina plaisu vidējo laukumu paraugā pēc žāvēšanas, bet arī žāvēšanas sarukumu par 30 %, jo samazinās māla frakcijas daļiņu un sekojoši arī absorbēta ūdens daudzums, kas žāvēšanas laikā rada mehāniskos spriegumus, māla daļiņu starpslāņiem saraujoties.
- 2) Pirmās astoņas nedēļas pēc plaisu ierosināšanas vidējais pašdziedēšanās ātrums nedēļā ir 12 μm *GRC* paraugiem un 17 μm *PGRC* paraugiem. *PGRC* paraugu pašdziedēšanās ātrums ir lielāks nekā *GRC* paraugiem, jo kristalizējošās piedevas ir “iekapsulētas” plānā akrila polimēra plēvē, kas neļauj tai reaģēt sajaukšanas laikā, nodrošinot vairāk kristālisku centru plaisu aizaugšanai pēc plaisas ierosināšanas.

Plaisu samazināšana fasādes materiālos

1. Ievads

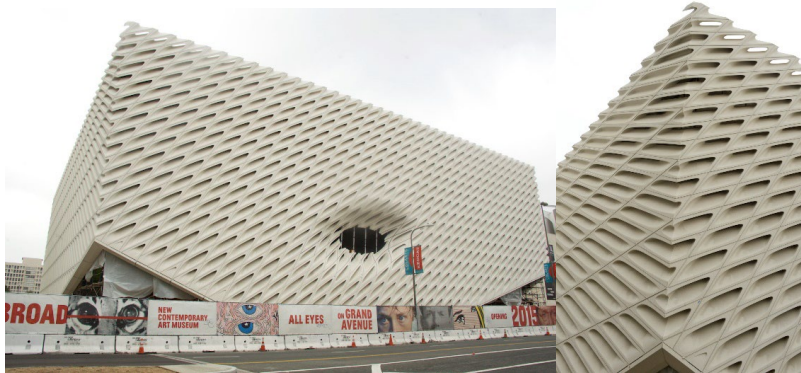
Urbanizācija un industrializācija pēdējās desmitgadēs rada nepieciešamību pēc dzīvojamās platības pilsētās visā Eiropā. Urbanizācija ir sarežģīts process, ko raksturo iedzīvotāju migrācija, ekonomiskā attīstība, zemes izmantojuma maiņa un dzīvesveida reforma [1], [2]. Šobrīd notiek jauna nozīmīga apkaimes attīstība ar privātām un sabiedriskām ēkām. Portlandcements (*OPC*) ir plaši izmantots celtniecības materiāls, ņemot vērā tā daudzās funkcijas un izmantošanas iespējas, sākot no nesošām konstrukcijām līdz fasādes materiāliem. Pieejamība izejvielu un apstrādes tehnoloģiju efektivitātes dēļ, ņemot vērā salīdzinoši zemās izmaksas, ir priekšrocība, salīdzinot ar citiem materiāliem [3]–[5]. Pēdējos gados gan interjerā, gan fasādē populāras ir kļuvušas neapstrādātas betona sienas – eksponētais betons. Citi tipiski fasādes materiāli ir stikls, alumīnijs, akmens un keramika [6]. Izmantojot iepriekšminētos materiālus, arhitekti var iegūt neredzētas ēkas formas un krāsas. Lai fasāde būtu ilgtspējīga, ir svarīgi izmantot augstas kvalitātes materiālus. Savukārt, lai iegūtu augstas kvalitātes materiālus, ir jāuzlabo ražošanas tehnoloģijas un nepieciešami augsti kvalificēti speciālisti.

Celtniecības procesā un ēkas ekspluatācijas laikā tiek patērēts daudz enerģijas, sākot no izejvielu ražošanas līdz pašam celtniecības procesam un ēkas apsaimniekošanai. Zaļās ēkas ir nozīmīgs virziens, lai risinātu enerģētikas un vides problēmas pasaules būvniecības nozarē. ASV Vides aizsardzības aģentūra ir definējusi, kas ir zaļās ēkas [7]. Zaļā ēka ir prakse veidot struktūras un izmantot procesus, kas ir ekoloģiski atbildīgi un resursu ziņā efektīvi visā ēkas dzīves ciklā, sākot no projektēšanas, būvniecības, ekspluatācijas, apkopes, renovācijas, līdz ēkas nojaukšanai [8]. Ilgtspējīga būvniecība, zaļa būvniecība, augstas veiktspējas būvniecība ir galvenās zinātnes pētniecības tēmas šobrīd [9]. Ir ļoti svarīgi izmantot jaunus materiālus un tehnoloģijas, kā arī tas, lai arhitekts strādātu ciešā sadarbībā ar celtniekiem un materiālu ražotājiem. Arhitekti arvien biežāk meklē ko jaunu, neredzētu, ar sarežģītām formām, krāsām un materiāliem. Ēkas no kastveida formas tagad ir kļuvušas sarežģītākas un arhitektoniskākas. 1. attēlā redzama sociālā māja, ko projektējis Mihails Ričs kopā ar Ketiju Hovliju. Arhitekti 2019. gadā par šo ēku ir saņēmuši Lielbritānijas arhitektūras nozīmīgāko balvu – Karaliskā Britu arhitektu institūta Stērlinga balvu. Šī ir zema enerģijas patēriņa, ļoti ilgtspējīga un moderna ēka [10].



1. att. UK Norwich, Goldsmith iela [10].

Ļoti sarežģītas formas ēka ASV Losandželosā ir pazīstama kā “*TheBroad*”, kas tika atklāta 2015. gadā, un tā redzama 2. attēlā. Ēkas fasādi veido 2500 ar stikla šķiedru armēti betona paneļi un 650 tonnas tērauda [11]. Šī ēka mūsdienās atspoguļo iespējas veidot interesantas formas fasādes, izmantojot jaunus un mūsdienīgus materiālus.



2. att. USA Los Angeles[11].

Vietējā arhitektu biroja “*Bltch/Knevel Architects*” ēkas ir lielisks piemērs sarežģītas formas un daudzu materiālu kompleksai izmantošanai, piemēram, keramikas, akmens, koka, metāla, stikla un betona harmonijai, kas redzama 3. attēlā. Ēka atrodas ASV, Teksasā. Šī ēka ir Universitātes Medicīnas centrs *El Paso*[12].



3. att. Universitātes Medicīnas centrs *El Paso* [12].

Ēkas uzturēšana ir ļoti svarīga, lai pagarinātu ilgmūžību, ja tas netiek darīts, ēkas elementu agrīnā novecošanās paātrinās [13]. Taču fasādes uzturēšana un tīrīšana ir galvenās resursu izmaksas un enerģijas patēriņš. Pēc *Perreta* [14]domām, aptuveni 75–80 % no kopējiem izdevumiem rodas ēkas kalpošanas un apkopes laikā ēkām ar 50 gadu kalpošanas laiku. Tādēļ ļoti svarīga ir atbilstoša fasādes materiāla izvēle.

Ēkas komforta līmeni nosaka ēkas fasāde, logi, lietūs aizsegi utt. Fasāde ne tikai rada ēkas vizuālo tēlu, bet arī nosaka ārējās agresīvās vides caurlaidību starp ēkas iekšpusi un ārpusi. Fasāde sastāv no daudzām sarežģītām sastāvdaļām, piemēram, logiem, apšuvumiem, izvirzītām

detaļām utt., tāpēc tā ir viena no sarežģītākajām projektēšanas, būvēšanas un uzturēšanas sistēmām. Galvenais fasādes defektu avots ir mitrums, netīrumi, krāsas temperatūras izmaiņas, piesārņojums, sāļš, mikroorganismi, slodzes un spriegumi, kas ilgtermiņā ietekmē fasādes izturību. Galvenie minēto faktoru radītie defekti ir plaisas, traipi, samazināta adhēzija starp materiāliem utt. Saskaņā ar *Pires* u. c. [8], traipi no putekļu un citu netīrumu nogulsnēm ir galvenais fasāžu defekts. Ir veikti pētījumi par keramikas flīzēm, ko izmanto fasādei, un galvenie defektu veidi ir: flīžu krāsas vai spilgtuma maiņa; šuvju krāsas maiņa. Abi defekti ir saistīti ar netīrumu nogulsnēm uz fasādes. Izmantojot dabiskā akmens apšuvumus, saskaņā ar *Neto* un *deBrito* [10], krāsu variācija ir vizizplatītākais defekts. Lai samazinātu šos defektus, ir nepieciešams ēkas uzturēšanas plāns, kas ietver pārbaudi, tīrīšanu, virsmas apstrādi ar aizsardzības līdzekļiem, lokālu remontu, lokālu elementu nomaiņu [13].

2. Keramikas fasādes materiāli

Keramikas būvmateriāli, piemēram, flīzes un ķieģeļi, ir pazīstami vairāk nekā 2000 gadu, taču tas joprojām ir mūsdienīgs, videi draudzīgs fasādes materiāls. Keramikas izstrādājumus plaši izmanto visā pasaulē to augstās izturības, labās siltuma vadītspējas, izturības pret dažādiem laika apstākļiem un spējas kontrolēt mitrumu, lai nodrošinātu optimālu iekštelpu klimatu [15].

Celtniecības keramika sākas ar tādu materiālu ieguvi kā māls un smiltis. Pirms materiāla apstrādes to iepriekš pārbauda karjerā, veicot urbumus un nosakot materiāla atrašanās dziļumu, laukumu un granulometriju. Mālus no karjera uzglabā konusus. Konusi izgatavoti no 20 līdz 30 centimetru bieziem māla slāņiem, pamatojoties uz iepriekšējo urbumu datiem. Māls konusus var palikt gadu, jo temperatūras svārstības padara mālu plastiskāku. Pēc tam mālus sajauc un izmanto ražošanai [16].

Māla masai pievieno dažādas pildvielas, piemēram, smiltis un tenesītu, izdegošās pildvielas, piemēram, skaidas un ogles. Pēc visu nepieciešamo pildvielu pievienošanas masu sajauc un ekstrudē. Iegūtā produkta mitruma saturs ir aptuveni 20 %, tāpēc to žāvē, līdz sasniegti 3 %, pēc tam apdedzina 1000 °C temperatūrā [17].

Kvalitātes prasības galaproduktam turpina pieaugt. Lai to sasniegtu, ražošanas procesā ir jākontrolē un jāpielāgo piedevas, lai samazinātu granulometrisko dažādību. Maisījuma granulometrijas neatbilstība var ietekmēt gatavā produkta kvalitāti un īpašības [18].

Izejvielu sajaukšana ir viens no vissvarīgākajiem procesiem pirms produkta formēšanas. Slikti sajauktas izejvielas var izraisīt defektus formēšanas, žāvēšanas un apdedzināšanas procesā, ko var atklāt tikai katra nākamā posma beigās. Sajaukšanas galvenais mērķis ir iegūt pilnīgi viendabīgu masu, kas gatava ekstrūzijai, tas nozīmē, ka visiem paraugiem, kas ņemti no rūpīgi sajaukta maisījuma, jābūt vienādiem. Diemžēl praktiski nav iespējams iegūt šādu pilnībā sajauktu maisījumu, izmantojot mehānisku maisīšanu. Sajaukšanas procesu ietekmē:

- izejvielu blīvums;
- izejvielu granulometrija;
- daļiņu forma;
- mitrums.

Materiālu sajaukšanai pirms ekstrūzijas ir vairākas metodes: izmantojot rotējošas lāpstiņas, stumšanu ar filtru u. c., lai iegūtu pilnībā sajauktu maisījumu [18].

Otra vissvarīgākā procedūra pēc sajaukšanas ir formēšana, izmantojot ekstrūziju. Defekti, kas radušies ekstrūzijas laikā, nav pamanāmi uzreiz. Tie pēc žāvēšanas vai apdedzināšanas

parādīsies plaisu vai deformāciju veidā. Celtniecības keramikas ekstrūzijai parasti izmanto šneka ekstrūderi, retāk virzuļa ekstrūderi. Būtisks ir arī izmantotā šneka veids. Ir vienas skrūves un divu skrūvju ekstrūderis. To kombinācijas un rotācijas virzieni var būt dažādi un pielāgoti māla masas un maisījuma īpašībām [19].

Ekstrūzijas laikā plaisas veidojas izejmateriāla īpašību un fizikālo procesu kopīgā ietekmē. Masas homogenizācija un formēšanas darbības ekstrūderā var izraisīt dažādus izstrādājuma defektus.

Mēģinājums novērst plaisas materiālā, mainot ekstrūdera ģeometriju, samazina, bet neizslēdz problēmu, jo to izraisa iepriekšējie procesa posmi, piemēram, māla ieguve, uzglabāšana, drupināšana vai sajaukšana.

Ieteicams problēmu iedalīt trīs grupās (1. tab.):

- mālu masas mainīgie;
- tehnoloģiskie mainīgie;
- mehāniskā procesa mainīgie.

1. tabula

Plaisu rašanās iemesli pēc ekstrūzijas[19]

Malu masas mainīgie	Tehnoloģiskie mainīgie	Mehāniskā procesa mainīgie
<ul style="list-style-type: none"> • Izmantotā māla veids • Minerālōģiskais sastāvs • Granulometriskais sastāvs • Ūdens daudzums / masas plūsma • Citas piedevas 	<ul style="list-style-type: none"> • Sagatavošana / homogenizācija • Ekstrūdera šneka ātrums • Ekstrūdera galvas mitrināšana vai eļļošana • Starpposms – transportēšana starp ekstrūderi un žāvētāju; mitruma uzturēšana • Žāvēšana • Apdedzināšana 	<ul style="list-style-type: none"> • Ekstrūdera ģeometrija • Konusveida ekstrūdera galva • Cilindra korpus • Ekstrūdera galva

Māla minerālu, piemēram, kaolinīta, haloizīta, montmorolīta vai illīta, daļiņu izmērs ir aptuveni 5–1000 nm. Māla minerāliem ir liels virsmas laukums (5–100 m²/g) un anizotropā morfoloģija [18]. Saskaņā ar literatūru plaisu veidošanos parasti klasificē šādos veidos:

- plaisu veidošanās plūsmas dēļ;
- plaisu rašanās masas griešanas laikā;
- gaisa ieplūdes defekti;
- plaisu veidošanās vakuumā;
- plaisas, ko izraisa neviendabīga māla masa [19].

Galvenie defekti fasādē ir plaisāšana, atslāņošana/atdalīšanās un efflorescence jeb sāļu parādīšanās. Galvenais defektu parādīšanās iemesls ir paaugstināts mitrums, ūdens uzsūkšanās no grunts, kondensāta veidošanās vai nepietiekama ēkas uzturēšana [20].

Jaunākie veiktie pētījumi par māliem jaunos un esošajos karjeros, to granulometriju, ķieģeļu ražošanas tehnoloģiskajām īpašībām ir atrodami[21]–[23]. Tomēr pētījumus par materiālu plaisāšanu, plaisu mērījumiem, plaisu rašanās iemesliem un novēršanas iespējām var atrast reti.

Veikti pētījumi ar mērķi samazināt un analizēt plaisas pilnajos ķieģeļos. Autoru izmantotās metodes – maisījuma granulometrijas koriģēšana, virsmaktīvo vielu pievienošana, lai uzlabotu ūdens iztvaikošanu žāvēšanas laikā un stikla šķiedru izmantošanu, lai panāktu materiāla armēšanas efektu apdedzināšanas procesā. Pēc parauga žāvēšanas un apdedzināšanas veikti plaisu mērījumi, izmantojot mikroskopu, lai analizētu mainīgo lielumu ietekmi.

Pētījumā izmantotie materiāli iegūti Latvijas lielākajā māla karjerā ar mērķi samazināt plaisu daudzumu pilnajos ķieģeļos. Karjerā iegūta smilts un trīs veidu māli – pelēkie, sarkanie, kompozītie māli. Keramikas ražošanai izmantotās māla masas granulometrija ir būtiska, jo tā lielā mērā ietekmē keramikas izstrādājumu tehnoloģisko procesu, piemēram, materiāla izturēšanos formēšanas, žāvēšanas un apdedzināšanas procesā. Lai mazinātu plaisu veidošanos, primāri samazināts smalko un anizotropo daļiņu daudzums, kas galvenokārt ir māla minerāli dažādās proporcijās. Plaisāšanas problēmas pastiprinās, palielinot daļiņu īpatnējo virsmu. Arī citi materiāli, piemēram, talks ar laminētu struktūru, ekstrūzijas laikā mēdz veidot plaisas.

Tomēr māla minerāli ir plastiski, kas ir svarīgi ekstrūzijas procesā. Jāatrod kompromiss starp plastiskumu un plaisu veidošanos. Katram māla izstrādājumam atkarībā no tā veida ir būtisks optimālais daļiņu frakcijas sadalījums, kas redzams 4. attēlā. Piemēram, pilnajiem ķieģeļiem māla daļiņas, kuru frakcija ir mazāka par 2 μm, nedrīkst pārsniegt 50 % no kopējā maisījuma. Bieži plaisāšanu var samazināt, palielinot rupji graudainu piedevu, piemēram, grants vai sasmalcinātu, apdedzinātu māla izstrādājumu daudzumu maisījumā. Vēsturiski rūpnīcā ražotais žāvētais materiāls, kas nav izgājis kvalitātes pārbaudes, tika sasmalcināts un pievienots māla masai. Mūsdienās rupji graudainas piedevas ar precīzu granulometrisku un ķīmisko sastāvu ir pieejamas no dažādiem piegādātājiem [19], [24], [25].

Rupja materiāla pievienošana samazina māla izstrādājumu rukumumu un plaisāšanas risku žāvēšanas un apdedzināšanas procesā. Taču jāņem vērā, ka mālu aizstāšana ar rupji graudainu piedevu samazinās plastiskumu [19], [24], [25].

Materiāla mitrums ietekmē plaisu veidošanos, taču šeit svarīgs ir arī maisījuma saturs un viendabīgums. Maisījuma mitruma satura izmaiņas tilpumā var izraisīt ievērojamas plaisas un to sekas žāvēšanas laikā. Tādēļ žāvēšana jāveic lēni un saudzīgi, lai mitrums vienmērīgi izdalītos no visa materiāla tilpuma [19].

Latvijā keramikas būvmateriālu ražošanai tiek izmantoti visu periodu nogulumu, pārsvarā devona un kvartāra, mazāk triasa un juras māla. Nozīmīgākais karjers Latvijā sastāv no devona laika māla nogulām. Karjerā ir dažādas nogulas no māla un māla aleurolīta līdz smilšakmenim, bet galvenokārt tie ir dažādi sarkanās krāsas karbonātus nesaturoši māla aleurolīti. Aleurolīti ir drūpoši šķembu ieži, kas galvenokārt sastāv no kvarca, laukšpata un vizlas. Aleurolītag granulometrija ir 0,1–0,01 mm, tātad to izmērs ir starp māla un smilšu graudu frakciju [26], [27]. No Latvijas lielākā karjera tika izmantotas smiltis un trīs māla veidi – pelēkais, sarkanais un kompozītais. Paraugu granulometrija un mineralogija tiek analizēta ar mērķi iegūt pilnos ķieģeļus. Keramikas ražošanā izmantotās māla masas granulometrija ir būtiska, jo tā lielā mērā ietekmē keramikas izstrādājumu tehnoloģisko procesu, piemēram, materiāla izturēšanos formēšanas, žāvēšanas un apdedzināšanas procesā. Liels māla frakciju daļiņu daudzums radīs lielu iespēju plaisām parādīties žāvēšanas laikā un lielu produkta rukumumu apdedzināšanas procesā [28]. *Mcnelly, G.* [24] piedāvā daļiņu sadalījuma ierobežojumus pilnajiem ķieģeļiem, caurumotajiem ķieģeļiem un jumta dakstiņiem. Tie parādīti trīsstūrveida diagrammā (4. att.). Diagrammu veido trīs galvenie daļiņu frakciju sadalījumi – māla daļiņas (< 2 μm), putekļu daļiņas (2–20 μm) un smilšu daļiņas (> 20 μm) [24].

Analizējot pieejamos Latvijas lielākā karjera mālus, keramikas būvmateriālu ražošanai vispiemērotākais ir kompozītā māla granulometriskais sastāvs, ko nodrošina tā līdzsvars starp visām graudu lieluma frakcijām [24], [29], [30]. Pelēkajā un sarkanajā mālā ir mazs smilšu frakcijas daļiņu daudzums, kas žāvēšanas un apdedzināšanas laikā var izraisīt ievērojamu materiāla rukumumu. Karjerā pieejamās smiltis var izmantot kā piedevu plastiskiem māliem, lai

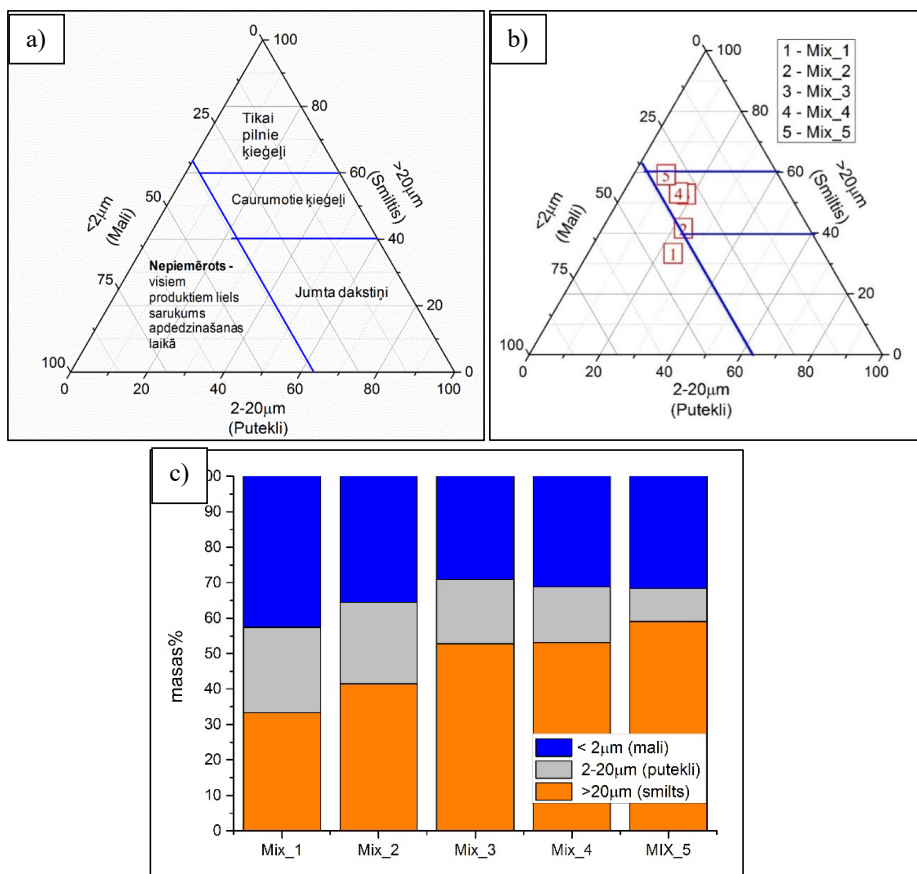
samazinātu pilno ķieģeļu rukumu ražošanas laikā. Saskaņā ar rentgenstaru difraktoģetrijas (*XRD*) rezultātiem, paraugos pārsvarā ir illīta un kaolinīta māla minerāli. Lai iegūtu māla masu ar vēlamajām īpašībām, ir jākontrolē kaolinīts un kvarcs, jo katrs no šiem minerāliem ietekmē kādu ražošanas posmu, sākot no izejvielu sajaukšanas un ekstrūzijas, līdz materiāla apdedzināšanai krāsni [24].

Pēc iegūtajiem rezultātiem secināts, ka karjerā pieejamie māli ir ļoti plastiski. Māla daļiņas nodrošina plastiskumu materiāla ekstrūzijai, veidošanai vai presēšanai veidnē. Māla daļiņas ietekmē arī materiāla saķepināšanu un gatavā produkta mehāniskās īpašības. Izvērtējot literatūrā pieejamos datus, secināts, ka jāpalielina smilšu frakcijas daļiņu daudzums, iegūstot piemērotu granulometrisko sastāvu pilniem ķieģeļiem [24].

Turpinot pētījumu smilšu lieluma daļiņu daudzums palielināts no 33 % līdz 59 %. Pilno ķieģeļu paraugu izgatavošanai tika izmantots laboratorijas ekstrūderis. Pēc formēšanas paraugi žāvēti 105 °C temperatūrā un vienu stundu apdedzināti 1000 °C temperatūrā. Pēc apdedzināšanas izmērīta ūdens absorbcija, rukums, blīvums, spiedes izturība. Lai noteiktu plaisu daudzumu pēc žāvēšanas un pēc apdedzināšanas, izmantota digitālā kamera un *SEM-EDX*.

Smilšu daļiņu funkcija kontrolē rukumu, slāņu atdalīšanos un nodrošināt gāzes novadīšanas ceļus apdedzināšanas laikā. Smilšu pievienošana māla masai var samazināt defektus žāvēšanas procesā. Pēc apdedzināšanas un dzesēšanas procesa laikā notiek materiāla saķepšana. Dzesēšanas procesā plaisu rašanos var izraisīt SiO₂ tilpuma izmaiņas aptuveni par 0,8 % 573 °C temperatūrā, ko izraisa tā kristāloģrāģiskā modifikācija [31], [32].

Pēc māla masas sajaukšanas un izveidoto ķieģeļu žāvēšanas tuneļkrāsni var vizuāli novērot dažus defektus, piemēram, plaisas. Šajā posmā veic pirmo kvalitātes pārbaudi. Jākontrolē žāvēšanas ātrums, un tas jāiestata pareizi, lai novērstu pārāk strauju temperatūras paaugstināšanos. Ķieģeļu temperatūra žāvēšanas laikā paaugstinās no 30 °C līdz 80 °C, lai iztvaikotu brīvais ūdens no ķieģeļiem un samazinātu mitruma saturu līdz 3 % [17]. Nākamajā tehnoloģiskajā posmā – apdedzināšanā – plaisāšanu galvenokārt izraisa materiālu tilpuma izmaiņas. Parasti tas notiek SiO₂kristaloģrāģiskās modifikācijas pāreja no zemtemperatūras kvarca uz augsttemperatūras kvarcu. Parasti tas notiek SiO₂kristaloģrāģiskās modifikācijas no alfa uz beta fāzi dēļ, kā rezultātā mainās tā tilpums [33]. Tātad apdedzināšana jāveic kontrolētā ātrumā. *Kadir* u.c. ir mainījuši sildīšanas ātrumu apdedzināšanas procesā no 0,7 °C/min līdz 10 °C/min un secinājuši, ka ķieģeļu fizikālās īpašības sāk pasliktināties, ja temperatūras celšanas ātrums ir lielāks par 2 °C/min [34]. Pētījuma gaitā sagatavotie paraugi žāvēti 105 °C temperatūrā un apdedzināti 1000 °C temperatūrā vienu stundu, sildīšanas ātrums –5 °C/min. Izgatavoti pieci dažādi māla masas maisījumi, un smilšu frakcijas daļiņu daudzums palielināts no 33 % līdz 59 %. 4. a attēlā redzams visu maisījumu granulometriskais sastāvs. Maisījumu novietojums diagrammā redzams 4. b attēlā.



4. att. a) Ieteicamais daļiņu frakcijas diapazons ķieģeļiem un jumta dakstiņiem [24]; b) maisījumu sastāva atrašanās vieta diagrammā; c) maisījumu granulometriskais sastāvs[35].

Žāvētu paraugu analīze. Paraugu veidošanās laikā vidējais parauga mitruma saturs dažādiem maisījumiem mainās no 14,4 % līdz 20,8 %. Materiāla vidējais rukurums žāvēšanas laikā nav atkarīgs tikai no parauga mitruma formēšanas laikā, tas korelē ar māla lieluma daļiņu daudzumu paraugā. Kā zināms, māliem ir slāņveida struktūra. Starp šiem slāņiem ir ūdens molekulas, žāvēšanas laikā ūdens molekulas iztvaiko un slāņi tuvojas viens otram, kā rezultātā materiāls sarūk [21].

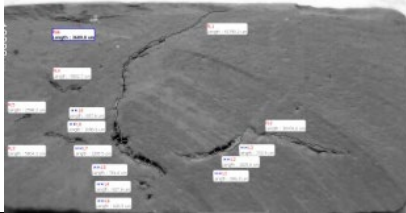
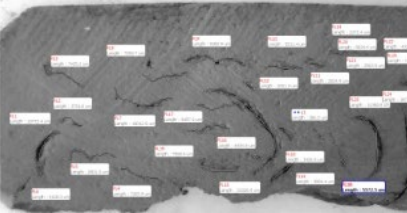
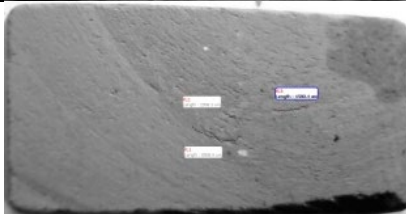
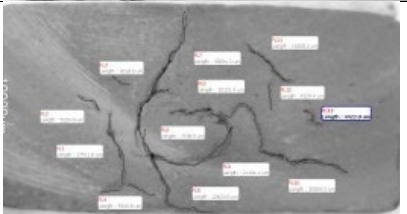

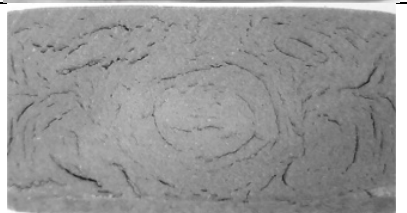


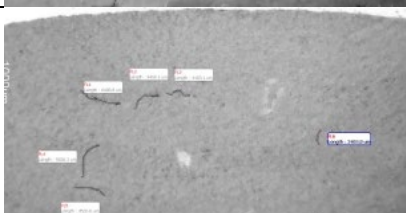

Novērota arī šāda sakarība: palielinot smilšu lieluma daļiņu daudzumu parauga maisījumā, samazinās vidējais plaisas laukums pret žāvēta parauga laukumu. To var izskaidrot tāpat kā iepriekš, samazinot māla frakcijas daļiņas, kas absorbē ūdens molekulas, un palielinot smilšu frakcijas daļiņu daudzumu, samazinās paraugu žāvēšanas laikā izraisītie spriegumi, un plaisas neveidojas [21], [36]. Būtiska ietekme uz plaisāšanu žāvēšanas procesā ir žāvēšanas ātrumam. Ja žāvēšanas process ir straujš, mitruma iztvaikošana no parauga ir neregulāra, kā rezultātā veidojas materiāla spriegumi starp parauga mitro kodolu un daudz sausāko virsmu, kas izraisa plaisu veidošanos. Tāpēc žāvēšana jāveic vienmērīgi[37].

Analizējot apdedzināto paraugu spiedes stiprību, var secināt: jo lielāks smilšu frakcijas daļiņu daudzums māla maisījumā, jo lielāka parauga spiedes stiprība. Iegūtie dati par vidējo plaisu laukumu korelē ar sildīšanas vidējo svārstību. Paraugiem ar zemāku vidējo plaisu laukumu ir mazāks sildīšanas svārstību zudums. To var izskaidrot ar strauju temperatūras

paaugstināšanos divās jutīgās zonās. Pirmajā temperatūras zonā 100–150 °C, kur ūdens iztvaiko no porām. Otrā zona – no 500 līdz 900 °C, kur saistītais ūdens iztvaiko un kvarcs no alfa fāzes pāriet beta fāzē ap 573 °C [35].

Vizuālie plaisu mērījumi apkopotā 2. tabulā [35]. Var secināt, ka paraugiem ar lielāku vidējo plaisu laukumu, piemēram, *Mix_1*, ir lielāks plaisu daudzums, kuru garums pārsniedz 5 mm. Plaisu daudzuma atšķirības starp žāvētiem un apdedzinātiem paraugiem ir ievērojamas. Katrā izgatavotajā maisījumā plaisu daudzums pēc apdedzināšanas procesa palielinās. Pēc apdedzināšanas vislielākais plaisu laukums ir maisījumos, kuros dominē smiltis, *Mix_3* un *Mix_4*, izņemot sastāvu *Mix_5*, kuram plaisu laukums būtiski neizmainās un kas atrodas ieteicamajā daļiņu frakcijas diapazonā trijstūra diagrammā [30] un ir vistuvāk vēlamiem pilno ķieģeļu sastāvam. Optimālais maisījuma sastāvs, ņemot vērā plaisu daudzumu un spiedes stiprības datus, ir *Mix_1* un *Mix_2*. Apaļas formas plaisas, kas parādās gandrīz katrā parauga centrā, rodas no ekstrūdera šneka. Šis plaisu veids ir māla masas plūsmas laminēšanas un māla masas rotācijas kustības kombinācija. Šīs plaisas var novērst, mainot māla masas granulometriskā sastāvu un/vai ekstrūdera galvas ģeometriju, lai nodrošinātu parauga sablīvēšanos pēdējā parauga veidošanas posmā [19]. Plaisas, kas nav novērotas žāvētos paraugos, bet ir redzamas apdedzinātajos paraugos, rodas divu iemeslu dēļ. Pirmais kvarca raksturs, kas no alfa fāzes pāriet beta fāzē ap 573 °C, otrais – apdedzināšanas ātrums [38]. Pēc *Arsenovič* u. c. pētījuma [21], apdedzināšanas temperatūra procesa pirmajā daļā jāpalielina lēnām (2–5 °C/min). Lēna sasilšana jāveic līdz 600 °C, lai samazinātu plaisu iespējamību kvarca fāzes pārejas laikā no alfa līdz beta fāzei 573 °C temperatūrā. Otrajā daļā sildīšanas ātrumu var palielināt līdz 5–10 °C/min. Apdedzināšanas ātrums, kas tiek izmantots promocijas darba gaitā, ir 5 °C/min no istabas temperatūras līdz 1000 °C. Šajā gadījumā, iespējams, sasilšanas ātrums pirmajā daļā ir pārāk ātrs un izraisa paraugu plaisāšanu. Kā ir secinājis *Ukwatta* u. c., sildīšanas ātrums ietekmē arī citas parauga īpašības, piemēram, rukumu, spiedes izturību un ūdens absorbciju. Palielinoties sildīšanas ātrumam, ķieģeļu spiedes stiprība samazinās zemā stiklošanās laika dēļ, kas saista māla daļiņas, kā rezultātā materiāls ir poraināks un trauslāks [18], [39].

Žāvētu un apdedzinātu paraugu plaisu mērījumi[35]

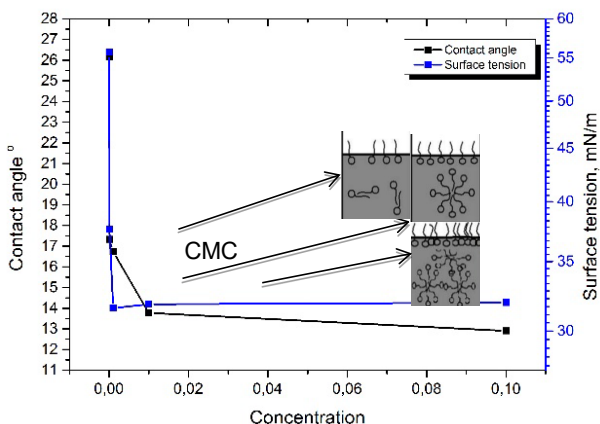
Maisījuma numurs	Žāvēts paraugs	Apdedzināts paraugs
Mix_1		
Mix_2		
Mix_3		
Mix_4		
Mix_5		

Pēc apdedzināšanas paraugi analizēti, izmantojot SEM. Gandrīz katrā ķieģeļu paraugā atrasti smilšu graudi 150 μm lielumā un lielāki. Kvarca fāzes maiņas dēļ ap smilšu graudiem redzamas plaisas. Daudzos darbos [38], [40], [41] ir novērotas plaisas ap kvarca graudiem. *Allegretta* u. c. darbā [41] ir radušās arī problēmas ar plaisāšanu ap kvarca graudiem, un, palielinot apdedzināšanas temperatūru no 750 $^{\circ}\text{C}$ līdz 1000 $^{\circ}\text{C}$, plaisu lielums palielinās.

Samazinot plaisu daudzumu žāvēšanas laikā, ir liela iespēja, ka samazināsies plaisu daudzums pēc apdedzināšanas. Žāvēšanas process bieži ir viena no sarežģītākajām darbībām ražošanas procesā. Žāvēšanas procesā izvada lielu daļu mitruma un iegūst gatavā produkta izskatu un formu[42]. Lai izvairītos no plaisu veidošanās žāvēšanas procesā, māla masai

pievienota virsmaktīvā viela. Žāvēšanas procesa pirmajā posmā plaisas materiālā parādās materiāla sprieguma starp sausu ķieģeļu virsmu un mitru ķieģeļu serdi dēļ. Plaisas parādās materiāla nelineāru mitruma un/vai temperatūras izmaiņu dēļ. Izmantojot virsmaktīvās vielas, spriegums starp virsmu un materiāla esošajām porām samazinās, uzlabojot mitruma transportēšanu no ķieģeļu serdes uz virsmu [43]. *Kowalski* u.c. [43] ir pētījuši, ka, ja dedocilsulfātu un fluora bāzes virsmaktīvās vielas lieto ļoti zemās koncentrācijā (0,001 %), plaisu veidošanās keramikā mazinās. Māli ar tendenci uzbriest saskarē ar amido-amin bāzes katjonu virsmaktīvajām vielām samazina šo risku un samazina plaisu veidošanos[44]. Lielākā daļa veikto pētījumu izmantota virsmaktīvo vielu koncentrācija diapazonā zem kritiskās micellas koncentrācijas (*CMC*) vai tuvu tai, lai sasniegtu maksimālu adsorbciiju[43], [45]. *CMC* ir koncentrācija, kurā virsmaktīvo vielu molekulas veido micellas, un visas papildu sistēmai pievienotās virsmaktīvās vielas arī veidos micellas [43].

Autore darbā izmantoja virsmaktīvo vielu *Triton X-100* ap*CMC*. *CMC*, kas redzams 5. attēlā, noteica, veicot kontakta leņķa mērījumus starp stikla plāksni un dažādas koncentrācijas *Triton X-100* pilienu, *CMC* var viegli noteikt pie koncentrācijas 0,001 %. Virsmas spraigumu galvenokārt ietekmē *CMC*; zem *CMC* virsmas spraigums mainās strauji, virs *CMC* izmaiņas ir nelielas. Visi paraugi ir izgatavoti ar virsmaktīvās vielas koncentrāciju ap *CMC*, lai panāktu mitruma transportēšanas uzlabošanu un mazāku plaisāšanu žāvēšanas laikā. Tika izgatavoti trīs paraugi ar vienādu granulometriju, bet atšķirīgu *Triton-X* koncentrāciju.



5. att. Kontaktleņķa un virsmas spraiguma atkarība no koncentrācijas. *CMC* noteikšana[46].

Plaisu novērtēšanai žāvētu ķieģeļu paraugi tika sazāģēti 2–3 mm platos gabalos. Plaisu mērījumi un analīze veikta, izmantojot programmu *Software Motic Images Plus 2.0* un digitālo kameru (*Moticam 2000*). Plaisas platums tika mērīts tuvu abiem galiem un plaisas vidū. No iegūtajiem datiem aprēķināta vidējā vērtība. Plaisu daudzumu aprēķina, izmantojot 1. vienādojumu.

$$\frac{\text{Plaisas garums} \times \text{Vidējais plaisas platums}}{\text{Parauga garums} \times \text{Parauga platums}} \times 100 = \text{Plaisu daudzums \% (1)}$$

Paraugi ar mazāko vidējo plaisu daudzumu žāvētā paraugā tika iegūti, palielinot nejonu virsmaktīvās vielas *Triton X-100* koncentrāciju virs *CMC*, kā redzams 3. tabulā. Dažādās

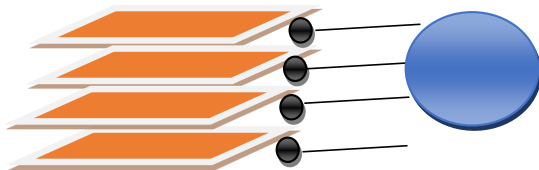
publikācijās ir atšķirīgi viedokļi par rezultātiem zem vai virs *CMC*[43]. Bet *R. Guéganet* u. c. [45] ir secinājuši, ka nejonu virsmaktīvās vielas (*C10E3*) koncentrācijas diapazons virs *CMC* vai tuvu *CMC* nodrošina maksimālu adsorbciju uz montmorillonīta māla virsmas. Tātad, analizējot autoru darbu, var secināt – jo labāka virsmaktīvās vielas adsorbcija uz māla virsmas, jo labāka ūdens iztvaikošana no ķieģeļa centra, jo mazāks plaisu daudzums pēc žāvēšanas.

3. tabula

Plaisu daudzums paraugos, mainot *Triton X-100* koncentrāciju[46]

Triton X-100 molarā koncentrācija	0,01	0,001	0,0001
Plaisu daudzums, %	0,07±0,0006	0,09±0,0007	0,10±0,0006

Autores ieteiktais žāvēšanas mehānisms mālos ar virsmaktīvajām vielām redzams 6. attēlā. Virsmaktīvo vielu molekulas hidrofilās galvas tuvojas māla struktūrai, un hidrofobā aste paliek porās. Ūdens molekulas žāvēšanas procesā pārvietojas pa hidrofobām astēm un neadsorbējas uz citām daļiņām vai neiesaistās māla struktūrā. Šis mehānisms palīdz ūdens molekulām vieglāk pārvietoties no ķieģeļu centra uz virsmu.



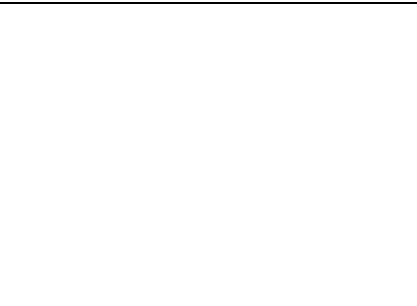
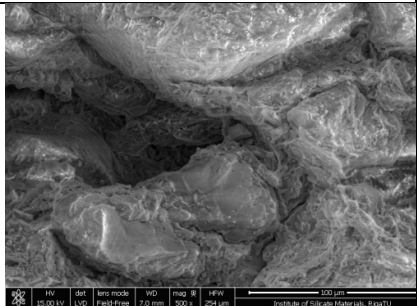
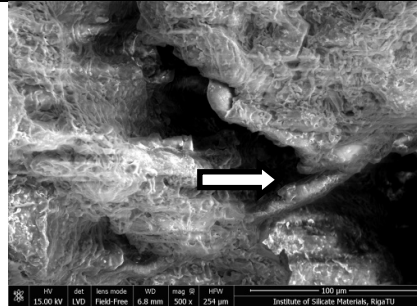
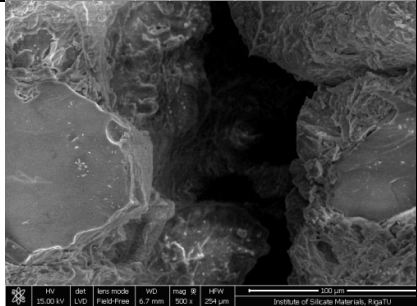
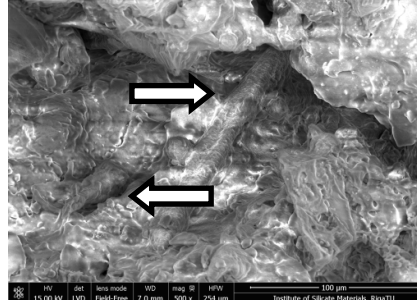
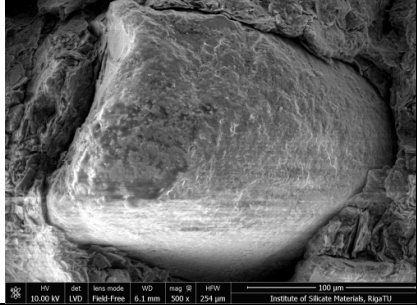
6. att. Žāvēšanas mehānisms mālos, izmantojot virsmaktīvo vielu[46].

Kā ļoti efektīva plaisu samazināšanas metode ir materiāla pastiprināšana. Lielākajam stikla šķiedras ražotājam Latvijā uzņēmumam AS “Valmieras stikla šķiedra” ir liels ražošanas atkritumu daudzums, īsa stikla šķiedra. Tiek lēsts, ka neorganisko atkritumu daudzums Eiropā pārsniedz 1500 miljonu tonnu. Tradicionāli nebīstamie neorganiskie atkritumi tiek apglabāti poligonos, un tos bieži apglabā tieši ekosistēmās bez attiecīgas apstrādes [47], [48]. Ķieģeļu un keramisko dakstiņu ražošanai visā pasaulē ir nepieciešams milzīgs daudzums dabisko izejvielu – mālu. Variējot ar dabiskajām izejvielām, iespējams veikt sastāva un izejvielu izmaiņas, ļaujot dažādu veidu atkritumus izmantot kā daļu no ķieģeļu formēšanas masas. Stikla šķiedras atkritumus var izmantot māla ķieģeļos. Tas ir labs veids, kā aizstāt dabiskās izejvielas un samazināt to izmantošanas daudzumu. Sadarbībā ar stikla šķiedras ražotāju AS “Valmieras stikla šķiedra” izmantota īsa stikla šķiedra otrreizējai pārstrādei. Šī pētījuma galvenais mērķis ir izpētīt stikla šķiedras atkritumu pievienošanas ietekmi uz māla ķieģeļu īpašībām pēc žāvēšanas un apdedzināšanas. Citu autoru veiktie pētījumi liecina par māla materiālu īpašību uzlabošanu, ja ir izmantoti stikla atkritumi[31], [47], [49]–[51]. Stikla pievienošana keramikas matricai apdedzināšanas laikā paātrina blīvēšanas procesu silīcija dioksīda un alumīnija oksīda sastāvdaļu difūzijas rezultātā un uzlabo materiāla īpašības, piemēram, spiedes izturību, ūdens absorbciju u. c. īpašības, pat ar nelielu piedevas daudzumu (zem 10 masas %) [31], [49].

Paraugiem ar vienādu granulometrisko sastāvu tika pievienoti 0 %, 5 % un 10 % stikla šķiedras atkritumi. Rezultāti rāda, ka, palielinot stikla šķiedras daudzumu, samazinās plaisu daudzums žāvētos paraugos, kas korelē arī ar paraugu žūšanas rukuma rezultātiem. Stikla

šķiedra parauga matricā samazina māliem raksturīgo rukumu, kas rodas žāvēšanas laikā, tādējādi izvairoties no plaisāšanas [47]. Autores pētījumā pretēji rezultāti ir novēroti apdedzinātiem paraugiem. Paraugu rukums un plaisu daudzums pēc apdedzināšanas palielinās, palielinot stikla šķiedras daudzumu mālu sastāvā. To izraisa silīcija dioksīds, kas pāriet no zemtemperatūras kvarcu uz augsttemperatūras kvarcu, palielina tilpumu aptuveni pie 573 °C sildīšanas laikā un samazina tilpumu dzesēšanas procesā [49]. Smiltis un stikla šķiedrā ir liels silīcija dioksīda daudzums. SEM attēli, kas redzami 4. tabulā, atspoguļo visu paraugus ar un bez stikla šķiedras, kas apdedzināti 1000 °C temperatūrā. Māla matricā ir atrodami dažāda lieluma kvarca graudi. Paraugos bez stikla šķiedras mikroplaisas ir izveidojušās ap lielām kvarca daļiņām, kas arī ir lielākais plaisu veidošanās iemesls, kā tika apspriests iepriekš tilpuma izmaiņu rezultātā sildīšanas un dzesēšanas procesā.

SEM attēli ar *Mix_7* bez stikla šķiedras piedevas, *Mix_7_5* % ar 5% stikla šķiedras piedevu un *Mix_7_10* % ar 10% stikla šķiedras piedevu[52]

Parauga veids	Stikla šķiedra paraugā	Plaisu veidošanās ap smilšu graudiem
<i>Mix_7</i> bez stikla šķiedras piedevas		
<i>Mix_7_5</i> % ar 5% stikla šķiedras piedevu		
<i>Mix_7_10</i> % ar 10% stikla šķiedras piedevu		

Stikla šķiedras piedevas palielināšana paaugstina saķepināšanas rukumu, kā tas tika apspriests iepriekš, izraisot materiāla sablīvēšanos. Stikla šķiedras piedevas maina rekrystalizācijas procesus, kā rezultātā veidojas blīvi māla un stikla aglomerāti [49]. Māla-stikla aglomerāti ietekmē spiedes izturību. Parauga blīvums pēc apdedzināšanas palielinās, ja palielina stikla šķiedras piedevas daudzumu. Palielinot māla ķieģeļu blīvumu, palielinās spiedes izturība. Kā minēts iepriekš, stikla šķiedrai ir laba saķere ar māla struktūru, un tas darbojas tāpat kā armatūra, kas stiprina materiālu. Promocijas darba parauga spiedes stiprība ir ļoti līdzīga *C. N. Djangang* u. c. iegūtajai spiedes stiprībai 10,49 MPa, kaolinīta māliem pievienojot 10 % stikla pulvera [49], [53].

Pētījumā secināts, ka, pievienojot stikla šķiedras atkritumus māla maisījumos, netika sasniegts vēlamais efekts gala produktā– plaisu daudzums pēc apdedzināšanas palielinājās, bet tiek iegūtas vairākas priekšrocības, kas iepriekš netika paredzētas. Pirmkārt, tiek samazināts atkritumu daudzums, otrkārt, uzlabojas māla ķieģeļu īpašības. Stikla šķiedras atkritumu

pievienošana (frakcijas diapazons no 20 μ m līdz 2 μ m) pozitīvi ietekmē māla ķieģeļu mehāniskās īpašības, proti, palielinās spiedes stiprība un blīvums, palielinot stikla šķiedras daudzumu maisījumā. Stikla šķiedra darbojas kā māla matricas armējums.

3. Cementa bāzes materiāli

Atšķirībā no keramikas materiāliem cementa materiāliem nav kvalitātes problēmu ražošanas procesā, taču problēmas parādās tā kalpošanas laikā. Betons ir plaši izmantots materiāls ēkās, sākot no nesošajām konstrukcijām, līdz dekoratīvajiem elementiem. Ilgtermiņa ekspluatācijas laikā betona konstrukcijās var parādīties dažāda veida vizuālie un strukturālie defekti. Plaisas kā viens no biežāk sastopamiem defektu veidiem var parādīties rukuma, betona stiprības samazināšanās, salaizturības dēļ, ķīmiskas iedarbības rezultātā līdz ar to materiāla izturība samazinās ilgākā laika posmā. To izraisa betona konstrukcijas reakcija uz agresīvu vidi, piemēram, hlorīdiem, sulfīdiem, karbonātiem; ūdens iekļūšana caur porām un nelielām plaisām absorbcijas vai hidrostatiskā spiediena dēļ; sasaldēšanas un atkausēšanas cikli [54]. Fasādes defekti galvenokārt rodas mehāniskas ietekmes rezultātā, vides iedarbības vai neatbilstošas apkopes dēļ. Lai mazinātu šos riskus, ir nepieciešama pienācīga betona konstrukciju apkope [55]. *Rooij* [56] norādīja, ka Apvienotā Karaliste 45 % no gada būvniecības izmaksām tērē betona konstrukciju uzturēšanai. Lai samazinātu šīs izmaksas, izstrādā jaunus materiālus un paņēmienus. Viens no veidiem, kā samazināt remonta un uzturēšanas izmaksas nākotnē, ir konstrukcijās izmantot betonu ar pašdziedēšanās spējām. Materiāliem ar spēju pašdziedēties ir daudz ilgtermiņa priekšrocību: nodarbināti mazāk strādājošo un ietaupīta nauda, veicot pārbaudes, uzraudzības un remonta darbus. Betonam ar pašdziedēšanās spējām nav nepieciešama cilvēka mijiedarbība, lai sāktu dziedēšanas procesu. Betona pašdziedēšanās spēju [54] dzelzsbetonā [57] augstas izturības betonā [58] augstas izturības ar šķiedru armētā betonā (*HPFRC*) [54], [58] ir pētījuši daudzi autori. Pašdziedēšanos var iedalīt divos mehānismos:

- autogēna pašdziedēšanās— plaisu aizaugšana, ko izraisa betona sastāvā esošais nehidratētais cements reakcijā ar apkārtējā vidē esošo ūdeni, masai netiek pievienotas īpaši pašdziedēšanās piedevas, taču šāda veida pašdziedēšanās nav paredzama un to nevar kontrolēt [59]–[61].
- autonomā pašdziedēšanās— inženiertehniskā plaisu aizvēršana, izmantojot piedevas, kas nav parastā cementa sastāvdaļa [58]–[60], [62], [63]:
 - pasīva – nav nepieciešama cilvēka iesaistīšanās, pašdziedēšanos ierosina ārējie veicinātāji [57], [64];
 - aktīva – iesaistīts cilvēks, lai aktivizētu un pabeigtu pašdziedēšanos [57], [64].

Daudzi pētnieki ir izpētījuši autonomos pašdziedēšanās mehānismus betonos ar šķiedras armējumu [54], [58], baktērijām [65]–[68], kristalizējošām piedevām [54], [58], [63], [69]–[72], absorbējošiem polimēriem [73], absorbējošiem māla materiāliem [62], iekapsulētiem pašdziedēšanās materiāliem [59], [62], [74], izplešanās materiāliem, piemēram, sulfoalumināts [62], [69], [70] u. c.

Komerčiāli pieejamās kristalizējošās piedevas sastāv no cementa, smiltīm, kristalizējoša elementa vai “aktīvās ķīmiskās vielas”, kas ir ražotāja konfidenciāla informācija [71], [75].

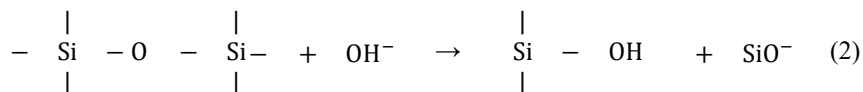
Kristalizējošā piedeva sāk reaģēt tikai tad, kad ir sasniegts pietiekams mitruma līmenis. Tas reaģē ar $\text{Ca}(\text{OH})_2$ un citiem produktiem, kas parādās cementa hidratācijas laikā. *Elsalamawy* u. c. [72] ir secinājuši, ka, palielinot ūdens/cementa (ū/c) attiecību, palielinās kristalizējošo piedevu efektivitāte. Bet, ja betonu ražo ar zemu ū/c attiecību, nav būtiskas atšķirības ūdens absorbcijā, tādējādi nav novērota būtiska starpība starp plaisu pašdziedēšanās paraugiem ar kristalizējošām piedevām un bez tām.

3.1. Ar stikla šķiedru armēts betons (GRC)

Plaisāšanas laikā ir grūti kontrolēt plaisas lielumu betona trausluma dēļ. Lai palielinātu stiepes izturību un kontrolētu plaisu izmēru, matricā var iekļaut dažādas šķiedras, piemēram, organiskās, polimēra, bazalta, tērauda un stikla šķiedras.

Ar stikla šķiedru armēts betons (GRC) ir kompozīts, kas sastāv no betona un stikla šķiedras. Stikla šķiedrai ir zema ūdens absorbcija, augsts elastības modulis un stiepes izturība [76]. *Fenu* u. c. ir pat secinājuši, ka citu šķiedru izmantošana betona pastiprināšanā izrādījās mazāk efektīva nekā stikla šķiedras stiegrojums, ja šo betonu izmanto dinamiskos apstākļos [77]. Šo materiālu ēku nekonstruktīvām daļām, piemēram, fasādes paneļiem izmanto vairāk nekā 30 gadu. GRC ir pazīstams ar augstu stiepes un triecienizturību, ko nodrošina stikla šķiedras. Šīs īpašības ļauj izgatavot GRC paneļus pat 12 mm plānus [78]–[80]. GRC var ražot, izmantojot divas metodes. Pirmā no tām ir liešanas metode, kur betonu sajauc ar sasmalcinātu stikla šķiedru un pēc tam lej veidņos. Šķiedras garums parasti ir aptuveni 12 mm, un tam pievieno 3 % stikla šķiedras no javas masas. Ja tiek palielināts šķiedras garums un daudzums, tiek samazināta maisījuma iestrādājamība. *Barluenga* u. c. ir atzīmējuši, ka, lietojot īsas šķiedras, var samazināt betona virsmas plaisāšanu. Ja plaisa parādās perpendikulāri šķiedrai, tā ierobežo plaisas garumu, savukārt, ja plaisa parādās paralēli šķiedrai, stiegrojums nedarbojas un plaisas izmērs aug brīvi līdz nākamajai šķiedrai [81]. Izmidzināšanas tehnikā šķiedras garumu var mainīt, taču parasti tas ir 25–40 mm un 5 % no javas masas. Izsmidzināšanas procesā iegūst vienmērīgi sajauktu kompozītu, salīdzinot ar liešanas metodi. Šāda veida materiāls ir ar augstu triecienu un stiepes izturību [79], [82].

Stikla šķiedrai, ko izmanto betonā, jābūt sārmu izturīgai (AR). Agrāk izmantoja parastu stikla šķiedru, piemēram, E stikla šķiedru, taču ilgā laika periodā tai bija zema izturība. Šķiedras zaudē izturību portlandīta ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) dēļ, kas rodas hidratācijas procesā betonā. Portlandīts palielina sārmainību cementa matricā līdz pH 12. Hidroksiljoni (OH^-), kas ir lielā koncentrācijā sārmaina cementa matricā, pārrauj Si-O-Si saites stikla šķiedrās, kas redzams 2. vienādojumā, un tā rezultātā šķiedra zaudē svaru un diametru un kļūst trauslas [80], [82]–[84].



Lai uzlabotu stikla šķiedras ķīmisko stabilitāti, tai pievieno ZrO_2 . Standartā EN 15422 ir minēts, ka stikla šķiedrai jābūt vismaz 16 % ZrO_2 , lai to izmantotu betonā [85]. Taču ZrO_2 pievienošana neatrisina šo problēmu pilnībā, jo pētījumi parādīja novecināta GRC lieces stiprības samazināšanos, salīdzinot ar jaunu GRC [86]–[88]. Pastāv dažādas metodes, kā samazināt šķiedru trauslumu. Piedevas, piemēram, metakaolīnu, nano-silīcija dioksīdu u. c., var pievienot betona maisījumam, kas veicina pucolāniskas reakcijas un portlandītu pārveido par

C-S-H. Tādā veidā samazinās betona sārmainība [76], [80], [84]. Zemas sārmainības cementa, piemēram, sulfoalumināta cementa, izmantošana varētu atrisināt problēmu, jo hidratācijas procesā netiek ražots portlandīts, bet pH vērtība betonā joprojām ir augsta – ap 10pH. Alternatīva metode ir šķiedras pārklāšana ar polimēru kārtiņu, piemēram, *PVA*, *AC* u. c., kas samazina kaļķu difūziju šķiedrās un Si-O-Si saišu pārraušanu [84], [89].

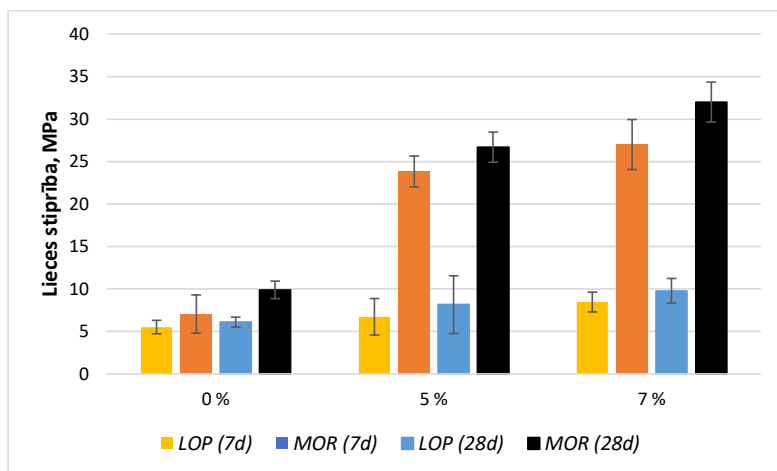
GRC biežuma un tradicionālā lietojuma dēļ *GRC* īpašību novērtēšanai izmanto trīspunktu vai četrpunktu lieces testu. Lai novērtētu parauga lieces izturību, izmanto proporcionalitātes līmeni (*LOP*) un sagrūšanas moduli (*MOR*).

LOP vērtība apraksta parauga maksimālo lineāro elastīgo deformāciju, kas nozīmē, ka, pieliekot slodzi, kas mazāka par *LOP*, tā nekaitēs materiālam – uz virsmas nebūs redzamas plaisas un materiāls atgriezīsies sākotnējā stāvoklī. Parauga elastīgajā rajonā, kas atrodas zem *LOP* vērtības, var raksturot ar Huka likumu, kur slodze ir proporcionāla pagarinājumam un līknes slīpumu raksturo Junga modulis. *LOP* vērtība parāda matricas maksimālo lieces izturību. Pēc tam, kad slodzi palielina virs *LOP* vērtības, materiāls izturas plastiski, tas neatgriezeniski deformējas. Šajā brīdī uz *GRC* virsmas var parādīties vairākas plaisas, taču materiāls joprojām ir slodzi nesošs. Palielinoties slodzei, *GRC* parauga pagarinājums palielinās betonā esošo šķiedru dēļ, līdz plaisa ir pārāk liela un šķiedras plīst vai izvelkas no betona plaisas zonā. *MOR* vērtība raksturo materiāla sagrūšanu [76], [82], [87]. *LOP* un *MOR* vērtības ietekmē daudzi faktori, piemēram:

- šķiedras daudzums;
- šķiedras garums;
- *GRC* izgatavošanas veids: izsmidzināts vai ieliets;
- materiāla blīvēšana.

GRC paraugi izgatavoti, izmantojot izsmidzināšanas metodi. Pētījums veikts, lai noteiktu šķiedras garumu un daudzumu ietekmi uz *GRC* īpašībām. *GRC* pamatkomponentes ir *CEM I 52,5R* cements, smalkas kvarca smiltis, superplastifikators un akrila polimērs. Izmantots *AR* stikla šķiedras pavediens. Šķiedru garums mainīts no 6 mm līdz 41 mm dažādiem paraugiem un izsmidzināšanas laikā sagriezts izsmidzināšanas iekārtā. Šķiedras daudzums mainīts no 0 % līdz 7 %. Parauga lieces tests veikts saskaņā ar *BS EN 1170* [90]. Paraugi izzāģēti no testa paneļa izmērā 275 x 50 mm un pārbaudīti ar četrpunktu lieces testu. *AR* stikla šķiedra pētīta, izmantojot *Phenom Pro X Desktop SE*.

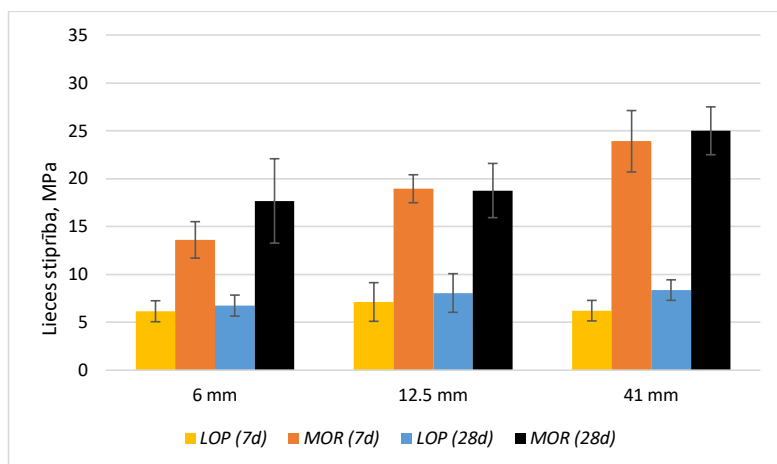
AR stikla šķiedras pievienošana betona matricai būtiski ietekmē parauga galīgo nestspēju. Kā redzams 7. attēlā, ja izmantotas 41 mm garas šķiedras, *MOR* vērtības palielinās, palielinoties šķiedras daudzumam betonā, savukārt *LOP* vērtības būtiski nemainās. *LOP* vērtību vairāk ietekmē betona matricas izturība nekā šķiedru pievienošana [76].



7. att. AR stikla šķiedras daudzuma ietekme uz *LOP/MOR* vērtībām paraugiem 7d un 28d vecumā [85].

Paraugi bez šķiedrām ir ar ļoti zemu plasticitāti un trauslu lūzuma punktu. Palielinot šķiedru daudzumu no 0%, 5% un 7%, tiek palielināta materiāla elastība. Palielinot šķiedru daudzumu no 5% līdz 7%, palielinās materiāla nestspēja, bet, ņemot vērā to, ka šķiedras garums nav mainījies, materiāla pagarinājums nemainās.

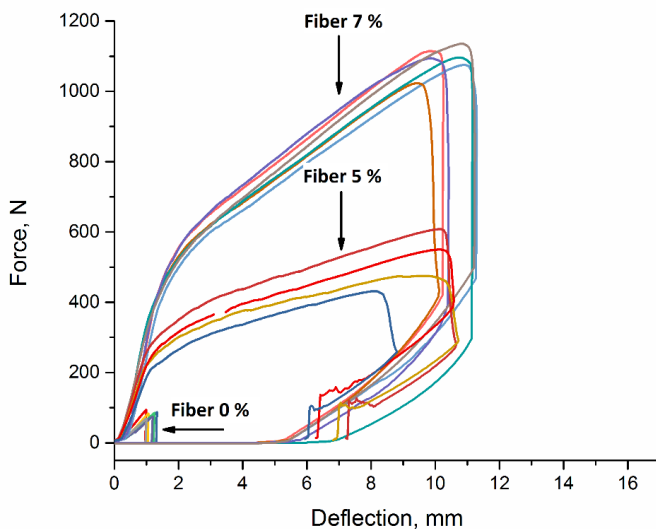
Šķiedras garums mainīts no 6 mm līdz 41 mm, šķiedras daudzums šo eksperimentu laikā bija 5%. *LOP / MOR* atkarība no šķiedras garuma redzama 8. attēlā. Šķiedras garums būtiski nemaina *LOP* vērtības. Kā tika secināts iepriekš, *LOP* vērtības vairāk ietekmē cementa matricas īpašības. *MOR* vērtības palielinās, palielinot šķiedras garumu no 6 mm līdz 41 mm.



8. att. AR stikla šķiedras garuma ietekme uz *LOP/MOR* vērtībām paraugiem 7d un 28 d vecumā [85].

Kā redzams 9. attēlā, pievienojot garākas šķiedras, palielinās materiāla plastiskā deformācija. H. Kasagani u. c. ir atzīmējuši arī to, ka paraugiem ar garākām šķiedrām ir lielāka deformācijas spēja, salīdzinot ar paraugiem ar īsākām šķiedrām [91]. Garākām šķiedrām ir lielāka iespēja deformēties saišķa struktūrā, uzlabojot *GRC* deformāciju pēc plaisas parādīšanās. Analizējot paraugu sabrukumu, var redzēt, ka, izmantojot garākas šķiedras,

materiāla pagarinājums paliek nemainīgs pie lielākas spēka izmaiņas. Pavedieni lēnām izvelkas no saišķa, nesagrūst trausli, ja tiek pielikts spēks, plaisas lielums (materiāla pagarinājums) nemainās.

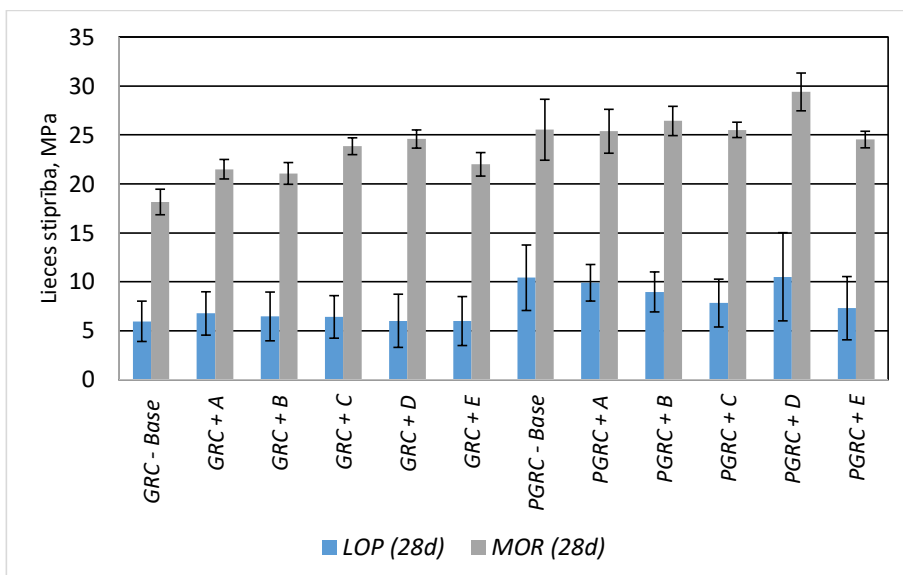


9. att. AR stikla šķiedras daudzuma ietekme uz materiāla pagarinājumu [85].

3.1.1. GRC īpašības, pievienojot kristalizējošās piedevas

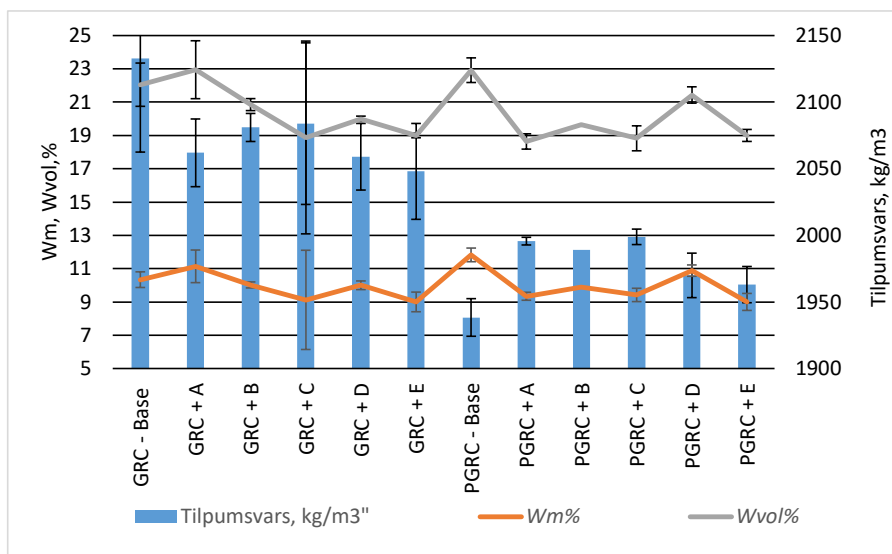
GRC paraugi izgatavoti, izmantojot tās pašas sastāvdaļas, kā aprakstīts 2.1. nodaļā, ar izsmidzināšanas metodi. GRC maisījumam pievienots akrila polimērs, lai iegūtu polimēra GRC (PGRC) paraugus. AR stikla šķiedra visiem paraugiem pievienota 5 % no javas.

Šajā pētījumā izmantotas kristalizējošās piedevas A, B, C un D, lai panāktu GRC un PGRC pašdziedēšanos pēc plaisas parādīšanās uz betona virsmas. Pētījumā analizētas dažādu piegādātāju dažādas kristalizējošās piedevas, izmantojot infrasarkanās Furjē transformācijas spektroskopiju (FTIR) un XRD. Atšķirība starp lieces stiprības vērtībām atkarībā no GRC veida un piedevas redzamas 10. attēlā. GRC parauga MOR vērtības palielinās, pievienojot maisījumam piedevas, savukārt LOP vērtības netiek ietekmētas un paliek vienā līmenī ar atsauces paraugu. PGRC ir augstākas LOP un MOR vērtības, salīdzinot ar GRC paraugiem. To var izskaidrot ar polimēru pievienošanu, kas padara trauslo betonu elastīgāku un pakļautu deformācijām.



10. att. Lieces stiprība atkarībā no GRC tipa un pievienotās piedevas[92].

GRC un PGRC parauga tilpuma svars, ūdens absorbcija ($W_m\%$) un atvērta porainība ($W_{vol}\%$) ir salīdzināti 11. attēlā. PGRC ir mazāks tilpuma svars, salīdzinot ar GRC paraugiem, atvērta porainība un ūdens absorbcija ir vienā līmenī neatkarīgi no tipa. Starpība starp GRC un PGRC tilpuma masu ir aptuveni 5 %, tāpēc var secināt, ka pievienotā polimēra dēļ betona struktūra ir kļuvusi vieglāka. Tomēr nav samazinājušās atvērtās porainības un ūdens absorbcijas vērtības.








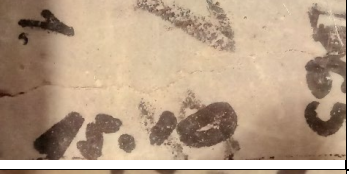

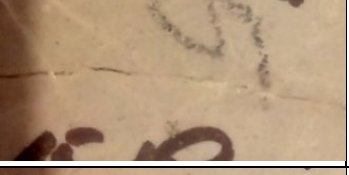



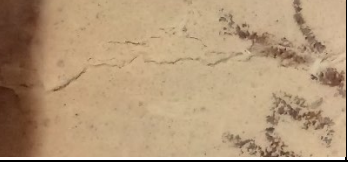
11. att. GRC un PGRC paraugu tilpumsvars, ūdens absorbcija un atvērtā porainība ar kristalizējošām piedevām un bez tām [92].

3.1.2. *GRC* un *PGRC* pašdziedēšanās ar kristalizējošo piedevu un bez tās

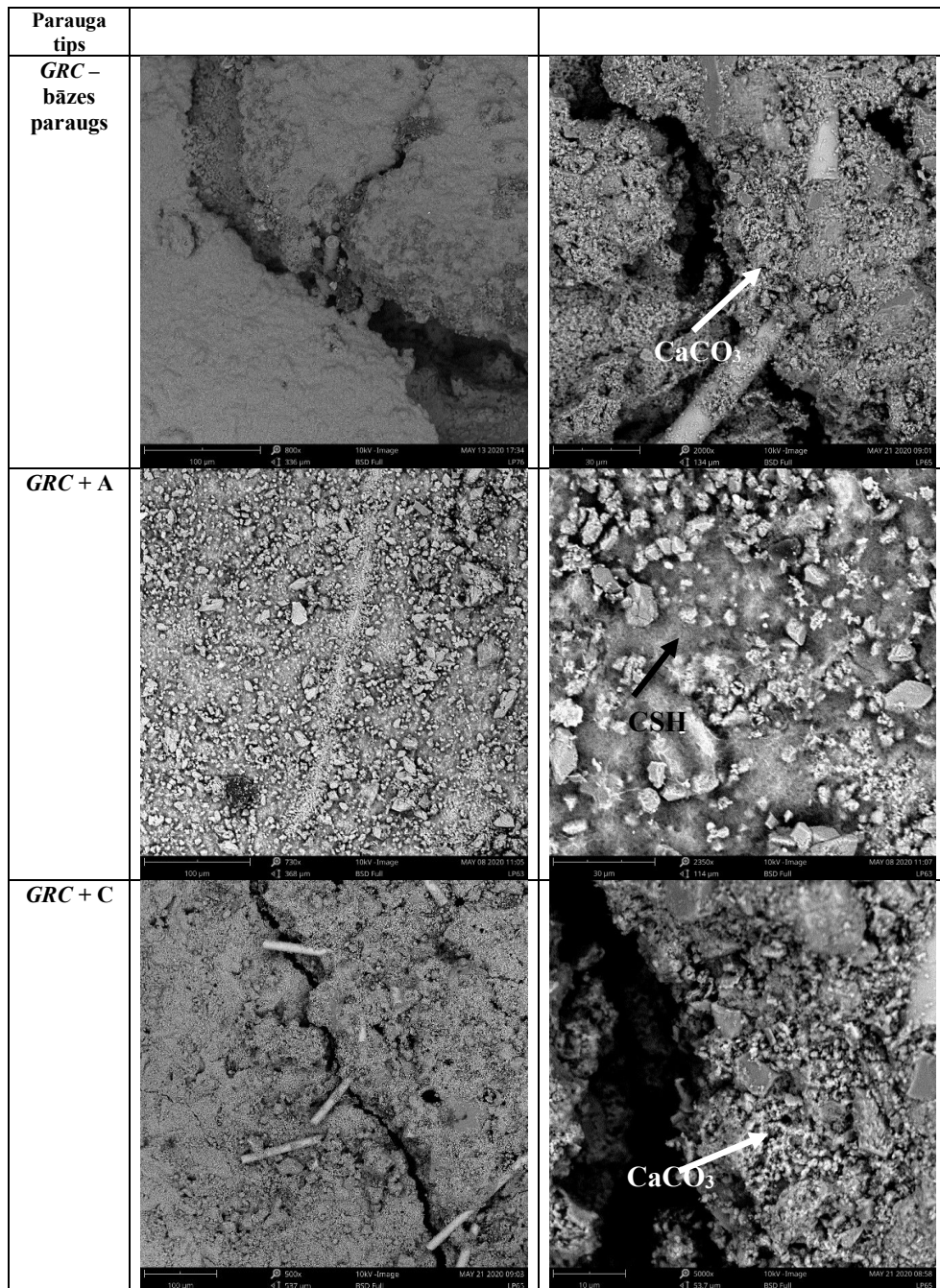
GRC un *PGRC* paraugiem pēc 28 dienām, skaitot no paraugu izgatavošanas, radīta plaisa, un pēc tam tie pilnībā iegremdēti ūdenī. Pēc 14 nedēļām paraugu pašdziedēšanās novērtēta vizuāli, ar mikroskopu izmērīts sadzijušās plaisas lielums. *PGRC* ir labāki pašdziedēšanās rezultāti nekā *GRC* paraugiem. Maksimālais sadzijušās plaisas lielums ir no $134,7 \pm 0,06 \mu\text{m}$ līdz $308,7 \pm 0,06 \mu\text{m}$. Arī citi pētnieki ir atzīmējuši līdzīgus plaisu izmērus, kas tikušas aizdziedētas [14], [17], [23].

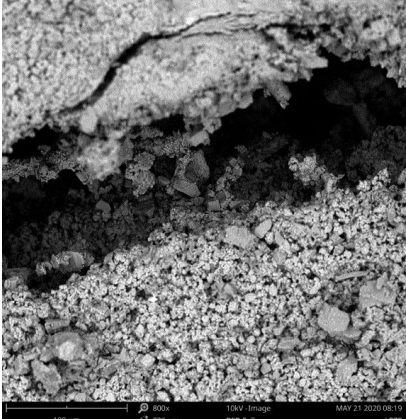
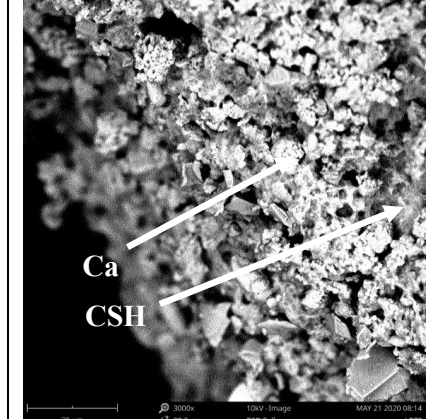

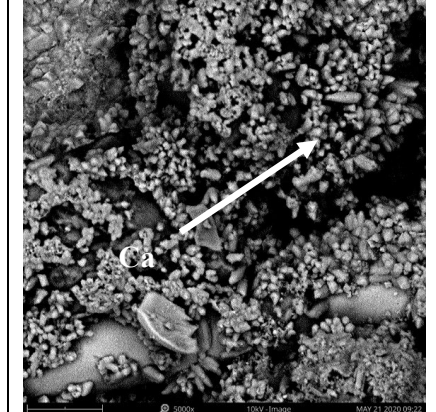
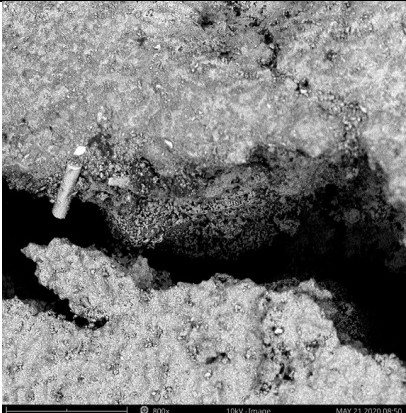
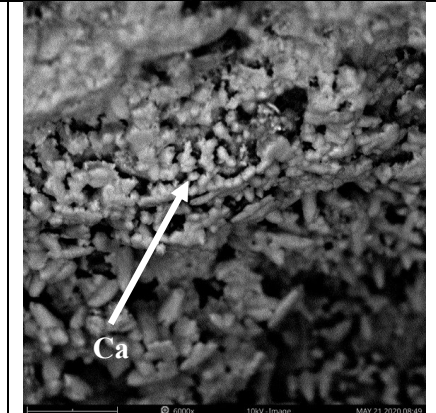
Pārbaudīti paraugi ar visdaudzsoļākajām piedevām, lai novērtētu pašdziedēšanās dinamiku astoņu nedēļu laikā. Rezultāti apkopoti 5. tabulā. Salīdzinot *GRC* un *PGRC* paraugu rezultātus pēc pašdziedēšanās, var secināt, ka *PGRC* paraugi ar kristalizējošām piedevām un bez tām sāk saaugt pēc ilgāka laika perioda nekā *GRC*, jo kristalizējošās piedevas un akrila polimērs pievienots maisīšanas procesā un kristalizējošā piedeva ir "iekapsulēta" ar plānu akrila polimēra slāni. Pašdziedēšanās ātruma atšķirību dēļ vidējais izmēritais pašdziedēšanās ātrums atšķiras no $7 \pm 0,06 \mu\text{m}$ līdz $19 \pm 0,06 \mu\text{m}$ nedēļā.

GRC un PGRC parauga pašdziedēšanās dinamikas analīze. Parauga platums 4 cm[92]

Parauga tips	Paraugs pēc plaisas izveidošanas	Paraugs pēc astoņu nedēļu pašdziedēšanās	Pašdziedēšanās novērtējums	Vidējais pašdziedēšanās ātrums nedēļā, μm
GRC – bāzes paraugs			±	16
GRC + A			±	12
GRC + C			±	7
PGRC – Bāzes			-	17
PGRC + A			-	15
PGRC + C			-	19

6. tabulā redzami paraugu SEM attēli. Lielākajai daļai paraugu pašdziedēšanās procesā izveidojas CaCO_3 kristāli un CSH gēls. CaCO_3 kristāli ir trausli, tāpēc sadzijušās plaisas var atkārtoti saplaisāt, savukārt CSH gēls, kas atrodas sadzijušās plaisās, ir viena no betona pamata struktūrām, kas nosaka tā izturību un ilgmūžību.

SEM attēli *GRC* un *PGRC* paraugiem pēc pašdziedēšanās[92]

Parauga tips		
PGRC – bāzes paraugs	 <p>100 μm 400x 10kV-Image BSD Full MAY 21 2020 08:14 LP76</p>	 <p>20 μm 3000x 10kV-Image BSD Full MAY 21 2020 08:14 LP76</p>
PGRC + A	 <p>100 μm 400x 10kV-Image BSD Full MAY 21 2020 09:25 LP75</p>	 <p>10 μm 3000x 10kV-Image BSD Full MAY 21 2020 09:22 LP75</p>
PGRC + C	 <p>100 μm 400x 10kV-Image BSD Full MAY 21 2020 08:50 LP77</p>	 <p>10 μm 3000x 10kV-Image BSD Full MAY 21 2020 08:49 LP77</p>

Secinājumi

1. Plaisu veidošanos pilnajos ķieģeļos žāvēšanas laikā samazinās par 30 %, ja virsmaktīvās viela *Triton X-100* pievienota tuvu kritiskajai micellas koncentrācijai (*CMC*), jo virsmaktīvā viela palīdz ūdens molekulām vieglāk pārvietoties no ķieģeļu centra uz virsmu.
2. Stikla šķiedras atkritumu (frakcijas diapazons no 20 μm līdz 2 μm) pievienošana māla masai palielina pilno ķieģeļu spiedes stiprību par 27 % un blīvumu par 4 %, palielinot stikla šķiedras daudzumu maisījumā.
3. Palielinot smilšu lieluma daļiņu daudzumu parauga maisījumā, vidējais plaisu laukums pret žāvētu parauga laukumu samazinās par 75 %. To var izskaidrot, ka, samazinoties māla frakcijas daļiņām, kas absorbē ūdens molekulas, un palielinot smilšu lieluma daļiņas, samazinās paraugu žāvēšanas izraisītie spriegumi un neveidojas plaisas.
4. Pēc astoņu nedēļu plaisu pašdziedēšanās dinamikas novērtēšanas *GRC* paraugi ar kristalizējošo piedevu un bez tās ir daļēji sadzijuši, savukārt *PGRC* paraugi uzrāda sliktas pašdziedēšanās pazīmes. Var secināt, ka *PGRC* paraugu dzīšanas sākums tiek aizkavēts, jo izejvielu maisīšanas laikā vienlaikus pievienota kristalizējoša piedeva un akrila polimērs. Kristalizējoša piedeva ir it kā "iekapsulēta" plānā akrila polimēra plēvē, un caur to nepieklūst ūdens, kas nepieciešams kristālu augšanai.
5. Galvenie *GRC* un *PGRC* pašdziedēšanās produkti ar kristalizējošo piedevu un bez tās pēc astoņām nedēļām ir CaCO_3 un C-S-H gēls.
6. Izmantojot komerciāli pieejamas piecu ražotāju kristalizējošas piedevas ar raksturīgajām C-H, Si-O un $-\text{SO}_4^{2-}$ saišu svārstībām, tiek iegūti vislabākie plaisu pašdziedēšanās rezultāti. Šie elementi norāda uz ģipša un organisko vielu klātbūtni kristalizējošās piedevās, kā arī tie piedalās C-S-H gēla veidošanā, kas galvenokārt nodrošina betona mehāniskās īpašības.
7. Keramikas materiāliem visefektīvākā plaisu samazināšanas metode, salīdzinot ar citām pētījumā izmantotajām metodēm, ir daļiņu sadalījuma optimizācija māla maisījumā, tas ir, palielinot smilšu frakcijas daļiņu daudzumu. Cementa bāzes fasādes materiāliem labākie pašdziedēšanās rezultāti tika sasniegti ar kristalizējošajām piedevām, kas satur C-H, Si-O un $-\text{SO}_4^{2-}$ ķīmiskos savienojumus.

Izmantotā literatūra

- [1] S. Wang, S. Gao, S. Li, K. Feng, “Strategizing the relation between urbanization and air pollution: Empirical evidence from global countries,” *J. Clean. Prod.*, vol. 243, p. 118615, 2020.
- [2] S. Guo, S. Zheng, Y. Hu, J. Hong, X. Wu, M. Tang, “Embodied energy use in the global construction industry,” *Appl. Energy*, vol. 256, p. 113838, 2019.
- [3] G. Silva, S. Kim, R. Aguilar, J. Nakamatsu, “Natural fibers as reinforcement additives for geopolymers – A review of potential eco-friendly applications to the construction industry,” *Sustain. Mater. Technol.*, vol. 23, p. e00132, 2020.
- [4] P. S. Matheu, K. Ellis, B. Varela, “Comparing the environmental impacts of alkali activated mortar and traditional portland cement mortar using life cycle assessment,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 96, no. 1, pp. 4–11, 2015.
- [5] Z. Zhang, J. L. Provis, A. Reid, H. Wang, “Geopolymer foam concrete: An emerging material for sustainable construction,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 56, pp. 113–127, 2014.
- [6] B. Han, R. Wang, L. Yao, H. Liu, Z. Wang, “Life cycle assessment of ceramic façade material and its comparative analysis with three other common façade materials,” *J. Clean. Prod.*, vol. 99, pp. 86–93, 2015.
- [7] “Basic Information | Green Building |US EPA,” 2016. [Online]. Available: <https://archive.epa.gov/greenbuilding/web/html/about.html>. [Accessed: 04-Jan-2020].
- [8] C. Zhang, C. Cui, Y. Zhang, J. Yuan, Y. Luo, W. Gang, “A review of renewable energy assessment methods in green building and green neighborhood rating systems,” *Energy Build.*, vol. 195, pp. 68–81, 2019.
- [9] Q. Li, R. Long, H. Chen, F. Chen, J. Wang, “Visualized analysis of global green buildings: Development, barriers and future directions,” *J. Clean. Prod.*, vol. 245, p. 118775, 2019.
- [10] “Stirling Prize 2019 awarded to Mikhail Riches’ Goldsmith Street social housing.” [Online]. Available: <https://www.dezeen.com/2019/10/08/stirling-prize-2019-winner-goldsmith-street-social-housing/>. [Accessed: 04-Jan-2020].
- [11] J. Taylor-Foster and T. Brittain-Catlin, “*From Pastel Pink to Pastel Blue: Why Colorful Architecture is Nothing New*,” 2017.
- [12] “Texas Medical Center Features Modern Mix of Contemporary Building Materials For Expansion – News: Press Releases & More | CEI Materials.” [Online]. Available: <https://www.ceicomposites.com/news/Texas-Medical-Center-Features-Modern-Mix-of-Contemporary-Building-Materials-For-Expansion-AE130.html>. [Accessed: 20-Jan-2020].
- [13] S. Madureira, I. Flores-Colen, J. de Brito, C. Pereira, “Maintenance planning of facades in current buildings,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 147, pp. 790–802, 2017.
- [14] J. Perret, “Guide de la maintenance des bâtiments - J.Perret - LibrairieEyrolles,” 1995. [Online]. Available: <https://www.eyrolles.com/BTP/Livre/guide-de-la-maintenance-des-batiments-9782281111576/>. [Accessed: 04-Jan-2020].
- [15] S. Fadil-Djenabou, P. D. Ndjigui, J. A. Mbey, “Mineralogical and physicochemical characterization of Ngaye alluvial clays (Northern Cameroon) and assessment of its suitability in ceramic production,” *J. Asian Ceram. Soc.*, vol. 3, no. 1, pp. 50–58, 2015.
- [16] O. L. Kulikov and K. Hornung, “Wall detachment and high rate surface defects during extrusion of clay,” *J. Nonnewton. Fluid Mech.*, vol. 107, no. 1–3, pp. 133–144, 2002.

- [17] E. Mançuhan, “Analysis and optimization of drying of green bricks in a tunnel dryer,” *Dry. Technol.*, vol. 27, no. 5, pp. 707–713, 2009.
- [18] J. P. Temga, J. R. Mache, A. B. Madi, J. P. Nguetnkam, D. Lucien, “Applied Clay Science Ceramics applications of clay in Lake Chad Basin, Central Africa,” *Appl. Clay Sci.*, vol. 171, pp. 118–132, 2019.
- [19] F. Händle, *Extrusion in Ceramics*, vol. 1542, no. 9. 2007.
- [20] E. Edis, I. Flores-Colen, J. De Brito, “Passive thermographic detection of moisture problems in façades with adhered ceramic cladding,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 51, pp. 187–197, 2014.
- [21] M. V. Arsenovic, L. L. Pezo, Z. M. Radojevic, S. M. Stankovic, “Serbian heavy clays behavior: Application in rough ceramics,” *Hem. Ind.*, vol. 67, no. 5, pp. 811–822, 2013.
- [22] J. Payne, A. Gharzouni, I. Sobrados, S. Rossignol, “Applied Clay Science Identifying the differences between clays used in the brick industry by various methods: Iron extraction and NMR spectroscopy,” *Appl. Clay Sci.*, vol. 160, no. March, pp. 290–298, 2018.
- [23] S. Bodian, M. Faye, N. Awa, V. Sambou, O. Limam, “Thermo-mechanical behavior of unfired bricks and fired bricks made from a mixture of clay soil and laterite,” *J. Build. Eng.*, vol. 18, no. March, pp. 172–179, 2018.
- [24] G. McNally, “Soil and Rock Construction Materials,” *London*, 1998.
- [25] H. J. Vogel, H. Hoffmann, A. Leopold, K. Roth, “Studies of crack dynamics in clay soil: II. A physically based model for crack formation,” *Geoderma*, vol. 125, no. 3–4, pp. 213–223, 2005.
- [26] V. Kuršs and A. Stinkule, “MāliLatvijaszemesdzīles un rūpniecībā.” p. 84, 1972.
- [27] I. Dienests, “Latvijaspūvmateriāluizējvieluatradnes,” pp. 1–19, 2004.
- [28] M. Dondi, B. Fabbri, G. Guarini, “Grain-size distribution of Italian raw materials for building clay products: a reappraisal of the Winkler diagram,” vol. 3, pp. 435–442, 1998.
- [29] M. Arsenović, L. Pezo, L. Mančić, Z. Radojević, “Thermal and mineralogical characterization of loess heavy clays for potential use in brick industry,” *Thermochim. Acta*, vol. 580, pp. 38–45, 2014.
- [30] S. Guzlēna, G. Šakale, S. Čertoks, “Clayey Material Analysis for Assessment to be Used in Ceramic Building Materials,” *Procedia Eng.*, vol. 172, pp. 333–337, 2017.
- [31] N. Phonphuak, S. Kanyakam, P. Chindapasirt, “Utilization of waste glass to enhance physico-mechanical properties of fired clay brick,” *J. Clean. Prod.*, vol. 112, pp. 3057–3062, 2016.
- [32] J. Götze and R. Möckel, *Quartz: Deposits, Mineralogy and Analytics*. 2012.
- [33] I. Demir and M. Orhan, “Reuse of waste bricks in the production line,” *Build. Environ.*, vol. 38, no. 12, pp. 1451–1455, 2003.
- [34] A. Abdul and A. Mohajerani, “Applied Clay Science Effect of heating rate on gas emissions and properties of fired clay bricks and fired clay bricks incorporated with cigarette butts,” *Appl. Clay Sci.*, vol. 104, pp. 269–276, 2015.
- [35] S. Guzlēna, G. Sakale, S. Čertoks, L. Grase, “Sand size particle amount influence on the full brick quality and technical properties,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 220, pp. 102–109, 2019.
- [36] F. Augier, W. J. Coumans, A. Hugget, E. F. Kaasschieter, “On the risk of cracking in clay drying,” *Chem. Eng. J.*, vol. 86, no. 1–2, pp. 133–138, 2002.

- [37] R. N. Tollenaar, L. A. van Paassen, C. Jommi, "Observations on the desiccation and cracking of clay layers," *Eng. Geol.*, vol. 230, pp. 23–31, 2017.
- [38] S. Sfarra, S. Perilli, D. Paoletti, D. Ambrosini, "Ceramics and defects," *J. Therm. Anal. Calorim.*, no. 1, 2016.
- [39] A. Ukwatta and A. Mohajerani, "Characterisation of fired-clay bricks incorporating biosolids and the effect of heating rate on properties of bricks," *Constr. Build. Mater.*, vol. 142, pp. 11–22, 2017.
- [40] M. Knapeket *et al.*, "Study of microcracking in illite-based ceramics during firing," *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 36, no. 1, pp. 221–226, 2016.
- [41] I. Allegretta, G. Eramo, D. Pinto, A. Hein, "The effect of temper on the thermal conductivity of traditional ceramics: Nature, percentage and granulometry," *Thermochim. Acta*, vol. 581, pp. 100–109, 2014.
- [42] A. Yataganbaba and I. Kurtbaş, "A scientific approach with bibliometric analysis related to brick and tile drying: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 59, pp. 206–224, 2016.
- [43] S. J. Kowalski and K. Kulczyński, "Reduction of fractures in dried clay-like materials due to specific surfactants," *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 91, no. 2, pp. 254–263, 2013.
- [44] A. G. Ghumare, M. Mallkk, M. S. Ramu, "Amido-amine based cationic gemini surfactants for clay inhibition," 2017.
- [45] R. Guégan, "Self-assembly of a non-ionic surfactant onto a clay mineral for the preparation of hybrid layered materials," *Soft Matter*, vol. 9, no. 45, p. 10913, 2013.
- [46] S. Guzlina, G. Sakale, S. Certoks, A. Spule, "Crack Reduction during Drying Process by Using Surfactant," *MATEC Web Conf.*, vol. 278, p. 01008, 2019.
- [47] F. Andreola, L. Barbieri, I. Lancellotti, C. Leonelli, T. Manfredini, "Recycling of industrial wastes in ceramic manufacturing: State of art and glass case studies," *Ceram. Int.*, vol. 42, no. 12, pp. 13333–13338, 2016.
- [48] F. A. López, M. I. Martín, I. García-Díaz, O. Rodríguez, F. J. Alguacil, M. Romero, "Recycling of Glass Fibers from Fiberglass Polyester Waste Composite for the Manufacture of Glass-Ceramic Materials," *J. Environ. Prot. (Irvine, Calif.)*, vol. 3, pp. 740–747, 2012.
- [49] C. N. Djangang, E. Kamsu, A. Elimbi, G. L. Lecomte, P. Blanchart, "Net-Shape Clay Ceramics with Glass Waste Additive," pp. 592–602, 2014.
- [50] I. Demir, "Reuse of waste glass in building brick production," *Waste Manag. Res.*, vol. 27, no. 6, pp. 572–577, 2009.
- [51] V. Loryuenyong, T. Panyachai, K. Kaewsimork, C. Siritai, "Effects of recycled glass substitution on the physical and mechanical properties of clay bricks," *Waste Manag.*, vol. 29, no. 10, pp. 2717–2721, 2009.
- [52] S. Guzlina, G. Sakale, S. Certoks, L. Grase, "Effect of the addition of fibreglass waste on the properties of dried and fired clay bricks," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 251, no. 1, 2017.
- [53] J. G. Song *et al.*, "Effect of the sintering technology on the properties of fired brick from quartz sands," *J. Ceram. Process. Res.*, vol. 12, no. 4, pp. 357–360, 2011.
- [54] L. Ferrara, V. Krelani, F. Moretti, "On the use of crystalline admixtures in cement based construction materials: from porosity reducers to promoters of self-healing," *Smart Mater. Struct.*, vol. 25, no. 8, pp. 1–17, 2016.

- [55] W. Khaliq and M. B. Ehsan, "Crack healing in concrete using various bio influenced self-healing techniques," *Constr. Build. Mater.*, vol. 102, pp. 349–357, 2016.
- [56] M. Rooij, K. van Tittelboom, N. Belie, E. Schlangen, "*Self-Healing Phenomena in Cement-Based Materials: State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee*," pp. 266, 2013.
- [57] M. Roig-flores, F. Pirritano, P. Serna, L. Ferrara, "Effect of crystalline admixtures on the self-healing capability of early-age concrete studied by means of permeability and crack closing tests," *Constr. Build. Mater.*, vol. 114, pp. 447–457, 2016.
- [58] P. Escoffres, C. Desmettre, J. P. Charron, "Effect of a crystalline admixture on the self-healing capability of high-performance fiber reinforced concretes in service conditions," *Constr. Build. Mater.*, vol. 173, pp. 763–774, 2018.
- [59] L. Ferrara, V. Krelani, M. Carsana, "A " fracture testing " based approach to assess crack healing of concrete with and without crystalline admixtures," *Constr. Build. Mater.*, vol. 68, pp. 535–551, 2014.
- [60] E. Cuenca, A. Tejedor, L. Ferrara, "A methodology to assess crack-sealing effectiveness of crystalline admixtures under repeated cracking-healing cycles," vol. 179, pp. 619–632, 2018.
- [61] B. Park and Y. Cheol, "Self-healing capability of cementitious materials with crystalline admixtures and super absorbent polymers (SAPs)," *Constr. Build. Mater.*, vol. 189, pp. 1054–1066, 2018.
- [62] X. Wang, C. Fang, D. Li, N. Han, F. Xing, "A self-healing cementitious composite with mineral admixtures and built-in carbonate," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 92, no. October 2017, pp. 216–229, 2018.
- [63] M. Roig-flores, S. Moscato, P. Serna, L. Ferrara, "Self-healing capability of concrete with crystalline admixtures in different environments," *Constr. Build. Mater.*, vol. 86, pp. 1–11, 2015.
- [64] C. Oucif, G. Z. Voyiadjis, T. Rabczuk, "Modeling of damage-healing and nonlinear self-healing concrete behavior: Application to coupled and uncoupled self-healing mechanisms," *Theor. Appl. Fract. Mech.*, vol. 96, pp. 216–230, 2018.
- [65] J. Zhang *et al.*, "Immobilizing bacteria in expanded perlite for the crack self-healing in concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 148, pp. 610–617, 2017.
- [66] K. Vijay, M. Murmu, S. V. Deo, "Bacteria based self-healing concrete – A review," *Constr. Build. Mater.*, vol. 152, pp. 1008–1014, 2017.
- [67] N. N. T. Huynh, N. M. Phuong, N. P. A. Toan, N. K. Son, "Bacillus Subtilis HU58 Immobilized in Micropores of Diatomite for Using in Self-healing Concrete," *Procedia Eng.*, vol. 171, pp. 598–605, 2017.
- [68] J. Xu and X. Wang, "Self-healing of concrete cracks by use of bacteria-containing low alkali cementitious material," *Constr. Build. Mater.*, vol. 167, pp. 1–14, 2018.
- [69] B. Park and Y. Cheol, "Quantitative evaluation of crack self-healing in cement-based materials by absorption test," *Constr. Build. Mater.*, vol. 184, pp. 1–10, 2018.
- [70] K. Sisomphon, O. Copuroglu, E. A. B. Koenders, "Self-healing of surface cracks in mortars with expansive additive and crystalline additive," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 34, no. 4, pp. 566–574, 2012.
- [71] J. Pazderka and E. Hájková, "Crystalline admixtures and their effect on selected properties of concrete," *Acta Polytech.*, vol. 56, no. 4, pp. 306–311, 2016.

- [72] M. Elsalamawy, A. R. Mohamed, A. E. Abosen, "Performance of crystalline forming additive materials in concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 230, p. 117056, 2020.
- [73] D. Snoeck, P. Van Den Heede, T. Van Mullem, N. De Belie, "Cement and Concrete Research Water penetration through cracks in self-healing cementitious materials with superabsorbent polymers studied by neutron radiography," *Cem. Concr. Res.*, vol. 113, pp. 86–98, 2018.
- [74] B. Van Belleghem, S. Kessler, P. Van Den Heede, K. Van Tittelboom, "Cement and Concrete Research Chloride induced reinforcement corrosion behavior in self-healing concrete with encapsulated polyurethane," *Cem. Concr. Res.*, vol. 113, pp. 130–139, 2018.
- [75] V. E. Garcia-Vera, A. J. Tenza-Abril, J. M. Saval, and M. Lanzon, "Influence of Crystalline Admixtures on the Short-Term Behaviour of Mortars Exposed to Sulphuric Acid," *Materials (Basel)*, vol. 12, no. 82, p. 16, 2019.
- [76] M. Madhkhan and R. Katirai, "Effect of pozzolanic materials on mechanical properties and aging of glass fiber reinforced concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 225, pp. 146–158, 2019.
- [77] L. Fenu, D. Forni, E. Cadoni, "Dynamic behaviour of cement mortars reinforced with glass and basalt fibres," *Compos. Part B Eng.*, vol. 92, pp. 142–150, 2016. 46
- [78] F. A. Branco, J. Ferreira, J. D. E. Brito, J. R. Santos, "Building structures with GRC," *CIB World Build. Congr.*, pp. 1–11, 2001.
- [79] J. G. Ferreira and F. A. Branco, "GRC mechanical properties for structural applications," *Institute Superior Techno.*, pp. 1–20, 2004.
- [80] J. R. Correia, J. Ferreira, F. A. Branco, "A rehabilitation study of sandwich GRC facade panels," *Constr. Build. Mater.*, vol. 20, no. 8, pp. 554–561, 2006.
- [81] G. Barluenga and F. Hernández-Olivares, "Cracking control of concretes modified with short AR-glass fibers at early age. Experimental results on standard concrete and SCC," *Cem. Concr. Res.*, vol. 37, no. 12, pp. 1624–1638, 2007.
- [82] P. J. M. Bartos, "Glassfibre Reinforced Concrete: A Review," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 246, no. 1, 2017.
- [83] V. Genovés, J. Gosálbez, R. Miralles, M. Bonilla, J. Payá, "Ultrasonic characterization of GRC with high percentage of fly ash substitution," *Ultrasonics*, vol. 60, pp. 88–95, 2015.
- [84] N. Arabi, L. Molez, D. Rangeard, "Durability of Alkali-Resistant Glass Fibers Reinforced Cement Composite: Microstructural Observations of Degradation," *Period. Polytech. Civ. Eng.*, vol. 62, pp. 1–7, 2018.
- [85] S. Guzlena and G. Sakale, "Alkali Resistant (AR) Glass Fibre Influence on Glass Fibre Reinforced Concrete (GRC) Flexural Properties," *RILEM Bookseries*, vol. 30, no. September, pp. 262–269, 2021.
- [86] R. Moceikis, A. Kičaite, E. Keturakis, "Workability of glass reinforced concrete (GRC) with granite and silica sand aggregates," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 251, no. 1, 2017.
- [87] A. Enfedaque, D. Cendón, F. Gálvez, V. Sánchez-Gálvez, "Analysis of glass fiber reinforced cement (GRC) fracture surfaces," *Constr. Build. Mater.*, vol. 24, no. 7, pp. 1302–1308, 2010.
- [88] B. Holubova, H. Hradecka, M. Netušilova, T. Gavenda, A. Helebrant, "Corrosion of Glass Fibres in Ultra High Performance Concrete and Normal Strength Concrete," *Ceram. - Silikaty*, vol. 61, no. 4, pp. 1–9, 2017.

[89] C. Scheffler *et al.*, “Interphase modification of alkali-resistant glass fibres and carbon fibres for textile reinforced concrete I: Fibre properties and durability,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 69, no. 3–4, pp. 531–538, 2009.

[90] EN 1170-5:1998, “Precast concrete products – Test method for glass –fibre reinforced cement. Part 5. Measuring bending strength, ‘Complete bending test’ method”.

[91] H. Kasagani and C. B. K. Rao, “Effect of graded fibers on stress strain behaviour of Glass Fiber Reinforced Concrete in tension,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 183, pp. 592–604, 2018.

[92] S. Guzlena and G. Sakale, “Self-healing of glass fibre reinforced concrete (GRC) and polymer glass fibre reinforced concrete (PGRC) using crystalline admixtures,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 30, no. September, p. 120963, 2019.



Sandra Guzlēna dzimusi 1991. gadā Jelgavā. Rīgas Tehniskajā universitātē (RTU) ieguvusi bakalaura grādu materiālzinātnē (2013) un maģistra grādu materiālu nanotehnoloģijās (2015). Strādājusi RTU Materiālzinātnes un lietišķās ķīmijas fakultātes Tehniskās fizikas institūtā, kopš 2013. gada ieņemot vecākā laboranta, kopš 2016. gada – zinātniskā asistenta amatu. 2015. gadā bijusi SIA "Lode" keramikas tehnoloģe. Strādājusi SIA "Skonto Concrete Cladding", kopš 2017. gada ieņemot Pētniecības un attīstības nodaļas vadītājas amatu.