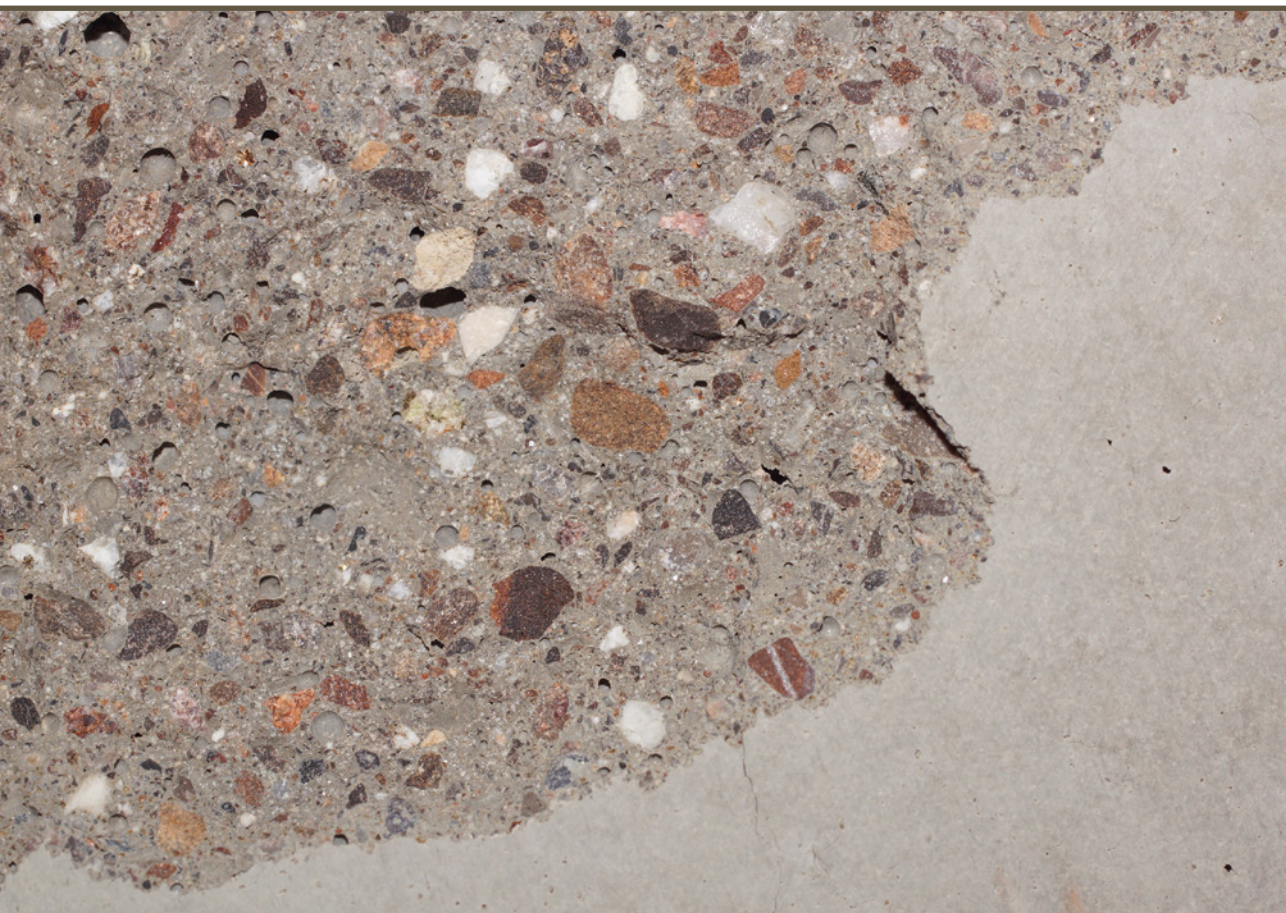


Nikolajs Toropovs

AUGSTAS VEIKTSPĒJAS BETONU NOVĒRTĒJUMS PĒC AUGSTU TEMPERATŪRU IEDARBES

Promocijas darba kopsavilkums



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Būvniecības un mašīnzinību fakultāte

Ilgspējīgo būvmateriālu un inženiersistēmu institūts

Nikolajs Toropovs

Doktora studiju programmas “Būvzinātne” doktorants

**AUGSTAS VEIKTSPĒJAS BETONU
NOVĒRTĒJUMS PĒC AUGSTU TEMPERATŪRU
IEDARBES**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs
asociētais profesors *Dr. sc. ing.* Genādijs Šahmenko

RTU Izdevniecība
Rīga 2026

Toropovs, N. Augstas veiktspējas betonu novērtējums pēc augstu temperatūru iedarbes. Promocijas darba kopsavilkums. – Rīga: RTU Izdevniecība, 2026. – 56 lpp.

Publicēts saskaņā ar promocijas padomes “RTU P-06” 2025. gada 10. oktobra lēmumu Nr. 04030-9.6/16.

Šis pētījums tapis ar *Sciex NMS-CH 12.305* projekta atbalstu.

Lēnas un garas pastaigas dod vairāk laika dabas vērošanai un baudīšanai. Lai būtu elegantāk, citēšu FN: “Visas patiesi lieliskās domas rodas pastaigas laikā.” Un es nesteidzos.

Vēlos izteikt visdziļāko pateicību saviem vadītājiem, kuri mani iedvesmoja un radīja patiesas centības un aizrautības piemēru, Genādijam Šahmenko, *Pietro Lura*, *Mateusz Wyrzykowski*, *Michele Griffa* un *Benedikt Weber*!

Esmu pateicīgs arī recenzentiem un komisijas P-06 locekļiem par konstruktīvām atsauksmēm un būtiskiem ieteikumiem.

Vēlos pateikties saviem kolēģiem un sadarbības partneriem par to, ka tiku iesaistīts lieliskos projektos, kas pārsniedza to, ko varēju iedomāties savas laboratorijas ekspedīcijas sākumā, būdams bakalaurants!

Šis ir bijis lielisks ceļojums cauri desmitgadēm, ko veidojuši cilvēki, kurus esmu satīcis šajā ceļā. Paldies jums Aleks, Aleksandr, *Alessio*, Alīna, Andrej, Andreas, Barbara, Danij, *Daniele*, *Davide*, Diāna, Ellina, Emīlija, *Fei*, Frank, Gabija, *Grazia*, Gunti, Jurij, Jāni, *Kobi*, Lauri, *Latina*, *Malene*, Marsel, Martin, Mārtiņ, Nadīne, Paulīna, Petra, Rafaēl, Robert, Roman, Rupert, Sāra, Sebij, *Sepps*, Serēna, Vitālij, Valter un Žanli! Man ir bijis pietiekami daudz laika, lai vērotu un pārdomātu notikumus, tas viss ir patiess piedzīvojums.

Visbeidzot, liels paldies manai ģimenei par nemītīgu atbalstu un dzīves piemēru!

Vāka attēla autors Nikolajs Toropovs.

<https://doi.org/10.7250/9789934372636>

ISBN 978-9934-37-263-6 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2026. gada 26. februārī plkst. 11.00 Rīgas Tehniskās universitātes Būvniecības un mašīnzinību fakultātē, Ķīpsalas ielā 6B/6A, 546. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Dr. sc. ing. Andrejs Pupurs,
Rīgas Tehniskā universitāte

Dr. phys. Andris Jakovičs,
Latvijas Universitāte, Latvija

Profesors *Dr. Valentin Antanovičs*,
Viļņas Ģedimina tehniskā universitāte, Lietuva

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis 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.

Nikolajs Toropovs (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā, tajā ir ievads, četras nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 84 attēli, 14 tabulas, divi pielikumi, kopā 126 lappuses, ieskaitot pielikumus. Literatūras sarakstā ir 148 nosaukumi.

SATURS

Ievads	6
Darba mērķis	7
Darba objekts	8
Darba uzdevumi	8
Darba zinātniskā novitāte	8
Rezultātu aprobācija un publikācijas	9
1. Augstai temperatūrai pakļauts betons. Literatūras apskata kopsavilkums	10
1.1. Augstu temperatūru ietekme uz konstrukcijām	10
1.2. Augstas temperatūras ietekme uz materiāliem	11
Spiedes stiprība	12
Elastības modulis	12
Porozitāte	13
Izmaiņas hidratācijas produktos	14
Materiāla integritāte, kas novērtēta ar nesagraujošām metodēm. Ultraskaņā balstīti mērījumi	15
1.3. Faktori un mehānismi, kas ietekmē betona eksplozīvo termisko atslāpošanos	15
1.4. Betona konstrukciju eksplozīvās termiskās atslāpošanās novēršana	18
1.5. Kopsavilkums	19
2. Materiāli un betona sastāvi kā šī darba objekts	20
2.1. Materiāli	20
2.2. Betona sastāvi	21
2.3. Sastāvu novērtēšana pēc atslāpošanās/nav atslāpošanās kritērija	21
Termiskās atslāpošanās testu rezultāti	22
3. paaugstinātās temperatūras ietekme uz betona īpašībām un mikrostruktūru	23
3.1. Ievads	23
3.2. Metodes	23
Mehāniskās īpašības	23
Betona hidratācija un dehidratācija (<i>TGA</i>)	23
Temperatūras ietekme uz poru struktūru	23
Termiskās izplešanas koeficients	24
3.3. Rezultāti	24
Mehāniskās īpašības	24

Termogravimetriskā analīze (TGA)	26
Dzīvsudraba intrūzijas porozimetrija	29
Termiskā izplēšanās	32
3.4. Diskusija	32
4. Negraujošās novērtēšanas metodes betonam, kas pakļauts augstai temperatūrai	34
4.1. Neitronu radiogrāfijas lietojums betonaM	34
Rezultāti un diskusija	34
4.1.1. Apkopojums/Secinājumi	40
4.2. Termiski izraisītu bojājumu novērtējums ar ultraskaņas metodēm	40
4.2.1. Paraugi un protokoli	40
4.2.2. Rezultāti	41
Ultraskaņas ātrums	41
Rezonanses ultraskaņas spektroskopija	41
Nelineārā rezonanses spektroskopija	43
4.2.3. Diskusija	45
4.2.4. Kopsavilkums/secinājumi	46
4.3. Termiski izraisītu bojājumu novērtēšana, izmantojot μ CT	46
4.3.1. Paraugi un protokoli	46
4.3.2. Metodes	46
4.3.3. Rezultāti	47
4.3.4. Apkopojums/Secinājumi	49
5. Secinājumi	50
Izmantotā literatūra	52

IEVADS

Pateicoties ilgajai izpētes, izstrādes un lietojuma vēsturei, betons ir kļuvis par pasaulē visvairāk izmantoto cilvēka radīto materiālu¹⁻³. Tas ir atradis lietojumu gan kā vienkāršs ceļa barjeras bloks satiksmes organizācijai, gan kā konstruktīvs materiāls, kas ļauj sasniegt tādus augstumus un laidumus, kādus bija grūti iedomāties pirms gadu desmitiem. Pieprasījums pēc betona ar izcilām stiprības un izturības īpašībām, salīdzinot ar tradicionālo betonu, radās līdz ar rūpniecisko attīstību 20. gadsimta otrajā pusē. Izmaiņas betona industrijā bija nepieciešamas, lai nodrošinātu labāku veiktspēju kopumā un lielāku specializāciju un atbilstu prasībām lietojuma jomā. Tas ietvēra granulometrijas optimizāciju, smalku daļiņu ar pucolāna aktivitāti izmantošanu, pildvielu ar noteiktām īpašībām izmantošanu utt.⁴ Tomēr vissvarīgākā bija ūdens un cementa attiecības samazināšana un ūdeni reducējošo piedevu ieviešana. Ūdens samazināšanas piedevas tika ieviestas 30. gados un ietekmēja betona rūpniecību; savukārt 80. gadus var raksturot kā revolūciju betona īpašībās, ko izraisīja jauna veida polikarboksilāta plastifikatori⁵. Betonu ar izteikti labākām īpašībām, salīdzinot ar parasto betonu (*OC*), bieži sauc par augstas veiktspējas betonu (*HPC*), un plastifikatorus, kas radīja revolūciju tirgū, sauc par superplastifikatoriem. *HPC* raksturo augsta spiedes un stiepes izturība, augsts elastības modulis, laba izturība, zema caurlaidība un augsta nodilumizturība. Samazinot konstrukcijas pašmasu, tiek patērēts mazāk izejmateriālu un kļūst iespējamas slaidas, elegantas konstrukcijas ar mazāku ieguldītu enerģiju un CO₂ nospiedumu. Betona sastāvu un veiktspējas izmaiņas notika pakāpeniski, līdz ar to nevar novilkt skaidru robežu starp *OC* un *HPC*. Lietojumu dažādība un izejmateriālu pieejamība visā pasaulē ļauj līdzāspastāvēt neierobežotam maisījumu daudzumam. Īpaši un vienlaikus ļoti dažādi lietojumi, piemēram, tuneļos, augstceltnēs, atomelektrostacijās, liela laiduma tiltos, radīja lielu betona veidu dažādību un jaunus izaicinājumus, kas iepriekš nebija aktuāli. Tas viss ļauj līdzāspastāvēt “jauniem” maisījumiem, vienlaikus nepadarot “vecos” konceptus par novecojušiem, kā tas būtu daudzās citās nozarēs. Atskatoties uz nozīmīgo attīstību betona rūpniecībā 20. gadsimtā, *Neville* un *Aitcin*⁶ to salīdzināja ar telekomunikāciju un automobiļu rūpniecību, secinot, ka “tomēr izmaiņas nav ne tuvu tik revolucionāras kā izmaiņas telekomunikācijā vai arī automobiļos⁶.”

Ir nepieciešams nodrošināt konstrukciju ilglaicīgu noturību gan no manuāla darba efektivitātes viedokļa, gan no sabiedrības ilgtspējīgas attīstības viedokļa, ņemot vērā ierobežotus pasaules minerālos/fosilos resursus. Cementa ražošana veido līdz pat 8–9 % no cilvēka saražotā CO₂ daudzuma³, 2016. gadā sasniedzot 163 miljonus tonnu cementa ES28 valstīs vien, bet maksimālais apjoms tika sasniegts 2007. gadā un veidoja 268 miljonus tonnu⁷. 2015. gadā ES28 valstīs tika saražoti 167 miljoni tonnu cementa, kas veido 4 % no pasaules ražošanas apjoma, tādējādi ES ir trešā lielākā cementa ražotāja pasaulē pēc Indijas ar 270 miljoniem tonnu un Ķīnas, kas dominē tirgū ar 2350 miljoniem tonnu cementa jeb 51 % no pasaules ražošanas apjoma 2015. gadā⁷. Kaļķakmens kalcinēšanas process un kurināmā dedzināšana cementa ražošanas procesā kopā izdala aptuveni 1 tonnu CO₂ uz 1 tonnu cementa³.

Neskatoties uz betona īpašību straujo attīstību un lielo saražota materiāla daudzumu, kas akcentē betona nozīmi mūsdienu sabiedrībā, viens no lielākajiem *HPC* izplatības ierobežojumiem visā pasaulē ir tā darbība ugunsgrēka gadījumā, proti, zemā *HPC* izturība, pakļaujot to augstai temperatūrai. Tas ir saistīts ar ekstrēmu bojājumu veidu, ko dēvē par sprādzienbīstamu termisko atslāpošanos^{4,8}. Sprādzienbīstama atslāpošanās augstā temperatūrā var izraisīt pakāpenisku stieģojuma betona aizsargslāņa zudumu, pakļaujot to apkārtējai videi

un izraisīt dzelzsbetona konstrukcijas elementa sabrukumu. Ir svarīgi nošķirt plaisāšanu kā sarežģītu ar struktūru saistītu parādību un izmaiņas, kas notiek ar betonu kā materiālu augstas temperatūras iedarbē. Šī atšķirība apskatīta darba 1.1. un 1.2. nodaļā, attiecīgi no konstrukcijas un materiāla viedokļa.

Jo vairāk *HPC* tiek izmantots, jo lielākas ir bažas par *HPC* veikspēju ugunsgrēka gadījumā. Palielinoties *HPC* izmantošanai augstceltnēs un tuneļos, kļūst nepieciešams izpētīt sprādzientipa atslāpošanos ugunsgrēku gadījumā, lai risinātu šīs problēmas, atrastu uzticamu risinājumu un aizsargātu jaunas un esošās konstrukcijas no plaisāšanas. Pētniecības un rūpniecības aprindu lielo interesi par izsīkumu daļēji izraisīja plaša mēroga ugunsgrēka katastrofas, kas satricināja sabiedrību. Pagājušā gadsimta 90. gados daudzi lieli ugunsgrēki notiek tuneļos (Lielās Beltas tunelī 1994. gadā, Lamanša tunelī⁹ 1996. gadā un Monblāna tunelī 1999. gadā), radot būtiskus un dārgus postījumus; šos trīs ugunsgrēkus apkopoja un apskatīja *Khoury*¹⁰.

1996. gada 18. novembrī izcēlās ugunsgrēks dzelzceļa tunelī, kas savieno Franciju un Angliju (Lamanša tunelī). Lokomotīve ar 10 vilciena vagoniem un deviņām kravas automašīnām dega aptuveni 10 stundas, izraisot būtiskus konstrukcijas bojājumus un ievainojot astoņus cilvēkus. Izmaksas saistībā ar transportlīdzekļu un tuneļa bojājumiem, kā arī izmaksas, kas saistītas ar pakalpojumu traucējumiem, saskaņā ar *Kodur*¹¹ bija ap 50 miljonu mārciņu. Maksimālā sasniegtā temperatūra svārstījās no 700 °C⁹,¹² līdz 1000 °C¹¹. *Ulm*⁹,¹² savos darbos minēja, ka ekonomiskie zaudējumi vien sasniedza aptuveni 1,5 miljonus USD dienā sešu mēnešu remontdarbu laikā, kad tunelis tika slēgts. No kā izriet, ka finansiālie zaudējumi, saistīti ar loģistikas problēmām slēgtās infrastruktūras dēļ, bija lielāki nekā remontdarbu tiešās izmaksas. Tunelis bija veidots no 45 cm bieziem saliekamiem dzelzsbetona gredzeniem, ugunsgrēka rezultātā tika bojāts tunelis vairāk nekā 100 metru garumā ar vidējo plaisu dziļumu no 10 cm līdz 20 cm. Dažās tuneļa daļās betona gredzeni tika iznīcināti līdz pat dabīgā ieža slānim¹¹. Tas liecina par ugunsgrēka radīto bojājumu nozīmīgumu un nepieciešamību pēc dziļākas mehānismu izpratnes.

Ir vairākas metodes, kas ir pierādījušas, ka tās spēj novērst vai samazināt sprādzienbīstamu atslāpošanos, piemēram, izdegošu šķiedru izmantošana betonā. Tomēr skaidru vadlīniju un viena ugunsgrēka scenārija trūkuma dēļ nav vispārējas aizsardzības metodes, kas pārbaudīta ar ugunsdrošības testu. Lai veicinātu plašu un drošu *HPC* lietojumu, ugunsdrošības projektēšanas un aizsardzības metodēm jābalstās dziļā izpratnē par procesiem, kas ir pamatā sprādzienbīstamam atslāpošanās procesam un materiālu īpašību attīstībai ugunsgrēka gadījumā. Jaunās attīlveidošanas un raksturošanas metodes, kas izstrādātas pēdējos gados, tika lietotas, izmantojot vienotu materiālu kopu, sniedz jaunu ieskatu termiskās atslāpošanās pamatmehānismos ar vispārēju mērķi – uzlabot *HPC* ugunsizturību.

DARBA MĒRKIS

Darba mērķis ir veicināt izpratni par termiskās atslāpošanās fenomenu un validēt kompleksās nesagraujošās mērīšanas metodes no citām jomām, lai novērtētu betona termiskos bojājumus.

DARBA OBJEKTS

Darbs sniedz kvalitatīvu un kvantitatīvu novērtējumu super absorbējošo polimēru (*SAP*) piedevas izmantošanai lai ierobežotu paaugstinātas temperatūras radītos bojājumus. Ar nelineārās rezonanses ultraskaņas spektroskopijas palīdzību iegūto paraugu nelinearitāte izceļ *SAP* un *PP* šķiedru kombinēto ietekmi uz materiāla stāvokli gan pirms termiskās slodzes, gan pēc tās.

Pēdējos gados izstrādātās jaunās attīrveidošanas un raksturošanas metodes, kas tiek lietotas, raksturojot vienotu materiālu kopu, ļauj sniegt jaunu ieskatu betona termiskās atslāpošanās procesam pamatmehānismos ar globālu mērķi – uzlabot *HPC* ugunsdrošību.

DARBA UZDEVUMI

Lai sasniegtu darba mērķus, definēti vairāki uzdevumi.

- Apkopot literatūrā pieejamo informāciju par augstas temperatūras ietekmi uz betonu, pievēršot uzmanību paliekošajām materiāla īpašībām jeb materiāla īpašībām pēc atdzišanas.
- Noteikt fundamentālos parametrus, kas izraisa termisko eksplozīvo atslāpošanos vai arī to novērš, par pamatu ņemot betonu ar parastām īpašībām (*OC*), kas izvēlētās termiskās slodzes iedarbības rezultātā nekad nesprāgst, un augstas veiktspējas betonu (*HPC*), kas piedzīvo eksplozīvo termisko atslāpošanos līdzīgos apstākļos.
- Modificēt izvēlēto *HPC* sastāvu, izmantojot dažādas piedevas, kas ierobežotu vai novērstu eksplozīvo termisko atslāpošanos.
- Izpētīt visu sākotnējo un modificēto maisījumu īpašības, ieskaitot īpašību izmaiņas atkarībā no vecuma un termiskās slodzes līmeņa. Apskatot izmaiņas, ko veicina termiskā slodze, izmantot materiāla paliekošo stāvokli.
- Izpētīt betona termiskos bojājumus ar negraujošām metodēm; izstrādāt protokolu bojājumu kvantitatīvai novērtēšanai.

DARBA ZINĀTNISKĀ NOVITĀTE

Promocijas darbs sniedz sistemātisku un plašu betona īpašību kopuma izpēti labi kontrolētos, vienotos apstākļos.

Cik autoram ir zināms, neitronu radiogrāfijas mērījumu laikā pirmo reizi tika reģistrēta faktiska plaisa. Pateicoties lielam neitronu staru vājinājumam ar ūdeņradi, neitronu attīrveidošana ļauj izpētīt ūdens sadalījumu cementa kompozītos. Neitronu rentgenogrāfija tika veikta javas paraugiem, pakļaujot tos augstai temperatūrai. Šim nolūkam paraugi tika novietoti uz sildīšanas plāksnes ar īpaši izstrādātiem aizsargvairogiem, lai aizsargātu delikāto neitronu attīrveidošanas iekārtu (jo īpaši scintillatoru) no atlūzām sprādziena gadījumā. Tas ļāva iegūt unikālu rezultātu – tiešsaistē novērot mitruma sadalījumu paraugā, sākoties plaisāšanai.

Cik autoram ir zināms, pirmo reizi vienlaikus tika apvienoti kompleksi reāllaika tvaika spiediena mērījumi porās, temperatūras gradienta mērījumi materiālā, neitronu radiogrāfija un parauga termiskā slodze.

Pirmo reizi *SAP* ietekme uz betona termiskiem bojājumiem tika novērtēta ar nesagraujošām metodēm.

Pirmo reizi tika izmantotas trīs ultraskaņas metodes, lai novērtētu betona termiskos bojājumus, un iegūtos ultraskaņas datus apstiprina mikrodatortomogrāfija (*uCT*) tiem pašiem paraugiem pirms un pēc termiskiem bojājumiem.

REZULTĀTU APROBĀCIJA UN PUBLIKĀCIJAS

1. Toropovs, N., Monte, F. L., Wyrzykowski, M., Weber, B., Sahmenko, G., Vontobel, P., Felicetti, R & Lura, P. (2015). Real-time measurements of temperature, pressure and moisture profiles in High-Performance Concrete exposed to high temperatures during neutron radiography imaging. *Cement and Concrete Research*, 68, 166–173.
2. Zhu, P., Brunner, S., Zhao, S., Griffa, M., Leemann, A., Toropovs, N., Malekos, A., Koebel, M. & Lura, P. (2019). Study of physical properties and microstructure of aerogel-cement mortars for improving the fire safety of high-performance concrete linings in tunnels. *Cement and Concrete Composites*, 104, 103414.
3. Dauti, D., Tengattini, A., Dal Pont, S., Toropovs, N., Briffaut, M., & Weber, B. (2018). Analysis of moisture migration in concrete at high temperature through in-situ neutron tomography. *Cement and Concrete Research*, 111, 41–55.
4. Dauti, D., Tengattini, A., Pont, S. D., Toropovs, N., Briffaut, M., & Weber, B. (2020). Some observations on testing conditions of high-temperature experiments on concrete: an insight from neutron tomography. *Transport in Porous Media*, 132 (2), 299–310.
5. Dauti, D., Dal Pont, S., Weber, B., Briffaut, M., Toropovs, N., Wyrzykowski, M., & Sciumé, G. (2018). Modeling concrete exposed to high temperature: Impact of dehydration and retention curves on moisture migration. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 42 (13), 1516–1530.
6. Zhong, P., Wyrzykowski, M., Toropovs, N., Li, L., Liu, J., & Lura, P. (2019). Internal curing with superabsorbent polymers of different chemical structures. *Cement and Concrete Research*, 123, 105789.
7. Bernard, E., Jenni, A., Toropovs, N., & Mäder, U. (2023). Percolation experiment across a 10-year-old interface between Opalinus Clay and Portland concrete. *Cement and Concrete Research*, 170, 107180.
8. Waldvogel, M., Zurbruggen, R., Toropovs, N., Berger, A., & Herwegh, M. (2023). Distribution and evolution of (micro) strain and stresses in flexible, waterproofing membranes using digital image correlation and finite element modelling. *Cement and Concrete Composites*, 138, 104982.
9. Wyrzykowski, M., Toropovs, N., Winnefeld, F., & Lura, P. (2024). Cold-bonded biochar-rich lightweight aggregates for net-zero concrete. *Journal of Cleaner Production*, 434, 140008.

1. AUGSTAI TEMPERATŪRAI PAKĻAUTS BETONS. LITERATŪRAS APSKATA KOPSAVILKUMS

1.1. AUGSTU TEMPERATŪRU IETEKME UZ KONSTRUKCIJĀM

Struktūras veiktspēja ugunsgrēkā ir atkarīga no vairākiem faktoriem. Mēģinājumi apkopot šos faktorus un izstrādāt noteikumus, lai pārbaudītu konstrukcijas, kas pakļautas uguns iedarbībai, aizsākās 1903. gadā, kad Ugunsgrēku novēršanas kongresā Londonā tika prezentēts pirmais ugunsizturības testēšanas standarts¹³.

Konstrukciju bojājumi var rasties betona vai tērauda stiegrojuma mehānisko īpašību pasliktināšanās dēļ, kā arī kontakta starp betonu un tērauda stiegrojumu pasliktināšanas vai betona plaisāšanas dēļ. Konstrukcijas elementi ir jāprojektē tā, lai noteiktā ugunsgrēka scenārijā noteiktu laiku pildītu savas nesošās funkcijas. Saskaņā ar *EN 1992-1-2*¹⁴, lai nodrošinātu konstrukcijas drošību, var izmantot gan nominālo ugunsgrēka scenāriju, gan parametrisko ugunsgrēka pieeju. Eurokodeksi attiecas uz konstrukciju pasīvo ugunsdrošību konstrukciju un elementu projektēšanas ziņā.

Vistiešākā un acīmredzamākā uguns ietekme uz jebkuru materiālu vai konstrukciju ir tieša liesmas iedarbība, un ir vispārzināms, ka betons un tā tērauda stiegrojums nedeg. Tie neizdala toksiskus izgarojumus, nerada bīstamus dūmus un neizkūst standarta *ISO* ugunsgrēka gadījumā. Tomēr ugunsgrēka laikā konstrukcijas ir pakļautas sabrukuma riskam, jo betona un – vēl jo vairāk – tērauda mehāniskās īpašības (stiprība stiepē un elastības modulis) ievērojami samazinās. Eksplozīvā termiskā atslāpošanās ir bīstama, jo: i) tā pakļauj tērauda stiegrojumu augstai temperatūrai, tādējādi izraisot tā ātrāku termisko nolietošanos; ii) rada lokālu saķeri starp betonu un tērauda stiegrojuma zudumu; iii) ārkārtējos gadījumos izraisa pie betona elementu šķersgriezuma laukuma samazināšanās.

Divi galvenie uguns slodzes likņu veidi ir celulozes ugunsgrēka līkne un ogļūdeņraža (HC) ugunsgrēka līkne. Galvenā atšķirība ir laiks, kas nepieciešams, lai sasniegtu maksimālo temperatūru, kur degšanas ātrums celulozes ugunsgrēkos ir salīdzinoši lēnāks, jo “degviela” ir būvmateriāli un ēkas saturs, savukārt ogļūdeņražu ugunsgrēkos temperatūras paaugstināšanās ir ievērojami ātrāka, jo “degviela” ugunsgrēkam ir ogļūdeņraži naftas ķīmijas rūpnīcās vai faktiskā degviela automašīnās, piemēram, ugunsgrēki tuneļos un stāvvietās. Ievērojami mazāk testu tiek veikts, izmantojot reaktīvās degvielas ugunsgrēka scenārija līkni, kur maksimālā temperatūras paaugstināšanās ir tūlītēja. Šīs un citas līknes plašāk aprakstītas darbā.

Komplekss liela mēroga ugunsdrošības tests tika veikts 2003. gadā Norvēģijā. Neizmantotais *Runehamar* tunelis kļuva par testēšanas objektu, kurā tika veikti pieci liela mēroga ugunsdrošības testi. Tika iegūts liels datu apjoms¹⁵⁻¹⁸, kas vēlāk tika aprakstīts un analizēts, piemēram, tuneļa gažu (gaisa) temperatūra¹⁶, uguns izplatība un liesmu garums¹⁷ un siltuma izdalīšanas ātrums¹⁸. Testi būtiski ietekmēja tālākos pētījumus un deva ieskatu ekstrēmās apstākļos, kas veidojas tuneļos ugunsgrēku gadījumos. Veicot testu T1¹⁵, tika reģistrēta maksimālā temperatūra 1359,6 °C. Jāatzīmē, ka testā tika simulēta kravas automašīnas aizdegšanās, kurā bija 360 koka paletes (1200 × 800 × 150 mm³ izmērā), 20 koka paletes (1200 × 1000 × 150 mm³ izmērā), 74 polietilēna plastmasas paletes

($1200 \times 800 \times 150 \text{ mm}^3$ izmērā) un 122 m^2 poliestera piekabes pārvalks (brezents). Šī temperatūra ievērojami pārsniedz celulozes uguns līknes temperatūru, kas bija sagaidāma no koka paletēm, un tā bija arī augstāka par HC līkni. Starptautiskā tuneļu asociācija izmantoja datus, kas iegūti *Runehamar* tuneļa ugunsdrošības testā savu vadlīniju izstrādē¹⁹ un ieteica ievērot *RWS* līknes scenāriju ceļu tuneļiem. Lai gan faktiskā ugunsdrošības pārbaude tunelī ir ļoti īpašs gadījums, mazāka mēroga tuneļa elementu testiem ir praktiska nozīme, un to rezultātā tiek iegūti vērtīgi dati, lai prognozētu tuneļa apšuvuma faktisko uzvedību ugunsgrēka gadījumā.

Balstoties iepriekšējā pieredzē un ņemot vērā ārkārtīgi postošu ugunsgrēku gadījumus, kas izraisījuši daudzveidīgus bojājumus, tiek veikti arvien sarežģītāki un ekstrēmāki ugunsdrošības testi ar mērķi palielinātu svarīgu konstrukciju drošību. Liela mēroga testēšanas objekti tiek būvēti tā, lai atspoguļotu reālus ugunsgrēka apstākļus, lai uzlabotu faktiskās struktūras drošību. Lielisks piemērs ir Honkongas-Džuhajas-Makao iegremdētais tunelis, kas uzbūvēts mērogā 1 : 5, kur tika nodrošināta ārējā slodze un uguns no divām pusēm²⁰. Šī liela mēroga testa rezultātā *Dong et al.*²⁰ novēroja gandrīz 100 % tuneļa iekšējās virsmas atslāpošanos un nobrukumu ar maksimālo dziļumu līdz 142,2 mm.

Balstoties iepriekš apkopotajā, var secināt, ka augsta temperatūra ugunsgrēka gadījumā var izraisīt būtiskus konstrukciju bojājumus. Kas savukārt īpaši uzsver nepieciešamību pēc dziļākas izpratnes par procesiem, kas norit betona konstrukcijās ugunsgrēka gadījumā ar mērķi novērst vai samazināt negatīvās sekas, veicot attiecīgas izmaiņas būvnormatīvos.

1.2. AUGSTAS TEMPERATŪRAS IETEKME UZ MATERIĀLIEM

Betona termiskā eksplozīvā atslāpošanās ir parādība, kas ir attiecināma uz konstrukcijām, nevis materiālu. Šī parādība ir atkarīga no konstrukciju ģeometrijas, ārējām slodzēm, slodžu kinētikas. Šie faktori papildina izmaiņas pašā materiālā, kas notiek augstas temperatūras iedarbē. Šajā nodaļā apskatīts, kas ir temperatūras paliekošā ietekme uz materiāla īpašībām. Jāuzsver, ka ne vienmēr ir iespējams pilnībā nošķirt citus faktorus (piemēram, ģeometriju vai kinētiku) no temperatūras ietekmes. To parasti dara, pētot pēc iespējas lēnas temperatūras izmaiņas un mazus paraugus.

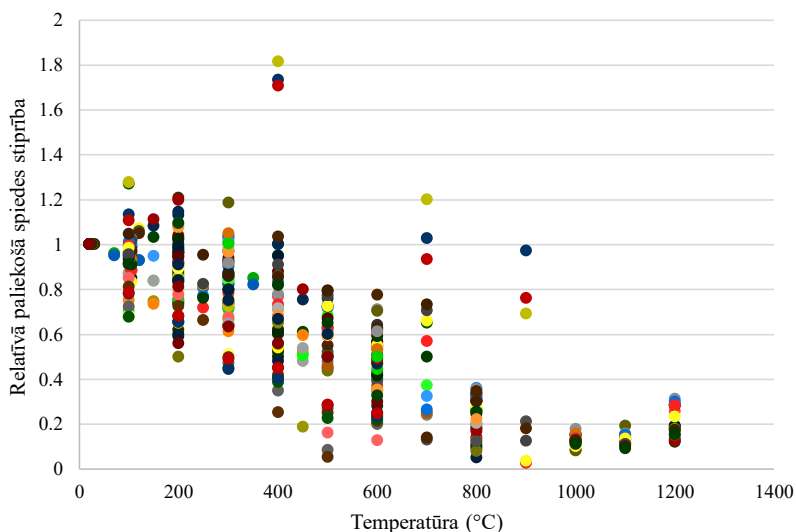
Ir svarīgi atšķirt uguns temperatūru un faktisko temperatūru katrā materiāla punktā. Ugunsgrēka līknes nosaka uguns/gāzu temperatūru. Reālajā struktūrā, kas mainās laikā, sagaidāms temperatūru gradients, kas nozīmē atšķirīgas materiāla īpašības un mikrostruktūru konstrukcijas griezumā.

Iegūt visprecīzākās un plašākās betona īpašības brīdī, kad materiālā notiek uguns slodzes izraisītās izmaiņas katrā laika/temperatūras brīdī, nav viegls izaicinājums. Promocijas darbā aplūkotas plaisāšanas parādības ir saistītas ar konstrukcijas veiktspēju augstā temperatūrā, kas nozīmē, ka pats materiāls vienlaikus piedzīvo mehāniskās un termiskās slodzes. No testēšanas viedokļa tas nozīmē, ka paraugiem, ko izmanto mehānisko, transporta vai citu īpašību noteikšanā, vienlaikus jābūt mehāniski un termiski noslogotiem, kas vairumā gadījumu nav droša darba/testēšanas vide.

Visbiežāk augstas temperatūras ietekmes novērtējums tiek atspoguļots, uzrādot datus par mehāniskām īpašībām noteiktā temperatūras diapazonā un aprakstot mikrostruktūras izmaiņas termisko slodžu ietekmē, dažas no literatūrā aprakstītajām īpašībām ir apkopotas tālāk. Svarīgi minēt, ka lielākā daļa no tālāk apkopotajām mehāniskām īpašībām tiek iegūtas pēc paraugu atdzišanas, t. i., paliekošā stāvoklī.

Spiedes stiprība

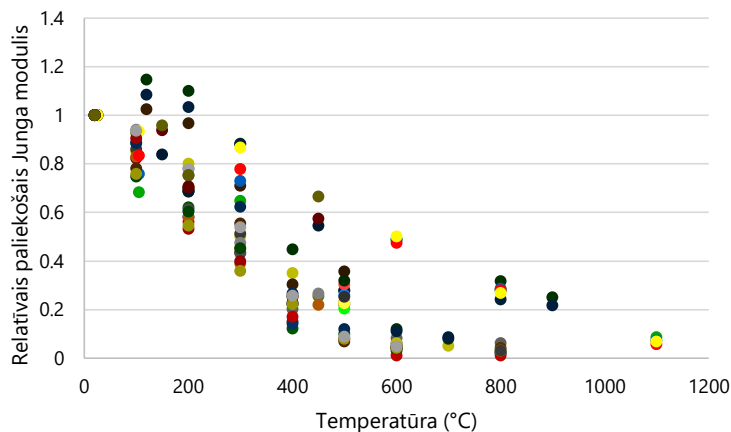
Tālāk ir apkopoti vairāku pētījumu^{21–42} dati. Vienotai datu vizualizācijai autors izvēlējās relatīvo salīdzinājumu, kur izmaiņas materiālu īpašībās tiek atspoguļotas kā paliekošā vērtība, dalīta ar sākotnējo vērtību pirms termiskā slogojuma. Datu ieguvei tika izmantotas gan tabulas, gan grafiki attiecīgajos darbos, kā rezultātā ir iespējamās nelielas novirzes no šo pētījumu oriģinālajiem datiem (1.1.1.1. attēls..). Piemēram, relatīvā paliekošā spiedes stiprība pēc termiskām slodzēm ir apkopota 101 betona sastāvam. Lielākajā daļā pētījumu sākotnējā temperatūra pirms termiskās apstrādes ir norādīta, un lielākoties tā ir 20 °C, 25 °C vai 30 °C. Gadījumos, kad references sākumtemperatūra nav norādīta vai tiek definēta kā istabas temperatūra, autors izvēlējās referenci piesaistīt 20 °C, kas ļauj attēlot attiecīgās īpašību vērtības grafiski, piemēram, *Irshidat*²⁹ darbā.



1.1. attēls. Relatīvā paliekošā spiedes stiprība, dati apkopoti no vairākiem avotiem^{21–42}.

Elastības modulis

1.2. attēlā apkopoti dati par paliekošo Junga moduli, attiecīgie dati ir apstrādāti no vairākiem literatūras avotiem^{25, 27, 29, 33, 36, 39, 41, 42} un attiecas uz dažādām betona stiprības klasēm ar mērķi sniegt kopējo tendenci.



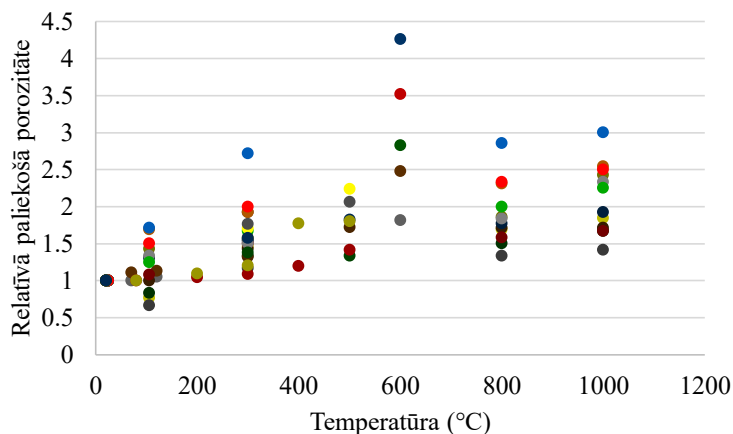
1.2. attēls. Relatīvais paličkošais Junga modulis.

Nedaudz augstāks relatīvais paličkošais Junga modulis ir novērots reaktīvajiem pulverbetoniem, ko pētījis *Zheng*³⁹, kurš ir novērojis Junga moduļa pieaugumu temperatūrā līdz pat 200 °C (1.2. att.). Kā var redzēt attēlā, Junga moduļa pieaugums ir samērā liels retums, salīdzinot ar pārējiem apkopotiem datiem. Kopumā dehidratācijas rezultātā samazinās betona elastības modulis, kas ir saistīts gan ar kristālu dehidratāciju, gan mikroplaisām. Iespējamo konceptu, kādi procesi izraisa elastības moduļa pieaugumu, autors piedāvā šī darba praktiskajā daļā, apskatot rezultātus, kas iegūti ar negraujošām metodēm, novērtējot paraugu linearitātes koeficientu izmaiņas pēc apstrādes augstā temperatūrā.

Lau un *Anson*⁴² savā darbā apskatīja metāla fibru ietekmi uz betona īpašībām pēc termiskās apstrādes, maisījumi ar tērauda šķiedrām uzrādīja augstāku elastības moduli nekā standarta maisījumi bez šķiedrām visās temperatūrās (pētījums tika veikts 25–1100 °C diapazonā).

Porozitāte

Tālāk ir piedāvāts īss literatūras apkopojums, kas apskata betona relatīvās porozitātes izmaiņas (1.3. a1.3. attēls). Būtiski, ka visos gadījumos^{35, 37, 40, 42, 43} – līdzīgi kā šajā promocijas darbā – tika izmantota dzīvsudraba porozimetrijas (*MIP*).

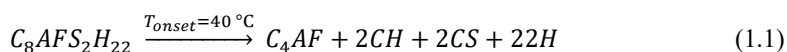


1.3. attēls. Relatīvā paliekošā porozitāte.

Izmaiņas hidratācijas produktos

Betona pakļaušana augstai temperatūrai rada ne tikai fiziskus bojājumus, bet, pirmkārt, izraisa mitruma kustību un hidratu dehidratāciju. Termiskās analīzes datus par fāžu sadalīšanos temperatūrā no 0 °C līdz 800 °C ir apkopojis *Collier*⁴⁴. Lai gan tīru fāžu sadalīšanos var izmērīt ar termogravimetriskās analīzes (TGA) metodēm, reālā konstrukcijā procesi ir sarežģītāki, jo strukturāliem elementiem ir temperatūras gradienti ugunsgrēka gadījumā un ļoti iespējama spiediena palielināšanās, kas ietekmē kristālu dehidratācijas temperatūru, kā arī pati struktūra ir pakļauta mehāniskajām slodzēm. Tajā pašā laikā fāzes maiņas raksturs, piemēram, dehidratācija vai dekarbonizācija, ir endotermiska reakcija; tas nozīmē temperatūras pazemināšanos, ja nav jaunas enerģijas pievades.

Vispārīgās dehidratācijas reakcijas ir norādītas tālāk un aprakstītas cementa ķīmijas nomenklatūrā:



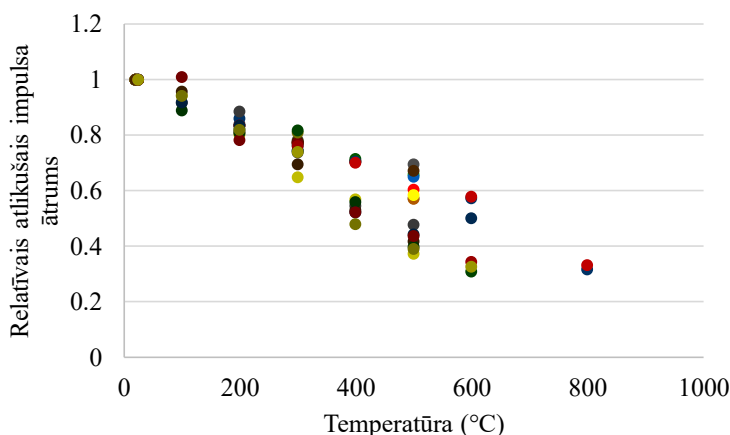
Kā redzams no reakciju formulām (1.1. un 1.3. formula), hidratu dekompozīcijas produkti augstā temperatūrā var turpināt sadalīties tālāk.

Lai gan vienkāršs tīro fāžu sastāvs un sadalīšanās ir labi pētīta tēma, dinamiskais fāzes sastāvs citu fāžu sadalīšanās laikā paaugstinātas temperatūras apstākļos ir diezgan sarežģīts. Kompleksu modeli, kas apraksta fāžu dekompozīciju, ir piedāvājis *Jiang et al.*⁴⁵, tā ietver procesus un īpašības līdz pat 1200 °C. Autori uzsver sildīšanas ātruma nozīmi momentānā fāžu veidošanā.

Materiāla integritāte, kas novērtēta ar nesagraujošām metodēm. Ultraskaņā balstīti mērījumi

Visizplatītākā ultraskaņas metode betona materiāla stāvokļa novērtēšanai ir ultraskaņas impulsa ātruma (*UPV*) mērīšana. Šī metode sīkāk apskatīta un lietota šī darba 4.2. nodaļā. Augstas temperatūras kopējā ietekme uz materiāla integritāti šeit ir parādīta kā relatīvais atlikušais ultraskaņas impulsa ātrums. Ultraskaņas impulsa ātrums ir lineāra viena impulsa metode; tas sniedz informāciju par kopējo materiāla stāvokli, jo tas ir jutīgs pret makroplaisām un mazāk jutīgs pret mikrobojājumiem.

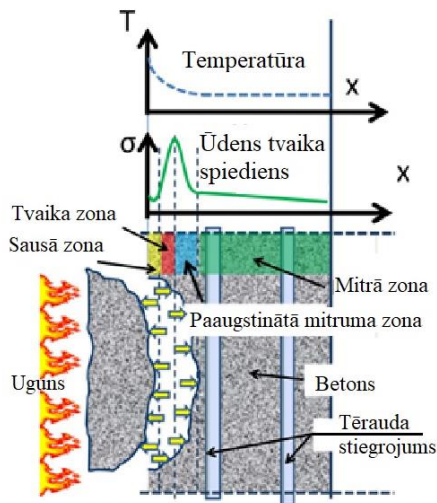
1.4. attēlā redzams relatīvais *UPV*, kas izmērīts paraugiem paliekošajā stāvoklī pēc pakļaušanas augstai temperatūrai, kur sākotnējais *UPV* (vērtība = 1), kas izmērīts paraugiem pirms pakļaušanas augstai temperatūrai, dati apkopoti no vairākiem avotiem^{23, 25, 27, 32}.



1.4. attēls. Relatīvais atlikušais impulsa ātrums.

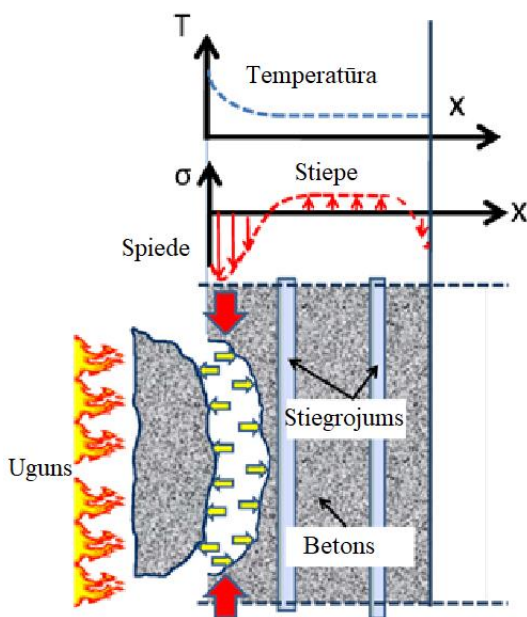
1.3. FAKTORI UN MEHĀNISMI, KAS IETEKMĒ BETONA EKSPLOZĪVO TERMISKO ATSLĀŅOŠANOS

Pirmās teorijas kas konsekventi koncentrējās tieši uz betona eksplozīvo atslāņošanas, tika attīstītas pagājušā gadsimta 60. gados^{46, 47}. Te atsevišķi jāizceļ vēsturisks pārskats, ko sagatavojis *Jansson*¹³, kur viņš min, ka betona termiskā eksplozīvā atslāņošanās raisīja interesi pētnieku vidē jau 1854. gadā¹³. Saskaņā ar **spiediena uzkrāšanās teoriju**⁴⁶ notiek ūdens uzkrāšanās aiz žūšanas frontes, jo žūšanas frontes radītie tvaiki migrē uz vēsāku iekšējo konstrukcijas daļu, kur kondensējas. Ūdens tvaika spiediena uzkrāšanās konceptu ir vizualizējis *Ozawa*⁴⁸ (1.5. att.).



1.5. attēls. Ūdens tvaika spiediena uzkrāšanas teorijas vizualizācija, aizgūta no *Ozawa*⁴⁹.

Vēl viens iespējama atslāņošanās mehānisms ir aprakstīts **termisko spriegumu teorijā**⁴⁷. Līdzīgi kā iepriekš, vizuālo teorijas attēlojumu aprakstījis *Ozawa* (1.5. att.). Tā kā temperatūra pie mitruma aizsprosta ir tuvu 100 °C un virsmas temperatūra strauji paaugstinās, savukārt sausā slāņa dziļums vēl ir mazs, starp uzkaršēto virsmu un mitruma aizsprostu veidojas stāvs termiskais gradients, kas izraisa lielus termiskos spriegumus. Saskaņā ar *Saito*⁴⁷ plaisāšana ir saistīta ar sabrukumu spiedē uzkaršētaj virsmas tuvumā. Pamatojoties uz detalizētu poru spiediena un termisko spriegumu analīzi, *Sertmehmetoglu*⁵⁰ ierosināja, ka spiedes spriegumi apsildāmās virsmas tuvumā rada stiepes plaisas paralēli virsmai. Spiediens, kas veidojas šajās plaisās, izraisa sprādzienbīstamu plaisāšanu. Bojājumus vēl vairāk sekmē spriegumu koncentrācija plaisu galos un saspiešanas izraisīta izliekšanās. *Sertmehmetoglu* savā darbā⁵⁰ reproducēja betona plaisāšanu istabas temperatūrā, radot pārspiedienu mākslīgi izveidotās plaisās, kas bija paralēlas parauga virsmai.



1.1. attēls. Termisko spriegumu teorija, aizgūts no Ozawa⁴⁹.

Jāuzsver, ka abu teoriju ierosinātie mehānismi (spiediena palielināšanās un termiskais spriegums) ir cieši saistīti un abi ir atkarīgi no mitruma sadalījuma (un mitruma aizsprosta veidošanās) ugunsgrēka laikā. Abi procesi norisinās vienādi un var ietekmēt viens otra robežnosacījumus, ietekmējot materiāla transportēšanu un mehāniskās īpašības. Bažants uzskata, ka poru spiediens ir “augstas stiprības betona sprādzienbīstamas termiskās plaisāšanas izraisītājs”, savukārt materiāla stāvokli, kas izraisa bojājumu, nosaka “termiskās sprieguma dēļ uzkrātās enerģijas daudzums”⁵¹. Ideju par trigeri un atbilstošu sliekšņa/trigera vērtību, pēc kuras notiek plaisāšana, savā darbā ir izklāstījis Lo Monte⁵², kur viņš to raksturo kā saikni starp šķietamās stiepes izturības samazināšanos un poru spiedienu.

Līdzās mitruma aizsprostošanās teorijai jāmin *BLEVE* (*Boiling liquid expanding vapor explosion*) fenomens, kas rodas lēna sildīšanas ātruma gadījumā, respektīvi, ja neveidojas straujš temperatūras gradients, apstākļi divos tuvējos reģionos/porās ir ļoti līdzīgi. Līdz ar to līdzīgo spiedienu un temperatūras dēļ blakus esošajās porās nav dzinējspēka masas vai enerģijas apmaiņas starp tām. Tas attiecas uz ideālu gadījumu divām vienādas formas un izmēra porām. Tā kā pirms uzkaršanās porās ir gaiss, ūdens un ūdens tvaiki, tad augstākā temperatūrā ūdens iztvaiko, taču, ņemot vērā to, ka apstākļi tuvumā esošajās porās ir vienādi, tvaiki paliek tajās pašās porās, palielinot spiedienu. Paaugstinātā spiedienā ūdens vārīšanas temperatūra paaugstinās, izraisot kondensāciju un ūdens klātbūtni porās šķidrā stāvoklī. Šķidrās ūdens aizņem mazāk vietas nekā tvaiki, taču, parādoties plaisām, notiek pēkšņa spiediena atlaišana, un tā rezultātā pārkarsētais ūdens momentāni iztvaiko, vārīšanās temperatūrai nokrītot līdz 100 °C. Tas var izraisīt sprādzienbīstamu atslāpošanos strauju tilpuma izmaiņu dēļ un lielas enerģijas izdalīšanos fāžu maiņas dēļ⁵³.

Tālāk ir sniegts īss to faktoru saraksts, kas potenciāli ietekmē plaisāšanas tipu un pakāpi, un tie ir:

- maksimālā temperatūra;
- karsēšanas ātrums;
- karsēšanas līkne;
- ugunsgrēka ilgums;
- konstrukcijas sekcijas izmēri, šķērsgriezums;
- konstrukcijas šķērsgriezuma forma un profils;
- mitruma saturs;
- tvaika spiediens porās;
- betona caurlaidība;
- betona vecums;
- betona spiedes stiprība;
- spiedes spriegumi un stieģrojuma iepriekšējais saspriegums;
- pildvielu tips;
- smalko pildvielu tips;
- pildvielu izmēri;
- plaisas;
- stieģrojums;
- stieģrojuma aizsardzības kārtas biezums;
- papildstieģrojums un metāla ieliekamās detaļas;
- metāla fibras;
- polipropilēna fibras;
- dabiskās fibras;
- gaisa iesaistošās piedevas.

Garais faktoru saraksts, kas ietekmē betona konstrukciju darbību ugunsgrēka laikā, liecina par plaisāšanas parādību sarežģītību un izaicinājumiem precīzā tā izskata kvalitatīvajā prognozēšanā un, vēl svarīgāk, bojājumu kvantitatīvā novērtēšanā. Vairāki faktori ir ļoti cieši saistīti un tiešā veidā ietekmē cits citu, tomēr tie nenožīmē vienu un to pašu.

1.4. BETONA KONSTRUKCIJU EKSPLOZĪVĀS TERMISKĀS ATSLĀNOŠANĀS NOVĒRŠANA

Lai nodrošinātu drošību, līdztekus ugunsgrēka agrīnai atklāšanai, ugunsdzēsēšanas sistēmām un drošu evakuācijas ceļu projektēšanai, pašai betona konstrukcijai var izmantot vairākas metodes, lai samazinātu vai novērstu ugunsgrēka izplūšanu. Dažas metodes var ieviest betona maisījuma projektēšanas vai betona elementu ģeometrijas un stieģrojuma projektēšanas stadijā, tomēr tas neattiecas uz jau esošām struktūrām. Savukārt citas metodes ir vienīgās, kas atstātas esošajām konstrukcijām, kur nepieciešama papildu aizsardzība. Plašāk šī nodaļa un metodes ir aprakstīti darba pamatdaļā.

1.5. KOPSAVILKUMS

Iepriekš izklāstītās tēmas apskats izceļ problēmas sarežģītību gan no materiāla, gan konstrukcijas elementu viedokļa, kas reizināts ar ugunsgrēka apstākļiem.

Liela mēroga konstrukciju faktiskie ugunsdrošības testi ir ļoti sarežģīti interpretācijai, ja neņem vērā acīmredzamo vizuālo novērtēšanu, vai atslāpošanās ir, vai arī nav notikusi. Turklāt lielformāta testi ir ļoti dārga. Tomēr iespēja novērst konstrukciju bojājumus attaisno pētniecības centienus.

Literatūrā apkopotie dati liecina par:

- mehānisko īpašību pasliktināšanos augstā temperatūrā;
- struktūras integritātes risku sprādzienbīstamas atslāpošanās dēļ;
- fizikālo un ķīmisko izmaiņu sarežģītību, ko betons piedzīvo ekstremālos temperatūras apstākļos;
- problēmām piekļūt materiāla faktiskajam reāllaika stāvoklim sarežģītības un drošības izaicinājumu dēļ karsto testu laikā;
- robežnosacījumu un faktiskā ugunsgrēka scenārija kombinācija var būt ļoti neparedzama;
- betona sprādzienbīstama plaisāšana ugunsgrēka dēļ nav materiāla īpašība, bet gan sarežģīta faktoru, kas cieši saistīti cits ar citu, kombinācija;
- eksistē dažādas aizsardzības metodes, lai ierobežotu vai izslēgtu sprādzienbīstamu atslāpošanos, ierasts risinājums esošajām konstrukcijām ir uguns aizsardzības materiāla slāņi, savukārt jaunām konstrukcijām – dabisko un PP šķiedru pievienošana.

2. MATERIĀLI UN BETONA SASTĀVI KĀ ŠĪ DARBA OBJEKTS

2.1. MATERIĀLI

Promocijas darba fokusā ir betona mikrostruktūras izmaiņas un dinamisku procesu novērtējums un vizualizācija, izmantojot dažādas metodes, kas iepriekš vienlaikus nebija lietotas, izmantojot vienotas sastāvu kopas. Būtiski ir tas, ka visos sastāvos kā galvenā saistviela ir izmantots portlandcements.

Lai samazinātu nenoteiktību, kas izriet no sajaukto saistvielu sarežģītā sastāva, autors izvēlējās parasto portlandcementu *Jura CEM I 52.5 R*, cementa oksīdu sastāvs apkopots 2.1. tabulā.

2.1. tabula

Jura CEM I 52.5 R cementa oksīdu sastāvs

Oksīdu sastāvs	Mass (%)
SiO ₂	19,64
Al ₂ O ₃	5,26
Fe ₂ O ₃	3,13
Cr ₂ O ₃	0,009
MnO	0,057
TiO ₂	0,290
P ₂ O ₅	0,179
CaO	63,18
MgO	2,00
K ₂ O	1,01
Na ₂ O	0,16
SO ₃	2,94
<i>L. O. I.</i>	1,87
kopā	99,72

L. O. I. – zaudēts izdegot (*loss on ignition*)

Maisījumos tika izmantots dejonizēts ūdens, lai izslēgtu ar šo pētījumu nesaistītu materiālu pēdas. Kā pildvielas tika izmantotas vietēji plaši pieejamās aluviālās smiltis un grants (te jāmin, ka pētījums tika izstrādāts Šveices Federālajā materiālzinātnes un tehnoloģijas laboratorijā (*Empa*) un lokāli pieejamās izejvielas ir raksturīgas Šveices būvmateriālu tirgum). Lai iegūtu blīvāku un labi sapakotu struktūru, tika izmantoti silīcija dioksīda izmeši *Elkem U968* jeb mikrosilīcijs. Lai samazinātu ūdens/saistvielas (ū/s) attiecību un saglabātu labu iestrādājamību, tika izmantots superplastifikators *Sika-56* uz polikarboksilāta bāzes. Tika izmantotas *Propex* polipropilēna šķiedras *Fibermesh 150-3*, kuru blīvums – 0,91 t/m³, šķiedras garums – 3 mm. *Fibermesh 150-3* kušanas temperatūra ir 162 °C, aizdegšanās temperatūra – 593 °C. Lai nodrošinātu *HPC* paraugu iekšējo sacietēšanu⁵⁴, tika izmantoti *BASF SAP VP300* superabsorbenti polimēri.

2.2. BETONA SASTĀVI

Kā aprakstīts iepriekš, sprādzienbīstamas atslāņošanās parādība notiek blīvos un mazāk caurlaidīgos betonos, piemēram, augstas veiktspējas un īpaši augstas veiktspējas betonā (*HPC* un *UHPC*). Lai novērtētu, kura īpašību kombinācija izraisa atslāņošanos un kura to neizraisa, ir nepieciešami abi maisījumi, viens, kas praktiski vienmēr atslāņotos, un otrs, kas tādos pašos apstākļos praktiski nekad neatslāņotos. Abiem jābūt praktiski lietojamiem un ar saprātīgām stiprības īpašībām, lai tos varētu plaši izmantot nesošajās konstrukcijās.

Visi betona sastāvi doti 2.2. tabulā.

2.2. tabula

Betona sastāvi, kas tika pētīti šajā darbā, (kg/m³)

Komponenta\Sastāva nosaukums	<i>OC</i>	<i>HPC-ref</i>	<i>HPC + PP</i>	<i>HPC + SAP</i>	<i>HPC + PP + SAP</i>	<i>HPC_16 mm</i>
Cements <i>CEM I 52.5 R</i>	370	488	488	464	464	488
Mikrosilīcijs	0	122	122	116	116	122
Pildvielas 0–1 mm	740	633	633	633	633	253
Pildvielas 1–4 mm	1110	949	949	949	949	380
Pildvielas 4–8 mm	0	0	0	0	0	396
Pildvielas 8–16 mm	0	0	0	0	0	554
Superplastifikators	5,18	8,54	8,54	8,12	14,5	8,54
PP šķiedras	0	0	2	0	2	0
Superabsorbenti polimēri	0	0	0	1,93	1,93	0
Ūdens	185	189,1	189,1	197,2	197,2	189,1
ū/s	0,5	0,31	0,31	0,34	0,34	0,31

Kā redzams 2.2. tabulā, pildvielu daudzums tika saglabāts vienāds visiem *HPC* maisījumiem, taču mainās cementa masa uz m³, tādējādi tiek ierēķināts tilpums, ko aizņem superabsorbenti. Superabsorbenti ir daļa no cementa pastas, līdz ar to tiek saglabāta proporcija starp cementa pastu un pildvielām jeb proporcija starp tilpumiem, kas piedalās dažādu masu kustībā. Ūdens spēj pārvietoties pa cementa pastu, porām un gar pildvielu virsmām, savukārt siltums dažādā ātrumā pārvietojas gan caur cementa pastu, gan pildvielām.

2.3. SASTĀVU NOVĒRTĒŠANA PĒC ATSLĀŅOŠANĀS/NAV ATSLĀŅOŠANĀS KRITĒRIJA

Lai pētītu sprādzienbīstamu betona atslāņošanos un izpētītu īpašību izmaiņas atkarībā no vecuma un temperatūras, ir jānodrošina, lai maisījumi, kas apkopoti 2.2. tabulā, ietvertu gan paraugus, kas atslāņojas, gan tādus, kuros līdzīgos apstākļos atslāņošanās nenotiek. Ja *OC* maisījumam, visticamāk, nevajadzētu atslāņoties, tad ir sagaidāms, ka *HPC-ref* maisījums augstā temperatūrā vienmēr atslāņosies. Attīstot šo koncepciju, pievienojot oriģinālajam *HPC-ref* maisījumam piedevas, kas novērs plaisu veidošanos, tiks iegūti jauni maisījumi, kuriem ir mazāka eksplozīvā atslāņošanās vai nav nekādu vizuālu bojājumu (*HPC + PP*, *HPC + SAP* un *HPC + PP + SAP*).

Termiskās atslāpošanas testu rezultāti

Rezultāti ir apkopoti pēc atslāpošanas/nav atslāpošanas kritērija, kur K atbilst kubiem; P – plātnēm jeb kuba un plātnes formas paraugi. Skaitļi blakus paraugu apzīmējumiem atbilst to paraugu skaitam, kuros tika novērota atslāpošanās (no kopējā pārbaudīto paraugu skaita), piemēram, 0/2 nozīmē, ka no diviem pārbaudītajiem paraugiem nav atslāpojušies neviens paraugs, 2/2 nozīmē, ka atslāpošanās tika novērota divos no diviem paraugiem.

2.3. tabula

Testu apkopojums pēc atslāpošanas kritērija

Vecums \\ sastāvi	OC	HPC-ref	HPC + PP	HPC + SA P	HPC + PP + SA P	HPC_16mm
1 d	K 0/2; P 0/1	K 2/2; P 1/1	K 0/2; P 0/1	K 2/2; P 1/1	K 2/2; P 0/1	K 2/2
3 d	K 0/2; P 0/1	K 2/2; P 1/1	K 0/2; P 0/1	K 2/2; P 1/1	K 0 ¹ /2; P 0/1	K 2/2
7 d	K 0/2; P 0/1	K 2/2; P 1/1	K 0/2; P 0/1	K 2/2; P 1/1	K 1/2; P 0/1	K 2/2
21 d	K 0/2; P 0/1	K 2/2; P 1/1	K 0/2; P 0/1	K 2/2; P 1/1	K 0/2; P 0/1	K 2/2
28 d	K 0/2; P 0/1	K 2/2; P 1/1	K 0/2; P 0/1	K 2/2; P 1/1	K 0/2; P 0/1	K 2/2
35 d	K 0/2; P 0/1	K 2/2; P 1/1	K 0/2; P 0/1	K 2/2; P 1/1	K 0/2; P 0/1	K 2/2

Kopā ar vispārēju atslāpošanās/nav atslāpošanas kritēriju tika reģistrēts arī laiks no testa sākuma, kad notika pirmā eksplozīvā atslāpošanās.

¹ Viens no kuba paraugiem “uzsprāga” 30 minūtes pēc termiskās slodzes beigām, kas ir ārpus pieņemtā testa laika.

3. PAAUGSTINĀTĀS TEMPERATŪRAS IETEKME UZ BETONA ĪPAŠĪBĀM UN MIKROSTRUKTŪRU

3.1. IEVADS

Iepriekšējā nodaļā, apskatot augstas temperatūras ietekmi, pakļaujot paraugus termiskai slodzei tikai no vienas puses, rezultāti ir apkopoti pēc vienkārša atslāpošanās/nav atslāpošanās kritērija. Šajā daļā autors apskata paliekošās izmaiņas īpašībās un mikrostruktūrā pēc termiskās slodzes, pakļaujot nelielus paraugus paaugstinātai temperatūrai visā tilpumā. Kā jau iepriekš minēts, drošības apsvērumu dēļ un tādēļ, lai iegūtu plašu datu klāstu par vienotu materiālu kopumu, tiek pētīts atlikums jeb paliekošās izmaiņas paraugos. Tas ļauj sniegt jaunu ieskatu eksplozīvās termiskās atslāpošanās pamatmehānismos. Tālāk sniegtie dati tika daļēji izmantoti, lai uzlabotu skaitlisko modeli, kas apraksta augstai temperatūrai pakļauta betona uzvedību⁵⁵.

Temperatūras pieauguma ātrums bija aptuveni 16 °C/min. Motivācija izmantot tieši šo fiksēto karsēšanas ātrumu krāsnī ir panākt, lai tas būtu tāds pats kā sildplatei, ko izmanto atslāpošanās novērtēšanas testos un neitronu radiogrāfijas pētījumā, kas aprakstīts turpmāk 4.1. daļā. Tas ļauj iegūtajiem datiem būt salīdzināmiem un piederēt vienai metodoloģiskai kopai.

3.2. METODES

Mehāniskās īpašības

Javu mehāniskās īpašības noteiktas izmantojot 40 × 40 × 160 mm³ prizmas veida paraugus. Termiskā slogošana tika veikta 28 dienu vecumā, uzkarsējot paraugus līdz 120 °C, 200 °C, 400 °C un 600 °C temperatūrā, kam sekoja astoņas stundas maksimālajā temperatūrā un brīva atdzesēšana krāsnī. Junga modulis, stiepes stiprība liecē un spiedes stiprība tika noteikta vienas, trīs, septiņu, 21, 28 un 35 dienu vecumā paraugiem, kas tika uzglabāti paralēli istabas temperatūrā (turpmāk – neapstrādātā stāvoklī).

Betona hidratācija un dehidratācija (TGA)

Lai izpētītu sākotnējo saistītā ūdens saturu un dehidratāciju augstā temperatūrā, tika veikti termogravimetriskās analīzes (TGA) testi. Visu javas maisījumu paraugi (2.2. tab.) tika pārbaudīti vienas, trīs, septiņu, 21, 28 un 35 dienu vecumā. Turklāt, kā aprakstīts iepriekš, mērījumi tika veikti paraugiem, kas tika termiski apstrādāti 28 dienu vecumā 120 °C, 200 °C, 400 °C un 600 °C temperatūrā astoņas stundas maksimālā temperatūrā ar 16 °C/min sildīšanas ātrumu, kam sekoja brīva atdzišana krāsnī.

Temperatūras ietekme uz poru struktūru

Dzīvudraba intrūzijas porozimetrijas (MIP) mērījumu ierobežojumus cementa materiālu faktiskā poru izmēra sadalījuma kvantitatīvai noteikšanai apsprieda *Diamond*⁵⁶. Lai pārvarētu dažus no šiem ierobežojumiem, *Kaufmann et al.*⁵⁷ lietoja un konceptuāli aprakstīja vairāku ciklu MIP, kas ļauj novērtēt poru apjomu un tā saukto poru “pudeles kakliņa” ietekmi.

Šajā pētījumā divu ciklu *MIP* tika veikta trīs, septiņu un 28 dienu veciem paraugiem ar vai bez termiskās slodzes.

Lai novērtētu termiskās slodzes ietekmi uz porozitāti, paraugi tika izņemti no formas 28 dienās un mehāniski sadrupināti līdz 2–7 mm, attiecīgie gabali tika pakļauti projektētajām termiskajām slodzēm 120 °C, 200 °C, 400 °C un 600 °C temperatūrā.

Neapstrādātie dati par dzīvsudraba iekļūšanu (dzīvsudraba tilpums pret lietoto spiedienu) tika analizēti, izmantojot *Washburn* vienādojumu⁵⁸ cilindriskām porām, lai pārvērstu tos līdzvērtīgā poru izmēra sadalījumā. Aprēķinos tika pieņemts dzīvsudraba virsmas spraigums 0,48 N/m² un saskares leņķis 130°.

Lai kvantitatīvi noteiktu poru izmēru sadalījuma atšķirības starp dažādām javām pirms un pēc termiskās slodzes, papildus kopējai porainībai tiek analizēts arī poru ieplūdes rādiuss jeb “pudeles kakliņš”, caur kuru kļūst pieejams lielāks poru tilpums. Poru ieplūdes rādiuss ir minimālais poru rādiuss, caur kuru tiek sasniegta lielākā daļa mikrostruktūras⁵⁹, un tas ir saistīts un raksturo cementa materiālu transporta īpašības⁶⁰. Izrāviena rādiuss tiek atrasts kā rādiuss, kurā tiek novērots pēkšņš ievadītā dzīvsudraba tilpuma pieaugums, un to var ērti identificēt kā pirmo pīķi diferenciālā poru izmēra sadalījumā.

Termiskās izplešanas koeficients

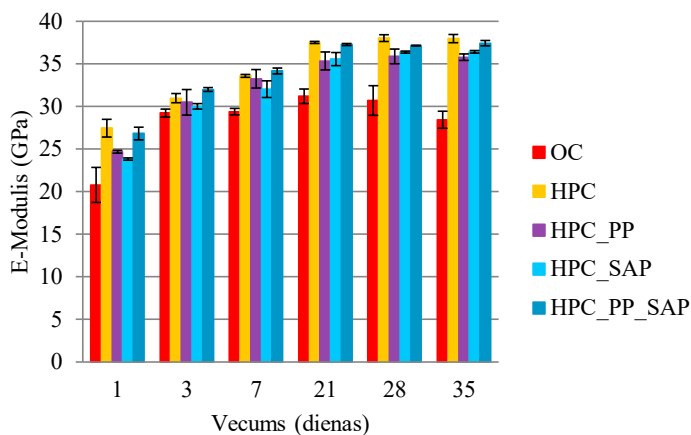
HPC-ref maisījuma termiskā izplešanās tika mērīta ar termiskās izplešanās dilatometru. Gan paraugs, gan atsaucis materiāls termiskās izplešanās korekcijai tika ievietoti dilatometrā. Garuma izmaiņas tika reģistrētas no 50 °C līdz maksimālajai temperatūrai 980 °C, atdzesējot līdz 200 °C.

Tika novērota izplešanās un saraušanās (rukums) uzvedība, un 3.3. nodaļā ir parādīti dati ar sistēmas paplašināšanas korekciju galvenajai *HPC-ref* matricai. Šie dati sniedz pamata pārskatu par galveno šajā pētījumā izmantoto *HPC-ref* matricu.

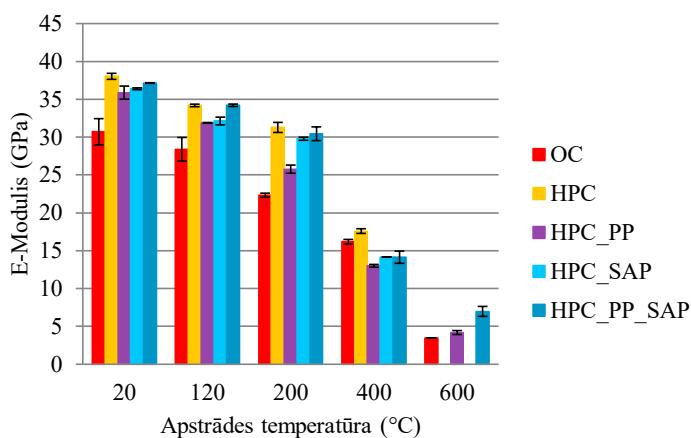
3.3. REZULTĀTI

Mehāniskās īpašības

3.1. un 3.2. attēlā redzami dati par pētāmo javu elastības īpašībām pēc noteiktas apstrādes. Var redzēt trūkstošos datus par *HPC-ref* un *HPC_SAP* paraugiem, kas apstrādāti 600 °C temperatūrā (3.2. att.). Tas ir saistīts ar faktisko paraugu sabrukumu, padarot neiespējamus statiskā elastības moduļa mērījumus atbilstoši *EN 12390-13*. Gadījumos, kad dati pieejami, kļūdu marķējumi attēlo standarta novirzi.

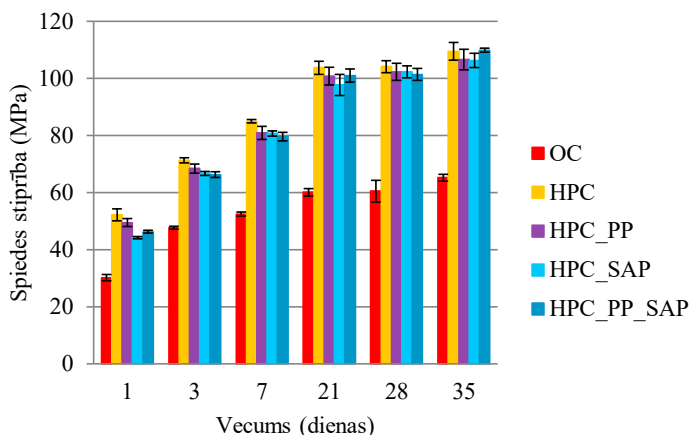


3.1. attēls. Elastības moduļa izmaiņas, paraugiem cietējot.

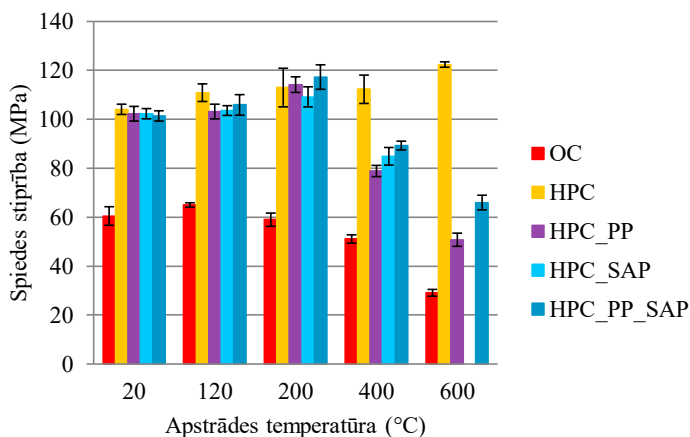


3.2. attēls. Elastības moduļa izmaiņas paraugiem pēc termiskās apstrādes 28 dienu vecumā.

Nākamajos divos attēlos (3.3. un 3.4. att.) prezentēti spiedes stiprības rezultāti, kas tika nomērīti, izmantojot tos pašus paraugus kā statiskā elastības moduļa mērījumu gadījumā.



3.3. attēls. Spiedes stiprības izmaiņas, paraugiem cietējot.

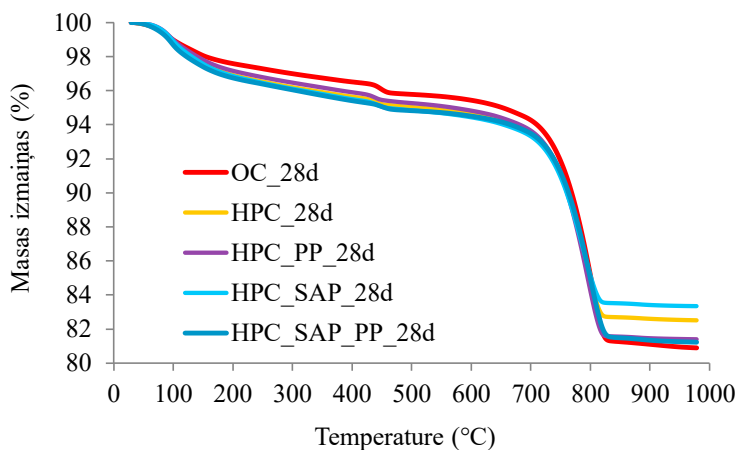


3.4. attēls. Spiedes stiprības izmaiņas paraugiem pēc termiskās apstrādes 28 dienu vecumā.

Termogravimetriskā analīze (TGA)

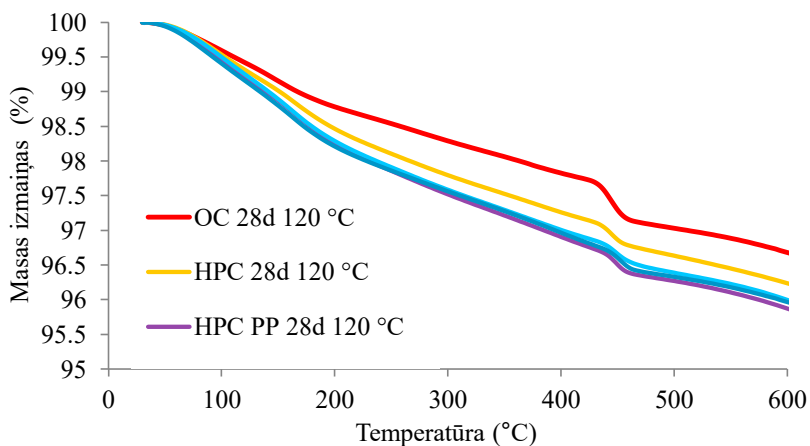
Šajā apakšnodaļā TGA rezultāti ir parādīti divos veidos: i) kā vispārējās TGA līknes visiem pieciem maisījumiem, kur masas zudumu līknes ir temperatūras funkcija; ii) kā masas zudumi pēc termiskās slodzes. Galvenā uzmanība tiek pievērsta masas zudumam, jo tas norāda pieejamo mitruma daudzumu katrā termiskās slodzes posmā. Aptuvens pieņēmums – masas zudums pirms 600 °C ir saistīts ar dehidratāciju un fiziski saistītā ūdens zudumu, savukārt masas zudums virs 600 °C galvenokārt ir saistīts ar karbonāta fāžu (galvenokārt kalcija karbonāta) dekarbonizāciju.

Visu piecu maisījumu TGA rezultāti 28 dienu vecumā redzami 3.5. attēlā.

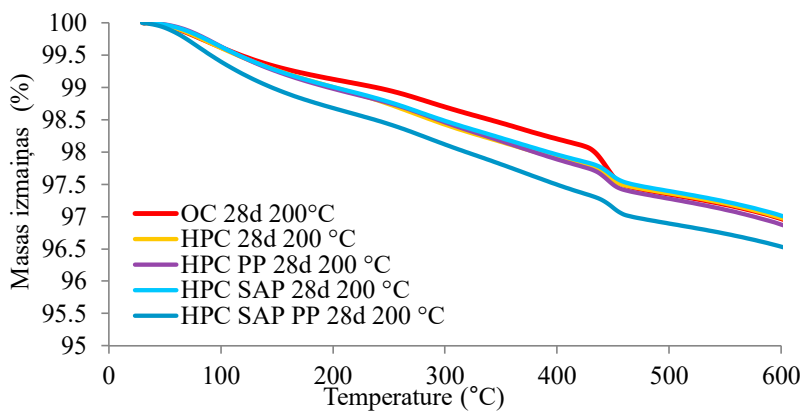


3.5. attēls. Visu javu TGA rezultāti 28 dienās.

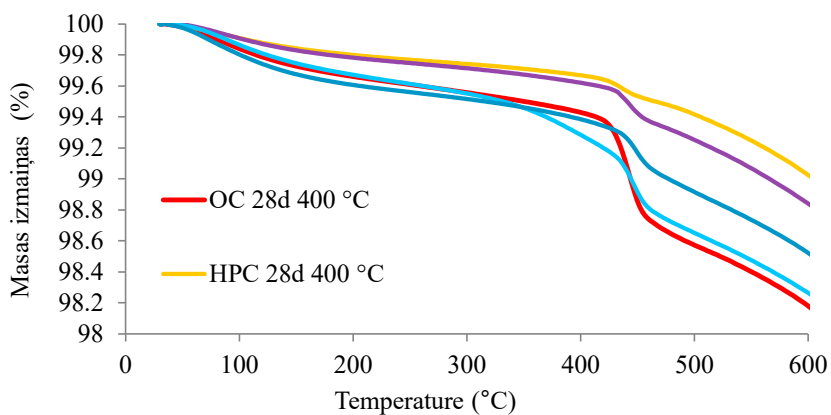
Tika pieņemts, ka karbonātu fāžu izmaiņas nenotiek paraugu termiskās slodzes laikā 120 °C, 200 °C, 400 °C, 600 °C temperatūrā un temperatūras ass skalas joslas līdz 600 °C, savukārt autoru galvenokārt interesēja H₂O daudzums paraugos pēc termiskās apstrādes un tas, vai notiek cementa rehidratācija. Vēlreiz ir svarīgi atzīmēt, ka parādīti dati par paraugiem atlikuma stāvoklī pēc diviem solventu apmaiņas cikliem.



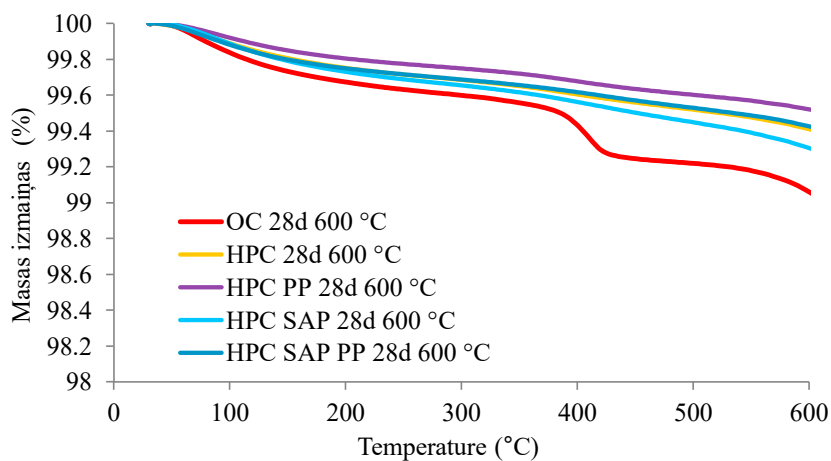
3.6. attēls. Visu javu TGA rezultāti 28 dienās pēc termiskās apstrādes 120 °C temperatūrā.



3.7. attēls. Visu javu TGA rezultāti 28 dienās pēc termiskās apstrādes 200 °C temperatūrā.



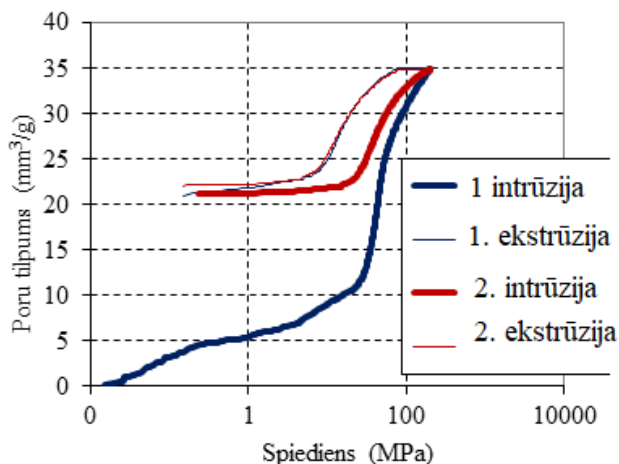
3.8. attēls. Visu javu TGA rezultāti 28 dienās pēc termiskās apstrādes 400 °C temperatūrā.



3.9. attēls. Visu javu TGA rezultāti 28 dienās pēc termiskās apstrādes 600 °C temperatūrā.

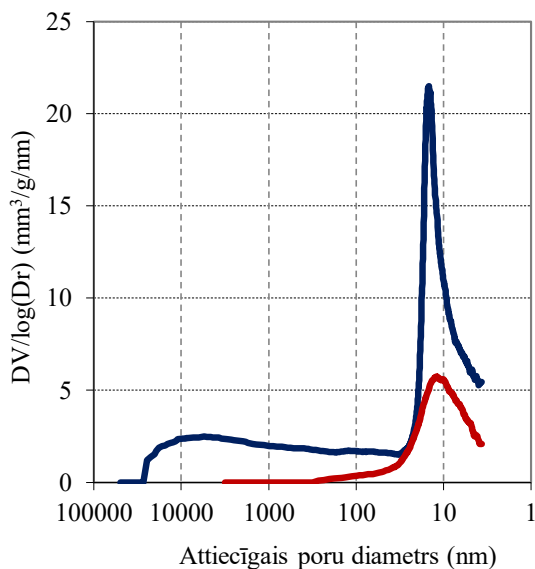
Dzīvsudraba intrūzijas porozimetrija

Ar *MIP* metodi iegūto datu vispārīgais veids ir parādīts tālāk, apskatot 28 dienas vecu *OC* paraugu (3.10. att.). Fizikālo atšķirību starp 1. un 2. ciklu detalizēti aprakstīja *Kaufmann*⁵⁷. Metode spēj nomērīt kopējo tilpumu, kurā izdevies injicēt dzīvsudraba, ko var izteikt kā parauga kopējo porainību procentos vai mm^3/g ; savukārt līknes forma nedod precīzu poru izmērus un to sadalījumu^{56, 57, 61, 62}, taču metode spēj izšķirt pudeles tipa poras un nomērīt attiecīgo poru “pudeles kakliņu”, par ko jau tika runāts iepriekš. Tā ir būtiska informācija, runājot par ūdens, tvaika un gāzu kustību materiālā.



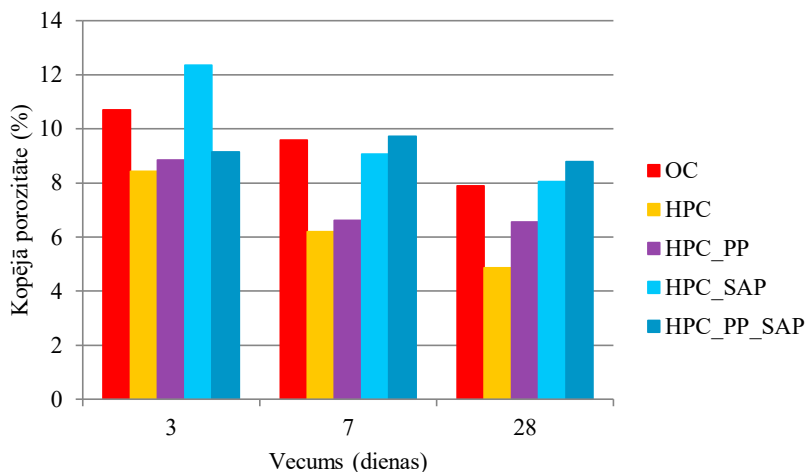
3.10. attēls. Dzīvsudraba divu ciklu porozimetrijas rezultāti *OC* paraugam 28 dienu vecumā.

Ņemot vērā 3.10. attēlā redzamos 1. un 2. cikla intrūzijas datus, var atvasināt un vizualizēt rādītājus, pie kuriem būtiski pieaug injicētā dzīvsudraba tilpums. 3.10. attēlā redzamo datu atvasinājums vizualizē izrāviena rādītājus, caur kuriem ir pieejama liela poru tilpuma daļa, tādējādi šis rādītājs ir transportēšanas īpašību sliekšnis un atvasinātās līknes piemērs *OC* paraugam pēc 28 dienām (3.11. att.).

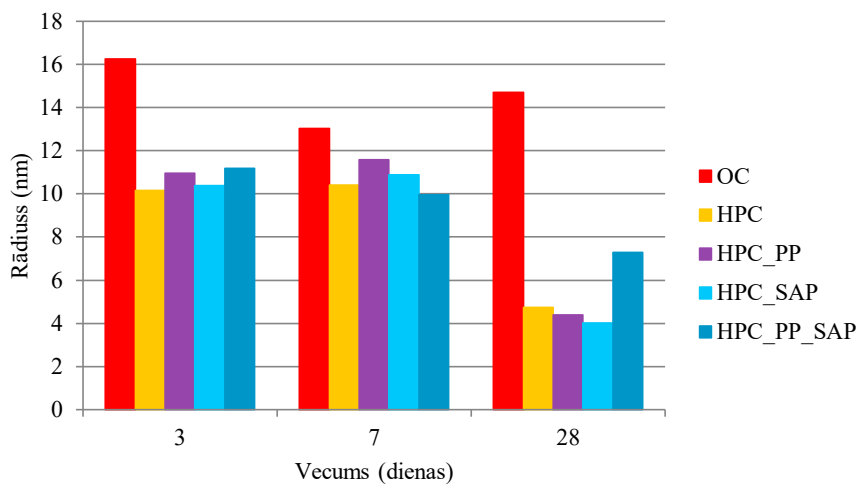


3.11. attēls. Porainības atvasinātā līkne, OC paraugs 28 dienu vecumā.

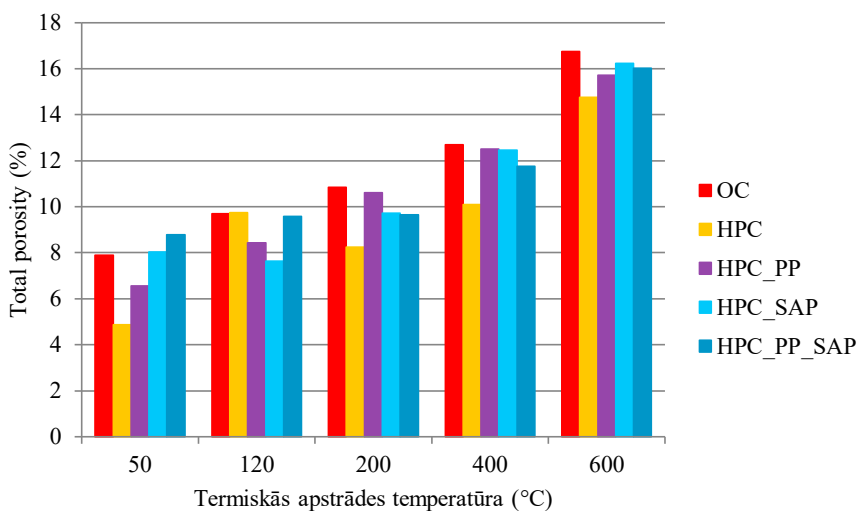
Tālāk sniegtie rezultāti apkopo apstrādāto datu maksimālās vērtības, kas ir līdzīgas 3.11. attēlā redzamajiem rezultātiem, bet visiem paraugiem reizē. Kopējās porainības un izlaušanās rādīša izmaiņas laika gaitā (no iemaisīšanas brīža līdz hidratācijas pārtraukšanai) trīs, septiņu un 28 dienu vecumā (attiecīgi 3.12. un 3.13. att.). 3.14. un 3.15. attēlā parādītas kopējās porainības un izlaušanās rādīša izmaiņas paraugiem, kas pakļauti termiskai slodzei līdz 600 °C temperatūrā 28 dienu vecumā.



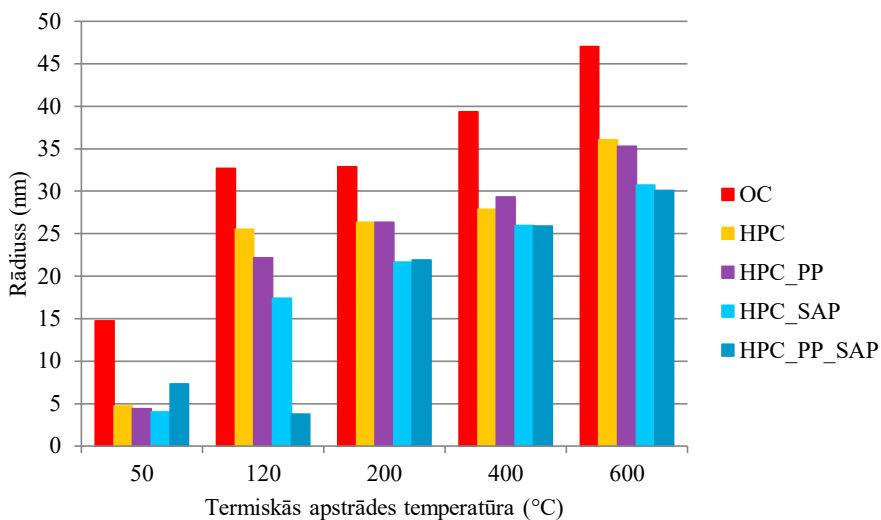
3.12. attēls. Kopējās porozitātes izmaiņas atkarībā no hidratācijas laika.



3.13. attēls. Izlaušanās rādiusa izmaiņas atkarībā no hidratācijas laika



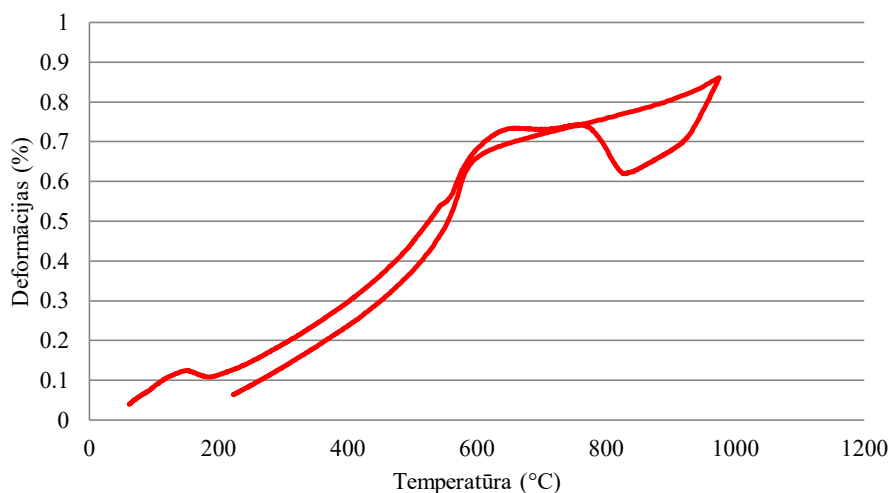
3.14. attēls. Kopējās porozitātes izmaiņas pēc termiskās slodzes 28 dienu vecumā.



3.15. attēls. Izlaušanās rādiusa izmaiņas atkarībā no termiskās slodzes 28 dienu vecumā.

Termiskā izplešanās

HPC galvenās matricas termiskās izplešanās līkne redzama 3.16. attēlā.



3.16. attēls. *HPC* javas parauga termiskā izplešanās.

3.4. DISKUSIJA

Šajā apakšnodaļā sniegti kompleksi un vienoti dati par materiāla atlikušo stāvokli pēc paaugstinātas temperatūras iedarbības.

Promocijas darba pētījumā noteiktās atlikušās mehāniskās īpašības (3.2. un 3.4. att.) labi saskan ar literatūras pārskatu (attiecīgi 1.1. un 1.2. att.).

HPC paraugi priekš mehāniskajām īpašībām, kas "uzsprāga" 600 °C termiskās slogošanas laikā, piedzīvojuši lielāko kopējo degradāciju, taču vairāki gabali, kas palika pāri pēc "sprādziena", bija piemēroti, lai veiktu spiedes stiprības mērījumus un uzrādīja divreiz augstāku spiedes stiprību nekā *HPC* + PP un *HPC* + PP+SAP paraugi, kas nebija "uzsprāguši" 600 °C.

HPC javas izlaušanas rādiuss pēc apstrādes 600 °C temperatūrā palielinās 6–7 reizes, salīdzinot ar termiski neapstrādātiem paraugiem, savukārt *OC* paraugiem izlaušanās rādiuss palielinās trīs reizes no sākotnējās vērtības (3.15. att.). Tas liecina par lielākiem bojājumiem, kas konstatēti augstas veiktspējas betonam, salīdzinot ar parasto betonu. Protams, te jāmin arī tas, ka atsevišķi *HPC* tipa paraugi "uzsprāga", savukārt *OC* paraugiem termiskā atslāņošanās netika novērota.

Materiāla mehāniskās īpašības tieši pirms eksplozīvās atslāņošanās var būt augstākas, salīdzinot ar stāvokli, kurā spriedze tiek atbrīvota vienmērīgi, jo tam ir lielāka porainība, polimēru šķiedras vai SAP.

4. NEGRAUJOŠĀS NOVĒRTĒŠANAS METODES BETONAM, KAS PAKĻAUTS AUGSTAI TEMPERATŪRAI

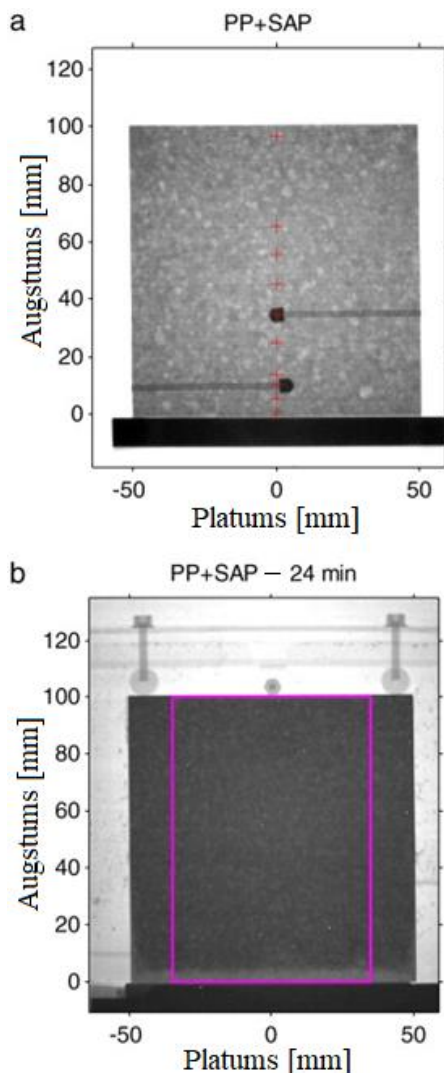
4.1. NEITRONU RADIOGRĀFIJAS LIETOJUMS BETONAM

Efektīva metode ūdens sadalījuma mērīšanai betonā ir neitronu radiogrāfija⁶³. Metode, kas apskatīta šajā promocijas darbā, ir turpinājums *Weber et al.*⁶⁴ pētījumam, kas vēlāk rezultējās vairākās publikācijās^{55, 65–69}.

Pētījuma gaitā pirmo reizi tika novērota eksplozīvā termiskā atslāpošanās 2D⁶⁵ un arī 3D⁶⁹. Promocijas darba autors piedalījās un sagatavoja visus paraugus divām neatkarīgām neitronu attēlveidošanas sesijām: *NEUTRA*^{55, 65}, kas atrodas *Paul Scherrer* institūtā (*Villigen*, Šveice), un notika *NeXT D50*^{66–69}, kas atrodas *Laue-Langevin* institūtā (Francija, Grenoble), izmantotie sastāvi ir identiski – izgatavoti, izmantojot vienu un to pašu maisītāju un maisīšanas protokolu. Iepriekš minētie pētījumi papildina cits citu, un pirmo reizi šajā darbā ir sniegti papildu dati, veicot mikrostruktūras izpēti un izmantojot papildu negraujošās izpētes metodes.

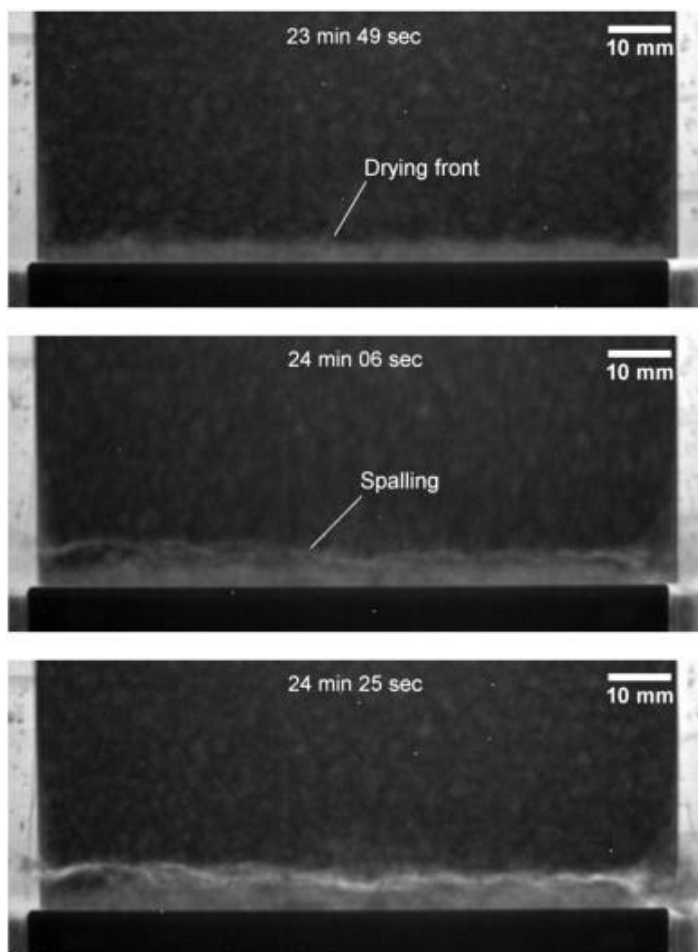
Rezultāti un diskusija

4.1. a attēlā redzams parauga rentgenattēls, kas iegūts ar mērķi noteikt precīzu termopāru un spiediena sensoru atrašanās vietu. 4.1. b attēlā – neitronu radiogrāfijas piemērs, kurā PP + SAP paraugā pēc 24 minūšu karsēšanas redzama žūšanas fronte. Daži robeždefekti ir redzami netālu no parauga vertikālajām malām nepilnīgas izolācijas dēļ, kas izraisīja ātrāku žūšanu. Šo efektu var attiecināt gan uz nepietiekamu siltuma izolāciju, gan nepilnībām tvaika izolācijā. Lai mitruma profilu aprēķinā izslēgtu šo defektu (4.4. att.), mitruma satura izmaiņu aprēķinā tika ņemts vērā tikai reģions, kas iezīmēts ar taisnstūra rāmi (4.1. b att.).



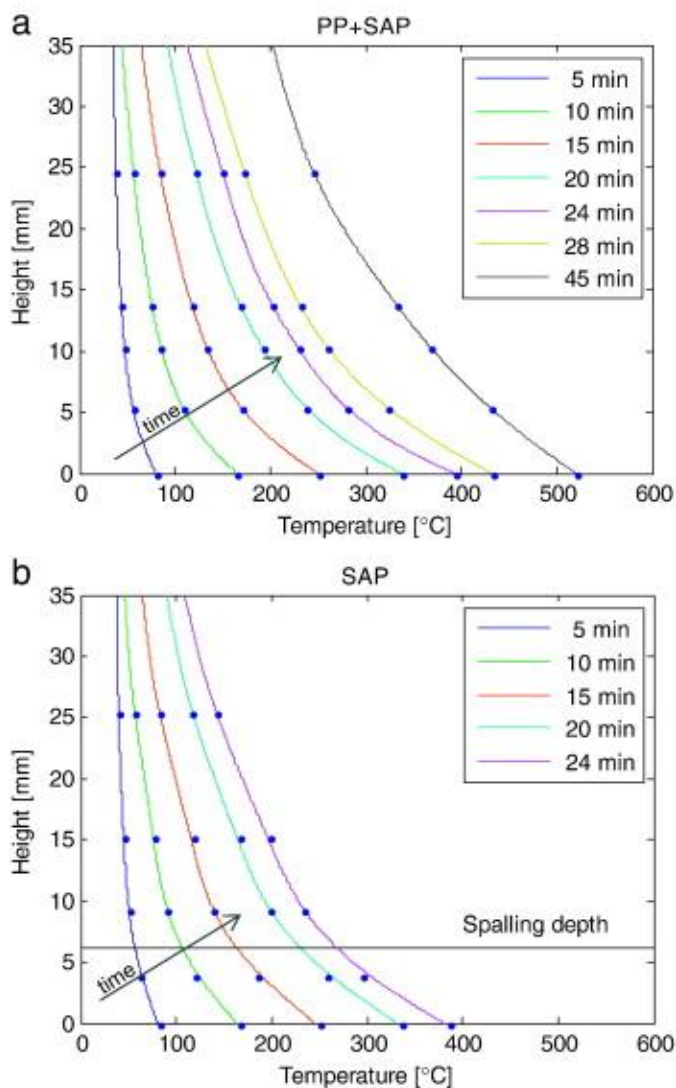
4.1. attēls. a) Rentgenstaru neapstrādāts radiogrāfijas attēls, kas parāda plāno termopāru (norādīts ar krustiņiem) un spiediena sensoru pozīcijas; b) neitronu neapstrādāts radiogrāfijas attēls pēc 24 minūšu karsēšanas. Žāvēšanas priekšpuse ir skaidri redzama. Taisnstūra kontūra 4.1. b attēlā norāda vidējo apgabalu mitruma profila iegūšanai (4.4. att.). Pelēkie līmeņi attiecas uz staru kūļa intensitāti⁶⁵.

Kā jau varēja sagaidīt⁷⁰, SAP un PP šķiedru pievienošana ļāva izvairīties no plaisāšanas. No otras puses, plaisa parādījās pēc 24 minūšu karsēšanas paraugā, kas saturēja tikai *SAP* (4.2. att.). Atslāpošanās izpaudās kā liela plaisa, kas izveidojusies paralēli termiski slogotai virsmai visā plātnes garumā aptuveni 6 mm augstumā (atbilst žūšanas frontes stāvoklim, 4.2. un 4.4. b att.). Atrāšanās vieta ir būtiska, tā iekļaujas ūdens tvaika spiediena teorijā, bet to nepierāda.



4.2. attēls. Neapstrādātu neitronu radiogrammu secība (parauga apakšējā daļa), kas parāda žūšanu un atslāpošanos SAP javā. Laiks 23 min un 49 sekundes – tieši pirms atslāpošanās žūšanas apgabals ir redzams gaiši pelēkā krāsā un apzīmēts kā “*Drying front*”. Laiks 24 min. un 6 sekundes – plaša vispirms parādās kā smalka līnija un paplašinās nākamajās radiogrammās. Pelēkie līmeņi reprezentē staru kūļa intensitāti, tumša pamatne ir vara bloks, caur kuru siltums tiek padots no sildīšanas plātnes līdz testējamam paraugam⁶⁵.

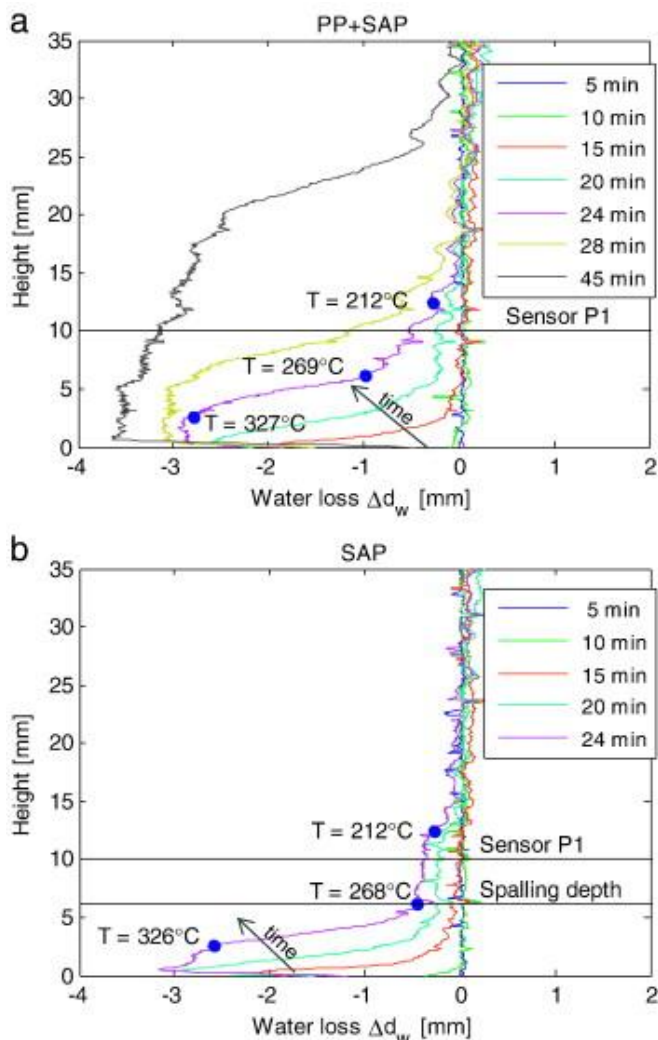
Temperatūras profils tika noteikts, pielāgojot līknes (4.3. att.) iegūto termopāru rādījumiem, kuru atrašanās vietas tika noteiktas ar rentgenstaru radiogrāfiju (4.1. a att.). Tika pieņemts, ka temperatūra 0 mm līmenī ir vienāda ar tā vara bloka temperatūru, uz kura tika novietots paraugs. 4.3. attēlā parādīti tikai apakšējie 35 mm pie apsildāmās virsmas. Izteiktas atšķirības starp temperatūras profiliem abos paraugos nav, lai gan termopāru telpiskā izšķirtspēja precīzam novērtējumam nav pietiekami laba.



4.2. attēls. Temperatūras profili javas plātnes apakšējā daļā 35 mm: a) PP + SAP paraugs (bez plaisas); b) SAP paraugs (izslīdēšana notika pēc 24 min 6 mm augstumā). Attēls iepriekš publicēts⁶⁵.

Ūdens zudumu profili (izteikti kā ekvivalents ūdens biezums^{71, 72}) parādīti 4.4. attēlā. Maisījumā izmantotais ūdens aizņēma aptuveni 20 % no javas tilpuma (2.2. tab.), kas 25 mm biežam paraugam nozīmē 5 mm sākotnējo ekvivalento ūdens biezumu. Profili tika iegūti, katrā augstumā vidēji aprēķinot mitruma saturu izmaiņas pa horizontālo līniju, ko ieskauj 4.1. a attēlā norādītais apgabals. Profiliem ir plato reģioni, kur pēkšņi mainās slīpums jeb ūdens zudumi strauji mainās no gandrīz nulles līdz lielai negatīvai vērtībai nelielā augstumā. Tādējādi plato aptuvenais novietojums (augstums) norāda žūšanas fronti, kur liela daļa brīvā un ķīmiski saistītā

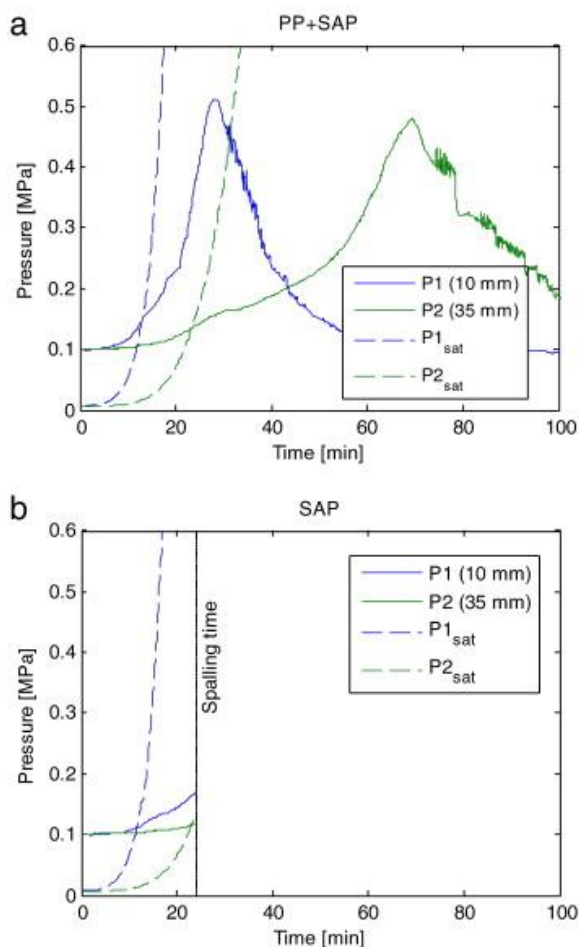
ūdens pazūd, attiecīgi iztvaikojot un dehidratējot. Žāvēšana notiek noteiktā šaurā reģionā, tāpēc plato nav pilnīgi horizontāls, bet sniedzas noteiktā augstumā.



4.3. attēls. Ūdens zudumu profili (izteikti kā līdzvērtīgs biezums) javas plātnes apakšējiem 35 mm (profili tika mērīti visā parauga augstumā): a) PP + SAP paraugs (bez plaisām); b) SAP paraugs (plaisāšana notika pēc 24 minūtēm 6 mm augstumā). Profila raksturīgajiem punktiem norādīta aptuvenā temperatūra pēc 24 minūtēm. Attēls no publicētā raksta.⁶⁵

Poru spiediens, ko mēra spiediena sensori (novietoti 10 mm un 35 mm attālumā no apsildāmās virsmas), ir prezentēts atkarībā no laika pēc testa sākuma (4.5. att.). Ir sagaidāms, ka spiediena maksimums būs saistīts ar žūšanas fronti, kur ūdens zudumi notiek vislielākajā ātrumā. To apstiprina ūdens zudumu profili PP + SAP paraugā. 4.4. attēlā redzams, ka žūšanas fronte (ar to ir domāts reģions, kurā mitruma izmaiņu profilā veidojas plato) sasniedz pirmā spiediena sensora pozīciju (atrodas 10 mm no apsildāmās puses) aptuveni tajā pašā laikā, kad tiek mērīta maksimālā spiediena vērtība. Te jāpievērš uzmanība 28 minūšu profila slīpuma

izmaiņām aptuveni 10 mm augstumā (4.3. a att.) un spiediena maksimumam tajā brīdī 10 mm pozīcijā (4.5. a att.).



4.4. attēls. Poru spiedienu mēra ar diviem sensoriem P1 un P2 (norādīts nominālais attālums no apsildāmās puses): a) PP + SAP paraugs (bez plīsumiem); b) SAP paraugs (izslīdēšana notika pēc 24 minūtēm 6 mm augstumā). Tiek ziņotas arī tvaika piesātinājuma spiediena līknes (aprēķinātas, pamatojoties uz temperatūru, kas izmērīta atbilstoši sensoriem)⁶⁵.

Spiediens paraugā bez PP šķiedrām (4.5. a att.) ir prezentēts tikai līdz brīdim, kad parādījās plaisa, jo pēc tam to lielā mērā ietekmē spiediena zudumi caur plaisu, relaksācija un arī tas, ka laiskas un tiešā kontakta zudums ietekmē temperatūras virzību. Taču jāmin, ka līdz plaisāšanai spiediens pieauga lēnāk nekā paraugā ar PP šķiedrām (4.5. 4.4). Tas atbilst lēnākai žūšanas frontes attīstībai paraugā bez PP šķiedrām (4.4. 4.3), kas liecina par lēnāku spiediena maksimuma virzību un tādējādi lielāku attālumu no spiediena sensora noteiktā laikā (līdzīgus rezultātus aprakstīja *Kalifa et al.*⁷³).

4.1.1. Apkopoījums/Secinājumi

Javas plātnēm, kas pakļautas karsēšanai līdz 550 °C temperatūrā, veikta neitronu radiogrāfija, vienlaikus mērot temperatūru un poru spiedienu. Šāds kombinētais mērījums ir publicēts pirmo reizi⁶⁵. Prezentētie rezultāti ir iegūti, izmantojot divu javu veidu paraugus ar vienādu ūdens un saistvielas attiecību ($w/b = 0,34$). Pirmais paraugs ir ar PP šķiedrām un SAP, savukārt otrais – tikai ar SAP. SAP pievienošana rada augstu mitruma saturu, tāpēc bija sagaidāms, ka plaisāšanas jeb eksplozīvās termiskās atslāņošanās risks palielināsies attiecībā pret HPC bez iekšējas sacietēšanas (tas tika apskatīts šī darba 2.3. apakšnodaļā). Atslāņošanās javā ar SAP notika līdz ar žūšanas frontes kustību, aptuveni 260 °C temperatūrā 6 mm no karsēšanas virsmas. Gluži pretēji, PP + SAP paraugā atslāņošanās nenotika. Pateicoties kombinētajiem temperatūras, poru spiediena un mitruma sadalījuma mērījumiem, javu uzvedība karsēšanas laikā ir vispusīgi izpētīta. Paredzams, ka šī pieeja sniegs jaunu ieskatu ugunsgrēka izkļiedēšanas mehānismu izpētē. Mērījumos un eksperimenta plānošanā iegūtā pieredze jau ir rezultējusies vairākos pētījumos un publikācijās^{66, 67, 69}, kuru rezultāti šajā promocijas darbā nav aprakstīti.

Kā jau iepriekš minēts, pirmo reizi tika izmantota šāda kompleksā metode, taču būtiski ir tas, ka līdz ar iegūtiem kvantitatīviem rezultātiem pirmo reizi tika vizualizēta eksplozīvā termiskā atslāņošanās gan 2D, gan 3D līmenī.

4.2. TERMISKI IZRAISĪTU BOJĀJUMU NOVĒRTĒJUMS AR ULTRASKAŅAS METODĒM

4.2.1. Paraugi un protokoli

Šīs apakšnodaļas mērķis ir raksturot termisko plaisāšanu normālos (OC) un augstas veiktspējas (HPC) betona paraugos, izmantojot ultraskaņas (US) negraujošās metodes gan lineāros mērījumus, gan nelineāros. Pētījumā lietotas divas lineārās metodes – impulsa ātruma mērījumi jeb ultraskaņas ātruma mērījumi (PV) un rezonanses ultraskaņas spektroskopija (RUS). Nelineārā ultraskaņas metode, kas ir aprakstīta tālāk, ir nelineārā rezonanses ultraskaņas spektroskopija (NRUS). Šie ultraskaņas mērījumi papildināti ar rentgena tomogrāfijām, kas aprakstītas šī darba 4.3. apakšnodaļā. Mērījumi tika veikti visiem maisījumiem, kas aprakstīti šajā darbā (2.2. tab.): OC, HPC-ref, HPC + PP, HPC + SAP, HPC + PP + SAP. Katram maisījuma sastāvam tika izmantoti divi cilindriski javas paraugi, kuru garums – 100 mm, diametrs – 25 mm. Šīs trīs negraujošās ultraskaņas metodes tika pielietotas uz vieniem un tiem pašiem paraugiem; pirms termiskās slodzes (neapstrādāts stāvoklis) un pēc karsēšanas, tādējādi ļaujot izslēgt rezultātu atšķirību, ko izraisa pildvielu atrašanās vieta, gadījumā, ja tiktu izmantoti fiziski atšķirīgi viena un tā paša maisījuma paraugi. Turklāt būtiska nozīme ir ne tikai pildvielām, bet arī gaisa saturam paraugos burbuļu veidā..

Tika izvēlēti četri termiskās slogošanas protokoli ar atbilstošu maksimālu temperatūru.

T1 – 120 °C

T2 – 200 °C

T3 – 400 °C

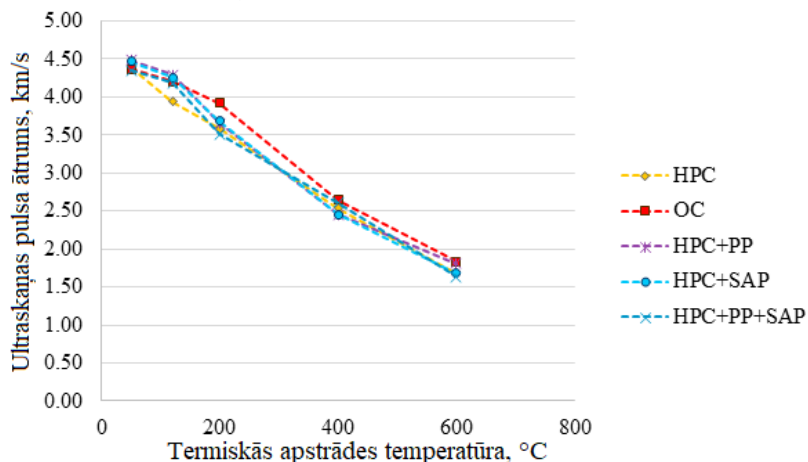
T4 – 600 °C

Sildīšanas ātrums 16,2 °C/min tika izvēlēts tā, lai tas atbilstu pārējiem testiem ar termisko slodzi. Maksimālā temperatūra tika izturēta astoņas stundas, tam sekoja brīva atdzišanās krāsnī, kas arī ilga aptuveni astoņas stundas.

4.2.2. Rezultāti

Ultraskaņas ātrums

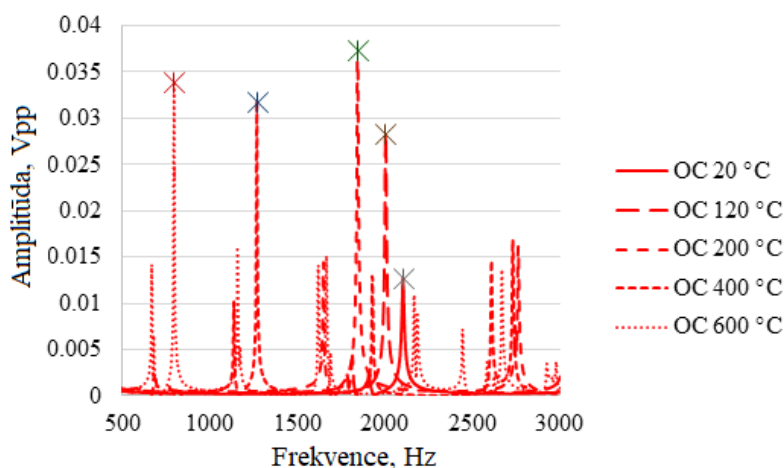
Šajā apakšnodaļā apkopoti rezultāti, kas apraksta termiskās apstrādes maksimālās temperatūras ietekmi uz ultraskaņas izplatīšanas ātrumu (4.6. att.).



4.5. attēls. Termiskās apstrādes maksimālās temperatūras ietekme uz ultraskaņas izplatīšanas ātrumu.

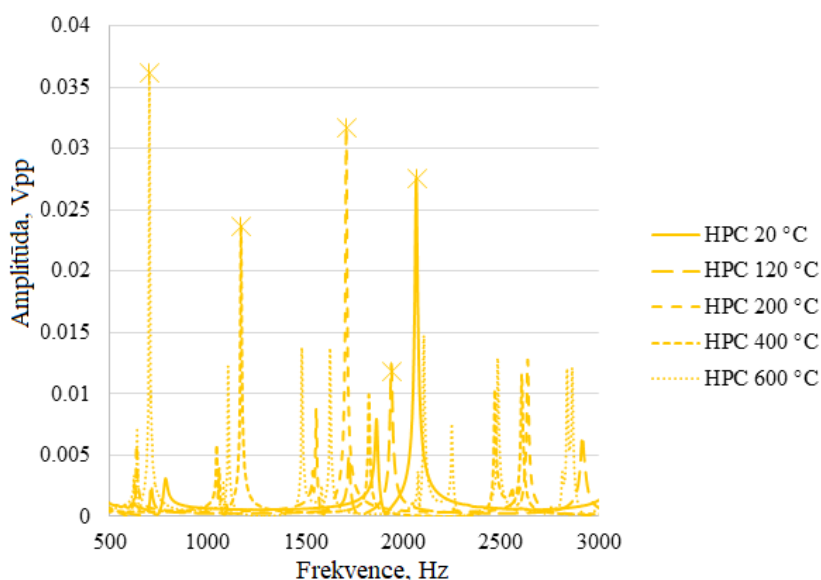
Rezonances ultraskaņas spektroskopija

RUS signāla kvalitatīvā analīze ar *RITA* (*Los Alamos National Laboratory*) programmatūru dod vispārēju rezonances maksimumu. Pēc termiskās apstrādes var novērot gareniskās rezonances frekvences nobīdi pa kreisi (rezonances frekvence samazinās; 4.7. att.). Šeit autors attēlo ierobežotu signāla frekvenču diapazonu datu vizualizācijas labad. Pīķu augstums (amplitūda) nav reprezentatīvs rādītājs materiāla kvalitatīvajām izmaiņām; pārsvarā tas ir saistīts ar robežnosacījumiem, piemēram, ar kontaktu starp paraugiem un mērierīci.



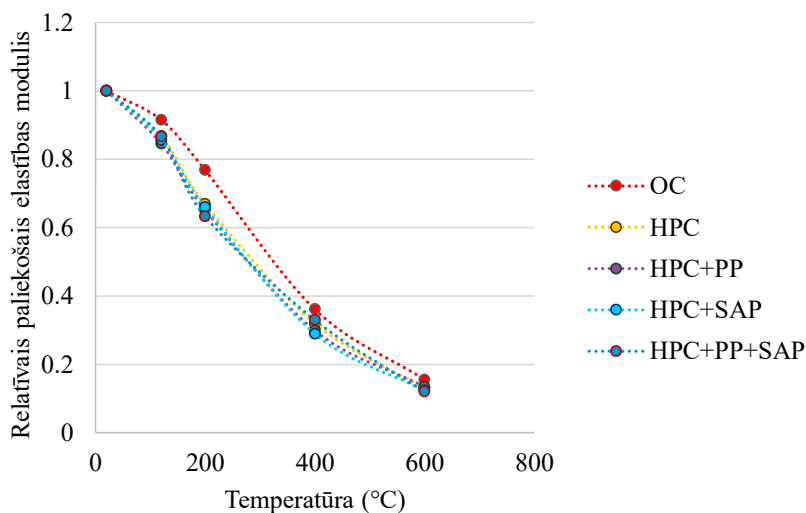
4.6. attēls. RUS signāli no OC paraugiem.

Vispārīgi RUS dati par *HPC*, līdzīgi kā *OC* (4.7. att.), liecina par rezonanses frekvences samazināšanos jeb grafiski tā nobīdās “pa kreisi” (4.8. att.), termiskās slodzes maksimālai temperatūrai pieaugot.



4.7. attēls. RUS signāli no *HPC* paraugiem.

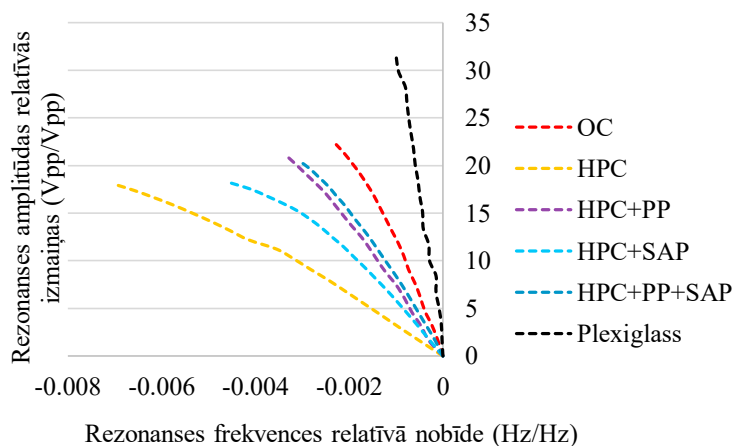
Iepriekš sniegtie RUS dati *OC* un *HPC* paraugiem attēloti vienam paraugam katrā temperatūras diapazonā. Paliekošā dinamiskā elastības moduļa izmaiņas visiem paraugiem redzamas 4.9. attēlā. Visiem paraugiem bez termiskās apstrādes dinamiskais elastības modulis ir 40–44 GPa diapazonā.



4.8. attēls. Relatīvais paliekošais elastības modulis atkarībā no termiskās apstrādes temperatūras.

Nelineārā rezonances spektroskopija

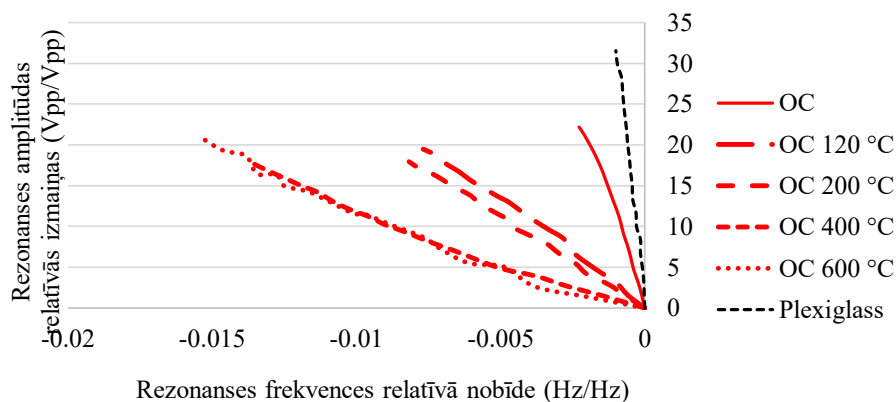
Neapstrādāto paraugu linearitāte ir apkopota un prezentēta tālāk. Šajā gadījumā ir apstrādāti visi viena un tā paša maisījuma paraugu NRUS signāli, aprēķināta katra parauga linearitātes līkne un prezentēta vidējā funkcija (4.10. att.). Visas sistēmas linearitāte definēta ar akrila stikla paraugu. Kā redzams, visviendabīgākais paraugs ir sistēmas reference jeb akrila paraugs, kuram ir tāda pati ģeometrija kā pētītajiem paraugiem. Vismazākā linearitāte ir *HPC* paraugam.



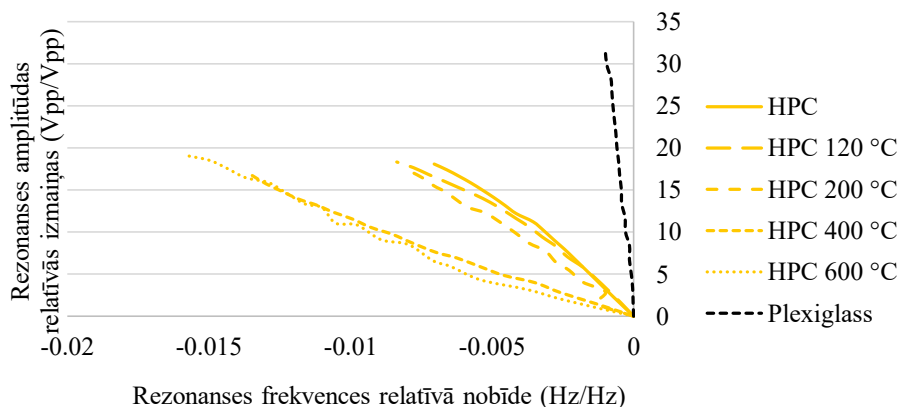
4.9. attēls. Termiski neapstrādāto paraugu linearitāte.

Tālāk redzamā attēlu kopa raksturo paraugu linearitāti pēc termiskās apstrādes, dati par neapstrādātiem *OC* un *HPC* paraugiem ir vidēji no astoņiem paraugiem, pārējiem trim maisījumiem neapstrādāta linearitāte ir vidējā no četriem paraugiem. Rezultāti pēc termiskās apstrādes ir vidēji no diviem paraugiem *OC* un *OPC*. Savukārt dati pārējiem sastāviem ir

prezentēti vienam paraugam. Sistēmas linearitātes novērtēšanai, līdzīgi kā iepriekš, tika izmantots akrila stikla cilindrs.



4.10. attēls. Termiski apstrādāto OC paraugu linearitāte.



4.11. attēls. Termiski apstrādāto HPC paraugu linearitāte.

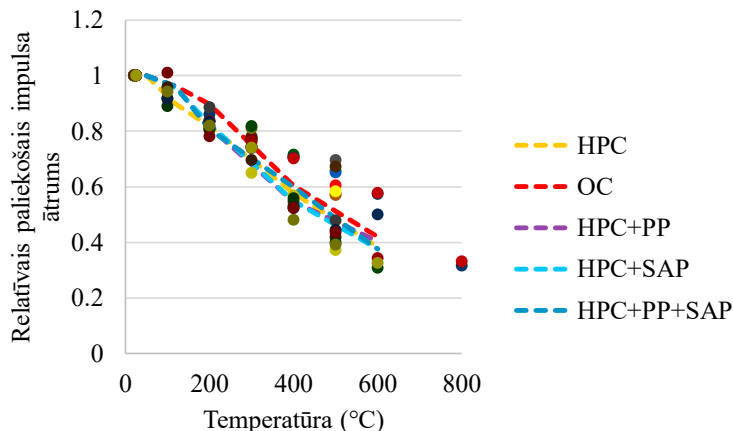
4.1. tabula

Nelinearitātes koeficienta α izmaiņas augstā temperatūrā

Sastāvi	Apstrādes temperatūra				
	20 °C	120 °C	200 °C	400 °C	600 °C
OC	364,7	1089,5	1222,5	3380,0	4680,0
HPC	1216,1	967,0	1279,0	3142,5	5007,0
HPC + PP	601,8	964,0	1321,0	2824,0	15706,0
HPC + SAP	698,7	762,0	1228,0	2979,0	4505,0
HPC + PP + SAP	656,3	707,0	1468,0	3079,0	4590,0

4.2.3. Diskusija

Šajā pētījumā iegūtie eksperimentālie dati attēloti kā relatīvais paliekošais ultraskaņas ātrums, un to var salīdzināt ar literatūras (1.4. att.) datiem, apkopojot tos vienā (4.13. att.).



4.12. attēls. Pētījuma datu salīdzinājums ar literatūras apskatu.

Eksperimentālie dati atbilst vispārējai literatūrā redzamajai tendencei, kas liecina par betona elastīgo īpašību pasliktināšanos augstā temperatūrā. Sākotnējais ultraskaņas ātrums visiem pieciem maisījumiem ir 4,35–4,5 km/s diapazonā, kas ir par 10 % zemāks nekā vairāku citu autoru pētījumos, piemēram, *Sultan*²³, *Eidan*²⁵ un *Kim*²⁷.

SAP sākotnēji izveidoto tukšo tilpumu klātbūtne būtiski neietekmē atlikušā UPV attīstību, šos mākslīgi izveidotos dobumus varētu salīdzināt ar īpaši viegla aerogela daļiņām.

Lai sekotu datiem, jāņem vērā tas, ka ultraskaņas ātrums ir elastības moduļa lineārā funkcija. Ultraskaņas ātruma samazinājums temperatūrai pieaugot ir samērā lineārs, līdzīgi kā elastības moduļa samazināšanās; tomēr šī samazinājuma pamatā ir dažādi procesi. Sākotnējā pazemināšanās temperatūrās zem 100 °C galvenokārt saistīta ar tiešu mitruma zudumu, kur nav sagaidāmi būtiski termiski bojājumi. 100–200 °C temperatūras diapazonā notiek divu veidu izmaiņas – gan hidratācijas produktu sadalīšanās (piemēram, etringīts), gan, iespējams, jaunu hidratācijas produktu veidošanās ITZ zonā. Dehidratācijas process ir globālāks un ietekmē visu parauga tilpumu, savukārt sacietēšana ITZ zonā ir lokāla un ietekmē ultraskaņas ātrumu mazāk nekā dehidratācija, kas notikusi tieši tilpumā, caur kuru ultraskaņas impulss atrod savu īsāko ceļu. Lai attēlotu un kvantitatīvi novērtētu šo atšķirību, jāizmanto nelineārās metodes. Autors izmantoja tā saukto *SIMONRUS* (*Single Mode Nonlinear Resonance Ultrasound Spectroscopy*), kas iepriekš īsāk jau minēju kā NRUS metode.

RUS rezultāti liecina par vienmērīgu dinamiskā elastības moduļa samazināšanos (4.9. att.) līdzīgi kā statiskam elastības modulim (3.2. att.). Tomēr, salīdzinot ar paraugiem kas tika izmantoti statiskā moduļa mērījumiem, neviens no paraugiem "neuzsprāga", un visi bija pieejami mērījumiem.

Literatūrā ir atrodami ļoti ierobežoti dati par termiski bojāto betona paraugu nelinearitātes novērtēšanu, temperatūras izmaiņas mērījumu laikā var radīt ļoti būtiskas mērījumu kļūdas⁷⁴, līdz ar to karsto testu veikšana ir liels izaicinājums. Nelineārās ultraskaņas metodes var izmantot

paraugiem paliekošā stāvoklī, iegūto α koeficientu vispārējais diapazons labi saskan ar literatūras datiem, piemēram, *Payan et al.*⁷⁵ apskatīja α vērtību paraugiem, kas apstrādāti 120 °C temperatūrā, un nomērītā vērtība attiecīgi OC un HPC paraugiem bija 1204 un 966. Atbilstošās vērtības šajā pētījumā attiecīgi ir 1089,5 un 967.

Izmantojot infrasarkanu termokameru, temperatūras svārstības NRUS mērījumu laikā netika novērotas, to var attiecināt gan uz parauga izmēriem, gan zemām amplitūdām, kā arī Haupterta protokola izmantošanu⁷⁴.

Šie rezultāti ir ļoti daudzsoļi un izceļ kombinēto lineāro un nelineāro ultraskaņas metožu iespējas novērtēt betona termiskos bojājumus. Tai pat laikā īpašu interesi izraisa dati, kas liecina par rukuma mikroplaisām un to aizaugšanu temperatūrā līdz 200 °C. Šajā temperatūrā novērota arī visai ticama ITZ zonas aizaugšana ar jaunizveidotiem kristāliem.

Papildus mikrobojājumu izpētei, izmantojot ultraskaņas metodes, tiek novērota gandrīz lineāra korelācija starp atlikušo elastības moduli un temperatūru, kurai paraugi tika pakļauti. Tam ir liela praktiskā nozīme, lai noteiktu betona konstrukcijas faktisko stāvokli pēc ugunsgrēka, veicot mērījumus gan potenciāli bojātām konstrukcijas daļām, gan konstrukcijas daļām, kas nav bijušas pakļautas ugunsgrēkam. Šis salīdzinājums sniegtu informāciju par iespējamo bojājumu apmēru un zonu, kas bijusi pakļauta augstām temperatūrām, norādot notikuma "karstos punktus".

4.2.4. Kopsavilkums/secinājumi

Zemākā temperatūrā vai ļoti īslaicīgas termiskās iedarbības rezultātā cietās HPC matricās var novērot lokālas izmaiņas, kas palielina materiāla linearitāti, tādējādi gandrīz vai rada labvēlīgu efektu.

Praktiska ultraskaņas ātruma mērīšanas metodes lietošana var maldināt lietotāju, jo ātruma kritums tieši nenožīmē mehānisko īpašību samazināšanos. Iegūtie NRUS dati apstiprina hipotēzi par hidratāciju ITZ zonās un mikroplaisu dzīšanu, ko sākotnēji izraisīja autogēnais rukums cietēšanas laikā un/vai žūšanas rukums temperatūrā līdz 200 °C.

4.3. TERMISKI IZRAISĪTU BOJĀJUMU NOVĒRTĒŠANA, IZMANTOJOT μ CT

4.3.1. Paraugi un protokoli

Termiski izraisītu bojājumu μ CT pētījumā tika izmantoti tie paši paraugi kā ultraskaņas mērījumos. Tomēr atšķirībā no ultraskaņas mērījumiem katrā temperatūras diapazonā tika izmantots tikai viens paraugs.

4.3.2. Metodes

Katrai μ CT datu kopai tika izmantots pilns rotācijas protokols ar soli 0,5°, līdz ar to tika uzņemts 721 radiogrāfijas attēls. Iestatījumi: attālums no avota līdz detektoram bija nemainīgs (1016 mm), detektora izmērs 1024 × 1024 pikseļi, izmantots konusveida stara avots. Paraugiem pirms termiskās apstrādes izmantotā strāva bija 140 uA, spriegums – 70 kV; atbilstošās vērtības termiski apstrādātiem paraugiem – 140 uA un 100 kV. Tika reģistrēta datu kopa, kuras pikseļu

izmērs ir 0,02659 mm un tāds pat attālums starp horizontāliem slāņiem, un tā rezultātā vokseļa izmērs ir $18,8 \times 10^{-6}$ mm.

Datu rekonstrukcijai, reģistrācijai un apstrādei tika izmantota *Empa* attēlu analīzes platforma. Rekonstrukcijai tika izmantota *Octopus* programmatūra, savukārt ar *Fiji/ImageJ* tika veikta 2D reģistrācija un slāņu apstrāde, kā arī 3D modeļu izveidei. Aprēķini tika veikti, izmantojot 8 bitu attēlus, sadalot materiālu sastāvdaļas klasteros, pamatojoties uz pelēkās krāsas pakāpēm. Līdzīgu pieeju autors izmantojis un aprakstījis, pētot māla un betona mijiedarbību⁷⁶.

Lielākā daļa termisko bojājumu tika novēroti subpikseļu mērogā, tādējādi kvantitatīvi uzticamas plaisu 3D atveidošanas iespējas bija ierobežotas. Iegūto datu kvalitatīvā analīze aplūkota tālāk.

4.3.3. Rezultāti

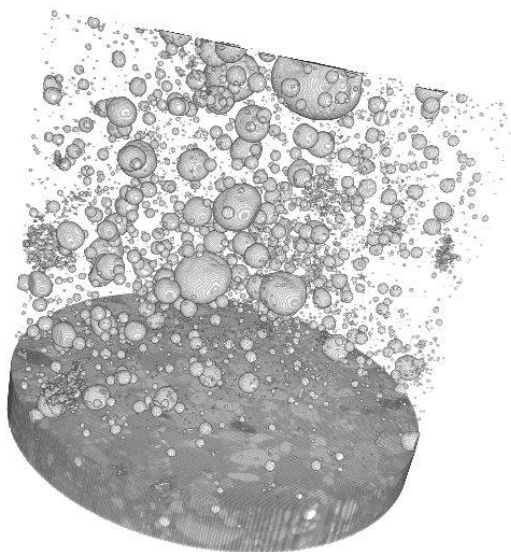
Pirms un pēc termiskās apstrādes ievāktu μ CT datu apstrāde ļauj novērot kvalitatīvās izmaiņas un termisko plaisāšanu dažādā maksimālā temperatūrā. Ir svarīgi ievērot, ka katram termiski noslogota parauga μ CT pirms termiskās slodzes ir tieši tā paša parauga μ CT dati, lai varētu vizualizēt faktisko bojājumu.

Kopējais gaisa un tukšumu telpiskais daudzums, kas aprēķināts no μ CT, apkopots 4.2. tabulā. Tālāk ir sniegts piemērs gaisa burbuļu telpiskam sadalījumam *OC* un *HPC* paraugiem (4.14. un 4.15. att.).

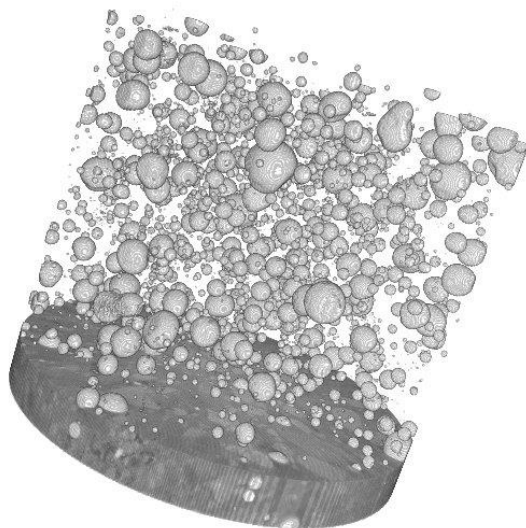
4.2. tabula

Tukšumu daudzums, ieskaitot gaisu (aprēķināts no μ CT)

Maisījums	Tukšumu daudzums (%)
<i>OC</i>	2,47
<i>HPC</i>	4,42
<i>HPC</i> + PP	3,31
<i>HPC</i> + SAP	5,11
<i>HPC</i> + PP + SAP	5,1



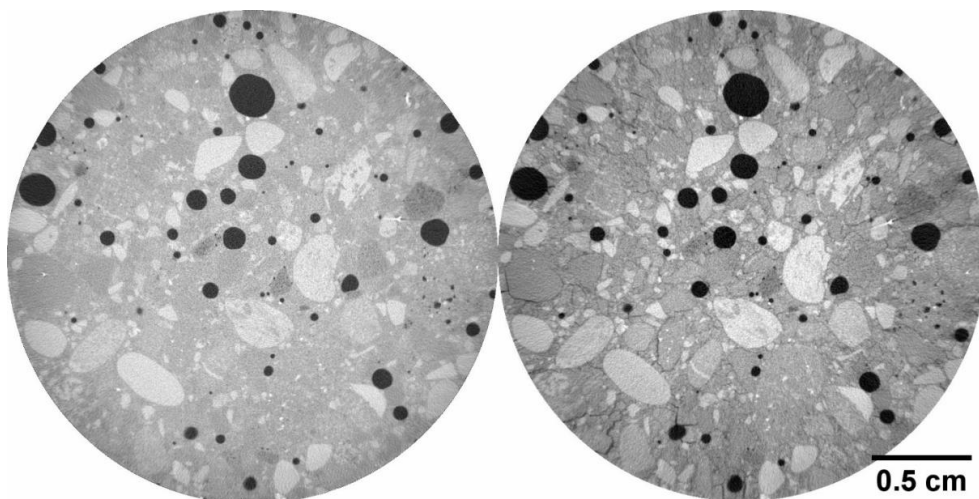
4.13. attēls. Gaisa burbuļu vizualizācija OC T1-1 paraugam pirms termiskās apstrādes.



4.14. attēls. Gaisa burbuļu vizualizācija HPC T1-1 paraugam pirms termiskās apstrādes.

Jāatzīmē, ka iepriekš norādītais tukšumu tilpuma saturs tieši nenožīmē gaisa saturu, jo daži nelieli gaisa burbuļi, iespējams, netika vizualizēti pēc rekonstrukcijas, reģistrācijas un staru cietēšanas artefaktu korekcijas, jo vokseļu izmērs ir mazāks par $18,8 \times 10^{-6} \text{ mm}^3$.

HPC paraugu termisko bojājumu kvalitatīvais novērtējums 600 °C temperatūrā redzams 4.16. attēlā.



4.15. attēls. *HPC* termiskais bojājums 600 °C temperatūrā. Pa kreisi – pirms termiskās slodzes, pa labi – pēc termiskās slodzes.

4.3.4. Apkopojums/Secinājumi

Nesagraujošām testa metodēm, piemēram, rentgena tomogrāfijai, ir liela nozīme materiāla stāvokļa kvalitatīvajā analīzē, ļaujot vizualizēt bojājumus un lokalizēt vietas, kur veidojas pirmās plaisas gan telpiski, gan piemeklējot attiecīgo temperatūru vai apstrādes laiku.

Acīmredzamas plaisas netika novērotas 120 °C un 200 °C temperatūrā, savukārt 600 °C temperatūrā *HPC* bija nopietnas plaisas. Radiālās plaisas, kas sākas no virsmas, visticamāk, ir saistītas ar parauga formu un rukumu.

Ir vizuāli novērots, ka plaisas ap pildvielām ar zemāku blīvumu ir izteiktākas nekā ap blīvākām pildvielām.

Iegūtie μ CT dati izceļ SAP un PP pozitīvo ietekmi uz betona termisko bojājumu ierobežošanu – paraugiem ar SAP un PP tiek novērota ļoti ierobežota plaisāšana, salīdzinot ar parastajiem *HPC* paraugiem.

5. SECINĀJUMI

Gan literatūras apskats, gan betona īpašību izpēte pēc termiskām slodzēm liecina par iespējamu mehānisko īpašību palielināšanos temperatūrā ap 200 °C, vispārēju pazemināšanos virs 400 °C un paliekošās spiedes stiprības būtisku pasliktināšanos paraugiem, kas noslogoti virs 800 °C. Runājot par šajā pētījumā testētajiem paraugiem, lielākais spiedes stiprības pieaugums bija +17,58 % 600 °C temperatūrā *HPC* paraugiem, taču jāmin, ka paraugi piedzīvoja termisko atslāpošanos un šis pieaugums raksturo materiāla potenciālās iespējas. Lielākais lieces stiprības pieaugums bija +18,49 °C *HPC* + PP + SAP paraugiem pēc apstrādes 200 °C temperatūrā. Vislielākie relatīvās spiedes un lieces stiprības zudumi tika reģistrēti *OC* paraugiem 600 °C temperatūrā, attiecīgi -51,90 % un -81,32 %. Jāatzīmē, ka paraugiem, kuriem pievienotas tikai PP šķiedras, bija lielāks stiprības kritums nekā *HPC* paraugiem (-50,34 % spiedē un -67,23 % liecē), tomēr, kad maisījumam tika pievienots SAP, relatīvais stiprības samazinājums bija mērenāks (-34,91 % spiedē un -49,58 % liecē), bet tas varētu izraisīt termisko atslāpošanos augstā temperatūrā lielāka ūdens satura dēļ, kas korelē ar neitronu radiogrāfijas rezultātiem.

Kopējā porainība un izlaušanās rādiuss, kas izmērīti ar *MIP* metodi, palielinājās atkarībā no slodzes temperatūras. *OC* paraugu kopējā porainība pēc termiskās slodzes 600 °C temperatūrā palielinājās 2,12 reizes, savukārt *HPC* paraugu kopējā porainība palielinājās 3,03 reizes, kas liecina par lielākiem bojājumiem. Svarīgi, ka vismazākais pieaugums pēc termiskās slodzes temperatūrā līdz 600 °C bija *HPC* + PP + SAP paraugiem.

Šos datus apstiprina vispārējais atlikušo transporta īpašību pieaugums, kas izmērīts ar skābekļa difūzijas palīdzību. Vislielākais transporta īpašību pieaugums, pamatojoties uz skābekļa difūziju, tika novērots *HPC* paraugiem 400 °C temperatūrā, tas palielinājās 122,21 reizi, kas liecina par bojājumiem. Augstākā temperatūrā bojājumi bija vēl nozīmīgāki, jo iekārtas izgāja ārpus mērījumu diapazona un paraugu stāvokli bieži vien nevarēja izteikt skaitliski.

Plaisu veidošanās un atslāpošanās ir vairāk iespējama termiskai apstrādei pakļautiem *HPC* paraugiem. Spiediens, ko rada ūdens tvaiki porās un termiskie spriegumi, var izraisīt sprādzienbīstamu atslāpošanos.

Pateicoties kombinētajiem temperatūras, poru spiediena un mitruma sadalījuma mērījumiem, betona uzvedība karsēšanas laikā ir vispusīgi izpētīta reāllaikā. Šī pieeja sniedz jaunu ieskatu eksplozīvās atslāpošanās mehānismu izpētē ugunsgrēku laikā.

Mitruma profilu un spiediena attīstības salīdzinājums ļauj secināt, ka maksimālais spiediens rodas līdz ar žūšanas fronti. Tādējādi paraugā bez PP šķiedrām novērota šaurāka un lēnāk progresējoša žūšanas fronte, kas attiecīgi izraisa šaurākas augsta spiediena zonas izveidi, kas atrodas tuvāk karsēšanas virsmai, salīdzinot ar tādu pašu paraugu ar PP fibrām.

Pietiekama siltumizolācija un alumīnija aizsargkārtā spēj aizsargāt scintilatora ekrānu no augstas temperatūras un betona lauskām eksplozijas laikā pat tad, ja paraugs ir novietots vien dažu centimetru attālumā no tā. Tuvs attālums līdz jutīgam un dārgam ekrānam ir būtisks labākai izšķirtspējai. Šajā promocijas darbā aprakstītie eksperimenti kļuva par ceļrādi turpmākiem eksplozīvās atslāpošanās pētījumiem, izmantojot neitronu radiogrāfiju, būtiski paaugstinot eksperimenta drošību.

Nesagraujošās ultraskaņas metodes uzrādīja skaidru atlikušā elastības moduļa samazināšanos katrā termiskās slodzes solī. *OC* paraugiem bija atlikuši tikai 15,53 % no dinamiskā elastības moduļa, *HPC* paraugiem – 13,12 %, *HPC* + *PP* paraugiem – 14,09 %, *HPC* + *SAP* – 12,32 %, *HPC* + *PP* + *SAP* – 11,94 %. Savukārt *NRUS* datu analīze apstiprina ideju par lokālu saraušanās plaisu sadzīšanu *HPC* un *HPC* + *PP* paraugiem un *ITZ* zonas sacietēšanu.

Svarīgs promocijas darba praktiskais secinājums ir ultraskaņas ātruma lineāra tendence, kas novērota paraugu paliekošā stāvoklī, palielinoties temperatūrai. Skaidrs, gandrīz lineārs ultraskaņas ātruma samazinājums pēc termiskās slodzes ļauj salīdzināt konstrukciju stāvokli dažādos punktos, lai definētu secinājumus par maksimālo temperatūru, kurai konstrukcijas elementi bija pakļauti.

Ar rentgenstaru μ CT iegūtie kvalitatīvie dati papildus plaisāšanai kopumā parāda, ka plaisas, visticamāk, veidojas ap mazāk blīviem agregātiem nekā ap blīvākiem.

Pētījums, kas aprakstīts šajā promocijas darbā, ir pirmais mēģinājums apvienot vairākas negraujošās metodes, lai novērtētu augstas temperatūras radītos bojājumus betonā, kas veikts konsekventi, izmantojot vienotu paraugu kopas un ievērojot sastāvu projektēšanas pamatprincipus.

IZMANTOTĀ LITERATŪRA

1. Damtoft, J. S., Lukasik, J., Herfort, D., Sorrentino, D. & Gartner, E. M. Sustainable development and climate change initiatives. *Cem. Concr. Res.* **38**, 115–127 (2008).
2. Barcelo, L., Kline, J., Walenta, G. & Gartner, E. Cement and carbon emissions. *Mater. Struct. Constr.* **47**, 1055–1065 (2014).
3. Monteiro, P. J. M., Miller, S. A. & Horvath, A. Towards sustainable concrete. *Nat. Mater.* **16**, 698–699 (2017).
4. Kalifa, P., Menneteau, F. D. & Quenard, D. Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures. *Cem. Concr. Res.* **30**, 1915–1927 (2000).
5. Flatt, R. & Schober, I. Superplasticizers and the rheology of concrete. in *Understanding the Rheology of Concrete* 144–208 (Woodhead Publishing Limited, 2012). doi:10.1533/9780857095282.2.144.
6. Neville, A. & Aïtcin, P.-C. High performance concrete- An overview. *Mater. Struct.* **31**, 111–117 (1998).
7. European Commission. *Competitiveness of the European Cement and Lime Sectors*. (2017).
8. Mindeguia, J.-C., Pimienta, P., Noumowé, A. & Kanema, M. Temperature, pore pressure and mass variation of concrete subjected to high temperature — Experimental and numerical discussion on spalling risk. *Cem. Concr. Res.* **40**, 477–487 (2010).
9. Ulm, F., Acker, P. & Levy, M. The “Chunnel” fire. II: Analysis of concrete damage. *J. Eng. Mech.* **125**, 283–289 (1999).
10. Khoury, G. A. Effect of fire on concrete and concrete structures. *Prog. Struct. Eng. Mater.* **2**, 429–447 (2000).
11. Kodur, V. Spalling in high strength concrete exposed to fire: concerns, causes, critical parameters and cures. *Adv. Technol. Struct. Eng.* 1–9 (2000).
12. Ulm, F. J., Coussy, O. & Bazant, Z. P. The ‘Chunnel’ fire. I: Chemoplastic softening in rapidly heated concrete. *J. Eng. Mech.* **125**, 272–281 (1999).
13. Jansson, R. Fire spalling of concrete: theoretical and experimental studies. (2013). doi:1103-4270.
14. *EN 1992-1-2. Eurocode2: General rules – Structural fire design*.
15. Ingason, H., Li, Y. Z. & Lönnemark, A. Runehamar tunnel fire tests. *Fire Saf. J.* **71**, 134–149 (2015).
16. Lönnemark, A. & Ingason, H. Gas temperatures in heavy goods vehicle fires in tunnels. *Fire Saf. J.* **40**, 506–527 (2005).
17. Lönnemark, A. & Ingason, H. Fire spread and flame length in large-scale tunnel fires. *Fire Technol.* **42**, 283–302 (2006).
18. Ingason, H. & Lönnemark, A. Heat release rates from heavy goods vehicle trailer fires in tunnels. *Fire Saf. J.* **40**, 646–668 (2005).
19. ITA. *Guidelines for structural fire resistance for road tunnels*. (2004).
20. Dong, Y. *et al.* Experimental research on fire resistance of the reduced scale immersed tunnel with fire in both traffic tubes. *Tunn. Undergr. Sp. Technol.* **132**, 104922 (2023).
21. Felicetti, R. & Gambarova, P. G. Effects of High Temperature on the Residual Compressive Strength of High-Strength Siliceous Concretes. *ACI Mater. J.* **95**, (1998).
22. Canbaz, M. The effect of high temperature on reactive powder concrete. *Constr. Build. Mater.* **70**, 508–513 (2014).

23. Sultan, H. K. & Alyaseri, I. Effects of elevated temperatures on mechanical properties of reactive powder concrete elements. *Constr. Build. Mater.* **261**, 120555 (2020).
24. Alimrani, N. S. & Balazs, G. L. Synthetic fibres or fibre cocktail in terms of shear capacity of concrete after elevated temperatures. *Mech. Mater.* **148**, 103504 (2020).
25. Eidan, J., Rasoolan, I., Rezaeian, A. & Poorveis, D. Residual mechanical properties of polypropylene fiber-reinforced concrete after heating. *Constr. Build. Mater.* **198**, 195–206 (2019).
26. Abaeian, R., Behbahani, H. P. & Moslem, S. J. Effects of high temperatures on mechanical behavior of high strength concrete reinforced with high performance synthetic macro polypropylene (HPP) fibres. *Constr. Build. Mater.* **165**, 631–638 (2018).
27. Kim, Y. S., Ohmiya, Y., Kanematsu, M. & Kim, G. Y. Effect of aggregate on residual mechanical properties of heated ultra-high-strength concrete. *Mater. Struct. Constr.* **49**, 3847–3859 (2016).
28. Liu, J. C. & Tan, K. H. Fire resistance of ultra-high performance strain hardening cementitious composite: Residual mechanical properties and spalling resistance. *Cem. Concr. Compos.* **89**, 62–75 (2018).
29. Irshidat, M. R., Al-Nuaimi, N. & Rabie, M. Hybrid effect of carbon nanotubes and polypropylene microfibers on fire resistance, thermal characteristics and microstructure of cementitious composites. *Constr. Build. Mater.* **266**, 121154 (2021).
30. Beaucour, A. L. *et al.* Influence of elevated temperature on properties of radiation shielding concrete with electric arc furnace slag as coarse aggregate. *Constr. Build. Mater.* **256**, 119385 (2020).
31. Algourdin, N., Sy Hung, B., Mesticou, Z. & Si Larbi, A. Effects of high temperature on mechanical behaviour and physicochemical properties of recycled mortars and its components. *Constr. Build. Mater.* **248**, 118554 (2020).
32. Nayel, I. H., Nasr, M. S. & Abdulridha, S. Q. Impact of elevated temperature on the mechanical properties of cement mortar reinforced with rope waste fibres. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* **671**, 0–10 (2020).
33. Papayianni, J. & Valiasis, T. Residual mechanical properties of heated concrete incorporating different pozzolanic materials. *Mater. Struct.* **24**, 115–121 (1991).
34. Saedi Daryan, A., Bakhtiari, M. & Ghasemi, P. An experimental study to evaluate the postfire mechanical properties of concrete specimens. *Struct. Concr.* 1–13 (2020). doi:10.1002/suco.202000011.
35. Niknezhad, D., Bonnet, S., Leklou, N. & Amiri, O. Effect of thermal damage on mechanical behavior and transport properties of self-compacting concrete incorporating polypropylene fibers. *J. Adhes. Sci. Technol.* **33**, 2535–2566 (2019).
36. Chang, Y. F., Chen, Y. H., Sheu, M. S. & Yao, G. C. Residual stress-strain relationship for concrete after exposure to high temperatures. *Cem. Concr. Res.* **36**, 1999–2005 (2006).
37. Noumowe, A. N., Clastres, P., Debicki, G. & Costaz, J. L. Transient heating effect on high strength concrete. *Nucl. Eng. Des.* **166**, 99–108 (1996).
38. Zhai, Y., Deng, Z., Li, N. & Xu, R. Study on compressive mechanical capabilities of concrete after high temperature exposure and thermo-damage constitutive model. *Constr. Build. Mater.* **68**, 777–782 (2014).
39. Zheng, W., Li, H. & Wang, Y. Compressive stress-strain relationship of steel fiber-reinforced reactive powder concrete after exposure to elevated temperatures. *Constr.*

- Build. Mater.* **35**, 931–940 (2012).
40. Chan, Y. N., Peng, G. F. & Anson, M. Residual strength and pore structure of high-strength concrete and normal strength concrete after exposure to high temperatures. *Cem. Concr. Compos.* **21**, 23–27 (1999).
 41. Phan, L. T., Lawson, J. R. & Davis, F. L. Effects of elevated temperature exposure on heating characteristics, spalling, and residual properties of high performance concrete. *Mater. Struct. Constr.* **34**, 83–91 (2001).
 42. Lau, A. & Anson, M. Effect of high temperatures on high performance steel fibre reinforced concrete. *Cem. Concr. Res.* **36**, 1698–1707 (2006).
 43. Xuan, W., Chen, X., Yang, G., Dai, F. & Chen, Y. Impact behavior and microstructure of cement mortar incorporating waste carpet fibers after exposure to high temperatures. *J. Clean. Prod.* **187**, 222–236 (2018).
 44. Collier, N. C. Transition and decomposition temperatures of cement phases - a collection of thermal analysis data. *Ceram. – Silikaty* **60**, 338–343 (2016).
 45. Jiang, C., Fang, J., Chen, J. Y. & Gu, X. L. Modeling the instantaneous phase composition of cement pastes under elevated temperatures. *Cem. Concr. Res.* **130**, 105987 (2020).
 46. Shorter, G. W. & Harmathy, T. Z. Discussion of the fire resistance of prestressed concrete beams. in *Proceedings of the Institution of Civil Engineers* 313–315 (1961).
 47. Saito, H. Explosive Spalling of Prestressed Concrete in Fire. *Bull. Japan Assoc. Fire Sci. Eng.* **5**, 23–30 (1966).
 48. Ozawa, M., Uchida, S., Kamada, T. & Morimoto, H. Study of mechanisms of explosive spalling in high-strength concrete at high temperatures using acoustic emission. *Constr. Build. Mater.* **37**, 621–628 (2012).
 49. Ozawa, M. & Morimoto, H. Effects of various fibres on high-temperature spalling in high-performance concrete. *Constr. Build. Mater.* **71**, 83–92 (2014).
 50. Sertmehmetoglu, Y. On a Mechanism of Spalling of Concrete Under Fire Conditions. (King's College London, 1977).
 51. Bažant, Z. P. Analysis of Pore Pressure, Thermal Stress and Fracture in Rapid Heated Concrete. in *International Workshop on Fire Performance of High-Strength Concrete* (eds. Phan, L. T., Carino, N. J., Duthinh, D. & Garboczi, E.) 155–164 (1998).
 52. Lo Monte, F., Felicetti, R. & Miah, M. J. The influence of pore pressure on fracture behaviour of Normal-Strength and High-Performance Concretes at high temperature. *Cem. Concr. Compos.* **104**, (2019).
 53. Choe, G. *et al.* Effect of moisture migration and water vapor pressure build-up with the heating rate on concrete spalling type. *Cem. Concr. Res.* **116**, 1–10 (2019).
 54. Justs, J., Wyrzykowski, M., Bajare, D. & Lura, P. Internal curing by superabsorbent polymers in ultra-high performance concrete. *Cem. Concr. Res.* **76**, 82–90 (2015).
 55. Dauti, D. *et al.* Modeling concrete exposed to high temperature : Impact of dehydration and retention curves on moisture migration. *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech.* **42**, 1516–1530 (2018).
 56. Diamond, S. Mercury porosimetry. An inappropriate method for the measurement of pore size distributions in cement-based materials. *Cement and Concrete Research* **30**, 1517–1525 (2000).
 57. Kaufmann, J., Loser, R. & Leemann, A. Analysis of cement-bonded materials by multi-cycle mercury intrusion and nitrogen sorption. *J. Colloid Interface Sci.* **336**, 730–7

- (2009).
58. Washburn, E. Note on a Method of Determining the Distribution of Pore Sizes in a Porous Material. *Proc Natl Acad Sci* **7**, 115–116 (1921).
 59. Winslow, D. N. & Diamond, S. A mercury porosimetry study of the porosity in Portland cement. *J. Mater.* 564–585 (1970).
 60. Hearn, N. & Hooton, R. D. Sample mass and dimension effects on mercury intrusion porosimetry results. *Cem. Concr. Res.* **22**, 970–980 (1992).
 61. Kaufmann, J. Pore space analysis of cement-based materials by combined Nitrogen sorption – Wood’s metal impregnation and multi-cycle mercury intrusion. *Cem. Concr. Compos.* **32**, 514–522 (2010).
 62. Kaufmann, J. Characterization of Pore Space of Cement-Based Materials by Combined Mercury and Wood’s Metal Intrusion. *J. Am. Ceram. Soc.* **92**, 209–216 (2009).
 63. Lehmann, E., Vontobel, P. & Wiesel, L. Properties of the radiography facility NEUTRA at SINQ and its potential for use as European reference facility. *Nondestruct. Test. ...* 191–202 (2001).
 64. Weber, B. *et al.* Neutron radiography of heated high-performance mortar. *MATEC Web Conf.* **6**, 03004 (2013).
 65. Toropovs, N. *et al.* Real-time measurements of temperature, pressure and moisture profiles in High-Performance Concrete exposed to high temperatures during neutron radiography imaging. *Cem. Concr. Res.* **68**, 166–173 (2015).
 66. Dauti, D. *et al.* First results on fast neutron tomography of heated concrete. in *5th International Workshop on Concrete Spalling due to Fire Exposure* 249–258 (2017).
 67. Dauti, D. *et al.* Analysis of moisture migration in concrete at high temperature through in-situ neutron tomography. *Cem. Concr. Res.* (2018). doi:10.1016/J.CEMCONRES.2018.06.010.
 68. Dauti, D., Dal Pont, S., Briffaut, M. & Weber, B. Modeling of 3D moisture distribution in heated concrete: From continuum towards mesoscopic approach. *Int. J. Heat Mass Transf.* **134**, 1137–1152 (2019).
 69. Dauti, D. *et al.* Some Observations on Testing Conditions of High-Temperature Experiments on Concrete: An Insight from Neutron Tomography. *Transp. Porous Media* **132**, 299–310 (2020).
 70. Lura, P. & Terrasi, G. Pietro. Reduction of fire spalling in high-performance concrete by means of superabsorbent polymers and polypropylene fibers: Small scale fire tests of carbon fiber reinforced plastic-prestressed self-compacting concrete. *Cem. Concr. Compos.* **49**, 36–42 (2014).
 71. Sedighi-Gilani, M. *et al.* Visualization and quantification of liquid water transport in softwood by means of neutron radiography. *Int. J. Heat Mass Transf.* **55**, 6211–6221 (2012).
 72. Lukić, B., Tengattini, A., Dufour, F. & Briffaut, M. Visualising water vapour condensation in cracked concrete with dynamic neutron radiography. *Mater. Lett.* **283**, 1–4 (2021).
 73. Kalifa, P., Chéné, G. & Gallé, C. High-temperature behavior of HPC with polypropylene fibers from spalling to microstructure. *Cem. Concr. Res.* **31**, 1487–1499 (2001).
 74. Hauptert, S. *et al.* High-accuracy acoustic detection of nonclassical component of material nonlinearity. *J. Acoust. Soc. Am.* **130**, 2654–61 (2011).
 75. Payan, C., Ulrich, T. J., Le Bas, P. Y., Saleh, T. & Guimaraes, M. Quantitative linear

- and nonlinear resonance inspection techniques and analysis for material characterization: Application to concrete thermal damage. *J. Acoust. Soc. Am.* **136**, 537–546 (2014).
76. Bernard, E., Jenni, A., Toropovs, N. & Mäder, U. Percolation experiment across a 10-year-old interface between Opalinus Clay and Portland concrete. *Cem. Concr. Res.* **170**, (2023).



Nikolajs Toropovs dzimis 1986. gadā Rīgā. Rīgas Tehniskajā universitātē (RTU) ieguvis bakalaura grādu būvzinātnē (2007) un maģistra grādu būvniecībā (2012). Studiju laikā strādājis RTU Būvniecības fakultātē. Kopš 2016. gada ir Šveices Federālās materiālu zinātnes un tehnoloģiju laboratorijas zinātniskais darbinieks. 2025. gadā ieguvis Šveices Būvniecības balvu.