

**Karīna Buka-Vaivade**

# **INOVATĪVU KOKA-BETONA KOMPOZĪTU KONSTRUKCIJU RACIONĀLS RISINĀJUMS**

Promocijas darbs



**RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE**

Būvniecības inženierzinātņu fakultāte  
Būvkonstrukciju inženierzinātņu institūts

**Karīna Buka-Vaivade**

Doktora studiju programmas “Būvniecība” doktorante

**INOVATĪVU KOKA-BETONA KOMPOZĪTU  
KONSTRUKCIJU RACIONĀLS RISINĀJUMS**

**Promocijas darbs**

Zinātniskie vadītāji  
Profesors *Dr. sc. ing.*  
DMITRIJS SERDJUKS  
Profesors *Dr. sc. ing.*  
LEONĪDS PAKRASTIŅŠ

Rīga 2022



Šis darbs ir izstrādāts ar

- Rīgas Tehniskās universitātes Doktorantūras grantu programmas atbalstu:
  - DOK.BIF/17
  - DOK.BIF/18
  - DOK.BIF/20
  - DOK.BIF/21
- Eiropas Sociālā fonda (SAM) finansētā projekta “Rīgas Tehniskās universitātes un Banku augstskolas doktorantu un akadēmiskā personāla stiprināšana stratēģiskās specializācijas jomās”, Nr. 8.2.2.0/20/I/008 atbalstu;
- Latvijas Zinātnes padomes projekta Nr.lzp-2020/1-0240 “Koaksiālo paātrinājumu korelācijas metode 6-D telpā būvkonstrukciju savienojumu kvalitātes novērtēšanai” atbalstu;



Latvijas Zinātnes padome

## ANOTĀCIJA

Strauji pieaugot Zemes populācijai palielinās ilgtspējīgas attīstības principa nozīme, ko būvniecības nozares kontekstā var interpretēt kā nepieciešamību pēc racionālākas materiālu izmantošanas ar uzsvāri uz atjaunojamajiem resursiem. Koka-betona kompozīts (TCC), kas spēj apvienot sevī koksnes un betona labākas īpašības un samazināt to trūkumus, ir uzskatāms par perspektīvu pielietošanai būvkonstrukcijām, kas strādā liecē.

Darba ietvaros ir noteikta defektu stingrajā savienojumā starp koka un betona slāņiem ietekme uz koka-betona kompozīta plātņu uzvedību. Ir izstrādāts koka-betona kompozīta konstrukcijas ilgtspējīgs risinājums ar piedāvātu inovatīvu stingra savienojuma izgatavošanas metodi, kas nodrošina materiālu visefektīvāko sinerģiju. Pilnā kompozīta darbība ir pētīta ar skaitliskajiem aprēķiniem un laboratorijas lieces un bīdes testiem. Paveiktie testi uzrādīja piedāvātā savienojuma veida lielāku drošuma līmeni, salīdzinot ar pēc klasiskām metodēm veidotiem adhezīviem savienojumiem.

Ir izstrādāta metodika un uz tās pamata – programmatūra – TCC plātņu diviem konstruktīviem risinājumiem – ar krusteniski līmētas koksnes (CLT) plātnēm un ar ribotām saplākšņa plātnēm pamatā, šķērsriezumu racionālu parametru un materiālu noteikšanai, piedāvājot par racionalitātes kritēriju – izmaksu koeficientu, kas raksturo materiāla izmaksas 1 m<sup>2</sup> plātnei. Ar izstrādāto programmu ir noteiktas koka-betona kompozīta pamatotas izmantošanas robežas, kas CLT-betona un saplākšņa-betona plātnēm raksturojas ar attiecīgi līdz pat par 44 % un 42 % zemākām izmaksu koeficienta vērtībām un 25 % un 33 % mazāku šķērsriezuma augstumu pie augstas vibrāciju kvalitātes klases salīdzinājumā ar to pašu konstruktīvo risinājumu, bet bez betona slāņa, racionālākajiem šķērsriezumiem. No apskatīto divu konstruktīvo risinājumu salīdzinājuma ir noteikts, ka saplākšņa-betona kompozīta plātnēm izmaksu koeficients ir zemāks nekā CLT-betona plātnēm, kā arī šis risinājums raksturojas ar zemāku pašsvara slodzi. Abu variantu eksperimentālas pārbaudes liecināja par mazāku rezultātu izkliedi koka-betona kompozīta paraugiem ar saplākšņa plātņi.

Ņemot vērā to, ka savienojuma kvalitātes kontrole kokbetonā tiek uztverta kā ierobežojums līmēto savienojumu izmantošanai praksē, darbā, balstoties uz paveiktajiem laboratorijas eksperimentiem, ir pārbaudītas un noteiktas operacionālās modālās analīzes – konstrukcijas globālai novērtēšanai, un ultraskaņas defektoskopijas – lokālai savienojumu diagnostikai, efektīvas izmantošanas iespējas.

Piedāvātais konstruktīvais risinājums paredz atteikšanos no tradicionāla stiegrojuma betona slānī. Nepārtrauktā tērauda stiegrojuma ierīkošana konstrukcijā, īpaši šī brīža situācijā, kad tērauda piegādes Latvijas tirgum ir apgrūtinātas dēļ dažādiem ārējiem faktoriem, būtiski palielina konstrukciju izmaksas. Ar laboratorijas eksperimentiem ir noteikts pozitīvs efekts no sintētisko fibru pievienošanas 0.5 % daudzumā betona sastāvam. Fibru pievienošana rezultējas spriegumu pārdalīšanās un betona slāņa trausluma samazināšanās. Pateicoties fibrām, sabrukuma gadījumā saglabājas koka-betona kompozīta integritāte.

Promocijas darbs sastāv no darba vispārējā raksturojuma, piecām nodaļām, secinājumiem un izmantotās literatūras saraksta. Darba apjoms – 120 lapaspuses, 96 attēli, 16 tabulas un 139 literatūras avoti. Promocijas darbs ir izstrādāts latviešu valodā.



## ANNOTATION

Because of the rapid growth of the Earth's population, the importance of the principle of sustainable development is increasing. In the context of civil engineering can be interpreted as the need for more rational use of materials with an emphasis on renewable resources. Timber-concrete composite (TCC), which can combine the better properties of timber and concrete in one composite material and reduce their disadvantages, is considered a promising composite for bending structures.

Within the framework of the work, the impact of timber-to-concrete rigid connection defects on the behaviour of TCC slabs has been determined. A sustainable solution of TCC for bending structures with an innovative method of rigid connection production, which ensures the most effective synergy of the materials, was developed. The performance of the full composite action has been studied by numerical calculations and laboratory bending and shear tests. The tests showed a higher safety level of the proposed connection type than the adhesive connections formed by classical methods.

A methodology and software for determining rational parameters and materials have been developed for two solutions of timber-concrete composite - with cross-laminated timber (CLT) panels and with plywood rib panels. The rationality criterion- cost factor- based on the cost of the materials per square meter of a slab is used. The reasonable limits for the use of TCC are determined by the developed software. CLT-concrete and plywood-concrete slabs have up to 44 % and 42 % lower cost factor values and 25 % and 33 % lower cross-section height at high vibration quality class compared to the most rational cross-sections of the same constructive solutions, but without a concrete layer. The comparison of the two constructive solutions discussed indicates that the cost factor for plywood-concrete composite slabs is lower than for CLT-concrete slabs, and a lower self-weight load also characterizes this solution. Experimental tests of both variants showed a smaller dispersion of results for timber-concrete composite specimens with plywood rib panels.

The quality control of connection in the timber-concrete composite often is perceived as a limitation for using glued connections in practice. The possibilities of effective use of operational modal analysis - for global evaluation of the structure and ultrasonic testing - for local diagnostics of connections have been tested and determined. The proposed TCC solution involves abandoning traditional steel reinforcement in the concrete layer. The continuous steel reinforcement in the structure, especially in the current situation when the supply of this material to the Latvian market is complex, significantly increases the construction costs. Laboratory experiments have determined a positive effect of adding 0.5 % synthetic fibres to the behaviour of TCC slabs. Adding fibres results in better stress distribution and fragility reduction of the concrete layer. Thanks to the dispersed reinforcement, the integrity of the timber-concrete composite slabs is preserved in case of collapse.

The doctoral thesis consists of general information, five chapters, conclusions, and a list of used literature. The thesis consists of 120 pages, 96 figures, 16 tables and 139 references and is written in Latvian.

# SATURS

Anotācija .....	3
Annotation .....	4
Saturs .....	5
Darba vispārējs raksturojums .....	7
Tēmas aktualitāte.....	7
Darba mērķis .....	8
Darba uzdevumi .....	8
Pētījuma zinātniskā novitāte.....	8
Promocijas darba praktiskais nozīmīgums .....	9
Pētīšanas metodika un izmantotie materiāli .....	10
Pētījuma teorētiskais un metodoloģiskais pamats .....	11
Pētījuma ierobežojumi.....	12
Promocijas darba rezultāti .....	12
Darba aprobācija un publikācijas .....	13
Darba saturs un apjoms .....	15
1.    Koka-betona kompozītu konstrukcijas .....	16
1.1.    Koka-betona kompozīts.....	16
1.2.    Betona veida ietekme uz koka-betona darbību .....	19
1.3.    Koka un betona savienojums kompozītā.....	25
1.3.1.    Kompozīta uzbūve un darbība liecē .....	25
1.3.2.    Savienojumu veidi starp koka un betona slāņiem .....	28
1.3.3.    Adhēzijas savienojumi.....	31
1.4.    Koka-betona kompozīta aprēķina pieejas .....	35
1.4.1.    Vienkāršotas analītiskas aprēķina metodes šķērsriezuma lieces stingumam	35
1.4.2.    Makro struktūras modelēšana aprēķiniem ar galīgo elementu metodi .....	37
1.5.    Nesagraujošās kvalitātes kontroles metodes .....	39
1.6.    Darba mērķis un uzdevumi .....	43
2.    Koka-betona savienojuma kvalitātes ietekme uz konstrukcijas uzvedību.....	44
2.1.    Betona slāņa ietekme uz CLT plātnes darbību.....	44

2.1.1.	CLT un koka-betona deformatīvo īpašību eksperimentālās pārbaudes.....	45
2.1.2.	Koka-betona kompozīta elementa uzvedība pie defekta stingā savienojumā	47
2.2.	Savienojuma defektu ietekme uz koka-betona elementa enerģijas absorbciju ..	50
2.3.	Savienojuma defektu ietekme uz koka-betona elementa dinamiskiem parametriem.....	52
3.	Piedāvātā inovatīvā adhezīvā savienojuma izgatavošanas tehnoloģija .....	54
3.1.	Šķembu metode stinga savienojuma izgatavošanai .....	54
3.2.	Pēc šķembu metodes izgatavotu plātņu pārbaude liecē .....	55
3.3.	Šķembu ietekme uz betona slāņa mehāniskajām īpašībām .....	58
3.4.	Pēc šķembu metodes izgatavotu koka-betona kompozīta paraugu bīdes testi ...	61
4.	Racionāli parametri koka-betona kompozīta plātnēm .....	65
4.1.	Koka-betona kompozīta plātnes konstruktīvi risinājumi .....	65
4.2.	Racionālu parametru noteikšanas metodikas un programmatūras izstrāde .....	67
4.2.1.	Racionalitātes kritērijs kok a-betona kompozīta plātnēm.....	68
4.2.2.	Iespējamo šķērsgriezumu preģenerēšana koka-betona kompozīta plātnēm ...	69
4.2.3.	Koka-betona kompozīta plātnes pārbaudes .....	70
4.2.4.	Programmas datorrisinājuma realizācija .....	76
4.3.	Koka-betona kompozīta plātņu pamatotas izmantošanas robežas .....	79
4.3.1.	Racionālāko CLT un CLT-betona plātņu salīdzinājums .....	79
4.3.2.	Racionālāko saplākšņa un saplākšņa-betona plātņu salīdzinājums .....	81
4.4.	Koka pamatnes veida ietekme uz koka-betona kompozīta plātnes izmaksām...	82
5.	Koka-betona kompozīta konstrukciju drošuma risinājumi.....	88
5.1.	Koka-betona stinga savienojuma nesagraujošā kvalitātes pārbaudes iespējas...	88
5.1.1.	Mazgabarīta paraugu ar un bez defekta savienojumā izgatavošana .....	88
5.1.2.	Operacionālās modālās analīzes laboratorijas testēšanas gaita .....	89
5.1.3.	Koka-betona paraugu atbilžu reakciju uz balto troksni apstrāde.....	92
5.1.4.	Modālajā analīzē iegūto rezultātu novērtējums .....	97
5.2.	Ultraskaņas defektoskopija .....	102
5.3.	Sintētiskā dispersā stieģrojuma ietekme uz koka-betona kompozīta plātnes sabrukuma ainu .....	105
	Secinājumi .....	109
	Literatūras saraksts .....	111

# DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

## Tēmas aktualitāte

Pasaulē ir vērojama cilvēku skaita palielināšanas tendence. Saskaņā ar ASV Tautas skaitīšanas biroja datiem, simts gadu laikā (1950.–2050.), pēc prognozēm, cilvēku skaits palielināsies 3,8 reizes un sasniegs vairāk nekā 9,7 miljardus. Strauji pieaugot cilvēku skaitam, pieaug ilgtspējīgas attīstības principa nozīme – saglabāt nākamajām paaudzēm vidi un dabu vismaz tādā pat kvalitātē, kā to esam saņēmuši mēs. Neatjaunojamo resursu krājumi ar katru gadu samazinās, tāpēc ir svarīgi šos resursus izmantot taupīgi un racionāli ar iespējami lielāku efektivitāti. Šī pieeja attiecas arī uz būvniecības nozari.

Koka-betona kompozīts apvieno betonu – visvairāk izmantojamo cilvēka veidoto būvmateriālu – un koksni – atjaunojamo dabas resursu. Abiem materiāliem piemīt trūkumi un priekšrocības. Savukārt, apvienojot tos un nodrošinot to kopdarbību, ir iespējams samazināt šo materiālu trūkumus un iegūt konstrukciju, kurai ir šo materiālu priekšrocības, piemēram, iegūt konstrukcijas ar zemāku pašvaru un labāku skaņas izolāciju nekā betona konstrukcijām, bet ar lielāku stingumu un nestspēju nekā koka konstrukcijām.

Lietojamības robežstāvoklis plātnēm no koka-betona kompozīta parasti ir noteicošs. Veidojot stingu adhezīvu savienojumu starp kompozīta materiālu slāņiem, var iegūt lielāku šķersgriezuma stingumu un līdz ar to mazākus pārvietojumus, salīdzinot ar konstrukcijām, kuru slāņi ir savienoti padevīgi. Eksistējošas līmēto (adhezīvo) savienojumu izstrādes metodes ir saistītas ar savienojuma sliktas kvalitātes veidošanās riskiem, tāpēc ir aktuāli piedāvāt stinga savienojuma ražošanas tehnoloģiju, kas raksturojas ar savienojuma augstu kvalitāti. Vienlaikus, piedāvājot konstrukciju ar stingu līmētu savienojumu starp materiālu slāņiem, kuru aprēķinos tiek ņemta vērā pilnvērtīga šo slāņu kopdarbība, ir svarīgi piedāvāt arī šo savienojumu nesagraujošo kvalitātes kontroles iespējas – gan konstrukcijas globālai novērtēšanai, gan konstrukciju lokālai pārbaudei.

Betona racionāla izmantošana ir tā izmantošana spiedē. Stiegru izmantošana betona slānī palielina tā biežumu, kas draud ar betona daļas nokļūšanu stiepes spriegumu darbības zonā. Tāpat, nepārtrauktā tērauda stiegrojuma ierīkošana konstrukcijā rada konstrukcijas papildu izmaksas, kas ir īpaši sadārdzinājušās tērauda reģionāla deficīta apstākļos, kas radušies *Covid-19* pandēmijas seku, kā arī karadarbības Ukrainā un īstenotajām sankcijām pret tērauda eksportētājiem dēļ. Tradicionālā tērauda stiegrojuma izmantošana betonā rezultējās arī lielākā CO<sub>2</sub> izmešu daudzumā. Izvairīties no klasiskā stiegrojuma izmantošanas var, izmantojot disperso sintētisko stiegrojumu. Fibras būtiski neietekmē betona stiprību, taču spēj uzlabot betona plastiskumu un saglabāt konstrukcijas integritāti sabrukuma gadījumā.

Pēdējos gados interese pret kompozītām koka-betona konstrukcijām aizvien pieaug, to papildus apstiprina fakts, ka patlaban izstrādes stadijā ir jaunie projektēšanas noteikumi koka-betona kompozīta konstrukcijām. Šo konstrukciju augošā popularitāte rada nepieciešamību pēc iespējas ātrāk noteikt racionālus koka-betona kompozīta plātņu šķersgriezuma parametrus un nepieciešamo materiālu stiprības klases projektēšanas sākumstadijā vai zinātniskās analīzes nolūkos, kas spētu būtiski samazināt resursu patēriņu.

## **Darba mērķis**

Promocijas darba mērķis ir izstrādāt inovatīvas koka-betona kompozīta konstrukcijas ilgtspējīgu un drošu risinājumu, kas raksturojas ar kompozīta materiālu visefektīvāko sinerģiju un racionālu materiālu lietojumu.

## **Darba uzdevumi**

Lai īstenotu darba mērķi, ir noteikti vairāki uzdevumi.

1. Izstrādāt metodi ietekmes novērtēšanai no defektu esamības stingajā adhezīvajā savienojumā starp koksnis un betona materiāla slāņiem uz koka-betona kompozīta plātnes darbību. Identificēt bīstamus defektu izmērus. Eksperimentāli noteikt lielu savienojumu defektu ietekmi uz elementa dinamiskajiem parametriem.
2. Identificēt eksistējošo adhezīvo koka-betona savienojumu izgatavošanas metožu trūkumus. Izstrādāt inovatīvu kvalitatīvu stinga adhezīva savienojuma izgatavošanas metodi. Noteikt piedāvātas izgatavošanas metodes ietekmi uz koka-betona kompozīta elementu darbību liecē un bīdē.
3. Izstrādāt metodiku un uz tās bāzes programmatūru koka-betona kompozīta plātnēm ar pilnu kompozītdarbību starp materiālu slāņiem, kas paredzētas lietošanai dzīvojamā un biroja ēku starpstāvu pārsegumos, racionālu šķērsriezuma parametru un nepieciešamo materiālu stiprības parametru noteikšanai. Izpētīt koka-betona kompozīta pamatotas izmantošanas robežas un noteikt racionālāku koka-betona kompozīta plātnes konstruktīvu risinājumu.
4. Pārbaudīt piedāvātā savienojuma starp kompozīta materiālu slāņiem nesagraujošas kvalitātes kontroles iespējas ar operacionālo modālo analīzi un ultraskaņas defektoskopiju, lai koka-betona kompozīta konstrukciju globālā un lokālā pārbaudē noskaidrotu, vai savienojumā nav defektu.
5. Piedāvāt ilgtspējīgu un drošu koka-betona kompozīta plātnes risinājumu bez tradicionāla nepārtraukta tērauda stieģrojuma izmantošanas betona slānī. Noteikt ietekmi, ko rada sintētiskā dispersā stieģrojuma pievienošana betona sastāvam, uz koka-betona kompozīta plātnes sabrukuma ainu.

## **Pētījuma zinātniskā novitāte**

Darba gaitā izstrādāta jauna kvalitatīva stinga adhezīva savienojuma izgatavošanas metode starp koksnis un betona slāņiem koka-betona kompozīta plātnēm, kas ļauj veidot gan iepriekš rūpnieciski izgatavotas – saliekamas, gan uz vietas lietas konstrukcijas. Piedāvātā tehnoloģija ļauj veikt vizuālo un mehānisko kvalitātes kontroli vēl plātņu izgatavošanas stadijā. Piedāvātā inovatīvā izgatavošanas metode – šķembu metode – nodrošina necīgu attiecību starp iespējamo defektu laukumu un kopējo savienojuma virsmas laukumu, kas ir vienāda ar šķembas skaldnes laukumu.

Darbā izstrādāta metodika un uz tās bāzes – oriģināla programmatūra, ar kuras palīdzību nepieciešamajam laidumam un ēkas lietošanas kategorijai (A vai B) var ātri piemeklēt racionālākus šķērsriezuma parametrus ar priekšlikumiem par izmantojamo materiālu stiprības klasēm, kas apmierinās maksimālo spriegumu, izlieču un elementa vibrāciju prasības, ievērojot abu materiālu šļūdi un betona rukumu, divu veidu koka-betona kompozīta plātņu konstruktīvajiem risinājumiem – ar *CLT* vai ribotu saplākšņa plātņi pamatā.

Ir piedāvāta jauna metodika koka-betona adhezīva savienojuma defektu ietekmes novērtēšanai uz koka-betona plātnes darbību atkarībā no defektu izmēra un daudzuma, balstoties galīgo elementu 3D skaitliskajā modelēšanā. Izstrādāti un validēti galīgajā elementu metodē (GEM) balstīti skaitliskie modeļi uzvedības prognozēšanai elementiem no krusteniski līmētās koksnes (*CLT*) un no koka-betona kompozīta.

Laboratorijas eksperimentos pierādīta operacionālās modālās analīzes izmantošanas efektivitāte konstrukcijas globālajā novērtēšanā un savienojuma starp betona un koka slāņiem kvalitātes kontrolē. Noteiktas ievērojamas izmaiņas svārstību modu formās un frekvenču spektros paraugiem ar un bez defektiem savienojumā. Noteikta nesagraujošās lokālas pārbaudes metodes ar ultraskaņu efektivitāte koka-betona kompozīta savienojumu kvalitātes lokālai pārbaudei, identificējot būtiskas atšķirības ultraskaņas signāla cauriešanā koka-betona kompozīta paraugiem ar un bez defektiem savienojumā.

Eksperimentu gaitā atklāts, ka, betona sastāvam pievienojot 0,5 % polipropilēna fibru, kuru garuma un diametra attiecība ir 90, rodas pozitīvs efekts, kas paaugstina konstrukcijas drošumu. Dispersais stiegrojums samazina spiestajā zonā esošā betona slāņa trauslumu, plaisu atvērumus un nodrošina betona slāņa integritātes saglabāšanu koka-betona kompozīta konstrukcijas sabrukuma gadījumā.

## **Promocijas darba praktiskais nozīmīgums**

Izstrādātā jaunā realizācijas metode savienojumam starp koksnes un betona slāņiem ļauj nodrošināt kvalitatīvu stingu savienojumu un pilnu kompozītdarbību elementiem no koka-betona kompozīta, kas nozīmē efektīvāku materiālu izmantošanu. Koksnes un betona sinerģija rada ilgtspējīgu konstruktīvu risinājumu jaunajām ēkām, kā arī dod iespēju veikt pārsegumu atjaunošanas darbus vēsturiskajās ēkās.

Atteikšanās no klasiskā nepārtrauktā tērauda stiegrojuma par labu dispersajam stiegrojumam no sintētiskajiem materiāliem dod iespēju iegūt videi draudzīgāku konstrukcijas risinājumu, vienlaikus saglabājot konstrukcijas drošumu.

Izstrādātā metodika un uz tās bāzes – programmatūra koka-betona kompozīta plātņu racionālu parametru noteikšanai, ļauj ievērojami samazināt resursu patēriņu sākotnējā projektēšanas posmā, kura laikā ir jāizvēlas izmantotās konstrukcijas parametri un materiāli, kā arī dod iespēju veikt zinātnisku analīzi vairākiem grīdas plātņu konstruktīvajiem risinājumiem.

Fiksētās izmaiņas svārstību modu formās un atbilžu reakcijās frekvenču domēnā, ko izraisa defektu esamība koka-betona savienojumā, pamato operacionālās modālās analīzes izmantošanas lietderīgumu savienojuma kvalitātes kontrolē un ir pamats turpmākiem



pētījumiem šajā virzienā. Iegūtais ultraskaņas signāla maksimālās relatīvās amplitūdas daudzkārtējais samazinājums savienojuma defekta dēļ ļauj secināt, ka ultraskaņas defektoskopiju var efektīvi izmantot koka-betona kompozīta elementu defektu savienojuma lokālai diagnostikai.

## Pētīšanas metodika un izmantotie materiāli

Koka-betona kompozīta elementu aprēķiniem ir izmantota galīgo elementu metode un vienkāršotā analītiskā aprēķinu metode, kas balstās reducētā šķērsriezuma un saliktas koka sijas jeb gammas metodēs, ievērojot pilnu kompozīta darbību.

Skaitliskie aprēķini, kas balstās galīgajā elementu metodē, veikti *Dlubal RFEM 5.24* datorprogrammā. Skaitlisko modeļu izstrādei izmantoti cieta ķermeņa galīgie elementi. Konstruktijas elementi no kokmateriāliem ir modelēti, izmantojot 3D ortotropu elastīga materiāla modeli. Koka-betona kompozīta konstrukciju aprēķinos, kas ievēro betona nelineāro uzvedību, betona slāņa modelēšanai ir izmantots 3D izotropas Mazāra bojājumu materiāla modelis, kas iestrādāts *Dlubal RFEM 5.24* datorprogrammā [1]. 3D izotropas Mazāra bojājumu materiāla modelis dod iespēju definēt materiāla nelineāro spriegumu-deformāciju līkni, tādējādi ievērojot materiāla elastības moduļa degradāciju betona plaisāšanas laikā. Pilnas kompozītdarbības modelēšanai kontakts starp koka un betona slāņiem ir definēts ar pilnu spēku pārnesei. Defektu koka-betona savienojumā modelēšanai – bez spēku pārnesei. Ir izmantots taisnstūra galīgo elementu režģis ar galīga elementa izmēru 0,01–0,02 m, slodze tiek pielikta pakāpeniski, 100 soļos. Skaitliskie modeļi ir validēti krusteniski līmētas koksnes plātnēm un koka-betona kompozīta plātnēm.

Darba gaitā veikti vairāki laboratorijas eksperimenti. Laboratorijas eksperimentos izmantotas trīs dažādas koka-betona kompozīta paraugu izgatavošanas metodes: sausā, kas paredz iepriekš izgatavotas betona plāksnes salīmēšanu ar koka plātņi; mitrā, kas paredz svaiga betona ieliešanu uz svaigi ieklātu koka plātnei līmes kārtu; darbā izstrādātā šķembu metode, kas paredz granīta šķembu pielīmēšanu koka plātnei un pēc līmes nožūšanas svaiga betona ieliešanu.

Darbā veikti: pēc mitrās un pēc šķembu metodes izgatavotu koka-betona kompozīta paraugu bīdes testi; operacionālā modālā analīze koka-betona kompozīta paraugiem ar un bez defekta savienojumā; ultraskaņas defektoskopija koka-betona kompozīta paraugiem; trīspunktu lieces testi:

- plātnēm ar laidumu 1,8 m no *CLT* un no pēc sausās vai pēc šķembu metodes izgatavota koka-betona kompozīta ar *CLT* pamatā;
- plātnēm ar laidumu 1,2 m no pēc šķembu metodes izgatavota koka-betona kompozīta ar *CLT* vai ar ribotam saplākšņa plātnēm pamatā ar un bez fibrām betonā;
- paraugiem ar laidumu 0,3 m no koka-betona kompozīta ar koka dēļiem pamatā pie trim dažādām šķembu frakcijām.

Eksperimentos izmantotie materiāli: *C24* klases koka dēļi; rūpnieciski ražotas *CLT* un ribotas saplākšņa plātnes; betona slāņi veidoti no *Sakret BAM* maisījuma; kā fibras izmantotas

*PP Strux 90/40*; granīta šķembas ar frakcijām 2–5 mm, 5–8 mm, 8–16 mm, 16–25 mm; epoksīda līmes *Sikadur 330, 30* un *3ICF*.

Operacionālā modālā analīze ir veikta, iedarbojoties uz koka-betona kompozīta paraugu sēriju ar balto troksni un ar *QuickDAQ* datorprogrammas palīdzību ierakstot paraugu atbilžu reakcijas laika domēnā. Iegūtie dati laika domēnā ir apstrādāti *ARTEMIS* programmā, ar kuras starpniecību iegūti paraugu atbilžu reakcijas frekvenču domēnā un noteikti paraugu dinamiskie parametri ar divām atšķirīgām metodēm – frekvenču domēna sadalīšanas un stohastiskās apakštelpas identificēšanas tehnikām. Mazgabarītu koka-betona kompozīta paraugu ar iestrādāto defektu savienojumā skenēšanai ar ultraskaņu izmantota Rīgas Tehniskajā universitātē izstrādātā eksperimentālā ultraskaņas ierīce un programmatūra, ar kuras palīdzību ir iegūti caurejošā ultraskaņas signāla relatīvās amplitūdas ieraksti koka-betona kompozīta paraugiem ar un bez defekta savienojumā.

Darbgaitā izstrādāta koka-betona kompozīta plātņu racionālu parametru noteikšanas metodika un uz tās bāzes – programmatūra divu veidu koka-betona kompozīta plātņu konstruktīvajiem risinājumiem – ar krusteniski līmētas koksnes plātni pamatā un ar ribota saplākšņa plātni pamatā. Datorprogrammas realizācijai izmantota programmēšanas valoda *Hypertext Preprocessor* jeb saīsināti *PHP 8.1.*, kas darbojas uz *Apache* servera. Programmēšanas valodas izvēle saistīta ar iespēju perspektīvā aprēķinus veikt tiešsaistē. Lai optimizētu ar datorprogrammas palīdzību iegūto datu turpmāko lietošanu un apstrādi dažādos griezumos, izmantota *MySQL* datubāze. Darbā ieviests jauns racionalitātes kritērijs – izmaksu koeficients, kas raksturo 1 m<sup>2</sup> plātnes materiālu izmaksas. Izstrādātā metodika, kas ir implementēta programmatūrā, dod iespēju noteikt racionālākus betona un krusteniski līmētas koksnes vai saplākšņa un koka ribu slāņu biežumus, ievērojot tehnoloģiskās prasības un sortimentus, kā arī koksnes un betona stiprības klases. Koka-betona kompozīta plātņu aprēķins balstās būvmehānikas un dinamikas pamatprincipos un tiek veikts atbilstoši nestspējas un lietojamības robežstāvoklim, ievērojot pārseguma vibrācijas, betona rukumu, kā arī betona un kokmateriālu šļūdi A un B kategorijas ēkām.

## **Pētījuma teorētiskais un metodoloģiskais pamats**

Darbā izmantotas šādas inženierzinātņu jomas:

- būvmehānika;
- slāņaino kompozītu materiālu mehānika;
- koksnes zinātne;
- betona zinātne;
- būvkonstrukcijas;
- konstrukciju optimizācija;
- dinamika;
- modāla analīze;
- akustika.

## Pētījuma ierobežojumi

Darbā koksnes makro struktūra tiek modelēta kā ortotrops materiāls, betons – kā izotropas. Pētījums veikts pārseguma plātnēm no koka-betona kompozīta, kas strādā vienā virzienā un ir brīvi balstītas. Slodze koka-betona kompozīta plātnēm tiek pielikta ne ātrāk kā 28 dienas pēc betona slāņa ieliešanas. Lieces un bīdes laboratorijas testi darba gaitā veikti uz īslaicīgu slodzi. Koka-betona kompozīta plātne tiek projektēta ar nosacījumu, ka betona slānis tiek pakļauts tikai spiedes spriegumiem. Betona stiprība stiepē tiek pilnīgi ignorēta. Aprēķinos tiek ņemti vērā krusteniski līmētas koksnes transversālie slāņi.

Izstrādātais algoritms koka-betona kompozīta plātņu racionālu parametru noteikšanai ir spēkā nemainīgos klimatiskos apstākļos A un B kategorijas ēku pārsegumiem pie aprēķinā izmantojamajām slodžu kombinācijām:

- fundamentālajai slodzes kombinācijai ar materiālu elastības moduļu vidējām vērtībām;
- summai no kvazi pastāvīgas slodžu kombinācijas kopā ar fiktīvu slodzi no betona rukuma pie materiālu efektīvajām elastības moduļu vērtībām, kas izvērtē materiālu šļūdi, un īslaicīgas lietderīgas slodzes pie materiālu elastības moduļu vidējām vērtībām.

Pamatojoties uz koka-betona kompozīta plātņu laiduma-šķērsgriezuma augstuma lielu attiecību – ap 30, šķērsdeformācijas analītiskajos aprēķinos tiek ignorētas. Koka-betona kompozīta plātņu pamatotas izmantošanas robežu noteikšanai un divu konstruktīvu risinājumu savstarpējam salīdzinājumam par grīdas kopējo platumu, kas tiek izmantots vibrāciju aprēķinos, ir pieņemti 5 m.

## Promocijas darba rezultāti

1. Izstrādāts un eksperimentāli pārbaudīts inovatīvas koka-betona kompozīta konstrukcijas ilgtspējīgs risinājums, kas paredz betona slāņa darbību tikai spiestajā zonā, ar disperso stieģojumu no sintētiskajiem materiāliem betona slānī un ar stingu savienojumu starp koka un betona slāņiem.
2. Inovatīvā stinga adhezīvā savienojuma starp betona un koksnes slāņiem izgatavošanas metode, kas balstās granīta šķembu izmantošanā līmētā savienojumā.
3. Izstrādātā koka-betona kompozīta plātņu racionālu parametru noteikšanas metodika konstrukcijām ar laidumu līdz 10 m.
4. Ekonomiskais pamatojums izmantošanas lietderīgumam diviem koka-betona kompozīta plātņu konstruktīvajiem risinājumiem un izdevīgākais koka-betona kompozīta plātnes veids.
5. Piedāvātā metode defektu adhezīvā savienojumā starp betona un koksnes slāņiem ietekmes novērtēšanai uz koka-betona kompozīta plātņu darbību.
6. Operacionālās modālās analīzes efektīva lietojuma iespējamība koka-betona konstrukciju globālajam novērtējumam. Ultraskaņas defektoskopijas lietderīgums savienojuma kvalitātes nesagraujošā lokālā pārbaudē.

## Darba aprobācija un publikācijas

Promocijas darba rezultāti ziņoti un apspriesti 11 starptautiskajās konferencēs. Galvenie darba rezultāti izklāstīti 12 zinātniskajās publikācijās, kas ir indeksētas *WoS / Scopus* datubāzēs, un divos zinātnisko konferenču tēžu krājumos. Divas publikācijas ir iesniegtas redakcijā. Citēto publikāciju skaits – 11, citētas 99 reizes. Autores Hirša indekss ir 6,0.

### **Zinātniskie raksti zinātniskajos žurnālos, kas indeksēti *WoS / Scopus***

1. Buka-Vaivade K., Serdjuks D., Pakrastins L. Cost Factor Analysis for Timber–Concrete Composite with a Lightweight Plywood Rib Floor Panel. *Buildings* 2022, 12, 761. <https://doi.org/10.3390/buildings12060761>.
2. Vasiljevs R., Serdjuks D., Buka-Vaivade K., Podkoritovs A., Vatin N. Load-Carrying Capacity of Timber-Concrete Composite Panels. *Magazine of Civil Engineering*, 2020, No. 1, pp.60-70. doi:10.18720/MCE.93.6.
3. Gravit M., Serdjuks D., Bardin A., Prusakov V., Buka-Vaivade K. Fire Design Methods for Structures with Timber Framework. *Magazine of Civil Engineering*, 2019, Vol. 85, No. 1, pp.92-106. doi:10.18720/MCE.85.8.
4. Buka-Vaivade K., Šliseris J., Serdjuks D., Pakrastiņš L., Vatin N. Rational Use of HPSFRC in Multi-Storey Building. *Magazine of Civil Engineering*, 2018, Vol. 84, No. 8, pp.3-14. doi:10.18720/MCE.84.1.
5. Buka-Vaivade K., Serdjuks D., Goremikins V., Pakrastiņš L., Vatin N. Suspension Structure with Cross-Laminated Timber Deck Panels. *Magazine of Civil Engineering*, 2018, Vol. 7, pp. 126–135. doi:10.18720/MCE.83.12.

### **Zinātniskie raksti konferenču ziņojumu izdevumos, kas indeksēti *WoS / Scopus***

1. Buka-Vaivade K., Serdjuks D. Behaviour of timber-concrete composite with defects in adhesive connection. In: *Procedia Structural Integrity ICSI 2021 The 4th International Conference on Structural Integrity*, Funchal, Madeira, Portugal, 30 August–2 September 2021. 2022, pp. 563–569. doi: 10.1016/j.prostr.2022.01.123.
2. Buka-Vaivade K., Serdjuks D., Šliseris J., Podkoritovs A., Ozolins R. Timber-concrete composite ribbed slabs with high-performance fibre-concrete. In: *Environment. Technology. Resources: Proceedings of the 13th International Scientific and Practical Conference*, Latvia, Rezekne, 17–18 June 2021. 2021, pp. 40–44. doi: 10.17770/etr2021vol3.6551.
3. Buka-Vaivade K., Serdjuks D., Podkoritovs A., Pakrastins L., Mironovs V. Rigid connection with granite chips in the timber-concrete composite. In: *Environment. Technology. Resources: Proceedings of the 13th International Scientific and Practical Conference*, Latvia, Rezekne, 17–18 June 2021. 2021, pp. 36–39. doi: 10.17770/etr2021vol3.6552.
4. Skins A., Serdjuks D., Buka-Vaivade K., Goremikins V., Mohamed A.Y. Steel and composite tapes in timber to concrete joint. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 2021, 141, pp. 68–79.

5. Buka-Vaivade K., Šliseris J., Serdjuks D., Šahmenko G., Pakrastiņš, L. Numerical Comparison of HPFRC and HPC Ribbed Slabs. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol.660: 4th International Conference on Innovative Materials, Structures and Technologies (IMST 2019), Latvia, Riga, 25–27 September 2019. Article number: 012054. doi:10.1088/1757-899X/660/1/012054.
6. Vasiļjevs R., Serdjuks D., Gerasimova J., Buka-Vaivade K., Erüz A. Behaviour of Timber-Concrete Joints in Hybrid Members Subjected to Flexure. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol.660: 4th International Conference on Innovative Materials, Structures and Technologies (IMST 2019), Latvia, Riga, 25–27 September 2019. Article number: 012050. doi:10.1088/1757-899X/660/1/012050.
7. Buka-Vaivade K., Serdjuks D., Goremikins V., Vilguts A. and Pakrastins L. 2017. Experimental verification of design procedure for elements from cross-laminated timber. *Procedia Engineering* 172: 1212-1219.

#### **Publikācijas zinātnisko konferenču tēžu krājumos**

1. Buka-Vaivade K., Serdjuks D., Pakrastins L. and Dumina J., A safer rigid connection solution for timber-concrete composite. In: Forum Wood Building Baltic 2022, Latvia, Riga, 9–11 May 2022. 2022, iesniegta publicēšanai.
2. Buka-Vaivade K., Serdjuks D., Vasiļjevs R., Gerasimova J., Pakrastins L. and Mierins I., Behaviours of timber-concrete composite members. In: Forum Wood Building Baltic 2021, Latvia, Riga, 14–16 April 2021. 2021, pp. 74–75.

#### **Iesniegtie zinātniskie raksti**

1. Buka-Vaivade K., Serdjuks D., Pakrastins L. and Dumina J., Non-destructive quality control of the adhesive rigid timber-to-concrete connection in TCC structures. *Buildings*.
2. Buka-Vaivade K., Serdjuks D., Zvirina D. and Pakrastins L., Experimental analysis of timber-concrete composite behaviour with synthetic fibres. In: *Journal of Physics: Conference Series – IOPscience (IMST 2022)*.

#### **Promocijas darba rezultāti ir ziņoti un apspriesti 11 zinātniskajās konferencēs.**

1. Buka-Vaivade K., Serdjuks D., Pakrastins L. and Dumina J. A safer rigid connection solution for timber-concrete composite. FWBB 2022, Riga, Latvia, 9–11 May 2022.
2. Buka-Vaivade K. Providing quality rigid connection in timber-concrete composite material. RTU 62<sup>nd</sup> International Scientific Conference, Riga, Latvia, October 28, 2021.
3. Buka-Vaivade K., Serdjuks D. Behaviour of timber-concrete composite with defects in adhesive connection. The 4th International Conference on Structural Integrity, Funchal, Madeira, Portugal, 30 August–2 September 2021.
4. Buka-Vaivade K., Serdjuks D., Šliseris J., Podkoritovs A., Ozolins R. Timber-concrete composite ribbed slabs with high-performance fibre-concrete. 13th International Scientific and Practical Conference, Environment. Technology. Resources, Rezekne, Latvia, 17–18 June 2021.
5. Buka-Vaivade K., Serdjuks D., Podkoritovs A., Pakrastins L., Mironovs V. Rigid connection with granite chips in the timber-concrete composite. 13th International

- Scientific and Practical Conference, Environment. Technology. Resources, Rezekne, Latvia, 17–18 June 2021.
6. Buka-Vaivade K., Serdjuks D., Vasiljevs R., Gerasimova J., Pakrastins L. and Mierins I. Behaviours of timber-concrete composite members. FWBB 2021, Riga, Latvia, 14–16 April 2021.
  7. Buka-Vaivade K., Sliseris J., Serdjuks D., Sahmenko G., Pakrastins L. Numerical comparison of HPFRC and HPC ribbed slabs. 4rd International Conference Innovative Materials, Structures and Technologies, Riga, Latvia, 25–27 September 2019.
  8. Vasiljevs R., Serdjuks D., Gerasimova J., Buka-Vaivade K., Orhun Erüz A. Behaviour of Timber-Concrete Joints in Hybrid Members Subjected to Flexure. 4rd International Conference IMST, Riga, Latvia, 25–27 September 2019.
  9. Buka-Vaivade K., Sliseris J., Serdjuks D. Numerical estimation of rational application of high-performance steel fibre reinforced concrete in multi-storey building. RTU 59<sup>th</sup> International Scientific Conference, Riga, Latvia, October 10, 2018.
  10. Buka-Vaivade K., Serdjuks D., Goremikins V. Innovative suspended structure with cross-laminated timber deck. RTU 58th International Scientific Conference, Riga, Latvia, October 13, 2017.
  11. Buka-Vaivade K., Serdjuks D., Goremikins V., Vilguts A., Pakrastins L. Experimental verification of design procedure for elements from cross-laminated timber. 12<sup>th</sup> International Conference “Modern Building Materials, Structures and Techniques”, Vilnius, Lithuania, 26–27 May 2016.

## **Darba saturs un apjoms**

Promocijas darbs ietver anotāciju, darba vispārējo raksturojumu, piecas galvenās nodaļas, secinājumus un izmantotās literatūras sarakstu. Darba apjoms – 120 lappuses, 96 attēli, 16 tabulas un 139 literatūras avoti.

Pirmajā nodaļā dots esošo pētījumu apkopojums un analīze, precizēts darba mērķis un uzdevumi. Otrajā nodaļā piedāvāta defektu adhezīvajā savienojumā starp koka un betona slāņiem ietekmes uz konstrukciju uzvedību novērtēšanas metodika. Ar laboratorijas eksperimentu palīdzību noteikta defektu ietekme uz konstrukcijas deformatīvajām īpašībām un dinamiskajiem parametriem. Trešajā nodaļā izstrādātā kvalitatīva stinga koka-betona savienojuma izgatavošanas metode. Veikti laboratorijas lieces un bīdes testi pēc piedāvātas metodes un pēc iepriekš eksistējošajām metodēm izgatavotajiem paraugiem. Ceturtajā nodaļā piedāvāta koka-betona kompozīta konstrukciju racionālo parametru noteikšanas metodika un uz tās bāzes ir izstrādāta programmatūra. Veikta koka-betona kompozīta plātņu pamatotas lietošanas robežu noteikšana un ekonomiski izdevīgākā konstruktīva risinājuma noteikšana. Piektajā nodaļā piedāvāti ar koka-betona konstrukciju drošuma jautājumiem saistītie risinājumi. Veikta operacionālas modālas analīzes un ultraskaņas defektoskopijas eksperimentālā aprobācija šo metožu lietošanai koka-betona kompozīta konstrukciju savienojumu kvalitātes kontrolei. Veikti eksperimentālie pētījumi koka-betona kompozīta konstrukciju drošāka sabrukuma nodrošināšanai ar dispersa sintētiska stiegrojuma izmantošanu. Promocijas darba noslēgumā apkopoti galvenie secinājumi.



# 1. KOKA-BETONA KOMPOZĪTU KONSTRUKCIJAS

## 1.1. Koka-betona kompozīts

Strauji pieaugot kopējam pasaules iedzīvotāju skaitam, ilgtspējīgas attīstības princips kļūst arvien svarīgāks. Tāpēc ir īpaši aktuāla problēma, kā vislabāk izmantot ierobežotos neatjaunojamus resursus un palielināt atjaunojamo dabas resursu izmantošanu, lai apmierinātu neierobežotas cilvēku vēlmes. Kompozītu izmantošana būvniecībā ir viena no iespējām, kā nodrošināt resursu efektīvāku izmantošanu.

Par kompozītu konstrukcijām sauc konstrukcijas, kuras tiek izgatavotas vismaz no diviem, pēc īpašībām dažādiem, materiāliem, ar mērķi uzlabot gala konstrukcijas mehāniskās īpašības. Kompozīta mehānisko īpašību uzlabošana tiek panākta, apvienojot katra no materiāla labākas īpašības, tādā veidā kompensējot materiāla trūkumus. Kompozītos kombinējamie materiāli mikroskopiskā līmenī paliek savstarpēji atdalīti, bet saites starp materiāliem tiek veidotas makroskopiskajā līmenī.

Viena no lielākajām Latvijas zemes bagātībām, dabas resursu ziņā, ir mežs, kas ir Latvijas pamata ekosistēma. Uz 2018. gadu mežs Latvijā aizņem 52 % no valsts sauszemes teritorijas. Tas veidojas dabiski, aizņemot arī tās teritorijas, ko ilgāku laiku neskar cilvēka darbība, tāpēc laika gaitā mežu platība palielinās. Mežu daudzums Latvijā, kā arī fakts, ka mežs ir atjaunojams dabas resurss, rada ievērojamo priekšrocību, lai būvniecībā izvēlētos kokmateriālus. Savukārt, betons ir visbiežāk un visplašāk mūsdienās izmantojamais mākslīgais celtniecības materiāls. Koka un betona kompozītu konstrukcijas var apmierināt augošu pieprasījumu pēc ilgtspējīgām konstrukcijām. Tipiskais koka-betona kompozīta izmantošanas veids ir elementos, kas strādā liecē, vertikālas slodzes no augšas uzņemšanai. Parasti, betona slānis tiek uzstādīts spiestajā zonā, bet kokmateriāli – stieptajā zonā (attēls 1.1.).

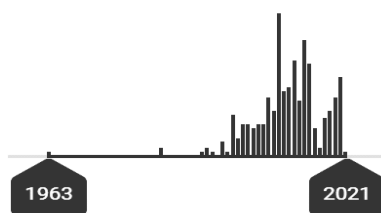


1.1. att. Koka-betona kompozīta plātne.

Konstrukciju veidošana no koka-betona ir salīdzinoši jauna tehnoloģija. Pirmās koka-betona kompozītu konstrukcijas tika izstrādātas jau 20. gadsimta sākumā, un bija saistītas, galvenokārt, ar tērauda trūkumu betona stiegrošanai [2]. Eiropā 1922. gadā Pauls Millers (*Paul Müller*) saņēma pirmo patentu par naglu un tērauda stiprinājumu sistēmu, kas veido savienojumu starp betona plātni un kokmateriālu [3]. Bet nopietni pētījumi Eiropā sākās tikai pēc 20. gadsimta 60. gadiem. Pēc pirmajiem mēģinājumiem ar kokbetonu ietaupīt tēraudu betona stiegrošanai, koka-betona tehnoloģiju sāka pielietot arī veco vēsturisko ēku koka grīdu atjaunošanai. Šī tehnoloģija pierādīja savu efektivitāti koka grīdas uzvedības uzlabošanā

vēsturiskajās ēkās, kur būtiski bija saglabāt autentiskus griestus, jo atjaunošanas darbus varēja veikt tikai no starpstāvu pārseguma augšpusēs [4].

Gan koka-betona kompozīta laika gaitā izpētītas priekšrocības, gan dabas resursu ierobežotība palielina interesi par kokbetonu. Mūsdienās to izmanto gan jaunu ēku būvniecībā, gan arī tiltu būvniecībā [5, 6]. Attēlā 1.2. ir apkopota informācija par 364 pētījumiem, kas ietver atslēgvārdus “timber concrete composite” sadalījumu pa gadiem, laika periodam no 1963. gada līdz 2021. gada sākumam, kas ir pieejami zinātniekiem paredzētajā vietnē *academia.edu*. Kā var redzēt no grafika, interese par koka-betona konstrukcijām sāka pastāvīgi augt 21. gadsimtā. No 2007. līdz 2014. gadam sasniedzot pīķi pētījumu daudzumā. Pēc pāris gadu pārtraukuma, interese par šo tēmu atkal strauji pieaug. No 2017. gada līdz 2020. gadam pētījumu daudzums tikai palielinās un sastāda jau ap 18 % no visiem pētījumiem.

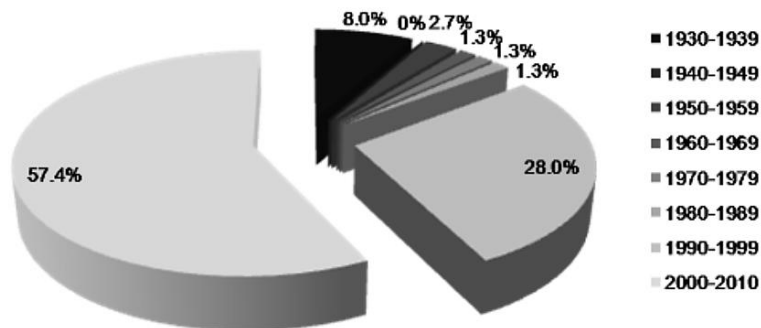


1.2.att. Koka-betona kompozītu pētījumu sadalījums pa gadiem saskaņā ar *academia.edu*.

Viens no tradicionālajiem koksnes izmantošanas veidiem bija tiltu būvniecība. Bet ar tērauda un betona ienākšanu civilajā celtniecībā, koka tiltu būvniecības popularitāte samazinājās, pamatojot to ar zemu koksnes stingumu un izturību. Koka-betona kompozīts kļuva par efektīvu risinājumu šai problēmai. Betona slānis pasargā koka elementus no tieša kontakta ar ūdeni un citām mehāniskajām iedarbībām. Kokmateriāla kombinācija ar betonu, kas ir stingāks materiāls ar lielu spiedes stiprību, ievērojami palielina nestspēju, konstrukcijas kopējo stingumu un izturību pret apkārtējās vides iedarbību, līdz ar to arī konstrukcijas kalpošanas laiku [6, 7]. Pie tam, kokbetons, salīdzinājumā ar betonu, spēj veidot ilgtspējīgākas konstrukcijas, jo izmanto atjaunojamus dabas resursus, ir saistīts ar zemākām oglekļa emisijām un tā ražošanai ir nepieciešams neliels enerģijas daudzums [8, 9]. Koksne kā konstruktīvais materiāls apvieno sevī lielu lieces stiprību ar mazu svaru, kas veido būtisku priekšrocību salīdzinājumā ar citiem konstruktīvajiem materiāliem. Koka-betona tiltu projektēšanā ir svarīgi ievērot mitruma un temperatūras izmaiņu ietekmi uz konstrukcijas izlieci. Saskaņā ar esošiem pētījumiem [10], koka-betona konstrukcijām ar biežajiem betona slāņiem vai stingajiem savienojumiem starp slāņiem, izliece ir tieši atkarīga no temperatūras un apkārtējās vides relatīvā mitruma izmaiņām. Pie tam, koka-betona konstrukcijām ar mazākiem koka šķērsriezumiem izlieces izmaiņas līknes ir līdzīgas mitruma izmaiņu līknēm, bet koka-betona konstrukcijas ar masīviem koksnes šķērsriezumiem, mazāk reaģē uz apkārtējās vides mitruma svārstībām.

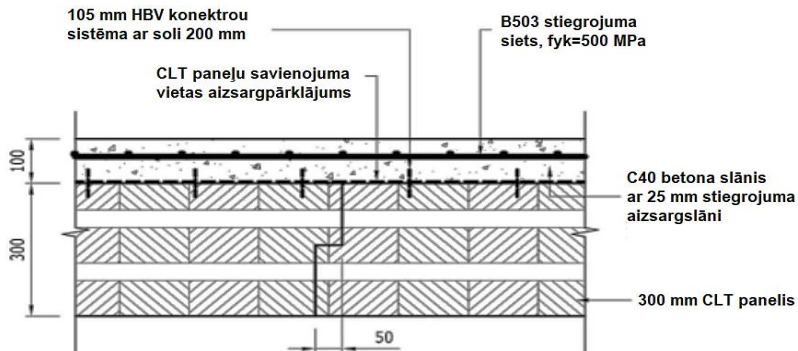
Kopš 1990. gadiem koka-betona izmantošana tiltu būvniecībā ievērojami palielinājās. Jau uz 2012. gadu pasaulē bija uzbūvēti vairāk nekā 100 tilti, kuru konstrukcijām tika izmantots kokbetons, pie tam, kā var redzēt attēlā 1.3., vairāk par pusi no tiem bija uzbūvēti

21. gadsimta pirmajos 10 gados. Šis pieaugums ir izskaidrojams ar koka-betona izmaksu konkurētspēju, draudzīgumu videi un tehnoloģiskajām inovācijām. Koka-betona kompozīta konstrukcijas spēj apmierināt sabiedrības vajadzības pēc lētiem un ilgtspējīgiem inovatīviem risinājumiem [6].



1.3. att. Koka-betona tiltu sadalījums pēc to uzbūves datuma [6].

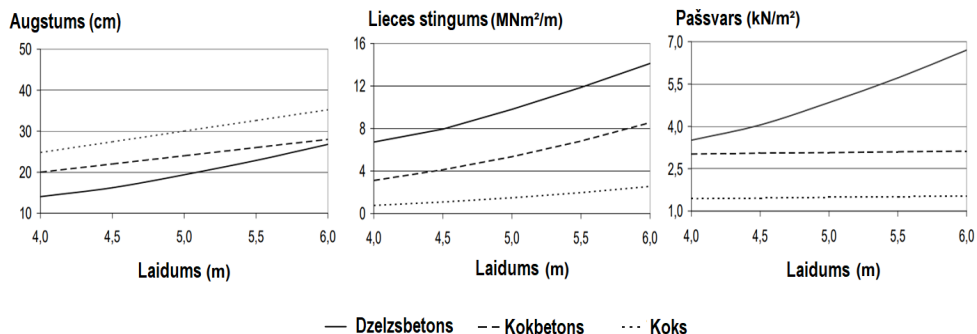
Parasti kokbetonu pielieto tiltiem ar maziem vai vidējiem laidumiem. Bet, apvienojot tradicionālus koka tiltu risinājumus ar jaunajiem koka-betona risinājumiem, bija uzbūvēts viens no garākajiem koka tiltiem – Vihantasalmi tilts Somijā 1999. gadā. Tilta kopējais garums ir 182 metri, ko veido trīs centrālie laidumi no līmētā koka kopnēm, katrs pa 42 metriem, un gala laidumi no koka-betona kompozīta, katrs 21 metru garš [7].



1.4. att. Nesošā starpstāvu pārseguma konstrukcija [7].

Koka-betona kompozīts mūsdienās tiek plaši izmantots gan jauno grīdu projektēšanā, gan arī esošo koka grīdu atjaunošanai. Apvienojot divus materiālus – koksni un betonu, var uzlabot dažādus koka grīdu klasiskus trūkumus, piemēram, dinamisko reakciju, lieces stingumu, nestspēju, skaņas izolāciju [11], konstrukcijas ugunsdrošību – šķērsgriezuma efektīvais laukums palielinās, jo uguns iedarbība uz koka konstrukciju ir iespējama tikai no vienas puses [12], pētījumi parāda, ka koka-betona ugunsizturība ir no 60 līdz 90 minūtēm [13], seismisko veiktspēju [14] un siltuma masu. Koka-betona grīdas ļauj panākt tādas konstrukcijas dinamiskus parametrus, kas nodrošina to drošu ekspluatāciju ritmiskajām aktivitātēm. Veidojot starpstāvu pārseguma konstrukciju no 300 mm biežajām šķērsvirzienā

kārtaini līmēta masīvkoka plātnēm (turpmāk tekstā CLT jeb *cross-laminated timber*) un 100 mm biezas betona virskārtas, ir iespējams panākt 3.5 reizes stingāku konstrukciju, 2 reizes lielāku modālo masu un augstāku pašsvārstību frekvenci nekā tikai CLT konstrukcijai, tādā veidā samazinot konstrukcijas reakciju uz tai pielikto ritmisko slodzi, novēršot rezonanses iespējamību [7]. Aprēķini ir veikti 1.4. attēlā redzamajam pārseguma risinājumam.



1.5. att. Trīs dažādu starpstāvu pārseguma sistēmu salīdzinājums pēc nepieciešama biezuma, lieces stinguma un pašsvara [4].

Tai pašā laikā koka-betona grīdas ļauj ievērojami samazināt pārseguma konstrukciju pašsvaru, salīdzinot ar dzelzsbetona pārsegumiem, līdz ar to arī citu vertikālu konstrukciju un pamatu izmērus. Papildus tam, samazinoties izmantojamā betona daudzumam, paātrinās būvniecības process un samazinās izmaksas, kas saistītas ar betona transportēšanu. Saskaņā ar esošajiem pētījumiem [4], palielinoties pārseguma konstrukcijas laidumam līdz 6 metriem, nepieciešamais pārseguma biezums konstrukcijām no koka-betona un no dzelzsbetona ir gandrīz vienāds, bet pašsvara slodze, ko rada koka-betona konstrukcija ir vairāk nekā par pusi zemāka nekā konstrukcijai no dzelzsbetona. Līdz ar to, pamatojoties uz attēlu 1.5. var secināt, ka koka-betona pārseguma konstrukcijas ir efektīva alternatīva klasiskajiem pārseguma risinājumiem no dzelzsbetona.

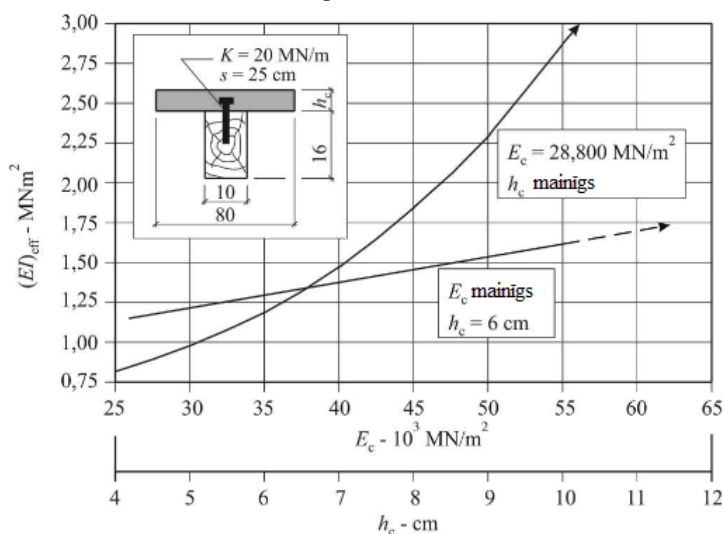
Ir sastopami arī pētījumi ar mazāk tradicionāliem risinājumiem [15, 16]. Piemēram, koka-betona kompozīta efektīva izmantošana konstrukcijās, kas galvenokārt ir pakļautas ass spēkiem, ar mērķi paplašināt koksnes izmantošanu betonā; un hibrīdās sijas risinājumi, kuros koks tiek savienots kompozītā ar īpaši augstas stiprības fibrobetonu, veidojot betona slāni ne tikai augšpusē, bet arī šķērsriezuma apakšā.

## 1.2. Betona veida ietekme uz koka-betona darbību

Koka-betona konstrukcijās betona slānim ir jāuzņem spriegumus, kas rodas no šķērsspēkiem un lieces momentiem. Papildus tam, sekundārus spriegumus izraisa: slodze, kas izkliedējās pa betona slāni no pretbīdes savienotājlīdzekļiem; un slodze, kas veidojas no kokmateriālu un betona rukuma [17].

Lielākā daļa no pētījumiem par koka-betona kompozītu ir veikti kompozītam, kas sastāv no parastā betona slāņa un masīva / līmētā koka sijām vai plātnēm, kas savstarpēji savienoti ar dažāda veida pretbīdes savienotājlīdzekļiem. Tomēr eksistē arī daži pētījumi, kur tiek pētīta cita veida betona un koksnes materiāla iespējamā lietderība.

Eksistē pētījumi par vieglbetona, betonu ar dažādām piedevām, augstās stiprības betona un fibrobeta izmantošanu koka-betona kompozītam. Attēlā 1.6. ir parādīta betona slāņa augstuma un betona elastības moduļa ietekme uz koka-betona stingumu. Kā var redzēt no grafika, samazinoties betona elastības moduļim, samazinās arī koka-betona kopējais lieces stingums, kas noved pie lielākām konstrukcijas izliecēm, ko apstiprina pētījumi par vieglbetona izmantošanu koka-betona kompozītam [18, 19].



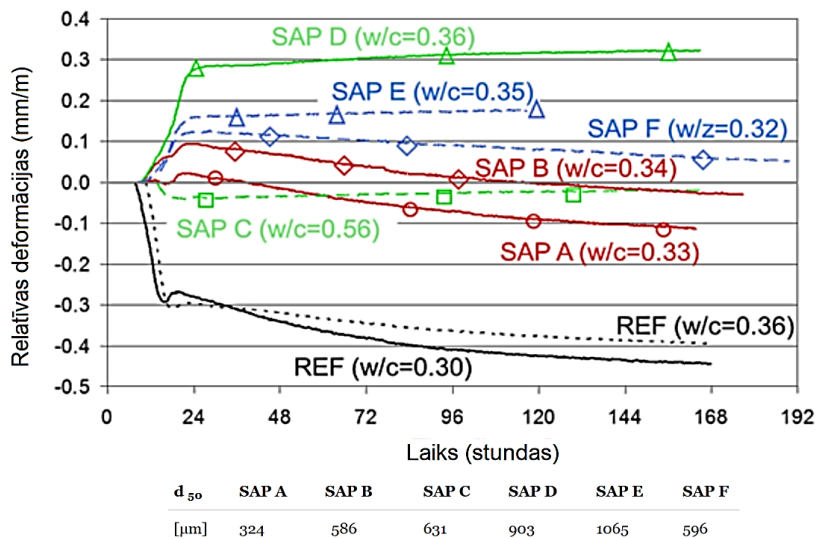
1.6.att. Betona slāņa augstuma  $h_c$  un elastības moduļa  $E_c$  ietekme uz koka-betona stingumu pēc Eirokodeksa EN 1995-1-1 [17].

Papildus tam, ir novērots, ka izmantojot vieglbetonu, līdz pat 50 % samazinās savienojuma ar mehāniskiem pretbīdes savienotājlīdzekļiem stiprība, kas saistīts ar lokālu vieglbetona bojājumu [19]. Bet vieglbetonam piemīt arī tādas priekšrocības, kā augstāka siltuma un skaņas izolācija, kā arī zema pašsvara slodze, kas var būt īpaši aktuāli rekonstrukcijas darbos pie vājas stiprības sienām un pamatiem [20].

Ņemot vērā to, ka betons ir visplašāk pielietojamais cilvēka radītais būvmateriāls, ir pamatoti centieni to pārveidot par videi draudzīgāku materiālu, piemēram, pievienojot tā sastāvā atkritumu materiālus ar mērķi samazināt nepieciešamā cementa daudzumu un, vienlaicīgi, uzlabojot betona veiktspēju.  $\text{CO}_2$  izmešu daudzums no cementa klinkera ražošanas sastāda 4 % no visā  $\text{CO}_2$  izmešu daudzuma, kas rodas no degvielas izmantošanas un rūpnieciskajām darbībām [21]. Betona sastāvā var pievienot vieglus pelnus (*fly ash*), maltus granulētus domnas izdedžus (*Ground Granulated Blast-furnace slag – GGBS*) un pārstrādātas minerālvielas. Vieglu pelnu pievienošana betona sastāvam palielina to iestrādājāmību, kas koka-betona ar iegriezumu-tipa savienojumiem gadījumā, uzlabo betona

spēju pilnīgi aizpildīt visus iegriezumus, tādā veidā uzlabojot kopēju koka-betona darbību. Savukārt, koka-betona ar līmētu savienojumu gadījumā, betona ar viegliem pelniem augsta iestrādājamības pakāpe samazina paraugu bīdes stiprību. Iespējamais pamatojums tam, ir tas, ka svaiga betona ar augstu iestrādājamības pakāpi plūsma nomazgā līmes slāni [22]. Pētījumi rāda, ka GGBS pievienošana betona sastāvā samazina koka-betona bīdes stiprību un nobīdes moduli, bet neraugoties uz to, šie parametri ir pietiekami, lai varētu izmantot ieguvumu no iespējas samazināt nepieciešama cementa daudzumu par 50 % [21].

Pēdējā laikā ir attīstījusies ķīmisko piedevu izmantošana betona sastāvā. Piedevas tiek pievienotas betonam ļoti mazos apmēros, bet ļauj būtiski uzlabot betona īpašības. Viens no svarīgākajiem, ar betonu saistītajiem, jautājumiem vienmēr bija ūdens daudzuma kontrole betona sastāvā. Līdz ar ķīmisko piedevu izmantošanas popularitātes pieaugumu, attīstās īpaši absorbējošo polimēru (*superabsorbent polymers* – *SAP*) izmantošana betona sastāvā. SAP izmantošana dod iespēju kontrolēt ūdens daudzumu un svaigā betona reoloģiskās īpašības [23]. Pievienojot SAP daļiņas betona maisīšanas laikā, tās var absorbēt ļoti lielu ūdens daudzumu un veidot betona struktūrā ieslēgumus ar brīvu ūdeni, tādējādi novēršot pašizžūšanu cementa hidratācijas laikā [24]. Tādējādi, SAP var būt par efektīvu līdzekli betona agrīnas plaisāšanas kontrolē, uzlabojot betona uzvedību ilgtermiņā, jo ļauj risināt betona autogēna rukuma problēmu. Protams ir aktuāls jautājums par nepieciešamo SAP daļiņu lielumu un optimālu ūdens/cementa (*water/cement* – *w/c*) attiecību. Tā, piemēram, kā var redzēt no attēlā 1.7., SAP C ar *w/c* 0.56 dēļ ūdens daudzuma, kas ir lielāks par cementa hidrotācijai vajadzīgo, būtiski izmainīja javas īpašības.



1.7. att. Autogēna rukuma mazināšanas iespējas ar SAP vielām pie dažādas ūdens-cementa attiecības un SAP daļiņu izmēra [25].

Pārāk liels SAP daļiņu lielums (SAP D, SAP E) noved pie betona nevēlamas porainības un spiedes stiprības samazinājuma, kā arī pie betona izplešanās, kas arī var kļūt par iemeslu



betona plaisāšanai. Savukārt, pārāk mazs SAP daļiņu lielums (SAP A, SAP B) ir efektīvs tikai agrīnā betona cietēšanas stadijā, pēc sākotnējas izplešanas līknes ir gandrīz paralēlas javas līknei REF bez SAP. Jāva ar SAP F, ar viszemāko w/c un vidējo SPA daļiņu lielumu uzrāda ļoti nelielu saraušanos.

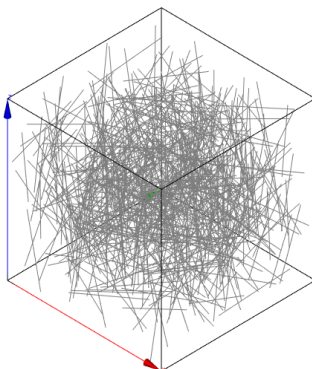
Kā norādīts esošajos pētījumos, SAP pievienošana betonam, kura sastāvā jau ir vieglie pelni, neatstāj nozīmīgu ietekmi uz koka-betona savienojuma darbību [22]. Savukārt, pētījums [21], liecina, ka, izmantojot koka-betonam parasto betonu, kuram ir pievienots SAP, savienojumu darbība tiek ievērojami ietekmēta – šādiem koka-betona paraugiem bija noteikta lielāka bīdes stiprība un nobīdes modulis. Pat ja SAP samazina betona spiedes stiprību un iestrādājamību, ilgtermiņā ieguvums no plaisāšanas un rukuma samazinājuma ir ļoti nozīmīgs, tāpēc ir ieteicams izmantot betonu ar zemu rukuma līmeni.

Ir veikti pētījumi, kuru ietvaros starp parastu betona slāni un koksnes slāni tiek pievienots īpaši augstas veiktspējas betona (*ultra high performance concrete – UHPC*) slānis, kas sastāda 11 % no betona šķērsgriezuma laukuma. Eksperimenta rezultātā tika noteikts, ka šis risinājums neietekmē slāņu nobīdi. Mehāniskā uzvedība arī bija ļoti līdzīga klasiskajam risinājumam. Ietekme no UHPC elastības moduļa vērtības, kas ir lielāka par parastā betona elastības moduļa vērtību, izrādījās nenozīmīga [26].

Topošais standarts par koka-betona kompozīta konstrukcijām [27] paredz betona slāņa stiegrošanu ar nepārtraukto stiegrojumu. Stiegrojuma nepieciešamība parasti tiek pamatota ar iespējamo betona rukumu un nepieciešamas stiprības nodrošināšanu ap pretbīdes savienotājlīdzekļiem. Tas nozīmē, ka minimālais betona slānis kokbetonā ir 80 mm, lai nodrošinātu minimāli nepieciešamu betona aizsargslāni stiegrojumam [17]. Savukārt, minimālais koka-betona plātnes augstums tādā gadījumā sastāda 240 mm, pie kura ir iespējama efektīva betona slāņa darbība, nepakļaujot betonu stiepes spriegumiem. Bieži vien šos materiāla biezumus nenosaka prasība pēc konstrukcijas nestspējas, līdz ar to klasiski stiegrots betons rada nevajadzīgu papildus pašsvaru, palielina materiāla patēriņu un slodzi uz atbalstošām konstrukcijām.

Fibrobetona izmantošana var būt par alternatīvu efektīvu risinājumu koka-betona kompozītam, kas ļauj samazināt betona slāņa biezumu un līdz ar to arī plātnes pašsvaru. Pētījumos ir konstatēts, ka betona stiegrošana ar fibrām uzlabo tapu-veida pretbīdes savienotājlīdzekļu uzvedību [17, 28], un palielina bīdes stiprību koka-betonam ar iegriezumu veida savienojumu [29].

Fibru ietekme uz betona īpašībām ir atkarīga no daudziem faktoriem: fibru formas, attiecības starp fibras garumu un tās ekvivalentu diametru (*aspect ratio*)  $l_f / d_f$ , pievienotā fibru daudzuma, fibru orientācijas un sadalījuma, izmantojamā betona parametriem utt. [30, 31, 32]. Ar fibrām stiegrotā betona īpašību prognozēšana ir sarežģīta, ir grūti paredzēt fibru orientāciju un to sadalījumu pa konstrukcijas tilpumu. Jāņem vērā, ka pat pie haotiskā fibru izvietojuma pie konstrukcijas šķautnēm fibras koncentrējās mazāk, kā to var redzēt attēlā 1.8. Fibru orientāciju var ietekmēt betona plūsma, bet fibru vienmērīgs sadalījums var tikt iztraucēts fibru kunkuļošanās dēļ, ja tiek izmantotas pārāk garas fibras ar sliktas iestrādājamības betonu.



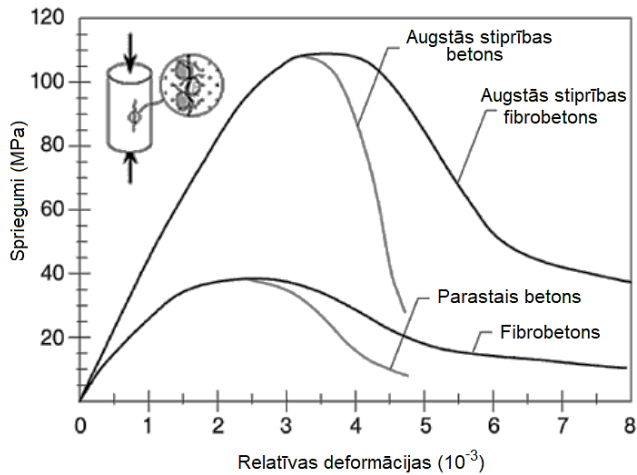
1.8.att. Fibru jauktais jeb haotisks (ievērtējot veidņu sienīņu efektu) izvietojums kubā.

Kā rāda pētījumi, betona pīķa stiprības uzlabojums no fibru izmantošanas parasti ir niecīgs, tāpēc tas netiek ievērots aprēķinos [33]. Savukārt, fibru izmantošanas efektu var ievērot citos aspektos, fibras sadala lokālus spriegumus, novērš plaisu izplatīšanos betonā, samazina betona trauslumu un rukumu, ievērojami uzlabojot betona pēcpīķa uzvedību gan spiedē, gan stiepē, gan liecē, kā arī palielina konstrukcijas enerģijas absorbciju [34, 35, 36]. Parādoties betonā pirmajai plaisai, fibras sāk strādāt, veidojot savienojumus jeb tā saucamos tiltiņus, kas ietekmē betona deformatīvās īpašības [37, 38]. Šo parādību var redzēt attēlā 1.9.



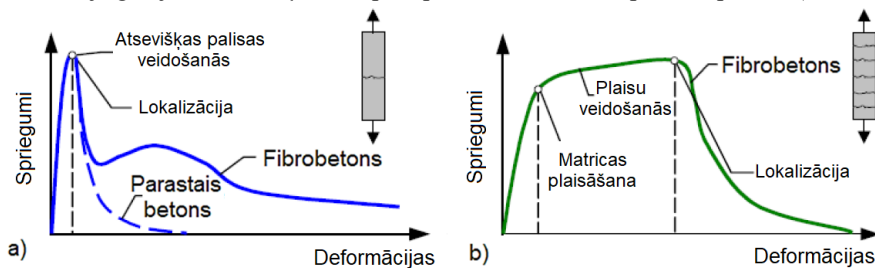
1.9. att. Tiltiņu veidošanās, betonā attīstoties plaisām.

Dispersais stiebrojums neietekmē spiedes stiprību. Fibru ietekme uz betona uzvedību spiedē un tās salīdzinājums ar parastās un augstās stiprības betona uzvedību ir redzama attēlā 1.10. Līdz brīdim, kad rodas plaisas, betona ar fibrām uzvedība ir tāda pati kā betonam bez fibrām. Atšķirības parādās pēc pīķa sasniegšanas. Pieliekot betona paraugam spiedes spēkus vienā virzienā, paraugā veidojas stiepes spēki perpendikulārajā virzienā, kas tuvu pie spriegumu pīķa vērtībām izraisa plaisāšanu. Parastā betona gadījumā, kad sāk attīstīties plaisa, nav kam pretoties šai plaisai un tāpēc tā attīstās strauji. Rezultātā betons vairs nespēj uzņemt spriegumus un spriegumu-deformāciju līknē spriegumi krīt, pie tam augstas stiprības betonam ir raksturīgs diezgan trausls sabrukums. Savukārt, fibrobetonā, attīstoties plaisai, sāk strādāt fibras. Spriegumi pāriet no betona uz fibrām un fibras cenšas pretoties stiepes spēkiem, kas veidojas spiedē. Rezultātā, fibras nodrošina kavēšanos plaisu izplatībā.



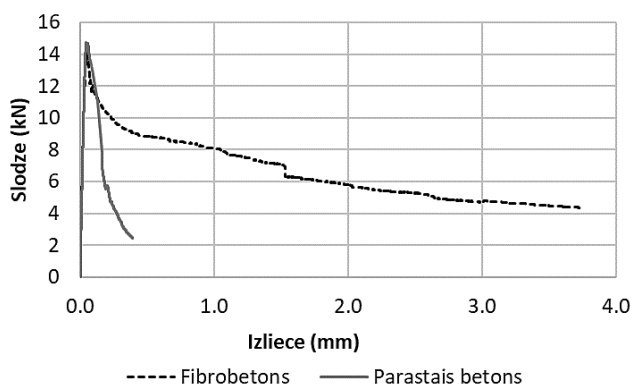
1.10. att. Spiedes spriegumu-relatīvo deformāciju līknes parastās un augstās stiprības betonam ar un bez fibrām [39].

Attēlā 1.11. ir redzama fibrobeta un parastā betona uzvedība stiepē. Uzlabojums pēcpīķa posmā ir atkarīgs no fibru daudzuma un formas. Ir iespējama plaisu lokāla koncentrēšanās (att. 1.11.a)), kad efekts no fibrām nav tik izteikts. Ja fibras ir labi sadalītas pa parauga tilpumu, tad parādās daudz plaisu, bet plaisas, kas veidojas ir sīkākas, ar mazāku atvērumu. Šajā gadījumā, tās uzņem stiepes spēkus un kavē lielu plaisu izplatību (att. 1.11.b)).



1.11. att. Betona uzvedība stiepē: a) mīkstināšanās (*softening*), gadījumā ja veidojas tikai viena plaisa; b) cietēšana (*hardening*) – veidojas daudz plaisu [40].

Fibru ieslēgšanās darbā ietekmē elementa no fibrobeta enerģijas absorbciju salīdzinājumā ar parasto betonu. Enerģijas absorbcija ir vienāda ar laukumu zem slodzes-izlieces līknes un parāda kādu enerģijas daudzumu ir jāpieliek konstrukcijai, lai to deformētu. Parastā betona gadījumā, pieliekot ārējo slodzi, vai arī no iekšējām slodzēm, piemēram, rukuma gadījumā, betonā viegli attīstās plaisas un tas sadalās bez īpašas enerģijas absorbcijas. Savukārt, fibrobeta, fibras uzņem stiepes spēkus un cenšas tos izkliedēt, materiālam turpinot strādāt. Attēlā 1.12. ir parādītas tipiskas slodzes-izlieces līknes fibrobeta un parastajam betonam.



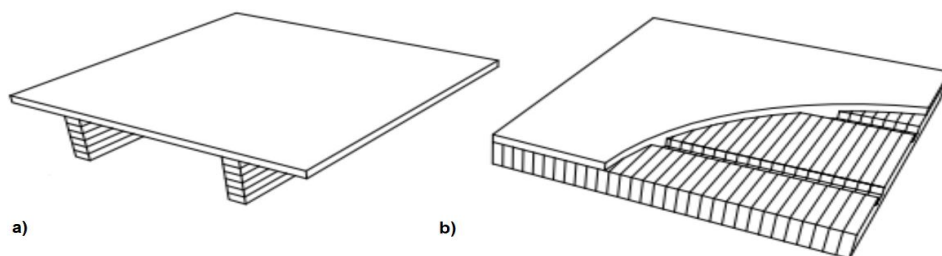
1.12.att. Tipiskas slodzes – izlieces līknes fibrobetonam un parastajam betonam.

Fibru konstruktīvā projektēšana fibrobetonā balstās uz pēcplaisāšanas atlikušo stiprību, ko nodrošina dispersais stiegtrojums. Lai ievērotu fibru darbības efektu uz materiāla nestspēju, ir jābūt garantētai minimālai fibru mehāniskajai veiktspējai. Fibru izmantošana lai uzlabotu konstrukcijas darbību nestspējas robežstāvoklī ir komplicēts darbs. Savukārt, koka-betona kompozīta konstrukcijās, kur betona slānis strādā spiedē, ir lietderīgi izmantot citus efektus no fibru pievienošanas betonam, ko pieskaita pie nekonstruktīvas fibru izmantošanas, tai skaitā betona agrīnas plaisāšanas kontrole vai ugunsizturības paaugstināšanai.

### 1.3. Koka un betona savienojums kompozītā

#### 1.3.1. Kompozīta uzbūve un darbība liecē

Kompozīts sastāv no diviem materiāliem – betona un koka. Parasti šo sistēmu veido betona plātne, kuru atbalsta viena vai vairākas koka sijas vai koka plātne, kā tas ir parādīts attēlā 1.13.

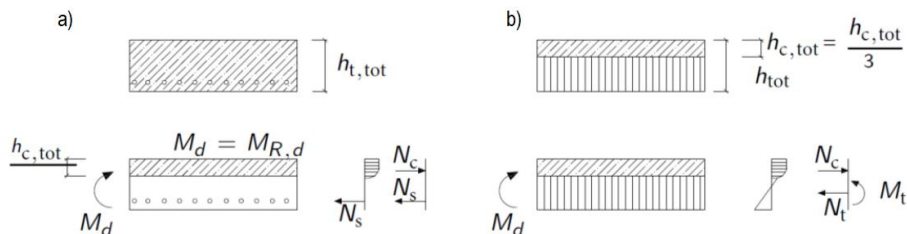


1.13. att. Tipiskie koka-betona konstrukciju risinājumi: a) ribotās plātnes; b) klasiskās plātnes [41].

Sinerģija jeb kompozīta kopdarbības pakāpe starp abiem atšķirīgajiem materiāliem rodas, pateicoties esošajam savienojumam starp materiālu slāņiem. Pateicoties slāņu kopdarbībai, kompozītam piemīt abu materiālu labākas īpašības, jo kompozīta darbība notiek, ja divi

konstrukcijas elementi vai materiāli ir savienoti kopā tādā veidā, ka tie reaģē uz slodzi kā viens elements, un ar lielāku stingumu vai izturību, salīdzinot ar katru elementu atsevišķi.

Dzelzsbetona konstrukcijās, kas strādā liecē, betona stiepes stiprību parasti neievēro, visus stiepes spriegumus, kas rodas liecē, uzņem stiegrījums. Sasniedzot nestspējas robežstāvokli liecē, betons ir saplaisājis līdz aptuveni 2/3 no šķērsriezuma augstuma [42]. Līdz ar to, koka-betona kompozītu konstrukcijās ir lietderīgi aizstāt šo potenciāli saplaisājošo laukumu ar koka šķērsriezumu, kā parādīts attēlā 1.14. Kaut arī kokmateriāli raksturojas ar mazāku stiprību un stingumu nekā tērauda stiegras, koksnes krietni lielākais izmantojamais šķērsriezuma laukums to spēj kompensēt.



1.14.att. Slodzes pārvešana: a) dzelzsbetona plātnē; b) koka-betona kompozīta plātnē [42].

Koka-betona kompozītu konstrukcijās koka elements tiek savienots ar betona slāni, parasti, izmantojot speciālus savienojošus elementus, kas uzņem bīdes spriegumus. Savienojumam ir svarīga loma konstrukciju uzvedības analīzē un projektēšanā. Pretbīdes savienotājlīdzekļi nodrošina pretstību pret slāņu slidēšanu, kad elements strādā liecē. Savienotājlīdzekļa izvēle ir izšķiroša, jo tā nosaka gala sistēmas kopējo efektivitāti.

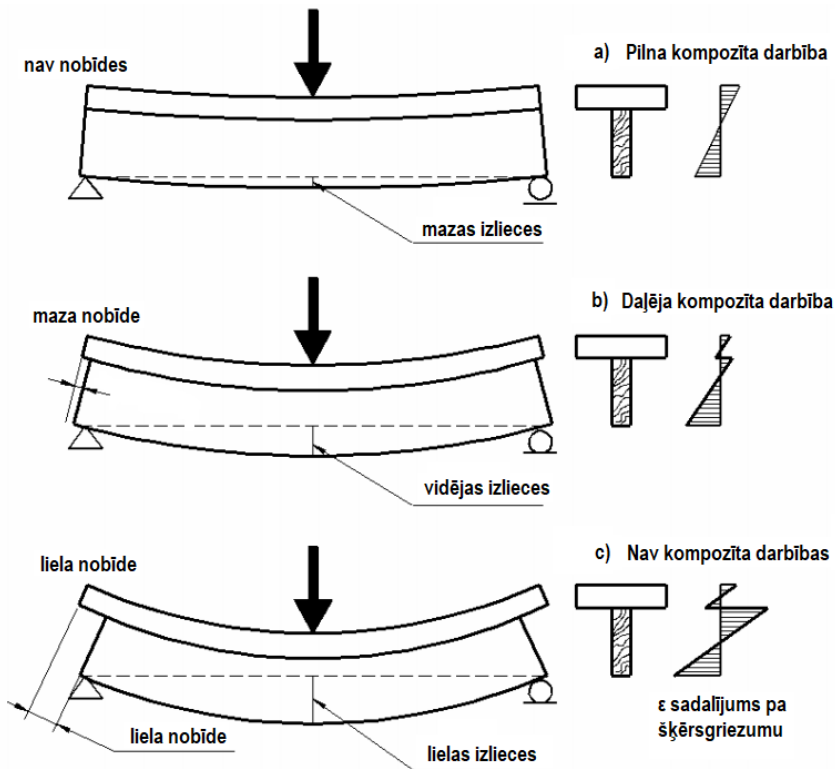
Koka-betona kompozītu konstrukcijas uzvedību atkarībā no starpslāņu savienojuma veida lieces spriegumu ietekmē var raksturot ar sijas veida modeli, kas sastāv no koka daļas un betona slāņa augšpusē. Ir iespējami 3 gadījumi, kas ir parādīti attēlā 1.15.

Pirmajā gadījumā (att.1.15.a)), savienojums ir pilnīgi stings un jebkāda nobīde starp slāņiem nav iespējama. Zem slodzes šāda saliktā konstrukcija darbojas kā viens elements, ar vienu neitrālo asi. Šādai sistēmai lieces stingums ir daudz lielāks nekā atsevišķu slāņu stingumu summa, līdz ar to arī mazāki spriegumi veidojas šķērsriezumā un izlieces, kas ļauj veidot konstrukcijas ar lielākiem laidumiem. Šādai konstrukcijai, strādājot liecē, spiedes spriegumi veidojas betona slānī, bet stiepes – koksnē (att. 1.16.(b)).

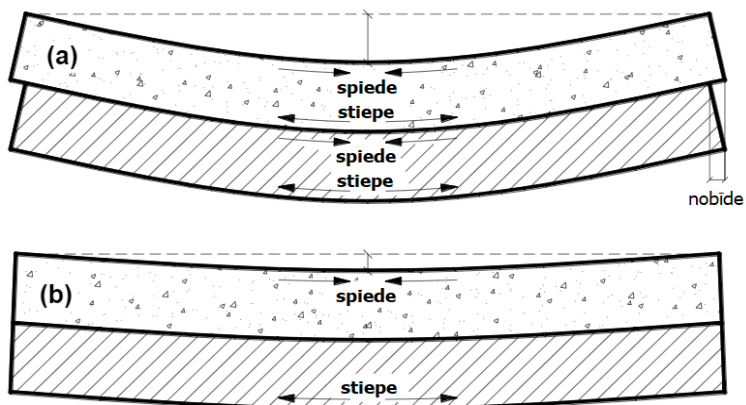
Trešajā gadījumā (att.1.15.c)), pieņemot, ka starp slāņiem nedarbojas berzes spēki, abi slāņi var brīvi slidēt attiecībā viens pret otru. Šajā gadījumā, sijas modelis strādā kā divas atsevišķas sijas, ar divām neitrālajām asīm. Abi slāņi darbojas neatkarīgi viens no otra un netiek nodots bīdes spēks starp abiem slāņiem, jo nav apvienojošu saišu. Šādai sistēmai lieces stingumu veido abu slāņu lieces stingumu summa, līdz ar to veidojas daudz lielākas izlieces un spriegumi, jo efekts no saliktās darbības nepastāv. Strādājot liecē, abos slāņos veidojas gan spiede, gan stiepe (att. 1.16.(a)).

Ideālā gadījumā savienojumam ir jābūt stingam, lai nodrošinātu kompozīta visefektīvāko darbību. Praksē, ar mehāniskajiem savienotājlīdzekļiem, ir grūti izveidot perfektu stingu savienojumu. Parasti, mehāniskie savienotājlīdzekļi pārnes bīdes spriegumus, ierobežojot

slīdēšanu līdz noteiktam brīdim, un zināmā mērā deformējas. Tādā veidā tiek nodrošināta tikai daļēja kompozīta darbība (att.1.15.b)). Šajā gadījumā arī pastāv divas neitrālas assis, kas samazina šķērsriezuma efektivitāti.



1.15. att. Modeļu darbība liecē: a) ar stingu savienojumu; b) padevīgu savienojumu; c) bez savienotājlīdzekļiem starp koka un betona slāņiem [43].



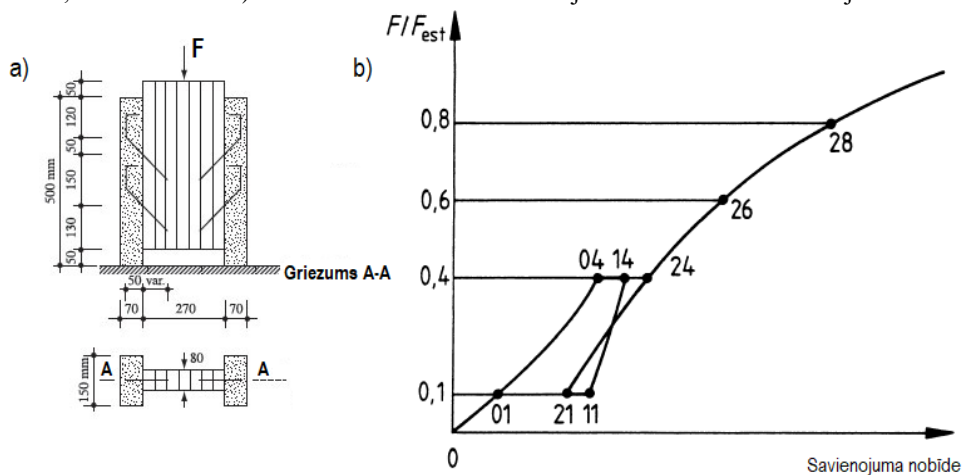
1.16. att. Spriegumu sadalījums pa slāņiem: (a) bez kompozītdarbības; (b) ar pilnu kompozītdarbību [6].



Jo labāk kompozīta slāņu savienojums pārnēs bīdes spriegumus starp koksni un betonu, jo efektīvāka ir kompozīta darbība. Slāņu savienojums nosaka visa kompozīta darbības parametrus, līdz ar to, tam ir ārkārtīgā nozīme un tam jāpievērš īpašu uzmanību. Savstarpējas slāņu nobīdes samazinājums nosaka konkrētās savienojuma metodes efektivitāti kompozītdarbības nodrošināšanai [3, 6, 43, 44, 45]. Savienotāju bīdes stiprība un stingums jeb nobīdes modulis ir svarīgi parametri koka-betona nestspējas un lietojamības robežstāvokļu projektēšanā [46].

### 1.3.2. Savienojumu veidi starp koka un betona slāņiem

Eksistē daudz pētījumu par savienojumu nodrošināšanu starp koksnes un betona slāņiem. Šie pētījumi, parasti, ietver koka-betona savienojuma sistēmu bīdes testus, ka arī siju vai plātņu prototipu ar konkrētu savienojuma veida lieces testus. Bīdes testus veic saskaņā ar EN 26891 standartu, lai noteiktu savienojuma bīdes stiprību un stingumu. EN 26891 standarts pamatā ir paredzēts savienojumiem, kas ir izgatavoti ar mehāniskiem stiprinājumiem, kurus izmanto statiski noslogotās koka konstrukcijās, bet, tai pašā laikā, standarts paredz iespēju tos pašus testēšanas principus izmantot arī citu veidu savienojumu testēšanai. Bīdes stiprība izsaka graužošās slodzes vērtību, kas tiek pielikta savienojumam bīdes testa laikā vai slodzes vērtību pie 15 mm lielas nobīdes. Savukārt, stingumu nosaka kā nobīdes moduli pie 40 %, 60 % un 80 % no vidējās maksimālās slodzes [47]. Attēlā 1.17.a) var redzēt bīdes testa shēmu, bet attēlā 1.17.b) – idealizētu slodzes-deformācijas līkni un veicamos mērījumus.

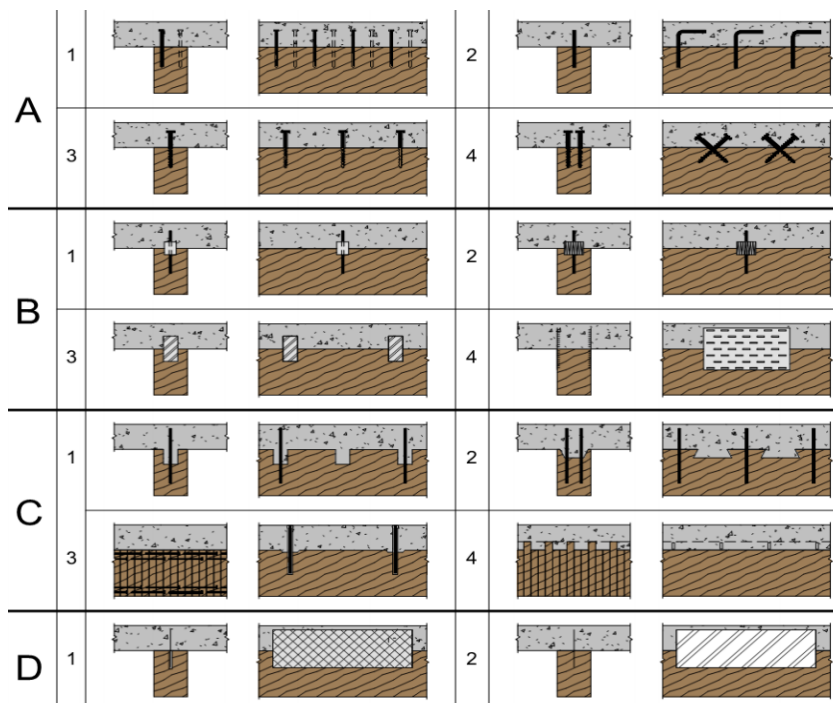


1.17. att. Bīdes testa a) parauga složošanas shēma [48]; b) idealizēta slodzes-deformācijas līkne un veicamie mērījumi [47], kur  $F$  – pieliktā slodze,  $F_{est}$  – prognozējamā graužošās slodzes vērtība vai slodzes vērtība pie 15 mm lielas nobīdes.

Savienotāji var būt metāla vai koka mehāniskie stiprinājumi, iegriezumi kokmateriālā, kas pildīti ar betonu, šo abu variantu kombinācija, kā arī līmētie savienojumi. Attiecībā uz to telpisko izvietojumu, savienotājus var iedalīt diskrētos un nepārtrauktos. Diskrētais mehānisko savienotāju izvietojums parasti balstās uz šķērsspēka sadalījumu pa sijas elementa

garumu, koncentrējoties balstu tuvumā, kur šķērsspēka vērtība ir lielāka un, samazinoties šķērsspēka vērtībai – izkliedējās pa sijas laidumu. Naglas, skrūves un tapas ir ievērojami padēvēgākie savienojumi, salīdzinājumā ar iegriezumiem kokmateriālā un nepārtraukti līmētiem savienotājiem, kas ir visstingrākie.

Autors *Ceccotti* jau 1995. gadā piedāvāja klasifikāciju lielajam iespējamo koka-betona savienotāju daudzumam pēc to stinguma pakāpes. Saskaņā ar piedāvāto grupēšanu, kuru var redzēt attēlā 1.18., A, B un C grupām ir daļēja salikta darbība, un tās ir sakārtotas virzienā no zemākā uz augstāko stingumu – jo savienojums ir stingāks, jo lielāka kompozīta darbība notiek sistēmā. D grupas savienotāji veido visstingākos savienojumus. Saskaņā ar šo klasifikāciju, savienojumus ar vislielāko padēvēgumu veido (A) grupā iekļautie savienotāji, tas ir savienojumi ar naglām, skrūvēm vai tapu formas stiprinājumiem, (B) grupā ir iekļauti savienojumi, kurus savieno plākšņu tipa savienotāji, (C) grupā ir iekļauti savienojumi ar iegriezumiem, kas palielina savienojuma stingumu, bet (D) grupā ir iekļauti savienojumi ar kokmateriālā ielīmētajām nepārtrauktajām tērauda lentēm. Koka-betona kompozīta konstrukcijas ar (A) grupas savienojuma realizāciju sasniedz aptuveni 50 % no konstrukcijas ar (D) grupas savienojumu lieces stinguma [49].



1.18. att. Koka un betona slāņu savienojumu klasifikācija [50].

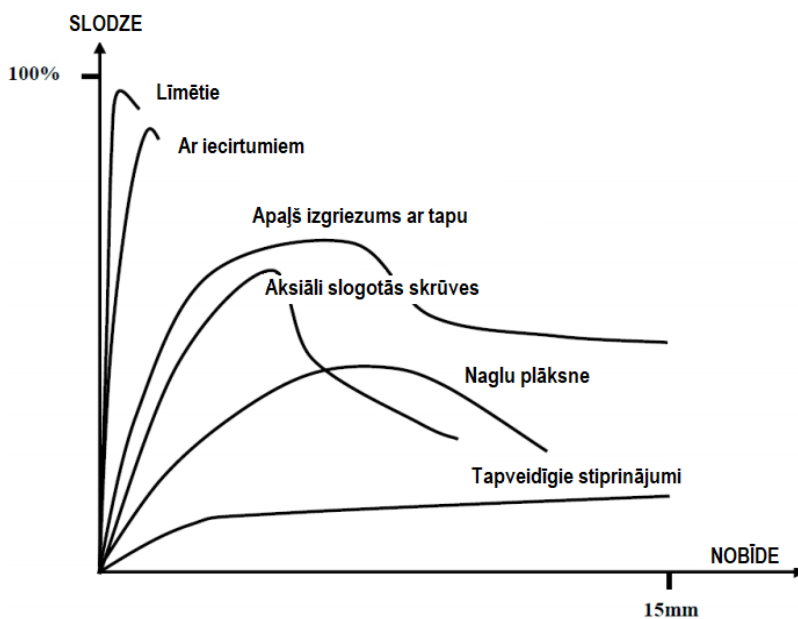
Paskaidrojumi: (A1) naglas; (A2) ielīmētie tērauda stieņi; (A3 / 4) skrūves; (B1 / 2) pretnobīdes gredzeni un zobainās metāla plāksnes; (B3) tērauda caurules; (B4) tērauda perforētās metāla plāksnes; (C1) apaļi iecirtumi kokmateriālos ar stiprinājumiem; (C2) kvadrāta formas iecirtumi ar stiprinājumiem; (C3) iecirtumi ar iepriekšspriegtu tērauda stieģrojumu; (C4) sanaglots koka dēļu klājs ar izbīdījumiem un tērauda pretnobīdes plāksnēm; (D1) tērauda režģis, kas pielīmēts pie kokmateriāliem; (D2) tērauda plāksne, kas pielīmēta pie kokmateriāliem.

Iegriezumi kokmateriālā kopumā pierādīja sevi kā labu savienojuma veidu attiecībā uz savienojuma stiprību un stingumu. Šī savienojuma darbību nosaka iegriezuma garums, skrūves klātbūtne un tās ieskrūvēšanas dziļums. Iegriezuma garums ietekmē savienojuma stiprību un stingumu, bet skrūve nodrošina plastiskumu un uzlabo savienojuma uzvedību pēc sabrukuma [51]. Bet šo savienojumu trūkums ir izstrādes procesa darbietilpība.

Galvenā atšķirība starp mehānisko un iegriezuma tipa savienojumu ir tāda, ka pirmajā gadījumā nobīdes modulis lielākoties ir atkarīgs no stiprinājumu elastības un koksnes, kas saskaras ar mehānisko stiprinājumu elastību, savukārt, iegriezuma tipa savienojumā nobīdes modulis, tieši otrādi, galvenokārt, ir atkarīgs no iegriezuma slīpas virsmas koksnes stiprības, ko nosaka koksnes elastības modulis leņķī pret šķiedru virzienu, kā arī ir atkarīgs no visa koka un betona daļu stiprības [52].

Līmes un epoksīdsveķu izmantošana savienojumu sistēmā nodrošina stingu savienojumu un efektīvu materiālu salikto darbību, bet parasti nav ieteicama, dēļ sarežģītas realizācijas būvlaukumā un nepieciešamības pēc stingras kvalitātes kontroles.

Zinātnieks *Dias* savā promocijas darbā [53] ir apkopojis informāciju par betona un koksnes slāņu savstarpēju uzvedību, izmantojot dažāda veida savienojumus. Attēlā 1.19. var redzēt salīdzinājumu līknes, kas apraksta nobīdi, kādu izraisa bīdes spēks, kas veidojas starp koksnes un betona slāņiem pie dažāda veida savienojumiem.



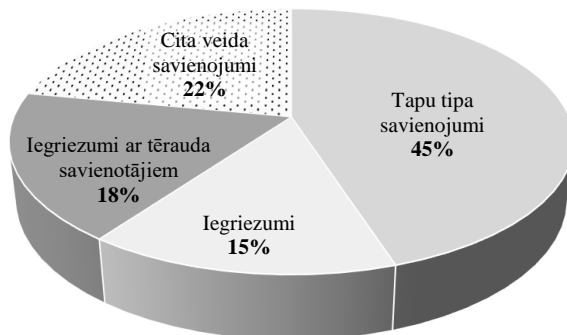
1.19. att. Tipiskā slodzes-nobīdes uzvedība dažāda veida savienojumiem [53].

No līknēm var secināt, ka līmēto un savienojumu ar iecirtumiem uzvedība ir krasi atšķirīga no savienojumiem ar tapu veida mehāniskajiem stiprinājumiem. Līmētiem savienojumiem un savienojumiem ar iecirtumiem ir raksturīga augsta stiprība un stingums, kas ļauj kompozītu šķēsgriezumu izmantot ar lielu efektivitātes pakāpi. Tai pašā laikā, šiem

savienojumiem ir raksturīga gandrīz lineāra uzvedība līdz pat sabrukumam, kas rodas pie relatīvi zemām deformāciju vērtībām. Savienojumiem ar tapu veida mehāniskajiem stiprinājumiem ir raksturīga daudz lielāka plastisko deformāciju spēja, bet arī daudz mazāka stiprība un stingums. Savienojumu, kuru realizācijā tiek izmantotas naglu plāksnes un aksiāli slogotās skrūves pēc mehāniskajām īpašībām atrodas starp līmētājiem savienojumiem un tapu veida savienojumiem, gan stiprības, gan stinguma ziņā.

Saskaņā ar pieejamo apkopojumu [42], kas balstās uz 60 zinātniskajiem literatūras avotiem, visvairāk pētniecisko darbu par savienojumu mehānisko īpašību novērtējumu, kur tika sniegta analīzei piemērota informācija kvantitatīvā izteiksmē, ir sastopami par tapu tipa savienojumiem (45%). Savukārt vēl 33% no darbiem sastāda pētījumus par savienojumiem ar iegriezumiem, ar vai bez papildus tērauda stiprinājumiem. Pētījumi par cita veida savienojumiem, kas iekļauj perforētas tērauda plāksnes, naglu plāksnes, dažāda veida līmētus savienojumus un savienojumus, kuru pamatā ir berze sastāda tikai zem ¼ no visiem pētījumiem.

Bīdes savienojumu izvēlē svarīgākais ir iegūtā savienojuma pretestības spēja nobīdei, kas nosaka kompozīta konstrukcijas kopējo efektivitāti. Savienojuma pretestības spēja nobīdei ir atkarīga no savienotāja stiprības un nobīdes moduļa. Kā jebkurai būvniecībā izmantojamai konstrukcijai, ir svarīgs pietiekams savienojuma plastiskums. Tāpat, vairāki pētījumi [3, 43, 45, 54] norāda uz kompozīta izgatavošanas optimizācijas svarīgumu. Izgatavošanas tehnoloģijas optimizācija varētu veicināt plašāku koka-betona tehnoloģijas izmantošanu.



1.20.att. Pētījumu sadalījums pēc pētītā savienojuma veida.

### 1.3.3. Adhēzijas savienojumi

No savienojuma stiprības un stinguma viedokļa līmētie savienojumi ir vislabākais risinājums, kas var nodrošināt gandrīz perfektu kompozīta darbību. Ir atzīts [42], ka līmētiem savienojumiem ir liels potenciāls, bet tie joprojām atrodas izstrādes stadijā. Pētījumu daudzums par šo savienojuma veidu ir ļoti mazs, saskaņā ar [42] datiem, tas sastāda ap 2.5% no visiem pētījumiem par savienojumiem starp betona un koksnes slāni. Atšķirībā no citiem savienojumu veidiem, līmētie savienojumi ļauj izvairīties no koksnes darbības virsmas spiedē. Ņemot vērā to, ka šis savienojuma veids ir nepārtraukts, bīdes spriegumi tiek sadalīti pa visu virsmu, tādejādi tiek novērsta spriegumu lokāla koncentrācija [6]. Kā arī, līme var veidot

aizsargslāni, kas pasargā koksni no betonā esošā mitruma [55]. Līmētie savienojumi ļauj izvairīties no laikietilpīgām darbībām (griešana, urbšana u.tml.) un, kaut arī līmju izmaksas ir lielas, tās var kompensēt ar pretbīdes savienotājlīdzekļu izmaksām [55]. Tāpat līmētie savienojumi ļauj izvairīties no korozijas jautājumiem, kas ir aktuāli mehāniskajiem savienotājlīdzekļiem [56].

Ierobežojumi līmēto savienojumu izmantošanai praksē, parasti, tiek pamatoti ar [6, 42, 55]:

- daļēji neizpētītu līmēta savienojuma uzvedību ilgtermiņā – savienojumu jutīgumu pret temperatūras un mitruma izmaiņām un ar šīm izmaiņām saistītiem spriegumiem, kas rodas no divu, ar dažādu uzvedību materiālu, mijiedarbības;
- relatīvi trauslu sabrukumu;
- daļēji neizpētītu līmēta savienojuma uzvedību dinamiskās slodzes ietekmē;
- standartu un projektēšanas metožu trūkumu;
- tehnoloģiskajām grūtībām savienojuma realizācijā un kvalitātes kontrolē.

### **Koka-betona ar līmēto savienojumu uzvedība ilgtermiņā**

Pēdējos gados, parādās jauni pētījumi par koka-betona ar līmēto savienojumu uzvedību ilgtermiņā, ievērojot temperatūras un mitruma svārstības. Kokam, betonam un epoksīda līmēm ir dažādas higrotermiskās īpašības, savienojot šīs komponentes, apkārtējas vides temperatūras un mitruma izmaiņas izraisa iekšējos spriegumus kompozītā. Ilgtermiņa uzvedību ietekmē betona rukums, ko veido gan autogēns, gan žāvēšanas rukums un koksnes uzbriešana un sarukums no apkārtējas vides mitruma izmaiņām. Rezultātā, materiālu atšķirīgas reoloģiskās uzvedības dēļ, to mijiedarbību raksturo šļūdes efekti [57]. Pakļaujot nelielus koka-betona ar līmēto savienojumu paraugus mākslīgiem klimatiskajiem apstākļiem pastāvīgās slodzes ietekmē, pētījums [57] parādīja, ka augstākais šļūdes ātrums saglabājās aptuveni pirmajās 30 dienās, pēc kā sāk ievērojami samazināties. Pēc paraugu izņemšanas no klimata kameras, tika konstatēts, ka stinguma samazināšanas laika gaitā vai līmes kohēzijas mazspēja nav novērojama. Papildus tam, pētījumā [57] tika veikta pilna mēroga koka-betona paraugu deformāciju novērošana ilgtermiņā 2. ekspluatācijas klases apstākļos [58] un šī procesa skaitliskā modelēšana ar galīgo elementu metodi, kas pierādīja iespēju prognozēt koka-betona kompozīta konstrukciju uzvedību ilgtermiņā.

Ilgtermiņa koka-betona kompozīta pētījumā iekštelpu klimatiskajos apstākļos [59], bija iegūti sekojoši galvenie rezultāti:

- koka-betona ar līmēto savienojumu saliktas darbības efektivitāte pēc 4.5 gadiem zem slodzes ir vairāk nekā 95 %;
- ilgstošas slodzes iedarbība līmenī ap 30 % no elementa nestspējas, neizraisīja līmētā savienojuma pasliktināšanos;
- ar vienkāršotām pieejām ir iespējams prognozēt koka-betona ar stingu savienojumu izlieces tā kalpošanas laikā.

Pabeidzot ilgtermiņa pētījumu [59] ar paraugu slogošanu līdz sabrukumam, tika konstatēts, ka elementa uzvedība ir gandrīz lineāra līdz pat sabrukumam; sabrukumu varēja raksturot kā trauslu un tas notika pārsvarā betona slānī. Nozīmīgā betona un kokmateriāla slāņu savstarpēja nobīde netika konstatēta. Tādējādi, ilgstoša slodze iekštelu klimatiskajos apstākļos neietekmēja kompozīta salikto darbību.

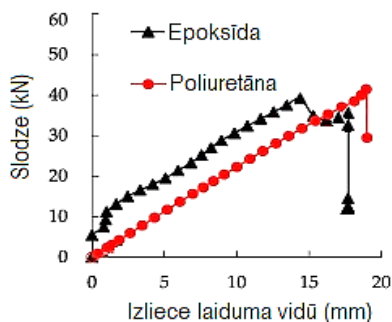
Koka-betona pētījums [60], kas ilga 2.5 gadus ārpus laboratorijas telpām, kur paraugi bija pasargāti no tiešas lietus ietekmes zem jumta, bet citādi pilnībā pakļauti vides temperatūras un mitruma izmaiņām, arī ļāva nonākt pie secinājumiem, ka, kaut arī deformācijas pieaugums laika gaitā ir novērojams, ilgtermiņā slodze neizraisa ievērojamu koka-betona degradāciju, faktiskais lieces stingums samazinājās tikai par 3 %, savukārt nestspēja nemainījās. Līdz ar to, koka-betona ilgtermiņa uzvedībā līmētais savienojums nav vājais posms.

Arī pētījums [61], kas ilga 5 gadus, kur koka-betona sija bija pakļauta ilgstošai slodzei neaizsargātos āra apstākļos un beigās noslogota līdz sabrukumam, parāda, ka kokbetons saglabāja stingu savienojumu starp koka un betona materiālu slāņiem. Graujoša slodze sastādīja 2.4 reizes lielāku slodzi nekā projektētās slodzes vērtība pēc lietojamības robežstāvokļa, sabrukums bija trausls un materiālu slāņu nobīde netika novērota. Ir secināts, ka, izmantojot savienojuma īpašību faktiskās vērtības, ir iespējams pietiekami precīzi paredzēt visus nepieciešamus lielumus, kas ir jāpārbauda, projektējot konstrukciju pēc nestspējas un lietojamības robežstāvokļiem.

Koka-betona uzvedība ilgtermiņā, konstrukcijām ar vidēju un lielu laidumu pie krasi mainīgiem apkārtējās vides apstākļiem, ir ļoti būtisks aspekts šo konstrukciju projektēšanā, kas ir saistīts ar lielu deformāciju attīstību un ko nedrīkst ignorēt [62]. Ir pētījumi, kas iesaka koka-betona konstrukcijas, kas atrodas āra apstākļos, uzreiz pieskaitīt pie 3. ekspluatācijas klases, neatkarīgi no mitruma līmeņa koksnē [63]. Kopumā, apskatītie pētījumi liecina, ka koka-betona kompozīta ar līmētiem savienojumiem uzvedība ir prognozējama un projektējama. Tāpēc, kompozīta ilgtermiņa uzvedība pie dažādiem mitruma un temperatūras režīmiem nevar būt par iemeslu, lai koka-betona ar līmēto savienojumu tehnoloģiju neizmantotu praksē.

### **Savienojuma sabrukuma trauslais raksturs**

Eksistē pētījumi, kuru ietvaros ir veikti līmes atdalīšanas testi un bīdes testi koka-betona paraugiem, kur adhēzija starp betona un koka slāņiem tiek nodrošināta ar 4 tipiskiem līmju veidiem – epoksīda, fenola rezorcīna formaldehīda (PRF), poliuretāna (PUR) un urīna formaldehīda (UF) līmēm. Ir noskaidrots, ka epoksīdsveķiem ir augsta adhēzijas stiprība, bet PRF un UF līmēm, noņemšanas testos tā bija ļoti zema. PUR līmes bīdes stiprība ir augstāka nekā PRF, UF un epoksīdsveķiem. Pētījumā tika secināts, ka kompozītu izstrādei ir ieteicams izmantot epoksīda un PUR līmes [64]. PUR līmes papildus priekšrocība ir tās zemās izmaksas. Ir noskaidrots, ka epoksīda un PUR līmes veido stingus savienojumus un, kaut arī šiem savienojumiem ir raksturīgs trausls sabrukums (1.21 att.), tās spēj nodrošināt nepieciešamu savienojuma stiprību [65, 66].



1.21.att. Koka-betona plātnes izlieces laiduma vidū atkarība no pieliktās slodzes, ar epoksīda vai PUR līmes savienojumu [66].

Pētījumi norāda, ka savienojuma stinguma vērtības, kas tiek iegūtas neliela mēroga bīdes testos, ļauj paredzēt savienojuma darbību reālos lieces apstākļos. Ja savienotāja stiprība ir noteicoša, tad tiek piedāvāts palielināt sistēmas plastiskumu. Bet testējot pārseguma plātnes praksē, var novērot, ka sabrukums iestājas pie slodzes, kas ir vairākas reizes lielāka par aprēķināto plātnes nestspēju [60, 61], parasti sabrukums notiek betona slānī, tam sākot plaisāt [67, 22], vai koksnē no stiepes spriegumiem. Līdz ar to ir pamatots viedoklis, ka līmētā savienojuma traušlums nav konstrukcijas no koka-betona kompozīta, kas strādā liecē, sabrukuma pamatveids un līmētā koka-betona kompozīta sistēma ir tikpat uzticama kā mehānisko savienotāju izmantošana [55, 60].

Gadījumos, ja savienojuma plastiskums tomēr ir jānodrošina, tad to var paveikt gan ar papildus tapu tipa pretbīdes savienotājliedzekļu izvietošanu [60], kas līmēta savienojuma sabrukuma gadījumā uzņemtu spriegumus, gan arī variējot izmantojamās līmes veidus. Ir pētījumi, kas norāda, ka savienojuma sabrukuma traušlu raksturu ietekmē izvēlēta līme [68]. Tā atkarībā no izmantotas līmes savienojuma sabrukums bija vai nu traušls pie lielas slodzes ( $> 4 \text{ N/mm}^2$ ), vai nu diezgan elastīgs pie zemāka slodzes līmeņa ( $1 \text{ N/mm}^2$ ) [42].

### Līmētā savienojuma izgatavošanas tehnoloģija

Līdz šim ir pazīstamas divas līmēto savienojumu izstrādes tehnoloģijas [42] – *sausā* un *mitrā*. Par “sauso” sauc kokmateriāla līmēšanu ar saliekamo betona plātni; par “mitro” vai “slapjo” – sauc tehnoloģiju, kad svaiga betona maisījums tiek liets uz svaigi uzklāto līmes kārtu. Katram no paņēmieniem ir savas priekšrocības un trūkumi. Saliekamais betons, parasti, ir ekonomiski mazāk izdevīgs augsto transporta izmaksu dēļ, bet šis risinājums spēj paātrināt kopējo būvniecības procesu un nodrošināt augstāku kvalitāti, kaut arī pastāv sarežģītības izveidotā līmēta savienojuma kvalitātes kontrolē. Būvlaukumā lietais betons samazina transporta izmaksas, bet pastāv līmes nobīdes risks betona liešanas laikā. Lai uzlabotu koksnes adhēziju ar līmi un pasargātu no ūdens uzsūkšanas no svaigā betona, to var ķīmiski modificēt, papildus gruntējot to virsmu [56].

Lai praksē izmantotu līmētos savienojumus, ir nepieciešams izstrādāt optimālākus savienojuma izveidošanas risinājumus, kas atvieglotu šo savienojumu kvalitātes kontroli, kā

arī jāveic vairāk pētījumus, kas saistīti ar koka-betona uzvedību dinamiskās slodzes ietekmē, jāpilinveido koka-betona ar līmēto savienojumu aprēķina metodes un koka-betona kompozīta konstrukciju kvalitātes novērtējuma metodes.

## 1.4. Koka-betona kompozīta aprēķina pieejas

Konstrukcijām ir jāpārbauda gan lietojamības, gan nestspējas robežstāvokļus [69]. Lietojamības robežstāvoklis parasti ir noteicošs vidēja un liela laiduma konstrukcijām, kas pakļautas liecei un / vai smagiem mainīgiem apkārtējas vides apstākļiem, kā piemēram, tiltu vai jumta konstrukcijām. Nestspējas robežstāvoklis ir noteicošs pārējos gadījumos. Lietojamības robežstāvoklis koka-betona kompozīta konstrukcijām iekļauj izlieču, vibrāciju un betona plaisāšanas kontroli.

Izstrādes stadijā esošais standarts “prCEN/TS Eirokodekss 5: Koka konstrukciju projektēšana – Kompozītu koka-betona konstrukciju projektēšana – Vispārīgie noteikumi un noteikumi ēkām” ietver sevī vispārīgus koka un betona kompozītu konstrukciju projektēšanas noteikumus gan nemainīgajos, gan mainīgajos apkārtējas vides apstākļos. Nemainīgos apkārtējas vides apstākļos, saskaņā ar standartu, ir jāievēro betona rukumu. Mainīgajos – papildus betona rukumam, ir jāievēro koka rukumu vai uzbriešanu no mitruma līmeņa izmaiņām, kā arī materiālu izplešanās no temperatūras izmaiņām. Lai ievērotu koka, betona un savienojuma šļūdes ietekmi uz spriegumiem un deformācijām, aprēķinos izmanto materiālu elastības moduļu un savienojuma nobīdes moduļa efektīvas vērtības. Standarts iekļauj noteikumus dažāda veida koka-betona kompozītiem ar mehāniskiem pretbīdes savienotājlīdzekļiem un/vai iegriezumiem, bet neietver detaļas līmēto koka-betona kompozītu projektēšanai [27]. Ņemot vērā kompozīta darbības visaugstāko efektivitātes pakāpi tieši koka-betonam ar līmēto savienojumu, ir aktuāli apskatīt iespējamās līmēto koka-betona kompozītu konstrukciju analīzes metodes.

Visprecīzākā objekta pētīšanas metode skaitās eksperimentāla, bet tā nav universāla, jo veicot izmaiņas pētāmā objekta parametros, parādās nepieciešamība no jauna testēt pētāmo objektu, tāpēc aprēķinos izmanto analītiskās un skaitliskās metodes, kas ir vispārīgākās un ekonomiski izdevīgākās. Eksistē vairākas analītiskās aprēķinu metodes, kuras ir iespējams piemērot koka-betona kompozīta ar līmēto savienojumu aprēķiniem, tai skaitā: salikto siju metode, kompozītu metode, bīdes analogiju metode, reducēto šķērsriezuma metode.

### 1.4.1. Vienkāršotas analītiskas aprēķina metodes šķērsriezuma lieces stingumam

Izstrādes stadijā esošais standarts, koka-betona kompozīta konstrukcijām ar padevīgajiem savienojuma veidiem iesaka izmantot gamma metodi ( $\gamma$  metode) jeb salikto siju metodi, saskaņā ar EN 1995-1-1 B pielikuma vadlīnijām [58].

Šo metodi izstrādāja profesors Kārlis Molers (*Karl Möhler*) 1955. gadā [70]. Projektēšanas metode balstās uz lineāri elastīga ķermeņa teoriju un sākotnēji tika izstrādāta saliktām sijām (T, I, kārbveida sijām), kuru atsevišķās daļas ir savienotas savā starpā ar mehānisko savienotājlīdzekļu palīdzību ar nobīdes moduli K. Kur, pēc nosacījumiem,



attālums  $s$  starp savienotājlīdzekļiem ir konstants vai vienmērīgi mainās. Sijas ir brīvi balstītas ar laidumu  $L$ . Nepārtrauktām sijām var lietot atbilstošās izteiksmes, pieņemot laidumu  $L$  vienādu ar 0.8 no faktiskā, savukārt, konsolēm laidumu  $L$  pieņem vienādu ar divkārtšu konsoles garumu. Metode balstās uz pieņēmumu, ka slodze darbojas šķērsriezuma  $z$ -ass virzienā un rada lieces momentu  $M=M(x)$ , kurš mainās sinusoidāli vai paraboliski, un šķērsspēku  $V=V(x)$  [58]. Saskaņā ar šo metodi salikta sija tiek rēķināta, izmantojot šķērsriezuma efektīvo stingumu  $(EI)_{ef}$ , kas ir atkarīgs no sijas šķērsriezuma īpašībām un sijas šķērsriezuma stinguma parametriem, kas ievērtē savienotājlīdzekļu elastīgo darbību nobīdes plaknēs ar  $s/K$  attiecību. Iespējamās stinguma redukcijas faktora  $\gamma$  vērtības svārstās no 0 (nav kompozīta darbības) līdz 1 (pilna kompozīta darbība) [71].

Līmes izmantošana noved pie gandrīz stinga savienojuma, kas palielina saliktā elementa stingumu un stiprību un ļauj vieglāk to aprēķināt, izmantojot pilnas saliktas darbības teoriju [42]. Rezultātā, aprēķinos var pieņemt, ka stinguma redukcijas faktors  $\gamma=1$ . Tad šķērsriezuma efektīvo stingumu  $(EI)_{ef}$  nosaka pēc formulas (1.1.):

$$(EI)_{ef} = \sum_{i=1}^n (E_i \cdot I_i + \gamma_i \cdot E_i \cdot A_i \cdot a_i^2) \quad (1.1.)$$

kur  $E_i$  – attiecīgas kārtas materiāla elastības modulis, MPa;

$I_i$  – attiecīgas kārtas inerces moments,  $\text{mm}^4$ ;

$\gamma_i$  – savienojuma stinguma redukcijas faktors, līmētā savienojuma gadījumā  $\gamma = 1$ ;

$A_i$  – attiecīgas kārtas šķērsriezuma laukums,  $\text{mm}^2$ ;

$a_i$  – attālums no attiecīgās kārtas smaguma centra līdz šķērsriezuma neitrālai asij, mm.

Ņemot vērā to, ka koka-betona šķērsriezumu veido atšķirīgi materiāli ar atšķirīgām mehāniskajām īpašībām, koka-betona ar līmētu savienojumu spriegumu aprēķinos ir ērti izmantot reducēto šķērsriezumu metodi. Metodes pamatā ir šķērsriezuma reducēšana uz tam materiāla īpašībām, kurā tiek meklēti spriegumi. Tādējādi, nosakot maksimālus stiepes normālspriegumus, kuri elementam veidojas šķērsriezuma apakšējā malā – koksne, viss koka-betona šķērsriezums tiek reducēts uz koksnes materiālu. Attiecīgie stiepes spriegumi tiek salīdzināti ar koksnes stiprību. Tāpat, nosakot maksimālus spiedes spriegumus, viss šķērsriezums tiek reducēts uz betona slāņa īpašībām un iegūtā spriegumu vērtība tiek salīdzināta ar betona spiedes stiprību. Šādā veidā var noteikt spriegumus jebkurā šķērsriezuma vietā, reducējot to uz tā materiāla īpašībām, kurā spriegumu līmenis tiek pārbaudīts.

Reducēto šķērsriezumu iegūst, izmantojot redukcijas faktoru  $n$ , kas ir elastības moduļu attiecība [72, 73]. Tā, piemēram, pārveidojot koka-betona kompozīta elementa šķērsriezumu uz koka materiāla mehāniskajām īpašībām, redukcijas faktoru nosaka kā:

$$n = \frac{E_b}{E_k} \quad (1.2.)$$

kur  $E_k$  – koka elastības modulis, MPa;

$E_b$  – betona elastības modulis, MPa

Materiālu slāņu augstums paliek nemainīgs, šķērsriezuma mainīšana notiek uz platuma rēķina pēc formulas:

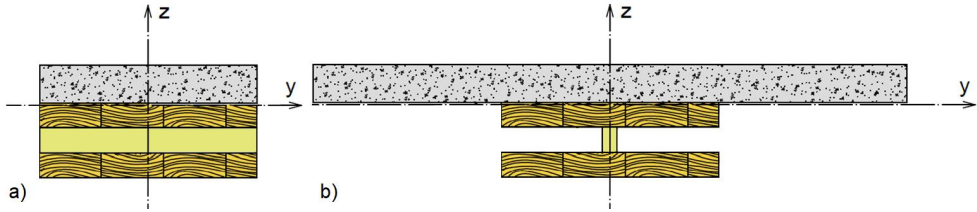
$$b_{k,eq} = b_b \cdot n \quad (1.3.)$$

kur  $b_{k,eq}$  – reducētais uz koka īpašībām betona slāņa platums, mm;

$b_b$  – betona slāņa platums, parasti 1000 mm;

$n$  – redukcijas faktors

Attēlā 1.22. var redzēt CLT – betona kompozīta reducētais šķērsgriezums uz CLT garenisko kārtu materiāla īpašībām. Reducēšanas rezultātā visiem šķērsgriezuma slāņiem ir vienāds elastības modulis.



1.22. att. CLT – betona kompozīta a) šķērsgriezums, b) reducētais šķērsgriezums uz CLT garenisko kārtu materiāla īpašībām.

#### 1.4.2. Makro struktūras modelēšana aprēķiniem ar galīgo elementu metodi

Koka-betona kompozīts sastāv no dažādu pēc īpašībām materiālu slāņiem. Lai prognozētu kompozīta īpašības ir nepieciešams zināt atsevišķu slāņu īpašības [58]. Izstrādes stadijā esošais koka-betona standarts [27], kompozīta konstrukciju modelēšanai atļauj izmantot lineāri-elastīgu sakarību starp spriegumiem un deformācijām gan koka, gan betona materiāliem, kas nozīmē, ka ir spēkā Huka likums:

$$\langle \sigma_i \rangle = C_{ij} \langle \varepsilon_i \rangle; \quad i, j = 1, \dots, 6, \quad (1.4.)$$

kur  $\langle \sigma_i \rangle$  – slāņa vidējo spriegumu komponents;

$C_{ij}$  – stinguma matricas elements;

$\langle \varepsilon_i \rangle$  – slāņa vidējo deformāciju komponents.

Stinguma matrica  $C_{ij}$  sastāv no 36 elementiem. Koksnei ir trīs elastīgo īpašību simetrijas plaknes, līdz ar ko – stinguma matricā ir 9 neatkarīgās elastīgās konstantes. Koksnes slāņa deformēšanas likums apgrieztā veidā izskatās šādi:

$$\begin{Bmatrix} \langle \varepsilon_1 \rangle \\ \langle \varepsilon_2 \rangle \\ \langle \varepsilon_3 \rangle \\ \langle \gamma_{23} \rangle \\ \langle \gamma_{31} \rangle \\ \langle \gamma_{12} \rangle \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{21} & S_{31} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{22} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \langle \sigma_1 \rangle \\ \langle \sigma_2 \rangle \\ \langle \sigma_3 \rangle \\ \langle \tau_{23} \rangle \\ \langle \tau_{31} \rangle \\ \langle \tau_{12} \rangle \end{Bmatrix} \quad (1.5.)$$

kur  $S_{ij}$  – padevīguma matricas elements.

Padevīguma matricas komponentes var izteikt ar materiāla tehniskajām elastīgajām konstantēm, proti, elastības moduļiem, Puasona koeficientiem un bīdes moduļiem:

$$[S_{ij}] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \quad (1.6.)$$

kur  $E_1, E_2, E_3$  – elastības moduļi koordinātu sistēmā 1-2-3 virzienos 1, 2 un 3;

$\nu_{ij}$  – Puasona koeficienti, kuri nosaka šķērsdeformāciju virzienā  $j$ , no pieliktās slodzes  $i$  virzienā;

$G_{23}, G_{31}, G_{12}$  – bīdes moduļi plaknēs 2-3, 3-1 un 1-2.

Ņemot vērā to, ka  $S_{ij} = S_{ji}$ , starp galvenajiem Puasona koeficientiem un sekundārajiem Puasona koeficientiem pastāv šādas korelācijas proporcijas:

$$\frac{\nu_{ij}}{E_i} = \frac{\nu_{ji}}{E_j}, \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (1.7.)$$

Mūsdienās inženieruzdevumu risināšanai ir iespējams izmantot programmas, kas balstās uz galīgo elementu metodi (GEM). GEM programmas ļauj ne tikai atrisināt sarežģītas problēmas, bet arī ātri aprēķināt dažādus variantus. Galīgo elementu metodes ietvaros konstrukcija tiek sadalīta galīgos elementos, kuriem ir vienkārša ģeometriskā forma. Nezināmie lielumi (pārvietojumi) tiek noteikti elementu mezglos. Iedarbojoties uz konstrukciju, tā deformējas un ieņem jaunu līdzsvara stāvokli. Izmantojot potenciālās enerģijas minimuma principu, saskaņā ar kuru sistēma ir līdzsvarā tad, ja tās potenciālā enerģija ir minimāla, tiek sastādīta vienādojumu sistēma. Vienādojumu sistēmas atrisinājums ir mezglu pārvietojumi. Zinot pārvietojumus ir iespējams iegūt arī citus konstrukcijas aprēķina rezultātus – deformācijas un spriegumus [74].

Datorprogrammu izmantošana koka-betona kompozīta aprēķinos koka slāņa modelēšanai ļauj pielietot arī sarežģītākus materiāla modeļus. Ortotropu kompozītu izpētē var izmantot ortotropu plastisku 3D materiāla modeli, kas balstās uz *Tsai-Wu* sabrukuma kritēriju [75, 76]. Šis modelis paredz, ka sasniedzot plūstamības robežu, spriegumi materiālā paliek nemainīgi un pārdalās saskaņā ar katrā virzienā vēl pieejamo materiāla stingumu.

Materiālu modelis apvieno sevī plastiskās un ortotropās īpašības. Elastīgajā zonā tas sakrīt ar ortotropu materiāla modeli, plastiskajā – notiek plūšana saskaņā ar *Tsai-Wu*:

$$f_{crit}(\sigma) = \frac{1}{C} \left[ \frac{(\sigma_x - \sigma_{x,0})^2}{f_{t,x}f_{c,x}} + \frac{(\sigma_y - \sigma_{y,0})^2}{f_{t,y}f_{c,y}} + \frac{(\sigma_z - \sigma_{z,0})^2}{f_{t,z}f_{c,z}} + \frac{\tau_{yz}^2}{f_{v,yz}^2} + \frac{\tau_{xz}^2}{f_{v,xz}^2} + \frac{\tau_{xy}^2}{f_{v,xy}^2} \right] \quad (1.8.)$$

$$\text{kur } \sigma_{x,0} = \frac{f_{t,x} - f_{c,x}}{2}; \quad \sigma_{y,0} = \frac{f_{t,y} - f_{c,y}}{2}; \quad \sigma_{z,0} = \frac{f_{t,z} - f_{c,z}}{2};$$

$$C = 1 + \left[ \frac{1}{f_{t,x}} + \frac{1}{f_{c,x}} \right]^2 \frac{E_x E_{p,x}}{E_x - E_{p,x}} \alpha + \frac{\sigma_{x,0}^2}{f_{t,x}f_{c,x}} + \frac{\sigma_{y,0}^2}{f_{t,y}f_{c,y}} + \frac{\sigma_{z,0}^2}{f_{t,z}f_{c,z}}$$

$f_{t,x}, f_{t,y}, f_{t,z}$  – plastiskā stiepes stiprība ass virzienā x, y vai z;

$f_{c,x}, f_{c,y}, f_{c,z}$  – plastiskā spiedes stiprība ass virzienā x, y vai z;

$f_{v,yz}, f_{v,xz}, f_{v,xy}$  – plastiskā bīdes stiprība ašu virzienā yz, xz vai xy;

$E_{p,x}$  – cietēšanas (*hardening*) modulis;

$\alpha = \sum_i \Delta\gamma_i$  – cietēšanas stāvokļa mainīgais.

Ja  $f_{crit}(\sigma) < 1$ , spriegumi atrodas elastīgajā zonā. Plastiskā zona tiek sasniegta, kad  $f_{crit}(\sigma) = 1$ .  $f_{crit}(\sigma)$  vērtība nevar būt lielāka par 1. Modeļa uzvedība ir ideāli-plastiska, nostiprināšanās nenotiek.

Betons tiek pieņemts kā izotropas materiāls ar bezgalīgi daudz materiāla elastīgas simetrijas plaknēm, kuram ir tikai 2 neatkarīgas elastīgas konstantes. Izotropas materiāla deformēšanas likums apgriezta formā izskatās šādi:

$$\begin{pmatrix} \langle \sigma_1 \rangle \\ \langle \sigma_2 \rangle \\ \langle \sigma_3 \rangle \\ \langle \tau_{23} \rangle \\ \langle \tau_{31} \rangle \\ \langle \tau_{12} \rangle \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{12} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{11} & S_{12} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{12} & S_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2(S_{11} - S_{12}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2(S_{11} - S_{12}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(S_{11} - S_{12}) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \langle \varepsilon_1 \rangle \\ \langle \varepsilon_2 \rangle \\ \langle \varepsilon_3 \rangle \\ \langle \gamma_{23} \rangle \\ \langle \gamma_{31} \rangle \\ \langle \gamma_{12} \rangle \end{pmatrix} \quad (1.9.)$$

Starp betona materiāla tehniskajām elastīgajām konstantēm pastāv sekojošā sakarība:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (1.10.)$$

kur  $E$  – elastības modulis, MPa;

$\nu$  – Puasona koeficients;

$G$  – bīdes modulis, MPa.

Materiāla uzvedība betonam ar disperso stiebrojumu tiek modelēta ar izotropas materiāla modeli ar bojājumu, kas paredz nepārtrauktu stiprības samazināšanās betona plaisāšanas dēļ. Šim materiāla modelim tiek definēta spriegumu-deformāciju nelineāra līkne atsevišķi spiedē un stiepē. Pirmajā spriegumu-deformācijas līknes posmā jābūt spēkā Huka likumam, pēc tam materiāla izotropiskais stingums tiek samazināts ar elastības moduļa degradāciju, izmantojot speciālo skalāro bojājuma parametru [75, 77, 78]. Samazinoties elastības moduļim, tiek pārrēķināta spriegumu-deformāciju attiecība. Bojāta materiāla gadījumā, veicot korekciju iterācijas, notiek sistēmas stinguma samazināšanās līdz brīdim, kad atsevišķais galīgais elements vairs neuzņem spriegumus. Spiedes un stiepes gadījumā bojājuma parametrs atšķiras.

## 1.5. Nesagraujošās kvalitātes kontroles metodes

Mūsdienu būvniecības prakse arvien vairāk balstās uz zinātnisko pētījumu rezultātiem. Katrs inovatīvais sasniegums ir atbalstījies teorētiskus un eksperimentālus datorizētus pētījumus. Datorizēti pētījumi sniedz iespēju risināt sarežģītas problēmas ar modernām skaitļošanas programmām, bet nepieciešamība pēc gatavu izstrādājumu nesagraujošās kvalitātes kontroles, ar mērķi noteikt izstrādātas konstrukcijas atbilstību projektējamai, joprojām pastāv.

Nesagraujošās testēšanas metodes dod iespēju novērtēt materiāla, komponenta vai sistēmas integritāti, materiāla īpašības, identificēt un raksturot bojājumus, neradot pārbaudāmajam materiālam kaitējumu [79]. Metodes nodrošina efektīvus paraugu pārbaudes veidus ražošanas kvalitātes kontrolei [80], kā arī konstrukciju stāvokļa monitoringam, to ekspluatācijas laikā. Eksistē daudzas dažādas nesagraujošās testēšanas metodes, ko pielieto būvniecībā, katrai metodei ir savas priekšrocības un ierobežojumi. Būvniecībā konstrukciju stāvokļa novērtēšanai pielieto tādas nesagraujošās testēšanas metodes, kā eksperimentālas pārbaužu metodes ar statisko vai dinamisko slodzi, par dinamisko slodzi izmantojot impulsa slodzes vai vibrācijas, kā arī akustiskās nesagraujošās pārbaudes metodes u.c. Šo metožu nosaukumos parasti ir atsauce uz noteiktu zinātnisku principu vai aprīkojumu, ko izmanto pārbaudes veikšanai.

Eksperimentālās pārbaužu metodes būvkonstrukciju stāvokļa novērtēšanai, slogojot konstrukcijas ar statisko slodzi, pamatā ir konstrukcijas slogošana ar pakāpeniski pieaugošu nekustīgo slodzi un attiecīgi iegūto deformāciju novērtēšana [81]. Šī metode tiek plaši pielietota testēšanai laboratorijas apstākļos. Savukārt, konstrukcijas tehniskā stāvokļa novērtēšanai uz vietas, šo metodi parasti pielieto tikai gadījumos, ja savādāk to nav iespējams paveikt, jo šī metode ir laika un darba ietilpīga, mazinformatīva un dažos gadījumos ir pat bīstama, jo var izraisīt konstrukcijas sabrukumu.

Betona un citu līdžīgu būvmateriālu kvalitātes kontrolei izmanto sklerometrus. Šmita āmuru darbības princips balstās uz trieciena impulsa noteikšanu, kas rodas pēc impulsa slodzes pielikšanas. Trieciena enerģija betona spiedes stiprības pārbaudei ir 2,207 Nm, bet ir arī āmuri ar samazinātu trieciena enerģiju citiem materiāliem vai plānām konstrukcijām [82]. Betona stiprību nosaka pēc āmura stieņa atsitienu augstuma, izmantojot noteiktās kalibrēšanas līknes. Sklerometriska testa pamatā ir korelācija starp betona spiedes stiprību un tā virsmas cietību [83]. Bet šī metode raksturo tikai materiāla virsmas stiprību un neļauj pilnvērtīgi novērtēt iespējamus defektus materiāla iekšpusē.

Viens no izplatītākajiem veidiem kā konstrukcijās atklāt defektus, ir to dinamisko parametru monitorings. Eksperimentālās pārbaužu metodes būvkonstrukciju stāvokļa novērtēšanai, slogojot konstrukcijas ar dinamisko slodzi, ļauj atklāt defektus būvkonstrukciju elementos, iedarbojoties uz konstrukciju ar impulsa vai vibrāciju slodzi. Šī metode – eksperimentālā modālā analīze, paredz, ka ir zināma iedarbe uz konstrukciju un konstrukcijas reakcija uz konkrētu iedarbi. Izmantojot transformācijas funkcijas, ir iespējams noteikt konstrukcijas dinamiskus parametrus.

Konstrukcijas dinamisko slogošanu var izraisīt dažādos veidos. Eksistē dinamiskās būvju un konstrukciju stāvokļa novērtēšanas metodes, kas ietver svārstību izraisīšanu gruntī ar speciālajam ierīcēm (pneimatiskais āmurs, vibrators) [84]. Grunts svārstības sākumā izraisa būves pamatu svārstības, bet pēc tam arī visas būves svārstības. Sensori tiek stiprināti pie konstrukciju elementiem un fiksē svārstību frekvences. Jo stingākas ir konstrukcijas, jo augstāka ir atstarotā svārstību frekvence sensorā un otrādi. Metodes trūkums ir slodžu parametru ierobežojumi un potenciālā iespēja bojāt konstrukciju vai tās daļu.

Dinamisko slodzi var radīt ar impulsveidīgu elektromagnētiskā lauka iedarbību uz konstrukciju, tādā veidā panākot iespēju regulēt pieliktās slodzes parametrus plašākā

diapazonā. Konstrukciju stāvokļa kontrole, balstās uz elektromagnētisko svārstību novērtējumu [85]. Metodes trūkums ir tas, ka to var izmantot tikai metāla konstrukcijām, kam piemīt magnētiskās īpašības.

Impulsa slodzi uz konstrukciju var radīt ar trieciena āmuru palīdzību. Konstrukciju tehniskā stāvokļa novērtēšanai trieciena āmurs tiek izmantots kopā ar akselerometriem, kas fiksē konstrukcijas reakciju uz impulsa slodzi. Trieciena āmurus plaši izmanto konstrukciju frekvences reakcijas testēšanā jeb modālajā analīzē [86]. Trieciena āmuru izmantošanas galvenais trūkums – nav iespējams ar vienu trieciena āmuru veikt pārbaudes dažāda izmēra pētāmajiem objektiem. Tāpat dinamisko slodzi var izraisīt, izmantojot mākslīgus vibrācijas avotus, piemēram, uz konstrukciju no noteiktā augstuma, uzmetot masu. Metodes trūkums – tā neļauj pilnvērtīgi novērtēt konstrukciju stāvokli, jo pieliktās triecien-vibrācijas slodzes frekvence un trieciena enerģija ir relatīvi zemas.

Eksperimentālās modālās analīzes (EMA) laikā tiek veikti ieejas spēku un izejas paātrinājumu mērījumi. Šie signāli tiek pārveidoti no laika domēna (amplitūda pret laiku) uz frekvences domēnu (amplitūda pret frekvenci) ar signālu apstrādē bieži pielietojamu matemātisko rīku – ātro Furjē transformāciju (FFT) [87], kas rada frekvences domēna ieejas spēka diagrammu jeb spektru un izejas paātrinājuma spektru. Sadalot izejas spektru ar ieejas spektru, tiek iegūta frekvences reakcijas funkcija (FRF), kas parāda, kā struktūra reaģēs uz ievadi noteiktā frekvencē. Lai FRF būtu tīra un atspoguļotu sistēmas darbību, ir ļoti svarīgi, lai izmērāmais spēks būtu vienīgais ierosinājums, kas testa laikā iedarbojas uz konstrukciju. Jebkuri neizmērīti ievades spēki izraisīs FRF piesārņojumu, kas būtiski ietekmē šīs metodes pielietošanu daudzos gadījumos.

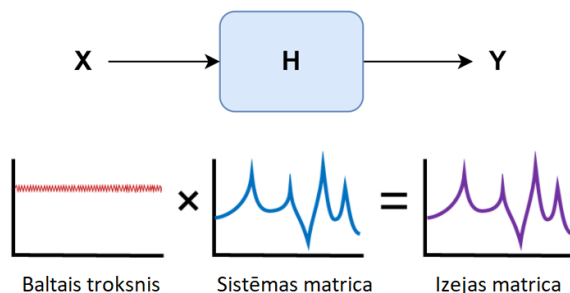
Neiespējamība vienmēr ievērtēt visas apkārtējas vides iedarbes uz konstrukciju, kā arī metodes ierobežojumi, kas ir saistīti ar apskatāma objekta izmēriem, ir galvenie iemesli, operacionālās modālās analīzes (OMA) attīstībai. Operacionālā modālā analīze, ko sauc arī par "apkārtējās vides modālo analīzi" vai "tikai izejas datu modālo analīzi", tiek plaši izmantota lielu konstrukciju modālajos novērtējumos ar vides un ekspluatācijas slodzēm [88]. Šai metodei ir vairākas priekšrocības salīdzinājumā ar EMA [89, 90, 91]:

- OMA dod iespēju veikt modālu analīzi, nezinot un/vai nekontrolējot ievades ierosmi;
- ļauj novērtēt tādu pašus modālos parametrus – svārstību modas formu, pašsvārstību frekvenci un rimšanas koeficientu, kā tradicionālās zināmās metodes;
- OMA pieder pie vairāku ievadu – vairāku izvadu (*multi input – multi output*, MIMO) metodes, kas ļauj precīzi novērtēt un atkārtot modu formas telpā;
- testi ir ekonomiskāki un ātrāk izpildāmi salīdzinājuma ar EMA. Šī metode neprasa papildus aprīkojumu sistēmas ierosināšanai, tādu kā vibroplatformas vai triecienāmuru testēšanas veikšanai laboratorijas apstākļos. Veicot OMA testus, par ievades iedarbi uz paraugu var būt laikā un telpā nejaušas pieskaršanās paraugam, paralēli vibrāciju reakciju mērījumiem parauga vairākās vietās. Šādā veidā radītā ierosme būs labs daudzfaktoru baltā trokšņa stohastiskā procesa tuvinājums.

Eksistē divas globālas pieejas, kā apstrādāt OMA iegūtus datus – frekvenču domēnā (piemēram, FFD metode, kas no angļu valodas *Frequency domain decomposition* jeb

frekvenču domēna sadalīšana) vai laika domēnā (piemēram, SSI metode, kas no angļu valodas *Stochastic Subspace Identification* jeb stohastiskā apakštelpas identificēšana) [92].

Frekvenču domēnā izejas spektrus modelē līdzīgi kā ar frekvenču reakcijas funkcijām. Pieņemot, ka uz konstrukciju darbojas baltais troksnis, kas ir vienādā lielumā visā interesējošo frekvenču diapazonā, un ar telpiski nejaušu sadalījumu pa konstrukciju, tad konstrukcijas atbildes reakcija satur visu nepieciešamu informāciju, lai raksturotu sistēmu. Tā kā baltais troksnis raksturojas ar konstantu jaudas spektru, izejas spektra matrica [Y] ir vienāda ar sistēmas matricu [H] (skat. 1.23. att. Operacionālās modālās analīzes shēma.) [93].



1.23. att. Operacionālās modālās analīzes shēma.

Operacionālās modālās analīzes laika domēnā gadījumā konstrukcijas reakcijas datus izmanto, lai izveidotu korelācijas funkcijas [93]. Izmanto autokorelācijas un krusteniskās korelācijas funkcijas. Autokorelācijas funkcijas pamatā ir signāla salīdzināšana ar tā aizkavētu versiju, pieaugot laika nobīdei. Tā kā sākotnējais signāls satur periodisku informāciju, piemēram, pašvārstību frekvences, noteiktā laikā nobīdē signāla aizkavētajai versijai būs liela korelācija ar signāla sākotnējo versiju. Šādā veidā tiek izņemts periodiskums, kas ir kopīgs starp diviem signāliem. Krusteniskās korelācijas funkcijas gadījumā, tiek salīdzināti references signāls ar signālu ar laika nobīdi, un izceļ periodiskumu, kas ir kopīgs starp signāliem no divām dažādām mērījumu vietām. Iegūtās korelācijas funkcijas ar diskrēto Furjē transformāciju pārvērš frekvenču domēnā, iegūstot korelogrammu jeb jaudas spektru, kur tiek izceltas dominējošās frekvences, kas ir kopīgas starp mērījumu vietām.

Tā kā korelācijas funkcija rada nemērogoto vērtību un ievades spēki nav izmērīti, modālās mērogošanas jēdziens OMA nepastāv [94]. Kaut arī jau pastāv vairākas pieejas, kā ar OMA iegūtās modu formas var mērogot, piemēram, papildus izmantojot uz galīgiem elementiem balstītos modeļus [95].

Tiek izvirzīta hipotēze, ka ar operacionālās modālās analīzes palīdzību ir iespējams noteikt ietekmi no defektu esamības stingrajā koka-betona savienojumā uz konstrukcijas modālajiem parametriem, jo, pētījumi rāda, ka konstrukcijas modālie parametri ir jūtīgi pret konstrukcijas bojājumiem [96]. Protams, šīs metodes pielietošanas pārseguma konstrukciju novērtēšanā ekspluatācijas laikā ir aprobežota, jo grīdas ekspluatācijas laikā ir īpaši pakļautas ārējām slodzēm, kas maina to dinamisko aprēķina shēmu.

Viena no plašāk pielietojamajām akustiskajām metodēm, materiāla defektu un struktūras izmaiņu konstatēšanai, ir ar ultraskaņas izmantošanu [97]. Ultraskaņas viļņiem ir īpašība

izplatīties taisni viendabīgā vidē. Raidītājs nosūta ultraskaņas impulsu materiālā, kur, sastopot defektus, ultraskaņas vilnis daļēji atstarojas un uztvērējs ultraskaņu svārstības pārveido elektriskajās svārstībās un atveido informāciju uz ekrāna. Šīs metodes trūkums – to var pielietot lokāli, jo vienā mērījumā tiek iegūta informācija tikai par konkrētu konstrukcijas apgabalu, kurā šis mērījums ir veikts. Ir sastopami pētījumi par ultraskaņas defektoskopiju betona konstrukcijās un koka konstrukcijās, bet pietrūkst informācijas par šīs metodes izmantošanas iespējām koka-betona kompozīta savienojuma kvalitātes kontrolei.

## 1.6. Darba mērķis un uzdevumi

Promocijas darba mērķis ir izstrādāt inovatīvas koka-betona kompozīta konstrukcijas ilgtspējīgu un drošu risinājumu, kas raksturojas ar kompozīta materiālu visefektīvāko sinerģiju un racionālu materiālu pielietojumu.

Lai īstenotu darba mērķi, ir noteikti vairāki uzdevumi.

1. Izstrādāt metodi ietekmes novērtēšanai no defektu esamības stingajā adhezīvajā savienojumā starp koksnis un betona materiāla slāņiem uz koka-betona kompozīta plātnes darbību. Identificēt bīstamus defektu izmērus. Eksperimentāli noteikt lielu savienojumu defektu ietekmi uz elementa dinamiskajiem parametriem.
2. Identificēt eksistējošo adhezīvo koka-betona savienojumu izgatavošanas metožu trūkumus. Izstrādāt inovatīvu kvalitatīvu stinga adhezīva savienojuma izgatavošanas metodi. Noteikt piedāvātas izgatavošanas metodes ietekmi uz koka-betona kompozīta elementu darbību liecē un bīdē.
3. Izstrādāt metodiku un uz tās bāzes programmatūru koka-betona kompozīta plātnēm ar pilnu kompozītdarbību starp materiālu slāņiem, kas paredzētas lietošanai dzīvojamo un biroja ēku starpstāvu pārsegumos, racionālu šķērsriezuma parametru un nepieciešamo materiālu stiprības parametru noteikšanai. Izpētīt koka-betona kompozīta pamatotas izmantošanas robežas un noteikt racionālāku koka-betona kompozīta plātnes konstruktīvu risinājumu.
4. Pārbaudīt piedāvātā savienojuma starp kompozīta materiālu slāņiem nesagraujošas kvalitātes kontroles iespējas ar operacionālo modālo analīzi un ultraskaņas defektoskopiju, lai koka-betona kompozīta konstrukciju globālā un lokālā pārbaudē noskaidrotu, vai savienojumā nav defektu.
5. Piedāvāt ilgtspējīgu un drošu koka-betona kompozīta plātnes risinājumu bez tradicionāla nepārtraukta tērauda stieģrojuma izmantošanas betona slānī. Noteikt ietekmi, ko rada sintētiskā dispersā stieģrojuma pievienošana betona sastāvam, uz koka-betona kompozīta plātnes sabrukuma ainu.



## 2. KOKA-BETONA SAVIENOJUMA KVALITĀTES IETEKME UZ KONSTRUKCIJAS UZVEDĪBU

Vislabāko efektu, apvienojot divus materiālus — koku un betonu, var iegūt, nodrošinot stingu savienojumu starp šiem slāņiem. Ņemot vērā to, ka līmēta savienojuma veidošana ir saistīta ar nekvalitatīva savienojuma veidošanas riskiem, ir svarīgi noteikt kā defekti līmētajā savienojumā var ietekmēt koka-betona kompozīta elementa īpašības un uzvedību.

### 2.1. Betona slāņa ietekme uz CLT plātnes darbību

Viens no plaši izmantotiem kokmateriāliem ir CLT plātnes. CLT ir industriāli ražota vairāku kārtu masīvkoka plātne, kas sastāv no ražošanas procesā plaknē salīmētiem perpendikulāri novietotiem dēļiem, kā rezultātā šim izstrādājumam samazinās anizotropijas līmenis, kā arī, pateicoties augstam spiedienam, kas tiek nodrošināts līmēšanas laikā, koksnes briešana un rūkšana samazinās līdz minimumam. Plātnēm tiek piedāvāts plašs izmēru klāsts, tās var izmantot arī lieliem laidumiem, eksistē ražotnes, kas izgatavo plātnes ar garumu pat lielāku par 20 metriem. Šķērsvirziena kārtaini līmētas plātnes izmanto kā saliekamos būvelementus nesošām konstrukcijām, ko ražo pēc pasūtījuma principa.

Pirmie CLT plātņu paraugi bija izgatavoti 1990-ajos gados Šveicē, Austrijā un Vācijā. Sākumā šī jaunā materiāla attīstība bija lēna, bet ar 21. gadsimta sākumu, attīstoties zaļajai domāšanai, to pielietošana sāka strauji pieaugt. Kopš 2015. gada Latvijā parādījās jau vairākas CLT ražotnes, tāpēc CLT plātnes var uzskatīt par jauno vietējo būvmateriālu no koka.

Citās valstīs šo materiālu pielieto ne tikai mazstāvu būvniecībā, bet arī daudzstāvu multifunkcionālo ēku būvniecībā. 2019. gadā bija pabeigta 18 stāvu koka ēkas būvniecība, kuras augstums sastāda 85.4 metrus, tas ir *Mjøstårnet* ēka Norvēģijā. CLT plātnes šajā ēkā tika izmantoti ēkas kopēja stinguma nodrošināšanai, kā arī liftu šahtu būvniecībai.

CLT plātnes ir pietiekami masīvs materiāls, kas rada priekšrocības šī materiāla izmantošanai starpstāvu pārsegumos. Bet fakts, ka CLT plātnēm jau pie nelieliem laidumiem par noteicošu paliek lietojamības robežstāvoklis, samazina to lietošanas pievilcību. CLT plātnēm, kas strādā liecē, ir raksturīgas lielas izlieces, kas neļauj pilnvērtīgi izmantot materiāla stiprību.

Viens no izplatītajiem starpstāvu pārsegumu risinājumiem ir grīdu izlīdzinošās masas pielietošana pirms nobeiguma apdares darbiem. Kā viens no iespējamiem grīdu izlīdzinošās masas variantiem maz noslogotām virsmām var būt uz cementa bāzes izlīdzinošā masa ar stiprības klasi, sākot jau no C20/C25. Nodrošinot izlīdzinošās kārtas un CLT starpstāvu pārseguma plātnes kopdarbību, ir iespējams panākt būtiskus uzlabojumus attiecībā uz starpstāvu pārseguma konstrukcijas deformācijām.

### 2.1.1. CLT un koka-betona deformatīvo īpašību eksperimentālās pārbaudes

Lai noteiktu betona slāņa ietekmi uz konstrukcijām no CLT plātnēm, darba ietvaros tika veiktas CLT un koka-betona kompozīta paraugu eksperimentālās pārbaudes, slogojot paraugus trīs punktu liecē līdz sabrukumam [98, 99, 73] un iegūtie rezultāti tika salīdzināti ar aprēķinātajiem.

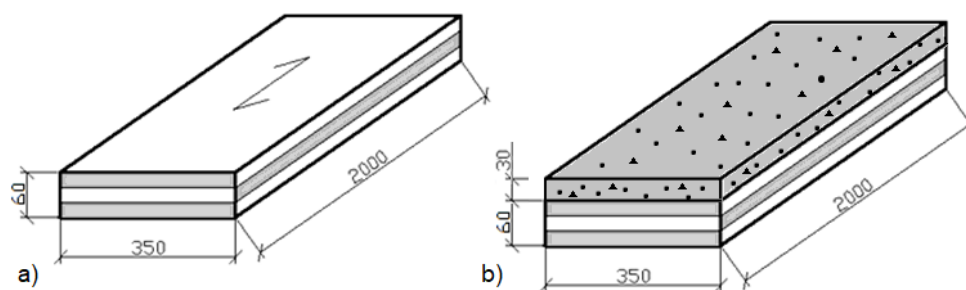
Divu veidu paraugi tika pieņemti (2.1.att.): CLT plātne ar garumu 2000 mm, platumu 350 mm un augstumu 60 mm, kas sastāv no trijām 20 mm biežām kārtām no C24 stiprības klases dēļiem un koka-betona kompozīta plātne, kas bija izgatavota pēc sausā paņēmiena, ar tāda paša izmēra CLT paneli stieptajā zonā, kurai virsū, spiestajā zonā, tika pielīmēta ar epoksīdu sveķiem Sikadur 330 iepriekš sagatavota 30 mm bieža betona plātne no grīdu izlīdzinošas masas Sakret BAM ar stiprības klasi C20. CLT plātnes ražotas *Skonto Group* ražotnē Jelgavā.

Izmantojamo materiālu deformatīvās un stiprības raksturvērtības, saskaņā ar [73], [100] un [101] ir apkopotas tabulā 2.1.

2.1. tabula

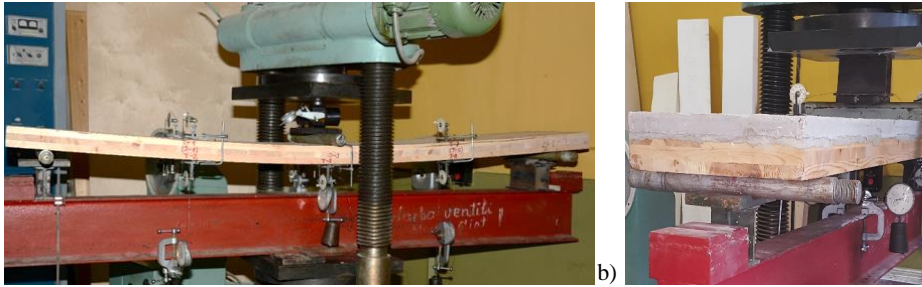
Izmantojamo materiālu deformatīvās un stiprības raksturvērtības

	CLT	Sakret BAM	Epoksīdu sveķi SikaDur 330
Deformatīvās īpašības	$E_1 = 11000 \text{ MPa}$ , $E_2 = E_3 = 370 \text{ MPa}$ , $G_{23} = 69 \text{ MPa}$ , $G_{12} = G_{13} = 690 \text{ MPa}$ ,	$E_{cm} = 30000 \text{ MPa}$ , $G = 12500 \text{ MPa}$ , $\nu = 0.2$ ,	$E_m = 3600 \text{ MPa}$ , $E_t = 4500 \text{ MPa}$ , $\nu = 0.35$ ,
Stiprības īpašības	$f_{m,k,0.05} = 24 \text{ MPa}$ , $f_{m,k,mean} = 35.8 \text{ MPa}$	$f_{cm} = 28 \text{ MPa}$ , $f_{ctm} = 2.2 \text{ MPa}$	$f_t = 30 \text{ MPa}$



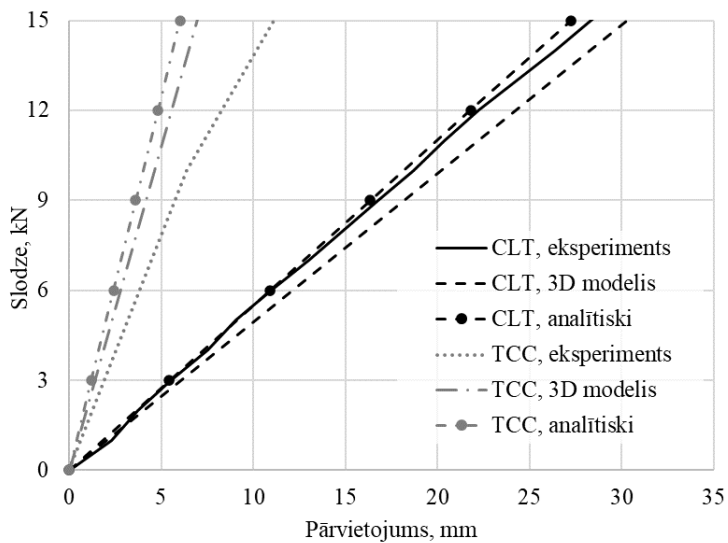
2.1. att. Paraugu gabarītmēri: a) CLT plātne; b) koka-betona kompozīts.

Laboratorijas eksperimenta slogošanas shēma CLT plātnei ir redzama 2.2. a) attēlā, plātnes laidums vienāds ar 1.8 m. Koka-betona kompozīta paraugam slogošanas shēma tika pieņemta identiska CLT paraugam (2.2. b)). Vertikālo pārvietojumu un deformāciju mērīšanai tika izmantoti izlieču mērītāji ar 1 iedaļas vērtību 0.01 mm un tenzometri ar 1 iedaļas vērtību 0.001 mm un tenzometra bāzi  $l_{(T)}=100 \text{ mm}$ .



2.2. att. a) CLT plātnes slogošana trīspunktu liecē; b) koka-betona plātnes izvietojums slogošanas iekārtā.

3D skaitlisko modeļu izstrādei tika izmantota uz galīgo elementu metodes balstīta Dlubal RFEM 5.24 programma. Cieta ķermeņa (*solid*) galīgie elementi tika izmantoti skaitliskā modeļa izstrādei. CLT elementu modelēšanai tika izmantots 3D ortotrops elastīgs materiāla modelis, betona slānim – 3D izotropas materiāla modelis. Koka-betona kompozīta plātnei tiek definēts kontakts starp betona un CLT slāņiem ar pilnu spēku nodošanu (*full force transmission*). Ir izmantots taisnstūra galīgo elementu režģis ar galīga elementa izmēru (*target length*) 0.01 m un slodze tiek pielikta pakāpeniski, 100 soļos.



2.3. att. Slodzes – vertikālo maksimālo pārvietojumu līknes.

kur TCC – koka-betona kompozīta plātne (*timber-concrete composite*); eksperiments – laboratorijas eksperimentā noteiktas vērtības; analītiski – ar vienkāršotu analītisko aprēķinu iegūtas vērtības; 3D modelis – ar GEM aprēķinātas vērtības.

Darba ietvaros eksperimentāli iegūtās, skaitliskās modelēšanas gaitā un vienkāršoti analītiski aprēķinātas slodzes-pārvietojumu līknes CLT un koka-betona kompozīta plātnēm trīs punktu liecē ir redzamas attēlā 2.3. att. Kā var redzēt no iegūtā grafika, betona slānim ir ievērojama ietekme uz konstrukcijas deformatīvajām spējām. Ja pie 15 kN lielas slodzes CLT

plātnē veidojas 28.4 mm lieli pārvietojumi, tad koka-betona kompozīta plātnei pie attiecīga slodzes līmeņa izliece laiduma vidū sastāda 11.1 mm. Tādējādi, nodrošinot kopdarbību starp CLT plātņi un 3 cm biezu izlīdzinošu grīdas masu, ir iespējams vairāk nekā 2.5 reizes samazināt izlieces laiduma vidū, kas veidojas trīs punktu liecē.

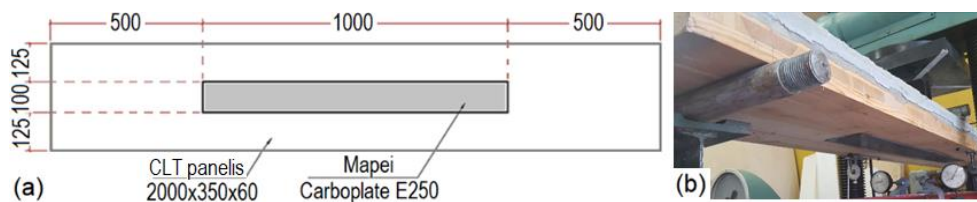
CLT plātnes aprēķins ar 3D skaitlisko modeli sniedz konservatīvākus rezultātus, maksimālā starpība starp eksperimentāli un ar izstrādāto modeli iegūto maksimālo pārvietojumu vērtībām nepārsniedz 7 %. Analītiski aprēķinātas ar reducēto šķērsriezuma metodi pārvietojumu vērtības pie mazākām slodzēm identiski apraksta parauga uzvedību, savukārt, pieaugot slodzei, analītiski aprēķinātie pārvietojumi ir līdz 4 % mazāki nekā eksperimentāli noteiktie. Kopumā, abas teorētiskās pieejas labi raksturo sakarību starp CLT plātnei pielikto slodzi un vertikālajiem maksimālajiem pārvietojumiem. CLT plātnei graujošā slodze sastādīja 22.6 kN, kas saskaņā ar analītiskajiem aprēķiniem sastāda ap 48.9 MPa lielus spriegumus, kas par 37 % pārsniedz koksnes vidējo stiprības vērtību liecē.

### 2.1.2. Koka-betona kompozīta elementa uzvedība pie defekta stingā savienojumā

Koka-betona kompozīta paraugu izgatavošanas process pēc sausās metodes bija saistīts ar problēmām kvalitatīva līmētā savienojuma starp materiālu slāņiem nodrošināšanā. Balstoties uz testēšanas laikā iegūtiem datiem, kas tika salīdzināti ar aprēķinātajiem, kā arī uz savienojuma vizuālo apsekošanu pēc koka-betona kompozīta plātnes sabrukuma, var konstatēt, ka ar sauso paņēmieni līmētā savienojuma izgatavošana starp CLT plātņi un iepriekš izgatavotas betona plāksnes ir neprognozējams process.

Vienlaicīgi ar koka-betona kompozīta parauga izgatavošanu, tika izgatavots identisks paraugs, kas tika pastiprināts stieptajā pusē ar oglekļa šķiedras Mapei Carboplate E250 loksnī 1.4 mm biezumā (2.4. att.). Ar sekojošajām deformatīvajām un stiprības raksturvērtībām [102]:

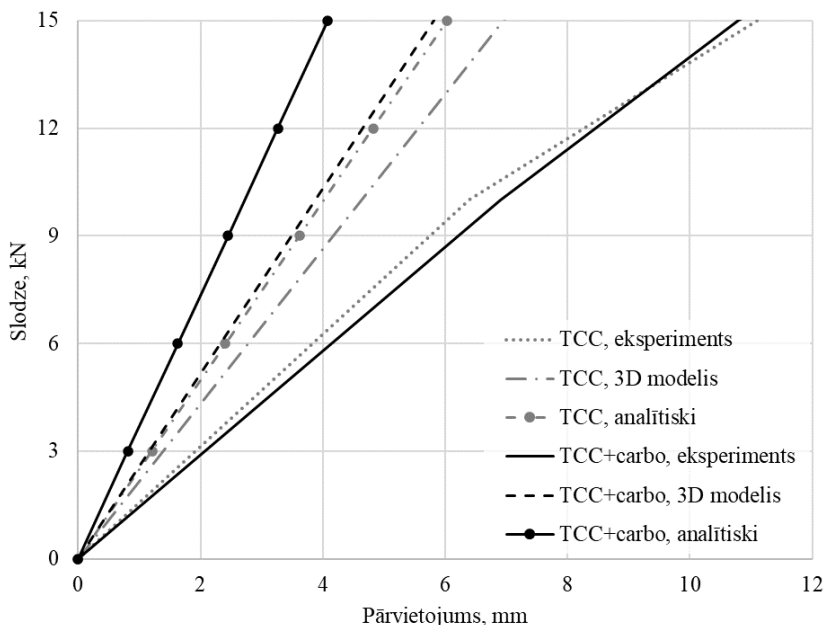
$$E_{mean} = 250000 \text{ MPa}, \varepsilon_u = 0.95 \%, \\ f_t = 250 \text{ MPa}, f_v = 79 \text{ MPa}$$



2.4. att. Koka-betona kompozīta paraugs ar oglekļa šķiedru Carboplate E250 loksnī: a) pastiprinājuma loksnes dimensijas un izvietojums, b) parauga izvietojums slodzes iekārtā.

Oglekļa šķiedras lente tika izmantota ar mērķi palielināt plātnes nestspēju, nemainot plātnes gabarītmērus. Izmantojamā pastiprinošā loksnē parauga stieptajā pusē, saskaņā ar vienkāršotiem analītiskajiem aprēķiniem, lokāli palielina kopējo koka-betona kompozīta ar stingu savienojumu parauga šķērsriezuma efektīvo stingumu 1.48 reizes. Kas nozīmē, ka pie vienāda pieliktas slodzes līmeņa maksimālajiem pārvietojumiem laiduma vidū būtu

jāsamazinās. Attēlā 2.5. ir redzamas eksperimentāli iegūtas, skaitliskās modelēšanas gaitā un analītiski vienkāršoti aprēķinātas slodzes-pārvietojumu līknes koka-betona kompozīta plātnēm ar un bez oglekļa šķiedru loksnes plātnes stieptajā pusē trīs punktu lieces slogojumā.



2.5. att. Slodzes – vertikālo maksimālo pārvietojumu līknes.

kur TCC – koka-betona kompozīta plātnē (*timber-concrete composite*); *carbo* – oglekļa šķiedru loksne; eksperiments – laboratorijas eksperimentā noteiktas vērtības; analītiski – ar vienkāršotu analītisko aprēķinu iegūtas vērtības; 3D modelis – ar GEM aprēķinātas vērtības.

Kā var redzēt no 2.5. attēla, koka-betona kompozīta paraugs ar oglekļa loksnes pastiprinājumu uzvedās padevīgāk nekā to apraksta teorētiskie aprēķini. Koka-betona paraugam ar oglekļa šķiedru loksnes pastiprinājumu eksperimentāli noteikti pārvietojumi krasi neatšķiras no maksimālajiem vertikālajiem pārvietojumiem, kas tika noteikti koka-betona kompozīta paraugam bez papildus pastiprinājuma. Starpība starp eksperimentāli iegūtajām maksimālo pārvietojumu vērtībām un aprēķinātajām vērtībām, abu veidu paraugiem, ir apkopota 2.2 tabulā.

2.2. tabula

Eksperimentāli iegūto maksimālo pārvietojumu salīdzinājums ar aprēķinātajiem pie 15 kN slodzes līmeņa

	$\Delta_{\text{analītiski}}, \%$	$\Delta_{\text{3Dmodelis}}, \%$
TCC	45.7	26.2
TCC+carbo	62.2	45.4

Piezīme: apzīmējumi saskaņā ar 2.5 attēlu.

Būtiskā atšķirība starp paraugu faktisko uzvedību no prognozējamās norāda uz elementa mazāku stingumu. Ņemot vērā to, ka koka-betona elementa lieces stingumu ietekmē savienojuma starp koka un betona slāņiem stingums, šo paraugu uzvedība norāda uz problēmām līmēta savienojuma kvalitātē. Balstoties uz parauga uzvedību, iegūto savienojumu starp betona un CLT slāņiem nevar raksturot kā stingu un var secināt par defektu esamību līmētājā savienojumā.

Koka-betona kompozīta parauga izskats pēc slogošanas un betona slāņa atdalīšanās ir redzams attēlā 2.6. No attēla var redzēt, ka kvalitatīvs līmēts savienojums izveidojas mazāk nekā uz 25 % no visas redzamas savienojama virsmas. Šādu konstrukciju izgatavošana ir bīstama, jo izgatavoto koka-betona kompozīta paraugu uzvedība krasi atšķiras no projektējamās uz sliktāko pusi.

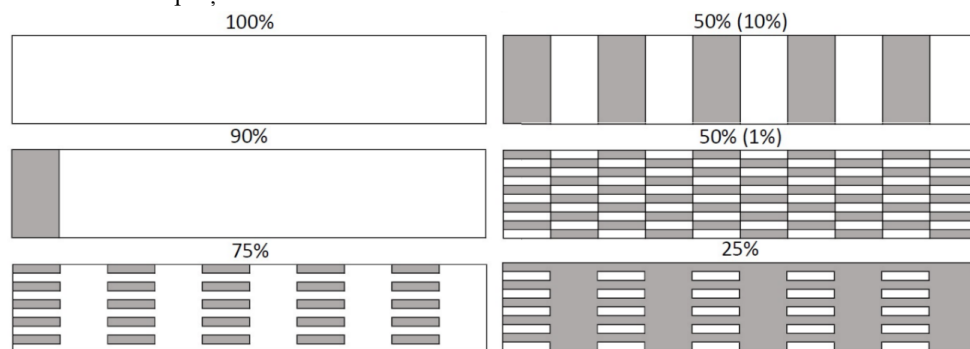


2.6. att. Koka-betona kompozīta parauga izskats pēc sabrukuma.

Kaut arī koka-betona kompozīta elementa līmētā savienojuma trauslums nav koka-betona konstrukciju sabrukuma pamatveids, tomēr savienojuma kvalitātei ir noteicošā loma konstrukcijas kopējā darbībā. Darbā veikto laboratorijas eksperimentu rezultātā ir konstatēta potenciālā savienojumu defektu veidošanās bīstamība. Savstarpēji salīmējot pēc savas dabas dažādus masīvus materiālu slāņus, ir grūti nodrošināt pilnu šo slāņu kontaktu. Savukārt, savienojuma defektu gadījumā pat papildus pastiprinājums oglekļa šķiedru loksnes veidā nedod gaidāmo efektu.

## 2.2. Savienojuma defektu ietekme uz koka-betona elementa enerģijas absorbciju

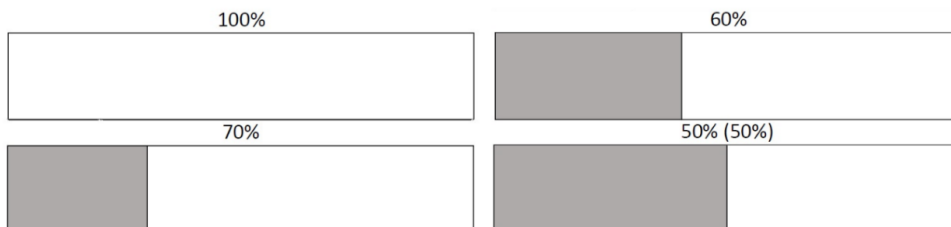
Ar nolūku noteikt līmēta savienojuma defektu ietekmi uz liecē strādājošā koka-betona kompozīta elementa uzvedību, darba ietvaros tiek piedāvāta metodika dažāda daudzuma un lieluma defektu ietekmes novērtēšanai, aplūkojot slodzes-pārvietojumu līknes pie dažādām kvalitatīvas kontaktvirsmas starp betona un koka slāņiem platībām gan atkarībā no tās kopējā daudzuma, gan no atsevišķa defekta lieluma. Piedāvātās metodikas pamatā ir uz galīgo elementu metodes balstīto vairāku koka-betona kompozīta elementa 3D skaitlisko modeļu izstrāde ar dažāda izmēra un kopējās platības, attiecībā pret kopējo savienojuma virsmas platību, defektiem savienojumā un iegūto slodžu-pārvietojumu līkņu salīdzinājums ar etalona slodžu-pārvietojumu līkni, kas iegūta no 3D skaitliskā modeļa koka-betona elementam ar pilno mijiedarbību starp betona un koka slāņiem. Kvalitatīvs savienojums starp betona un koka slāņiem tika definēts ar pilnu spēka pārnesei, bet nesalīmētajās zonās, kur veidojas defekts, – bez spēka pārnesei starp slāņiem. Par pamatu 3D skaitlisko modeļu izstrādei ir izmantoti koka-betona kompozīta paraugi, kas ir apskatīti 2.1.2. sadaļā, kas dod iespēju novērtēt savienojuma defektu ietekmes uz koka-betona plātnes uzvedību analizē iegūtos rezultātus ar laboratorijas eksperimentā iegūtajiem datiem. Elementu 3D modeļu izstrādei ir izmantota Dlubal RFEM 5.24 datorprogramma. Betona slānis ir modelēts ar Dlubal RFEM 5.24 datorprogrammas piedāvāto nelineāro materiāla modeli jeb 3D izotropu *Mazāra* bojājumu materiāla modeli ar nelineārām spriegumu-deformāciju līknēm, kas ievērtē materiāla bojājumu. Ir izmantots taisnstūra galīgo elementu režģis ar galīga elementa izmēru 0.01–0.02 m, slodze tiek pielikta 100 soļos. Paraugi gan laboratorijas, gan skaitliskajā eksperimentā ir slogoti trīs punktu liecē. Attēlos 2.7 un 2.8 ir apkopotas apskatāmo kvalitatīvo līmētu laukumu pieņemtās izvietojanas shēmas.



2.7. att. Kvalitatīvo līmēto laukumu izvietojanas shēmas, kur nesalīmētos laukumus (pelēkā krāsā) veido daudzi laukumiņi ar garumu 10 % no parauga garuma.

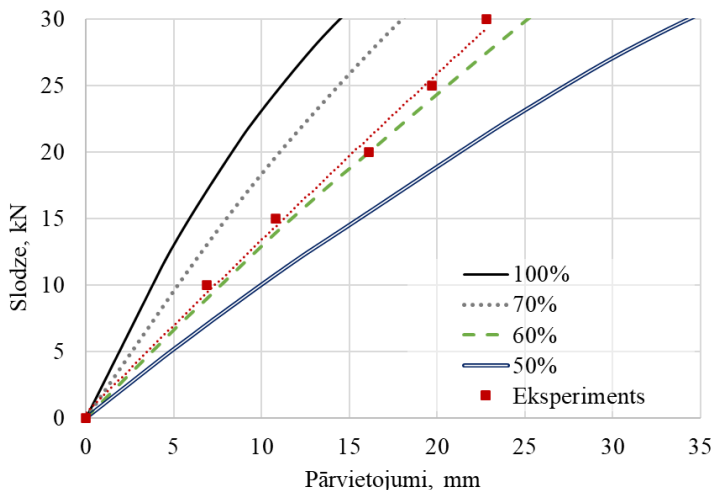
Pētījuma pirmajā piegājienā ir noteiktas slodzes-pārvietojumu līknes pie 90 %, 75 %, 50 % un 25 % lielām kvalitatīvas kontaktvirsmas laukumu plātībām no kopēja savienojuma virsmas laukuma, tādā veidā, ka nekvalitatīvi salīmēta laukumiņa garums sastāda 10 % no visa parauga garuma. Saskaņā ar iegūtajiem datiem, pie kvalitatīvo līmēto laukumu

izvietošanas shēmām 90 %, 75 %, 50 % (10 %), un 50 % (1 %) slodzes-pārvietojumu līknes ir gandrīz identiskas ar 100% kvalitatīvu savienojumu, maksimālo pārvietojumu vērtību atšķirības nepārsniedz 4.3 %. Tādējādi, defekti ar garumu līdz 10 % no parauga kopējā garuma neatstāj efektu uz parauga enerģijas absorbciju, ko nosaka kā laukumu zem slodzes-pārvietojumu līknes.



2.8. att. Kvalitatīvo līmēto laukumu izvietošanas shēmas, kur nesalīmēto laukumu veido viens, pēc platības liels, laukums, kas ir aizkrāsots pelēks.

Pētījuma otrajā piegāzienā ir veikti aprēķini ar nolūku iegūt slodzes-pārvietojumu līknes pie 30 %, 40 % un 50 % lieliem defektu laukumiem no kopēja savienojuma virsmas laukuma, tādā veidā, ka nekvalitatīvi salīmēts laukums veido vienu lielu laukumu ar garumu no 30 līdz 50 % no parauga kopēja garuma (2.8. att.). Saskaņā ar paveiktiem aprēķiniem, laukumi, bez adhēzīvās saites starp betona un koka slāņiem, ar platību no 30 % līdz 50 % no visas savienojuma virsmas platības, salīdzinājumā ar 100 % kvalitatīvu savienojumu, ievērojami palielina maksimālus pārvietojumus elementa laiduma vidū (2.9. att.). Tā pie defektu platības 30 %, 40 % un 50 % no visas savienojuma virsmas platības veidojas attiecīgi par 24 %, 72 % un 137 % lielāki pārvietojumi nekā pie 100 % kvalitatīva savienojuma.



2.9. att. Slodzes-pārvietojumu līknes pie 100 % kvalitatīva savienojuma un pie laukumiem bez adhēzijas saites 30 %, 40 % un 50 % lielumā no visas savienojuma virsmas, kā arī eksperimentā iegūtā līkne paraugam, kura sabrukuma ainu var redzēt attēlā 2.6.

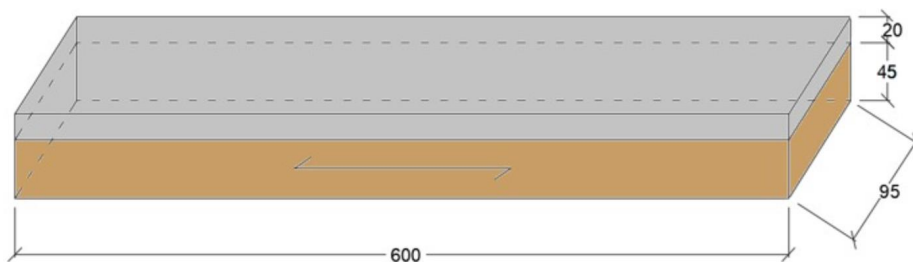


Attēlā 2.9 ir ievietota laboratorijas eksperimentā iegūtā slodzes-pārvietojuma līkne pēc sausās metodes izgatavotajam koka-betona paraugam. Kā var redzēt, eksperimentāli iegūtā parauga slodzes-pārvietojumu līkne ir tuva līknei, kas saskaņā ar skaitliskajā modelēšanā iegūtajiem datiem, atbilst 40 % lielam laukumam bez adhēzijas starp betona un koka slāņiem, kas papildus pierāda kvalitatīva līmēta savienojuma nozīmi un izskaidro krasi atšķirīgu paraugu uzvedību, kas ir izgatavoti pēc sausas tehnoloģijas, savstarpēji salīdzinot koka slāni ar iepriekš izgatavotu betona plātni, no prognozējamās uzvedības koka-betona elementam ar 100% kvalitatīvu savienojumu starp slāņiem.

Paveiktais pētījums ļauj secināt, ka strādājot liecē, koka-betona kompozīta elementa enerģijas absorbciju ietekmē nevis kopējā kvalitatīvas kontaktvirsmas attiecība pret visu savienojuma virsmas platību, bet atsevišķo laukumu ar defektu platības lielums. Pa visu platumu caurejoši lieli laukumi bez adhēzīvās saites starp slāņiem būtiski samazina plātnes enerģijas absorbciju, kas tika novērots arī eksperimentāli, testējot pēc klasiskās sausās metodes, izgatavo koka-betona kompozītu, trīs punktu liecē. Izmantojot klasisko sauso koka-betona kompozīta izgatavošanas tehnoloģiju, kontaktzonas platība būs atkarīga no savienojuma izgatavošanas kvalitātes un, kā rāda prakse, tās lielums būs grūti prognozējams.

### 2.3. Savienojuma defektu ietekme uz koka-betona elementa dinamiskiem parametriem

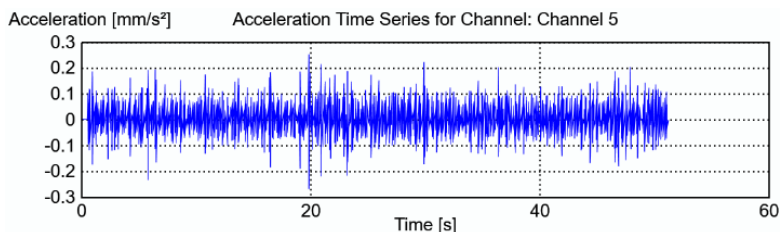
Lai noteiktu vai defekti līmētajā savienojumā starp betona un koksnes slāņiem ietekmē konstrukcijas dinamiskos parametrus, ir izgatavota mazgabarītu 16 paraugu sērija ar un bez iestrādātajiem defektiem savienojumā un ar operacionālās modālās analīzes palīdzību ir noteikti un salīdzināti abu paraugu veidu dinamiskie parametri. Paraugu gabarītmēri ir redzami attēlā 2.10. Defekts savienojumā veido 40 % no visas savienojuma platības. Šāda izmēra defekts var izveidoties, piemēram, ražošanas tehnoloģiskā procesa neievērošanas dēļ un saskaņā ar veiktajiem aprēķiniem (sadaļa 2.2) var izraisīt konstrukcijas uzvedību, kas krasi atšķiras no projektētās. Izgatavoto paraugu apraksts, operacionālās modālās analīzes testēšanas gaita, iegūto rezultātu apstrāde un novērtējums sīkāk ir aplūkoti darba 5.1.1–5.1.4 sadaļās.



2.10. att. Paraugu gabarītmēri dinamisku parametru noteikšanai.

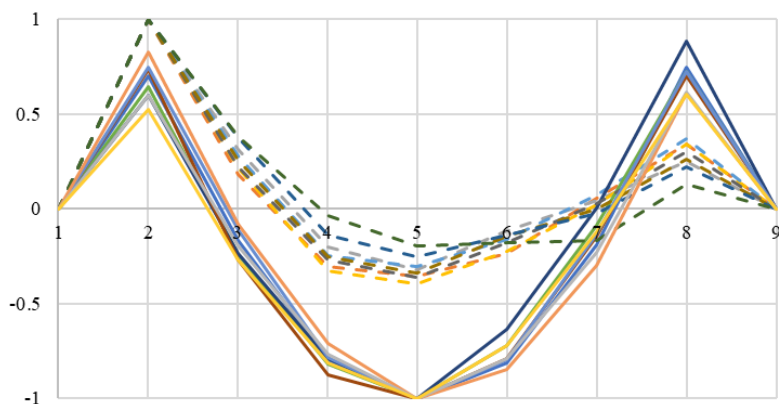
Koka-betona kompozīta paraugu atbildes reakcijas uz balto troksni ir fiksētas ar 6 akselerometru palīdzību, kas bija izvietoti pa parauga viduslīniju. Eksperimenta laikā datu

ieraksts ir veikts ar datorprogrammas QuickDAQ palīdzību. No ieraksta paātrinājums-laiks (2.11 att.) ar datorprogrammas ARTeMIS Modal palīdzību ir iegūti paraugu dinamiskie parametri, proti, pašsvārstību frekvence, rimšanas koeficients un modas forma. Minētie parametri ir noteikti pirmajām trijām modām.



2.11. att. Paātrinājuma – laika neapstrādāts ieraksts vienam no sensoriem.

Izvērtējot pēc divām dažādām metodēm iegūtus dinamiskus parametrus, ir konstatēts ka vislielāko un acīmredzamo ietekmi apskatāmais defekta veids atstāj uz 3. modas formu. Attēlā 2.12 ir apkopotas normalizētās 3. modas formas visiem 16 paraugiem. Paraugiem bez defekta ir raksturīga simetriskā modas forma ar 3 pusvilņiem ar maksimumu vidējā sensora vietā. Paraugiem ar defektu modas forma paliek nesimetriska, maksimums tiek sasniegts pirmajā pusvilnī defekta pusē.



2.12. att. Normalizētas 3. modas formas paraugiem bez defekta (nepārtrauktās līnijas) un ar defektu (raustītās līnija).

Tādējādi, pēc platības lieli defekti stingajā savienojumā starp betona un koksnes slāņiem atstāj ietekmi arī uz koka-betona kompozīta konstrukcijas dinamiskajiem parametriem. Kas nozīmē, ka pastāv iespēja modālas analīzes pielietošanai koka-betona kompozīta elementu nesagraujošās kvalitātes pārbaudēs.

### 3. PIEDĀVĀTĀ INOVATĪVĀ ADHEZĪVĀ SAVIENOJUMA IZGATAVOŠANAS TEHNOLOĢIJA

Šobrīd pazīstamajām divām līmēto savienojumu izstrādes tehnoloģijām ir būtiski trūkumi. Gan līmētā savienojuma veidošana ar sauso paņēmienu, savstarpēji salīmējot kokmateriāla slāni ar gatavu betona plātni, gan arī ar mitro paņēmienu – ar svaigā betona maisījuma liešanu uz svaigi uzklāto līmes kārtu, ir saistīta ar augstiem defektu veidošanas riskiem līmētajā savienojumā. Pirmajā gadījumā tie veidojas dēļ sarežģītībām pilna kontakta nodrošināšanā starp diviem masīviem materiālu slāņiem. Otrajā gadījumā – pastāv svaigi uzklāta līmes slāņa nobīdes risks betona liešanas laikā. Abos gadījumos parauga vizuāla apsekošana neļauj viennozīmīgi prognozēt gatava produkta kvalitāti. Kā bija noteikts iepriekšējā nodaļā, savienojuma kvalitātei ir būtiska loma konstrukcijas kopējā uzvedībā. Līdz ar to, lai stingrie savienojumi koka-betona risinājumos kļūtu plašāk pielietojami, ir svarīgi piedāvāt optimālāko savienojuma ražošanas tehnoloģiju.

#### 3.1. Šķembu metode stingra savienojuma izgatavošanai

Kvalitatīva stingra koka-betona savienojuma izgatavošanai, darba ietvaros tiek piedāvāta granīta šķembu izmantošana līmētā savienojuma nodrošināšanai starp betona un koka slāņiem. Piedāvātā stingra savienojuma starp koknes un betona slāņiem izgatavošanas tehnoloģija ir nosaukta par *šķembu metodi*. Šķembu metode paredz koknes slānim pielīmēt ar epoksīda sveķu palīdzību šķembas (3.1 att.) un pēc līmes nožūšanas virsū ieliet svaigā smalkgraudainā betona slāni. Tādējādi, ir paredzēts, ka tiek būtiski samazināti koka-betona kompozīta konstrukciju stingra savienojuma nozīmīgu defektu veidošanas riski, jo atsevišķo šķembu, kurām iespējams izveidojas zemas kvalitātes līmēts savienojums ar koka slāni, ietekme uz kopējo savienojuma kvalitāti ir neliela. Iespējamā viena defekta laukums sastāda procentuāli niecīgu daļu no kopēja savienojuma virsmas laukuma, un ir vienāds ar vienas šķembas skaldnes laukumu.

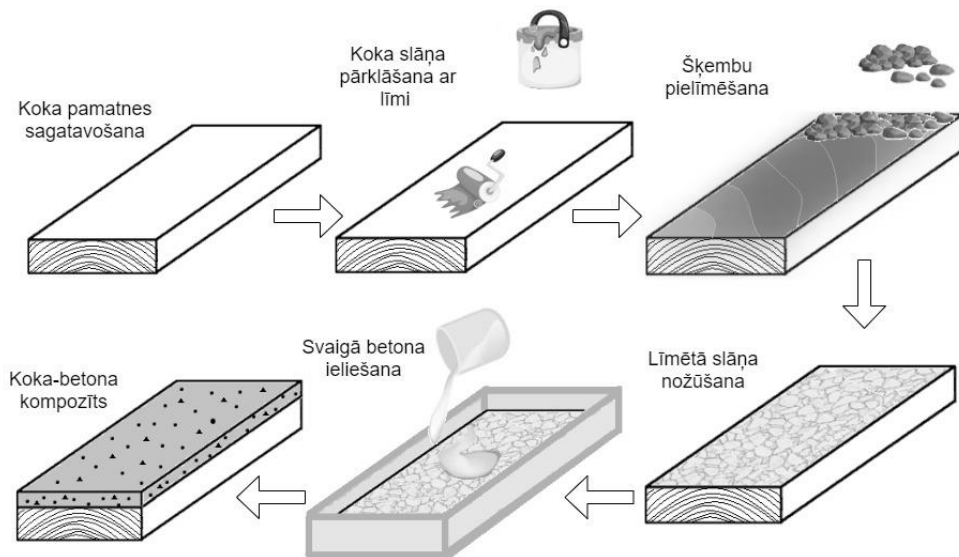


3.1. att. Koknes slānim pielīmētās šķembas.

Šī piedāvātā stingra savienojuma izgatavošanas tehnoloģija, pateicoties nelielam šķembu izmēram, nodrošina iespēju līmētā savienojuma vizuālajai kontrolei un savienojuma starp koknes un šķembām mehāniskajai pārbaudei, piemēram, ar cietas birstes palīdzību, pirms svaigā betona ieliešanas procesa. Savukārt saite starp šķembām un betona slāni veidojas dabiskā procesā kā kombinācija no ķīmiskās reakcijas starp cementa masu un šķembām kā

betona pildvielu, kā arī cementa hidratācijas produktu mehāniskās enkurošanās ar šķembu virsmu [103, 104].

Attēlā 3.2. ir shematiski parādīta stinga savienojuma izgatavošanas tehnoloģija. Pirmais solis koka-betona kompozīta izgatavošanā paredz koka slāņa sagatavošanu, kas var būt veidots no CLT plātnēm, dēļiem, ribotam plātnēm no koka sijām ar saplāksni un tamlīdzīgiem elementiem. Koka slāņa virsmai jābūt noslīpētai un tīrai, atbrīvotai no putekļiem. Saskaņā ar instrukciju tiek iemaisīta epoksīda sveķu līme. Sagatavotā līme ar špakteļlāpstiņu, rullīti vai otu tiek vienmērīgi uzklāta uz koka slāņa. Nākamais solis ir iepriekš nofirītu un sausu šķembu uzklāšana vienā vienmērīgā slānī uz iepriekš izveidotās vēl mitrās līmes kārtas 60 minūšu laikā (+23°C temperatūrā) pēc tās izveidošanas. Pie šķembu frakcijas 16–25 mm aptuvenais šķembu patēriņš ir 14-17 kg/m<sup>3</sup>. Jāļauj izžūt līmētām slānim vismaz 12 stundas. Pēc līmes izžūšanas, tiek ieliets svaigā betona slānis. Ir iespējams veidot iepriekš sagatavotas rūpnieciski ražotas saliekamas konstrukcijas vai ieliet betona slāni “uz vietas” būvlaukumā. Veidojot atsevišķas koka-betona kompozīta plātnes, betona slāņa ieliešanai izmanto veidņus. Līdz betona sacietēšanai jānodrošina plātnes atrašanos uz horizontālas virsmas, vai, lejot betonu uz vietas, starpstāvu pārsegumu gadījumā, jānodrošina koka slāņa atbalstu no apakšas. Pilnu slodzi izgatavotais koka-betona kompozīts saskaņā ar 2. Eirokodeksu spēj uzņemt pēc 28 dienām no betona ieliešanas brīža.



3.2. att. Adhezivā savienojuma ar šķembām izgatavošanas tehnoloģijas shēma.

### 3.2. Pēc šķembu metodes izgatavotu plātņu pārbaude liecē

Lai pārbaudītu izvirzīto hipotēzi par augstas kvalitātes līmēta savienojuma izgatavošanu, izmantojot koka virsmai iepriekš pielīmētās šķembas, tika izveidoti trīs koka-betona kompozīta plātnes ar laidumu 1.8 m un platumu 350 mm saskaņā ar 3.1 sadaļā aprakstītu izgatavošanas tehnoloģiju [105]. Paraugi tika veidoti ar identiskiem iepriekš testēto paraugu

(nod. 2.1.2.) parametriem, savienojumam izmantojot 16–25 mm frakcijas granīta šķembas un Sikadur 330 epoksīda sveķus. Koka-betona kompozīta paraugi tika slogots trīs-punktu liecē. Viena no paraugu sabrukuma ainām ir redzama 3.3. attēlā.



3.3. att. Koka-betona kompozīta parauga ar pastiprinošu oglekļa šķiedras loksni sabrukuma aina.

Sloģošanas procesā iegūto datu statistiskā apstrāde iekļauj sevī vidējo aritmētisko vērtību un standartnovirzes noteikšanu, kā arī vērtību variācijas koeficientu un līkņu korelācijas koeficientu aprēķinu saskaņā ar formulām (3.1)–(3.4).

Vidējā aritmētiskā vērtība  $x_{vid}$  tiek aprēķināta pēc formulas:

$$x_{vid} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (3.1)$$

kur  $x_i$  – apskatāmā izlieces vērtība  $i$ -tam paraugam, mm;

$n$  – kopējais paraugu skaits.

Vidējās vērtības vidējo kvadrātisko novirzi jeb standartnovirzi aprēķina pēc formulas:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{vid})^2}{(n - 1)}} \quad (3.2)$$

kur  $x_i$  – apskatāmā izlieces vērtība  $i$ -tam paraugam, mm;

$n$  – kopējais paraugu skaits;

$x_{vid}$  – vidējā aritmētiskā vērtība starp  $n$  paraugiem.

Variācijas jeb dispersijas koeficientu  $c_v$  aprēķina pēc formulas:

$$c_v = \frac{s}{x_{vid}} \quad (3.3)$$

kur  $s$  – standartnovirze;

$x_{vid}$  – vidējā aritmētiskā vērtība starp  $n$  paraugiem.

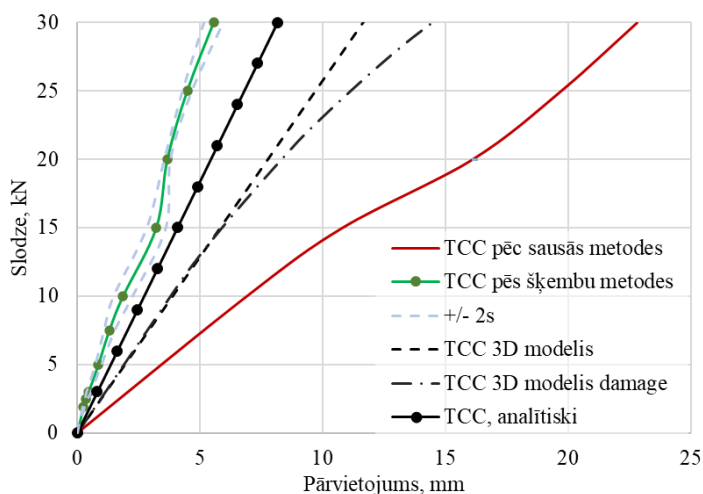
Korelācijas koeficientu  $\rho_{a,b}$  starp divu paraugu pārvietojumu līknēm  $a$  un  $b$  nosaka pēc formulas:

$$\rho_{a,b} = \frac{\sum_{i=1}^n (a_i - a_{vid}) \cdot (b_i - b_{vid})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (a_i - a_{vid})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (b_i - b_{vid})^2}} \quad (3.4)$$

kur  $a_i$  un  $b_i$  – izlieces vērtība paraugam  $a$  vai  $b$  pie slodzes līmeņa  $i$ ;

$a_{vid}$  un  $b_{vid}$  – izlieces vidējā aritmētiskā vērtība paraugam  $a$  vai  $b$  pie starp visiem slodzes līmeņiem.

Slodzes-pārvietojumu līknes koka-betona kompozīta plātnēm ar un bez šķembu slāņa trīs punktu liecē ir redzamas attēlā 3.4. Starp iegūtajām slodzes-pārvietojumu līknēm visiem paraugiem, kas bija izgatavoti pēc jaunās piedāvātās šķembu metodes ir noteikts 99.9 % augsts korelācijas koeficients, kas norāda uz augstu tiešu sakarību starp eksperimentāli iegūtajām vērtībām visiem paraugiem. Variācijas koeficients atsevišķiem grafika punktiem nepārsniedz 10 % un vidēji sastāda 6.5 %, kas norāda uz iegūto datu viendabīgumu. Slodzes-pārvietojumu līknes koka-betona kompozīta plātnēm ar un bez šķembu slāņa ir iegūtas eksperimentāli, slodzes-pārvietojumu līknes koka-betona kompozītam ar stingu savienojumu ir iegūtas vienkāršotā analītiskā aprēķina ceļā un ar galīgo elementu metodi (GEM) ar skaitlisko 3D modeli diviem gadījumiem – izmantojot betona slānim vienkāršotu izotropu materiāla modeli un izotropu materiāla modeli, kas ievērtē bojājumu (*damage*) jeb betona slāņa degradāciju ar mainīgo elastības moduli konstrukcijas sloģošanas laikā.



3.4. att. Slodzes – vertikālo maksimālo pārvietojumu līknes.

kur TCC – koka-betona kompozīta plātne; pēc sausās / šķembu metodes – eksperimentāli iegūtās vērtības pēc attiecīgās metodes izgatavotiem paraugiem; +/- 2s – slodzes – pārvietojumu līknes vidējās vērtības ar 2 standartnovirzēm TCC pēc šķembu metodes paraugiem; 3D modelis – ar GEM aprēķināta līkne, neievērojot betona degradāciju; 3D modelis *damage* – ar GEM aprēķināta līkne, izmantojot izotropu materiāla modeli kas ievērtē betona bojājumu sloģošanas laikā; analītiski – ar vienkāršotu analītisko aprēķinu iegūtās vērtības.

Kā jau iepriekš bija konstatēts, koka-betona kompozīta plātnē bez šķembām, kura raksturojās ar ievērojamajiem defektiem savienojumā, attīstās krietni lielāki pārvietojumi nekā aprēķinos iegūtie, pie 30 kN lielas slodzes eksperimentāli noteiktie pārvietojumi sastāda 22.8 mm, kas ir par 52 % vairāk, nekā aprēķinātie ar 3D *damage* modeli. Šī parauga graužoša slodze sastādīja 32 kN.

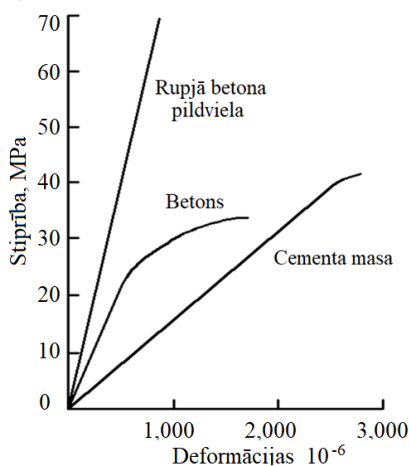
Koka-betona kompozīta, ar šķembām stinga savienojuma nodrošināšanai, uzvedība krasi atšķiras no parauga bez šķembām. Paragi ar piedāvāto stinga savienojuma risinājumu parādīja gan augstāku nestspēju – graužoša slodze vidēji sastādīja 40 kN, kas ir par 25 %

vairāk nekā paraugam bez šķembām; gan arī mazas izlieces no pieliktās slodzes. Pie 30 kN lielas pieliktas slodzes eksperimentāli noteiktas izlieces laiduma vidū nepārsniedza 1/300 daļu no parauga laiduma.

Iegūtie paraugi ar šķembru izmantošanu adhezīvā savienojuma veidošanā parāda stingāku uzvedību, nekā aprēķina modeļi koka-betona kompozīta elementiem ar stingu koka un betona slāņu savstarpēju savienojumu. Tas dod pamatu uzskatīt, ka koka-betona kompozīta aprēķina modeļu ar stingu savienojumu izmantošana pēc piedāvātās šķembru metodes izgatavotu koka-betona konstrukciju aprēķiniem ir droša.

### 3.3. Šķembru ietekme uz betona slāņa mehāniskajām īpašībām

Attēlā 3.4. redzamajai koka-betona kompozīta paraugu ar šķembām slodzes-pārvietojumu līknei ir novērojamas līknes rakstura izmaiņas pie lielākām slodzēm. Sasniedzot 15 kN slodzes līmeni, kad, balstoties uz GEM skaitliskajiem aprēķiniem ar materiāla modeli, kas ievērtē betona degradāciju slogošanas laikā, koka-betona kompozīta parauga stingumam būtu jāsamazinās, testējamā parauga stingums nedaudz palielinās. Šī parādība ir izskaidrojamā ar granīta šķembru klātbūtni. Kā var redzēt attēlā 3.5. rupjo betona pildvielu stiprība ir daudz augstāka par cementa masas stiprību. Piedāvātas stingu savienojumu izstrādes tehnoloģijas gadījumā, šķembas ne tikai nodrošina kvalitatīvu savienojumu starp betona un koksnes slāņiem, bet arī lokāli pilda rupjās betona pildvielas funkcijas, tādējādi uzlabojot betona stiprību savienojuma tuvumā.

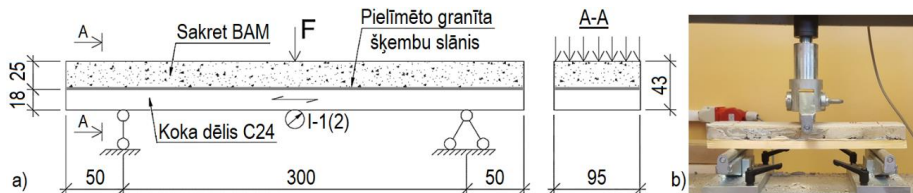


3.5. att. Spriegumu-deformāciju līknes cementa masai, rupjajai pildvielai un betonam [106].

Ar mērķi pārbaudīt šķembru frakcijas ietekmi uz grīdu izlīdzinošās masas Sakret BAM mehāniskajām īpašībām tika izveidoti mazgabarīti koka-betona kompozīta paraugi ar trīs granīta šķembru frakciju veidiem [98], [107].

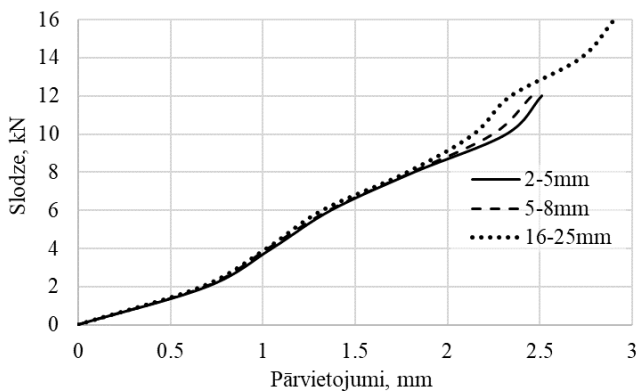
Katrai granīta šķembru frakcijai tika notestēti trīs punktu liecē līdz sabrukumam pa 4 paraugiem. Mazgabarīta paraugu slogošanas shēma ar dimensijām un to izvietojums slogošanas iekārtā ir redzami 3.6. attēlā. Viena parauga kopējais garums ir 400 mm, laidums

300 mm, augstums un platums attiecīgi 43 un 95 mm. Paraugi tika veidoti no C24 klases koka dēļiem ar šķērsriezumu 18x95 mm stieptajā zonā un 25 mm bieza slāņa no grīdu izlīdzinošas masas Sakret BAM ar stiprības klasi C20 spiestajā zonā. Šķembu pielīmēšanai pie koka slāņa virsmas vienmērīgā kārtā tika izmantota epoksīda sveķu līme Sikadur 330. Izmantojamo granīta šķembu frakcijas ir 2–5 mm, 5–8 mm un 16–25 mm.



3.6. att. Mazgabarīta paraugu a) slogošana shēma un izmēri; b) izvietojums slogošanas iekārtā.

Laboratorijas eksperimentā iegūtās slodzes-pārvietojumu līknes mazgabarīta koka-betona paraugiem ir redzamas 3.7. attēlā. Starp iegūtajām slodzes-pārvietojumu līknēm paraugiem ar dažādas frakcijas šķembām ir iegūts 99.9 % liels korelācijas koeficients. Visām paraugu sērijām ir raksturīgs iegūto datu viendabīgums savas sērijas ietvaros. Variācijas koeficients paraugiem ar šķembu frakciju 2–5 mm, 5–8 mm un 16–25 mm ir attiecīgi zem 4.5 %, 1.6 % un 9.3 %.



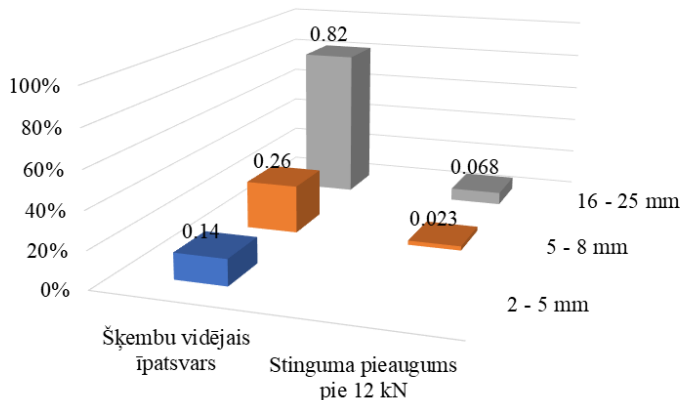
3.7. att. Slodzes-pārvietojumu līknes mazgabarītiem koka-betona kompozīta paraugiem ar dažādām granīta šķembu frakcijām.

Vidējā graužošā slodze paraugiem ar šķembu frakciju 2–5 mm un 5–8 mm bija diezgan līdzīga, attiecīgi 12.05 kN un 12.85 kN, savukārt pie šķembu frakcijas 16–25 mm bija novērojams parauga nestspējas pieaugums par vairāk nekā 30 %, graužošā slodze sastādīja 16.2 kN. Mehānisko īpašību uzlabojumu pie lielākām pildvielu frakcijām apstiprina arī citi eksperimentālie pētījumi [108, 109].

Kā var redzēt no grafika, līdz aptuveni 8 kN slodzes līmenim visu 12 paraugu uzvedība ir gandrīz identiska. Palielinoties pieliktās slodzes līmenim, pie lielākām šķembu frakcijām ir



novērojama paraugu nedaudz stingāka uzvedība, kas ir izskaidrojama ar šķembu lielāku īpatsvaru betona slānī (3.8 att.).



3.8. att. Šķembu frakcijas vidējais īpatsvars pret betona slāņa augstumu un paraugu stinguma pieaugums pie 12 kN slodzes salīdzinājumā ar 2–5 mm šķembu frakcijas paraugiem.

Ņemot vērā, saskaņā ar eksperimenta gaitā noteiktu zemu paraugu stinguma pieaugumu, palielinoties šķembu frakcijai, var secināt, ka šķembu frakcijas izmēram nav noteicošā loma pēc šķembu metodes ražotās koka-betona kompozīta plātnes, kas strādā liecē, uzvedībā.

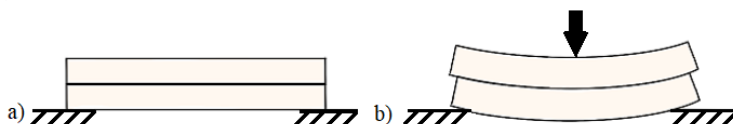


3.9. att. Mazgabarītu koka-betona paraugu sabrukuma ainas, kas bija ražoti pēc: a) sausās metodes; b) piedāvātās šķembu metodes.

Līdzīgi kā nodaļā 2.1 aprakstītiem paraugiem ar laidumu 1.8 metri, arī mazgabarīta paraugiem, kas bija ražoti pēc sausās metodes, varēja novērot betona slāņa atdalīšanos pa līmēta savienojuma vietu bez slāņu kopdarbības pazīmēm, atšķirībā no mazgabarīta paraugiem ar šķembām, kur sabrukums ir novērojams gan pa koksnes šķiedrām, gan pa betona slāni (3.9. att.).

### 3.4. Pēc šķembu metodes izgatavotu koka-betona kompozīta paraugu bīdes testi

Kā bija noteikts iepriekš, koka-betona savstarpēja savienojuma kvalitātei ir noteicošā loma koka-betona kompozīta elementa uzvedībā. Koka-betona kompozīta elements eksistē līdz brīdim, kamēr eksistē savienojums starp materiāla slāņiem. Elementam, kas strādā liecē, veidojas arī bīdes spriegumi, kas savu maksimālo vērtību sasniedz šķērsriezuma neitrālās ass līmenī. Bīdes spriegumu veidošanos liecē virzienā pa elementa garumu apstiprina vienkāršs piemērs. Ja divus dēļus uzliek vienu uz otra, un apakšējo dēli brīvi nobalsta, bet augšējā dēļa laiduma vidū pieliek vertikālu slodzi, augšējā dēļa apakšējā virsma nobīdās attiecībā pret apakšējā dēļa augšējo virsmu, kā to var redzēt attēlā 3.10.



3.10. att. Bīdes spriegumu veidošanās liecē: a) divi savstarpēji nesastiprināti dēļi; b) dēļu savstarpēja nobīde pēc pieliktas vertikālas slodzes.

Viengabalaina elementa gadījumā bīdes spriegumiem pretojas viens materiāls ar savu stiprību. Koka-betona kompozīts ir slāņains kompozīts, pie tam, parasti, ar savienojuma plakni starp betona un koka slāņiem tiešā tuvumā šķērsriezuma neitrālajai asij. Stingam savienojumam starp kompozīta slāņiem ir jābūt pietiekoši kvalitatīvam, lai tas spētu uzņemt šķērsspēku, kas veidojas elementā [110]. Kaut arī ievērojamie tangenciālie spriegumi veidojas liecē strādājošās sijās ar mazu laidumu, kurām veidojās ievērojamās šķērsspēka vērtības balstu tuvumā un profiliem ar plānām sienām, piemēram, dubult-T tipa šķērsriezumiem, darbā ir pievērsta papildus uzmanība pēc piedāvātās šķembu metodes izgatavotu savienojumu drošības līmeņa pārbaudei no bīdes stiprības viedokļa. Šim nolūkam darba ietvaros ir veikti eksperimenti pēc šķembu metodes un mitrās metodes ražoto koka-betona paraugu bīdes stiprības noteikšanai.

Ir pašsaprotams, ka koka-betona kompozīta sabrukums notiek, ja sabrūk jebkura no komponentēm. Līmēto savienojumu, parasti, projektē ar nosacījumu, ka tā stiprība ir lielāka nekā salīmējamo elementu stiprība. Līdz ar to, uz bīdes spriegumiem pārbauda kokmateriāla slāņa bīdes stiprību un betona slāņa bīdes stiprību.

Starp koka bīdes stiprības vērtību, ko pielieto aprēķinos, un koka lieces stiprību pastāv sekojoša sakarība [111]:

$$f_{v,k,t} = 0.2(f_{m,k})^{0.8} \leq 3.8 \text{ MPa} \quad (3.5.)$$

kur  $f_{v,k,t}$  – koka bīdes stiprības raksturīgā vērtība, MPa;

$f_{m,k}$  – koka lieces stiprības raksturīgā vērtība, MPa.

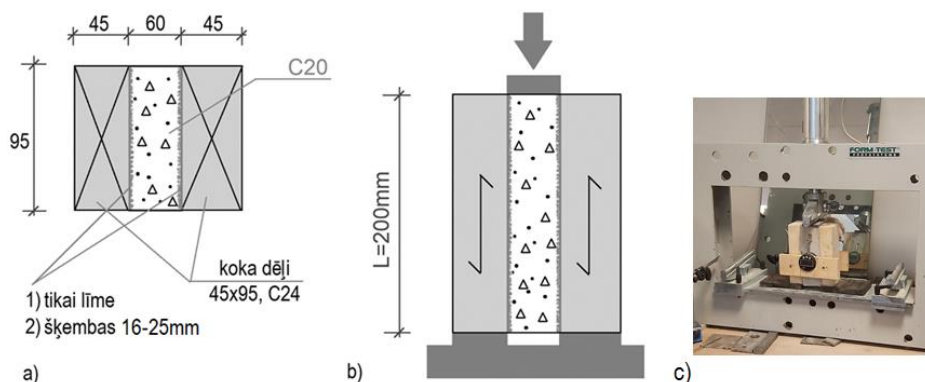
Betona, bez papildus bīdes un garenstieģrojuma, bīdes stiprības aprēķina vērtība, kas izriet no [100], tiek pieņemta pēc sekojošas formulas:

$$f_{v,k,c} = k_1 \cdot 0.2f_{ck} \quad (3.6.)$$

kur  $k_1 = 0.15$ ;

$f_{ck}$  – betona spiedes stiprības raksturīgā vērtība, MPa.

Ar nolūku noteikt efektu no šķembu izmantošanas uz koka-betona kompozīta savienojumu bīdes stiprību un uzvedību ir veikti bīdes stiprības testi 10 paraugiem, no kuriem 4 paraugi ir ar parastu, pēc mitrās metodes izgatavotu, līmētu savienojumu, un 6 paraugi ar pēc piedāvātās šķembu metodes izgatavotu līmētu savienojumu. Materiāli, kas ir izmantoti koka-betona kompozīta paraugiem, ir ēvelētie C24 klases koka dēļi ar šķērsgriezumu 45x95 mm, epoksīda sveķi Sikadur 30, grīdu izlīdzinoša masa Sakret BAM ar C20 stiprības klasi, un granīta šķembas ar frakciju 16–25 mm. Paraugu dimensijas un sloģošanas shēma ir redzama attēlā 3.11.



3.11. att. Bīdes testa paraugi: a) skats no augšas; b) skats no sāniem un sloģošanas shēma; c) parauga izvietojums sloģošanas iekārtā.

Paraugi ar parasto līmēto savienojumu tiek izgatavoti pēc “mitrās” tehnoloģijas, proti, iestrādājot betona slāni uz svaigi ieklāta līmes slāņa, savukārt, paraugi ar šķembām savienojumā, paredz betona iestrādi uz iepriekš pielīmētām pie koka virsmas šķembām, pēc līmes sacietēšanas (3.12 att.). Gatavus paraugus testē vismaz pēc 28 dienām atbilstošos klimatiskajos apstākļos (20° temperatūra pie relatīvais gaisa mitrums 65 %), kad betons pilnīgi sacietē. Testēšanai tiek izmantota Form+test ražotāja hidrauliskā prese.



3.12. att. Paraugu izgatavošanas process.

Tā kā paraugu betona bīdes stiprība ir zemāka nekā koksnes ( $f_{v,k,c} = 0.6 \text{ MPa} < f_{v,k,t} = 2.5 \text{ MPa}$ ), paraugu sabrukums ir sagaidāms pa betona daļu. Teorētiskā paraugu graužošā slodze ir:

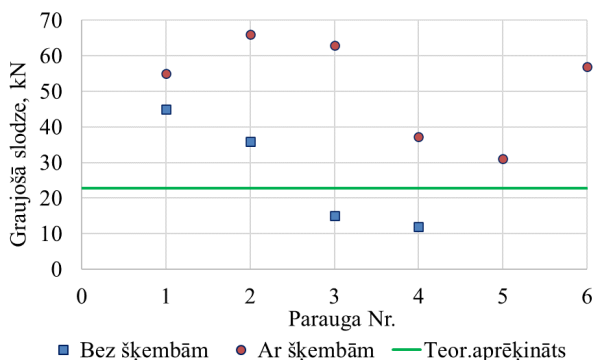
$$F_{gr} = f_{v,k,c} \cdot 2 \cdot 95 \cdot 200 / 1000 = 22.8 \text{ kN}$$

Attēlā 3.13 ir redzamas paraugu sabrukuma ainas. Abiem paraugu veidiem pārsvarā sabrukums notika pa betonu, attīstoties plaisai no apakšas, kur veidojas lielāki tangenciālie spriegumi, uz augšu, tādā veidā sašķeļot paraugu.



3.13. att. Paraugu sabrukumu ainas: a) plaisas attīstība paraugā pie sabrukuma; b) ar parasto līmes savienojumu; c) ar šķembām savienojumā.

Slogojot paraugus līdz sabrukumam, tika iegūtas paraugu graužošās slodzes vērtības, kas ir apkopotas attēlā 3.14. Attēlā var redzēt, ka abu paraugu veidiem ir raksturīga rezultātu izkliede. Bet paraugiem bez šķembām līmētājā savienojumā šī izkliede ir plašāka.



3.14. att. Bīdes testā iegūtas paraugu graužošās slodzes.

Ja pēc šķembu metodes izgatavotajiem paraugiem eksperimentā noteikto graužošo slodžu variācijas koeficients sastāda 28 %, tad pēc mitrās metodes izgatavotajiem paraugiem tas ir 60 %. Variācijas koeficients virs apmēram 30 % parasti norāda uz problēmām eksperimenta datos un nav pieņemams [112]. Maksimālā graužošā slodze paraugiem bez šķembām sastādīja 45 kN un minimālā – 3.8 reizes mazāka, proti, tikai 12 kN. Diviem no četriem paraugiem iegūtā graužošā slodze tika iegūta par 34 % un 47 % zemāka par teorētiski aprēķināto graužošo slodzi. Savukārt, visiem sešiem paraugiem ar šķembām līmētajā savienojumā, graužošās slodzes vērtība ir iegūta 35-189 % lielāka par teorētiski noteikto. Maksimālā graužošā slodze sastāda 66 kN, minimālā – 31 kN, tādējādi rezultātu atšķirība sastāda 2.13 reizes.

Eksperimenta gaitā, papildus paraugu graužošai slodzei, tika fiksētas pārvietojumu vērtības, kas rodas starp kompozīta parauga slāņiem. Pie lielākām pieliktās slodzes vērtībām, ir konstatēta pārvietojumu starpība paraugiem ar un bez šķembām līmētajā savienojumā, kas ir 10 % robežās.

Tādējādi, eksperimentāli iegūtie rezultāti, ļauj secināt, ka šķembu izmantošana līmētajā savienojumā ļauj palielināt ne tika elementa lieces stiprību, bet arī bīdes stiprību. Šķembu izmantošana samazina rezultātu izkliedi. Vienlaikus, šķembas būtiski neietekmē savienojuma kopējo stingumu, un atstāj savienojuma nelielu padevīgumu, kas izpaužas ar līdzīgām slāņu nobīdēm abiem paraugu veidiem. Tādējādi, izmantojot koka-betona kompozīta izgatavošanā piedāvāto šķembu metodi, ir iespējams iegūt drošu koka-betona kompozīta plātņi ar stingu koka-betona savienojumu.

## 4. RACIONĀLI PARAMETRI KOKA-BETONA KOMPOZĪTA PLĀTNĒM

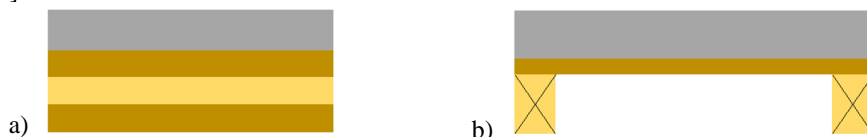
Kā rāda pētījumi, starpstāvu pārsegumi no koka-betona kompozīta paneļiem ir efektīva alternatīva citiem starpstāvu pārsegumu sistēmu risinājumiem ne tikai dzīvojamās, bet arī komerciālajās ēkās. Koka-betona kompozīta izmantošana, pateicoties koka-betona kompozīta konstrukciju vieglajam svaram, var nodrošināt zemākas izmaksas uz ēku pamatu un citu nesošu konstrukciju rēķina un ieguvumus apkārtējai videi [113, 114].

Tendence pēc moduļu (*modular building*) izmantošanas daudzstāvu koka ēku būvniecībā noved pie lielu laidumu nepieciešamības. Savukārt, lielāks laidums rada vairāk izaicinājumu. Starpstāvu pārsegumiem par lieliem laidumiem tiek uzskatīti laidumi robežās no 6 līdz 10 m [114]. Parastām koka grīdu konstrukcijām, sava zema lieces stinguma dēļ, ir grūti izpildīt prasības, kas attiecas uz ilgtermiņa deformācijām un vibrācijām. Koka-betona kompozīta izmantošana ļauj uzlabot grīdas dinamisko reakciju, tādējādi šī kompozīta potenciāls slēpjas liela laiduma starpstāvu pārsegumu konstrukciju izmantošanā daudzstāvu koka ēkās. Dažādi starpstāvu pārsegumu konstrukciju risinājumi no koka-betona kompozīta jau ir veiksmīgi realizēti dažādās Pasaules malās [7], piemēram, Tomasa Klārksona kopienas koledžā, Lielbritānijā, kur koka-betona kompozīts ir izmantots deju grīdas konstrukcijā ar laidumu 10 metri; UBC Zemes zinātņu ēkā, Kanādā, ar vienā virzienā balstītu koka-betona kompozīta plātņi ar laidumu 6.4 metri; Sv. Elmo biroju kompleksā, Jaunzēlandē (laidums 9 metri); Sidnejas Tehnoloģiskās universitātes biznesa skolas ēkā (*Dr. Chau Chak Wing Building*), Austrālijā (laidums 6 metri); kā arī citos projektos.

Ņemot vērā koka-betona kompozīta konstrukciju perspektīvas ir aktuāli piedāvāt metodiku koka-betona kompozīta komponentu izmēru, ievērojot tehnoloģiskās prasības, noteikšanai un materiālu stiprības izvēlei projektēšanas sākuma stadijā, kas nodrošinās materiālu racionālāku izmantošanu, izpildīs nestspējas un lietojamības robežstāvokļus un nodrošinās cilvēku komfortablu uzturēšanos ēkās ar piedāvāto starpstāvu pārseguma risinājumu. Kā arī noteikt koka-betona kompozīta plātņu racionālākas izmantošanas robežas salīdzinājumā ar parastiem analogiskajiem koka pārsegumu risinājumiem bez betona slāņa.

### 4.1. Koka-betona kompozīta plātnes konstruktīvi risinājumi

Eksistē divi visplašāk izmantojami koka-betona kompozīta plātņu konstruktīvi risinājumi – betona slānis ar CLT plātņi (4.1 a) att.) un betona slānis ar koka sijām (4.1 b) att.) [115].

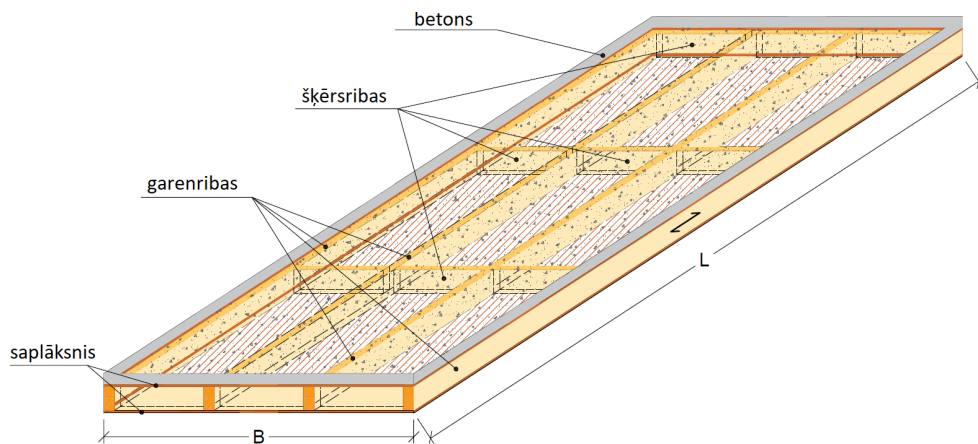


4.1. att. Koka-betona kompozīta plātņu tipiski konstruktīvi risinājumi: a) ar CLT plātņi; b) ar koka sijām.

Koka-betona kompozīta plātnes konstruktīvais risinājums ar koka sijām parasti paredz bieža stiegrota betona slāņa izmantošanu, lai nodrošinātu pietiekamu plātnes lieces stingumu. Lai būtu iespējams atteikties no tērauda stiegrojuma izmantošanas, vienlaikus saglabājot augstu šķērsriezuma lieces stingumu, izmantojamo koka siju šķērsriezuma augstumam ir jābūt ļoti lielam. Šī iemesla dēļ koka-betona kompozīta plātnes konstruktīvais risinājums ar koka sijām netiek apskatīts kā piemērojams risinājums ilgtspējīgai koka-betona kompozīta konstrukcijai bez tērauda stiegrojuma.

Koka-betona kompozīta konstrukcijas ar CLT plātnēm (turpmāk tekstā *CLT-betona plātne*) ļauj atteikties no tērauda stiegrojuma izmantošanas betona slānī, taču, šim risinājumam piemīt divi trūkumi. Pirmais – CLT augstas izmaksas ar to lielu materiāla patēriņu, īpaši pie lielākiem laidumiem, veidojas masīvi un ekonomiski neizdevīgie šķērsriezumi [116]; otrais – masīvu konstrukciju lietošana no koksnes – dabīga materiāla, kas raksturojas ar neviendabīgu uzbūvi un paredz dažādu vainu esamības iespējas, noved pie lielas rezultātu izkliedes.

Tāpēc, lai saglabātu koka-betona priekšrocības un mazinātu iepriekš pieminētus trūkumus, tiek piedāvāts koka-betona kompozīta plātnes risinājums, kura pamatā ir kārbveida saplākšņa plātne ar koka ribām (turpmāk tekstā *saplākšņa-betona plātne*). Piedāvātā risinājuma šķērsriezums ir redzams 4.2 attēlā. Papildus priekšrocības šādam risinājumam ir iespēja eventuāli, balstoties uz lokāliem, pārdomātiem risinājumiem, efektīvi integrēt inženierkomunikācijas un citus risinājumus konstrukcijas šķērsriezumā, uz tā rēķina nezaudējot stāva augstumu. Dobumu šķērsriezuma iekšā ir iespējams izmantot papildus skaņas un/vai siltumizolācijas izvietošanai.



4.2. att. Saplākšņa-betona plātne, kurai ir 4 garenribas un 4 rindas ar šķērsribas.

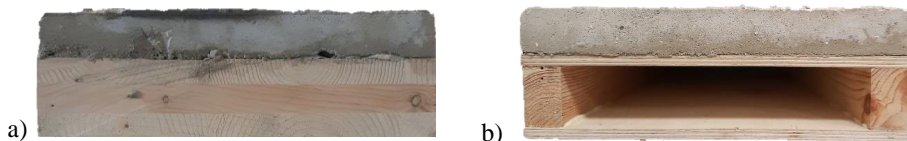
Pateicoties saplākšņa apakšējai kārtai, šķērsriezuma lieces stingums tiek būtiski palielināts, salīdzinot ar līdzīgu risinājumu bez saplākšņa apakšējās kārtas (4.1 b) att.), ka arī, tiek nobīdīta šķērsriezuma neitrāla ass prom no betona slāņa. Tā, piemēram, 18 mm bieža saplākšņa apakšēja kārta var samazināt koka siju (ribu) šķērsriezuma augstumu 1.5 reizes, saglabājot tādu pašu šķērsriezuma lieces stingumu. Tādējādi, piedāvātais koka-betona



kompozīta plātnes konstruktīvais risinājums ar stingu savienojumu starp betona slāni un saplākšņa plātņi, veido optimālāko ilgtspējīgu koka-betona kompozīta plātnes risinājumu.

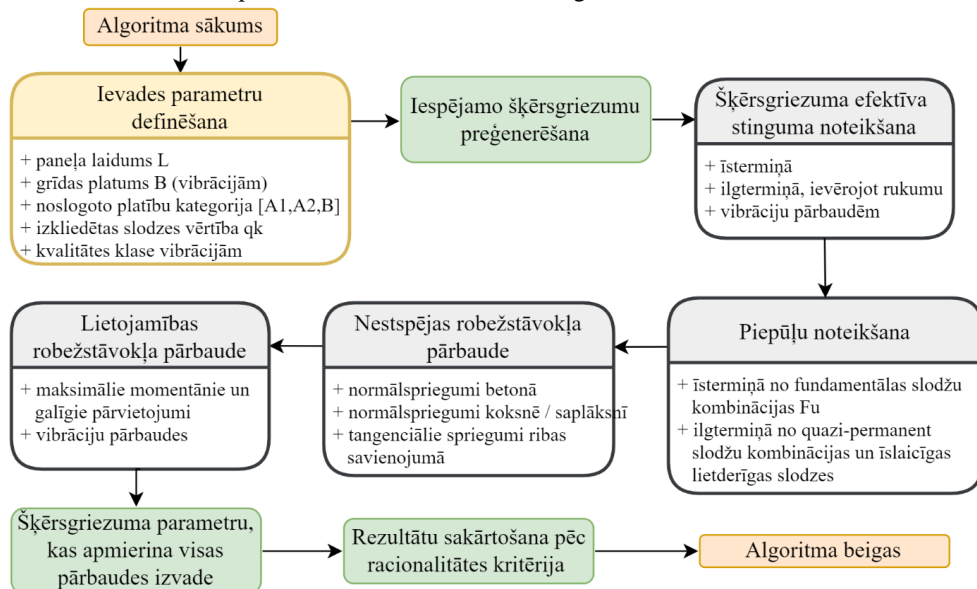
## 4.2. Racionālu parametru noteikšanas metodikas un programmatūras izstrāde

Darba ietvaros ir izstrādāta metodika un uz tās bāzes – programmatūra koka-betona kompozīta plātņu racionālu šķērsriezuma parametru un izmantojamo materiālu nepieciešamas stiprības klases noteikšanai divu veidu konstruktīvajiem risinājumiem (4.3. att.) – ar CLT plātņi un ar ribotu saplākšņa plātņi pamatā. Paredzēts, ka abiem risinājumiem tiek izmantots fibrobetona slānis un tiek nodrošināts stings savienojums starp fibrobetona slāni un koka plātņi, ko realizē pēc darbā piedāvātās šķembu metodes.



4.3. att. Koka-betona kompozīta šķērsriezums ar: a) CLT; b) saplākšņa ribotu plātņi.

Lai noteiktu koka-betona kompozīta plātņu racionālas izmantošanas robežas, izstrādātā programmatūra ietver papildus divas modifikācijas, lai noteiktu racionālākus šķērsriezuma parametrus analogiskajiem diviem konstruktīvajiem risinājumiem, kas sastāv tikai no koka plātnēm bez betona slāņa. Tādējādi, programmatūra kopā ietver četras modifikācijas. Piedāvātās metodikas pamatā ir attēlā 4.4 redzamais algoritms.



4.4. att. Koka-betona kompozīta plātnes šķērsriezuma racionālo parametru noteikšanas algoritms.



### 4.2.1. Racionalitātes kritērijs koka-betona kompozīta plātnēm

Ņemot vērā to, ka koka-betona kompozīta konstrukcijas sastāv no dažādiem materiāliem ar atšķirīgām īpašībām, it īpaši svāra un cenas ziņā, materiāla patēriņš nevar objektīvi raksturot konstrukcijas racionalitāti. Tāpēc, konstruktīvo risinājumu savstarpējam salīdzinājumam, ir nepieciešams izmantot citu parametru, kas var sasaistīt dažāda veida materiālus dažādās mainīgās proporcijās. No vairākiem materiāliem izgatavotu konstrukciju racionalitāti var raksturot ar izmantoto materiālu cenām. Uz izmaksām balstīti kritēriji bieži tiek izmantoti konstrukciju optimizācijā [117, 118]. Tāpēc, darba ietvaros, par koka-betona kompozīta plātnes racionalitātes kritēriju ir pieņemts izmaksu koeficients  $c$ , kas balstās uz attiecīgā šķērsriezuma materiāla izmaksām Latvijas tirgū 2021./2022. gadu mijā viena kvadrātmetra koka-betona kompozīta plātnei. Izstrādātā datorprogramma paredz iespēju definēt izmantojamo materiālu cenas, atbilstoši aktuālajai situācijai būvmateriālu tirgū.

Lai izpildītu gan CLT, gan saplākšņa plātņu konstruktīvu risinājumu ugunsdrošības prasības, ir jāizmanto papildus apšuvumu, piemēram, ar ugunsdrošajām ģipškartona plāksnēm. Šis risinājums, nepieciešamības gadījumā, ļauj salīdzinoši viegli nomainīt aizsargslāņus, salīdzinājumā ar pārroļotu CLT plātnes risinājumu bez papildu aizsargslāņa. Ugunsdrošības apšuvums izmaksu koeficienta analīzē netiek ņemts vērā.

Izmaksu koeficients koka-betona kompozīta plātnes vienam kvadrātmetram tiek aprēķināts pēc formulām (4.1) un (4.2), attiecīgi ar CLT plātņi un saplākšņa plātņi pamatā.

$$c = \frac{h_{CLT} \cdot P_{CLT} + h_c \cdot P_c}{P_{c,C20} \cdot B_1} \quad (4.1)$$

kur  $h_{CLT}$  un  $h_c$  – CLT un betona slāņa augstumi, m;

$P_{CLT}$  un  $P_c$  – CLT un izmantojamas stiprības klases betona cena, EUR/m<sup>3</sup>;

$P_{c,C20}$  – C20 stiprības klases betona cena, kas tiek izmantota par bāzes cenu, EUR/m<sup>3</sup>;

$B_1$  – 1 metra plata joslas platums, m.

$$c = \frac{(h_{pu} \cdot P_{pu} + h_{pd} \cdot P_{pd} + h_c \cdot P_c) \cdot b \cdot L + h_t \cdot b_t \cdot P_t \cdot (L \cdot n_{long} + b \cdot n_{trans})}{b \cdot L \cdot P_{c,C20} \cdot B_1} \quad (4.2)$$

kur  $h_i$  – slāņa vai elementa augstums, m;

$P_i$  – attiecīgā materiāla cena, EUR/m<sup>3</sup>;

$b$  un  $L$  – paneļa platums un laidums, m;

$n_{long}$  un  $n_{trans}$  – garenribu un šķērsribu daudzums;

indeksi  $pu$ ,  $pd$  – augšējais un apakšējais saplākšņa slānis;

indeksi  $t$ ,  $c$  – koka un betona slānis;

$P_{c,C20}$  – C20 stiprības klases betona cena, kas tiek izmantota par bāzes cenu, EUR/m<sup>3</sup>;

$B_1$  – 1 metra plata joslas platums, m

Izmaksu koeficientu noteikšanai par CLT viena kubikmetra cenu ir pieņemts 900 EUR, savukārt C20 klases stiprības betona ar 0.5 % sintētisku fibru daudzumu izmaksas par kubikmetru ir pieņemtas kā 104 EUR. Pārējām stiprības klasēm pieņemtās cenas un  $\frac{P_c}{P_{c,C20}}$  attiecības ir apkopotas tabulā 4.1.

4.1. tabula

Betona ar sintētiskajām fibrām cenas atkarībā no tā klases

Stiprības klase	C25	C30	C35	C40	C45
Cena, EUR/m <sup>3</sup>	106	108	109	110	111
P <sub>p</sub> /P <sub>c,C20</sub>	1.019	1.038	1.048	1.058	1.067

Par koksnes viena kubikmetra cenu ir pieņemts 600 EUR. Saplākšņa cenas par kubikmetru, atkarībā no tā biezuma ir pieņemtas balstoties uz internetveikalos pieejamo informāciju un ir apkopotas tabulā 4.2.

4.2. tabula

Saplākšņa cenas atkarībā no tā biezuma

Biezums, mm	6.5	9	12	15	18	21	24	27	30	35	40	45	50
Cena, EUR/m <sup>3</sup>	1238	1019	911	895	876	895	895	895	895	995	995	995	995
P <sub>p</sub> /P <sub>c,C20</sub>	11.90	9.80	8.76	8.61	8.42	8.61	8.61	8.61	8.61	9.57	9.57	9.57	9.57

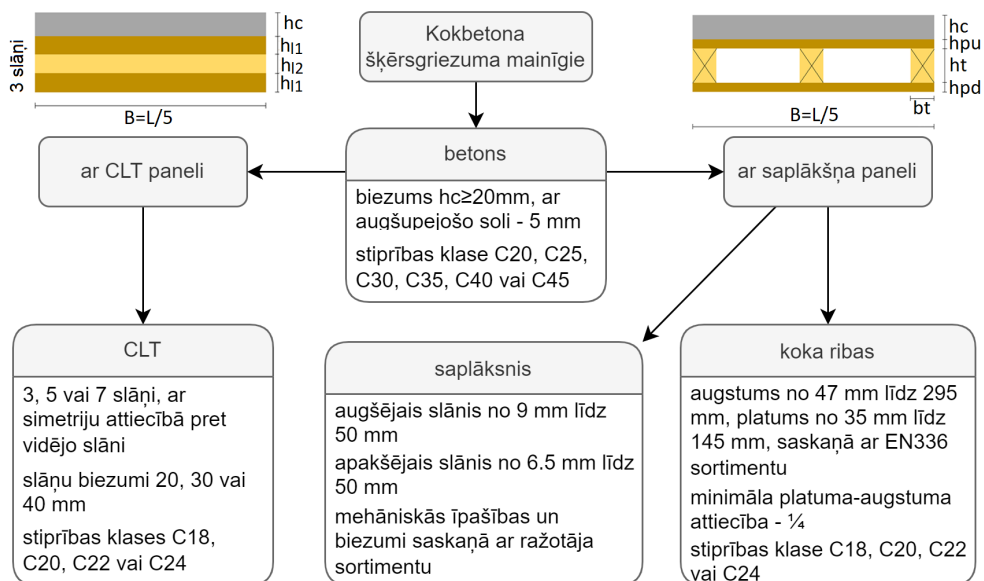
#### 4.2.2. Iespējamo šķērsriezumu preģenerēšana koka-betona kompozīta plātnēm

Koka-betona kompozīta plātņu racionālu šķērsriezuma parametru un materiālu nepieciešamas stiprības klases noteikšanas metodika paredz visu iespējamu koka-betona kompozīta plātņu šķērsriezumu preģenerēšanu saskaņā ar definētajiem ievades parametriem, materiāliem un tehnoloģiskajām robežām. Darbā tiek apskatītas vienā virzienā brīvi balstītas koka-betona kompozīta plātnes ar platuma-garuma attiecību 1:5.

Par uzdevuma ievades parametriem jeb izejas datiem, kas ir definējami atkarībā no projektēšanas uzdevuma, tiek pieņemti:

- plātnes laidums  $L$ , m;
- visas grīdas platums, kas tiek izmantots vibrāciju aprēķinos  $b$ , m;
- noslogoto platību kategorija (vienas māsaimniecības ēka, daudzdzīvokļu dzīvojamā ēka vai biroja ēka);
- lietderīgās izkliedētas slodzes vērtība  $q_k$ , kN/m<sup>2</sup>;
- nepieciešamā kvalitātes klase, no pieļaujamā vibrāciju līmeņa viedokļa.

Pieņemtie koka-betona kompozīta plātņu šķērsriezuma mainīgie lielumi ietver 6 dažādas betona un 4 dažādas koksnes stiprības klases; 13 standarta saplākšņa biezumus; 3 dažādus CLT slāņa biezumus, kas piemērojami CLT plātnēm ar kopējo slāņa daudzumu 3, 5 vai 7 slāņi; un 6 platumi un 11 augstumi koka sijām atbilstoši EN336 sortimentam. Tie ir apkopoti 4.5 attēlā.



4.5. att. Pieņemtie šķērsgriezuma mainīgie koka-betona kompozīta plātnēm.

kur  $B$  – plātnes platums;  $L$  – plātnes garums;  $hc$  – betona slāņa biezums;  $h_{l1}$  un  $h_{l2}$  – CLT slāņu biezums;  $h_{pu}$  un  $h_{pd}$  – augšējā un apakšējā saplākšņa slāņa biezums;  $bt$  un  $ht$  – koka ribas platums un augstums.

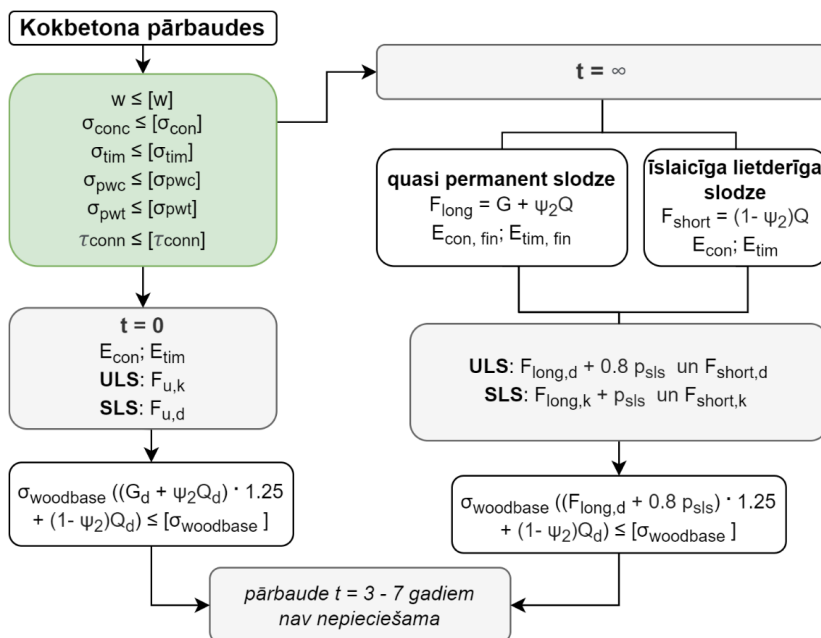
Definētās tehnoloģiskās robežas attiecās uz iespējamajiem slāņu biezumiem – betonam, sākot ar 20 mm biezu slāni ar soli 5 mm, CLT – nedefinēts viena slāņa iespējamais biezums, t.i. 20, 30 un 40 mm. Katram CLT slānim var būt citāds biezums, saglabājot CLT šķērsgriezuma simetriju attiecībā pret plātnes vidējo slāni. Betona slāņa minimālais biezums ir pieņemts ar 20 mm, lai būtu iespējams veidot stingu savienojumu starp betona un koka slāņiem pēc šķembu metodes. Ēvelēto koka brusu šķērsgriezumi ir pieņemti saskaņā ar EN 336 sortimentu, paredzot, ka ribas platuma-augstuma attiecībai ir jābūt lielākai, par  $1/4$ .

Rezultātu savstarpējam salīdzinājumam visas grīdas platumus, kas tiek izmantots vibrāciju aprēķinos, ir pieņemts vienāds ar 5 metriem. Konstruktīvu risinājumu savstarpējam salīdzinājumam darbā ir noteikti šķērsgriezumu racionāli parametri plātnēm ar laidumu no 3 līdz 10 metriem ar soli 0.5 metri A (dzīvojamā) un B (biroja) kategorijas ēkām.

### 4.2.3. Koka-betona kompozīta plātnes pārbaudes

Koka-betona kompozīta plātņu projektēšana tiek veikta, adaptējot rekomendācijas no topošajiem koka-betona kompozīta konstrukciju un vibrāciju noteikumiem. Veicamās koka-betona pārbaudes tiek veiktas saskaņā ar jauno koka-betona kompozītu konstrukciju projektēšanas noteikumu ieteikumiem, kas pašlaik tiek izstrādāti CEN TC250/N2330 ietvaros “Eirokodekss 5: Koka konstrukciju projektēšana — Kompozītu koka-betona konstrukciju projektēšana — Vispārīgie noteikumi un noteikumi ēkām”, no kuriem daļa ir aprakstīta arī [42], un jaunajiem projektēšanas noteikumiem grīdu vibrāciju raksturlielumiem, kas pašlaik tiek izstrādāti CEN TC250/SC5 WG3 4. apakšgrupas ietvaros “Vibrācijas”.

Koka-betona kompozīta plātne tiek rēķināta divos laika momentos. Pirmais laika moments,  $t = 0$  gadi, atbilst konstrukcijas sākuma stāvoklim. Šinī posmā, aprēķinos netiek ņemts vērā ne betona rukums, ne materiālu šļūde, jo tie nav attīstījušies. Otrais laika punkts,  $t = \infty$  gadi, atbilst konstrukcijas kalpošanas laika beigām. Ilgtermiņa stāvoklim tiek ņemti vērā materiālu šļūde un betona rukums. Materiālu šļūde tiek ievērtēta ar materiālu elastības moduļu efektīvajām vērtībām. Betona žūšanas un autogēnais rukums aprēķinos tiek ievērtēts ar fiktīvo slodzi no neelastīgās deformācijas. Kritēriji, kas tiek pārbaudīti koka-betona kompozīta plātnēm divos laika momentos ar attiecīgajām slodzi kombinācijām un izmantojamajiem elastības moduļiem ir apkopoti 4.6 attēlā.



4.6. att. Koka-betona kompozīta plātņu pārbaudes ar atbilstošām slodzes kombinācijām, kur ULS un SLS ir nestspējas un lietojamības robežstāvokļi;  $t$  — laika moments;  $w$  — izliece;  $\sigma$  — normāli spriegumi;  $\tau$  — bīdes spriegumi;  $E$  — elastības modulis;  $G$  — pastāvīgā slodze;  $Q$  — lietderīga slodze;  $\psi_2$  — pastāvīgās lietderīgās slodzes daļa no kopējās lietderīgās slodzes;  $F_u$  — slodzes fundamentālā kombinācija;  $p_{sls}$  — fiktīva slodze, kas novērtē betona rukumu;  $[ ]$  — pieļaujamā vērtība; indeksi: *con* — betons; *tim* — koks; *pwc* — augšējais saplākšņa slānis; *pwt* — apakšējais saplākšņa slānis; *conn* — savienojums starp ribu un augšējo saplākšņa slāni; *k* — raksturīgās vērtības; *d* — aprēķina vērtības; *fin* — efektīvās vērtības; *woodbase* — koksnes materiāli.

Momentāno izlieču pieļaujamā vērtība ir pieņemta ar 1/300 daļu no laiduma, galīgajām izliecēm — 1/150 daļa no plātnes laiduma. Ja, palielinot spriegumu līmeni kokmateriālā par 25 %, spriegumi pārsniedz attiecīgo pieļaujamo vērtību, tad papildus ir nepieciešama koka-betona kompozīta plātnes pārbaude laika momentā, kas atbilst 3 – 7 gadiem [27].

Betona un koksnes elastības moduļu efektīvas vērtības, ko izmanto aprēķiniem ilgtermiņa slodzes gadījumā, nosaka pēc formulām (4.3) un (4.4).

$$E_{con,fin} = \frac{E_{con,t0}}{1 + \psi_{con} \cdot \varphi(\infty, t0)} \quad (4.3)$$

$$E_{tim,fin} = \frac{E_{tim}}{1 + \psi_{tim} \cdot k_{def}} \quad (4.4)$$

kur  $E_{con,fin}$  un  $E_{tim,fin}$  – attiecīgi betona un koksnes elastības moduļu efektīvas vērtības aprēķiniem ilgtermiņā, MPa;

$E_{con,t0}$  – betona elastības modulis laika brīdī, kad betons sasniedz projektējamo stiprību vai betonam pirmo reizi tiek pielikta slodze, MPa;

$\psi_{con}$  – koeficients, kas ņem vērā materiāla saliktas darbības ietekmi uz betona efektīvo šļūdes koeficientu, kas 1. lietojamības klases gadījumā pie dažādām betona šļūdes koeficienta vērtībām tiek interpolēts starp [27] ieteiktām vērtībām, pieņemot, ka spēkā ir pilna kompozīta darbība, proti,  $\gamma = 1$ , pēc (4.5) formulas;

$$\psi_{con} = 0.3 \cdot \varphi(\infty, t_0) + 0.75 \quad (4.5)$$

$\varphi(\infty, t_0)$  – betona šļūdes koeficients no laika, kad betons sasniedz projektējamo stiprību vai betonam pirmo reizi tiek pielikta slodze līdz kalpošanas laika beigām, ko aprēķina saskaņā ar 2. Eirokodeksa B pielikumu pēc formulas (4.6);

$E_{tim}$  – koksnes elastības moduļa vidēja vērtība, MPa;

$\psi_{tim}$  – koeficients, kas ņem vērā materiāla saliktas darbības ietekmi uz koksnes efektīvo šļūdes koeficientu;

$k_{def}$  – koksnes deformācijas koeficients saskaņā ar [58].

Tiek pieņemts, ka betonam slodze tiek pielikta pēc betona projektējamās stiprības sasniegšanas, tas ir, ne ātrāk kā pēc 28 dienām no betona iestrādāšanas brīža, apkārtējas vides relatīvais mitrums ir vienāds ar 40 %. Betona šļūdes koeficientu konstrukcijas kalpošanas beigās, kad šļūde ir pilnībā attīstījusies, aprēķina saskaņā ar 2. Eirokodeksa B pielikumu pēc formulas:

$$\varphi(\infty, t_0) = \frac{16.8}{\sqrt{f_{cm}}} \cdot \frac{1}{0.1 + t_0^{0.20}} \cdot \varphi_{RH} \quad (4.6)$$

kur  $f_{cm}$  – vidējā betona spiedes stiprība 28. dienā, MPa;

$t_0$  – betona vecums, kad tam tika pielikta slodze, dienas;

$\varphi_{RH}$  – koeficients, kas ievērtē apkārtējas vides relatīva mitruma ietekmi uz šļūdes koeficientu, ko nosaka pēc (4.7) formulām:

$$\varphi_{RH} = 1 + \frac{1 - RH/100}{0.1 \cdot \sqrt[3]{h_0}}, \quad ja f_{cm} \leq 35 MPa$$

$$\varphi_{RH} = \left[ 1 + \frac{1 - RH/100}{0.1 \cdot \sqrt[3]{h_0}} \cdot \left( \frac{35}{f_{cm}} \right)^{0.7} \right] \cdot \left( \frac{35}{f_{cm}} \right)^{0.2} \quad ja f_{cm} > 35 MPa \quad (4.7)$$

$RH$  – apkārtējās vides relatīvais mitrums, %;

$h_0$  – elementa nosacītais izmērs ir vienāds ar betona slāņa augstumu, mm.

Gan nestspējas, gan lietojamības robežstāvokļu aprēķinos tiek ņemts vērā betona žūšanas un autogēns rukums kā neelastīga deformācija, ko aprēķina saskaņā ar 2. Eirokodeksu.

Neelastīgās deformācijas, ko izraisa betona rukums, aprēķinā tiek ņemtas vērā fiktīvas pastāvīgās slodzes veidā:

$$p_{sls} = \varepsilon_{sh} \cdot C_{p,sls} \quad (4.8)$$

kur  $p_{sls}$  – fiktīva vertikāla slodze, kas raksturo neelastīgas deformācijas betona rukuma dēļ, kN/m;

$\varepsilon_{sh}$  – neelastīga deformācija no betona žūšanas un autogēnā rukuma 90% līmenī [27], ko CEM 42,5 N stiprības klases cementa gadījumā var aprēķināt pēc formulas (4.9);

$C_{p,sls}$  – koeficients, ko koka-betona kompozīta konstrukcijām ar stingu savienojumu starp betona un koksnes slāņiem, tas ir ar pilnu kompozītu darbību ( $\gamma = 1$ ) nosaka pēc formulas (4.10).

$$\varepsilon_{sh} = 0.9 \cdot \left[ 561 \cdot \exp(-0.12 \cdot \frac{f_{cm}}{10}) \cdot 1.55 \cdot \left( 1 - \left( \frac{RH}{RH_0} \right)^3 \right) + 2.5 \cdot (f_{ck} - 10) \right] \cdot 10^{-6} \quad (4.9)$$

kur  $\varepsilon_{sh}$  – neelastīga deformācija no betona rukuma, 90 % apmērā;

$RH_0 = 100$  %;

$f_{ck}$  – raksturīgā betona spiedes stiprība 28. dienā, MPa.

$$C_{p,sls} = \pi^2 \frac{E_1 \cdot A_1 \cdot E_2 \cdot A_2 \cdot z}{(E_1 A_1 + E_2 A_2) \cdot L^2} \quad (4.10)$$

kur  $E_1$  un  $E_2$  ir elastības moduļu vērtības, attiecīgi betona un koksnes slāņiem, kN m<sup>2</sup>;

$A_1$  un  $A_2$  – betona un koksnes slāņa šķērsgriezumu laukumi, m<sup>2</sup>;

$z$  – attālums starp betona un koksnes šķērsgriezumu smaguma centriem, m;

$\gamma = 1$  – saliktas darbības koeficients;

$L$  – plātnes laidums, m.

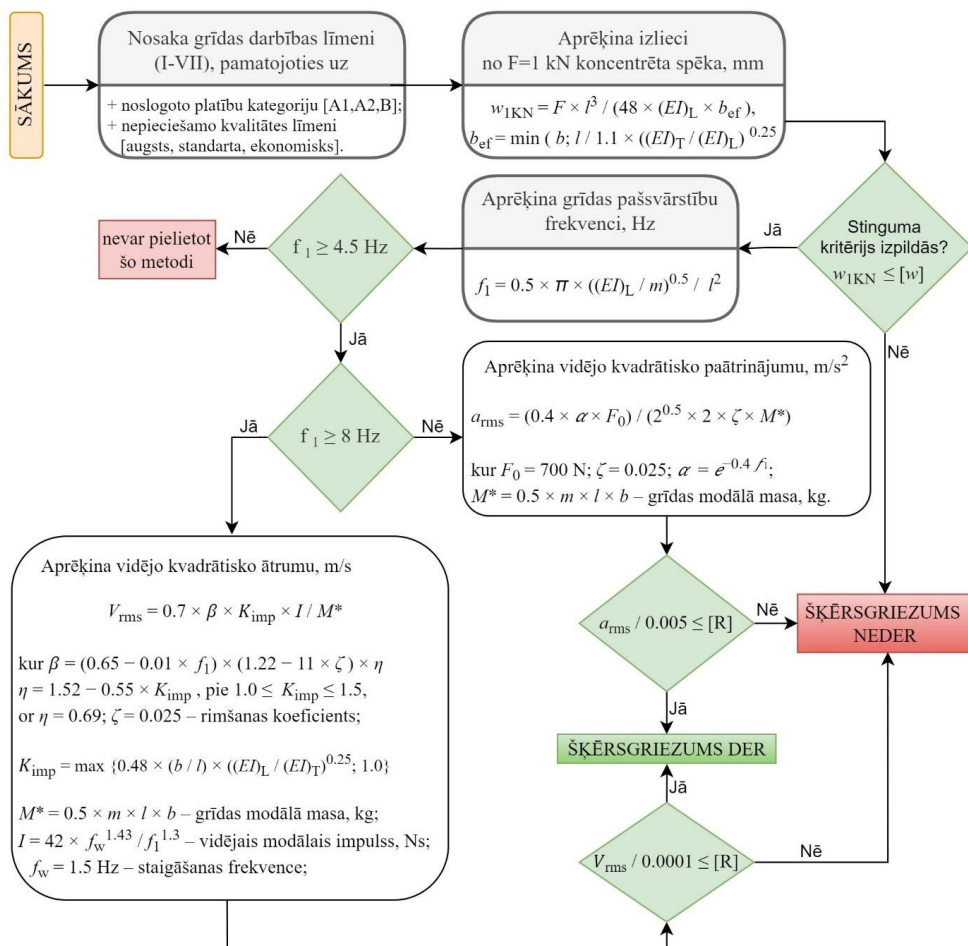
Aprēķinos betona stiepes stiprība tiek pilnīgi ignorēta. Koka-betona kompozīta plātne tiek projektēta tādā veidā, lai betona slānis būtu pakļauts tikai spiedes spriegumiem. Bīdes deformācija, ņemot vērā, lielu attiecību starp kompozīta plātnes garumu un augstumu (ap 30), aprēķinos arī tiek ignorēta [119]. CLT plātnes šķērskārtas tiek ievērtētas aprēķinos, reducējot tās uz gareniski izvietoto slāņu materiāla īpašībām.

Lietojamības robežstāvokļa pārbaude, iekļauj ne tikai momentāno un galīgo maksimālo pārvietojumu noteikšanu, bet arī vibrāciju pārbaudes. Saskaņā ar klasisko 5. Eirokodeksu projektēšanas pamatkritēriji, kas saistīti ar vibrācijām, ir:

- konstrukcijas pašsvārstību frekvence;
- momentānā izliece no 1 kN lielas koncentrētas slodzes;
- konstrukcijas vibrācijas ātruma reakcija no koncentrētā vienības impulsa (1 Ns).

Par ieteicamo minimālo starpstāvu pārseguma konstrukciju pašsvārstību frekvenci dzīvojamajās ēkās bija noteikti 8 Hz, bet gadījumā ja šī frekvence ir zemāka par 8 Hz, saskaņā ar noteikumiem, bija jāveic papildus pētījumus [58].

Saskaņā ar jaunajiem izstrādes stadijā esošajiem projektēšanas noteikumiem [120], saglabājās pārbaude uz izlieci no 1 kN liela koncentrēta spēka pielikšanas jeb stinguma kritērijs. Bet tiek ieviesti jauni jēdzieni – paātrinājuma un ātruma kritēriji, ko pārbauda atkarībā no grīdas pašsvārstību frekvences līmeņa. Jaunie noteikumi paredz projektēšanas nosacījumus pārsegumiem ar pašsvārstību frekvenci robežās no 4.5 līdz 8 Hz neieskaitot, kur jāizpildās tā saucamajam paātrinājuma kritērijam. Pārsegumiem ar pašsvārstību frekvenci sākot no 8 Hz tiek ieviests ātruma kritērijs. Papildus tam, ir ieviests pārseguma darbības līmeņa jēdziens (*Floor performance level*), kas paredz, dažādas robežvērtības vibrāciju kritēriju izpildei, atkarībā no ēkas kategorijas un izvēlēta vibrāciju kvalitātes līmeņa. Koka-betona kompozīta grīdu ar laidumu  $l$ , platumu  $b$  un pašsvara masu uz 1 kvadrātmtru  $m$ , kuru raksturo efektīvie lieces stingumi uz 1 m platu joslu  $(EI)_L$  un  $(EI)_T$ , attiecīgi grīdas garenvirzienā un šķērsvirzienā, vibrāciju projektēšanas procedūra ir atspoguļota 4.7 shēmā.



4.7. att. Koka-betona grīdu vibrāciju pārbaudes procedūra pēc topošā Eirokodeksa 5, kur [ ] – robežvērtība saskaņā ar tabulu 4.3.

Visu vibrāciju kritēriju robežvērtības atbilstoši grīdas darbības līmenim, kā arī grīdas darbības līmeņa noteikšana atbilstoši grīdas platību slogošanas kategorijai un nepieciešamas kvalitātes līmenim ir apkopoti, attiecīgi, tabulās 4.3 un 4.4.

4.3. tabula

Vibrācijas kritēriju robežvērtības saskaņā ar grīdas darbības līmeni

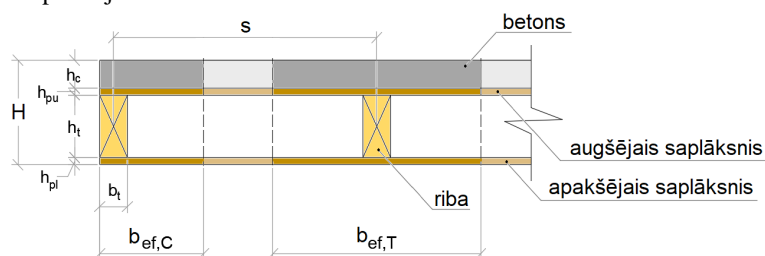
Kritērijs	Grīdas darbības līmenis						
	I	II	III	IV	V	VI	VII
Stinguma: $w_{1KN} [mm] \leq [w]$	0.25	0.5	0.8	1.2	1.6		Nav
Ātruma un paatrinājuma: $R \leq [R]$	4	8	12	16	24	32	

4.4. tabula

Grīdas darbības līmenis saskaņā ar lietošanas kategoriju un kvalitātes klasi

Lietošanas kategorija	Kvalitātes klase		
	Augsta	Standarta	Ekonomiskā
Daudzstāvu dzīvojamās ēkas, A1	I, II, III	IV	V
Privātmājas, A2	I, II, III, IV	V	VI
Biroja ēkas, B	I, II	III	IV

Koka-betona kompozīta plātnes pārbaudes konstruktīvajam risinājumam ar ribotu saplākšņa plātņi pamatā iekļauj normālspriegumu aprēķinus betona slānī, spiestajā un stieptajā saplākšņa slānī un koka garenībās; un tangenciālo spriegumu aprēķinu šuvē starp ribu un augšējo saplākšņa slāni. Pārbaudes tiek veiktas koka-betona kompozīta plātnes divu veidu efektīvajiem šķērsgriezumiem – dubult-T un C-tipa šķērsgriezumiem (skat. attēlu 4.8). Vibrāciju pārbaudēm un plātne izlieces aprēķiniem, tiek izmantoti plātnes ekvivalentie lieces stingumi 1 m platai joslai.



4.8. att. C-tipa un dubult-T tipa saplākšņa-betona kompozīta paneļa šķērsgriezumi,

kur H – paneļa augstums; h<sub>c</sub> – betona slāņa augstums; h<sub>pu</sub> un h<sub>pl</sub> – augšējā un apakšējā saplākšņa slāņa augstums; h<sub>t</sub> – koka ribas augstums; b<sub>t</sub> – koka ribas platums; b<sub>ef,T</sub> ir dubult-T šķērsgriezuma efektīvais platums; b<sub>ef,C</sub> ir C-tipa šķērsgriezuma efektīvais platums; s – ribu solis.

Dubult-T tipa un C-tipa šķērsgriezumu efektīvos platumus nosaka saskaņā ar formulām (4.11) un (4.12), pamatojoties uz saplākšņa slāņa stiprību skaldē [58] un faktisko garenribu soli:



$$b_{ef,T} = \min ( 0.1 \cdot L + b_w; s ) \quad (4.11)$$

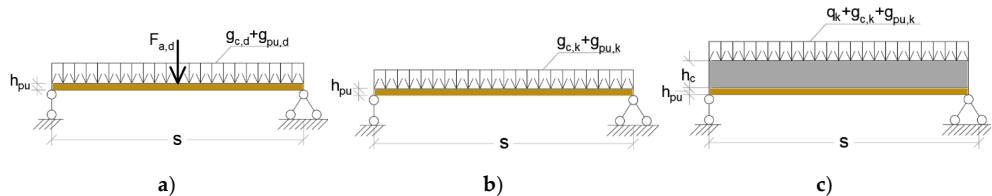
$$b_{ef,C} = \min ( 0.05 \cdot L + b_w; \frac{s + b_w}{2} ) \quad (4.12)$$

kur  $b_{ef,T}$  un  $b_{ef,C}$  – dubult-T tipa un C-tipa šķērsriezumu efektīvie platumi, mm;

$L$  – paneļa laidums, mm;

$b_w$  un  $s$  – garenribas platums un solis, mm.

Garenisko ribu solis  $s$  tiek noteikts, pamatojoties uz augšējā saplākšņa slāņa nestspējas un deformācijas aprēķiniem plātnes šķērsvirzienā saskaņā ar aprēķina shēmām, kas parādītas 4.9 a) un b) attēlā, un betona un augšējā saplākšņa slāņa ar pilnu kompozītdarbību starp slāņiem deformācijas aprēķinu pēc attēlā 4.9 c) redzamas shēmas. Ņemot vērā augšējā saplākšņa slāņa darbības nozīmi starp koka ribām, šim apakšelementam ir pieņemta konservatīvāka aprēķina shēma, t.i., brīvi balstīta sija. Betona slāņa mijiedarbība ar augšējo saplākšņa slāni pasargā pēdējo no noturības zuduma. Šķērsribas tiek izmantotas tikai, lai sadalītu paneli mazākos brīva gaisa tilpumos. Šķērsribu rindu daudzums tiek pieņemts vienāds ar garenribu daudzumu.



4.9. att. Aprēķina shēmas.

a) augšējā saplākšņa slāņa nestspēja uz 80 kg montāžas slodzes  $F_{a,d}$  un pašsvara no betona  $g_{c,d}$  un saplākšņa slāņiem  $g_{pu,d}$ ; b) augšējā saplākšņa slāņa izliece no betona  $g_{c,k}$  un saplākšņa  $g_{pu,k}$  slāņu pašsvara; c) betona un augšējā saplākšņa slāņu izliece no abu slāņu pašsvara un lietderīgās vienmērīgi izkliedētas slodzes  $q_k$ ; kur  $s$  – ribu solis;  $h_c$  un  $h_{pu}$  – attiecīgi, betona un augšējā saplākšņa slāņa biezumi.

#### 4.2.4. Programmas datorisinājuma realizācija

Darba ietvaros piedāvātā koka-betona kompozīta plātņu racionālu parametru noteikšanas metodika paredz lielu analītisko aprēķinu apjomu. Tāpēc, uz tās bāzes ir izstrādāta programmatūra. Datorprogrammas realizācijai ir izmantota tiešsaistei paredzēta programmēšanas valoda *Hypertext Preprocessor* jeb saīsināti *PHP* 8.1., kura darbojas uz *Apache* servera. Lai optimizētu ar datorprogrammas palīdzību iegūto datu turpmāko lietošanu un apstrādi dažādos griezumos, ir izmantota *MySQL* datubāze, kurā tiek uzglabāti preģenerētie rezultāti. *PHP* programmēšanas valodas izvēle balstās perspektīvā datorprogrammu attīstīt kā tiešsaistes rīku, kuru var izmantot vienlaicīgi nenoteikts daudzums lietotāju no dažādām vietām un ierīcēm.

Atbilstoši ievades un mainīgajiem datiem, tiek preģenerēta koka-betona kompozīta plātnes visu iespējamo šķērsriezumu kopa, kuriem tiek noteikti efektīvie ģeometriskie parametri, kas ir nepieciešami turpmākai momentāno, ilgtermiņa un vibrāciju kontroles pārbaužu veikšanai. Attēlā 4.10 ir redzama daļa no izstrādājamās datorprogrammas koda, kas balstās uz piedāvāto

algoritmu koka-betona kompozīta plātņu ar ribotu saplākšņa plātni pamatā racionālu parametru noteikšanai.

```

C:\xampp\htdocs\doktors\functions\pwfunctions.php - Notepad++
Fails Labot Meklēt Skats Kodējums Valoda Iestatījumi Tools Makrokomandas Palaist Plugins Window ? X
functions.php xlt.php cltpure.php CLTCC.php pwfunctions.php index.php pw_vecais.php
1 <?php
2
3
4 function GetExpenses2($options = Array()) {
5
6
7 $Calculate = 3; //1 = A cat min c, 2 = A cat min H, 3 = B cat min C, 4 = B cat min H
8 $Onlyone = 0; // ja 1, tad aprēķina tikai vienu variantu
9
10 $salidzinanasMasivs = Array();
11
12 $q = $options['parametri']['q']; //lietderīgā slodze 2 vai 3 kN/m2
13 $L = $options['parametri']['L']; // laidums no 3 līdz 10 m
14 $platumas = $options['parametri']['platumas']; // grīdas platumas vibrāciju aprēķiniem
15 $kategorija = $options['parametri']['kategorija']; // Ēkas kategorija A1 - daudzstāvu
    dzīvojamās ēkas, A2 - privātmāja vai B - biroja ēkas
16 $Quality = $options['parametri']['Quality']; // 1 - augsta, 2 - pamata; 3 - ekonomiskā izvēle
17
18
19 $B=$L/5; // plātnes platumas, mm (1:5)
20 $winstr=$L/300; // momentānas izlieces robežvērtība, mm
21 $wfinr=$L/150; // galīgas izlieces robežvērtība, mm
22 $gamma=1; //pilna kompozīta darbība
23 $Qk = ($q * $B/1000); // lietderīga lineāra raksturīgā slodze, kN/m
24 $romPW = 7; //kN/m3 saplākšņa blīvums
25
26 $hpwt = Array(6.5,9,12,15,18,21,24,27,30,35,40,45,50); //stieptais saplākšnis,mm
27 $hw = Array(47,72,97,120,145,170,195,220,245,270,295); //koka ēvēlētas brusas augstums pēc
    sortimenta,mm
28 $bw = Array(35,44,60,72,97,145); //koka ēvēlētas brusas platumas pēc sortimenta,mm
29 $hpwc = Array(9,12,15,18,21,24,27,30,35,40,45,50); //spiestais saplākšņa apšuvums,mm
30
31 $hc = Array(20,25,30,35,40,45,50,55,60,65,70,75,80,85,90,95); //h betona,mm
32
33 $kK = 5.769230769; // koksne = 600 EUR/m3, C20/25 ar fibrām = 104 EUR/m3
34 $damp=0.025;
35
36 $betonaKlase = Array();
37 $betonaKlase['C20'] = Array("fck"=>20,"fcm"=>28,"fctk005"=>1.5,"fctm"=>2.2,"Ecm"=>30000,"fvk"=>
    0.6,"rom"=>2500,"cena"=>104,"kB"=>1);
38 $betonaKlase['C25'] = Array("fck"=>25,"fcm"=>33,"fctk005"=>1.8,"fctm"=>2.6,"Ecm"=>31000,"fvk"=>
    0.75,"rom"=>2500,"cena"=>106,"kB"=>1.01923);
39 $betonaKlase['C30'] = Array("fck"=>30,"fcm"=>38,"fctk005"=>2.0,"fctm"=>2.9,"Ecm"=>33000,"fvk"=>
    0.9,"rom"=>2500,"cena"=>108,"kB"=>1.03846);
length: 63,694 lines: 1,207 Ln: 31 Col: 13 Pos: 1,426 Windows (CR LF) UTF-8 IN

```

4.10. att. Datorprogrammas koda daļa ar ievades un mainīgo parametru definēšanu.

Koka-betona kompozīta plātnēm ar ribotu saplākšņa plātni pamatā lielāka šķērsgriezuma elementu skaita un to iespējamo izmēru plaša sortimenta dēļ, salīdzinājumā ar koka-betona kompozīta plātnēm, kuru pamatā ir CLT plātnes, ir milzīgs iespējamo šķērsgriezumu kombināciju daudzums, kas pārsniedz 100 000. Tāpēc, lai veiktu koka-betona kompozīta plātnes ar ribotu saplākšni pamatā aprēķina rezultātu apstrādi ir būtiski veidot iegūto rezultātu datubāzi.

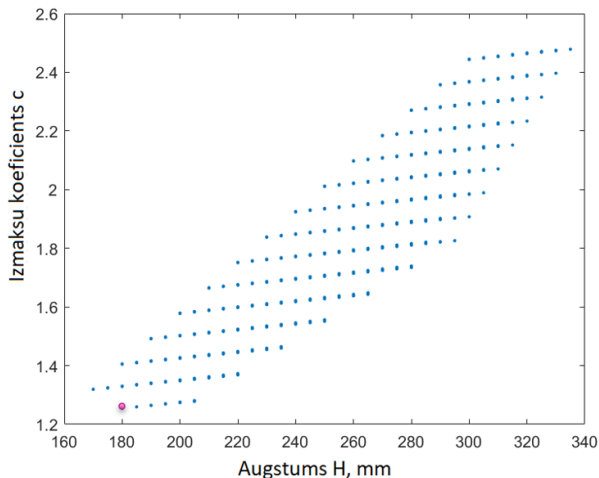
Visi preģenerētie šķērsgriezumi tiek izlaisti caur nestspējas un lietojamības robežstāvokļu pārbaudēm. Šķērsgriezumi, kas neapmierina kaut vienu no pārbaudēm, tiek atmetti. Šķērsgriezumi, kas apmierina visas pārbaudes, tiek sakārtoti pēc racionalitātes kritērija. Attēlā 4.11 ir redzams datubāzes izskats ar šķērsgriezuma parametriem un daļu no aprēķinu rezultātiem koka-betona kompozīta plātnei ar ribotu saplākšņa plātni pamatā pie 3.5 metru

liela laiduma, kas apmierina visas pārbaudes lietošanai daudzstāvu dzīvojamajās ēkās. Aprēķina rezultāti ir sakārtoti augošā secībā pēc izmaksu koeficienta.

Laidums	Augstums	iteration	dati	solis	lh	passvars	Galigas_izlieces	vibrac	
3500	107.5	0.2611	444	hpwt=6.5,hpwc=9,hw=72,bw=35,hc=20,CONC=C30,TIMBER=C24	0.350	32.6	0.663	0.9150	0.989
3500	107.5	0.2613	448	hpwt=6.5,hpwc=9,hw=72,bw=35,hc=20,CONC=C35,TIMBER=C24	0.350	32.6	0.663	0.9056	0.984
3500	107.5	0.2615	452	hpwt=6.5,hpwc=9,hw=72,bw=35,hc=20,CONC=C40,TIMBER=C24	0.350	32.6	0.663	0.8948	0.980
3500	107.5	0.2615	451	hpwt=6.5,hpwc=9,hw=72,bw=35,hc=20,CONC=C40,TIMBER=C22	0.350	32.6	0.662	0.9048	0.998
3500	107.5	0.2617	455	hpwt=6.5,hpwc=9,hw=72,bw=35,hc=20,CONC=C45,TIMBER=C22	0.350	32.6	0.662	0.8934	0.993
3500	107.5	0.2617	456	hpwt=6.5,hpwc=9,hw=72,bw=35,hc=20,CONC=C45,TIMBER=C24	0.350	32.6	0.663	0.8835	0.975
3500	112.5	0.2653	458	hpwt=6.5,hpwc=9,hw=72,bw=35,hc=25,CONC=C20,TIMBER=C20	0.350	31.1	0.784	0.9692	0.909
3500	112.5	0.2653	459	hpwt=6.5,hpwc=9,hw=72,bw=35,hc=25,CONC=C20,TIMBER=C22	0.350	31.1	0.787	0.9636	0.900
3500	112.5	0.2653	460	hpwt=6.5,hpwc=9,hw=72,bw=35,hc=25,CONC=C20,TIMBER=C24	0.350	31.1	0.788	0.9528	0.883

4.11. att. MySQL datubāzes izskats ar preģenerētiem aprēķina rezultātiem.

Attēlā 4.12 ir atainoti aprēķina rezultāti koka-betona kompozīta plātnei ar laidumu 7 metri, kurai pamatā ir CLT plātne pie augstas vibrāciju kvalitātes klases un A1 lietošanas kategorijas, t.i., plātnes paredzētas lietošanai daudzstāvu dzīvojamajās ēkās. 966 ģenerētie CLT-betona šķērsriezuma varianti izgāja visām koka-betona kompozīta plātņu pārbaudēm, t.i, spriegumu, pārvietojumu un vibrāciju pārbaudēm.



4.12. att. Visi iespējamie rezultāti kā plātnes kopējais augstums ar attiecīgu izmaksu koeficientu CLT-betona plātnei ar laidumu 7 m, kas atbilst nestspējas un lietojamības robežstāvokļiem pie A kategorijas un vibrāciju augstākās kvalitātes klases.

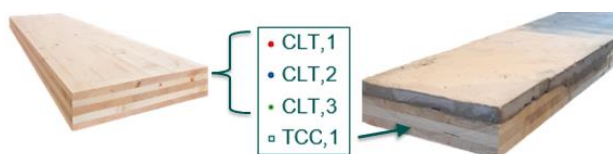
Saskaņā ar pielietoto algoritmu, par racionālāko šķērsriezumu no attēlā 4.12 redzamajiem rezultātiem ir izvēlēts šķērsriezums ar viszemāko izmaksu koeficientu, kuram atbilst 180 mm liels augstums. Papildus interesi var radīt arī rezultāti ar vismazāko augstumu pie attiecīgās vismazākās izmaksu koeficienta vērtības.

### 4.3. Koka-betona kompozīta plātņu pamatotas izmantošanas robežas

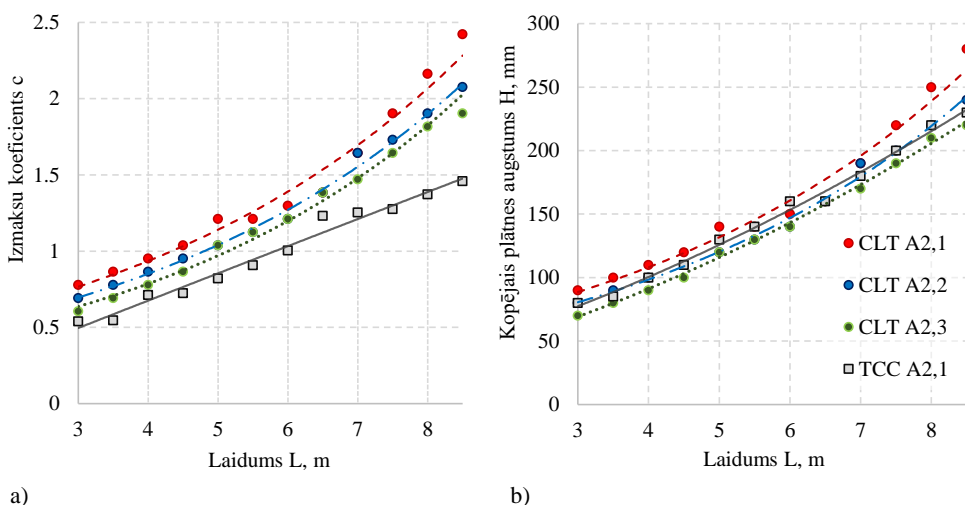
Lai noteiktu koka-betona kompozīta plātņu racionālākas izmantošanas robežas salīdzinājumā ar parastiem analogiskajiem koka pārsegumu risinājumiem bez betona slāņa, izmantojot darbā izstrādātu programmatūru, ir noteikti izmaksu ziņā racionālākie šķērsgriezumi un tiem atbilstošie šķērsgriezuma kopējie augstumi, laidumiem robežās no 3 līdz 10 metriem ar soli 0.5 m pie dažādām noslogotu platību kategorijām (B kategorijas noslogotas platības tiek projektētas uz 3 kN/m<sup>2</sup> izkliedētu slodži, A kategorijas platības – uz 2 kN/m<sup>2</sup>) un vibrāciju kvalitātes klasēm (augsta, standarta un ekonomiskā).

#### 4.3.1. Racionālāko CLT un CLT-betona plātņu salīdzinājums

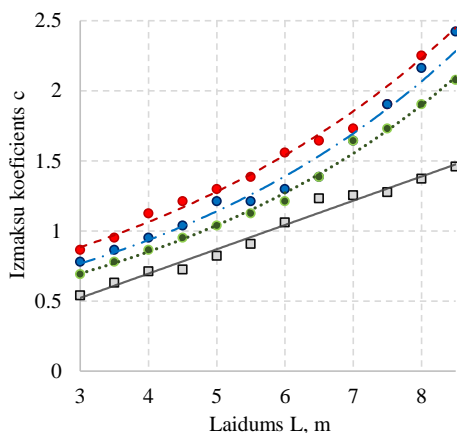
CLT plātnēm noteicošā pārbaude ir uz vibrācijām, savukārt, CLT-betona kompozīta plātnēm noteicošās ir galīgas izlieces (robežvērtība 1/150 no plātnes laiduma). Tāpēc CLT plātnēm ir noteiktas racionālu parametru vērtības pie trīs iespējamajām vibrāciju kvalitātes klasēm, savukārt, CLT-betona plātnēm tikai pie vienas – augstākas kvalitātes klases. Attēla 4.13 var redzēt apzīmējumus, kas tiek izmantoti turpmākajos grafikos (4.14 – 4.16 att.)



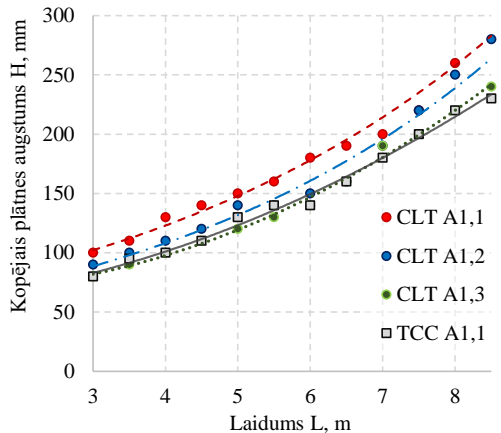
4.13. att. CLT un CLT-betona (TCC no angļu valodas *timber-concrete composite*) plātņu apzīmējums. 1, 2 un 3 – vibrāciju kvalitātes klases, attiecīgi augsta, standarta un ekonomiskā.



4.14. att. CLT un CLT-betona (TCC) plātnes A2 kategorijas ēkās: a) izmaksu koeficienta atkarība no plātnes laiduma; b) plātnes augstuma atkarība no laiduma. 1, 2 un 3 – vibrāciju augsta, standarta un ekonomiskā kvalitātes klase.

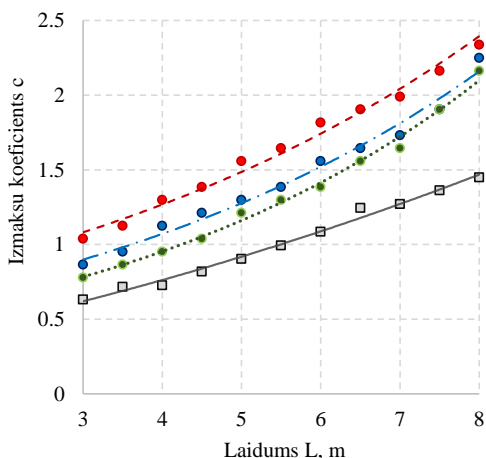


a)

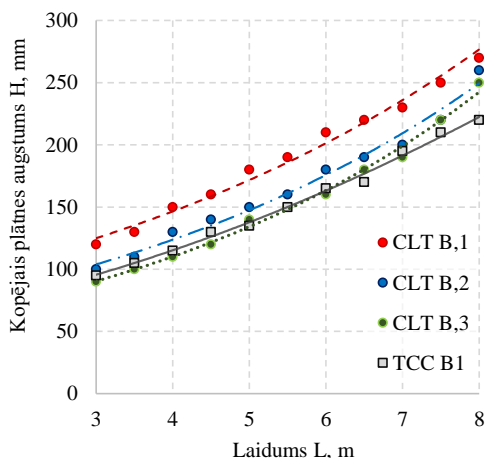


b)

4.15. att. CLT un CLT-betona (TCC) plātnes A1 kategorijas ēkās: a) izmaksu koeficienta atkarība no plātnes laiduma; b) plātnes augstuma atkarība no laiduma. 1, 2 un 3 – vibrāciju augsta, standarta un ekonomiskā kvalitātes klase.



a)

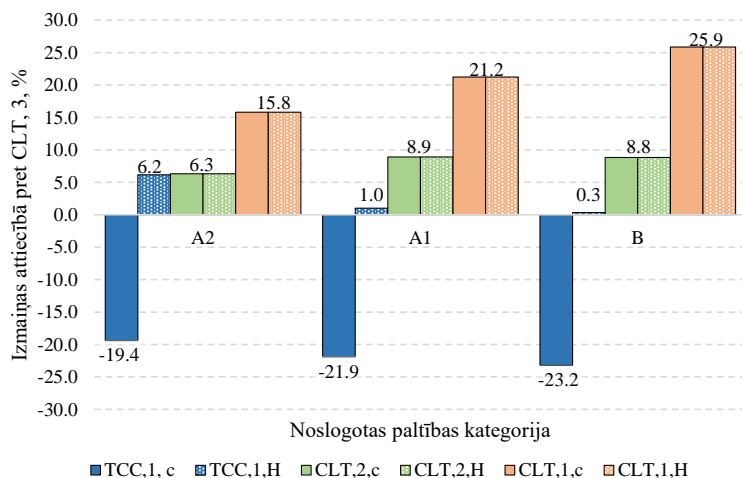


b)

4.16. att. CLT un CLT-betona (TCC) plātnes B kategorijas ēkās: a) izmaksu koeficienta atkarība no plātnes laiduma; b) plātnes augstuma atkarība no laiduma. 1, 2 un 3 – vibrāciju augsta, standarta un ekonomiskā kvalitātes klase.

Koka-betona kompozīta plātnēm ar CLT plātni pamatā betona slāņa biezums svārstās no 20 mm līdz 85 mm. Šāds betona slānis spēj būtiski uzlabot konstrukcijas dinamisko reakciju. Apkopojot aprēķinos iegūtus rezultātus, koka-betona kompozīta plātņu ar CLT plātni izmantošana, salīdzinājumā ar vienkārši CLT plātnēm ir absolūti pamatota daudzstāvu dzīvojamu ēku un biroja ēku starpstāvu pārsegumiem pie jebkuras izvēlētas vibrāciju kvalitātes klases. CLT-betona izmantošana A1 un B kategorijas noslogotajām platībām spēj samazināt pieņemto racionalitātes kritēriju – izmaksu koeficientu vidēji par 22 % un 23 %, ka

arī gandrīz nepalielina plātnes kopējo augstumu, salīdzinājumā ar vienkāršajām CLT plātnēm, kas atbilst ekonomiskajai (trešajai) vibrāciju kvalitātes klasei. Privātmāju gadījumā, CLT-betona plātnes arī spēj vidēji par 19 % samazināt izmaksu koeficienta vērtību salīdzinājumā ar visekonomiskāko CLT plātņu risinājumu, bet vienlaikus ar izmaksu koeficienta samazinājumu nedaudz pieaug plātnes kopējais augstums, vidēji par 6 %. CLT un CLT-betona plātņu izmaksu  $c$  un kopējā augstuma  $H$  vērtību procentuālas izmaiņas attiecībā pret CLT plātnes parametriem, kas atbilst 3 jeb ekonomiskai vibrāciju kvalitātes klasei, ir apkopotas attēlā 4.17. Kopumā, ieguvums no koka-betona kompozīta ar CLT plātņi izmantošanas starpstāvu pārsegumu risinājumos palielinās līdz ar augstākām prasībām pret vibrāciju kvalitātes klasi, lielākiem laidumiem un noslogotākām platībām. B kategorijas platībām ir augstākas prasības uz grīdas darbības līmeni (saskaņā ar tabulām 4.3 un 4.4), kas tieši ietekmē risinājumus no CLT plātnēm, kur vibrāciju kritēriji ir noteicoši. Pie augstākās vibrāciju kvalitātes klases biroja tipa ēkās CLT-betona konstruktīvais risinājums var samazināt līdz pat par 44 % izmaksu koeficientu un līdz pat par 25 % plātnes šķērsriezuma augstumu.

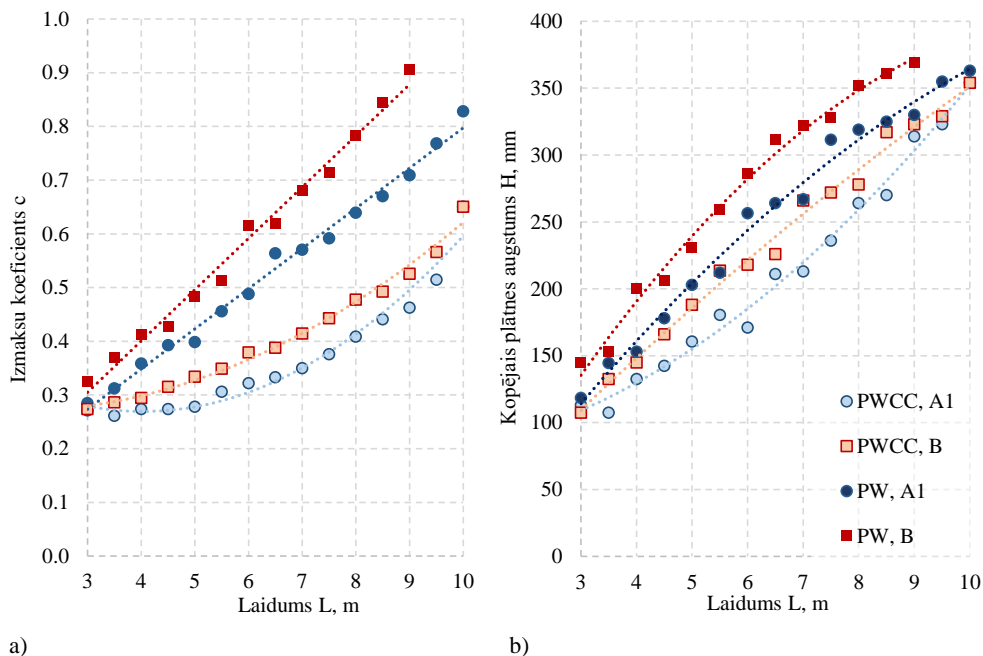


4.17. att. CLT un CLT-betona (TCC) plātņu izmaksu  $c$  un kopējā augstuma  $H$  vērtību izmaiņu salīdzinājums ar ekonomiskās vibrāciju kvalitātes klases CLT plātnes raksturlielumiem. 1, 2 un 3 – vibrāciju augsta, standarta un ekonomiskā kvalitātes klase; A2 – privātmājas, A1 – daudzstāvu dzīvojamās ēkas, B – biroja ēkas.

### 4.3.2. Racionālāko saplākšņa un saplākšņa-betona plātņu salīdzinājums

Saplākšņa ribotām plātnēm noteicošās pārbaudes ir uz vibrācijām. Koka-betona kompozīta plātnēm ar ribotu saplākšņa plātņi pamatā, pie racionālākajiem šķērsriezuma parametriem, betona slāņa biezums svārstās robežās no 20 mm līdz 35 mm, joprojām saglabājot par noteicošu pārsvarā vibrāciju pārbaudi. Tāpēc abu veidu plātnēm ir noteiktas un savstarpēji salīdzinātas izmaksu koeficienta vērtības ar attiecīgajām plātņu kopējo augstumu vērtībām augstākai vibrāciju kvalitātes klasei A1 un B kategorijas ēkām.

Apskatoties attēlā 4.18 apkopoto ribotu saplākšņa plātņu un saplākšņa-betona plātņu salīdzinājumu izmantošanai biroja ēkās un daudzstāvu dzīvojamajās ēkās, saplākšņa-betona plātņu ekonomiskā pamatotība un konkurētspējīgums ir acīmredzami, īpaši palielinoties plātnes laidumam. Atsevišķos gadījumos, saplākšņa-betona plātnes spēj samazināt izmaksu koeficientu līdz pat par 41.9 % un plātnes augstumu līdz pat par 33.3 % salīdzinājumā ar parastajām ribotām saplākšņa plātnēm. Pie tam, augstākai vibrāciju kvalitātes klasei, ar darba ietvaros pieņemtajiem mainīgajiem, nav iespējams nodrošināt nepieciešamus šķērsgriezumus laidumiem sākot no 9.5 metriem.



4.18. att. Ribotu saplākšņa (PW) un saplākšņa-betona (PWCC) plātnes biroja ēkās (B) un daudzstāvu dzīvojamajās ēkās (A1): a) izmaksu koeficienta atkarība no plātnes laiduma; b) plātnes augstuma atkarība no laiduma.

#### 4.4.Koka pamatnes veida ietekme uz koka-betona kompozīta plātnes izmaksām

Izmantojot darbā izstrādātu programmatūra racionālu šķērsgriezuma parametru noteikšanai koka-betona kompozīta plātnēm, kuru pamatā ir CLT vai saplākšņa plātne, ir savstarpēji salīdzināti abi koka-betona kompozīta plātņu konstruktīvie risinājumi pēc to izmaksām un šķērsgriezuma augstumiem pie dažādiem plātņu laidumiem un platību lietošanas kategorijām atbilstoši augstākai vibrāciju kvalitātes klasei. Noteiktie racionālie parametri CLT-betona plātnēm ir apkopotas tabulās 4.5 un 4.6. Vairumā gadījumu CLT-betona plātņu pārbaude uz galīgajiem pārvietojumiem ir noteicoša. Tabulās tā ir atzīmēta ar  $w_{fin, ratio}$  un nozīmē aprēķinātās izlieces attiecību pret robežvērtību, kas pieņemta kā 1/150 no laiduma.

4.5. tabula

Racionālākie šķērsriezuma parametri CLT-betona plātnēm A1 kategorijas ēkām

Laidums, m	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	9.5	10
Augstums $H$ , mm	80	95	100	110	130	140	140	160	180	200	220	230	245	260	275
Izmaksu koeficients $c$	0.54	0.63	0.71	0.72	0.82	0.91	1.06	1.23	1.25	1.28	1.37	1.46	1.55	1.64	1.74
$h_{CLT}$ , mm	60	70	80	80	90	100	120	140	140	140	150	160	170	180	190
$h_c$ , mm	20	25	20	30	40	40	20	20	40	60	70	70	75	80	85
Betona klase	C20	C20	C20	C45	C45	C45	C40	C25	C45	C45	C45	C45	C45	C45	C45
Koksnes klase	C24	C20	C24	C24	C24	C24	C24	C22	C24	C24	C18	C22	C24	C24	C24
Pašsvars, kN/m <sup>2</sup>	0.75	0.90	0.84	1.09	1.38	1.42	1.00	1.07	1.59	2.09	2.32	2.41	2.59	2.76	2.92
$W_{fin, ratio}$	0.78	0.92	0.82	1.00	0.99	0.99	0.90	0.99	0.98	0.99	0.99	1.00	0.99	1.00	0.99

4.6. tabula

Racionālākie šķērsriezuma parametri CLT-betona plātnēm B kategorijas ēkām

Laidums, m	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	9.5	10
Augstums $H$ , mm	95	105	115	130	135	150	165	170	195	210	220	235	250	270	285
Izmaksu koeficients $c$	0.63	0.72	0.73	0.82	0.90	0.99	1.09	1.24	1.27	1.36	1.45	1.54	1.63	1.73	1.82
$h_{CLT}$ , mm	70	80	80	90	100	110	120	140	140	150	160	170	180	190	200
$h_c$ , mm	25	25	35	40	35	40	45	30	55	60	60	65	70	80	85
Betona klase	C20	C20	C20	C20	C45	C35	C45	C45	C40	C45	C45	C45	C45	C45	C45
Koksnes klase	C24	C24	C24	C24	C24	C24	C24	C24	C24	C20	C24	C24	C24	C24	C24
Pašsvars, kN/m <sup>2</sup>	0.92	0.96	1.21	1.38	1.30	1.46	1.63	1.34	1.96	2.13	2.17	2.34	2.51	2.80	2.97
$W_{fin, ratio}$	0.69	0.71	0.95	0.99	0.93	1.00	0.99	0.98	1.00	1.00	0.99	1.00	0.99	0.99	0.99

Saplākšņa-betona plātnēm lielākoties noteicošs ir vibrācijas kritērijs, kas apzīmēts kā  $vib_{Rratio}$  un nozīmē aprēķinātā reakcijas faktora  $R$  attiecību pret tā robežvērtību saskaņā ar 4.3 un 4.4 tabulām. Racionālākie šķērsriezumu parametri saplākšņa-betona plātnei pie divām ēku kategorijām – A1 un B – ir apkopoti tabulās 4.7 un 4.8.

4.7. tabula

Racionālākie šķērsriezuma parametri saplākšņa-betona plātnēm A1 kategorijas ēkām

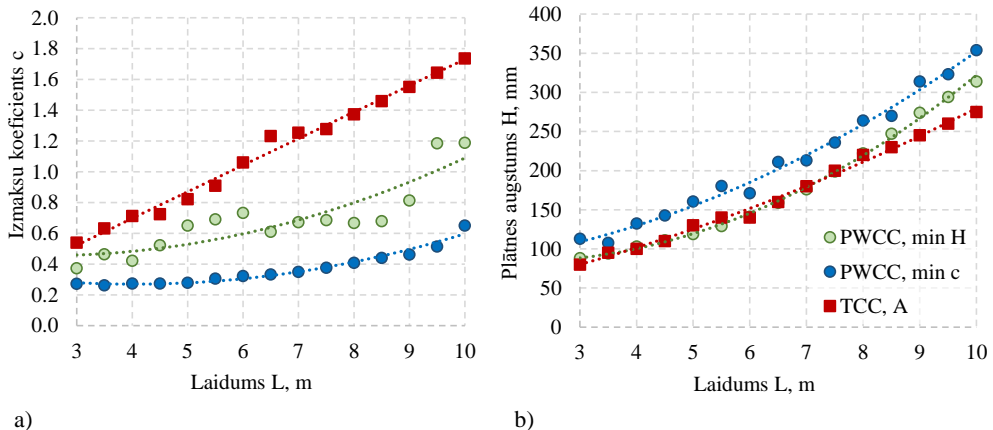
Laidums, m	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	9.5	10
Augstums $H$ , mm	113	107.5	132.5	142.5	161	180.5	171	211	213	236	264	270	314	323	354
Izmaksu koeficients $c$	0.27	0.26	0.27	0.27	0.28	0.31	0.32	0.33	0.35	0.38	0.41	0.44	0.46	0.51	0.65
$h_{pl}$ , mm	9	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	12	9	9	9	9	15	9	18	21
$h_{pu}$ , mm	12	9	9	9	9	9	9	12	9	12	15	15	15	15	18
$h_v$ , mm	72	72	97	97	120	145	120	170	170	195	220	220	270	270	295
$b_v$ , mm	35	35	35	35	35	44	35	44	44	60	60	60	72	72	97
Ribu solis $s$ , m	0.60	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.40	0.65	0.47	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	1.0
$h_c$ , mm	20	20	20	30	25	20	30	20	25	20	20	20	20	20	20
Betona klase	C20	C30	C20	C20	C20	C20	C35	C20	C25	C25	C20	C40	C30	C45	C35
Koksnes klase	C18	C24	C18	C18	C24	C22	C24	C22	C24	C24	C18	C24	C24	C24	C24
Pašsvars, kN/m <sup>2</sup>	0.69	0.66	0.67	0.91	0.80	0.69	0.97	0.73	0.86	0.76	0.78	0.83	0.83	0.89	0.99
$w_{fin, ratio}$	0.98	0.91	0.74	0.94	0.77	0.62	0.81	0.57	0.66	0.55	0.50	0.46	0.40	0.36	0.30
$vib_{Rratio}$	0.62	0.99	0.94	0.99	0.99	1.00	1.00	0.99	1.00	1.00	0.97	0.87	0.81	0.73	0.62



Racionālākie šķērsriezuma parametri saplākšņa-betona plātnēm B kategorijas ēkām

Laidums, m	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	9.5	10
Augstums $H$ , mm	107.5	132.5	145	166	188	213.5	218	226	266	272	278	317	323	329	354
Izmaksu koeficients $c$	0.27	0.29	0.29	0.32	0.33	0.35	0.38	0.39	0.41	0.44	0.48	0.49	0.53	0.57	0.65
$h_{pi}$ , mm	6.5	6.5	9	12	9	6.5	9	12	9	12	18	12	18	21	21
$h_{pu}$ , mm	9	9	9	9	9	12	9	9	12	15	15	15	15	18	18
$h_i$ , mm	72	97	97	120	145	170	170	170	220	220	220	270	270	270	295
$b_v$ , mm	35	35	35	35	44	44	44	44	60	60	60	72	72	72	97
Ribu solis $s$ , m	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.40	0.43	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00
$h_c$ , mm	20	20	30	25	25	25	30	35	25	25	25	20	20	20	20
Betona klase	C30	C20	C20	C20	C20	C20	C20	C20	C20	C30	C25	C30	C25	C45	C35
Koksnes klase	C24	C20	C22	C18	C20	C24	C24	C24	C22	C24	C24	C24	C24	C24	C24
Pašsvars, kN/m <sup>2</sup>	0.67	0.68	0.94	0.84	0.84	0.86	1.00	1.14	0.91	0.95	0.98	0.86	0.89	0.93	0.99
$w_{in, ratio}$	0.86	0.71	0.82	0.66	0.61	0.55	0.61	0.66	0.49	0.49	0.49	0.41	0.42	0.42	0.39
$v_{ib\_Rratio}$	0.99	1.00	1.00	0.97	1.00	0.99	0.98	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.93

Izmaksu ziņā racionālākie šķērsriezumi CLT-betona kompozīta plātnēm ar laidumu robežās no 3 līdz 10 metriem ar soli 0.5 metri pie dažādām noslogotu platību kategorijām ir salīdzināti ar saplākšņa-betona kompozīta plātņu šķērsriezumiem divos veidos. Viens gadījums atbilst saplākšņa-betona kompozīta racionālākajam šķērsriezumam izmaksu ziņā ar šim šķērsriezumam atbilstošu augstumu; otrais gadījums – paredz salīdzināšanu ar saplākšņa-betona kompozīta paneļa šķērsriezumu, ar minimāli iespējamo augstumu un tam atbilstošu zemāko izmaksu koeficientu. Attēlā 4.19 ir apkopoti iegūtie dati A kategorijas noslogotajām platībām, kas atbilst dzīvojamajām ēkām.

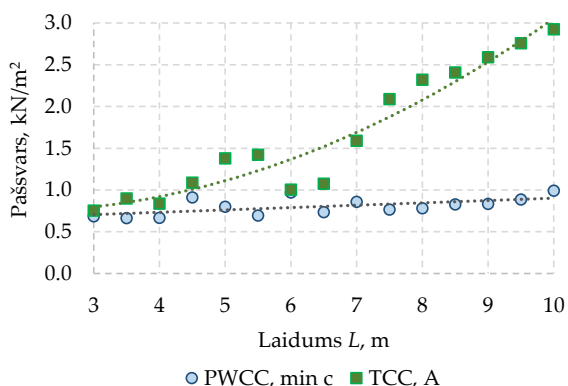


4.19. att. CLT-betona (TCC) un saplākšņa-betona (PWCC) plātnes A kategorijas ēkās:

- a) izmaksu koeficienta atkarība no plātnes laiduma; b) plātnes augstuma atkarība no laiduma.  
 min H – plātne ar vismazāko iespējamo augstumu ar atbilstošu izmaksu koeficientu; min c – plātne ar zemāko iespējamo šķērsriezuma izmaksu koeficientu; A – dzīvojamās ēkas.

Kā var redzēt, piedāvātais koka-betona kompozīta plātnes risinājums ar ribotu saplākšņa plātni pamatā ļauj būtiski samazināt izmaksu koeficientu. Salīdzinot ar CLT-betona plātni, saplākšņa-betona plātnes ar izmaksu ziņā racionālāko šķērsgrizumu A noslogoto platību kategorijai izmaksu koeficients ir par 50 % līdz 73 % ar vidējo vērtību 66 % mazāks. Bet paralēli ievērojamam izmaksu koeficienta samazinājumam, saplākšņa-betona kompozīta plātnes augstums palielinās par 7 % līdz 41 % ar vidējo vērtību 25 %, salīdzinājumā ar CLT-betona kompozīta plātnes augstumu.

Saplākšņa-betona plātnes konstrukcijas īpatnību dēļ biežāki betona slāņi rezultējas nepieciešamībā pēc biežākā augšējā saplākšņa slāņa un/vai papildus ribām, lai samazinātu soli starp ribām. Abi gadījumi ir saistīti ar papildus izmaksām, katra papildus garenribo, īpaši pie lieliem plātnes laidumiem, ievērojami palielina plātnes 1 m<sup>2</sup> materiālu izmaksas. Tāpēc racionālākie no izmaksu koeficienta viedokļa saplākšņa-betona plātņu šķērsgrizumi ir ar plānu, parasti ap 20–30 mm biezu betona slāni. Tik plāna betona slāņa izmantošana nodrošina plātnes pašvara slodzes zemu līmeni neatkarīgi no plātnes laiduma (4.20 att.). Ja pie 3 metru laiduma saplākšņa-betona plātnes pašvars ir aptuveni par 20 % zemāks nekā CLT-betona plātnēm, tad pie lielākiem laidumiem šī atšķirība sasniedz pat 71 %.



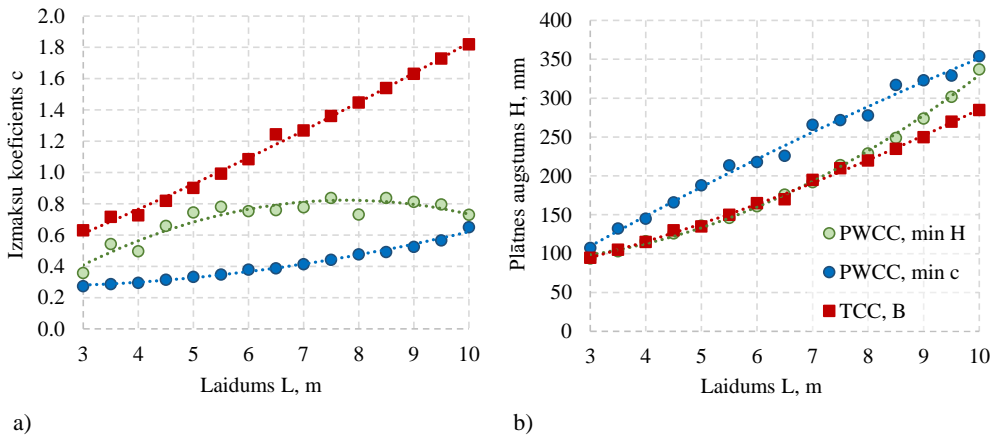
4.20. att. Sakarība starp plātnes pašvaru un plātnes laidumu CLT-betona (TCC) un saplākšņa-betona (PWCC) plātnēm A1 kategorijas ēkās. min c – plātne ar zemāko iespējamo šķērsgrizuma izmaksu koeficientu; A – daudzstāvu dzīvojamās ēkas.

Izvēloties saplākšņa-betona kompozīta plātni ar vismazāko iespējamo šķērsgrizuma augstumu, kas izpilda nestspējas un lietojamības robežstāvokļu prasības, ir iespējams samazināt saplākšņa-betona konstruktīvā risinājuma šķērsgrizuma augstuma starpību ar CLT-betona plātnes augstumu līdz 14 %, pie vairākiem laidumiem iegūstot saplākšņa-betona plātnes augstumu mazāku par CLT-betona plātnes augstumu, paralēli saglabājot būtisku izmaksu koeficienta samazinājumu, kas sastāda no 21 % līdz 54 %, kā to var redzēt 4.9 tabulā. Pie laidumiem no 6.5 metriem līdz 8 metriem, saplākšņa-betona plātnēm un CLT-betona plātnēm šķērsgrizuma augstums ir gandrīz vienāds, bet izmaksu koeficients saplākšņa-betona plātnēm ir vidēji par 49 % zemāks nekā CLT-betona plātnēm.

Saplākšņa-betona (PWCC) plātņu ar minimāli iespējamo augstumu salīdzinājums ar racionālākajiem CLT-betona (TCC) paneļiem A kategorijai

Laidums, m	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	9.5	10
c	0.37	0.46	0.42	0.52	0.65	0.69	0.73	0.61	0.67	0.68	0.67	0.68	0.81	1.18	1.19
$\Delta$ , %	30.9	26.6	40.9	27.8	20.8	23.9	30.9	50.5	46.4	46.3	51.4	53.5	47.6	27.9	31.5
H, mm	88	94	103	111	119	129	141	159	176	199	222	247	274	294	314
$\Delta$ , %	10.0	10.6	3.0	0.9	-8.5	-7.9	-11.9	-0.6	-2.2	-0.5	0.9	7.4	11.8	13.1	14.2

Biroja ēku pārsegumiem ir līdzīga situācija kā dzīvojamajām ēkām. Attēlā 4.21 ir apkopoti iegūtie dati B kategorijas noslogotajām platībām, kas atbilst biroja ēkām. Salīdzinājumā ar CLT-betona plātņi, saplākšņa-betona plātnei ar izmaksu ziņā racionālāko šķērsriezumu B noslogoto platību kategorijai izmaksu koeficients ir par no 57 % līdz 69 % mazāks, ar vidējo vērtību 65 %, bet paneļa augstums palielinās par no 13 % līdz 43 %, ar vidējo vērtību 29 %, salīdzinājumā ar CLT-betona plātņi. Saplākšņa-betona plātņu pašsvars ir par no 15 % līdz 67 % mazāks, ar vidējo vērtību 45 %, salīdzinājumā ar CLT-betona plātņēm.



4.21. att. CLT-betona (TCC) un saplākšņa-betona (PWCC) plātnes B kategorijas ēkās:  
a) izmaksu koeficienta atkarība no plātnes laiduma; b) plātnes augstuma atkarība no laiduma.  
min H – plātne ar vismazāko iespējamo augstumu ar atbilstošu izmaksu koeficientu; min c – plātne ar zemāko iespējamo šķērsriezuma izmaksu koeficientu; B – biroja ēkas.

Izvēloties saplākšņa-betona kompozīta plātņi ar vismazāko iespējamo šķērsriezuma augstumu, kas izpilda nestspējas un lietojamības robežstāvokļu prasības, ir iespējams samazināt saplākšņa-betona konstruktīvā risinājuma šķērsriezuma augstuma starpību ar CLT-betona plātnes augstumu līdz 18 %. Pie plātņu laidumiem no 3 metriem līdz 8.5 metriem abu veidu plātņu augstums ir gandrīz vienāds – atšķirības nepārsniedz 6 %, šajās laiduma robežās izmaksu koeficients saplākšņa-betona plātņēm ir par no 18 % līdz 50 % mazāks nekā CLT-betona plātņēm, kā to var redzēt 4.10 tabulā. Pie laidumiem sākot ar 9.5 metriem, plātņu augstumu starpība starp racionālāko šķērsriezumu no izmaksu koeficienta viedokļa un šķērsriezumu ar minimāli iespējamo augstumu ir mazāka par 8 %.

Saplākšņa-betona (PWCC) plātņu ar minimāli iespējamo augstumu salīdzinājums ar racionālākajiem CLT-betona (TCC) paneļiem B kategorijai

Laidums, m	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	9.5	10
c	0.36	0.54	0.50	0.66	0.75	0.78	0.75	0.76	0.78	0.84	0.73	0.84	0.81	0.80	0.73
Δ, %	43.1	24.1	31.7	19.4	17.5	21.4	30.6	38.9	38.7	38.5	49.5	45.7	50.2	53.9	59.9
H, mm	94	103	116	126	136	146	161	176	192	214	229	249	274	302	337
Δ, %	-1.1	-1.9	0.9	-3.1	0.7	-2.7	-2.4	3.5	-1.5	1.9	4.1	6.0	9.6	11.9	18.2

Par koka-betona kompozīta plātnes konstruktīva varianta ar ribotu saplākšņa plātņi pamatā vēl vienu priekšrocību var pieminēt šo plātņu vieglāk paredzamo uzvedību. Pateicoties tam, ka saplākšņa-betona plātnēm koksnes materiāla īpatsvars ir mazāks nekā CLT-betona plātnēm, darba ietvaros veiktie eksperimenti parādīja mazāku graužošās slodzes izkliedi šāda tipa paraugiem nekā CLT-betona paraugiem. Apskatot astoņu koka-betona kompozīta paraugu graužošās slodzes, kur 4 paraugi bija ar ribotu saplākšņa plātņi pamatā un 4 paraugi ar CLT plātņi pamatā, saplākšņa-betona paraugiem tika konstatēta 10.7 % liela rezultātu dispersija, kas ir ļoti labs rādītājs, savukārt CLT-betona paraugiem šis radītājs bija vienāds ar 25.5 %, kas ir tuvu nepieļaujamai robežai.

Tādējādi, piedāvātais koka-betona kompozīta plātnes konstruktīvais risinājums, kura pamatā ir saplākšņa tipa plātne ar koka ribām, pamatojoties uz paveikto analīzi, ir atzīstams kā īpaši izdevīgs koka-betona kompozīta plātnes risinājums gan dzīvojamajām, gan biroja ēkām. Piedāvātais risinājums ļauj ievērojami samazināt pārseguma izmaksas, salīdzinājumā ar CLT-betona plātnēm arī gadījumā, ja plātnes augstumam ir būtiska nozīme. Papildus tam, piedāvātais risinājums pie lielākiem laidumiem raksturojas ar ievērojami mazāku pašsvaru, plāna betona slāņa izmantošanas dēļ, kas ietekmē visu pārējo vertikālo konstrukciju nepieciešamus izmērus. Ribota saplākšņa plātne, bez betona slāņa, kā patstāvīgs konstruktīvais risinājums raksturojas ar lielu līganumu, bet kopdarbībā ar betona slāni, tas rada konkurētspējīgu pārseguma risinājumu.

## **5. KOKA-BETONA KOMPOZĪTA KONSTRUKCIJU DROŠUMA RISINĀJUMI**

Darba ietvaros tiek apskatīti divi aspekti no koka-betona kompozīta plātņu drošuma viedokļa. Pirmais aspekts ir stinga savienojuma starp betona un koksnes slāņiem nesagraujošās kvalitātes kontroles iespēja, gan izgatavotu elementu kvalitātes pārbaudei, gan arī ekspluatācijā esošu konstrukciju stāvokļa novērtēšanai. Tas ir būtiski, jo kā bija noteikts darbā, savienojuma kvalitātei ir izšķiroša loma koka-betona kompozīta plātņu darbībā. Otrais aspekts ir saistīts ar konstrukcijas darbību sabrukuma brīdi. Parasta betona bez papildus stieģrojuma sabrukums raksturojas kā trausls, kas rada bīstamību. Tāpēc darbā ir piedāvāts izmantot betonu ar disperso stieģrojumu no sintētiskajām fibrām.

### **5.1. Koka-betona stinga savienojuma nesagraujošā kvalitātes pārbaudes iespējas**

Viens no ierobežojumiem līmēto savienojumu izmantošanai praksē, ir saistīts ar nepieciešamību pēc savienojumu kvalitātes kontroles. Uz 2018. gadu, pētījumi par koka-betona kompozīta elementiem ar līmētu savienojumu starp betona un koka slāņiem sastādīja vien ap 2.5 % [42]. Līdz ar to, trūkst arī pētījumu par nesagraujošajām koka-betona kompozīta konstrukciju stinga savienojuma kvalitātes pārbaudes metodēm. Ņemot vērā to, ka literatūras analīzes laikā netika atrasta informācija par koka-betona kompozīta konstrukciju stinga savienojuma kvalitātes pārbaudes iespējām, darba ietvaros tika aprobētas divas pazīstamas metodes – operacionālā modālā analīze un ultraskaņas defektoskopija, lai pārlicinātos par šo metožu pielietošanas iespējām defektu stingajā līmētajā savienojumā starp betona un koka slāņiem noteikšanā.

#### **5.1.1. Mazgabarīta paraugu ar un bez defekta savienojumā izgatavošana**

Stinga savienojuma kvalitātes kontroles metožu aprobācijai darba ietvaros ir izgatavoti 16 mazgabarīta koka-betona kompozīta paraugi ar garumu 60 cm pēc darbā piedāvātas šķembu metodes. Astoni paraugi ir izgatavota bez defekta savienojumā, pārējiem astoniem – ir iestrādāts defekts savienojumā

Paraugu pamatnei ir izmantoti koka dēļi ar platumu 95 mm un augstumu 45 mm, kuriem ar epoksīdu līmi Sikadur-31CF vienmērīgā slānī tika pielīmētas šķembas ar frakciju 8–16 mm. Šķembu patēriņš ap 10.2 kg/m<sup>2</sup>. Pēc līmes nožūšanas, izmantojot veidņus, paraugiem tika ieliets 2 cm biezs grīdu izlīdzinoša masas Sakret BAM slānis. Paraugiem ar defektu savienojumā, lai nodrošinātu pilnīgu adhēzijas neesamību starp betona un koksnes slāņiem, koka dēļi tika pārklāti ar epoksīda līmi, bet šķembas tika uzklātas tikai uz 60 % no parauga virsmas. Pēc līmes slāņa nožūšanas, pārējā parauga daļā – 40 % no parauga virsmas, bez šķembām, tika ietīta plēvē un pēc tam, šķembas tika vienmērīgi izvietotas uz plēves slāņa,

viršū ielejot svaigu betona masu. Dažas no paraugu izgatavošanas stadijām ir redzamas attēlā 5.1. Paraugu testēšana notiek ne ātrāk kā pēc 28 dienām pēc betona slāņa iestrādāšanas.

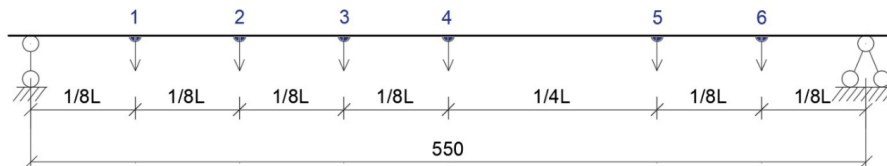


5.1. att. Paraugu izgatavošanas stadijas: a) 16 paraugi pēc līmes nožūšanas; b) parauga gala 40 % apmērā ietīšana plēvē defekta nodrošināšanai; c) paraugu izvietojums veidņos.

### 5.1.2. Operacionālās modālās analīzes laboratorijas testēšanas gaita

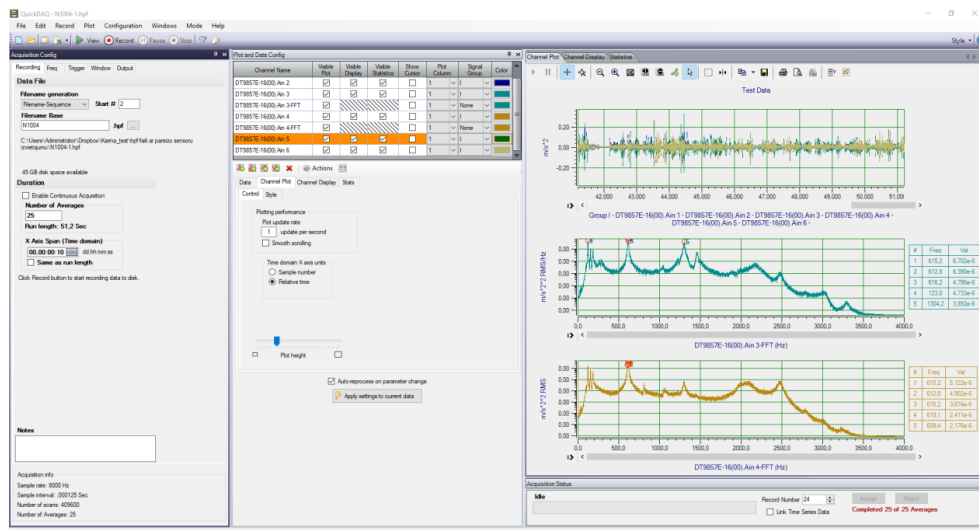
Izgatavotie paraugi ar laiduma – platuma attiecību  $L/b > 5$ , tiek apskatīti kā plātnes, kas strādā vienā virzienā. To modālai analīzei tika izmantoti 6 sensori – akcelerometri, ar kuriem tika mērīta konstrukcijas atbildes reakcija paātrinājuma veidā uz balto troksni. Eksperimentā pieņemtie robežnosacījumi – brīvi balstīta sija ar laidumu 550 mm. Sensori tika izvietoti pa parauga viduslīniju, saskaņā ar 5.2 attēlā redzamo shēmu. Eksperimenta realizācijai bija pieejami divi Dytran Instruments, Inc. ražotāja sensoru tipi – trīs sensori ar zemu jutīgumu ap 100 mV/EU – 3312A2T modelis un trīs sensori ar augstu jutīgumu ap 1000 mV/EU – 3100D24 modelis, kas tika izvietoti pozīcijās 3, 4 un 5.

Lai eksperimenta veikšanas gaitā nodrošinātu ātru, ērtu un drošu sensoru stiprināšanu pie paraugiem, pēc betona slāņa sacietēšanas, tika veikti papildus paraugu sagatavošanas darbi. Visiem paraugiem pēc vienādas shēmas ar divkomponentu epoksīda līmi Bison Epoxy Universal tika pielīmētas bultskrūves M5, veidojot izturīgu savienojumu starp bultskrūves galviņu un parauga koka virsmu.



5.2. att. Sensoru izvietošanas shēma.

Visi sensori tiek savienoti ar daudzkanālu augstas precizitātes dinamiskā signāla analizatoru – *Data Translation* ražotu DT9857E, kas uztver sensoru signālus un aizsūta mērījumu datus uz datoru, ar ko ir savienots ar USB vadu. Datu reģistrēšanai ir izmantotā QuickDAQ programma ar iestrādāto FFT Analyzer saskarni, kas dod iespēju veikt iegūto datu ērtu sākotnējo novērtēšanu frekvenču domēnā. Programmas QuickDAQ interfeiss ir redzams attēlā 5.3.

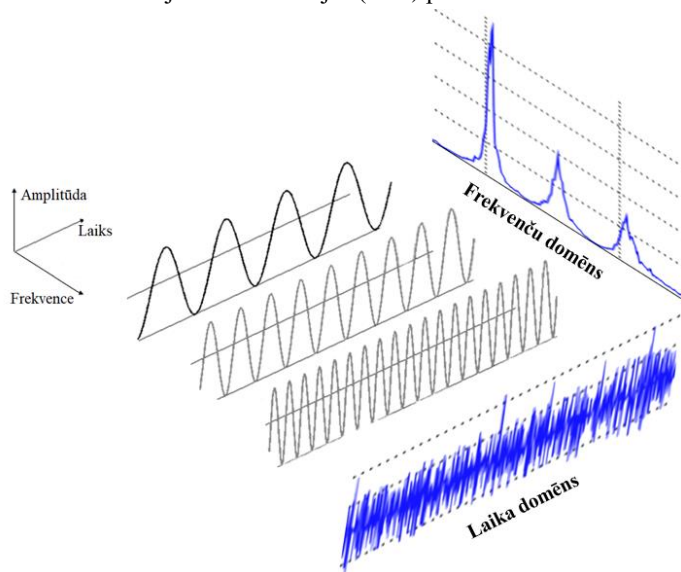


5.3. att. Programmas QuickDAQ saskarne.

Pirms mērījumu veikšanas programmā tiek reģistrēti un konfigurēti visi pievienotie sensori, norādot katra sensora jutīgumu kā milivoltu skaitu uz  $m/s^2$ , kas ir nepieciešams neapstrādātu datu mērogošanai. Lai sākotnēji nepārtrauktu signālu no sensoriem varētu pārraidīt uz pievienoto datoru, tas tiek pārveidots digitālā formā kā diskretu vērtību (paraugu) sērija, kas tiek ņemta ar regulāriem laika intervāliem. Datora programma parāda digitalizēto datu punktu diagrammu un rekonstruē viļņu formu, velkot līnijas starp punktiem. Ir svarīgi izvēlēties atbilstošu paraugu ņemšanas ātrumu, lai notiktu informācijas zaudēšana un kļūdaina sākotnēja signāla attēlošana. Veicot testa mērījumu ierakstu un izvērtējot iegūto frekvenču domēnu, par maksimālo analizējamo frekvenci turpmākiem mērījumiem tika pieņemta 4000 Hz liela frekvence. Lai precīzi ierakstītu signālu, paraugu ņemšanas frekvence ir divas reizes lielāka par maksimālo un ir vienāda ar  $8000 \text{ Hz}$ , kas atbilst  $1 / 8000 = 0.000125$  sekundes intervālam.

Turpmākai sākotnējai datu analīzei mērījumi no laika domēna tiek transformēti uz frekvenču domēnu, izmantojot šim nolūkam speciālo matemātisko funkciju, ko sauc par *Furjē transformāciju*. Ja laika domēnā var novērot signāla izmaiņas laika gaitā, tad frekvenču domēns dod iespēju novērtēt, cik daudz signāla ir katrā konkrētajā frekvenču joslā, tādējādi attēlojot sistēmas kvalitatīvu uzvedību. Iegūtais frekvenču spektrs dod iespēju izvērtēt notiekošo procesu eksperimenta laikā. Ātrās un diskretās Furjē transformācijas pamatā ir mērījumu ieraksta laikā domēnā sadalīšana sīkajos blokos ar viena bloka garumu T sekundes

un katra bloka tālākā transformācija uz frekvenču domēnu. Spektrā tiek atspoguļotas spektru līnijas ar noteiktu izšķirtspēju, kura faktiski nozīmē attālumu starp spektra līnijām un ir vienāda ar  $\Delta f = 1/T$  Hz. Katra bloka transformācijas rezultāts tiek centrēts uz attiecīgas līnijas frekvenci. Shematiski ātro Furjē transformācijas (FFT) procesu var redzēt attēlā 5.4.



5.4. att. Mērījuma ieraksta no laika domēna transformācija frekvenču domēnā.

Ir pieņemts FFT bloka izmērs, kas ir vienāds ar 16384 punktiem, kas nodrošina  $16384 / 2 = 8192$  spektrālās līnijas un, ievērojot definēto paraugu ņemšanas frekvenci,  $8000 / 16384 = 0.488$  Hz augstu spektrālo izšķirtspēju. Tik liela izšķirtspēja ļauj atpazīt cieši izvietotus maksimumus, bet pārmērīgi nepārslogo datu apstrādes procesu un apstrādāto datu uzskatāmību. Tika pieņemts, ka katrs ieraksts ietver sevī 25 datu blokus, kuru garums ir vienāds ar FFT izmēru. Tādējādi, lai iegūtu galīgo vidējo frekvenču spektru, katra atbilstošā datu bloka spektra amplitūdas dati tiek summēti un dalīti ar divi, saglabājot rezultātu atmiņā. Šo procesu atkārto, līdz tiek sasniegts definētais vidējo vērtību skaits. Vidējo vērtību izmantošana ir izplatīta vibrāciju datu apstrādē un ļauj iegūt vidējo vērtību kopu, kas samazina troksni un fona vibrācijas, salīdzinot ar datu nepārtrauktu iegūšanu. Ņemot vērā pieņemto frekvences izšķirtspēju un vidējo vērtību skaitu, viena ieraksta kopējais ilgums sastāda  $25 * (1 / 0.488) = 51.2$  sekundes. Iegūto datu sākotnējai novērtēšanai visiem FFT kanāliem tiek uzstādīts “taisnstūra logs”, proti, netiek piemēroti papildus iestatījumi, lai mazinātu spektrālās noplūdes kļūdas.

Vislielāko interesi rada frekvenču reakcijas līdz 1000 Hz, kur izvietojas vairākas pirmās pīķu vērtības, tāpēc ievades kanāliem tika pielietots 2. pakāpes *Butterworth* zemfrekvences digitālais filtrs ar robežfrekvenci 1000 Hz, kas nodrošina maksimāli platu caurlaides joslu no 0 līdz 1000 Hz, šis robežas ietvaros pavājinot signālu tikai pa 3 dB, savukārt signāli ar augstāku frekvenci par robežfrekvenci tiek pakāpeniski samazināti ar ātrumu 12 dB uz vienu



oktāvu [121]. Oktāva ir frekvenču skalas dubultošana. Piemēram, no 1000 Hz līdz 4000 Hz ir divas oktāvas (no 1000 līdz 2000 un no 2000 līdz 4000).

Pēc QuickDAQ programmas konfigurēšanas katram paraugam tiek veikta datu ievākšana (5.5. att.), kas sastāv no sekojošiem soļiem:

1. Parauga novietošana uz balstiem un sensoru piestiprināšana.
2. Baltā trokšņa ierosināšana ar laikā un telpā nejaušiem pieskārieniem parauga virsmai.
3. Paralēli 2.solim – parauga reakcijas signāla ierakstīšana.
4. Mērījumu atkārtošana vēl trīs reizes.



5.5. att. Koka-betona kompozīta paraugs sagatavots atbildes reakcijas ierakstīšanai.

### 5.1.3. Koka-betona paraugu atbilžu reakciju uz balto troksni apstrāde

QuickDAQ programma ar iestrādāto FFT Analyzer saskarni, kas nodrošina katrā no sensoriem ierakstīto datu pāreju uz frekvenču domēnu, tiek izmantota tikai eksperimenta laikā notiekošo procesu vizualizācijai un kontrolēšanai. Eksperimenta laikā iegūto datu turpmākai apstrādei un analīzei tiek izmantots precīzāks rīks – ARTeMIS Modal programma. ARTeMIS programmā dinamisko parametru identifikācijai ir iestrādātās vairākas metodes, kas balstās gan uz frekvenču domēnu, kas nodrošina procesa uzskatāmību un lietotājiem draudzīgu vidi, gan arī uz laika domēnu, kas raksturojas ar rezultātu augstu precizitāti [90]. ARTeMIS dod iespēju veikt datu analīzi, kas tiek balstīta vienlaicīgi uz vairāku sensoru ierakstiem. Šim nolūkam, no datorprogrammas QuickDAQ tiek eksportēti ierakstītie dati laika domēnā, kas tālāk tiek importēti ARTeMIS programmā.

Pirmais solis ietver testējama parauga modeļa sagatavošanu ARTeMIS programmā. Ņemot vērā, ka paraugs tiek aplūkots kā brīvi balstīta sija un sensori ir izvietoti taisni vienā līnijā, tad dotajā gadījumā parauga ģeometriju veido ar taisnu līniju savienoti 8 punkti – 2 malējie punkti raksturo parauga balstus un pārējie 6 – sensoru izvietojumu pa parauga

garumu. Katram no šiem 6 punktiem tiek piešķirts atbilstošs sensoru ieraksts, kas bija ierakstīts ar QuickDAQ, norādot sensora virzienu.

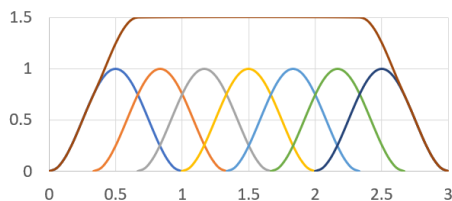
Sagatavojot parauga modeli, kas ietver neapstrādātus mērījumu ierakstus, tiek uzsākts datu apstrādes process. Datu apstrādei tiek izmantoti vairāki iestatījumi. Tiek noņemtas lineārās tendences no katra mērījumu kanāla, kas varēja rasties, piemēram, signāla novirzes gadījumā, un varētu iespaidot turpmāko signāla apstrādi un modālo analīzi. Tiek atļauts programmai izvēlēties nepieciešamo izmantojamo projekciju kanālu daudzumu, lai izvairītos no pārmērīgi liela daudzuma liekas krusteniskās informācijas spektrālā blīvuma novērtēšanas un uz neapstrādātiem laikrindu datiem balstīto parametrisko modeļu kalibrēšanas procesā. Parametriskā modeļa uzdevums ir – ar pēc iespējas mazākām novirzēm no izmērītās sistēmas reakcijas (mērījumiem) prognozēt sistēmas reakciju, un tas ir pamatā stohastisko apakštelpu identifikācijas tehnikās (SSI – *Stochastic Subspace Identification*), kas balstās uz laika domēna datiem. Spektrālā blīvuma diagrammai tiek saglabāta 0.488 Hz izšķirtspējā, bet to novērtējumam tiek izmantots programmā iebūvētais Hanninga logs ar 66 % pārklāšanos.

Lai iegūtu spektru, mērījumu ieraksts tiek sadalīts blokos, un katrs no šiem blokiem, ar galīgo garumu, tiek apstrādāts ar ātro Furjē transformāciju. Matemātiski šo sadalījumu blokos var aprakstīt kā noteiktās loga funkcijas ar nobīdes reizinājumu, un lai atjaunotu sākotnējo signālu, šīs funkcijas ir jāsasummē kopā. Tā kā veicot ātro Furjē transformāciju, tiek apskatīts tikai konkrēts atsevišķs laika mērījuma bloks, neievērojot to, kas notiek pirms un pēc apskatāmā signāla robežām, izvēlētajai loga funkcijai var būt liela ietekme uz galā iegūto spektru [122]. Visvienkāršākais logs ir taisnstūra veida, kas vienkārši izgriež signāla daļu (5.6.att.). Bet šī loga izmantošana bieži noved pie iegūtā spektra izkropļojuma un pārtraukumiem uz logu robežām [123].



5.6. att. Taisnstūra loga sadalījums.

Pie trokšņaino signālu mērījumiem, parasti, izmanto Hanna logu. Izmantojot *Hanna* jeb *Hanninga* logu, kura forma ir vienāda ar *cos* funkcijas formu  $[-\pi; \pi]$  robežās, ar 66 % pārklāšanos, ir iespējams būtiski samazināt spektra izkropļojuma un spektra noplūdes iespējamību [124]. Pārklāšanos ar 66 % nozīmē, ka 66 % no apstrādājamā signāla laika būs izmantojams atkārtotajam aprēķinam. Šādā gadījumā dati netiek zaudēti. Sasummējot logus ar 66 % pārklāšanos, tiek iegūta konstante, kas ir vienāda ar 1.5. Kā var redzēt no attēla 5.7, Hanna loga ar pārklāšanos izmantošana palielina datu apstrādes darbietilpību, bet tas ir attaisnojams ieguldījums spektra kvalitātē.



5.7. att. Hanninga logs ar pārklāšanos 66 %.

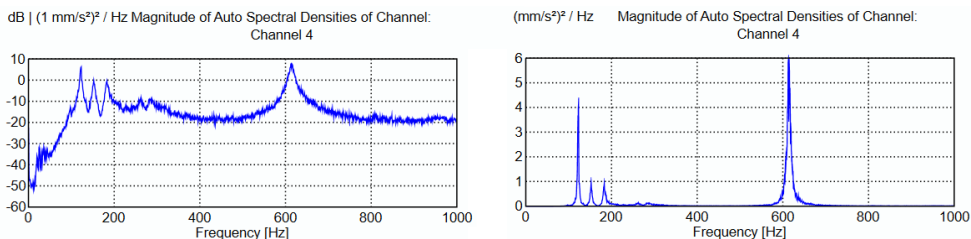
Tā kā iedarbe, kas tiek pielikta paraugam ir nejauša, raksturojas ar nenoteiktību attiecībā uz tās vērtību laika momentā, un to nevar aprakstīt ar matemātisko vienādojumu, harmoniku noteikšana spektrālā blīvuma diagrammā ir atspējota. Datu apstrāde tiek veikta arī, izmantojot stohastisko apakštelpas identifikācijas tehniku, ar programmā piedāvātajām metodēm. Izmantojot programmas piedāvāto automātisko SSI novērtēšanu, tiek automātiski identificētas modas, kas paātrina analīzes procesu. Iestrādātie algoritmi izvērtē atrastās modas un nosaka vai atbilstošā moda ir konstruktīvā, kas apraksta analizējamās konstrukcijas dinamiku, vai trokšņu moda, ko spektrālā blīvuma diagrammā ir grūti noteikt.

Frekvenču atbilžu diagrammas analīzei var lietot divus mēroģus – lineāro un puslogaritmisko. Lineārā mēroģa gadījumā jaudas spektrāla blīvuma diagramma, kas apraksta signāla enerģijas sadalījumu frekvences komponentos, atspoguļo sakarību starp frekvenci un signāla jaudu lineārajās mērvienībās. Saskaņā ar *Parsevala teorēmu* signāla jaudu frekvenču domēnā var iegūt, integrējot paātrinājuma, ātruma vai pārvietojuma funkciju laikā domēnā. Puslogaritmiskā mēroģa gadījumā, signālu jaudas izmaiņas tiek atspoguļotas decibelos (dB), kas ir logaritmisks lielums. Signālu jaudas izmaiņu decibelos starp diviem signāliem var noteikt pēc sekojošās formulas:

$$10 \log(M_2^2/M_1^2) = 20 \log(M_2/M_1) \quad (5.1)$$

kur  $M_1$  un  $M_2$  – attiecīgā signāla ar sensoriem uztvertā mēra amplitūda, piemēram, paātrinājums,  $\text{mm/s}^2$ .

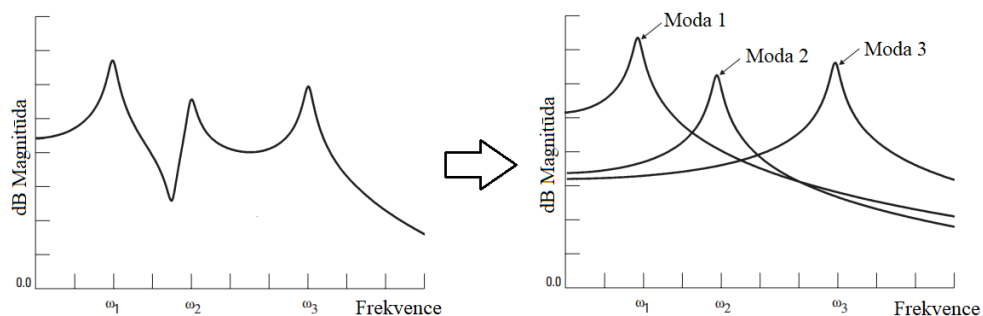
Puslogaritmiskais mēroģs dod iespēju uz vienas diagrammas aptvert plašāku frekvenču diapazonu un uzskatami attēlot amplitūdu diapazonu. Piemēram, signāla magnitūdas samazinājumu 128 reizes var attēlot kā signāla jaudas samazināšanos tikai par 21 dB. Attēlā 5.8 ir redzams viens un tas pats jaudas spektrs dažādos mēroģos.



5.8. att. Jaudas spektrs puslogaritmiskajā (pa kreisi) un lineārajā (pa labi) mēroģā.

Apstrādājot sākotnējus datus saskaņā ar augstāk minētajiem iestatījumiem, sākas faktiskā modālā analīze – iegūto datu novērtējums.

Sistēmas kustības brīvības pakāpe ir to neatkarīgo ģeometrisko lielumu skaits, kas viennozīmīgi nosaka visu sistēmas masu stāvokli laikā. Piemēram, sijai masa ir izkļiedēta, kas noved pie bezgalīga brīvības pakāpju daudzuma. Sistēmas ar daudzām brīvības pakāpēm reakciju var prezentēt kā vairāku sistēmu ar vienu brīvības pakāpi (SDOF) reakciju kopu, šī aptuvenā sistēmas reakcijas sadalīšana neatkarīgu SDOF sistēmu komplektā, pa vienai katrai modai ir frekvences domēna sadalīšanas (FDD – *Frequency Domain Decomposition*) tehniku pamatā. Shematiski šo procesu var redzēt attēlā 5.9.



5.9. att. Modālais superpozīcijas efekts [125].

FDD vienmēr nodrošina tikai aptuvenu nevis precīzu risinājumu, metodes mērķis ir izteikt sistēmas reakciju, ko raksturo savāktie dati, modās un modālajās koordinātēs:

$$y(t) = Aq(t) \quad (5.2)$$

kur  $y(t)$  – savāktie mērījuma dati,

$A$  – modu formu matrica,

$q(t)$  – modālo koordinātu vektors.

Modālās analīzes, kas balstās uz frekvenču domēnu, pamatā ir sekojoši soļi [126]:

- Pašsvārstību frekvences noteikšana saskaņā ar pīķa vērtībām spektrālā blīvuma diagrammā;
- Rimšanas koeficienta noteikšana pēc attiecīgā pīķa platumā;
- Modas formas noteikšana pēc jebkuras rindas vai kolonnas spektrālā blīvuma diagrammā.

ARTEMIS programmā ir piedāvātās trīs uz FDD balstītas metodes – klasiskā FDD, uzlabotā FDD jeb EFDD un līknes atbilstības FDD (*Curve-fit FDD*) jeb CFDD metode. Visu trīs metožu pamatā ir FDD, kas balstās uz frekvenču domēnu. Uzlabotajās metodēs – EFDD un CFDD, papildus tiek izmantots tā saucamais modālās garantijas kritērijs jeb MAC (*Modal Assurance Criterion*). Pētījumi rāda, ka ar CFDD ir iespējams panākt precīzāku dabisko frekvenču un rimšanas attiecību novērtējumu gan tīras stohastiskas ierosmes gadījumā, gan arī deterministiskas ierosmes klātbūtnē [127], tāpēc eksperimentālo datu analīzei no metodēm, kas balstās uz frekvenču domēnu, tiek izvēlēta CFDD metode.

Otrā veida metožu grupa, ko piedāvā ARTeMIS programma ir uz laika domēna balstīta metode, kuras pamatā ir SSI tehnika, kas raksturojas ar augstu parametru novērtējuma precizitāti un skaitļošanas efektivitāti salīdzinājumā ar citām OMA metodēm [92]. Uz laika domēnu balstītās metodes par pamatu izmanto parametriskus modeļus, tāpēc tās ir matemātiski sarežģītas.

Sistēmas modālie parametri ir saknes fundamentālajam kustības vienādojumam (5.3), kur katrai atsevišķai frekvencei un rimšanai atbilst unikāls nobīdes vektors, ko sauc par modas formu.

$$M\ddot{y}(t) + D\dot{y}(t) + ky(t) = v(t) \quad (5.3)$$

kur  $k$  – stinguma matrica,

$D$  – rimšanas matrica,

$M$  – masas matrica,

$y(t)$  – dati, ko laika gaitā uztver sensori (paātrinājums, ātrums, pārvietojums),

$v(t)$  – ierosme, kas nav zināma un netiek ierakstīta.

Stohastiskas apakštelpas identifikācijas metodes pamatā ir modelis, ko var aprakstīt sekojoši [92]:

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= Ax_k + w_k \\ y_k &= Cx_k + v_k \end{aligned} \quad (5.4)$$

kur  $y_k$  – izejas vektors (izmērītā reakcija),

$x_k$  – diskrētais stāvokļa vektors,

$w_k$  – procesa un modelēšanas troksnis, ko rada traucējumi un nezināma ierosme,

$v_k$  – mērījuma troksnis,

$k$  – laika moments,

$A$  – sistēmas dinamiskā matrica, kas raksturo sistēmas dinamiku,

$C$  – izvades matrica, kas nosaka, kā iekšējais stāvoklis tiek pārņemts uz ārējo vidi mērījumos.

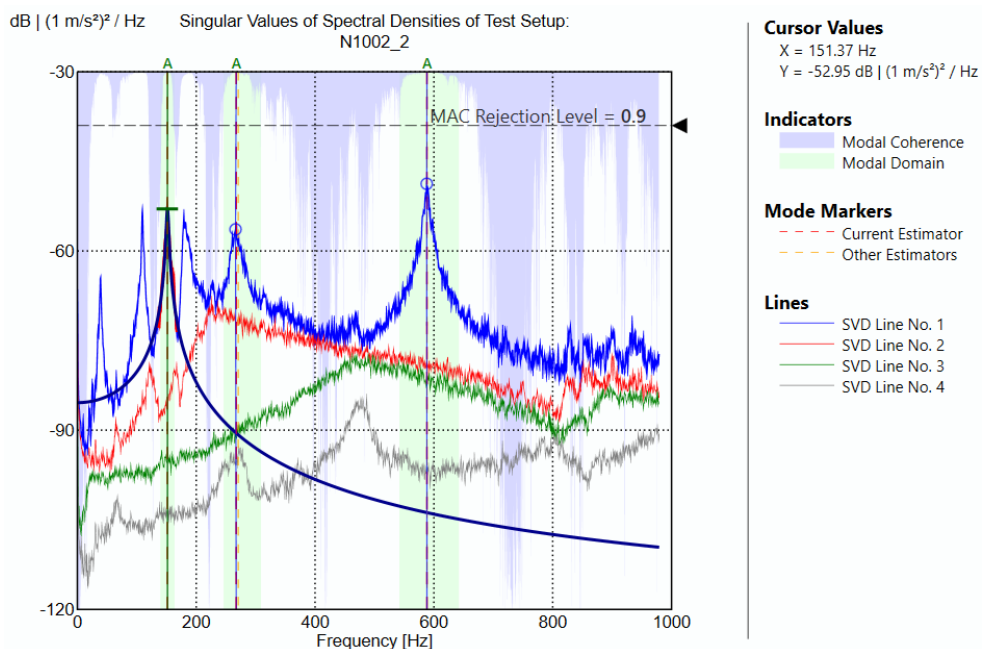
Mērķis ir iegūt fizisko informāciju no matricas  $A$ , zinot tikai sistēmas reakciju laika domēnā. Lai samazinātu aprēķinu laikietilpību un uzlabotu sistēmas dinamisko īpašību identifikācijas precizitāti, aprēķinos tiek izmantota tikai daļa no  $y_k$  izejas datiem, no kuriem tiek izveidota tā saucamā *Hankela* matrica, kas savā ziņā aizvieto frekvenču atbildes funkciju FRF. Izmantojot *Hankela* matricu, tiek projicēti matricas pagātnes un nākotnes nosacījumi, kas identificē sistēmu un palīdz iegūt noderīgu informāciju, tai skaitā fizisko matricu  $A$  [128]. Sīkāk par to, kā noteikt modālos parametrus, var apskatīt [92].

Eksistē vairākas metodes *Hankela* matricas apstrādei, no kurām var izšķirt šādas pamatmetodes – kanoniskā variantu analīzes (CVA) metode, nesvērtā principa komponenta (UPC) metode vai principiālā komponenta (PC) metode. Šo metožu precizitāte sistēmas parametru identificēšanā ir līdzīga. SSI-CVA iesaka izmantot datiem ar zemu signāla/trokšņa attiecību un pie modām ar ļoti atšķirīgu stiprumu. Ar modas stiprumu tiek domāta modas dominēšana reakcijas laikā. Augstas stiprības moda nozīmē labi ierosinātu modu, zemas stiprības – mazāku ierosmes modu, savukārt modas ar atšķirīgu stiprumu norāda uz modu ar zemu ierosmi esamību starp labi ierosinātajām modām. SSI-UPC ieteicams izmantot izejas datiem ar augstu signāla/trokšņa attiecību un līdzīga stipruma modām, savukārt SSI-PC

metode tiek uzskatīta kā kompromiss starp divām iepriekš minētajām metodēm [92]. ARTeMIS programma papildu piedāvā *Extended Unweighted Principal Component* jeb īsumā SSI-UPCX tehniku, kas ir uzlabotā SSI-UPC un atšķiras ar savu ātrumu un atmiņas efektīvāku izmantošanu. Eksperimentālo datu analīzei no metodēm, kas balstās uz laiku domēnu, tiek izvēlēta SSI-PC metode.

### 5.1.4. Modālajā analizē iegūto rezultātu novērtējums

Visiem 16 paraugiem tika noteiktas un izvērtētas pirmās trīs pašsvārstību frekvences ar attiecīgajiem rimšanas koeficientiem un kompleksitātes jeb modas sarežģītības pakāpi pēc 2 dažādām metodēm – CFDD un SSI-PC. Attēlā 5.10 ir redzams viena no parauga bez defektiem jaudas spektra novērtējums pēc CFDD metodes, izmantojot funkciju Automātiskā modālā novērtēšana.

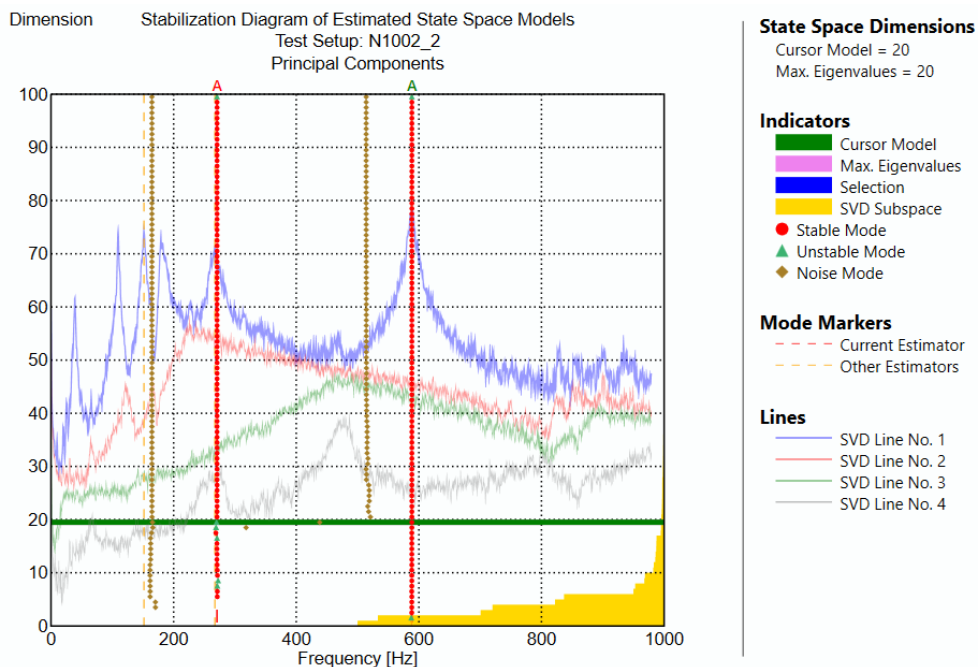


5.10. att. Jaudas spektrs pēc CFDD metodes.

Papildus automātiski atrastajām labi atdalītajām modām, kuru frekvences ir atzīmētas ar aplīšiem, diagrammā ir redzams, tā sauktais, modālais domēns – gaiši zaļā krāsā un modālā saskaņotība (*coherence*) – gaiši zilā krāsā. Automātiskā pīķu meklēšana balstās uz, tā sauktās, modālās koherences aplīsi. Modālā koherence ir mērs, kas būs vienāds ar 1 reģionā, kur dominē konkrētā moda un tā atrodas ap pīķu vērtībām. Diagrammas augšdaļa atbilst modālajai koherencei 1, diagrammas apakšdaļa – 0. Starp pīķu vērtībām modas tiek sajauktas un modālā koherence ievērojami samazinās. Apgabals, kur dominē viena moda, tiek apzīmēts kā modālais domēns. Tā ietvaros par modas frekvenci tiek izvēlēta frekvence, kas atbilst lielākajam pīķim. Jaudas spektrā ir izteiktie pīķi, kuriem, atbilstoši lineārajam sensoru izvietojumam, atbilst sarežģītas modu formas. Līdz ar to ir secināts, ka mērījumus, pat

elementiem, kas strādā vienā virzienā, ir ieteicams veikt, izvietojot sensorus telpiski divās dimensijās, piemēram, pa parauga perimetru, nevis lineāri – tikai pa parauga garumu.

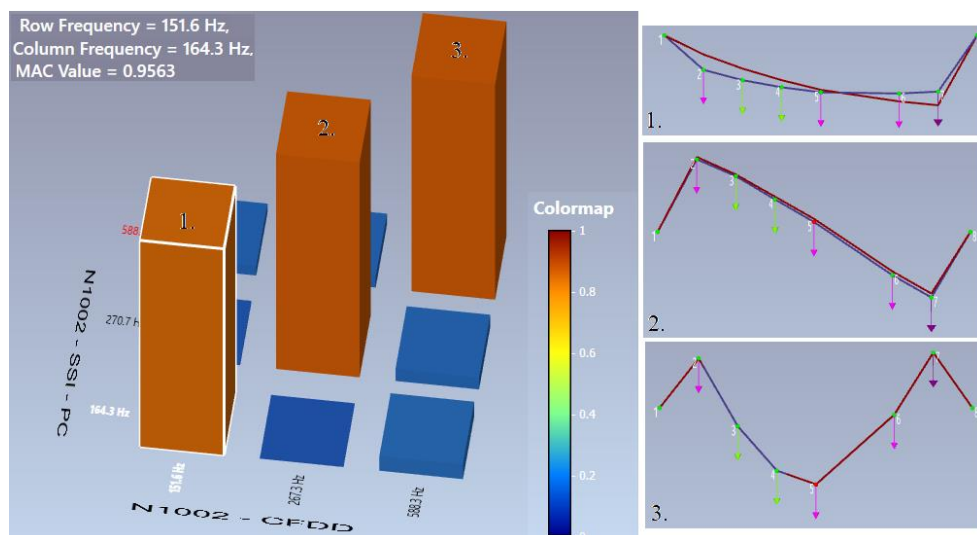
Attēlā 5.11 ir redzams viena no parauga bez defektiem modālais novērtējums pēc SSI-PC metodes. Ar vertikālajām līnijām ir atzīmētas noteiktās modas, kur sarkanā krāsā ir apzīmētas stabilas modas, savukārt ar brūno – trokšņu modas. Trokšņu modas parasti raksturojās ar lielu rimšanas koeficientu. Uzskatāmības nolūkā identificētās modas tiek attēlotās, izmantojot par fonu frekvenču spektru, kaut arī to aprēķins ir balstīts uz neapstrādātajām laukrindu datiem un tieša sakara ar frekvenču spektru identificētajām modām nav.



5.11. att. Stabilizācijas diagramma pēc SSI-PC metodes.

Validējot pēc abām identifikācijas metodēm iegūtās modas, tiek veikta rezultātu savstarpējā apstiprināšana un modālo rezultātu kvalitātes kontrole. Konkrētajam paraugam 3 modu MAC vērtības, frekvenču un rimšanas koeficientu vērtības, kā arī modu formu salīdzinājums ir redzams attēlā 5.12 un tabulā 5.1. *Modal Assurance Criterion* ir statistikas rādītājs, ko izmanto modu pāru formu savstarpējai salīdzināšanai. Šis kritērijs ir ļoti jutīgs pret lielām atšķirībām un salīdzinoši nejutīgs pret nelielām modu formu atšķirībām. Otrajai un trešajai modām MAC vērtība ir virs 0.99, pirmajai modai tas ir 0.96. Pirmajai modai pēc SSI-PC tehnikas ir liels rimšanas koeficients, kas norāda uz modas nevis konstruktīvu, bet trokšņainu dabu.





5.12. att. Trīs pirmo modu, identificēto ar CFDD un SSI-PC metodēm salīdzinājums.

5.1. tabula

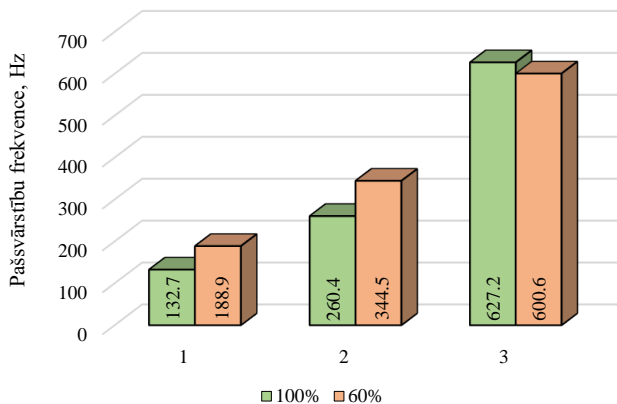
Saskaņā ar CFDD un SSI-PC metodēm noteikto modālo parametru apkopojums paraugam bez defekta

Metode	Moda	Frekvence $f$ , Hz	$\Delta f$ , %	Rimšanas koeficients, %	Komplicētība, %
CFDD	1.	151.6	7.7	1.28	0.03
	2.	267.3	1.3	1.88	0.24
	3.	588.3	0.0	0.72	0.61
SSI-PC	1.	164.3		13.70	0.46
	2.	270.7		7.25	0.30
	3.	588.5		0.97	0.19

Salīdzinot frekvenču vērtības visiem 16 paraugiem, kas tika iegūtas pēc divām dažādām metodēm – CFDD un SSI-PC, vislielākā rezultātu sakritība tika novērota 3. modas frekvences vērtībai. Paraugiem bez defektiem šo vērtību atšķirība nepārsniedz 0.3 %, savukārt, paraugiem ar defektu vidēja atšķirība sastāda 0.9 % tai skaitā ar vienu paraugu, kuram šī atšķirība sasniedz 2.8 %. Kopumā iegūtie rezultāti apliecina frekvences vērtības, kas atbilst 3. modai augstu ticamības pakāpi. Otrai modai atbilstošo frekvenču vērtību atšķirības ir augstākās, vairākiem paraugiem sasniedzot jau vairākus procentus. Savukārt pirmās modas frekvence pusē no gadījumu ar SSI-PC metodi netika noteikta, apzīmējot attiecīgo frekvenču vērtību kā trokšņa frekvenci. Attēlā 5.13 ir apkopotas pašsvārstību vidējās frekvences saskaņā ar CFDD metodi. Vērā ņemamā atšķirība starp paraugiem ar un bez defektiem ir otrās modas frekvencē. Paraugiem ar defektu tā ir augstāka par aptuveni 32 %. Daļai no paraugiem, betona sastāvam 0.5 % daudzumā bija pievienotas sintētiskās fibras PP Strux 90/40, eksperimenta

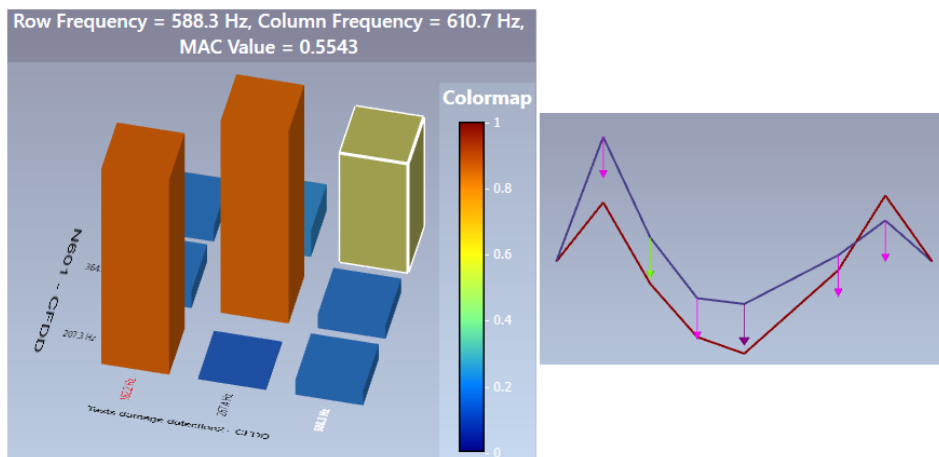


laikā tika konstatēts, ka fibras būtiski neietekmē paraugu ar un bez defektiem reakciju uz balto troksni.



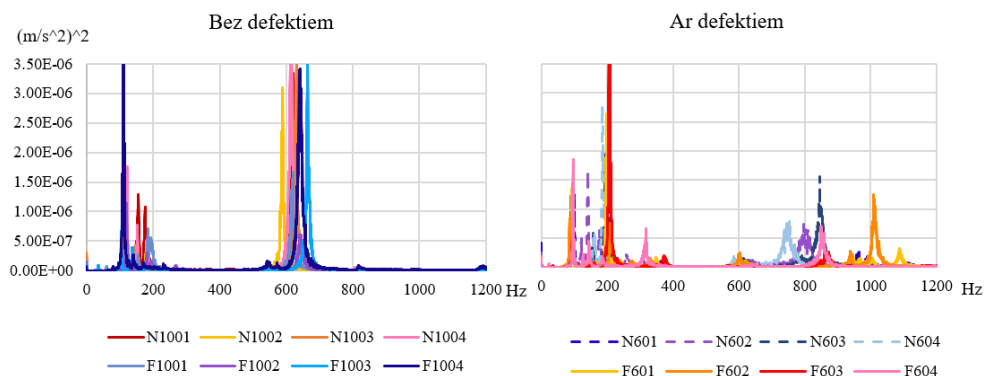
5.13. att. Pirmo trīs modu frekvenču vidējās vērtības paraugiem ar un bez defektiem savienojumā, kur 100% – bez defektiem, 60% – ar 40 % lielu defektu.

Pirmās divas modu formas paraugiem ar un bez defektiem būtiski neatšķiras. Savukārt, 3. modas formai ir konstatētas acīmredzamas izmaiņas defektu dēļ. Attēlā 5.14 ir apkopota divu paraugu modu formu salīdzinājums. Salīdzinājums rāda, ka paraugam ar un bez defekta pirmo divu modu formas gandrīz neatšķiras, MAC sastāda 0.99 un 0.98 attiecīgi 1. un 2. modām. Savukārt, 3 modas formas salīdzinājuma rezultātā MAC ir vienāds ar 0.55, kas veido būtiskas atšķirības.



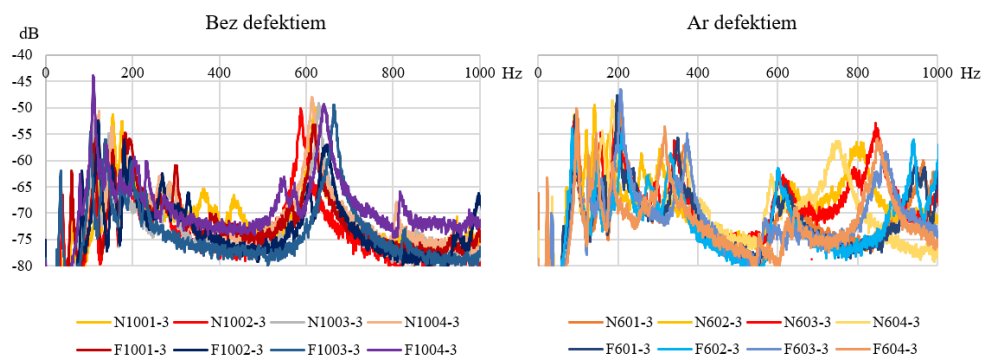
5.14. att. Modu formu savstarpējais salīdzinājums paraugam ar un bez defekta.

Izmaiņas var novērot arī signāla jaudas spektrā lineārajā mērogā no vidēja sensora, ko var redzēt attēlā 5.15. Ja paraugiem bez defekta 3. modas frekvence ap 600 Hz ir dominējošā, tad paraugiem ar defektu pie 3. modas frekvences ir novērojama zema līmeņa ierosme.



5.15. att. Signāla jaudas spektrs no vidējā sensora.

Apkopojot signālu jaudas spektrus no visiem sensoriem puslogaritmiskajā mērogā, papildus iepriekš minētajai parādībai, var papildus novērot, ka paraugiem ar defektu ne tikai palielinās 2. modas frekvences vērtība, bet arī atbilstošs signāla stiprums (pie aptuveni 340 Hz), salīdzinājumā ar paraugiem bez defekta (5.16. att.).



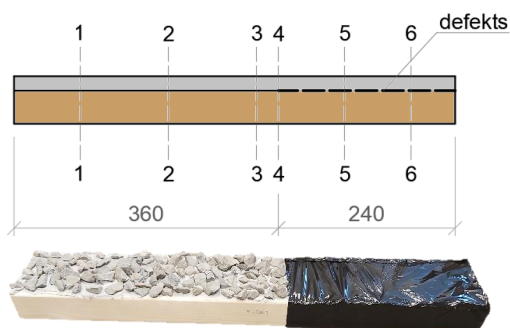
5.16. att. Signāla jaudas spektrs no visiem sensoriem.

Tādējādi, modālajā analizē konstatētās atšķirības starp paraugu sērijām ļauj apgalvot, ka bojājumu esamība stingrajā savienojumā starp betona un koksnes slāņiem ietekmē koka-betona kompozīta parauga atbilstošu reakciju un dinamiskos parametrus. Līdz ar to, noteiktos apstākļos operacionālo modālo analīzi ir iespējams efektīvi izmantot koka-betona kompozīta konstrukciju savienojuma starp betona un koksnes slāņiem kvalitātes un defektu esamības novērtēšanai. Apskatītā metode ļauj veikt nesagraujošo kvalitātes pārbaudi globālā mērogā, apskatot visu konstrukciju kopumā. Tas var būt īpaši aktuāli pie liela daudzuma ar liela izmēra konstrukcijām ražošanas, kad defektu lokālas pārbaudes metodes būtu laikietilpīgas. Izveidojot vienu etalona konstrukciju, ko var pārbaudīt ar lokālām defektu pārbaudes metodēm, tās modālas analīzes rezultātus var izmantot par referenci pārējām konstrukcijām. Šīs metodes pielietošana konstrukciju monitoringam ekspluatācijas laikā ir sarežģīta dēļ aplūkojamās konstrukcijas lietošanas veida. Koka-betona kompozīta plātnes ir paredzētas lietošanai starpstāvu pārsegumos, no kā izriet, ka tās tiks regulāri pakļautas īslaicīgas un kvazi

pastāvīgas slodzes iedarbībai, ietekmējot un mainot konstrukcijas aprēķina shēmu, salīdzinājumā ar references stāvokli – sākotnēji izbūvēto konstrukciju. Lai būtu iespējams salīdzināt konstrukcijas aktuālos modālos parametrus ar sākotnējiem, ir jānodrošina konstrukcijas vienādus apstākļus.

## 5.2. Ultraskaņas defektoskopija

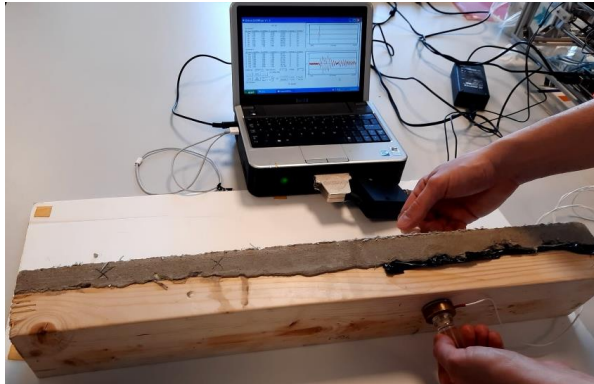
Literatūrā ir sastopami pētījumi par ultraskaņas defektoskopijas pielietošanu betona konstrukcijām un koka konstrukcijām, bet pētījumus par ultraskaņas pielietošanu koka-betona kompozīta konstrukcijās atrast neizdevās. Ņemot vērā, ka koksne un betons ir dažādas struktūras materiāli, darba ietvaros ir veikta laboratoriskā pārbaude koka-betona kompozīta paraugiem ar defektu stingajā savienojumā, lai noskaidrotu sagaidāmos rezultātus no lokālas konstrukcijas pārbaudes ar ultraskaņu. Mērījumu sērija ir veikta 4 mazgabarīta paraugiem ar iestrādātiem defektiem. Katram paraugam ir veikti 6 mērījumi. Mērījumu vietu izvietojums ir redzams attēlā 5.17. Mērījumi 1-1 un 2-2 ir veikti parauga daļā bez defektiem; 5-5 un 6-6 – parauga daļā ar defektiem; 4-4 – uz robežas starp parauga daļām ar un bez defektiem; 3-3 – parauga daļā bez defektiem, robežas starp parauga daļām ar un bez defektiem tuvumā.



5.17. att. Mērījumu vietu izvietojums pa parauga garumu un parauga defekta izveide tā ražošanas laikā.

Ultraskaņas izmantošana defektu noteikšanai ir viena no izplatītākajām nesagraujošas kontroles metodēm. Eksistē ultraskaņas metodes, kas ļauj veikt pārbaudi no parauga vienas puses vai arī no parauga abām pusēm. Konkrētajā gadījumā, lai vizualizētu ultraskaņas signāla iziešanu caur parauga daļu ar un bez defekta, ir izmantota pārraides ultraskaņas metode, izvietojot signāla devēju un uztvērēju parauga pretējās pusēs, vienu tieši pretī otram, kā to var redzēt attēlā 5.18. Mērījumi ir veikti ar Rīgas Tehniskajā universitātē izstrādāto eksperimentālo ultraskaņas aparātu un programmatūru [129]. Devējs un uztvērējs sastāv no diskiem ar pjezo elementiem, signāla slāpētāji konkrētajā modelī nav. Laba saķere starp parauga virsmu un ierīci tiek nodrošināta ar speciālo šķidrums, dotā eksperimenta laikā ir izmantots vazelīns. Caurejošā metode paredz, ka devējs, izmantojot pjezoelektrisko efektu, ģenerē ultraskaņas impulsu, kas iziet cauri pētītajam objektam, un objekta pretējā malā, uztvērējs, izejošo signālu, reģistrē. Tiek sūtīts viens impulss, ko raksturo viens periods, bet dēļ

ultraskaņas viļņa īpašības atstaroties no parauga malām, reģistrējams signāls sastāv no daudziem periodiem, kuri pakāpeniski norimst.



5.18. att. Ultraskaņas defektoskopijas gaita ar Rīgas Tehniskajā universitātē izstrādāto eksperimentālo ultraskaņas aparātu un programmatūru.

Izmantojamā ultraskaņas impulsa frekvence ir 100 kHz. Šāda viena impulsa mērījuma laiks ir aptuveni 1 milisekunde. Mērījumu ņemšanas ātrums bija izmantots 30000 SPS (paraugu skaits sekundē), izšķirtspēja – 10 biti, tādējādi, nomērītā signāla 1 milisekundes digitalizācijai ir izmantoti  $0.001 \cdot 30000 \cdot 2^{10} = 30720$  punkti.

Ultraskaņas defektoskopijas veiksmīgā pielietošana savienojuma kvalitātes kontrolei koka-betona kompozītam, balstās uz akustiskās impedances starpību dažādos materiālos. Akustiskā impedance  $Z$  raksturo vides (materiāla) pretestības līmeni ultraskaņas viļņu svārstībām, to var aprēķināt pēc formulas (5.5).

$$Z = c \cdot \rho \quad (5.5)$$

kur  $c$  – skaņas ātrums, m/s;

$\rho$  – vides blīvums, kg/m<sup>3</sup>.

Jo lielāks ir vides blīvums, jo lielāka ir akustiskās impedances vērtība. Kad ultraskaņas vilnis, izejot cauri vienam materiālam, saduras ar cita materiāla robežu, daļa no viļņa enerģijas atstarojas un daļa pāriet otrajā materiālā. To, cik enerģijas atstarosies, ietekmē abu materiālu akustiskā pretestība jeb impedance. Jebkuriem diviem materiāliem atstarošanas koeficientu  $R$ , kā procentu no visas viļņa enerģijas var aprēķināt pēc formulas (5.6).

$$R = \left( \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2 \cdot 100\% \quad (5.6)$$

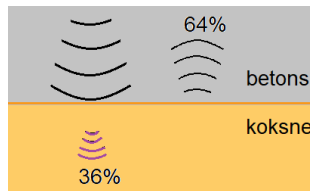
kur  $Z_1, Z_2$  – pirmā un otrā materiāla akustiskā impedance.

Tabulā 5.2 ir apkopoti dati akustiskās impedances noteikšanai priedei, betonam un gaisam. Priedes koksnei skaņas viļņa ātrums ir norādīts virzienā, kurā tika veikti mērījumi, tas ir – radiālajā virzienā. Polipropilēna plēves, kas ir izmantota defekta savienojumā nodrošināšanai paraugu izgatavošanas laikā, akustiskā impedance ir salīdzināma ar koksnes materiāla akustisko impedanci.

Materiālu akustiskās raksturvērtības

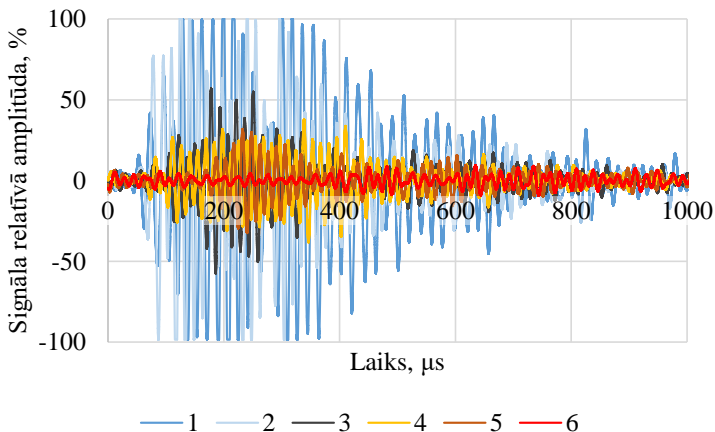
	c, m/s	$\rho$ , kg/m <sup>3</sup>	Z, kg/(sm <sup>2</sup> )	Gaiss, 20°C	R, %	
					Priede	Betons, C20
Gaiss, 20°C	344 [130]	1.2 [131]	412.8	0	99.9	100.0
Priede	2500 [132]	420	1050000.0	99.9	0	63.4
Betons, C20	3700 [133]	2500	9250000.0	100.0	63.4	0

Kā var redzēt no aprēķinātajiem atstarošanas koeficientiem, vilnim, izejot caur betonu vai koksni un saskaroties ar gaisa vidi, gandrīz 100 % no viļņa enerģijas atstarojas. Šis princips ir pamatā defektu, kas ietver gaisa šķirkārtas, noteikšanai ar ultraskaņu. Uz betona-koka materiālu robežas atstarojošas enerģijas lielums ir līdz 64 %, bet ap 36 % no viļņa enerģijas tiek nodots uz otro materiālu. Šī procesa vizuālais atainojums ir redzams attēlā 5.19.



5.19. att. Ultraskaņas viļņa atstarojums un pāreja no betona materiāla koksnē.

Attēlā 5.20 ir apkopoti 6 mērījumu dati vienam no paraugiem, kā nomērītā signāla relatīvās amplitūdas atkarība no laika.



5.20. att. Mērījumu ieraksti no pārbaudes ar ultraskaņu parauga dažādās vietās (1–6 saskaņā ar 5.17 attēlu).

Caur parauga daļu bez defekta, tālu no robežas, kur sākas defekts, ultraskaņas signāls, kas iziet paraugam cauri, ir stiprs un raksturojas ar lielu amplitūdu (mērījumi 1 un 2). Signāls ir

tik stiprs un labs, ka pielietotās izšķirtspējas pat nepietiek, lai reģistrētu amplitūdu maksimālās vērtības un tās tiek attēlotas kā nogrieztas. Tuvojoties robežai ar defektu – nomērītā signāla maksimālā amplitūda pakāpeniski samazinās. Kā var redzēt no tabulas 5.3, mērījumam 3. pozīcijā maksimālās amplitūdas vērtība samazinājās par aptuveni 42 % salīdzinājumā ar maksimālo nomērīto amplitūdas vērtību, kas atbilst parauga daļai bez defekta, jo daļa no ultraskaņas signāla jau neiziet cauri defektam savienojumā. Sasniedzot defekta robežu, un parauga daļā ar defektu, robežas tuvumā, (mērījumi 4 un 5), signāla maksimālā amplitūda turpina ievērojami krist, šis kritums jau sasniedz 60–70 %. Nomērītais signāls jau ir vājš, jo uztvertais signāls ir tā signāla daļa, kas apiet defektu parauga daļā, kur savienojums starp materiāliem ir bez defekta. Savukārt, vietā, kur defekta klātesamība ir izteikta un tuvumā nav vietas bez defekta – ultraskaņas signāls neiziet cauri abu materiālu savienojumam. Signāla amplitūdas vērtība nesasniedz 10 % no maksimālās amplitūdas vērtības pie signāla pārraides vietā bez defekta. Šo amplitūdas vērtību lielākoties sastāda signāls, kas izplatās pa visu paraugu, atstarojas no tā malām un klaiņo, jo apskatāmā parauga garums nav bezgalīgs. Pie lielākiem parauga izmēriem šis amplitūdas procents būs vēl zemāks.

5.3. tabula

Defekta esamības ietekme uz ultraskaņas signāla amplitūdu

	1.	2.	3.	4.	5.	6.
$A_{max}, \%$	100.0	100.0	57.1	38.0	31.9	9.6
$A_{min}, \%$	-98.5	-98.5	-57.6	-38.3	-32.5	-9.4
$\Delta_{max}, \%$	0.0	0.0	42.9	62.0	68.1	90.4
$\Delta_{min}, \%$	0.0	0.0	41.6	61.1	67.0	90.5

Tādējādi, ultraskaņas defektoskopiju ir iespējams veiksmīgi izmantot koka-betona kompozīta stinga savienojuma, kas izgatavots pēc piedāvātas šķembu metodes, lokālai kvalitātes kontrolei, neraugoties uz pietiekami lielu ultraskaņas viļņa enerģijas atstarošanas koeficientu starp betonu un koksni.

### 5.3. Sintētiskā dispersā stiegrojuma ietekme uz koka-betona kompozīta plātnes sabrukuma ainu

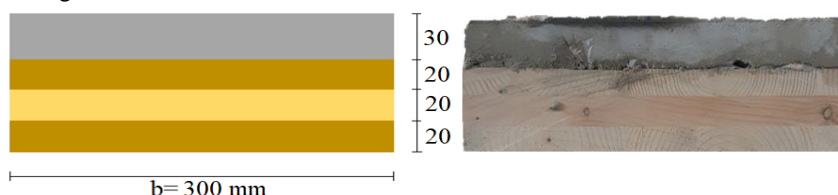
Veicot darba ietvaros dažādus laboratorijas eksperimentus, notika saskarsme ar betona slāņa bīstamu, trauslu sabrukuma veidu ar betona gabalu atdalīšanos no paraugiem. Lai padarītu koka-betona kompozīta konstrukciju sabrukumu plastiskāku un apkārtējai videi drošāku, ir veiktas eksperimentālas pārbaudes koka-betona kompozīta paraugiem ar disperso sintētisko stiegrojumu betona slānī.

Betonam, pat pie neliela spriegumu līmeņa, ir raksturīga izteikta materiāla nelinearitāte. Fibru izmantošana uzlabo betona īpašības, šis uzlabojums ir atkarīgs no daudziem faktoriem, tāpēc viennozīmīgi prognozēt fibrobetona īpašības ir komplicēts darbs. Pētījumi rāda, ka fibras novērš plaisu izplatīšanos betonā, samazina betona trauslumu, kā arī ievērojami uzlabo

betona uzvedību pēc plaisu parādīšanās, tāpēc arī materiāla enerģijas absorbciju [108, 134, 135]. Eksistē daudz pētījumu [136, 37, 137], kur eksperimentāli ir iegūtas spriegumu-deformāciju līknes betonam ar un bez dispersā stieģrojuma, kas pierāda ievērojamo pieļaujamo deformāciju vērtību pieaugumu pēcīķa posmā, kad betonā ir parādījušās plaisas.

Ar nolūku pārbaudīt, vai fibru pievienošana sniedz pozitīvu efektu uz koka-betona kompozīta elementu sabrukuma ainu, tika paveikta koka-betona kompozīta elementu laboratoriskā testēšana paraugiem ar rūpnieciski ražotu CLT plātni pamatā. Tika izgatavoti pa diviem koka-betona paraugiem ar un bez dispersā stieģrojuma betona slānī. Betona slānis visiem paraugiem tika iestrādāts pēc piedāvātās šķembu metodes.

Attēlā 5.21 ir redzami paraugu šķērsgriezuma parametri. Visos gadījumos ir iestrādāts 30 mm biezs Sakret BAM betona slānis ar stiprību C20 uz iepriekš pielīmētām ar Sikadur 30 epoksīda sveķiem 16–25 mm frakcijas granīta šķembām. Izmantotais CLT panelis ir ar kopējo augstumu 60 mm, kas veidots no C24 klases koksnes. Izgatavotu paraugu kopējais platums ir 300 mm un garums 1300 mm.



5.21. att. Testējamo paraugu šķērsgriezums.

Labāku plaisu kontroli betonā nodrošina fibras ar lielāku attiecību starp fibras garumu un diametru. No otras puses, jo lielāka ir šī attiecība, jo lielāka ir kunkuļu veidošanas varbūtība, kas ir bīstama ar nevienmērīgu fibru sadalījumu un mazu fibru daudzuma iespējamību elementa kritiskajos šķērsgriezumos. Šādā veidā, fibras ar garuma-diametra attiecību zem 20 nevar nodrošināt pilnvērtīgu spriegumu sadalījumu plaisu attīstības gadījumā un izslīd no sacietējušās betona masas, savukārt fibras ar garuma-diametra attiecību virs 150 rada lielu kunkuļu veidošanas risku un sliktu iestrādājamības pakāpi. Par vēlamu garuma-diametra attiecību parasti sauc diapazonu no 40 līdz 100 [138]. Iestrādājamības pakāpi pasliktina arī fibru daudzums betona sastāvā, jāievēro, ka palielinoties tam, būtiski samazinās betona iestrādājamības pakāpe. Sintētisku polimēru fibru pievienošana daudzumā no 0.4 % līdz 0.8 % spēj nostiprināt betona matricu un panākt efektīvāku plaisu kontroli [139]. Tāpēc koka-betona kompozīta paraugiem ar sintētisko disperso stieģrojumu, betona sastāvam ir pievienotas polipropilēna makro šķiedras PP Strux 90/40 0.5 % daudzumā no betona tilpuma (att. 5.22). Fibru raksturlielumi, atbilstoši ražotāja datiem, ir apkopoti tabulā 5.4.

5.4. tabula

Sintētisko fibru PP Strux 90/40 raksturlielumi

Garums, mm	Garuma-diametra attiecība	Stiepes stiprība, MPa	Elastības modulis, GPa	Robeždeformācija, %
40	90	620	9.5	10



a)



b)

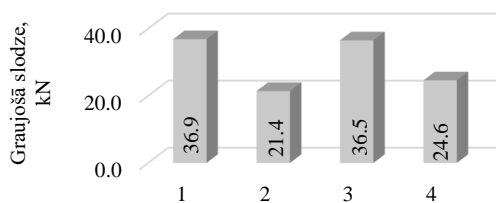
5.22. att. Sintētiskās makro šķiedras PP Strux 90/40: a) ārējais izskats; b) pievienošana betona sastāvam.

Koka-betona kompozīta paraugi tika testēti trīs punktu liecē ar laidumu 1.2 m, līdz sabrukumam. Testēšana ir veikta ar hidrauliskās sloģošanas iekārtas CONTROLS (Cat. C55G2) palīdzību. Slodzes-pārvietojumu eksperimentālās vērtības ir fiksētas automātiski, pieslēdzot digitālus sensorus datoram (att. 5.23.).



5.23. att. Koka-betona paneļu sloģošanas gaita trīs punktu liecē.

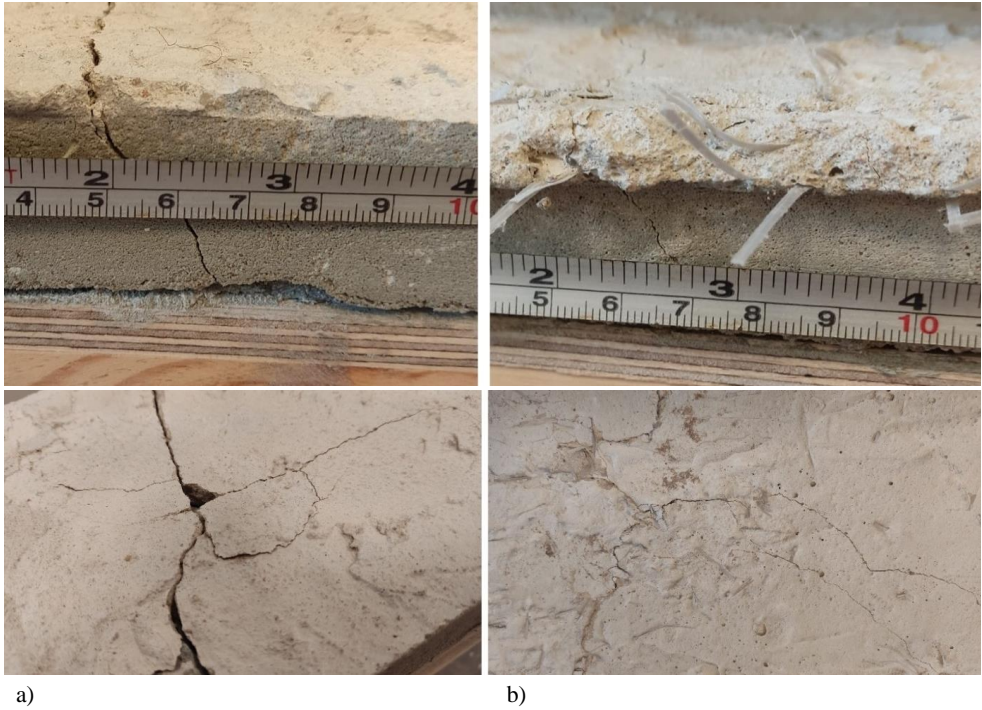
Būtisko ietekmi uz paraugu nestspēju fibras neatstāj. Attēlā 5.24. ir apkopotas graujošās slodzes paraugiem ar un bez fibrām. Paraugiem ar pievienoto disperso stieģrojumu vidējā graujošā slodze ir par 4.8 % lielāka nekā paraugiem bez fibrām, bet iegūto slodžu vērtību izkliede ir liela.



5.24. att. Graujošo slodžu vērtības CLT-betona paraugiem ar un bez fibrām, kur 1 un 2 – paraugi bez fibrām; 3 un 4 – paraugi ar fibrām.

Savukārt, efekts no fibru izmantošanas koka-betona kompozīta paraugu sabrukuma ainās bija acīmredzams. Koka-betona kompozīta paraugiem ar disperso stieģrojumu ir raksturīgas mikroplaisas, kas ir sīkākas par cilvēka mata biezumu (att. 5.25).

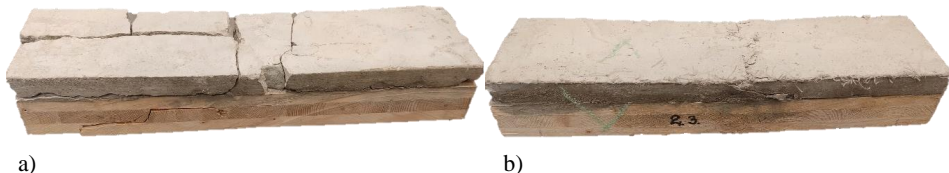




5.25. att. Plaisu raksturs un attīstība, kas raksturīga koka-betona kompozīta paraugiem a) bez fibrām; b) ar fibrām.

Ja betona sastāvā ir pievienotas fibras, tad vienas lielas plaisas lineārās attīstības vietā, veidojas vairākas sīkākas plaisas, jo fibru esamība veicina spriegumu pārdalījumu. Parādoties plīsam, betons turpina strādāt, jo fibras spēj turpināt pārnest stiepes spriegumus.

Paraugiem ar pievienotajām betona sastāvā fibrām pilna sabrukuma aina ir savādāka, nekā paraugiem bez fibrām. Paraugi ar fibrām raksturojās ar mazāk trauslu sabrukumu. Kā var redzēt attēlā 5.26, koka-betona kompozīta paraugi ar fibrām pēc pilna sabrukuma būtiski nemaina savu izskatu – betona slānis saplaisā, bet kopumā plātne nezaudē savu integritāti, atšķirībā no paraugiem bez fibrām, kuriem ir raksturīgā betona gabalu atdalīšanās no koka plātnes.



5.26. att. Pilna sabrukuma aina, kas raksturīga koka-betona kompozīta paraugiem a) bez fibrām; b) ar fibrām.

Tādējādi, fibrobetons koka-betona kompozīta konstrukcijās ļauj saglabāt konstrukcijas kopējo drošumu un integritāti un attīsties no papildus tērauda garenstieģrojuma izmantošanas betona slānī, kas strādā tikai spiestajā zonā.

## SECINĀJUMI

Promocijas darbā izvirzītais mērķis un uzdevumi ir sasniegti. Ir izstrādāts inovatīvas koka-betona kompozīta konstrukcijas ilgtspējīgs un drošs risinājums, kas raksturojas ar kompozīta materiālu visefektīvāko sinerģiju un racionālu materiālu pielietojumu.

Promocijas darba rezultātā ir iegūti šādi galvenie secinājumi.

1. Ir izstrādāta stingra adhezīva savienojuma starp koka un betona slāņiem jauna izgatavošanas metode, kas nodrošina koka un betona materiālu pilnu kopdarbību. Piedāvātā šķembu metode nodrošina savienojuma vizuālas un mehāniskas kontroles iespēju koka-betona savienojuma izgatavošanas laikā, ir saistīta ar zemu līmes slāņa nobīdes risku, un nodrošina dabisko saites veidošanos starp betona masu un šķembām.
2. Iegūtie rezultāti pierāda, pēc šķembu metodes izgatavotā savienojuma augstāku drošuma līmeni, salīdzinājumā ar pēc mitrās metodes izgatavotu koka-betona savienojumu. Pēc piedāvātās metodes koka-betona kompozīta paraugi bīdes testos ir uzrādījuši lielāku graužošās slodzes vidējo vērtību ar mazāku rezultātu dispersiju.
3. Pierādīts pozitīvs efekts uz betona mehāniskajām īpašībām savienojuma tuvumā no šķembu metodē izmantojamajām šķembām, kas papildus pilda betona pildvielas lomu. Noteikts koka-betona kompozīta paraugu graužošanas slodzes liecē līdz pat 30 % liels pieaugums pie lielākām šķembu frakcijām (16–25 mm), salīdzinājumā ar paraugiem pie 2–5 mm un 5–8 mm frakcijas. Eksperimentāli pierādīts, ka ietekme no frakcijas izmēra uz slodžu-pārvietojumu līknes raksturu ir niecīga, tāpēc ir secināts, ka šķembu frakcijai nav būtiska loma koka-betona kompozīta uzvedībā, jo šīm konstrukcijām parasti noteicošs ir lietojamības robežstāvoklis.
4. Izstrādāta metodika un programmatūra koka-betona kompozīta plātņu ar pilnu kompozītdarbību racionālu parametru ātrai noteikšanai. Koka-betona kompozīta plātnes ir atzītas par ekonomiski pamatotu konstruktīvu risinājumu izmantošanai gan dzīvojamajās, gan arī biroja ēkās salīdzinājumā ar analogiskajiem konstruktīvajiem risinājumiem bez betona slāņa pie visām vibrāciju kvalitātes klasēm. Pie augstākas vibrāciju kvalitātes klases CLT-betona un saplākšņa-betona plātnēm ir līdz pat par 44 % un 42 % zemākas izmaksu koeficienta vērtības un 25 % un 33 % mazāki šķērsriezuma augstumi salīdzinājumā ar analogiskajiem risinājumiem bez betona slāņa.
5. Noteikts, ka pie A un B lietošanas kategorijām saplākšņa-betona plātnēm ir, attiecīgi, vidēji par 66 % un 65 % zemāki izmaksu koeficienti, kas rezultējas vidēji par 25 % un 29 % lielākiem plātņu augstumiem salīdzinājumā ar CLT-betona plātnēm. Robežās, kur ar saplākšņa-betona risinājumu ir iespējams nodrošināt līdzīgu CLT-betona plātnēm augstumu, izmaksu koeficienta samazinājums svārstās robežās no 18 % līdz 51 %.
6. Eksperimentāli pierādīta mazāka plātņu graužošanas slodzes izkliede pie zemāka koksnes materiāla īpatsvara. Variācijas koeficients saplākšņa-betona plātnēm sastādīja 11 %, savukārt CLT-betona paraugiem – 28 %.
7. Laboratorijas eksperimentu gaitā ir novērota pēc sausās metodes izgatavotu koka-betona kompozīta konstrukciju krasi atšķirīga uzvedība no projektējami sagaidāmās uzvedības

defektu koka-betona savienojumā esamības dēļ. Ar skaitliskajiem eksperimentiem, pēc izstrādātās defektu ietekmes novērtēšanas metodes, pierādīts, ka defekti, kas veido lielas nepārtrauktas platības 30 %, 40 % un 50 % apmērā no visas koka-betona savienojuma virsmas platības, ir bīstami un rezultējās ar, attiecīgi, par 24 %, 72 % un 137 % lielākām izliecēm nekā pie 100 % kvalitatīva savienojuma. Pēc platības mazi defekti (ar garumu līdz 10 % no plātnes garuma) pat pie liela to kopēja daudzuma (līdz 75 % no visas savienojuma virsmas platības), būtiski neietekmē koka-betona kompozīta konstrukcijas enerģijas absorbciju. Papildus tam, liela izmēra defekti koka-betona savienojumā, saskaņā ar laboratorijas testiem, ietekmē konstrukcijas reakciju uz dinamiskajām slodzēm, mainot konstrukcijas dinamiskus parametrus, tādus kā modu formas un pašsvārstību frekvenču vērtības.

8. Aprobēta un atzīta par efektīvu operacionālā modālā analīze koka-betona kompozīta konstrukciju globālajām novērtējumam uz defektu esamību savienojumā starp kompozīta slāņiem. Eksperimenta gaitā ir konstatētas būtiskas atšķirības dinamiskajos parametros koka-betona kompozīta paraugiem ar un bez defekta savienojumā. Ir noteiktas būtiskas 3. modas formas izmaiņas defekta dēļ (statistikas rādītājs, ko izmanto modu pāru formu savstarpējai salīdzināšanai,  $MAC = 0.55$ ).
9. Ir piedāvāts risinājums koka-betona kompozīta savienojuma kvalitātes kontroles problēmai. Aprobēta un atzīta par efektīvu ultraskaņas defektoskopija pēc šķembu metodes izgatavotu koka-betona savienojumu lokālais testēšanai. Neraugoties uz betona un koksnes radiālajā virzienā aptuveni 10-kārtīgo atšķirību akustiskajās impedancēs, ar 36 % enerģiju no ultraskaņas viļņa, kas pāriet no viena materiāla otrajā ir pietiekami, lai veiksmīgi analizētu koka-betona savienojuma kvalitāti. Ja par nomērītā signāla maksimālo amplitūdu pie kvalitatīva adhezīva savienojuma pieņem 100 %, tad defekta tuvumā šī vērtība pakāpeniski samazinās līdz 30–60 %. Liela un izteikta defekta gadījumā, nomērītais signāls atbilst trokšņiem un tā maksimālā amplitūda ir zem 10 %.
10. Eksperimentāli pierādīts pozitīvs efekts uz koka-betona kompozīta konstrukcijas drošumu no polipropilēna fibru ar garuma-diametra attiecību 90 pievienošanas 0.5 % daudzumā betona sastāvam. Noteikts betona slāņa bez tradicionāla tērauda stiegrojuma trausluma samazinājums; spriegumu pārdalīšanās, kas plaisu attīstības gadījumā, rezultējās sīkās plaisās ar mazu atvērumu; kā arī betona slāņa integritātes saglabāšanās ar koksnes slāni, koka-betona kompozīta konstrukcijas pilna sabrukuma gadījumā.

## LITERATŪRAS SARAKSTS

- [1] G. Pijaudier-Cabot and J. Mazars, "Damage Models for Concrete," in *Jean Lemaitre Handbook of Materials Behavior Models*, 2, Elsevier, 2001, pp. 500-512.
- [2] R. Destro, G. Boscato, U. Mazzali, S. Russo, F. Peron and P. Romagnoni, "Structural and thermal behaviour of a timber-concrete prefabricated composite wall system," *Energy Procedia*, vol. 78, p. 2730 – 2735, 2015.
- [3] W. Winter, K. Tavoussi, A. Fadaei, F. Parada and I. Prašnjak, "Development of prefabricated timber-steel-concrete ribbed decks," *WCTE 2016 - World Conference on Timber Engineering*, 2016.
- [4] R. Selle, K. Holschemacher and B. Heiden, "An alternative approach for hybrid floors made of timber and concrete (TCCS)," *10th International Conference Modern Building Materials, Structures and Techniques*, pp. 778-786, 2010.
- [5] K. Holschemacher and H. Kieslich, "Retrofitting of timber beam ceilings with the timber-concrete composite construction," *Advanced Materials Research*, pp. 1095-1100, 2010.
- [6] J. Rodrigues, A. Dias and P. Providência, "Timber-concrete composite bridges: State-of-the-art review," *BioResources*, pp. 6630-6649, 2013.
- [7] A. Dias, J. Skinner, K. Crews and T. Tannert, "Timber-concrete-composites increasing the use of timber in construction," *European Journal of Wood and Wood Products*, vol. 74, 2016.
- [8] B. Falk, "Wood as a sustainable building material.," *Forest Product Journal*, vol. 59, pp. 6-12, 2009.
- [9] K. Conroy, M. Riggio and C. Knowles, "Perceptions of the Environmental and Health Impacts of Wood Product Use in Buildings: A Survey Among Architects on the United States West Coast," *BioProducts Business*, pp. 109-124, 2019.
- [10] V. Bajzecerova and J. Kanocz, "The effect of environment on timber-concrete composite bridge deck," *Procedia Engineering*, vol. 156, pp. 32-39, 2016.
- [11] V. Bajzecerová, "Bending Stiffness of CLT-Concrete Composite Members - Comparison of Simplified Calculation Methods," *Procedia Engineering*, pp. 15-20, 2017.
- [12] M. V. Gravit, D. Serdjuks, A. V. Bardin, V. Prusakov and K. Buka-Vaivade, "Fire design methods for structures with timber framework," *Magazine of Civil Engineering*, vol. 85, pp. 92-106, 2019.
- [13] J. Natterer, "A way to sustainable architecture by new technologies for engineered timber structures," *Proceedings of the World Conference on Timber Engineering (WCTE 2004)*, 2004.
- [14] P. Croce, M. Beconcini, P. Formichi, F. Landi and D. Cardella, "Fatigue behaviour of

- composite timber-concrete beams," *Procedia Structural Integrity*, vol. 11, pp. 363-370, 2018.
- [15] E. Ferrier, P. Labossière and K. Neale, "Modelling the bending behaviour of a new hybrid glulam beam reinforced with FRP and ultra-high-performance concrete," *Applied Mathematical Modelling*, vol. 36, pp. 3883-3902, 2012.
- [16] T. El-Salakawy and A. Gamal, "Behavior of strengthened Timber Concrete Composite under axial loads," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 14, p. e00497, 2021.
- [17] K. Holschemacher and H. Kieslich, "Recent developments in timber-concrete composite," *CLEM+CIMAD 2017*, 2017.
- [18] M. Haiman and N. Turčić, "Timber-lightweight aggregate composite floor structure," *Materials Science Forum 730-732*, pp. 486-491, 2012.
- [19] L. Jorge, J. Schänzlin, S. Lopes, H. Cruz and U. Kuhlmann, "Time-dependent behaviour of timber lightweight concrete composite floors," *Engineering Structures*, vol. 32, pp. 3966-3973, 2010.
- [20] S. Deresa, J. Xu, C. Demartino, G. Minafò and G. Camarda, "Static Performances of Timber- and Bamboo-Concrete Composite Beams: A Critical Review of Experimental Results," *The Open Construction & Building Technology Journal*, no. 15, pp. 17-54, 2021.
- [21] P. Richard, Z. Liu, T. Descamps and K. Sikora, "Effect of concrete modification on shear of connections for timber-concrete composites," *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings*, vol. 173, pp. 1-38, 2020.
- [22] K. Sikora and Z. Liu, "Shear strength of different connection and concrete types for Timber Concrete Composites (TCC)," *WCTE 2018 - World Conference on Timber Engineering*, 2018.
- [23] V. Mechtcherine, "Use of superabsorbent polymers (SAP) as concrete additive," *RILEM Technical Letters*, vol. 1, pp. 81-87, 2016.
- [24] M. Sai KUMAR, N. SHEKAR and B. Anjan, "Use of super absorbent polymer in concrete," *International Journal of Emerging Trends in Engineering and Development*, vol. 8, pp. 15-21, 2018.
- [25] C. Schröfl, V. Mechtcherine and M. Gorges, "Relation between the molecular structure and the efficiency of superabsorbent polymers (SAP) as concrete admixture to mitigate autogenous shrinkage," *Cement and Concrete Research*, vol. 42, pp. 856-873, 2012.
- [26] E. Augeard, E. Ferrier and L. Michel, "Mechanical behavior of timber-concrete composite members under cyclic loading and creep," *Engineering Structures*, vol. 210, p. 110289, 2020.
- [27] CEN, prCEN/TS Eurocode 5: Design of Timber Structures — Structural design of timber-concrete composite structures — Common rules and rules for buildings, Brussels: CEN/TC 250, 2019.
- [28] K. Holschemacher, S. Klotz and D. Weisse, "Application of Steel Fibre Reinforced

- Concrete for Timber-Concrete Composite Constructions," *Lacer*, pp. 161-170, 2002.
- [29] S. Lamothe, L. Sorrelli, P. Blanchet and P. Galimard, "Engineering ductile notch connections for composite floors made of laminated timber and high or ultra-high performance fiber reinforced concrete," *Engineering Structures*, vol. 211, p. 110415, 2020.
- [30] A. Jansson, M. Flansbjer, I. Löfgren, K. Lundgren and K. Gylltoft, "Experimental investigation of surface crack initiation, propagation and tension stiffening in self-compacting steel-fibre-reinforced concrete," *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, vol. 8, no. 45, pp. 1127-1143, 2012.
- [31] M. Yusof, N. Nor, M. Zain, N. Peng, A. Ismail, R. Sohaimi and A. Zaidi, "Mechanical properties of hybrid steel fibre reinforced concrete with different aspect ratio," *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, vol. 7, no. 5, pp. 159-166, 2011.
- [32] R. Olivito and F. Zuccarello, "An experimental study on the tensile strength of steel fiber reinforced concrete," *Composites: Part B*, no. 41, pp. 246-255, 2010.
- [33] H. Singh, *Steel Fiber Reinforced Concrete Behavior, Modelling and Design*, Ludhiana: Springer, 2017, p. 172.
- [34] M. Kazemi, H. Golsorkhtabar, M. Beygi and M. Gholamitabar, "Fracture properties of steel fiber reinforced high strength concrete using work of fracture and size effect methods," *Construction and Building Materials*, no. 142, pp. 482-489, 2017.
- [35] E. Vougioukas and M. Papadatou, "A model for the prediction of the tensile strength of fiber-reinforced concrete members, before and after cracking," *Fibers*, vol. 3, no. 5, p. 27, 2017.
- [36] T. Simões, C. Octávio, J. Valença, H. Costa, D. Dias-da-Costa and E. Júlio, "Influence of concrete strength and steel fibre geometry on the fibre/matrix interface," *Composites Part B: Engineering*, no. 122, pp. 156-164, 2017.
- [37] A. Abdul-Razzak and A. Mohammed Ali, "Modelling and numerical simulation of high strength fibre reinforced concrete corbels," *Applied Mathematical Modelling*, no. 35, pp. 2901-2915, 2011.
- [38] P. Bhargava, U. Sharma and S. Kaushik, "Compressive stress-strain behavior of small scale steel fibre reinforced high strength concrete cylinders," *Journal of Advanced Concrete Technology*, vol. 1, no. 4, pp. 109-121, 2006.
- [39] J. Walraven et al., *fib Model Code for Concrete Structures 2010*, Berlin: John Wiley & Sons, 2013.
- [40] M. Vavruš, P. Koteš and A. Tamrazyan, "Numerical analysis of strengthening concrete columns by high performance fibre concrete," *MATEC Web of Conferences*, no. 196, p. 02034, 2018.
- [41] A. Frangi and M. Fontana, "Elasto-plastic model for timber-concrete composite beams with ductile connection," *Structural Engineering International: Journal of the International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE)*, vol. 13, pp.

47-57, 2003.

- [42] A. Dias, J. Schänzlin and P. Dietsch, Design of timber-concrete composite structures, Aachen: Shaker Verlag GmbH, 2018.
- [43] M. Fragiacomio and E. Lukaszewska, "Development of prefabricated timber-concrete composite floor systems.," *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings*, vol. 164, pp. 117-129, 2011.
- [44] M. Van Der Linden, "Timber-concrete composite beams," *Heron*, pp. 215-239, 1999.
- [45] M. Fragiacomio, A. Gregori, J. Xue, C. Demartino and M. Toso, "Timber-concrete composite bridges: Three case studies," *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, vol. 5, pp. 429-438, 2018.
- [46] D. Yeoh, M. Fragiacomio, M. De Franceschi and A. Buchanan, "Experimental Tests of Notched and Plate Connectors for LVL-Concrete Composite Beams," *Journal of Structural Engineering*, pp. 261-269, 2011.
- [47] BS EN 26891:1991 - Timber structures. Joints made with mechanical fasteners. General principles for the determination of strength and deformation characteristics, Brussels: European Committee for Standardization, 1991.
- [48] J. Miotto and A. Dias, "Glulam-concrete composites: Experimental investigation into the connection system," *Materials Research*, 2011.
- [49] A. Ceccotti, "Composite concrete-timber structures," *Progress in Structural Engineering and Materials*, vol. 4, pp. 264-275, 2002.
- [50] L. Collins, Timber-concrete composite: an alternative composite floor system. (Master Thesis), Kansas: Kansas State University, 2020.
- [51] D. E. C. Yeoh, Behavior and design of timber-concrete composite floor system. Doctor thesis., Christchurch: University of Canterbury, 2010.
- [52] Z. Balogh and R. Gutkowski, "Modeling of shear transfer in wood-concrete notch-connections," *10th World Conference on Timber Engineering 2008*, 2008.
- [53] A. Dias, Mechanical behaviour of timberconcrete joints. Doctoral Thesi, Coimbra: University of Coimbra, 2005.
- [54] E. Lukaszewska, M. Fragiacomio and H. Johnsson, "Laboratory Tests and Numerical Analyses of Prefabricated Timber-Concrete Composite Floors," *Journal of Structural Engineering*, vol. 136, pp. 46-55, 2010.
- [55] J. Negrão, F. Oliveira and C. Oliveira, "Investigation on timber-concrete glued composites," *9th World Conference on Timber Engineering 2006, WCTE 2006*, 2006.
- [56] S. Kostic, V. Merk, J. Berg, P. Hass, I. Burgert and E. Cabane, "Timber-mortar composites: The effect of sol-gel surface modification on the wood-adhesive interface," *Composite Structures*, vol. 201, pp. 828-833, 2018.
- [57] L. Eisenhut, W. Seim and S. Kühnborn, "Adhesive-bonded timber-concrete composites – Experimental and numerical investigation of hygrothermal effects," *Engineering Structures*, no. 125, pp. 167-178, 2016.

- [58] EN 1995-1-1 Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings, Brussels: CEN, 2004.
- [59] T. Tannert, B. Endacott, M. Brunner and T. Vallée, "Long-term performance of adhesively bonded timber-concrete composites," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 72, pp. 51-61, 2017.
- [60] T. Tannert, A. Gerber and T. Vallee, "Hybrid adhesively bonded timber-concrete-composite floors," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 97, p. 102490, 2020.
- [61] A. Ceccotti, M. Fragiaco and S. Giordano, "Behaviour of a timber-concrete composite beam with glued connection at strength limit state," *9th World Conference on Timber Engineering 2006, WCTE 2006*, 2006.
- [62] N. Khorsandnia, H. Valipour, R. Shrestha, C. Gerber and K. Crews, "Review on long-term behaviour of timber-concrete composite floors," *From Materials to Structures: Advancement Through Innovation - Proceedings of the 22nd Australasian Conference*, pp. 1053-1058, 2013.
- [63] A. Ceccotti, M. Fragiaco and S. Giordano, "Long-term and collapse tests on a timber-concrete composite beam with glued-in connection," *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, vol. 40, pp. 15-25, 2007.
- [64] Q. Fu, L. Yan, T. Ning, B. Wang and B. Kasal, "Interfacial bond behavior between wood chip concrete and engineered timber glued by various adhesives," *Construction and Building Materials*, vol. 238, p. 117743, 2020.
- [65] S. Kostić, S. Meier, E. Cabane and I. Burgert, "Enhancing the performance of beech-timber concrete hybrids by a wood surface pre-treatment using sol-gel chemistry," *Heliyon*, vol. 4, p. e00762, 2018.
- [66] Q. Fu, L. Yan, T. Ning, B. Wang and B. Kasal, "Behavior of adhesively bonded engineered wood – Wood chip concrete composite decks: Experimental and analytical studies," *Construction and Building Materials*, vol. 247, p. 118578, 2020.
- [67] J. Kanócz and V. Bajzecerová, "Timber - Concrete composite elements with various composite connections part 3: Adhesive connection," *Wood Research*, vol. 60, pp. 939-952, 2015.
- [68] J. Daňková, P. Mec and T. Majstříková, "Stiffness analysis of glued connection of the timber-concrete structure," *Open Engineering*, vol. 6, pp. 241-246, 2016.
- [69] EN 1990: Eurocode - Basis of structural design, Brussels: CEN, 2002.
- [70] S. Gagnon and C. Pirvu, CLT handbook : cross-laminated timber, Quebec: FPIInnovations, 2011.
- [71] I. Christovasilis, M. Brunetti, M. Follesa, M. Nocetti and D. Vassallo, "Evaluation of the Mechanical Properties of Cross Laminated Timber with Elementary Beam Theories," *Construction and Building Materials*, no. 112, pp. 202-213, 2016.
- [72] K. Buka-Vaivade, D. Serdjuks, V. Goremikins, L. Pakrastins and N. Vatin, "Suspension



- structure with cross-laminated timber deck panels," *Magazine of Civil Engineering*, vol. 7, no. 83, p. 126–135, 2018.
- [73] K. Buka-Vaivade, D. Serdjuks, V. Goremikins, A. Vilguts and L. Pakrastins, "Experimental Verification of Design Procedure for Elements from Cross-laminated Timber," *Procedia Engineering*, no. 172, pp. 1212-1219, 2017.
- [74] R. Rikards and A. Čāte, *Galīgo elementu metode*, Rīga: RTU izdevniecība, 2001.
- [75] RFEM 5. Spatial Models Calculated According to Finite Element Method. User Manual, Tiefenbach: Dlubal Software GmbH, 2020.
- [76] S. Li, E. Sitnikova, Y. Liang and A. Kaddour, "The Tsai-Wu failure criterion rationalised in the context of UD composites," *Composites: Part A*, vol. 102, pp. 207-217, 2017.
- [77] J. Sliseris, "Numerical analysis of reinforced concrete structures with oriented steel fibers and re-bars," *Engineering Fracture Mechanics*, no. 194, pp. 337-349, 2018.
- [78] B. Kuhn, "Nonlinear Material Model Damage," Dlubal Software GmbH, Tiefenbach, 2017.
- [79] Y. Kong, C. Bennett and C. Hyde, "A review of non-destructive testing techniques for the in-situ investigation of fretting fatigue cracks," *Materials & Design*, vol. 196, p. 109093, 2020.
- [80] S. Gholizadeh, "A review of non-destructive testing methods of composite materials," *Procedia Structural Integrity*, vol. 1, pp. 50-57, 2016.
- [81] J. Zhao, T. Liu and Y. Wang, "Static Test Analysis of a Bridge Structure in Civil Engineering," *Systems Engineering Procedia*, vol. 1, pp. 10-15, 2011.
- [82] J. Brozovsky, "Comparision of compressive strenghts of concrete testing by different of sclerometers," *Procedia Engineering*, pp. 254-259, 2013.
- [83] R. Kowalski and J. Wróblewska, "Application of a sclerometer to the preliminary assessment of concrete quality in structures after fire," *Arcives of Civil Engineering*, vol. 64, pp. 171-186, 2018.
- [84] J. Shamim, J. Abu Sayed and P. Bhowmik, "Design of a Model Dynamic Load Testing Machine," *International Conference on Mechanical, Industrial and Energy Engineering*, pp. MIE12-064, 2012.
- [85] S. Satapathy, F. Stefani and A. Saenz, "Crack tip behavior under pulsed electromagnetic loading," *IEEE Transactions on Magnetics*, pp. 106-110, 2005.
- [86] T. Wang, O. Celik, F. Necati Catbas and L. Zhang, "Practical calibration techniques for the modal impact hammer," *Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series*, 2015.
- [87] C. Zhu, H. Huang, H. Liu, C. Song, F. Ma and Z. Liu, "On-line vibration monitoring and diagnosing of a multi-megawatt wind turbine gearbox," *International Gear Conference 2014: 26th–28th August 2014, Lyon*, pp. 1089-1098, 2014.
- [88] C.-S. Lin and Y.-X. Wu, "Response-Only Parametric Estimation of Structural Systems

- Using a Modified Stochastic Subspace Identification Technique," *Applied Sciences*, vol. 11, p. 11751, 2021.
- [89] I. G. Araújo and J. E. Laier, "Operational modal analysis using SVD of power spectral density transmissibility matrices," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 1, no. 46, pp. 129-145, 2014.
- [90] M. Fontan and L. Guerineau, "A new SHM strategy using in situ modal analysis processing to monitor civil engineering structures," *Proceedings of the 10th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure, SHMII 10, Porto, Portugal, 30 June - 2 July 2021*, pp. 1-6, 2021.
- [91] X. Lu, X. He, H. Chen and R. Zheng, "Operational modal parameter identification with colored noise excitation," *Chinese Journal of Aeronautics*, no. 34, pp. 288-300, 2021.
- [92] F. Zahid, O. Chao and S. Khoo, "A review of operational modal analysis techniques for in-service modal identification," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 8, no. 42, 2020.
- [93] E. Di Lorenzo and e. al., "Dynamic Characterization of Wind Turbine Gearboxes Using Order-Based Modal Analysis," *PROCEEDINGS OF INTERNATIONAL CONFERENCE ON NOISE AND VIBRATION ENGINEERING (ISMA2014) AND INTERNATIONAL CONFERENCE ON UNCERTAINTY IN STRUCTURAL DYNAMICS (USD2014)*, p. 4349–4362, 2014.
- [94] L. Aenlle and R. Brincker, "Basic concepts of modal scaling," *VIII INTERNATIONAL OPERATIONAL MODAL ANALYSIS CONFERENCE 2019 May12-14 Copenhagen*, 2019.
- [95] M. Aenlle and R. Brincker, "Modal scaling in operational modal analysis using a finite element model," *International Journal of Mechanical Sciences*, no. 76, pp. 86-101, 2013.
- [96] A. Kita, N. Cavalagli, I. Venanzi and F. Ubertini, "A new method for earthquake-induced damage identification in historic masonry towers combining OMA and IDA," *Bulletin of Earthquake Engineering*, no. 19, pp. 5307-5337, 2021.
- [97] W. Guo, H. Xu, Z. Liu and J. Shi, "Ultrasonic technique for testing cold welding of butt-fusion joints in polyethylene pipe," *Proceedings of the ASME 2013 Pressure Vessels & Piping Division Conference*, p. 97205, 2013.
- [98] R. Vasiljevs, D. Serdjuks, J. Gerasimova, K. Buka-Vaivade and A. Orhun Erüz, "Behaviour of Timber-Concrete Joints in Hybrid Members Subjected to Flexure," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, no. 660, p. 012050, 2019.
- [99] K. Buka-Vaivade, D. Serdjuks, R. Vasiljevs, J. Gerasimova, L. Pakrastins and I. Mierins, "Behaviours of timber-concrete composite members," *Forum Wood Building Baltic 2021*, pp. 1-2, 2021.
- [100] EN 1992-1-1 Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1 : General rules and

rules for buildings, Brussels: CEN, 2004.

- [101] Materiāla apraksts. Sikadur -330 Divkomponentu epoksīdu impregnēšanas sveķi, Rīga: Sika Baltic SIA, 2010.
- [102] Carboplate. Ekstrudēta oglekļa šķiedras loksne ar aizsargplēvi no abām pusēm, Mapei, 2021.
- [103] T. Al-Attar, "A quantitative evaluation of bond strength between coarse aggregate and cement mortar in concrete," *European Scientific Journal*, vol. 6, no. 9, pp. 54-69, 2013.
- [104] J. Weerheijm and K. Van Breugel, "Introduction to concrete: A resilient material system. In: Understanding the Tensile Properties of Concrete," in *Understanding the Tensile Properties of Concrete*, Woodhead Publishing, 2013, pp. 1-15.
- [105] K. Buka-Vaivade, D. Serdjuks, A. Podkoritovs, L. Pakrastins and V. Mironovs, "Rigid connection with granite chips in the timber-concrete composite," *Environment Technology Resources Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*, 2021.
- [106] A. B. A. Deiaf, "Bonding between Aggregates and Cement Pastes in Concrete," *Journal of Civil Engineering and Architecture*, no. 10, pp. 353-358, 2016.
- [107] R. Vasiljevs, D. Serdjuks, K. Buka-Vaivade, A. Podkoritovs and N. Vatin, "Load-carrying capacity of timber-concrete composite panels," *Magazine of Civil Engineering*, vol. 1, no. 93, pp. 60-70, 2020.
- [108] M. Ulas, K. Alyamac and Z. Ulucan, "Effects of aggregate grading on the properties of steel fibre-reinforced concrete," *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, vol. 1, no. 246, p. 012015, 2017.
- [109] V. O. Okonkwo and E. Arinze, "Effects of Aggregate Gradation on the Properties of Concrete Made From Granite Chippings," *International Journal of Advancements in Research & Technology*, vol. 4, no. 12, pp. 17-20, 2015.
- [110] G. He, L. Xie, X. Wang, J. Yi, L. Peng, Z. Chen, P. Gustafsson and R. Crocetti, "Shear Behavior Study on Timber-Concrete Composite Structures with Bolts," *Bioresources*, vol. 4, no. 11, pp. 9205-9218, 2016.
- [111] A. Khokhar, H. Zhang and D. Ridley-Ellis, "The shear strength, and failure modes, of timber joists obtained from the torsion test method," *World conference on timber engineering 2010*, pp. 1-8, 2010.
- [112] C. Brown, "Coefficient of Variation," in *Applied Multivariate Statistics in Geohydrology and Related Sciences*, Berlin, Springer, 1998, pp. 155-157.
- [113] K. Crews, S. John, C. Gerber, A. Buchanan, T. Smith and S. Pampanin, "Innovative engineered timber building systems for non-residential applications, utilising timber concrete composite flooring capable of spanning up to 8 to 10m," Forest & Wood Products Australia Limited., Melbourne, 2010.
- [114] H. Movaffaghi, J. Pyykkö and I. Yitmen, "Value-driven design approach for optimal long-span timber-concrete composite floor in multi-storey wooden residential

- buildings," *Civil Engineering and Environmental Systems*, vol. 3, no. 37, pp. 100-116, 2020.
- [115] C. Huber and K. Deix, "Comparison of calculation methods of elastic bonding: limits of the gamma method using an example of a wood-concrete composite floor with single loads," *Materials*, vol. 14, p. 7211, 2021.
- [116] J. Negrao and L. Jorge, "CLT STRUCTURES FOR LONG SPAN FLOORS AND ROOFS - OPTIMIZING THE CROSS-SECTION PROPERTIES," *Proceedings of the 41st IAHS World Congress*, p. 11, 2016.
- [117] J. Majer, N. Vavřínová, K. Stejskalová and L. Pentková, "Software for the Multi-Criteria Design of the External Walls Based on User Priority," *Buildings*, vol. 12, p. 647, 2022.
- [118] S. Kravanja and T. Žula, "Cost Optimization of Structures in Civil Engineering," in *Proceedings of the Proceedings of the New Developments in Structural Engineering and Construction*, Singapore, 2013, pp. 1325-1330.
- [119] E. Karacabeyli and S. Gagnon, Canadian CLT Handbook 2019 edition, Pointe-Claire: FPInnovations, 2019.
- [120] P. t. SC5.T3, EN 1995-1-1 Vibrations, CEN, 2019.
- [121] W. Laghari, M. Baloch, M. Mengal and S. Shah, "Performance Analysis of Analog Butterworth Low Pass Filter as Compared to Chebyshev Type-I Filter, Chebyshev Type-II Filter and Elliptical Filter," *Circuits and Systems*, no. 5, pp. 209-216, 2014.
- [122] S. Gade and H. Herlufsen, "Use of Weighting Functions in DFT/FFT Analysis (Part I)," *B&K Technical Review "Windows to FFT Analysis (Part I)"*, vol. 3, pp. 1-28, 1987.
- [123] D. Jwo, I. Wu and Y. Chang, "Windowing Design and Performance Assessment for Mitigation of Spectrum Leakage," *E3S Web of Conferences*, no. 94, p. 03001, 2019.
- [124] J. Antoni and J. Schoukens, "Optimal Settings for Measuring Frequency Response Functions With Weighted Overlapped Segment Averaging," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 9, no. 58, pp. 3276 - 3287, 2009.
- [125] The Fundamentals of Modal Testing. Application Note 243 - 3., U.S.A.: Agilent Technologies, 2000.
- [126] R. Brincker, "Some Elements of Operational Modal Analysis," *Shock and Vibration. International Conference on Structural Engineering Dynamics 2013*, no. 2014, p. 325839, 2014.
- [127] B. Greiner, Operational Modal Analysis and its Application for SOFIA Telescope Assembly Vibration Measurements, Dezember: Institut für Raumfahrtssysteme, Universität Stuttgart, 2009.
- [128] G. Storti, L. Carrer, F. Silva Tuckmantel, T. Machado, K. Cavalca and N. Bachschmid, "Simulating application of operational modal analysis to a test rig," *Mechanical Systems and Signal Processing*, no. 153, p. 107529, 2021.

- [129] A. Tatarinov, A. Rumjancevs and V. Mironovs, "Assessment of cracks in pre-stressed concrete railway sleepers by ultrasonic testing," *Procedia Computer Science*, no. 149, pp. 324-330, 2019.
- [130] T. Lofqvist, J. Delsing and K. Sokas, "Speed of sound measurements in humid air using an ultrasonic flow meter," *Proceedings, XVII IMEKO World Congress, June 22 – 27, 2003, Dubrovnik, Croatia*, p. TC12, 2003.
- [131] D. Vijayakumar, O. Prakash and R. Sharma, "Estimation of Air Density and its importance in Barometric Pressure Measurements," *ADMET 2012*, p. PM 002, 2012.
- [132] M. Krause, U. Dackermann and J. Li, "Elastic wave modes for the assessment of structural timber: Ultrasonic echo for building elements and guided waves for pole and pile structures," *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, vol. 2, no. 5, pp. 221-249, 2014.
- [133] V. Kachanov, I. Sokolov, R. Kontsov, S. Lebedev and S. Fedorenko, "Ultrasonic wave velocity measurement in concrete using the impact-echo method," *Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, vol. 1, no. 61, pp. 15-19, 2019.
- [134] E. K. Z. Balanji, M. N. Sheikh and M. N. S. Hadi, "Behavior of hybrid steel fiber reinforced high strength concrete," *Proceedings of the First European and Mediterranean Structural Engineering and Construction Conference*, pp. 29-34, 2016.
- [135] Savita, S. Shwetha, Malanbi, Shweta, Saksheshwari and K. Manjunath, "Experimental Study on Strength Parameters of Steel Fiber Reinforced Concrete using GI Wire & Fly Ash," *International Research Journal of Engineering and Technology*, vol. 5, no. 5, pp. 3271-3277, 2018.
- [136] K. Marar, Ö. Eren and I. Yitmen, "Compression specific toughness of normal strength steel fiber reinforced concrete (NSSFRC) and high strength steel fiber reinforced concrete (HSSFRC)," *Materials Research*, vol. 2, no. 14, pp. 239-247, 2011.
- [137] R. Neves and J. De Fernandes Almeida, "Compressive behaviour of steel fibre reinforced concrete," *Structural Concrete*, vol. 6, no. 1-8, p. 1, 2005.
- [138] M. Akio, O. Masaki, M. Mitsuro and Y. Junichi, "Synthetic fiber suited for use in reinforcing cement mortar or concrete and cement composition containing same". European Patent Office Patent EP0286112A2, 1987.
- [139] M. Chaudhary, V. Srivastava and V. Agarwal, "Effect of waste low density polyethylene on mechanical properties of concrete," *Journal of Academia and Industrial Research*, vol. 3, no. 3, pp. 123-126, 2014.