

Elīna Barone

MODUĻVEIDA ĒKU LOŽU IZTURĪGU SIENU KONSTRUKCIJU APRĒĶINA METODOLOĢIJA

Promocijas darbs



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Būvniecības un mašīnzinību fakultāte

Ilgtspējīgo būvmateriālu un inženiersistēmu institūts

Elīna Barone

Doktora studiju programmas “Siltuma, gāzes un ūdens tehnoloģiju” doktorante

**MODUĻVEIDA ĒKU LOŽU IZTURĪGU SIENU
KONSTRUKCIJU APRĒĶINA
METODOLOĢIJA**

Promocijas darbs

Zinātniskie vadītāji

profesors *Dr. sc. ing.*

MĀRTIŅŠ VILNĪTIS

Asoc. profesore *Dr. sc. ing.*

BAIBA GAUJĒNA

Rīga 2026

Barone E. Modulveida ēku ložu izturīgu sienu konstrukciju aprēķina metodoloģija. Promocijas darbs. Rīga: RTU Izdevniecība, 2026. 115 lpp.

Publicēts saskaņā ar būvniecības un transporta inženierzinātnes nozares promocijas padomes “RTU P-06” 2026. gada 30. aprīļa lēmumu Nr. 04030-9.6/6.

Promocijas darbs izstrādāts Būvniecības un mašīnzinību fakultātē Rīgas Tehniskajā universitātē. Promocijas darba ietvaros veikts pētījumu kopums par materiālu ballistisko pretestību, uzsvāru liekot uz kokmateriāliem – krusteniski līmētu koksni (*CLT*) un saplāksni – standarta *EN 1063* noteiktajām robežvērtībām aizsardzības klasēm BR1 un BR2. Metodoloģija balstās uz materiālu mehānisko īpašību analīzi, trieciena enerģijas starpību un empīrisku sakarību starp koksnes blīvumu un lādiņa parametriem un izraisīto caursīšanas dziļumu.

Šis darbs izstrādāts ar

- Rīgas Tehniskās universitātes doktorantūras grantu programmu DOK.BIF/20, DOK.BIF/21 atbalstu;
- Eiropas Sociālā fonda atbalstu darbības programmas “Izaugsme un nodarbinātība” 8.2.2. specifiskā atbalsta mērķa “Stiprināt augstākās izglītības institūciju akadēmisko personālu stratēģiskās specializācijas jomās” projekta Nr. 8.2.2.0/20/I/008 “Rīgas Tehniskās universitātes un Banku augstskolas doktorantu un akadēmiskā personāla stiprināšana stratēģiskās specializācijas jomās” atbalstu.



NACIONĀLAIS
ATTĪSTĪBAS
PLĀNS 2020



EIROPAS SAVIENĪBA
Eiropas Sociālais
fonds

IEGULDĪJUMS TAVĀ NĀKOTNĒ

Vāka attēla autore Elīna Barone.

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2026. gada 18. septembrī plkst. 14.00 Rīgas Tehniskās universitātes Būvniecības un mašīnzinātņu fakultātē, Ķīpsalas ielā 6A, 453. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors *Dr. sc. ing.* Aleksandrs Korjaksins,
Rīgas Tehniskā universitāte

Asoc. profesors *Dr. sc. ing.* Tomáš Vymazal,
Čehija, Brno Tehniskā universitāte

Dr. ing., Jolanta Pranckevičienė,
Lietuva, Viļņas Ģedimina Tehniskā universitāte

APSTIPRINĀJUMS

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

Elīna Barone (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir darba vispārīgs raksturojums, piecas nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 52 attēli, 28 tabulas, kopā 114 lappuses. Literatūras sarakstā ir 116 nosaukumi.

ANOTĀCIJA

Promocijas darba “Moduļveida ēku ložu izturīgu sienu konstrukciju aprēķina metodoloģija” ietvaros veikts pētījumu kopums par kokmateriālu – krusteniski līmētās koksnes (*CLT*) un saplākšņa – ballistisko pretestību, to caursišanas dziļuma aprēķiniem un minimālā ballistiskā biezuma prognozēšanu. Darba mērķis ir izstrādāt un eksperimentāli pārbaudīt **aprēķinu metodoloģiju** kokmateriālu sienu ballistiskās pretestības noteikšanai BR1 un BR2 aizsardzības klasēm (*EN 1063* standarts). Eksperimentālais darbs balstās uz materiāla mehānisko īpašību analīzi, trieciena enerģijas starpību un empīrisku sakarību starp koksnes blīvumu un lādiņa parametriem un izraisīto caursišanas dziļumu. Lai pārbaudītu metodoloģijas precizitāti, tika veikta eksperimentālo rezultātu salīdzināšana ar standartā *EN 1063* noteiktajām robežvērtībām. Izstrādātā metodoloģija ļauj precīzi prognozēt nepieciešamo koksnes sienas biezumu bez pilna procesa eksperimenta veikšanas, tādā veidā samazinot finansiālus ieguldījumus, riska aspektus un paātrinot ēku projektēšanas laiku. Promocijas darbs sastāv no literatūras izpētes un aprēķina modeļa koka konstrukciju ballistiskās pretestības noteikšanai. Papildus tam tika veikts normatīvās dokumentācijas pārskats.

Promocijas darba blakus mērķis ir iegūt zinātniski un praktiski nozīmīgus rezultātus, kas sniegtu atbildes uz jautājumiem par ballistiskas koka sienas kritērijiem un veicinātu ballistikas un būvniecības jomu integrāciju. Pētījums balstās uz zinātniski tehnisku hipotēzi par ēku drošības līmeņa paaugstināšanas iespējām, izmantojot videi draudzīgākus materiālus par plaši izmantotajiem stiegrbetona un tērauda materiāliem.

Tika testētas koksnes kompozītmateriālu – *CLT* un bērza saplākšņa – spēja absorbēt lodes kinētisko enerģiju un noteikts minimālais sienas biezums, kas nodrošina aizsardzību saskaņā ar *NE 1063* standarta BR1 un BR2 klasēm, lai atrastu optimālāko risinājumu un noteiktu no materiālu īpašībām atkarīgo šķietami dinamisko stiprību. Šis parametrs ļauj aprēķināt lodes caursišanas maksimālo dziļumu mazjaudas ierocim, kas klasificējas BR1 un BR2 klasēm pēc standarta *EN 1063*, prognozējot tendenci BR3 un BR4 klasēm. Veikta rezultātu optimizācija. Pētījuma paplašināšanai veikts papildus teorētisks ballistisko sienu salīdzinājums un eksperimentāli testi ar *CLT* un saplākšņa kombinēto ballistisko sienu konstrukcijām, aprēķinu metodoloģijas pielāgojums daudzslāņu konstrukcijām.

Šajā promocijas darbā tiek apskatīta tieši terminālā ballistika. Latvijā un pasaulē šajā nozarē, īpaši koksnes kompozītmateriālu jomā, trūkst pētījumi, ekspertīzes un ekspertu vai arī šāda informācija nozares specifikas dēļ nav publiski pieejama.

Šāda terminālās ballistikas pētījuma virziena attīstība varētu dot būtisku ieguldījumu gan teorētiskā zinātnē, gan praktiskos risinājumos, lai veicinātu zinātnes un tirgus attīstību ballistiskās aizsardzības jomā. Nozares attīstība ļautu izstrādāt precīzākus modeļus un teorijas, lai uzlabotu ballistisko eksperimentu simulācijas. Praktiski risinājumi ballistisko sienu modeļos veicinātu jaunus aizsardzības veidus un sniegtu augstāku aizsardzības līmeni esošajās militārās un civilo aizsardzības struktūrās.

Darba apjoms ir 115 lappuses, 52 attēli, 28 tabulas, 55 formulas, izmantoti 116 literatūras avoti. Promocijas darbs uzrakstīts latviešu valodā.

ANNOTATION

Within the scope of the doctoral thesis "Calculation Methodology for Bullet-Resistant Wall Structures in Modular Buildings", a comprehensive study on the ballistic resistance of timber-based materials – cross-laminated timber (CLT) and plywood – was conducted. The research addresses the determination of projectile penetration depth and the prediction of the minimum ballistic thickness of timber wall structures. The aim of the thesis is to develop a calculation methodology for determining the ballistic resistance of timber wall structures for protection classes BR1 and BR2 in accordance with the EN 1063 standard. The experimental research is based on the analysis of mechanical properties of materials, the differential impact energy approach, and empirical relationships between wood density, projectile parameters, and the resulting penetration depth.

The aim of the thesis is to develop a calculation methodology for determining the ballistic resistance of timber wall structures for protection classes BR1 and BR2 in accordance with the EN 1063 standard. The experimental research is based on the analysis of mechanical properties of materials, the differential impact energy approach, and empirical relationships between wood density, projectile parameters, and the resulting penetration depth.

The dissertation consists of a literature review and the development of a model for assessing the ballistic resistance of structural elements. Additionally, an analysis of relevant normative documentation has been performed.

A secondary objective is to obtain practically significant results that address key criteria for ballistic timber wall structures and contribute to the integration of the disciplines of ballistics and civil engineering. The research is based on a scientific and technical hypothesis concerning the potential for improving building safety levels through the application of environmentally sustainable materials as alternatives to commonly used reinforced concrete and steel.

Experimental investigations were conducted to evaluate the capacity of timber composite materials – CLT and birch plywood – to absorb projectile kinetic energy and to determine the minimum wall thickness required to achieve ballistic protection in accordance with EN 1063 protection classes BR1 and BR2. The aim was to identify optimal structural solutions and to determine an apparent dynamic strength parameter dependent on material properties. This parameter allows the calculation of the maximum projectile penetration depth for low-energy firearms classified under EN 1063 BR1 and BR2, as well as the prediction of trends for higher protection classes BR3 and BR4. To expand the study, an additional theoretical comparison of ballistic walls was conducted, along with experimental testing of combined CLT and plywood ballistic wall structures. The calculation methodology was adapted for multilayer structures.

The advancement of this research direction in terminal ballistics has the potential to make a significant contribution to both fundamental scientific knowledge and practical engineering applications in the field of ballistic protection. The development of this field would facilitate the formulation of accurate analytical models and theoretical approaches for improving the simulation of ballistic experiments. Practical implementation of advanced ballistic wall models may enable the development of novel protection solutions and provide enhanced safety levels for existing military and civil defence infrastructure.

The work comprises 115 pages, 52 figures, 28 tables, 55 formulae, and 116 references. The thesis is written in Latvian.

SATURA RĀDĪTĀJS

Anotācija	4
Annotation	5
Satura rādītājs	6
Darbā izmantotie saīsinājumi un tulkojumi	8
DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS.....	9
Tēmas aktualitāte un problēmas nostādne	9
Promocijas darba mērķis	11
Promocijas darba uzdevumi	11
Pētījuma zinātniskā novitāte.....	11
Pētījuma metodoloģiskais pamats	12
Promocijas darba praktiskais nozīmīgums	12
Izmantotie rīki un iekārtas	13
Pētījuma ierobežojumi.....	14
Aizstāvēšanai izvirzītās tēzes	14
Promocijas darba struktūra.....	15
Promocijas darba rezultātu aprobācija	16
Publikāciju saraksts	16
1. LITERATŪRAS APSKATS.....	17
1.1. Ballistika.....	17
1.2. Ballistiskie materiāli.....	17
Smiltis kā ballistisks materiāls	19
Stiegrbetons kā ballistisks materiāls	19
Māla ķieģeļi kā ballistisks materiāls	20
Tērauda plāksnes kā ballistisks materiāls.....	20
Koks (saplāksnis, <i>CLT</i>) kā ballistisks materiāls.....	20
Īpaši augsta molekulārā blīvuma polietilēns (<i>UHMWPE</i>) kā ballistisks materiāls.....	23
Aramīda plāksnes (<i>Kevlar</i>) kā ballistisks materiāls	24
Oglekļa šķiedru plāksne kā ballistisks materiāls	25
Stikla šķiedras plātnes kā ballistisks materiāls	25
Ģipškartona plāksnes kā ballistisks materiāls	26
Ballistisko materiālu īpašību apkopojums.....	26
1.2. Ieroču iedalījums	27
1.3. Standarti un ieroču klases.....	28
1.4. Lodes gala formas ietekme uz mērķi.....	31
1.5. Rikošets	32
1.6. Lādiņa darbības posmi mērķī	34
1.7. Lodes caursišanas spēja.....	35
1.8. Līmes ietekme uz līmētu kokmateriālu ballistiskajām īpašībām	43
1.9. Metodoloģija citos zinātniskajos darbos	44
1.10. Teorētiskā apskata kopsavilkums.....	46
2. PĒTĪJUMA TEORĒTISKAIS UN EKSPERIMENTĀLAIS PAMATOJUMS	48

2.1. Koksnes pirmreizējās ballistiskās pārbaudes	48
Saplākšņu ballistiskā pārbaude.....	49
CLT ballistiskā pārbaude	49
Teorētiskie aprēķini caursišanas dziļumam.....	50
Secinājumi	51
2.2. Aprēķina metodoloģijas eksperimentālais un teorētiskais pamatojums	51
2.2.1. Pētījumu apstākļi	51
2.2.2. CLT eksperimentālā un teorētiskā izpēte	54
CLT paneļu ballistiskie testi	54
Parametru optimizācijas analīze pēc CLT materiāla īpašību koeficientiem	59
CLT galīgo elementu analīze	61
Secinājumi	68
2.2.3. Saplākšņa eksperimentālā un teorētiskā izpēte	69
Eksperimentāli noteikts caursišanas dziļums	69
Teorētiski aprēķināts caursišanas dziļums aizsardzības klasēm	72
Parametru optimizācijas analīze pēc saplākšņa materiāla īpašību koeficientiem	73
Secinājumi	75
2.2.4. Kopsavilkums	76
3. METODOLOĢIJA BALLISTISKĀS PRETESTĪBAS NOVĒRTĒŠANAI	78
3.1. Vispārīgās metodoloģijas algoritms	78
3.2. Metodoloģijas apraksts	79
4. METODOLOĢIJAS PIELĀGOŠANA.....	83
Praktisks piemērs ballistikas sienas biezuma projektēšanai.....	83
5. PĒTĪJUMI DAUDZSLĀŅU SIENU BALLISTIKĀ	85
5.1. CLT sienu ar siltumizolāciju eksperimentālā un teorētiskā izpēte	85
Saliktās CLT sienas sastāvs	85
Eksperiments un rezultātu analīze	86
Secinājumi	89
5.2. UHMWPE-saplākšņa eksperimentālā un teorētiskā izpēte	89
Pētījuma apstākļi	90
Saplākšņa un UHMWPE paraugu atsevišķie testi	92
Saplākšņa-polietilēna plātņu testi	92
Rezultātu analīze	95
Secinājumi	97
5.3. Ballistisko sienu salīdzinājums	98
Sienu salīdzinājumā izvirzītie kritēriji	99
Rezultātu analīze	101
Secinājumi	103
Nodaļas kopsavilkums.....	103
SECINĀJUMI	105
IETEIKUMI TĀLĀJIEM PĒTĪJUMIEM	107
LITERATŪRAS SARAKSTS	108

DARBĀ IZMANTOTIE SAĪSINĀJUMI UN TULKOJUMI

CLT – krusteniski līmēta koksne

UHMWPE – īpaši augstas molekulas polietilēns

Terminālās ballistikas nozare Latvijā ir jauna un nepietiekami attīstīta, tādēļ ir būtiski ieviest pareizus un jēgpilnus tulkojumus angļu valodas terminiem latviešu valodā. Darba autore ir izvēlējusies un konsekventi izmantojusi šādus vārdu vai terminu tulkojuma nozīmes:

Bulletproof – ložu drošs

Crater – lodes krāteris

Drag coefficient – gaisa pretestības koeficients

FJM (full jacket metal) – ar metāla apvalku pārklātas lodes

Handgun – rokas pistole

Janka hardness – Janka cietība

Mushrooming – lodes “sēnītes” formas saspiešanās

Ogive shape – slīpgala forma

Penetration depth – lodes caursišanas dziļums

Rifle – vītņstobra šautene

Safe room – drošības istaba

Terminal ballistics – terminālā ballistika

The apparent dynamic strength – šķietamā dinamiskā stiprība

Witness plate – lodes apstādināšanas plātne

Izmantoto lielumu apzīmējumi:

A , m² – lodes priekšējā gala laukums;

C_d – lodes gala formas pretestības koeficients (*drag coefficient*);

E_{kin} , J – lodes kinētiskā enerģija;

F , N – spēks, ar kādu lādiņš pārvar attālumu,;

m , kg – lādiņa masa;

P , m vai mm – lodes caursišanas dziļums;

v_o , m/s – lodes izlidošanas ātrums;

α , kg/m – materiāla iekšējo spriegumu koeficients, kas ir vienāds ar mērķa blīvuma, lodes formas koeficienta un lodes šķērsriezuma laukuma reizinājumu;

β , kg·m/s² – parametrs, kurā dominē materiāla izturība;

DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

Tēmas aktualitāte un problēmas nostādne

Nestabilā globālā drošības situācija rada jaunu tirgus pieprasījumu pēc ārējo draudu drošiem risinājumiem. Vislabāk, ja tās ir ātri un viegli samontējamas, moduļveida pārvietojamas dzīvojamās un nedzīvojamās mājas. Ilgstošas karantīnas apstākļos tās nodrošinātu komfortu lietotājiem, pielāgojoties vides apstākļiem pat attālos pasaules reģionos, vienlaikus uzturot vides saglabāšanas, ilgtspējas un aizsardzības tendenci. Karu un nemieru, dabas katastrofu gadījumos cilvēki ir spiesti uzturēties pie valstu robežām dzīvošanai nepiemērotos apstākļos [1]. Pagaidu izmitināšanai vajadzētu piedāvāt īslaicīga patvēruma ēkas, kur iemītniekiem tiek nodrošinātas pamatvajadzības un dzīvībai droši apstākļi. Optimāli, ka šīs ēkas būtu viegli uzbūvējamas, vajadzības gadījumā pārvietojamas, kā arī ballistiski aizsargātas. Tieši ēku ārējās norobežojošās konstrukcijas parasti nodrošina aizsardzību tajās esošajām dzīvām būtnēm un objektiem [2]. Tomēr pietrūkst informācijas un pētījumu, kuros būtu ziņojumi par ballistisku būvmateriālu sienu integrēšanu norobežojošajās konstrukcijās. Iespējams, ka informācijas pieeja ir ierobežota nozares specifikas dēļ. Latvija sūta uz Ukrainu vietēji ražotas koka karkasa moduļu mājas karā cietušajām, bez pajumtes palikušajām Ukrainas daudzbērnu ģimenēm. Vienas mājas platība ir 55 m² un tā salikta no divām saskrūvējamām daļām ar iespēju nepieciešamības gadījumā tās pārvietot [3]. Ēkas konstrukcijas netiek aprīkotas ar papildu bruņojumu. Būtu lietderīgi ēkā izveidot drošības istabu (*safe room*) vai vismaz integrēt ballistisko sienu, tādā veidā nodrošinot iedzīvotājiem arī psiholoģisko komfortu, nevis tikai fizisku aizsardzību. Šādās starptautiskajās operācijās bieži vien ir nepieciešama aizsargelementu transportēšana lielos attālumos, un tad konstrukciju svārs kļūst par kritisku parametru, arī situācijās, piemēram, ēku rekonstrukcijās, kad nav pieļaujams palielināt slodzi uz nesošajām konstrukcijām. Tas ierobežo tradicionālo tērauda vai betona konstrukciju izmantošanu, un galvenais izaicinājums ir izveidot konstrukcijas, kurām ir pietiekami maza masa, lai tās varētu transportēt, bet vienlaikus tās būtu pietiekami stipras, lai maksimāli mazinātu ballistiskos draudus [4]. Koka konstrukciju izmantošana ēku būvniecībā kļūst arvien izplatītāka, un koka karkasa konstrukcijas lieto gan jaunu ēku būvniecībā, gan esošo ēku modernizācijā. Arī koka karkasa konstrukciju projektēšanu var automatizēt, tādējādi samazinot būvniecības un projektēšanas procesu laiku [5]. Par pārvietojamas moduļveida ēkas karkasu tiek izvēlēts koks tā relatīvi vieglā svara, pieejamības un to ērti nomaināmo elementu dēļ. Tāpēc īpaši aktuāla ir tēma par moduļu un pagaidu ēkām, kas paredzētas cilvēkiem, kuri iztur īsāku vai garāku karantīnas laiku, kas ir viegli pārvietojamas un montējamas, tādā veidā samazinot transportēšanas izdevumus, arīdzan ātri uzstādāmas, operatīvi reaģējot uz patvēruma nepieciešamību, kas var būtiski ietekmēt cilvēku veselību un dzīvību. Necauršaujamas sienu konstrukcijas bieži tiek būvētas sabiedriskās ēkās, piemēram, bankās, ieroču veikalos, šautuvēs, vēstniecībās, militārajās iestādēs, policijas iecirkņos, īslaicīgās aizturēšanas kamerās (kur skaņas izolācija, ugunsdrošība un ballistika ir būtiski aspekti), viesnīcās, slimnīcās un cietumos. Arī Eiropas Parlamenta un Padomes regula (ES) Nr. 305/2011 [6] nosaka būtiskas prasības ēkām, kas ietver ēkas drošību to lietotājiem. Būtu perspektīvi ballistiski drošas sienas veidot arī skolās, jo ne tik tālu no mums – Igaunijā un Somijā – ir notikuši terorakti skolās. 2014. gadā Vīlandē (Igaunija) skolēns pirmdienas pēcpusdienā skolā nāvējoši sašāvis skolotāju [7].

Tēmas aktualitāti pastiprina karš un konflikti starp valstīm, un dabas, kā arī cilvēku izraisītas katastrofas (HES uzspridzināšana), kas izraisa plašas diskusijas un trauksmi. Viens no trauksmes mazināšanas veidiem ir globāla un individuāla preventīva aizsardzība, kas tai pat laikā rada papildu draudus, piemēram, ASV ieroču glabāšanas atļauju skaits pārsniedz valsts iedzīvotāju skaitu. Teroristiska veida notikumi ne tikai apdraud cilvēku drošību, bet var radīt arī ilgtermiņa sekas turpmākajām paaudzēm, ieskaitot ekosistēmu un infrastruktūru.

Daudzu pasaules valstu finansiālie resursi un investīcijas aizsardzības sektoram tieši pēdējos gados ir būtiski palielinājušās. Ballistiskā aizsardzība joprojām ir viena no svarīgākajām pētniecības un attīstības jomām civilajā un militārajā jomā. Atbilstoša ēku un būvju aizsardzības projektēšana ir sarežģīta daudzo tehnisko prasību dēļ. Neatkarīgi no paredzamā kalpošanas laika unikāls parametrs visu militāro objektu būvniecībā ir specifiskācija, kas saistīta ar ēkas aizsardzību – konstrukcijai piemītošo spēju nodrošināt drošību un aizsardzību un ierastos apstākļus ēkas iekšpusē esošajiem cilvēkiem un iekārtām [8], [9], [10]. Tāpēc relatīvi triecienizturīgām civilām ēkām sienu pastiprināšana ir būtiska. Tradicionālajās sprādziendrošajās sienās parasti izmanto augstas stiprības betonu vai arī tās ir aprīkotas ar tērauda plāksnēm, lai panāktu sienu ballistisku pastiprināšanu. Šāda metode ir pietiekami sarežģīta, tā ir dārga un būtiski palielina konstrukcijas svaru. Vēl jāņem vērā tas, ka konstrukciju bojājumu rezultātā remonts prasa ievērojamus laika resursus [11]. Šī iemesla dēļ šajā promocijas darbā ir ierosināts izmantot kokmateriālu, kura blīvums ir līdz piecām reizēm mazāks nekā betonam. Kokmateriālam ballistiska trieciena gadījumā piemīt liela mehāniskā izturība, izslēdzot tūlītēju sabrukšanu, lielas deformācijas un plaisas. Salīdzinoši viegls ir arī īpaši augstas molekulasmas polietilēna *UHMWPE* materiāls, kas savienots ar laminētu saplāksni. Saplāksnis savienojumā ar polietilēnu kā kompozītmateriāls vēl nav plaši izmantots, un tas izraisa zinātnieku interesi par jaunu materiālu izmantošanu, taču tas ir pieejams tirgū, tai skaitā ballistiskās aizsardzības vajadzībām. Plātņu savienojumi ir vājās vietas ložu draudiem. Būvdarbi, piemēram, elektroinstalācijas, santehnikas un ventilācijas lūkas, var mazināt ložu necaurlaidīgo sienu efektivitāti. RTU profesors A. Borodīņecs ar zinātnisko grupu ir pētījuši ložu drošību un mikroklimatu neklasificētās ēkās [10], [12]–[16], kā arī to, kā ventilācijas kanāli paneļa iekšpusē ietekmē sienas ballistiku [9]. Līdz ar šaujamieroču attīstību cilvēki ir domājuši par to, kā pasargāt sevi no lodēm, izmantojot dažādus šķēršļus. Sākumā cilvēki izmantoja materiālus, kas bija vieglāk pieejami. Interesanti, ka kā ložu necaurlaidīgas barjeras tika ieteiktas ar ūdeni pildītas pudeles un mitru avīžu kaudzes [17], [18]. Kopumā ballistisko aizsargmateriālu izpētē ir vērojama liela attīstība [18], [19]. Viens no vismodernākajiem koksnies materiāliem ir nanoceluloze, kurai arī tiek piedēvētas īpašas ballistiskās īpašības [20].

Līdz šim nav plaši publiski pieejami zinātniski pētījumi par koka kompozītmateriālu saliekamo paneļu konstruktīviem optimāliem risinājumiem pārvietojamām ēkām ārkārtēju trieciena slodžu gadījumā, kā arī nav atklāta šo pētījumu metodoloģija. Šāda pētījuma virziena attīstība varētu dot būtisku ieguldījumu gan teorētiskā terminālās ballistikas zinātnē, gan praktiskos risinājumus, lai veicinātu gan zinātnes, gan tirgus attīstību ballistiskās aizsardzības jomā. Metodoloģijas lietošana ļautu izstrādāt precīzākus modeļus un teorijas, lai uzlabotu ballistisko eksperimentu simulācijas. Jauni praktiski risinājumi ballistisko sienu modeļos veicinātu jaunus aizsardzības veidus un sniegtu augstāku aizsardzības līmeni esošajās militārās un civilās aizsardzības struktūrās.

Promocijas darba mērķis

Promocijas darba **mērķis** ir izstrādāt aprēķina metodoloģiju moduļveida sienu konstrukciju ballistikās pretestības prognozēšanai BR1 un BR2 aizsardzības klasēm pēc *EN 1063* standarta.

Promocijas darba uzdevumi

Lai sasniegtu darba mērķi, tika izvirzīti definēti vairāki **uzdevumi**.

1. Apskatīt teorētiski ballistikas nozares literatūras bāzi, apskatot un salīdzinot zinātnisko metodoloģiju citos zinātniskajos darbos, definēt secinājumus.
2. Izveidot metodoloģijas teorētisku un eksperimentālu pamatojumu:
 - a) veikt koksnes pirmreizējās ballistikās pārbaudes, izdarīt secinājumus eksperimenta tālākai sekmīgai ieviešanai.
 - b) veikt pētījumus par koksnes ballistisko pretestību *CLT* un saplāksnim; realizēt *CLT* paneļu testus matemātiskajā modelī, izmantojot galīgo elementu metodi;
 - c) noteikt mērķa materiāla šķietamo dinamisko stiprību *CLT* un saplākšņa materiāliem katrai aizsardzības klasei, kas ļautu pēc Ponceleta formulas aprēķināt lodes caursišanas maksimālo dziļumu (jeb minimālo sienas biezumu) citam ierocim ar lodes masu līdz 8,0 g un lodes sākuma ātrumu līdz 400 m/s, veidojot tendenci ieročiem ar lodes masu līdz 15,6 g un lodes sākuma ātrumu līdz 440 m/s.
3. Izveidot metodoloģiju, kas īpaši piemērota līmētu kokmateriālu sienu ballistikās pretestības prognozēšanai BR1 un BR2 aizsardzības klasēm.
4. Veikt izstrādātās metodoloģijas validāciju, izveidojot praktisku piemēru lodes caursišanas dziļuma pārejai no BR2 klases līdz BR4.
5. Paplašināt pētījumu ar daudzslāņu sienu ballistiku:
 - a) pielāgot aprēķinu metodiku daudzslāņu *CLT* sienām ar siltumizolāciju un adīto aramīda šķiedru audumu un sienai saplāksnis-*UHMWPE*, izmantojot iegūtos eksperimentālos datus;
 - b) salīdzināt perspektīvākās ballistikās sienu konstrukcijas ēkām, par būtiskiem faktoriem pieņemot ne tikai ložu drošumu, bet arī sienas svaru, cenu un siltumpretestību.
6. Izstrādāt priekšlikumus metodoloģijas praktiskai ieviešanai un normatīvo dokumentu par kokmateriālu ballistiku papildināšanai.

Pētījuma zinātniskā novitāte

Izstrādāta jauna aprēķina metodoloģija moduļveida sienu konstrukciju ballistikās pretestības prognozēšanai BR1 un BR2 aizsardzības klasēm pēc *EN 1063* standarta.

Pētījumu rezultātā ir noteiktas no materiālu īpašībām atkarīgas konstantes *CLT* un saplākšņa materiāliem, kas ļauj aprēķināt lodes caursišanas vidējo dziļumu jebkuram rokas ierocim ar lodes masu līdz 15,6 g un ātrumu 440 m/s (BR1 līdz BR4 aizsardzības klases).

Atšķirībā no esošajām ballistikās prognozēšanas metodoloģijām šajā promocijas darbā izstrādātā metodoloģija ir vienkāršāka un piemērota līmētu koka elementu ballistisko īpašību noteikšanai.

Zinātnisko novitāti pierāda tas, ka:

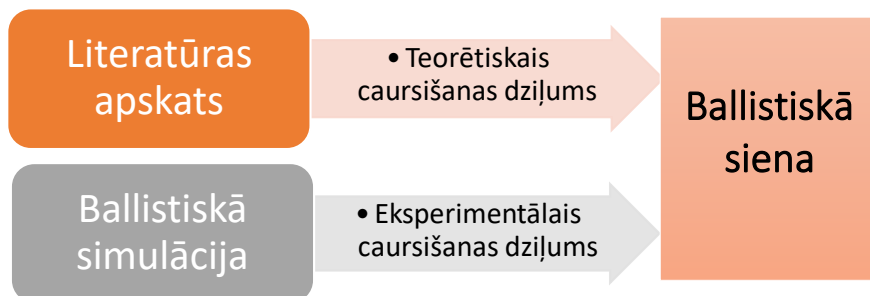
- rezultāti ir izmantojami praktiskiem mērķiem;

- rezultātu apraksti sniegti publikācijās un starptautiskās konferencēs;
- ir sadarbība ar Latvijas koka būvniecības klasteri.

Pētījuma metodoloģiskais pamats

Promocijas darbā pārstāvētās jomas ir ballistika, būvinženierzinātne un materiālzinātne, mehānika (trieciena dinamika un skaitliskā modelēšana), drošība un aizsardzība.

Darbs sastāv no literatūras pārskata un literatūrā atrodamo formulu analīzes, teorētiskā caursišanas dziļuma izpēti un aprēķina formulām, toties eksperimentālais caursišanas dziļums tiek iegūts ballistiskās simulācijās jeb testos. Vizuāli darba metodoloģija attēlots 1. attēlā.



1. att. Darba metodoloģijas shēma.

Promocijas darba praktiskais nozīmīgums

Izstrādātā un darbā aprobētā metodoloģija ļauj precīzi prognozēt nepieciešamo koksnes sienas biezumu bez pilna procesa eksperimenta veikšanas, tādā veidā samazinot finansiālus ieguldījumus, riska aspektus un paātrinot ēku projektēšanas laiku.

Darba praktiskajā daļā aprēķini veikti, izmantojot eksperimentāli noteiktus materiāla parametrus. Par eksperimentālo klasifikācijas līmeni ir izvēlēta BR2 aizsardzības klase, pēc kuras datiem rezultātu analogija pāriet uz pārējām klasēm, ņemot vērā katras klases trieciena kinētisko enerģiju, ko nosaka standartizēti lielumi lodes masai un sākuma maksimālajam ātrumam.

Piedāvātā metodoloģija ļauj prognozēt līmētas koksnes sienas biezumu BR1, BR2 aizsardzības klasēm pēc *EN 1063* standarta. Šīm klasēm noteikti no materiāla atkarīgi parametri, tādā veidā egles *CLT* un bērza saplākšņa ballistisko raksturojumu datubāzei pievienojot jaunus parametrus.

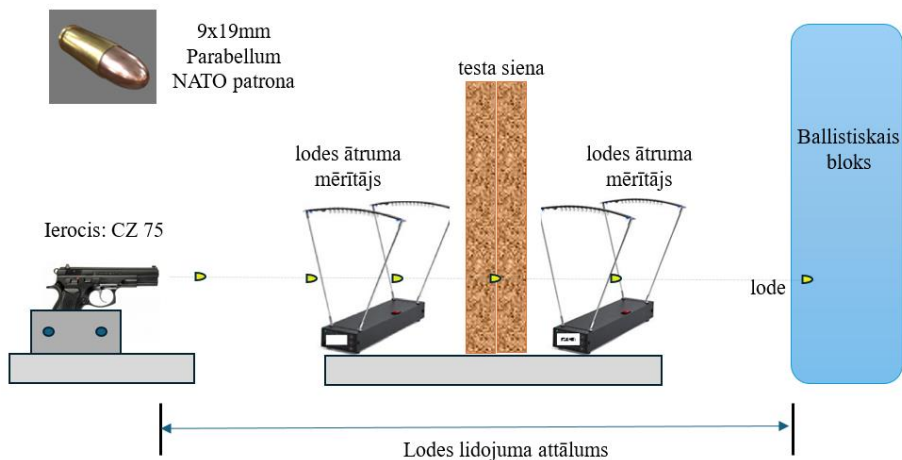
Jaunā aprēķina metodoloģija sniegs nozīmīgu ieguldījumu ilgtspējīgas būvniecības nozarē, sniedzot lielāku skaidrību par kokmateriālu lietojumu ēku sienu ballistisko funkciju nodrošināšanai. Terminālās ballistikas jomas attīstība var veicināt progresu gan teorētiskajā zinātnē, gan praktiskos risinājumos, lai veicinātu zinātnes un tirgus mijiedarbību. Nozares tālāka attīstība varētu ļaut izstrādāt precīzākus modeļus un teorijas, lai uzlabotu ballistisko eksperimentu simulācijas. Praktiski risinājumi ballistisko sienu modeļos veicinātu jaunus aizsardzības veidus un sniegtu augstāku aizsardzības līmeni esošajās militārās un civilās aizsardzības struktūrās.

Izmantotie rīki un iekārtas

Eksperimentos izmantotie rokas ieroči ir CZ 75 (ražo uzņēmums “ČZUB” Čehijas republikā) un Glock 17 (Glock sērija, Austrija) pusautomātiskās rokas pistoles. 9 mm x19 mm kalibra *Parabellum FMJ* (metāla apvalka lodes). Šo ieroču lādiņš izšaušanas brīdī rada 157–162 dB lielu troksni, tāpēc darba drošības komplektā neatņemama sastāvdaļa ir trokšņa ierobežošanas palīgierīces jeb austiņas, kā arī papildus ausu aizbāžņi (pēc nepieciešamības). Šaušanas leņķis (lādiņa ass leņķis attiecībā pret šķēršļa virsmu) bija 90 grādi, lai gan tas varēja nedaudz mainīties sakarā ar to, ka šāvējs bija nevis specializēta iekārta, bet cilvēks (profesionālis). Eksperiments šajā promocijas darbā tiek limitēts, izmantojot slīpgaļa (*ogive*) formas *Parabellum* lodes. Ieroča un tā parametru izvēle ir pamatota ar to, ka CZ 75 un Glock 17 ir standartizēti zemas-vidējas kinētiskās enerģijas avoti. Šo ieroču izmantošana samazina eksperimentālo mainīgo skaitu, nodrošina mērījumu atkārtojamību, ieroča izmantošana ir raksturīga urbanizētai videi, kas pietuvina eksperimentu reāliem apstākļiem.

Ložu ātruma mērīšanai tika izmantoti divas N/P firmas “Slingshot” Speed tester hronogrāfa ierīces ar mērījumu kļūdu $\leq 1\%$ un precizitāti $\pm 0,1$ m/s (EN 1063 standarts nepieprasa precizitāti, mazāku par 1 m/s). Šie ātruma mērītāji jeb velosimetri tika novietoti pirms un pēc mērķa materiāla, maksimāli tuvu sienas paraugam.

Eksperimenta darbības shēma attēlota 2. attēlā. Lodes lidojuma attālums ir 8–9 metri no ieroča stobra līdz paraugam lodes iesprūšanas rezultātā vai līdz ballistikajam blokam jeb lodes uztvērējam lodes caursišanas gadījumā.



2. att. Eksperimenta darbības shēma.

Caursišanas garumi tika mērīti ar tērauda stieplīti un rokas lineālu, un kļūdas precizitāte ir ± 1 mm (mazākās iedaļas vērtība) līdz lodes aizmugurējai daļai.

CLT un saplākšņu eksperimentos izmantotā ieroča CZ 75 izšautās lodes ātrums pirms lodes ielidošanas paraugā bija no 327,3 m/s līdz 345,8 m/s. Ātrums atbilst *NIJ standard-0108.01* standartam, kur 9 mm lodes sākuma ātrumam jābūt (332 ± 12) m/s, bet nesakrīt ar *EN 1063* standarta tabulu (1.1. tab.), kur tie ir diapazonā no (360 ± 10) m/s līdz (440 ± 10) m/s. Lodes ātrums tika mērīts šaušanas 8–9 metru attālumā no ieroča pirms materiāla caursišanas. Pēc fizikas likumiem tik relatīvi liela ātruma samazināšanās 8–9 metru attālumā ir niecīga. Līdz ar to ierīces fiksēto ātrumu pirms materiāla var pieņemt vienādu ar lodes sākuma ātrumu. Šo

starpību var ietekmēt patronas šaujampulvera daudzums un ieroča markas izvēle, kam šajos testos bija gadījuma raksturs. ASV normatīvā *NIJ standard-0108.01* ir detalizētāka informācija par ieroču piemērotību aizsardzības klasēm, iekļaujot stobra garuma parametrus.

Valodas formulējumu uzlabošanai un atsevišķu teikumu redakcijai tika izmantots mākslīgā intelekta valodas modelis *ChatGPT (OpenAI, GPT-5 versija, 2025)*. Modelis netika izmantots jaunu zinātnisku secinājumu ģenerēšanai, bet tikai teksta stilistikas un valodas uzlabošanai. Autore ir veikusi visu satura pārbaudi un atbild par tā precizitāti.

Pētījuma ierobežojumi

Piedāvātā metodoloģija ir piemērojama BR1 un BR2 aizsardzības klasēm, kas nosaka ierosinātās lodes sākuma ātrumu no 330 m/s līdz 400 m/s un lodes masu no 2,5 g līdz 8,0 g ar tendenci līdz 450 m/s un lodes masu līdz 15,7 g.

Šī pētījuma ierobežojumi bija divi rokas ieroči un viens patronas tips atbilstoši aizsardzības klasei BR2 saskaņā ar *EN 1063* un *EN 10522/10523*, izmantojot slīpgaļa jeb *ogive* formas *Parabellum* lodes. Iemesls – tirgus pieejamība un biežs pielietojums attiecīgajā jomā.

Metodoloģijas piemērojamība nav eksperimentāli pārbaudīta citām koksnes sugām, bet vērtēta tikai bērza saplākšņa un egles *CLT* materiālu gadījumā.

Piedāvātajā metodoloģijā nav ietverti tādi mainīgie faktori kā leņķa un šaušanas attāluma ietekme, kas var ietekmēt rezultātu ticamību un lietojumu praksē. Pētījums neietver sienu paneļu sastiprinājumu montāžas detaļas un to izmaksas, savienojumu, kas ir vajākā vieta konstrukcijā, dažādību un to ballistikās pretestības ietekmi, pēkšņas lodes ātruma izmaiņas (nejauši šķēršļi lodes ceļā), lodes izmēru un gala formu variācijas un arī rikošeta iespējamību, kā arī šķembu izplatību. Eksperimenta laikā telpās esošā temperatūra izvēlēta nejauši – vienreiz +6–7 °C janvārī, citreiz +19 °C (maijā). Standarts nosaka testēšanas iekštelpu temperatūru $+18 \pm 5$ °C.

Aprēķinus ir būtiski vienkāršot, tāpēc tika pieņemts, ka: 1) lode iespiešanās brīdī materiālā nav deformējusies; 2) lādiņa kinētiskā enerģija tiek izmantota tikai mērķa deformācijai; 3) no daudziem faktoriem, kas ietekmē lodes caursišanas spēju, galvenie un nozīmīgākie: ir a) lādiņa masa, ātrums saduršanās brīdī un lādiņa galviņas gala forma; b) mērķa pretestības spēju raksturojums [21].

Aizstāvēšanai izvirzītās tēzes

- Izstrādāta aprēķinu metodoloģija moduļveida sienu konstrukciju ballistikās pretestības prognozēšanai BR1 un BR2 aizsardzības klasēm pēc *EN 1063* standarta. Izstrādātā metodoloģija ļauj ar augstu precizitāti prognozēt nepieciešamo koksnes sienas biezumu bez pilna mēroga eksperimenta veikšanas, tā samazinot finansiālos ieguldījumus, drošības riskus un paātrinot ložudrošu ēku projektēšanas laiku.
- Noteikti empīriski parametri (šķietamā dinamiskā pretestība R_t), kas ļauj prognozēt maksimālo caursišanas dziļumu jeb minimālo sienas biezumu *CLT* materiālam pie mainīgu lodes ātruma (330–400 m/s) un lodes masas (2,5–8,0 g) parametru gadījumā BR1 un BR2 aizsardzības klases ietvaros. Parādīta grafiska tendence jaudīgāku ieroču spējai BR3 un BR4 klasēm.

- Noteikti empīriski parametri, kas ļauj prognozēt maksimālo caursišanas dziļumu jeb minimālo sienas biezumu **saplākšņa** materiālam pie mainīgu lodes ātruma (330–400 m/s) un lodes masas (2,5–8,0 g) parametru gadījumā BR1 un BR2 aizsardzības klases ietvaros. Parādīta grafiska tendence jaudīgāku ieroču spējai BR3 un BR4 klasēm.

Promocijas darba struktūra

Promocijas darbā ir piecas nodaļas – literatūras apskats, pētījuma teorētiskais un eksperimentālais pamatojums, metodoloģija ballistikās pretestības novērtēšanai, eksperimenti metodoloģijas aprobācijai un pētījumi daudzslāņu sienu ballistikā.

Promocijas darba izstrādes gaitā veikta citu zinātnisku pētījumu un informācijas līdzekļu plaša analīze par ballistikas zinātni, plašāk lietotajiem ballistikajiem materiāliem, iekļaujot koksnes cietību, ko mēra ar Janka cietību, kas korelē ar materiāla spēku pretoties trieciena slodzei. Sniegts pārskats par ieroču un kalibru iedalījumu, analizēti dažādi uz ballistiku attiecināmie standarti, veikts to īss salīdzinājums. Literatūras analīzē iekļauta būtiska informācija par aizsardzības klasēm, lodes gala formas ietekmi uz mērķi, rikošetu iespējamību, lādiņa darbību mērķa materiālā un plašāk par lodes caursišanas spēju un aprēķinu formulām, kā arī par līmes ietekmi uz ballistisko rezultātu, apskatīta un salīdzināta metodoloģija citos zinātniskajos darbos un pētījumos. Pētījuma teorētiskajā un eksperimentālajā pamatojumā veikti un analizēti preliminārie un reālie koksnes ballistiskie testi – pētījumi par *CLT* un **saplākšņa** modeļiem, lai atrastu optimālāko risinājumu BR2 klases ballistikai sienai, matemātiskais modelējums, izmantojot galīgo elementu metodi. Darbā iekļauta parametru optimizācijas analīze. Metodoloģija ballistikās pretestības novērtēšanai parādīts paņēmieni kopums līmētu kokmateriālu sienu ballistikās pretestības prognozēšanai BR1 un BR2 aizsardzības klasēm, veidojot tendenci BR3 un BR4 aizsardzības klasēm pēc *EN 1063* standarta. Pētījums paplašināts ar daudzslāņu sienu ballistikajiem pētījumiem par *CLT* un **saplākšņa** darbību slāņainā konstrukcijā, lai pielāgotu aprēķina metodoloģija papildinošo materiālu ballistikās pretestības noteikšanai vai prognozēšanai, kā arī veikts astoņu ballistisko sienu salīdzinājums, lai sagrupētu jau zināmās un arī autores pētītās ballistikās barjeras to spēju robežās. Izstrādāti priekšlikumus metodoloģijas praktiskai ieviešanai un normatīvo dokumentu par kokmateriālu ballistiku papildināšanai.

Pētījuma noslēgumā apkopoti galvenie secinājumi.

Darba apjoms ir 115 lappuses, tajā ir 52 attēli, 28 tabulas, 55 formulas, izmantoti 116 literatūras avoti. Promocijas darbs uzrakstīts latviešu valodā.

Promocijas darba rezultātu aprobācija

Promocijas darba rezultāti prezentēti un apspriesti trīs starptautiskās konferencēs:

1. **Barone, E.**, Vetra, R., Gaujena, B., Vilnītis, M. Ordinary gypsum plasterboard, and Knauf Torro gypsum plasterboard bullet-proofing. 2022, RTU IMST, Sept 28–30, Riga, Latvia <https://imst.rtu.lv/wp-content/uploads/sites/59/2022/12/IMST-PROGRAMMA-2022-web-1-1.pdf> (autores ieguldījums 70 %)
2. **Barone, E.**, Gaujena, B., Vilnītis, M. Literature Review of Applicable Ballistic Materials for Temporary Wooden Building Envelopes, 30th International Baltic Conference, Materials Engineering and Modern Manufacturing, Oct 19–20, 2023, Kauņa, Lietuva (autores ieguldījums 80 %)
3. **Barone, E.**, Hamenoks, D., Gaujena, B., Vilnītis, M. Plywood wall for bulletproof modular buildings. 2025, RTU IMST, Sept 10–12, Riga, Latvia (autores ieguldījums 80 %)

Publikāciju saraksts

Scopus datubāzē indeksētas piecas publikācijas:

1. Borodiņecs, A., Geikins, A., **Barone, E.**, Jačņevs, V., Prozuments, A. Solution of Bullet Proof Wooden Frame Construction Panel with a Built-In Air Duct. Buildings, 2022, Vol. 12, No. 1, Article number 30. ISSN 2075-5309. Pieejams: doi:10.3390/buildings12010030 (autores ieguldījums 10 %)
2. **Barone, E.**, Vetra, R., Gaujena, B., & Vilnītis, M. Ordinary gypsum plasterboard and Knauf Torro gypsum plasterboard bullet-proofing. Paper presented at the Journal of Physics: Conference Series, 2022, 2423(1). Pieejams: doi:10.1088/1742-6596/2423/1/012016 <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2423/1/012016> (autores ieguldījums 70 %)
3. **Barone, E.**, Veļičko, E., Gaujēna, B., Vilnītis, M. Plywood Panel with UHMW Polyethylene Board Ballistic Resistance. Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering, 2023, Vol. 32, No. 1, 233.–243.lpp. ISSN 2029-9990. e-ISSN 2335-2000. Pieejams: doi:10.5755/j01.sace.32.1.32822. (autores ieguldījums 80 %)
4. **Barone, E.**, Gaujena, B., Vilnītis, M. Literature Review of Applicable Ballistic Materials for Temporary Wooden Building Envelopes, Advances in Science and Technology, 2023, 134 AST, pp. 29–40 (autores ieguldījums 90 %)
5. **Barone, E.**, Griņēvičs, I., Gaujēna, B., Vilnītis, M. CLT Wall for Bullet-Safe Temporary Buildings. Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering, 2025, Vol. 37, No. 1, 97. –108.lpp. <https://sace.ktu.lt/index.php/DAS/article/view/38395> <https://doi.org/10.5755/j01.sace.37.1.38395> (autores ieguldījums 70 %)

Web of Science datubāzē indeksēta viena publikācija:

6. **Barone, E.**, Gaujena, B., Videmanis, J. Projectile Penetration Depth into Wood-Based Frame of Unclassified Buildings. Far East Journal of Mechanical Engineering and Physics, 2022, Vol. 3, pages 11-20. e-ISSN 2229-4511. Pieejams: doi:10.17654/2229451122002 <http://www.pphmj.com/abstract/14445.htm> (autores ieguldījums 70 %)

1. LITERATŪRAS APSKATS

Promocijas darba izstrādes procesā veikta citu zinātnisku pētījumu un informācijas līdzekļu plaša analīze, kas saistīta ar ballistikajiem materiāliem un pielietojumu. Tika analizēta zinātniskā informācijā par ballistiku kā zinātni, plašāk pielietotajiem ballistikajiem materiāliem, tai skaitā koksnes cietību, ko mēra ar Janka cietību, kas korelē ar materiāla spēku pretoties trieciena slodzei. Sniegts pārskats par ieroču un kalibru iedalījumu, analizēti dažādi uz ballistiku attiecināmie standarti, veikts to īss salīdzinājums. Literatūras analīzē iekļauta būtiska informācija par aizsardzības klasēm, lodes gala formas ietekmi uz mērķi, rikošetu iespējamību, lādiņa darbību mērķa materiālā četrās fāzēs un plašāk par lodes caursišanas spēju un aprēķinu formulām, uzsvāru liekot uz Ponceleta formulu. Arīrdzan līmes ietekme uz līmētu kokmateriālu ballistikajam īpašībām un apskatīts metodoloģijas pārskats citos veiksmīgos ballistikas jomas zinātniskajos darbos un pētījumos. Nodaļas noslēgumā apkopoti galvenie secinājumi, kas izriet no veiktās literatūras analīzes.

1.1. Ballistika

Ballistika ir zinātne par šāviņu lidojuma laikā. Termins "ložudrošs" (*bulletproof*) ir relatīvi maldinošs, jo neviens materiāls nav simtprocentīgi necauršaujams. Ballistika iedalās trīs zinātniskajos virzienos [8], [22]:

- Iekšējā ballistika (*interior ballistics*) – apskata ieroci, tā darbību šāviņa un lādiņa paātrinājuma fāzē, munīcijas mijiedarbību; apskata sprāgstvielu īpašības, gāzes spiediena aprēķināšanas metodes, alternatīvas sistēmas lādiņu paātrināšanai.
- Ārējā ballistika (*external ballistics*) – apskata šāviņa kustību no izšaušanas brīža (ierocha stobra) līdz lodes ieiešanai mērķī; apskata spēkus, kas iedarbojas uz lādiņu, to aprēķināšanas metodes, trajektoriju, žiroskopiju un aerodinamika.
- Terminālā ballistika (*terminal ballistics*) – pēta šāviņa uzvedību un sekas pēc tam, kad tas trāpa mērķī. [8] Ballistikās aizsardzības projektēšanas principi, testēšanas problēmas un risinājumi, rikošetu iespāids. Parasti šie dati ir empīriski. [22]

Terminālās ballistikas zinātne sākās ar izcilo matemātiķi Leonardu Eileru (*Leonard Euler*) (1745) un britu zinātnieku Bendžaminu Robinsu (*Benjamin Robins*) (1742), kuri analizēja caursišanas datus metāla lielgabala lodēm gruntī kā funkciju no trieciena ātruma. Turpmākajos divos gadsimtos līdz Otrajam pasaules karam terminālās ballistikas joma bija balstīta uz empīriski atvasinātām sakarībām starp caursišanas dziļumu un trieciena ātrumu vairākiem lādiņiem dažādos mērķos. Šīs empīriskās formulas 20. gadsimta 60.–70. gados apkopoja Harmanis un Džons (*Hermann; Jones*), un Bekmens un Goldšmits (*Backman; Goldschmith*) [23].

Šajā promocijas darbā tiek apskatīta tieši terminālā ballistika. Arī Latvijā šajā nozarē trūkst pētījumi, ekspertīzes un ekspertu vai arī šāda informācija nozares specifikas dēļ nav publiski pieejami.

1.2. Ballistiskie materiāli

Lai apstādinātu lielā ātrumā lidojošu lodi, ir nepieciešams aizsargvairogs jeb šķērslis no materiāla, kas spēj uzņemt un absorbēt lielu daudzumu kinētiskās enerģijas. Lodes darbība (tās

inerces spēks [24]) materiālā ir atkarīga ne tikai no lodes ātruma, diametra, masas un lodes priekšējā gala formas, bet viennozīmīgi arī no paša materiāla – cik slāņains tas ir, vai tas ir austs (audums), blīvs, šķiedrains, kāda ir tā cietība liela trieciena gadījumā. Katra materiāla pretestība pret liela ātruma šāviņiem atšķiras arī ar montāžas detaļu materiāla struktūras nevienādīgumu, šāviņa tipa (priekšgala formas) un enerģijas (šāviņa masas un ātruma), un trieciena stāvokļa pret mērķi [25], [26].

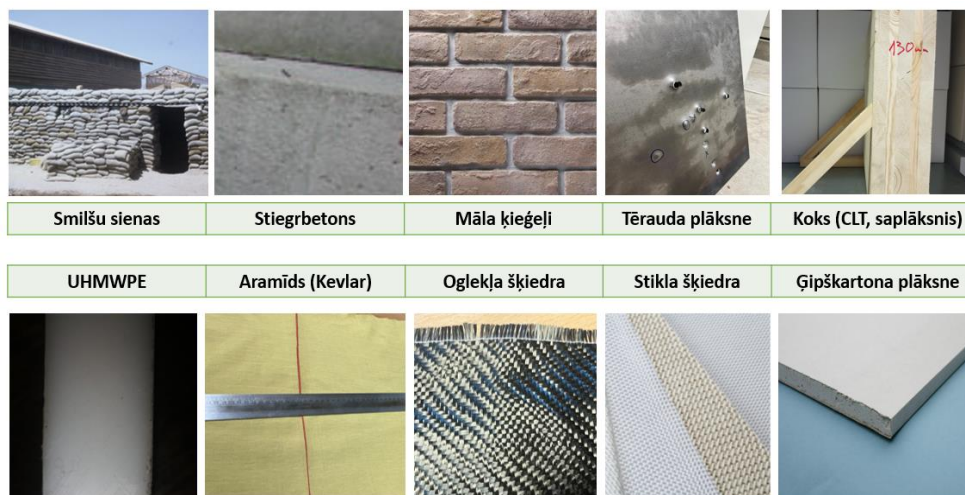
Ņemot vērā, ka lodes trieciens ir dinamiska kustība, mērķa materiāla un lodes mijiedarbībai ir raksturojumi, kas parādīti 1.1. tabulā.

1.1. tabula

Materiālu īpašību ietekme uz ballistisko pretestību [27]

Materiāla īpašības	Ballistiskā ietekme
blīvums –	masa
cietība –	lādiņa deformācijas spēja
Janga modulis –	triecienviļņa izplatīšanās
plaisu izturība –	izturība pret vairākiem triecieniem
plaisu veids –	enerģijas absorbēšanas spēja

Šajā apakšnodaļā tiek analizēti desmit ballistiskie materiāli, to īpašības, stiprās un vājās puses, kā arī jaunākie pētījumi, lai izprastu to potenciālu un iespējas ballistikajā aizsardzībā, tostarp izmantošanu ar drošību saistītu ēku norobežojošajās sienu konstrukcijās.



1.1. att. Darbā aprakstītie un biežāk lietojamie ballistiskie materiāli.
[4], [28] – [33]

Tās ir (1.1. att.):

- smilšu sienas,
- stiegrbetons,
- māla ķieģeļi, keramika,
- tērauda plāksne,
- koks (saplāksnis, krusteniski līmēta koksne jeb *CLT*),
- īpaši augstas molekulmasas polietilēna (*UHMWPE*) plātnes,

- aramīda plātnes,
- oglekļa šķiedras plātnes,
- stikla šķiedras plātnes,
- ģipškartona plātnes.

Tālāk parādītas katra materiāla raksturīgākās īpašības, priekšrocības un trūkumi, zinātniskie pētījumi un pielietojums.

Smiltis kā ballistisks materiāls

Smiltis kā granulveida materiāls ir viens no lētākajiem aizsardzības veidiem pret lodēm. Sablīvēts smilšu valnis ir efektīva dabiskā barjera, kas absorbē triecienu un arī sprādzienu, padarot lodes atšanos jeb rikošetu neiespējamu pat pie liela ātruma šāviņa. Tā kā smilšu valnis parasti ir liela biezuma, tad tā viena attāluma vienība dod salīdzinoši mazu ballistisko pretestību. Augsnes kārtu bieži lieto kā papildinājumu betona un tērauda vairogiem [19]. Sapresētus smilšu maisus kā labu barikāžu materiālu izmanto armijā. Tāda viena no tranšēju aizsargsienām ir Hesco barjera [13], kas ir daudzšūnu barjeru sistēma, kas izklāta ar izturīgu, neaustu polipropilēna ģeotekstilu un izgatavota no metināta tērauda sieta ar cinka-alumīnija pārklājumu, kas iekšpusē ir pildīta ar smiltīm. Tāda veida smilšu konteinerus var izmantot kā ballistisko un sprādzienbīstamo sienu aizsardzību pret sekundāro fragmentāciju [14] personālam un dzīvībai svarīgiem un neaizsargātiem objektiem, piemēram, slimnīcām, noliktavām un lidmašīnām stacionāros apstākļos [15]. Smilšu barjeru priekšrocības ir tās, ka tās ilgi kalpo un ir salīdzinoši videi draudzīgas. To trūkums ir tas, ka tās ir pārāk smagas, lai tās varētu pārvietot, un nav piemērotas būvēm auksta klimata apstākļos, jo tām nav pietiekoša siltumizolācija. Smiltis taisnstūrveida konteinerā, kas ievietots starp norobežojošām plāksnēm, var būt piemērota telpai, kas paredzēta kā drošības istaba (*safe room*) ēkā. Izmaksas smilšu pielietošanas gadījumā būtu ievērojami mazākas nekā bieži izmantotā nodilumizturīgā tērauda 500. klases (*AR500*) plāksne. Būtisks aspekts, kas jāņem vērā, ir – cik blīvi šajās kastēs jāiepako smiltis, lai nodrošinātu nepieciešamo aizsardzību. Tika veikts pētījums par smilšu saturošām sienām: 6 mm stikla šķiedras kastveida sienas un 12 mm finiera kastveida sienas, pildītas ar tīrām, ar nodomu izžāvētām smiltīm 288 mm platumā. Eksperiments tika veikts šaujot 15 m attālumā no mērķa ar nodomu samazināt lodes kinētisko enerģiju līdz nullei. Lodes apstājās 127 un 200 mm dziļumā atkarībā no konkrētā ieroča tipa un ārējās virsmas materiāla. Var secināt, ka tāds ir nepieciešams minimālais komerciālo sienu biezums, lai noturētu 10 kg smilšu vienā blokā [16]. Jāņem vērā, ka caursite jeb iespiešanās dziļums ir ievērojami lielāks mitrās smiltīs nekā sausās smiltīs, neatkarīgi no lodes patronas tipa [4]. [19]

Stiegrbetons kā ballistisks materiāls

Betons mūsdienās ir visbiežāk izmantotais materiāls kritiski svarīgu ēku būvniecībā, piemēram, atomelektrostacijās, valdības objektos, vēstniecībās un militārajos objektos [25]. Stiegrbetona ballistisko sniegumu ietekmē tādas materiāla īpašības kā betona matricas spiedes un stiepes izturība, pildvielas veids un izmērs, tērauda stiegru attālumi, stiegru novietojums un daudzums, kā arī iespējamais alternatīvo šķiedru veids, saturs, šķiedru stiepes un saķeres izturība un to orientācija. [25] Turklāt pierādīts, ka betona stiprības palielināšana no 48 MPa līdz 140 MPa un cietēšanas temperatūras paaugstināšana no 30 °C līdz 250 °C, būtiski

neietekmē tā trieciena izturību [38], [39]. Bet, palielinot pildvielas izmērus un šķiedru daudzumu, palielinās materiāla izturība pret ieroča radīto triecieni. [25]. Lodes caursites dziļums un lodes izspiestais krātera diametrs mērķa paraugos samazinās, samazinoties ūdens un cementējošā materiāla attiecībai (u/c) un palielinoties betona spiedes stiprībai, taču izpētīts, ka šī tendence nav lineāra [39], [40]. Rupjo granīta pildvielu un tērauda šķiedru sastāvs uzlabo betona triecienizturību. Pret 12,6 mm lodi ar trieciena ātrumu 620 – 700 m/s visefektīvāk aiztur betons ar spiedes stiprību 100 MPa. [39]

Ekspimentāli pierādīts, ka aizsardzībai pret liela ātruma (vairāk nekā 800 m/s) lodēm ir nepieciešams 17 cm biezs betons. Tomēr 20–40 cm biezas sienas būvniecība ir papildu drošība, ja vien izmaksas to atļauj [20]. Tas padara vēl pamanāmāku materiāla trūkumu – svaru (stiegrbetona vidējais blīvums 25 kN/m³). Turklāt betona blokus ir samērā viegli iznīcināt ar vairākiem atkārtotiem triecieniem [39]. Betona materiālā novērojamas izteiktas plaisas, drupšana.

Māla ķieģeļi kā ballistisks materiāls

Māla ķieģeļu būtiskākā ballistiskās jomas priekšrocība ir materiāla cietība. Ballistikas pētījumos ķieģeļi tiek sašķelti. Kanādas valdības atbalstītā eksperimentā tikai dažas šauteņu lodes (no lieljaudas medību patronām) varēja pilnībā izspiesties cauri vienam 90 mm biežam māla ķieģelim. Neviena no šīm lodēm neiekļuva darvas papīra slānī starp ķieģeļa saplāksni un aizmuguri (13 mm biezs koka apvalks un ārējais darvas papīrs, kamēr starp tapām tika novietota stikla šķiedras izolācija). Rezultāti pierādīja, ka sienas, kas izgatavotas no 90 mm mūra finiera, efektīvi aptur lodes, kas izšautas no 9 mm ieroča [28].

Tērauda plāksnes kā ballistisks materiāls

Lai gan tērauds ir dārgs materiāls, tas ir viens no biežāk izmantotajiem materiāliem ballistiskajai aizsardzībai. Tas ir arī visplānākais zināmais ballistiskais materiāls (1 līdz 19 mm [42]), ko lieto vienā kārtā, un ir ļoti efektīvs. Trūkumi: sarežģīta uzstādīšana, jo to nevar montēt uz vietas (iepriekš ir jāparedz savienojuma vietas); tērauds bloķē mobilo sakaru un *Wi-Fi* tīklus, kas ir apgrūtināši ikdienā un dažkārt var radīt bīstamu situāciju. Tērauds var radīt arī lodes negaidītu atsišanos jeb rikošetu un atdalošas šķembas, kas ietekmē dzīvo būtnu drošību.

Viens no piemēriem, kur tieši tērauda materiāls ir izmantots – [43] ir patentējais īpašas formas konstrukcijas ar dobu centru, kas galvenokārt izgatavotas no tradicionāli lietotām tērauda plāksnēm. Tas ir panelis, kas aizsargā militāros karavīrus un aprīkojumu no ballistiskiem un mīnmetēju uzbrukumiem. Bojāto plākšņu nomaina ir ātra un relatīvi vienkārša, jo katrs modulis strādā atsevišķi, tādā veidā neietekmējot blakus esošos nebojātos paneļa modulus.

Koks (saplāksnis, *CLT*) kā ballistisks materiāls

Koka konstrukciju izmantošana ēku būvniecībā kļūst arvien izplatītāka, un koka karkasa konstrukcijas tiek izmantotas gan jaunu ēku būvniecībā, gan esošo ēku modernizācijā. Arī koka karkasa konstrukciju projektēšanu var automatizēt, tādējādi samazinot būvniecības laiku un projektēšanas procesu [25]. Koku bieži neņem vērā, projektējot aizsargkonstrukcijas īpaši apdraudētos reģionos, tā zemās stiprības dēļ salīdzinājumā ar materiāliem, kas var efektīvāk nodrošināt ballistisko aizsardzību [8], [24]. Lai gan koka ballistiskās īpašības ir pētītas jau trīs gadsimtus, joprojām nav atrasts apmierinošs risinājums, kā nodrošināt pietiekamu izturību pret

ballistiskām briesmām [44]. Sprāgstvielu testos plaši izmanto koka mērķus, lai testēšanas laikā nodrošinātu drošību un standartizāciju [24]. Tomēr standarta aizsargmodeļos esot pārvērtēts koka biežums šāviņa apstādīšanai. [44] Koksnes materiālu caursītes dziļums ir saistīts ar koksnes fizikālajām īpašībām [26], [27]. Kokmateriāla nepilnības (piemēram, anizotropiskums) ietekmē tā mehāniskās īpašības, tostarp šāviņa darbību. Arī reizēm lodes uzvedība kokmateriālos ir neprognozējama, jo kokmateriālos ir relatīvi daudz redzamu un neredzamu zaru, kas samazina koksnes stiprības un izturības prognozējamību [26], [28], [29], [30], īpaši egles un priedes sugām [45]. Tā kā koks ir dabisks materiāls, tam atkarībā no koka augšanas apstākļiem, vecuma un sugas var atšķirties mehāniskās īpašības. Šī atšķirība var būt novērojama arī viena parauga ietvaros [8]. Materiāla fizikālās īpašības parasti nav prognozējamās mezglā un mezgla tuvumā. A. Nardin pētīja mezglu ietekmi uz koksnes, t. i., Norvēģijas egles, lūzumu. Viņu veiktās simulācijas parādīja, ka stiepes un bīdes izturība mezglā ir lokāli lielāka. Arī plīsuma enerģija bija vislielākā mezgla tuvumā [45], [48]. Šāviņu caursītes dziļums palielinās līdz ar trieciena ātrumu, un mīkstākai koksnei šie parametri ir tuvi lineārai atkarībai. Šāviņa iespiešanās ir atkarīga ar mērķa materiāla biezuma, blīvuma, Janka cietības [45] un koksnes šķiedru virziena [44]. Koksnes kompozītmateriālu krusteniski līmēto kārtu struktūra samazina materiāla anizotropiju un no tās atkarīgās mehāniskās īpašības, tāpēc līmēto materiāli ir prognozējamāki un uzticamāki par masīvkoksni [49].

Koksnes materiālu ballistiskās īpašības nosaka to spēja absorbēt un izkliedēt šāviņa kinētisko enerģiju, aizkavējot vai apturot tā tālāku kustību. Atšķirībā no tērauda vai keramikas, koksne neaptur lodi galvenokārt ar augstu cietību, bet gan ar vairāku mehānismu kombināciju: šķiedru deformāciju un pārrāvumu, slāņu atdalīšanos (delamināciju), lokālu saspiešanu, plaisu veidošanos un berzi starp lodi un penetrācijas kanāla sienām [45], [50], [51]. Būtiskākās koksnes ballistiskās īpašības: blīvums, šķiedru struktūra, enerģijas absorbcijas spēja, berze [50], [51]. Jo lielāks ir koksnes blīvums, jo lielāka parasti ir tās pretestība lodes iespiešanai. Cietkoksnē, piemēram, ozols vai bērzs, uzrāda labākas ballistiskās īpašības nekā mīkstā koksne, piemēram, egle vai priede [50]. Nozīmīga īpašība ir arī šķiedru struktūra un anizotropija. Koksnes mehāniskās īpašības atšķiras garenvirzienā, radiālajā un tangenciālajā virzienā, tādēļ lodes penetrācija ir atkarīga ne tikai no materiāla veida, bet arī no šķiedru orientācijas. [50], [51] Daudzslāņu materiāli, piemēram, bērza saplāksnis vai *CLT* paneļi, izmanto dažādos virzienos orientētus slāņus, kas liek lodei ik pēc slāņa mainīt deformācijas režīmu un palielina enerģijas zudumus [52]. Enerģijas absorbcijas spēja. Lodei virzoties cauri koksnei, kinētiskā enerģija tiek patērēta šķiedru pārraušanai un saspiešanai. Jo garāks ir penetrācijas ceļš, jo vairāk enerģijas tiek absorbēts. Biezākos materiālos lode sāk kustēties ar novirzi no sākotnējās ass, kas palielina kontakta laukumu un pretestību. [50], [53] Koksnes materiālu galvenās ballistiskās īpašības ir augsta enerģijas absorbcijas spēja uz masas vienību, laba deformāciju izkliedēšana šķiedru struktūrā, spēja destabilizēt šāviņu un relatīvi augsta pretestība vairāku slāņu konstrukcijās. Īpaši efektīvi šajā ziņā ir blīvi bērza saplāksņi un daudzslāņu koksnes kompozīti, kuru ballistiskā efektivitāte bieži ir augstāka nekā varētu spriest tikai pēc to blīvuma vai stiprības rādītājiem. [45], [52], [53]

CLT kompozītmateriālu īpašības kombinācijā ar koka paneļu spēju absorbēt enerģiju ir perspektīvs virziens to izmantot pagaidu militārajās konstrukcijās. *CLT* materiālu priekšrocības ir laba siltumnoturība, skaņas izolācija, materiāla relatīvi mazais svars, paneļi ir ātri un viegli montējami, piemēroti apdarei gan ēkas iekšpusē, gan ārpusē un tiem ir lielāka izturība pret grauzējiem perpendikulāro šķiedru dēļ. [8] darbā tika pētīta Ziemeļamerikas egles, priedes un

dienvīdu priedes *CLT* izturība pret militārām lodēm. Priedes *CLT* uzrādīja labākus rezultātus nekā egles *CLT* paaugstināta blīvuma un cietības dēļ. *CLT* biežums ir palielināts, lai materiāls apturētu šāviņu, vadoties pēc trieciena ātrumu. Zināšanu trūkums par koksnes anizotropo darbību trieciena slodzes iedarbībā neļauj veikt pilnīgu raksturojumu par *CLT* analītiskajiem un skaitliskajiem modeļiem. Tāpēc tālāk eksperimentos tika pētīts uzlabots *CLT* – ar perforētām tērauda plāksnēm, metāla plāksnēm [54], aramīda epoksīda paneļiem, vieglā tērauda plāksnēm, stikla šķiedras loksēm un īpaši augstas molekulmasas polietilēna plāksnēm – kā iespējams risinājums pagaidu militāro struktūru sienām [8] [32], [33], kā arī austi audumi [34], [35]. Liela lodes ātruma pētījumos [44] secina, ka tērauda plātņu papildināti skujkoku paneļi būtu piemērotākais risinājums inženiertehniskajos modeļos. [54] Laikapstākļu mitrums neietekmē *CLT* ballistisko pretestību pagaidu militārajām konstrukcijām. [8] Ir veikti pētījumi par *CLT* ar izolācijas slāni CO₂ emisiju samazināšanai [36] un *CLT* īpašības kopumā [37]. Tomēr *CLT* ballistiskie testi liecina, ka materiāla raksturīgā izturība pret lodes iekļūšanu ir ievērojami labāka nekā zāgmateriāliem un saplāksnim, ko izmanto biežāk pagaidu militārajās konstrukcijās. [9], [38]. Arī *CLT* materiāla slāņveida raksturs ļauj mainīt tā kārtu un virzienu sastāvu atbilstoši konstruktīvajām prasībām, šajā gadījumā – ballistiskajai izturībai. [54] Pašlaik koksne nav novērtēta pietiekami, lai izstrādātu aizsargsistēmu, ko var izmantot kā aizsargdetonācijas ekrānu, jo tās stiprība ir zema salīdzinājumā ar tērauda un betona stiprību. [8] Toties citā avotā saplāksni iesaka lietot pret detonācijas sienās, to minimālais biežums 18 mm. [2] Krustām savietota finiera (saplākšņa) struktūra ļauj izmantot atšķirības pa šķiedru un pret izejmateriāla šķiedru virzienam, kas samazina koksnes mehānisko īpašību anizotropiju. Tādējādi finieris ir viendabīgāks nekā koksnes izejmateriāls. Vienlaikus finiera krustveida struktūra padara materiālu konstruktīvi izturīgāku [49].

Autore ir pārbaudījusi saplākšņa ballistisko izturību zinātniskajā publikācijā “*Projectile penetration depth into wood-based frames of unclassified buildings*”. Gan teorētiskie, gan eksperimentālie rezultāti parādīja, ka 3x28 mm saplāksnis notur lodi līdz 64 mm dziļumam un ir vienīgais ložu necaurīdīgais materiāls salīdzinājumā ar tādiem būvmateriāliem kā 130 mm egles *CLT* vai 190 mm diametra priedes balķi.

Koksnes cietība

Triecienizturības jomā svarīga koksnes materiāla īpašība ir tās cietība. Cietība ir materiāla spēja pretoties kāda cita ķermeņa deformācijai. Cietību uzskata par izturības un struktūras kvalitātes rādītāju, lai prognozētu koka materiālu ballistiku [27], [61]. Cietību definē kā izturību pret iespaidumiem, un tās vērtības koksnei var noteikt, izmantojot testu, ko sauc par modificēto Janka cietību (*Janka hardness*), kā aprakstīts *ASTM D1037* "Koka šķiedru un skaidu plātņu materiālu īpašību novērtēšanas standarta testa metodes" un *ASTM D143* "Mazu skaidru koksnes paraugu standarta testa metodes" [8].

Janka cietības testā mēra, kāds spēks nepieciešams, lai 11,28 mm lodīti ieurbtu kokā līdz lodītes diametra pusei. Vidējā spēka vērtība no četriem iespaidumiem – divi tangenciālajā un divi radiālajā pusē – nosaka rezultējošo koksnes sānisko cietību kilonūtonos. Piemēram, bērza Janka cietība ir 1210 N, bērza saplāksnim tā ir 4610–5410 N [61], ozolam 6280 N un priedei 2940 N [45]. Elementa gala cietība atšķiras no sānu cietības koksnes šķiedru virziena dēļ. Agrāk testēšanai tika izmantots testa stends ar vārpstu un uznavu; tagad precīzākiem mērījumiem izmanto digitālas iekārtas. Pētnieki izmanto arī samazināta mēroga šķēsgriezuma testus, lai pielāgotos plānākiem koksnes paraugiem un izstrādājumiem. [62]

Testēšanas laikā iegūtās cietības spēka vērtības parāda sakarības ar stiprības parametriem, tādiem kā elastības modulis un robežspriegums spiedē paralēli šķiedrām, un tam ir proporcionāla sakarība ar koksnes blīvumu. Cietība un koksnes mehāniskās īpašības mainās atkarībā no mitruma satura koksnē, jo ir palielinājies šķiedru aktīvais šķērsgriezums. Koksnei, kuras mitruma saturs ir no 6 % līdz 20 %, aprēķina formula (1.1.) ir:

$$H = H_{12} \left[\frac{H_{12}}{H_{green}} \right]^{M_p^{-12}}, \quad (1.1.)$$

kur H_{12} – cietība 12% mitrumā;

H_{green} – zāģmateriāla cietība;

M – mitruma daudzums (*moisture*);

M_p – starposma mitruma saturs.

Starposma mitruma saturs tiek definēts kā punkts, kad koksnes mehāniskās īpašības sāk mainīties žāvēšanas dēļ, sākot no zaļkoksnes. [62]

Janka cietības datus parasti izmanto kā rādītājus koksnes cietībai [45], triecienizturībai pret iespaidumiem un materiāla ilgmūžībai. Tabulās norādītās vērtības parasti ir vidējās vērtības, jo koksne ir anizotropa. Cietības vērtību parasti norāda kā vidējo rādītāju no radiālās un tangenciālās iespiešanas [63]. Vēsturiski koksnei ir izmantotas citas testēšanas procedūras, piemēram, Rokvela skala, S skala plāniem, relatīvi mīkstiem materiāliem un Brinela skala [8].

Kokmateriālā lodes berzes izraisītais straujš temperatūras pieaugums starp materiālu un lodi pastāv, bet tā ietekme uz ballistisko pretestību ir sekundāra, jo primāri būtiska ir koksnes šķiedru mehāniskā caursīšana, slāņu atslāņošanās, slāņu saspiešana, lodes deformācija un lodes kinētiskās enerģijas izkliede pa materiāla tilpumu.

Lodei ietriecoties mērķī rodas temperatūras efekti. Šai brīdī lodes dotā kinētiskā enerģija aiziet šķiedru pārraušanai, lignīna un celulozes deformācijā, slāņu atslāņošanās un lodes deformācijā. Berze starp lodi, saspiestu koksni un lodes izrautā tuneļa sienām rada siltumu, kas var īslaicīgi sasniegt 100–300 °C. Process ir lokāls un siltums nepaspēj izplatīties dziļi materiālā. Ap tuneļa malu koksne var lokāli karbonizēties jeb izveidojas cietāka zona. Tā var palielināt berzi, līdz ar to palēnināt lodes ātrumu, kas vairāk novērojams tieši biežākā materiālā. Piemēram, bērza saplāksnī fenola līmes un lignīns dotās procesa rezultātā sasilst, materiāls kļūst viskoelastīgāks. Tad materiāls var absorbēt vairāk enerģijas un plaisu izplešanās samazinās. Tieši bērza saplāksnim parasti ir labāka ballistiskā uzvedība, jo tas ir blīvāks, tam ir vairāk līmes slāņu, šķiedras biežāk maina virzienu, līdz ar to tam ir lielāka berzes virsma. *CLT* ir lielāki masīvkoka slāņi, mazāk līmes robežu, vairāk dominē šķiedru šķelšana. Lokālai berzes izraisītai temperatūrai *CLT* ir mazāka ietekme nekā saplāksnī. Temperatūras pieaugums nav galvenais apturēšanas mehānisms, bet tas palīdz palielināt berzi, destabilizēt lodi, karbonizēt kanālu un absorbēt enerģiju elastīgāk. [50]

Īpaši augsta molekulārā blīvuma polietilēns (*UHMWPE*) kā ballistisks materiāls

Zinātnē ir veikti daudzi pētījumi par *UHMWPE* materiālu un tā reakciju uz ballistisko iedarbību. Tomēr lielākā daļa šo pētījumu ir veikti bruņuvestēm, nevis celtniecības materiāliem. Lielās stingrības un zema blīvuma priekšrocību dēļ kompozītmateriālus, kas pastiprināti ar īpaši augstas molekulmasas polietilēna šķiedrām, aizvien biežāk izmanto valsts aizsardzībā kā vieglo bruņu sistēmu daļas, lai aizsargātu nocietinājumus un konstrukcijas pret ballistiskiem triecieniem. [32], [40], [41]. Vispārējais *UHMWPE* ražošanas process ietver šķiedru ražošanu

lielas temperatūras gēla-griešanas (*gel-spinning*) procesā un pēc tam to pārklāj ar sveķiem, sakrauj krusteniski līdz vēlamajam biežumam un karsti presē. [9], [42] Tā kā komerciāli *UHMWPE* plāksne ir viens no daudzsološajiem materiāliem, pētnieki izstrādā projektēšanas un sintēzes metodes un precizē prasības aizsardzības līmeņiem un zonām. *UHMWPE* ir piemērots vieglajiem bruņu pielietojumiem ar galvenokārt liela ātruma triecieniem. [43], [44], [45]. Pētījumi par *UHMWPE* kompozītmateriālu sastāvā galvenokārt ir koncentrējušies uz aizsardzību pret šķembu iekļūšanu, un ir maz pētījumu par tā pretsprādzienbīstamību. Wu X. et al. veica pētījumus par *UHMWPE* materiālu un konstatēja, ka faktiskajā situācijā starp aizsargplāksni un aizsargājamo sienu jābūt noteiktam attālumam. Turklāt viņi diskutē par šī materiāla ugunsdrošību. [11] *UHMWPE* ir tādas īpašības kā zema ūdens absorbcija [11], [69]. Materiāls ir toksiski neitrāls, bez smaržas, ar labām siltumizolācijas īpašībām, ar vienkāršu ķīmisko sastāvu un struktūru, ķīmiski un radiācijas ziņā neitrāls, ar zemu berzes koeficientu un izturību pret berzi un nodilumu, kā arī ar ievērojamu stiprību. [70]. Tam ir zems blīvums ($930\text{--}950\text{ kg/m}^3$) un tas ir viegls [71], tāpēc tas ir viens no labākajiem materiāliem ar augstu stiprības un svara attiecību [70], [71]. Pateicoties lielai deformācijas spējai, *UHMWPE* materiālam ir augsta enerģijas izkliedēšanas kapacitāte. Augstās triecienizturības un pietiekami zemā blīvuma dēļ, *UHMWPE* šķiedrai ir plašs pielietojuma potenciāls ballistikās aizsardzības un materiālu svara samazināšanas jomā. [64] *UHMWPE* šķiedras nosaukums ir Dyneema SK60/Cuben šķiedra pašlaik ir vispēcīgākā sintētiskā šķiedra pasaulē, kas ir 10 reizes stiprāka par tēraudu un par 50 % stiprāka par aramīda šķiedru (stiepes izturība 2,7 GPa). [72] Vienvirziena slāņus parasti apvieno, veidojot $0^\circ/90^\circ$ šķērsslāņu laminātu, ko tagad plaši izmanto ballistikās aizsardzības lietojumos. [73] Tomēr, ja kompozītmateriālā tiek izmantotas tikai Dyneema šķiedras, spiedes stiprība un bīdes modulis var bieži būt ierobežots [65]. *UHMWPE* uzrāda lielāku enerģijas absorbcijas spēju pie lielākiem lodes ātrumiem, nekā pie mazākiem. [8]

Elastīgiem materiāliem, kāds ir *UHMWPE*, ir būtiski apskatīt tā uzvedību trieciena laikā, jo tie var izturēt lielas plastiskās deformācijas pirms tie sabrūk vai nu zem stiepes vai bīdes spriegumu dēļ, kad noteikta deformācija ir sasniegta. [19] Lai nu kā, *UHMWPE* tiek reti pielietots būvniecības nozarē. Polietilēns nepakļaujas līmēšanas procesiem, tāpēc detaļu savienošana jāizmanto savienojumu detaļas vai daži konkrēti metinājumu veidi. [74] Ir veikti pētījumi par pāļu spilvenu aizvietošanu ar *UHMWPE* [75], par *UHMWPE* siju [73], un maza ātruma testi *UHMWPE* sijām [76]. K. Sanborna ir pārliecināta, ka *UHMWPE* nav pietiekamas vispārējās izturības un stingrības, lai to izmantotu kā konstrukcijas paneli. [8].

UHMWPE-saplākšņa plātnes ir paredzētas izmantošanai atsevišķi vai kombinācijās aizsardzībai pret mazkalibra un standarta kalibra lādiņiem vai sprādziena šķembām, aizsargājot pret tiešiem vai nejaušiem šāvieniem. [64] ir izpētījuši, ka 20 mm *UHMWPE* laminātam iespiešanās dziļums ir aptuveni vairāk nekā puse no lamināta biezuma, un aizmugurējās virsmas deformācija un atslāpošanās ir diezgan ievērojama. [64], [71]. Tomēr *UHMWPE* ir polimērs, līdz ar to tas nav saudzīgs videi, ja vien tas netiek izmantots jau kā otrreiz pārstrādāts materiāls.

Aramīda plāksnes (*Kevlar*) kā ballistisks materiāls

Aramīda plāksnes ir polimēra materiāls. Zemās ķīmiskā reaģētspējas un īpaši smalka izmēra dēļ aramīda šķiedras ir guvušas zinātnisku ievērību. Viens no aramīda tiem ir *Kevlar*, kas sastāv no garām polimēra ķēdēm ar paralēlu novietojumu. *Kevlar* ir augstas stiprības para-aramīda sintētiskās šķiedras. *Kevlar* piemīt unikāla augstas stiprības, izturības, cietības un termiskās stabilitātes kopums. [77] Tas tika izgudrots sarežģītiem rūpnieciskiem un progresīvo

tehnoloģiju lietojumiem. *Kevlar* šķiedru pielieto jomās, kur pazemināts svars, paaugstināta stiprība un korozijas izturība ievērojami uzlabo produkta drošību un efektivitāti. Plāna sedziņa var kalpot kā konstrukcijas pastiprinājums vai ballistiskā aizsardzība, piemēram, seismiskajās šķērssienās. Tas ir viegls un viegli pielāgojams dažādām vajadzībām. [78] *Kevlar* šķiedras tiek pētītas ballistiskos eksperimentos, īpaši testos ar bruņu vestēm [57], [58], [77], [79], [80]. Šajā apskatā (skatīt 2.1. apakšnodaļu) salīdzināts 12 mm biezs ballistiskais panelis uz aramīda bāzes, lai pārbaudītu lodes aizsardzību un materiāla atbilstību [5].

Oglekļa šķiedru plāksne kā ballistisks materiāls

Oglekļa šķiedrai ir augsta stiepes izturība, liels stingums, augsta ķīmiskā izturība, augsta izturības un masas attiecība, augstas temperatūras izturība un zema termiskā izplešanās. Oglekļa šķiedru kompozītmateriāliem ir zemāka triecienizturība, salīdzinot ar speciālo stiklu, *Kevlar* materiāliem vai polimēru kompozītmateriāliem. Oglekļa šķiedra ir dārgs materiāls, jo tā ieguve ir tehniski sarežģīta un enerģētiski prasīga. Ja lodes trieciena ātrums ir zems, tad oglekļa šķiedras kompozītmateriāli var saplīst un atslāņoties. Liela ātruma triecienā – tos var cauršaut. *Kevlar* šķiedras vai *UHMWPE* ballistiskajā triecienā izrāda daudz lielāku pretestību. Oglekļa šķiedras ir relatīvi trauslākas (neelastīgākas) un tāpēc trieciena laikā absorbē stipri mazāk enerģijas nekā oglekļa-polimēra šķiedras [81]. Neatkarīgi no izejvielas veida oglekļa šķiedras ir melnas (diametrs parasti ir $<10\ \mu\text{m}$). Oglekļa konstrukciju mehāniskās īpašības ir ar stiprību 100 MPa un Junga moduli 1060 GPa, teorētiski aprēķināts. Oglekļa šķiedras tipam (ar augstāko stiepes izturību) ir relatīvi liela vērtība 7500 MPa [82]. Oglekļa paneļa biezums ir faktors, kas būtiski ietekmē paneļu ballistisko robežu. Biezajos oglekļa/EP (oglekļa-epoksīda) paneļos lādiņa forma izraisa dažādus bojājuma jeb atteices mehānismus. Savukārt plānē oglekļa/EP ballistisko notikumu laikā viegli izliecas, absorbējot lielāko daļu lādiņa enerģijas neatkarīgi no formas. Rezultātā rodas dažādas ballistiskās robežas. [83]

Stikla šķiedras plātnes kā ballistisks materiāls

Stikla šķiedras plātnes ir izgatavoti no stikla šķiedras auduma slāņiem. Īpaši vērtīgas ir stikla šķiedras unikālās un neatkārtojamās īpašības: augsta izturība pret locīšanu, stiepšanu un saspiešanu, nedegošs, izturība pret augstu temperatūru un mitrumu, izturība pret ķīmisku un bioloģisku iedarbību un salīdzinoši neliels blīvums. Tas ir materiāls, kuru var šķēterēt, šķērēt, aust, tīt, pīt, liekt un apstrādāt kā jebkuru citu šķiedru. [23] Stikla šķiedras plātne ir izdevīga pēc cenas un piemērots risinājums sienu aizsargāšanai pret lodēm; tā sienu neveido rikošetu un netraucē elektronisko sakaru signālu. Tā ir stingra, un tā var aizsargāt pret mazu triecienu uzbrukumu. Īpaši vieglu materiālu var pielāgot uz vietas. Trūkumi: smags (lai gan daudz mazāk smagāks nekā tērauds), tam ir ierobežota elastība, lai to varētu uzklāt uz nelīdzenām virsmām. Parasti sienām neviena no šīm īpašībām nav problēma. [24] Kā alternatīva ballistiskajām sienām izmanto stikla šķiedras konteinerus ar dažādu ģeometriju. Šķiedru materiālu izmantošanas priekšrocība ir tā, ka tie ir lēti, videi draudzīgi un viegli labojami salīdzinājumā ar citiem ballistiskajiem blokiem, kuru pamatā ir keramika un plastmasa un kurus pēc bojājumiem nav iespējams atjaunot. [37]. Kompozīta triecienizturība un pēc tam esošā nestspēja ir atkarīga no faktoriem, piemēram, šķiedru un matricas īpašībām, šķiedru matricas izkārtojuma, slāņu vai slāņu skaita, biezuma un trieciena ātruma. [26]

Ģipškartona plāksnes kā ballistisks materiāls

Ģipsis tiek plaši lietots būvniecības nozarē, un tā patēriņš pasaulē arvien pieaug [85], [86]. Salīdzinoši vienkāršā montāža un apdare ar ģipša plāksnēm ēkas būvdarbu procesu padara ātru un ekonomisku. Ģipsi var pārstrādāt gandrīz bezgalīgi. Tas ir kvalitatīvs, ekoloģisks, energoefektīvs un samērā ilgtspējīgs materiāls [87]. Standarta ģipškartona plāksnes tiek izmantotas starpsienu uzstādīšanai un griestu apdarei. Ģipškartona plātnes bieži vien arī aizsargā ēkas tērauda konstrukcijas, jo slikti vada siltumu [88], [89]. Ģipškartonam piemīt visas ģipša labās īpašības – tas regulē iekštelpu mikroklimatu, ir salīdzinoši viegls, ar lielisku mehānisko izturību. Īpaša ģipškartona plākšņu priekšrocība ir to augstā ugunsizturība, jo ģipsis ir nedegošs materiāls. [90] Ražotājs Knauf ražo pret lodes triecieniem izturīgu plākšni *Knauf Torro* (ar īpašu šķiedru struktūru un ļoti augstu blīvumu: 1500 kg/m³ pie 20°C). *Torro* ģipškartona plātnei šobrīd Latvijā nav analoga. Tā ir vienīgā ģipškartona plāksne ar tik augstu blīvumu, kas ir pārbaudīta atbilstoši attiecīgajiem ballistiskajiem un konstruktīvajiem standartiem. Šīs īpašības padara ģipša plākšni ložu izturīgu. [30] Ložu necaurlaidīgā *Torro* plāksne aiztur (jeb notur) lodi, izmantojot RB4 klases ieročus (t.i., pistoles). Tomēr *Torro* ir dārgs un industriāls materiāls. Ģipša plākšņu nozares pārstāvji aicina izstrādāt jaunu, dizainiski pievilcīgāku analogu. Knauf ballistiskajām sienām ir vairāki plusi: viegli uzstādīt, var montēt uz vietas. Parasti lieto klientu uzņemšanas zālēs bankās, policijas iecirkņos, drošības istabās. Tām ir laba ugunsizturība, tās var montēt kopā ar logiem, durvīm; viegluma dēļ tās var uzstādīt ar rokām. Pētījumi parāda, ka Knauf *Torro* veido ložu necaurlaidīgu risinājumu kombinācijā ar *Knauf Vidiwall* un *Blue* ģipškartona plāksnēm [30][31]. Dānijas uzņēmums [91] piedāvā divas sienu konstrukcijas, kas sastāv no kombinēta standard-*Vidiwall*-*Torro*-standard-*Blue*-*Torro* ģipškartona plāksnēm ar kopējo biezumu 106 mm un 109 mm. Saskaņā ar *DIN EN 1522* [92] standartu šādas sienas spēj aizturēt FB4 tipa ieroča (pistoles) lodi.

Ballistisko materiālu īpašību apkopojums

To galvenās ballistiskās darbības pozitīvās un negatīvās īpašības un blīvumi apkopoti 1.2. attēlā.

Blīvums: 2000 kg/m ³ + lētas + barikāžu materiāls + videi draudzīgs + viegli pieejams + piemērots sprādzienu aizsardzībai - mitras smiltis sliktāk aptur lodi nekā sausas	Blīvums: 2500 kg/m ³ + augsta stiprība + augsta pret-triecienu stiprība, + piemērots barikādēm + sprādzienu aizsardzībai - iespējamās šķembas - nav ātri atjaunojami defekti	Blīvums: 2000 kg/m ³ + liela cietība + videi draudzīgs materiāls - trausli - veido šķembas - smags - nav ātri atjaunojami defekti	Blīvums: 7800 kg/m ³ + īpaši efektīvs + visplānākais ballistiskais materiāls - nevar montēt/pielāgot uz vietas - iespējams rikošets šķembas	Blīvums: 400-800 kg/m ³ + viegli remontējams + videi draudzīgs + plaši pieejams konkrētos apgabalos ± nehomogēns - zema stiprība - zema cietība
Smilšu sienas	Stiegrbetons	Māla ķieģeļi	Tērauda plāksne	Koks (CLT, saplāksnis)

UHMWPE	Aramid (Kevlar)	Oglekļa šķiedra	Stikla šķiedra	Ģipškartona plāksne
Blīvums: 930-950 kg/m ³ + liela cietība + labākais materiāls attiecībā augsta stiprība pret svaru - dārgs - nav videi draudzīgs, bet to var lietot atkārtoti	Blīvums: 1400 kg/m ³ + audums (padodas) + augsta stiprība + liela stingrība + termiski stabils + pielieto bruņās, arī pret šķembām - dārgs	Blīvums: 1500-1800 kg/m ³ + zema termiskā izplešanās + liels stingums - dārgs - atslāņojas un bojājas zemas trieciena slodzes ietekmē	Blīvums: 2430 kg/m ³ + īpaši viegls + pielāgojams būvlaukumā + nedegošs + neveido rikošetu - relatīvi smags	Blīvums: 1500 kg/m ³ + viegli montējama un formējama + liela ugunsizturība + videi draudzīga, reciklējama - dārga - salīdzinoši smaga

1.2. att. Ballistisko materiālu blīvums, pozitīvie (+) un negatīvie (-) ballistiskie aspekti.

1.2. Ieroču iedalījums

Ieroču iedalījums ir atšķirīgs dažādās zemēs un pielietojuma jomās. Viena no versijām – iedala 4 veidus – vieglās rokas pistoles, lieljaudas pistoles, uzbrukuma un medību šautenes.

Vieglās rokas pistoles – šajā kategorijā ietilpst ieroču klāsts ar mazākā izmēra munīciju, tai skaitā, 9 mm patronas. Tās ir vispazīstamākās markas un modeļi, arī *Glock* un *CZ 75*. Tos var ērti nēsāt līdz un pēc nepieciešamības noslēpt, tāpēc uzbrukumos tieši vieglās rokas pistoles izmanto visbiežāk. Tos var izšaut, izmantojot tikai vienu roku, lai gan ieroča atsitieni var būt pietiekami spēcīgs Ņūtona likuma dēļ. [84] Vieglās rokas pistoles iedala vēl detalizētāk:

- Sākuma ātrums (*muzzle velocity*) līdz 150 m/s, kas ir zema ātruma/ pneimatiskās pistoles, ko lieto šaušanas treniņos vai izklaides nolūkā.
- Vidējas jaudas paš aizsardzības patronas no 150–300 m/s, ko lieto sportā un paš aizsardzības nolūkos tuvos attālumos.
- Augstas jaudas policijas un militārā munīcija ar sākuma ātrumu no 300–440 m/s.

Lieljaudas rokas ieroču piemēri ir .357 un .44 *Magnum*. To šaušanai ir nepieciešamas abas rokas. Tie rada ļoti spēcīgu akustiku, tāpēc izvēle ir ierobežota un tās atbilst UL3 klasei. [84]

Uzbrukuma šautenes – tās ietver ieročus, kas šauj 5.56 kārtas, piemēram, *AR-15* un *M-16*. To šaušanas diapazons ievērojami pārsniedz rokas pistoles diapazonu un tas rada ievērojamas sekas uz mērķi, tie ir viegli pamanāmi, tāpēc bieži tie ir nepraktiski ikdienas un komerciālos iebrukumos. 30–40 % cilvēku izvēlas šī vai augstāka ballistikā līmeņa aizsardzību. Pateicoties šī ieroča lielajai ietilpībai un pusautomātiskajām šaušanas funkcijām, izmantotajam ballistikajam materiālam un ložu necaurlaidīgajām sienām jāspēj izturēt vairākas ložu kārtas. [84]

Medību šautenes – lai pasargātu mērķi no medību šautenes uzbrukuma, nepieciešama bieža ložu necaurlaidīga siena, jo, piemēram, *M-14* aptur vairākas 7,62 mm munīcijas kārtas, kas atbilst UL752 8. ballistikajam līmenim. Vairāki mūsdienu šaujamieroči šajā kategorijā var būt pusautomātiski un izmantot liela izmēra patronas, atkarībā vai nepieciešama šaušanas precizitāte vai jauda. [84]

Kalibri

Mazjaudas ieroči (lodes sākuma ātrumam līdz 440 m/s) tiek iedalīti pēc čaulas garuma, pēc lodes sastāva, funkcijas un pielietojuma.

Eksperimentālie pētījumi šajā promocijas darbā tiek limitēti, izmantojot 9 mm × 19 mm *Parabellum* lodes ar slīpgala formu *ogive*, ko no franču vārda var tulkot kā “lodes gala forma”. 9 mm izmērs attiecas uz lodes formas diametru. Tālāk parādīts 9 mm kalibra patronas klasifikācija pēc izmēra (garumi var būt atšķirīgi), sastāva un pielietojuma.

Pēc pielietojuma lodes iedala:

- militārajā un policijas lietoto ieroču lodes – lieto 9 mm × 19 mm NATO, 9 mm × 18 mm bijušās PSRS valstis,
- civilo/ sporta ieroči – lieto 9 mm × 17 mm kalibru
- sporta – lieto 9 x 21 mm un 9 mm × 23 mm kalibrus,
- speciālo vienību un klusinātajās operācijās – lieto 9 mm × 39 mm *SP5* un *SP6* zemskaņas, lielas masas lodes, kas piemērotas slepenām operācijām. [93]

Pēc lodes struktūras un funkcijas tiek izdalīts:

- FMJ (*Full Metal Jacket*) – visbiežāk militārām vajadzībām izmantota lode, ar augstu caursišanas spēju un to parasti izmanto standarta eksperimentiem un situācijām.
- JHP (*Jacketed Hollow Point*) – civilā/policijas munīcija ar kontrolētu deformāciju; tai ir spēcīgāks mērķa apturēšanas efekts.
- Subsonic/smagās lodes – smagākas lodes (147 g) zemāka ātruma klusināšanai; bieži izmanto 9 mm × 39 tipa variantos speciālajās sistēmās.
- AP (*Armor Piercing*) – SP-6 tipa bruņaucaurlaidīgie kalibri, parasti 9 mm × 39 mm.

Šajā pētījumā izmantotas FMJ (*Full Metal Jacket*) jeb pilnība apvalkota lode tirgus pieejamības un biežās izmantošanas praksē dēļ.

Iedalījums pēc čaulas garuma parādīts 1.2. tabulā.

1.2. tabula

9 mm kalibra patronu iedalījums pēc čaulas garuma [93], [94]

Kalibra apzīmējums	Nosaukums	Čaulas garums (mm)	Raksturojums / tipiska lietošana
9 mm × 17 mm	.380 ACP / 9 mm Kurz	17	Vieglas paš aizsardzības pistoles, zema spiediena
9 mm × 18 mm	9 mm Makarov	18.1	Raksturīgs Padomju savienībā un Austrumeiropas bloka valstīs; analogs 9 x 19 mm Parabellum.
9 mm × 19 mm	9 mm Parabellum / 9 mm Luger / 9 mm NATO	19.15	Visizplatītākā policijas un militārā munīcija; NATO/komerčiālie standarti.
9 mm × 21 mm	9 mm IMI / 9x21 Italian	21	Bieži sportam vai reģionāliem regulējumiem reģionos, kur 9 x 19 mm ir aizliegts
9 mm × 23 / 9 mm × 25 mm	9 mm Largo, 9x23 Winchester, 9x25 Dillon	23 / 25	Lieto sportā; lielāka jauda.
9 mm × 39 mm	SP-5 / SP-6 (subsonic)	39	Specializētas zemskāņas klusinātas patronas, spēcīga lode, SP-6 var caursāut bruņas.

1.3. Standarti un ieroču klases

Eksperimentālā darba robežas, sākotnējie pieņēmumi un nosacījumi tiek balstīti uz neatkarīgiem spēkā esošiem (līdz ar to – aktuāliem) standartiem konkrētajā jomā. Ballistisko standartu skaits ir ierobežots. Zināmie un tīmeklī pieejamie standarti saistībā ar ballistiku ir

- **EN 1063** “Ballistiski izturīgu aizsargmateriālu standarti” (*Standards for ballistic resistant protective materials*)

Eiropas Standartizācijas komitejas izveidots drošības stiklojuma standarts, lai mērītu ložu necaurlaidīga stikla pretestību. To parasti lieto kopā ar EN 1522. Standarti iedala materiāla pretestību konkrētajiem ieroču veidiem un atbilstošajām lodēm klasēs, kā arī nosaka testēšanas apstākļus. Standarts ir domāts ložu necaurlaidīgajam stiklam, kas nav tuvs koksnei vai pētījumā izmantotajiem citiem materiāliem, tomēr šis ir viens no retajiem pieejamajiem dokumentiem, kas strādā Eiropas zonas ietvaros, un tā pamatā varētu veidot citu būvmateriālu ballistiskās pretestības noteikumu kopu. [95]

- **EN 1522/ DIN EN 1522** “Eironormu standarts logu, durvju, slēgu un žalūziju izturībai pret lodēm” (*Euronorm standard for Bullet Resistance in Windows, Doors, Shutters and Blinds*) Standarts attiecas uz ēkas elementiem, kas potenciāli visvairāk apdraud ēkas lietotājus. [92]
- **EN 1523/ DIN EN 1523** “Logi, durvis, slēgi un žalūzijas – ložu izturība – testēšanas metodes” (*Windows, Doors, Shutters and Blinds - Bullet Resistance – Test Methods*) ir

Eiropas Standartizācijas komitejas izveidots standarts, kas papildina iepriekšējo (*EN 1522*) standartu, lai paskaidrotu, kādi testa parametri ir piemēroti katrai BR klasei. [96]

- **BS 5051** “Ložu necaurlaidīgs stiklojums” (*Bullet-resistant glazing*) [97]

Britu standarts ballistikajai aizsardzībai ēkas stiklotajiem elementiem iekšējās (1. daļa) un ārējās (2. daļa).

- **UL 752** “Ložu necaurlaidīgā aprīkojuma standarts” (*Standard for Bullet-Resisting Equipment*)

ASV Nacionālais pamatstandarts terminālās ballistikas jomā ēkas elementiem (stiklšķiedras paneļiem, laminētām stikla paketēm, durvīm, logiem), kas nosaka ballistikas līmeni, testēšanas apstākļus un nosacījumus. To testēšanas līmeņi nav pakāpeniski stiprāki, tas ir, nav noteikts, ka augstāka līmeņa ballistikais materiāls spēj noturēties pret zemākā līmeņa norādīto ieroci. [98]

- **ASTM F1233-08** “Droša stiklojuma materiālu un sistēmu standarta testēšanas metodes” (*Standard Test Method for Security Glazing Materials And Systems*)

Standartā tiek salīdzināti ballistisko šķēršļu materiāli noteiktos lauka (nevis laboratorijas) apstākļos. Šajā standartā ir 12 aizsardzības klases, kuras var pielīdzināt UL 752, bet ar pazeminātu drošības pakāpi, jo, lai izpildītu klasi, prasa apstādināt tikai vienu no 3 eksperimenta faktoriem, kas nosaka sekmīgu vai neveiksmīgu šaušanas mēģinājumu – izmantotie rīki, paņēmieni un metodes (tai skaitā ķīmiskie ieroci un neasa instrumenta trīecieni) un laiks, lai veiktu uzbrukumu, kuru pēdējo izpildīt nav obligāti. [99]

- **NIJ Standard-0108.01** “Ložu droši aizsargmateriāli” (*Ballistic Resistant Protective Materials*)

ASV Nacionālā tieslietu institūta standarts ballistiski izturīgiem aizsargmateriāliem, tai skaitā kopā vai atsevišķi metāla, keramikas, caurspīdīgā stikla, auduma un ar audumu pastiprināti plastmasa. Koksnes izstrādājumi nav pieminēti. Tajā ir iedalītas 4 ieroču pretestības klases, ar papildinājumiem. [100]

- **UFC 4-023-07** “Šaujamieroču tiešas iedarbības novēršanas izstrāde” (*Design to resist direct fire weapons effects*)

ASV dokuments (nav definēts kā standarts), kurā uzrāda arī koku kā iespējamu ballistisko aizsargmateriālu predetonācijas ekrāniem. Tajā iesaka kokmateriāla vairogu veidot daļām, lai slāņa bojājuma gadījumā to viegli varētu nomainīt. Dokuments nosaka ciedra koka biezumu 9 mm, Duglasa egli vai priedi 25 mm, saplāksni, tai skaitā OSB plāksni, 18 mm biezumā. Salīdzinājumam – betona vai mūra slānim jābūt vismaz 25 mm biezumā un papildus tos ietekmē sprādziena enerģijas spiediena vilnis, kas var atsisties objekta virzienā. Kokmateriāls rada mazāk bīstamas sprādziena seku radītas lidojošas šķembas. Šajā dokumentā atrodami ieteikumi ēkas projektēšanai jau arhitektūras līmenī dažādām aizsardzības bīstamībām, tai skaitā tanku uzbrukumiem. Piedāvātas formulas kokmateriāla, betona, tērauda un mūra minimālā ložu drošā biezuma noteikšanai un lodes ātruma pēc iziešanas no mērķa aprēķināšanai. [101]

- **NATO AEP-55 STANAG 4569** ir NATO standartizācijas līgums, kas attiecas uz aizsardzības līmeņiem vieglo bruņoto transportlīdzekļu pasažieriem. Standarts ietver sprādzienu un artilērijas kinētisko enerģiju, ietverot ieroču darbību ar lodes sākuma ātrumu sākot no 833 m/s. [102]

Lai ieročus sagrupētu pēc iedarbības lieluma, tos grupē pēc vairākām klasēm. Standartā *EN 1063* “Ballistiski izturīgu aizsargmateriālu standarti” (*Standards for ballistic resistant protective materials*), arī *DIN EN 1522/23* izšķir klases no BR1 līdz BR7. (1.3. tabula)

1.3. tabula

Ieroču ballistiskās pretestības klašu iedalījums pēc standarta *EN 1063* 1. tabulas [23]

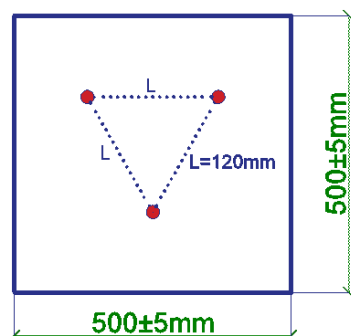
Klase <i>EN 1063</i>	Ieroča veids	Kalibrs	Patronas veids	Masa (g)	Testa apstākļi	
					Attālums (m)	Lodes ātrums (m/s)
BR1	pistole	22 LR	L/RN	2,6 ± 0,1	10 ± 0,5	360 ± 10
BR2	rokas pistole	9 mm Luger	(1) FJ/RN/SC	8,0 ± 0,1	5 ± 0,5	400 ± 10
BR3	rokas pistole	357 <i>Magnum</i>	(1) FJ/CB/SC	10,2 ± 0,1	5 ± 0,5	430 ± 10
BR4	rokas pistole	357 <i>Magnum</i>	(1) FJ/CB/SC	10,2 ± 0,1	5 ± 0,5	430 ± 10
	rokas pistole	.44 <i>Rem. Mag.</i>	(2) FJ/FN/SC	15,6 ± 0,1	5 ± 0,5	440 ± 10
BR5	šautene	5.56 × 45	(2) FJ PB/SCP1	4,0 ± 0,1	10 ± 0,5	950 ± 10
BR6	šautene	5.56 × 45	(2) FJ PB/SCP1	4,0 ± 0,1	10 ± 0,5	950 ± 10
	šautene	7.62 × 51	(1) FJ/PB/SC	9,5 ± 0,1	10 ± 0,5	830 ± 10
BR7	šautene	7.62 × 51	(2) FJ/PB/HC1	9,8 ± 0,1	10 ± 0,5	820 ± 10

Augstāka klase pieprasa augstākas pretestības prasības mērķa materiālam, tas ir, to aizsardzības klašu numerācija ir pieauguša pretestībai. Ja paraugs atbilst konkrētas klases prasībām, tad tas atbilst arī iepriekšējai zemākai klasei. Pirmās četras klases BR1–BR4 ir rokas pistoles, sporta šautenes un revolveri, kas spēj dot lodei sākuma ātrumu no 360 līdz 440 m/s, kas ir vairāk nekā 1500 km/h. Tās atšķiras savā starpā ar kalibra tipu, kādu sienu/mērķis spēj izturēt. BR5–BR7 ir šautenes, kas ir lieljaudas ieroči, piemēram amerikāņu M16 vai NATO G36 un G3, un piešķir lādiņam ātrumu no 820 m/s līdz 950 m/s, kas ir vairāk nekā 3000 km/h. Šie ieroči ir efektīvi un precīzi lielā attālumā. Piemēram, klases BR7 materiāls ir testēts ar šauteni, kalibrs 7.61x51 un klase piešķirta ar noteikumu, ka tā aiztur lodi. Tomēr NIJ Standart-0108.01 precizē, ka – tā kā konkrētā kalibra patronu klāsts ir ļoti plašs un ir pieejami arī paštaisīti lādiņi, aizsargslānis, kas iztur standarta testa patronu, var neizturēt citus tā paša kalibra lādiņus. Pie vienāda trieciena ātruma nedeformējošās vai ložu necauršaujošās patronas rada ievērojami lielāku iespiešanās draudus nekā tāda paša kalibra patronas ar svina serdi. [100]

Standarts *EN 1063* nosaka testēšanas kārtību. Paraugi pirms testēšanas jātur 12 stundas konstantos apstākļos ar gaisa temperatūru $+18 \pm 5$ °C. Testēšanas temperatūra sakrīt ar glabāšanas temperatūras diapazonu. Mērķa materiāls ir (500 ± 5) mm × (500 ± 5) mm izmēros un paredzēts, ka lodes tiek mērķētas vienādmalu trīsstūra stūros ar attālumu $L=120 \pm 1$ mm viena no otras (1.3. att.), lai tās neietekmētu viena otras performanci. Tests tiek izpildīts ar automātisko šauteni. Nenoliedzami stikla plātnē citādāk uztver lodes nekā jebkurš cits nekristālisks materiāls, tomēr vienāda ar kokmateriālu ir tas, ko standarts nosaka, ka, lai izturētu noteikto klasi, stikla materiāls lauskas neveido.

Standarti *EN 1063* un *UL 752* ir līdzīgi, bet tie atšķiras ar detaļām. Piemēram, *UL 752* pieprasa veikt vairāku paraugu testēšanu dažādās temperatūrās, savukārt pēc *EN 1063* paraugus testē apkārtējās vides temperatūrā.

Apskatot standartus, nākas secināt, ka Eiropā nav precīzu standartu par ložu drošām sienām. Ir iespēja aizgūt izturības klases no stikloto elementu standartiem, kas arī tiek darīts.



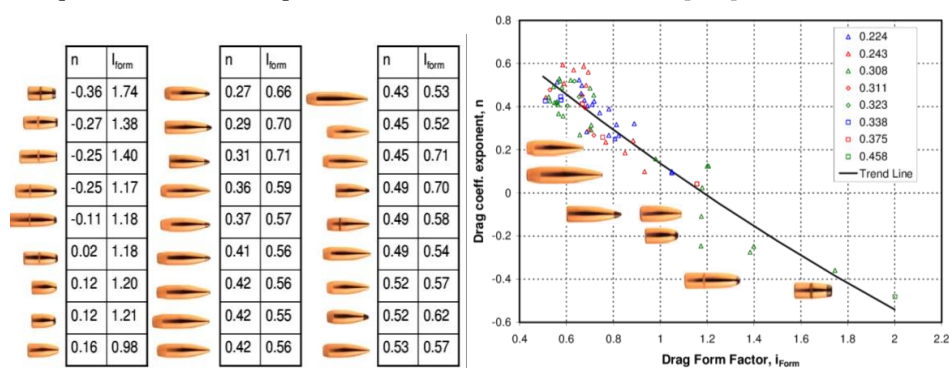
1.3. att. Parauga izmēri un ložu mērķējuma vietas.

Aizsardzību klases noteiktie ložu sākuma ātrumi atšķiras atkarībā no izmantotā standarta. Šajā pētījumā *CLT* testi atbilst BR2 klasei pēc *EN 1063* vai 1. klasei pēc *UL752*, ko nosaka izmantotās *Parabellum* patronas un mērķu pretestība. Interesanti, ka eksperimentos izmērītais reālais lodes sākuma maksimālais ātrums bija 345,8 m/s, kas atšķiras no BR2 klases testa apstākļu ātruma 400 m/s. Toties standartā *NIJ Standard-0108.01* 9 mm lodei ātrums ir robežās no 332 ± 12 m/s (II klase), kas iekļaujas kļūdas apgabalā, līdz 426 ± 15 m/s (III-A klase).

1.4. Lodes gala formas ietekme uz mērķi

Lodes gala forma ietekmē tās spēju iedarboties uz mērķa materiālu, tai skaitā, caursišanas dziļumu. [44] Lodes gala formas jeb gaisa pretestības koeficients (*drag coefficient*), ko parasti apzīmē ar n , C_d , c_x , c_w , ir hidrodinamikas bezdimensiju lielums, kas apzīmē objekta pretestību šķidrā vidē, kā gaisā vai ūdenī. Jo mazāks koeficients, jo mazāka vides dinamiskā pretestība. Pretestības koeficients ir cieši saistīts ar objekta (lodes) virsmas laukumu. (1.4. attēls)

Šāviņa konstruktīvie lielumi, tādi kā trieciena ātrums un enerģija, lodes gravitācijas novirze un sānvēja nobīde ir atkarīgi no veiktspējas parametriem: šāviņa ātruma, šāviņa aizkavēšanās un eksponentes, kas nosaka pretestības koeficienta likumsakarību. [103]



1.4. att. [103] Grafiks uzrāda pretestības koeficienta atkarību no gala formas un to, ka mazāks koeficients (n) nosaka mazāku lodes pretestību. Koeficients n ir negatīvs plakanām lodēm.

Pretestības koeficients ietilpst pretestības vienādojumā, kas paskaidro, ka pretestības spēks uz jebkuru objektu plūsmas virzienā ir proporcionāls gaisa vides blīvumam un plūsmas ātruma

kvadrātam starp objektu un šķidrumu (gaiss). Formula (1.3.) arī paskaidro lodes gala formas un laukuma ietekmi uz pretestības spēku. [104]

$$F_d = \frac{\rho u^2}{2} \cdot C \cdot A, \quad (1.3.)$$

kur F_d – pretestības spēks, kas perpendikulārs lodes gala laukumam, N;

ρ – gaisa blīvums, kg/m^3 ;

u – lodes ātrums, m/s ;

C – pretestības koeficients, kas atkarīgs no lodes gala formas;

A – lodes gala laukums, m^2 .

Pretestības koeficients tiek izteikts no šīs formulas, līdz ar to tas ir tieši proporcionāls pretestības spēkam un apgriezti proporcionāls gaisa blīvumam, lodes ātrumam un gala formas laukumam.

$$C = \frac{2F_d}{\rho u^2 A}. \quad (1.4.)$$

Jo lielāks lodes gala laukums, jo mazāks koeficients. Zināms, ka bīdes spriegums ir proporcionāls spēka un laukuma attiecībai

$$\tau = \frac{F_d}{A}, \quad (1.5.)$$

tāpēc formulu (1.5.) var pārrakstīt kā

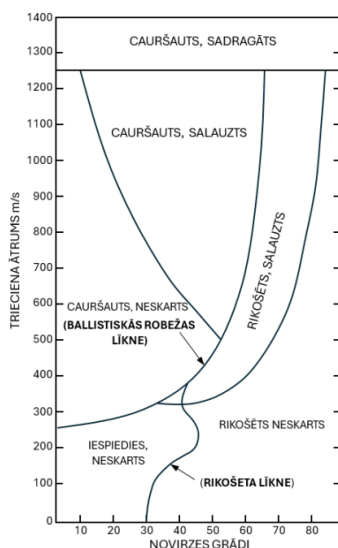
$$C = \frac{2\tau}{\rho u^2}. \quad (1.6.)$$

Kad mērķis ir cauršauts, vismazākais palēninājums ir šāviņiem, kuriem ir slīps gals (*ogive*), tāpēc tie ir efektīvi iekļūšanai mērķī, bet vislielākais palēninājums ir šāviņiem ar plakanu galu, piemēram, fragmentus imitējoši šāviņi. [8]

1.5. Rikošets

Lodes lidojuma ātrums ar katru nolidoto attāluma metru jūtami samazinās, kas ietekmē lodes stabilitāti lidojuma trajektorijā. [21] Arī šķēršļi lodes ceļā var ne tikai palēnināt šāviņa enerģiju, bet arī mainīt tā virzienu. Tas ir atkarīgs no leņķa starp šķēršļoto barjeru un lidojuma līniju, ko sauc par slīpuma leņķi. Vislielākā novirze ir pie ballistikās robežas ātrumiem. Pie pavisam lieliem slīpumiem lādiņš atlec no barjeras bez apstāšanās vai mērķa cauršaušanas un to sauc par rikošetu. [19] Rikošets ir lodes virziena maiņa attiecībā pret šāviņa sākotnējo asi, tā apzīmējums ir leņķis, kādā lode tiek izšauta attiecībā pret mērķi.

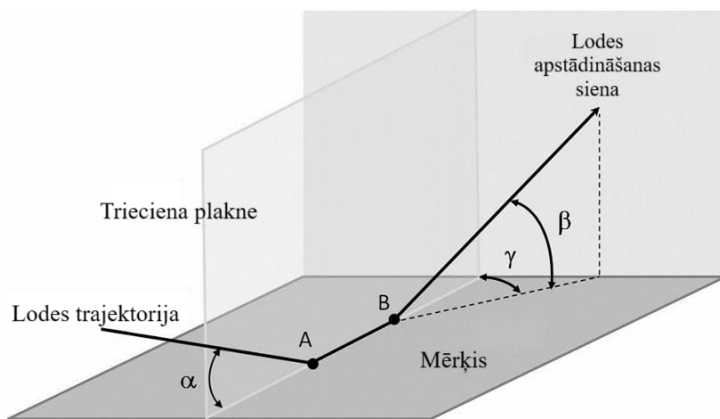
Kad šāviņa laikā notiek sūniskas novirzes un kontaktā esošie spēki nav simetriski attiecībā pret šāviņa darbības asi, ir grūtāk formulēt problēmu un atrast risinājumu. [19]



1.5. att. Fāžu stāvokļa diagramma starp 6,35 mm diametra Ogive formas lodi un 6,35 mm alumīnija sakausējuma mērķa elementu. [19], [23]

Terminālās ballistikas pamatlicējs M. E. Bekmens (*Backman*) [19] 20.gs. 70. gados izveidoja shēmu, kurā apraksta *ogive* formas lodes kopdarbības shēma ar alumīnija sakausējuma mērķa elementu. (1.5. attēls) Tajā parādīts novirzes grādu atkarība no trieciena ātrumu no 0–1400 m/s. Rikošets parādās 30+ grādos pie zemiem (relatīvi) ātrumiem, toties pie ātruma 500–1250 m/s, rikošets rodas no vairāk par 50 novirzes grādiem.

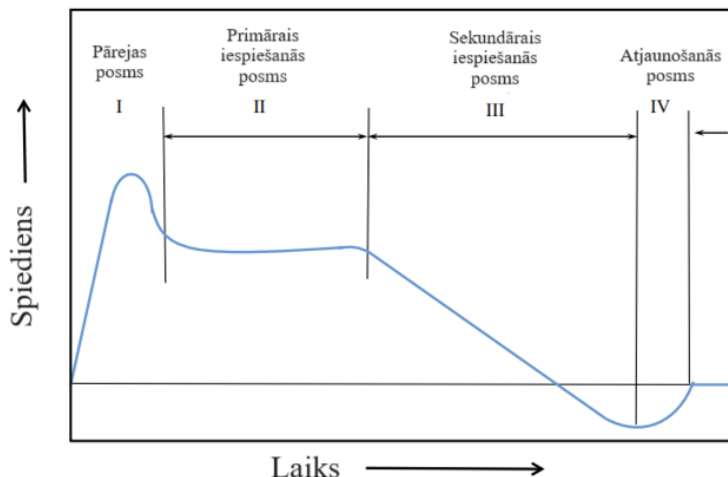
Rikošets koka paraugos ir atkarīgs no izšaušanas leņķa α . (Rikošeta lodes trajektorija, kurā redzams trieciena leņķis α , rikošeta leņķis β un atlekšanas leņķis γ parādīts 1.6. attēlā.) Rezultāti [47] rāda, ka šāviņa enerģijas zudums rikošeta laikā ir vismaz 70%. Šis ievērojamais enerģijas apjoms tiek zaudēts lodes deformācijas un krātera veidošanās procesā mērķa materiālā atsitiena laikā. [47]



1.6. att. Rikošeta lodes trajektorija, kurā redzams trieciena leņķis α , rikošeta leņķis β un atlekšanas leņķis γ . Šāviņa trāpa mērķī punktā A un atstāj mērķī punktā B. [47]

1.6. Lādiņa darbības posmi mērķī

Christman and Gehring [105] grafikā ir attēloti stieņu (*jet*) šāviņa un daļēji bezgalīga mērķa dinamiskā trieciena rezultātā radušā enerģijas spiediena posmi laikā. Ārkārtīgi lokalizētā kinētiskā enerģija mazā laukumā ir bruņojuma (arī sienas) lielākais izaicinājums. [44]



1.7.. att. Lādiņa 4 enerģijas spiediena posmi, atkarībā no tā atrašanās vietas mērķī. [105]

Izdalīti 4 lodes pārnests enerģijas posmi (skatīt kopā ar 1.7. attēlu):

I Pārejas (*transient*) posms. Tas ir ļoti īss, tikai dažās mikrosekundes, kad lādiņš pirmo reizi nonāk saskarē ar mērķa virsmu. Grafikā ir augstākā spiediena virsotne, jo trieciena vilnis pārvietojas no šāviņa uz mērķi.

II Primārā iespiešanās (*primary*) fāze. Šī posma laikā šāviņa kinētiskā enerģija tiek pārnesta uz mērķa materiālu hidrodinamiskā procesā. Spiediena lauks šajā posmā ir gan mērķa, gan lodes materiālu blīvuma, saspiežamības, ātruma un izmēru rezultāts. Spiediens šajā posmā ir konstants, jo tas tiek modelēts kā stacionārs stāvoklis. Šīs fāzes ilgumu ietekmē lodes izmēri, kas nosaka lodes iespiešanās ejas garumu.

III Sekundārā iespiešanās (*secondary*) fāzē notiek lādiņa deformēšanās, kad strauji samazinās enerģija. Samazinoties spiediena laukumam, nozīme ir materiāla stiprībai un deformācijas ātruma reakcijai.

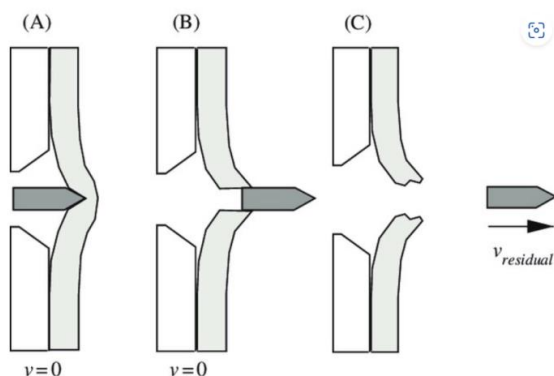
Primārā un sekundārā iespiešanās var notikt arī vienlaicīgi, ja bīdes deformācija notiek paralēli lodes krātera veidošanās procesam. Šī fāze beidzas, kad enerģijas blīvums aiz triecienviļņa vairs nevar pārsniegt materiālu pretestību deformācijai.

IV Atjaunošanās (*recovery*) posms paredz lodes izrautā krātera saraušanos. Atkarībā no mērķa materiāla trausluma, bojātais materiāls var noslogot lodes krāteri tā, ka tas paliek izmēros mazāks nekā citās fāzēs. Arī var notikt zināma mērķa materiāla atjaunošanās, pēc tam, kad materiāls atgriežas no radītā spiedes spiediena trieciena rezultātā.

Pētījumā [8] šo fāžu modeli pielīdzina sprādziena izraisīta trieciena fāzēm. Tas sākas ar īsu augsta spiediena fronti, kam seko triecienviļņu izplatīšanās pie pastāvīga spiediena, kas beidzas ar atjaunošanās posmu negatīvā spiedienā. Atšķirība ir ballistiskā šāviņa skartais laukums (maksimāli 2–3 diametri) vai sprādziena iedarbība [8], [105].

1.7. Lodes caursišanas spēja

Viens no lodes rādītājiem ir tā ieiešanas dziļums materiālā jeb materiāla caursišanas spēja. Kad noskan šāviens, tad lode atdalās no patronas čaulas un pulvera sadegšanas enerģijas rezultātā ierosina lādiņa ballistisko kustību tēmētajā virzienā. Lodes ieiešana sienas materiālā un tās absorbēšana vai iziešana ārā no šīs sienas jeb vairogmateriāla ir vitāli svarīga dzīvīiem un nedzīvīiem objektiem, kas atrodas aiz konkrētās sienas. Ja lodes caursites dziļums pārsniedz sienas biezumu, tad siena nav ballistiski izturīga. Ja lode neiziet no sienas, tad to sauc par ballistiski drošu. 1.8. attēlā parādīta ātruma un līdz ar to arī kinētiskās enerģijas samazināšanās līdz nullei, ja lode tiek absorbēta (A,B). Ja lode turpina savu gaitu, tad lodei ir paliekošais (*residual*) ātrums, tomēr tas strauji ir samazinās, un te parādās arī apkartējās vides ietekme. (C) [21], [106]



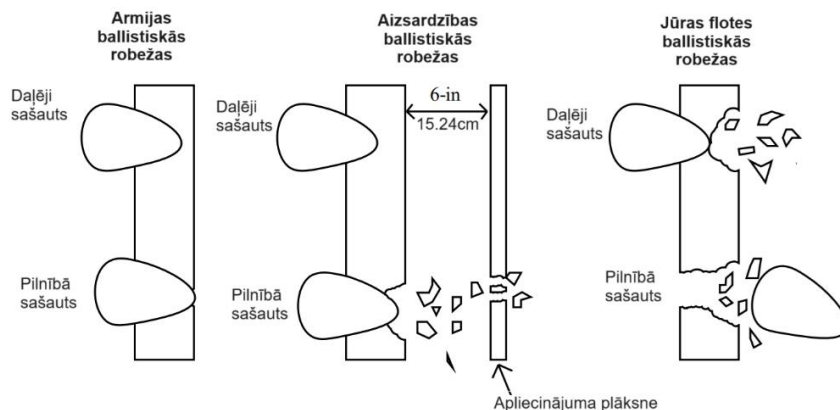
1.8. att. Dažādas situācijas pēc trieciena: A: lode tiek ieslēgta materiālā, B: lode tiek apstādināta, bet tā var ietekmēt objektu uzreiz aiz mērķa, C: pilnīga caursaušana. [106]

Lode materiālā izveido seismisku vilni, kas cirkulāri izplatās no trieciena punkta [21] uz malām. Šajā pētījumā par pieļaujamu tiek uzskatīts tikai A gadījums, kad lode materiālā tiek apstādināta pilnībā un tā nav izgājusi ārpus materiāla pat ne milimetru.

EN 1523 standarts testu uzskata par sekmīgu arī tad, ja pēc testa lodes mehānisms vairs nav darbaspējīgs, un arī tad, ja nav iespējams saglabāt noteiktas kvalitātes līmeņus attiecībā uz citiem aspektiem, kas nav saistīti ar drošību, piemēram, gaisa caurlaidību, ūdensnecaurclaidību vai vēja pretestību. Materiāls ir ložu drošs, ja visi atvērtie elementi paliek aizvērtā stāvoklī (skatoties no lodes iziešanas puses). [96]

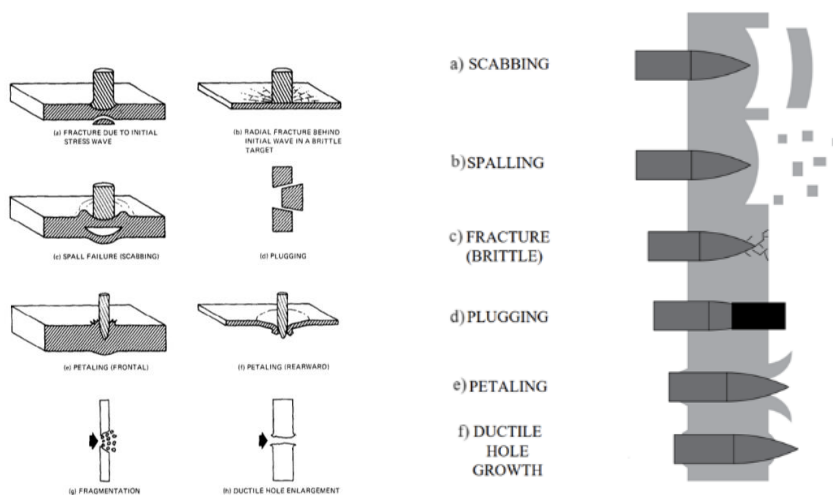
Viena no būtiskākajām konkrētā šāviņa un mērķa mijiedarbības īpašībām ir ballistiskais robežātrums (v_{bl} , kur bl – *ballistic limit*). v_{bl} vērtību konkrētai šāviņa/mērķa formai var noteikt, veicot divus eksperimentus ar pietiekami tuvu trieciena ātrumu. Liela ātruma trieciena rezultātā lodei ir pilnībā jāiziet cauri mērķim, savukārt maza ātruma trieciena gadījumā šāviņam ir jāapstājas mērķī. Ņemot vērā eksperimentālās kļūdas ātruma mērījumos un materiālu īpašību variācijas, praktiski nav iespējams noteikt v_{bl} ar pāris eksperimentiem. Tā vietā tiek izmantota varbūtības pieeja, saskaņā ar kuru tiek veikti vismaz seši eksperimenti ar prognozēto robežātrumu. Pusei no šiem eksperimentiem mērķim ir jābūt caursautam, bet otrai pusei – mērķim ir jāaptur šāviņš. Izmantojot šīs metodes statistiku, par robežātrumu v_{50} uzskata vidējo lielāko ātrumu bez caursaušanas un vidējo mazāko ātrumu ar mērķa caursaušanu. [107]

Caursišanas dziļums ir garums, cik dziļi lode var ieiet materiālā. Ballistikas joma to pieņem kā atskaites punktu, vai materiāls ir ložu drošs vai nav. Tomēr nozarēs ir citādākas robežas un izpratne par to, vai materiāls ir tiešām ložu drošs. Tās atšķiras armijā, apsardzē un jūras flotē. (1.9. att.) Saskaņā ar ASV armijas (*US Army*) definīciju pilnīga caursišana ir sasniegta arī tad, ja lādiņš joprojām ir iesprūdis mērķī, bet caur to var izlauzties gaisma. Savukārt ASV Jūras kara flotes (*US Navy*) definīcija nosaka, ka pilnīga perforācija ir sasniegta, kad lādiņš pilnībā izšaujas no mērķa. [107]



1.9. att. Materiāla caursišanas raksturojums dažādās jomās.

Ir vairāki veidi, kā aprakstīt lodes ieiešanu mehānismu materiālā. Bojājums iekšējā sprieguma viļņa dēļ (1.10. att. a), sfēriskais bojājums aiz iekšējā viļņa trauslos materiālos (1.10. att. b), atlūzu veidā (1.10. att. c), korķa veidā (1.10. att. d), frontāla šķembu izstumšana (1.10. att. e), šķembu izstumšana lodes ceļa virzienā (1.10. att. f), fragmentēšana (1.10. att. g), krātera paplašināšana (1.10. att. h). [19] Citā literatūrā: atslāņošana (1.11. att. a), izdrupumi (1.11. att. b), plaisas (1.11. att. c), materiāla daļas izstumšana (1.11. att. d), šķembu izstumšana (1.11. att. e), elastīga krātera veidošana (1.11. att. f). [8]



1.10. att. Lodes uzvedība mērķī [19]

1.11. att. Lodes uzvedība mērķī [8]

Lodes caursišanas spēja ir atkarīgs no divām pusēm – lodes un materiāla raksturlielumiem. Skatīt 1.4. tabulu. Lodes iespiešanās dziļums (un lodes novirze [45]) mērķa materiālā tieši atkarīgs no materiāla cietības un šķiedru virziena anizotropos materiālos.

1.4. tabula

Lodes un materiāla raksturlielumi, kas ietekmē lodes caursišanas spēju materiālā

Lodes ietekme	Materiāla ietekme
masa	stiprība
diametrs	cietība
ātrums	tekstūra – šķiedru virziens
forma (gala forma)	

Lodes caursite materiālā ietver fizikālus procesus, kas pētīti gan eksperimentāli, gan teorētiski. Teorētiskie modeļi ir izstrādāti, atkarībā no lodes izšaušanas ātruma, lodes formas, masas, mērķa cietības u.c. īpašībām. Tomēr daudzi no analītiskajiem modeļiem ir viena mehānisma modeļi, kuriem līdz šim ir bijis ierobežots pielietojums. [108] Skaitliskās simulācijas ir prognozējušas mērķu reakciju uz šāvienu, bet to aprēķināšana prasa ievērojamus laika resursus. Tāpēc daudzi pētījumi ir **pielāgoti empīriskiem vai daļēji empīriskiem likumiem**. [8], [24]

Analītiskajai modelēšanai ir svarīga nozīme terminālās ballistikas jomā, lai izprastu saistīto fiziku un izceltu parametrus, kas ietekmē šos procesus. Skaitlisko simulāciju var uzskatīt par perfektu eksperimentu, kurā var mainīt vienu parametru vienā reizē un noteikt tā ietekmi uz pētāmo procesu. [107]

Izšautas lodes iespiešanās dziļums koka materiālā ir saistīts ar koksnes fizikālajām īpašībām [21], [45]. Lodes iedarbība materiālā ir atkarīga no lodes ātruma v_i , m/s, lodes masas m_p , kg, koksnes mitruma W , %, koksnes blīvuma ρ , kg/m³, koksnes cietības (Junga cietība, N), zarainības, bīdes pretestības τ , MPa, normālsprieguma σ , MPa. Tajā pašā laikā svarīgākie un būtiskākie faktori, kas ietekmē cauršaujošo spēju, ir: 1) šāviņa masa m_p , kg, trieciena ātrums v , m/s, un šāviņa galviņas gala forma; 2) mērķa pretestības spēja. Eksperimentālos datus var analizēt, izmantojot gan Robinsa-Eulera modeli, gan Ponceleta modeli. Izturību pret iespiešanos koksnē var prognozēt, izmantojot divas fiziski interpretējamās komponentes – inerciālo spriegumu un materiāla dinamisko izturību. [45]

Svarīgi ir vienkāršot aprēķinus līdz minimumam un pieņemt, ka 1) lode iespiešanās brīdī nedeformējas; 2) lādiņa kinētiskā enerģija tiek izmantota tikai mērķa deformācijai; 3) no daudziem faktoriem, kas ietekmē caurlaidību, galvenie un nozīmīgākie ir a) lādiņa masa, ātrums atlēciena brīdī un lādiņa galviņas gala forma; b) mērķa pretestības spēju raksturojums. [21]

Ponceleta modelis (1.7., 1.8. formulas) nozīmē, ka koksnes izturību pret iespiešanos var risināt, izmantojot vairākas fizikāli interpretējamās sastāvdaļas [8], [45], [60], [107].

$$m_p \frac{dv}{dt} = F = -\beta - \alpha v^2, \quad (1.7.)$$

kur m_p – šāviņa masa, kg;

v – lādiņa ātrums noteiktā laikā t , m/s;

β – parametrs, kurā dominē materiāla izturība, (kg × m)/s² ;

α – materiāla iekšējo spriegumu koeficients, kas ir vienāds ar mērķa blīvuma, lodes formas koeficienta un lodes šķērsriezuma laukuma reizinājumu, kg/m,

F – spēks, ar kādu lādiņš pārvar attālumu, N .

Ponceleta vienādojumā tiek pieņemts, ka penetratoram jeb lodei tās kustībā nenotiek ievērojams masas zudums, tātad $m = \text{const}$. Šis pieņēmums ne vienmēr ir precīzs, jo trieciena laikā var notikt lodes izplešanās, “sēnītes” formas saspiešanās (*mushrooming*), sadalīšanās un sairšana. Šāviņa iespiešanās dziļums P ir atkarīgs no lādiņa palēnināšanās mērķī un lādiņa ātruma. Vienādojuma (1.7.) integrālis dod rezultējošo caursišanas garumu P kā sākotnējā trieciena ātruma (v_i) funkciju:

$$P = \frac{m_p}{2\alpha} \ln \left(1 + \frac{\alpha v_i^2}{\beta} \right). \quad (1.8.)$$

Parametrus α un β nosaka eksperimentāli pēc lodes caursišanas datiem [45], kā piemēram, priedes koka (skujkoks, no kā arī izgatavots *CLT*) parametri materiāla iekšējo spriegumu koeficientu $\alpha = 0,028 \text{ kg/m}$, bet materiāla stiprības parametrs $\beta = 1500 \text{ kg} \times \text{m/s}^2$. Pētījumos [45], [60] parāda, ka P ir atkarīgs no izšaušanas ātruma, kur tiem ir gandrīz lineāra sakarība.

Eksperimentālie lodes iespiešanās dziļuma dati analizēti, izmantojot Ponceleta (*Poncelet*) modeli (1.8. formula), kas lielā mērā balstās uz Ņūtona 2. likumu $F = m \times a$.

Blakus Ponceleta modeļa derīgumam apskata Robinsa-Eulera formulu (1.9.), lai aprakstītu lodes iespiešanās datus. To lieto gadījumā, ja $\alpha = 0$, kas ir tuvināts iznākums tam, ja α ir ļoti maza vērtība (bezgalīgi mazs lielums). Šo vienkāršojumu nevar lietot priedes un egles koksnes izmantošanas gadījumā. [45] Lodes caursišanas garumu nosaka:

$$P = \frac{m_p v_i^2}{2\beta}. \quad (1.9.)$$

Šajā modelī šāviņa palēninājums ir nemainīgs. Tas tiek piemērots, piemēram, rūdītu tērauda šāviņu ietekmei uz alumīnija mērķiem. Lai aprakstītu lādiņa iespiešanos slāņainos materiālos, Ponceleta modelis ir efektīvāks nekā Robinsa-Eilera modelis. [61]

Mērķa materiāla šķietamo dinamisko stiprību aprēķina pēc formulas

$$R_t = \frac{\beta}{A}, \quad (1.10.)$$

kur A – lodes priekšējā gala laukums. Dinamiskā stiprību korelē ar mērķa materiāla stiprību bīdē un Janka cietību [45], [47], [53], [61]. Ballistisko pretestību biežiem mērķiem var prognozēt no lodītes statiskās iespiešanas testiem. Z. Rosenbergs (*Rosenberg*) [107] izvirzīja līdzīgus pētījumu rezultātus par svina ložu iedarbību uz betona mērķiem.

Uz fundamentālajām attiecībām un pieņēmumiem balstītus klasiskus iespiešanās vienādojumus izstrādāja Eulers un Robins, Poncelets, un Resāls. Izmantojot integrēšanu, lodes palēninājuma izteiksmi attiecībā pret ātrumu var pārveidot par izteiksmi attiecībā uz galīgo caursišanas dziļumu (šajā gadījumā apzīmē ar “ d ”) izteiktā ātruma izteiksmē. 1.5. tabulā parādīti katram zinātniekam ieskaitītie iespiešanās ballistikas vienādojumi, kā arī kalibrētās konstantes. [29], [45]

1.5. tabula

Klasiskie iespiešanās vienādojumi un ar tiem saistītās iespiešanās dziļuma izteiksmes [8]

Modelis	Palēninājums	Lodes caursišanas dziļums
Eilera-Robinsa	$a = C = \text{const.}$	$P = \frac{v_s^2}{2C}$
Ponceleta	$a = C + Bv^2$	$P = \frac{1}{2B} \ln \left(1 + \frac{Bv_s^2}{C} \right)$
Resāla	$Av + Bv$	$P = \frac{1}{B} \ln \left(1 + \frac{Bv_s}{A} \right)$

Tomēr arī citi zinātnieki secina, ka lodes caursišana nevar tikt atspoguļota, pielietojot Ponceta vai Robins-Eilera modeli. [45]

Mērķa materiāla pretestību lādiņam var uzskatīt kā inerces spēka un materiāla pretestības spēka summu, ko matemātiski var aprakstīt ar formulu [21]:

$$F = \frac{C_g \times S \times \rho \times v^2}{2} + C_k \times S \times P_0, \quad (1.10.)$$

kur C_g – koeficients, kas raksturo lādiņa gala formu;

S – stobra šķērsriezuma laukums;

ρ – mērķa materiāla blīvums;

v – lādiņa ātrums caursites procesā, kas samazinās no atsitiena ātruma līdz pat nullei (lādiņš vēl neizlido caur šķērsli);

C_k – koeficients, kas raksturo lādiņa korpusa formu;

P_0 – mērķa materiāla pretestības koeficients. [21]

Pārveido mērķa pretestības spēka formulu, to vienkāršojot, un iesaistot eksperimentos nosakāmus koeficientus A un b .

$$F = C_g \times S \times \rho \times \frac{v^2}{2} + C_k \times S \times P_0 = C_k \times S \times P_0 \left[\frac{v^2 \times C_g \times \rho}{2 \times C_k \times P_0} + 1 \right] = S \times A \times (1 + b \times v^2), \quad (1.11)$$

kur: substitūcijas koeficients (konstanšu reizinājumu var aizstāt ar citu konstanti)

$$A = C_k \times P_0 \quad (1.12.)$$

un

$$b = \frac{C_g \times \rho}{2 \times C_k \times P_0} \quad (1.13.)$$

Šāda materiāla pretestības spēka formula ir pareiza, ja lādiņš šķērsli iedziļinās bez sānu novirzēm un pats lādiņš netiek deformēts. [21]

Saskaņā ar Ņūtona II likumu lādiņa ar masu m inerces spēks [21]

$$F_{in} = m \times a \quad (1.14.)$$

ir pretēji vērsts un vienāds ar šķērsļa pretestības spēku

$$m \times a = -F. \quad (1.15.)$$

Lādiņa iedziļināšanos var uzskatīt par taisnvirziena kustību atbilstoši lādiņa asij x , kura pāātrinājums var būt izteikts ar diferenciālo vienādojumu

$$a = \frac{d^2x}{dt^2} = \frac{dv}{dt}. \quad (1.16.)$$

Lādiņa kustības diferenciālvienādojums

$$\frac{md^2x}{dt^2} = -S \times A \times (1 + b \times v^2) \quad (1.17.)$$

vai

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{S \times A \times (1 + b \times v^2)}{m}. \quad (1.18.)$$

Līdz ar to lādiņa pāātrinājums a lādiņa kustības ass virzienā izsakāms

$$a = \frac{d^2x}{dt^2} = \frac{v dv}{dx} \quad (1.19.)$$

Tātad iepriekšējo vienādojumu var uzrakstīt šādā veidā, kas atbilst lādiņa kustībai šķērsli vienādojumam

$$\frac{v dv}{dx} = -\frac{S \times A \times (1 + b \times v^2)}{m}. \quad (1.20.)$$

Caursišanas dziļumu atkarībā no atsietena ātruma v , sadalot attiecīgi šīs mainīgās komponentes:

$$\frac{v dv}{(1+bv^2)} = -\frac{S \times A dx}{m}, \quad (1.21.)$$

kur mainīgie lielumi ir lādiņa ātrums v atkarībā no tā iedziļināšanās dziļuma x .

Pēc diferencēšanas noteikumiem tiek pieņemts pārveidojums

$$dv^2 = 2v dv \quad (1.22.)$$

un

$$\frac{d(b-v^2)}{b} = dv^2. \quad (1.23.)$$

Pieliekot vajadzīgos lielumus, atbilstoši matemātiskām sakarībām [21]

$$\frac{d(bv^2+1)}{b} = \frac{d(b \times v^2)}{b} \quad (1.24.)$$

un iepriekšējo vienādojumu var pārveidot

$$\frac{v dv}{(1+bv^2)} = \frac{2v dv}{2(1+bv^2)} = \frac{d(1+bv^2)}{2b(1+bv^2)} = -\frac{S \times A dx}{m} \quad (1.25.)$$

Lai atrisinātu šo vienādojumu, nepieciešams to integrēt, pieņemot, ka atsietena momentā $x=0$ un $v=v_a$, bet jebkurā citā iedziļināšanās momentā, lādiņam iedziļinoties šķērslī līdz dziļumam x , tā ātrums v atbilstīs lādiņa kustības integrējamam vienādojumam [21]

$$\frac{1}{2b} \int_{v_a}^v \frac{d(1+bv^2)}{(1+bv^2)} = -\frac{S \times A}{m} \int_0^x dx \quad (1.26.)$$

(pastāvīgie locekļi $1/2b$ un $S \times A/m$).

Integrējot vienādojumu, varam iegūt šādu lādiņa kustības ātruma v atkarību no tā iedziļināšanās dziļuma x :

$$\frac{1}{2b} \ln \left(\frac{1+bv^2}{1+bv_a^2} \right) = S \times \frac{A \times x}{m}. \quad (1.27.)$$

Tātad caursišanas dziļums X jebkurā momentā ir atkarīgs no lādiņa ātruma v , masas m , stobra šķērsgrīzuma laukuma S un materiāla pretestības A : [21]

$$X = \frac{m}{2 \times b \times S \times A} \times c = L_0 \times \ln \frac{(1+b \times v_a^2)}{(1+b \times v^2)} \quad (1.28.)$$

Ievieš konstantēm saīsinājumam apzīmējumu $L_0 = m/(2b \times S \times A)$, kas raksturo izmantotā lādiņa parametrus un mērķa materiāla īpašības. [21]

Maksimālais caursišanas dziļums (*penetration depth*) būs tad, kad munīcijas lādiņš (lode) savā kustībā apstāsies materiāla iekšienē un lodes kustības ātrums ir nulle, tāpēc, ja apzīmē $v=0$, tad [21]

$$X_{\max} = L_0 \times \ln(1+b \times v_a^2). \quad (1.29.)$$

Caursišana galvenokārt ir atkarīga no lādiņa (lodes) ātruma atsietena brīdī v_a , kad materiāls izklīdē lādiņa atlikušo enerģiju. Līdzīgā veidā var noteikt arī laiku pēc atsietena, kad lādiņa ātrums ir v , tad lādiņa kustības vienādojums: [21]

$$\frac{dv}{dt} = \frac{-S \times A \times (1+b \times v^2)}{m} \quad (1.30.)$$

aizvietojot iegūst:

$$\frac{dv}{(1+b \times v^2)} = \frac{-S \times A dt}{m}, \quad (1.31.)$$

kuru var integrēt pēc mainīgiem lielumiem – laika t un ātruma v .

$$\int_{v_a}^v \frac{v dv}{1+b \times v^2} = -\frac{SA}{m} \times \int_0^t dt. \quad (1.32.)$$

Šo vienādojumu jau var integrēt, uzskatot, ka atsietena brīdī $t=0$ un lādiņa ātrums ir v_a , bet jebkurā citā brīdī $v = f(t)$. [21]

Pārveido šo vienādojumu, ja b ir konstante.

$$\frac{m}{S \times A \times \sqrt{b}} \int_{v_a}^v \frac{dv \sqrt{b}}{1 + b \times v^2} = - \int_0^t dt \quad (1.33.)$$

integrējot abas tā puses, iegūst vienādojumu lādiņa iedziļināšanās laika t noteikšanai atkarībā no atsītiņa ātruma v_a un pašreizējā kustības ātruma v

$$t = 2 \times L_0 \times \sqrt{b} \times \arctg(v \times \sqrt{b} |_{v_a}^v). \quad (1.34.)$$

$$t = 2 \times L_0 \times \sqrt{b} \times [\arctg(\sqrt{b} v_a) - \arctg(\sqrt{b} v)]. \quad (1.35.)$$

Maksimālais caursišanas laiks būs, kad lādiņš apstāsies $v=0$

$$t_{max} = 2 \times L_0 \sqrt{b} \times \arctg(\sqrt{b} \times v_a) \quad (1.36.)$$

Aprēķinot caursišanu sarežģītā mērķī, kurš sastāv no dažādu materiālu kārtām, nepieciešams aprēķināt lādiņa ātrumu un laiku, caursitot katru materiāla kārtu kā funkciju $v=f(x)$. Šim nolūkam var izmantot iegūtās formulas [21]

$$X_{max} = L_0 \times \ln(1 + b \times v_a^2) \quad (1.37.)$$

un

$$x = L_0 \times \ln \frac{(1 + b \times v_a^2)}{(1 + b \times v^2)} = L_0 \times [\ln(1 + b \times v_a^2) - \ln(1 + b \times v^2)] \quad (1.38.)$$

vai aizvietojot iegūt

$$x = X_{max} - L_0 \times \ln(1 + b \times v^2) \quad (1.39.)$$

tad pašreizējam lādiņa caursišanas dziļumam x var uzrakstīt

$$x - X_{max} = -L_0 \times \ln(1 + b \times v^2) \quad (1.40.)$$

vai

$$X_{max} - x = L_0 \times \ln(1 + b \times v^2) \quad (1.41.)$$

un dalot ar L_0 iegūst

$$(X_{max} - x) / L_0 = \ln(1 + b v^2) \quad (1.42.)$$

Pēc logaritma īpašības $\ln A = B$ ir līdzvērtīgs $e^B = A$ un var potencēt iepriekšējo vienādojumu, iegūstot

$$e^{\frac{X_{max} - x}{L_0}} = 1 + b v^2 \quad (1.43.)$$

vai

$$b v^2 = e^{\frac{X_{max} - x}{L_0}} - 1 \quad (1.44.)$$

izsaka:

$$v = \sqrt{\frac{e^{\frac{X_{max} - x}{L_0}} - 1}{b}}. \quad (1.45.)$$

Šī formula dod iespēju noteikt lādiņa ātrumu v jebkurā caursites dziļumā, ja ir zināms tā maksimālais dziļums X_{max} un attiecīgie koeficienti L_0 un b .

Munīcijas lādiņu maksimālās caursišanas spējas aprēķināšanai, praksē izmanto dažādu valstu pētnieku noteiktās empīriskās formulas. [109]

Piemēram, francūzis Žakobs de Marra piedāvāja formulu [21]

$$X = \frac{(\frac{v_a \sin \theta}{k})^{1,5} m^{0,75}}{d}, \quad (1.46.)$$

kur X – lādiņa maksimālā caursišanas spēja, m;

m – lādiņa masa, kg;

d – lādiņa diametrs, dm;

v_a – lādiņa ātrums atsitiena brīdī, m/s;

k – šķēršļa materiāla pretestības koeficients pēc Žakoba de Marra tabulas datiem (parastai bruņai $k=1600$ – 2000 , norūdītai bruņai k līdz 3000);

θ – leņķis, kādā lādiņš satiekas ar šķērslī. [21]

Žakobs de Marra ieguva arī empīrisku formulu, lai noteiktu ātrumu v (m/s), kas nodrošina b biezas bruņas caursišanas decimetros ar masas m lādiņu kilogramos un tā diametru d decimetros:

$$v = \frac{k \cdot d^{0,75} \cdot b^{0,7}}{\sqrt{m} \cdot \sin \theta} \quad (1.47.)$$

1912. gadā apšaudot mērķus Berezaņas salā Melnajā jūrā, ieguva tā saucamo Berezaņas empīrisku formulu, kas dod iespēju aprēķināt lādiņa maksimālo iedziļināšanos dažāda blīvuma grunts materiālos:

$$X_{max} = \lambda \times k \times v \times a \times \sin \theta \times m / d_2 \quad (1.48.)$$

kur lādiņa galvas koeficientu $\lambda = f(lg/d) = 1,0 - 1,4$ un šķēršļa materiāla (vides) tabulēto koeficientu k , ko var aprēķināt arī pēc formulas

$$k = 2,55 / \rho \times a \quad (1.49.)$$

kur ρ ir materiāla blīvums;

a – skaņas ātrums materiālā (to mērvienības jāsaskaņo).

Ja zināms lādiņa ātrums atsitiena brīdī v_a (to aprēķina pēc ballistikas formulām vai atrod pēc tabulu datiem) un pēc Berezaņas formulas aprēķināts maksimālais caursites dziļums X_{max} , tad municijas lādiņa ātrums jebkurā brīdī ir nosakāms pēc formulas:

$$v = v_a * \sqrt{1 - \left(\frac{x}{x_{max}}\right)^2}. \quad (1.50.)$$

Lai aprēķinātu vairāku slāņu (kārtu) materiālu bruņu caursites dziļumu, nepieciešams noteikt slāni, kurā lādiņš (lode) apstāsies $v=0$. Aprēķins ir jāveic katram mērķa slānim (kārtai) atsevišķi, nosakot, kurā kārtā lādiņš iestrēgs (apstāsies savā kustībā). Tomēr praktiskām vajadzībām izmanto nevis aprēķiniem, bet gan eksperimentu rezultātiem dažādu **grafiku** veidā. [21]

UFC standartā [2], lai noteikti tieši kokmateriāla minimālo biezumu lodes pretestībai ieteikta formula (1.51.) un lodes ātrumu pēc iziešanas no mērķa nosaka formula (1.52). Abās izteiksmēs lielumi lietoti imperiālā sistēmā. Lādiņa maksimālā caursišanas spēja ir atkarīga no lādiņa sākotnējā ātruma, masas, diametra un materiāla īpašībām. Koksnes īpašības (blīvums un cietība) norādīta dokumenta tabulās kā konstantes, tomēr pieļaujams, ka reālie apstākļi pieļauj pielaides.

$$T_W = 9837 \cdot \left(\frac{v^{0,4113} \cdot w^{1,4897}}{\rho \left(\frac{\pi D^2}{4} \right)^{1,3596} \cdot H^{0,5414}} \right) \quad (1.51.)$$

kur T_W – lādiņa maksimālā caursišanas spēja collās;

v – lādiņa sākotnējais ātrums pēdās sekundē;

w – lādiņa masa mārciņās;

D – lādiņa diametrs kvadrātcollās;

ρ – koksnes blīvums mārciņās uz kvadrātcollu;

H – koksnes cietība mārciņās;

Lodes ātrumu pēc iziešanas no mērķa atkarīgs no lādiņa izšaušanas ātruma, mērķa biezuma un lādiņa maksimālās caursišanas spējas šajā materiālā. Formulā tiek prasīta arī T_w jeb lādiņa

maksimālā caursišanas spēja. Nākas formulu apšaubīt jau sākotnēji, jo gadījumā, kad lodes apstājas materiālā, tā atlikušais ātrums ir nulle.

$$v_r = v \cdot \left[1,0 - \left(\frac{t}{t_w} \right)^{0,5735} \right] \quad (1.52.)$$

kur v_r – lodes ātrumu pēc iziešanas no mērķa pēdās sekundē;

t – reālais mērķa biezums;

Piedāvātās betona un mūra, un tērauda formulas atšķiras ar to, ka tiek ievērtēta lodes gala forma un izšaušanas leņķis.

Lai novērtētu ķermeņa bruņu perforācijas veiktspēju, izmanto V50 ballistisko robežtestu. Šāvienu ātrumu secīgi kontrolē, izmantojot augšup-lejup metodi, lai iegūtu paraugu, kas satur rezultātus abās pusēs no V50 ātruma patiesās vērtības. V50 ātrums ir ātrums, pie kura perforācijas varbūtība ir 50 procenti. [110] Tātad tiek aprēķināts aritmētiskais vidējais no trīs zemākajiem rezultātiem, kas izgāja cauri paraugam, un trīs augstākajiem – kas apstādināja lodi.

Ja paraugus testē ar trieciena ātrumu 400 m/s ar tērauda apvalka teorētiski nedeformējamu lodi 5–10 metru attālumā no mērķa. Lidojošās lodes diametrs 9 mm un masa 8 gramī. Tiek aprēķināta trieciena enerģija jeb kinētiskā enerģija, ko izmanto, lai novērtētu šāviņa radītos bojājumus. Šo materiāla absorbēto enerģiju aprēķina, izmantojot 1.53. formulu. Ja šāviņš izlido cauri mērķim ar atlikušo enerģiju, kas ir tuvu nullei, tiek uzskatīts, ka materiāls ir sasniedzis savu ballistisko robežu. [8], [32], [55].

$$E_{kin} = \frac{m \cdot v_o^2}{2} \quad (1.53.)$$

$$E_{kin} = \frac{0,008 \text{ kg} \cdot (400 \text{ m/s})^2}{2} = 640 \text{ J}$$

kur E_{kin} , J – lodes kinētiskā enerģija,

m , kg – lādiņa masa,

v_o , m/s – lodes izlidošanas ātrums.

1.8. Līmes ietekme uz līmētu kokmateriālu ballistiskajām īpašībām

Līmes kārtā līmētos savienojumos ir vajākais (kritiskākais) slānis. [62], [63] Līmju skaitliskie parametri ir elastības modulis (2–6 GPa), bīdes modulis, Puasona koeficients (0,3–0,4), stiepes stiprība (10–30 MPa) un spiedes stiprība (30–80 MPa) un bīdes stiprība (5–15 MPa), siltumvadītspēja (0,2–0,4 W/mK). [62], [63]

CLT un saplāksnis tiek veidoti krusteniski salīmējot vairākas mazākas koksnes kārtas perpendikulāri viena otrai, tādā veidā saglabājot kokmateriāla labās īpašības, bet uzlabojot tā vājās vietas – izturību pret plaisām, stiprību un samazina anizotropiju. Līme nodrošina slāņu saķeri un ietekmē ne tika mehāniskās, bet arī gala materiāla ballistiskās īpašības. Līmes ballistiskās īpašības ir atkarīgas no līmes enerģijas absorbcijas spējas, saķeres starp slāņiem un plastiskuma un deformācijas spējas.

Karbamīda formaldehīda (UF) līme ir cieta un trausla, rada cietu, bet ne elastīgu savienojumu un ir jutīga pret mitrumu un laikā gaitā tā noveco. Parasti tiek izmantota iekšējās.

UF līme ballistiskā trieciena gadījumā

- Samazina plastiskumu – trieciena laikā tā neļauj slāņiem absorbēt visu enerģiju
- Veido trauslus šķēlumus – pie augstas lokālās slodzes UF saite var plaisāt un atšķelties
- Var izraisīt atslāņošanos – ja trieciena enerģija pārsniedz adhēzijas stiprību
- Nav optimāla enerģijas izkliedēšanai – trieciena enerģija koncentrējas nelielā zonā.

UF līme samazina *CLT* paneļu ballistisko pretestību, jo

- tā ir mazāk elastīga un neļauj slāņiem absorbēt trieciena enerģiju;
- palielina delaminācijas risku pie trieciena;
- ražo trauslu salaidumu, kas var plaisāt vai lūzt.

CLT paneļu fizisko un mehānisko īpašību uzlabošanai iesaka lietot poliuretāna (PUR) vai fenola-rezorcīna (PRF) līmi, kas varētu līdzēt arī pret ballistiskiem triecieniem vai sprādzienu viļņiem. [111] Fenola formaldehīda līme, ko lieto saplākšņa finiera plākšņu savienošanā, ir ļoti izturīga un noturīga pret mitruma un temperatūras svārstībām, tai ir laba adhēzija un augsta stabilitāte ballistiska trieciena gadījumā. [112]

Citi autori (*Sanborn, Koene, Marco T. Lo Ricco etc.*) ir dažādi pieskārušies pētījumam par līmes ietekmi ballistiskajos paraugos. *Koene* un *Willemsen* [61] ir norādījusi saplākšņu pētījumos līmes tipu (MUF), lai raksturotu saplākšņa veidu, toties nav veikta līmes ietekmes analīze uz triecienizturību vai mērķa caursišanas spēju. Toties *Sanborn* [8] analizē standarta *CLT* ražošanas poliuretāna līmi un tās ietekmi uz *CLT* īpašībām. Tiek uzsvērts, ka līmes uzklāšana, virsmas sagatavošana un izpildes laiks (labāk, ja uzklāšana un šaušana notiek tai pašā dienā) ir būtisks un ietekmē gala iznākumu. Līme nav galvenais faktors ballistiskās pretestības prognozēšanā, tomēr tā tieši ietekmē kokmateriāla mehāniskās īpašības, kas korelē ar lodes trieciena izturību. Toties secināts, ka mērķa bojājumi notiek *CLT* koksnē, nevis līmes šuvē. *Marco T. Lo Ricco* [44] pētījumā par *CLT* dažādiem slāņiem atzīst, ka kvalitatīva līme ļauj ražot biežākas *CLT* loksnes un līmes saķere ar koksnes šķiedrām uzlabo kopējo pretložu stiprību, un piekrīt, ka līme nav noteicošais faktors ballistiskajā izturībā, bet gan materiāla blīvums un cietība un papildus izmantotie slāņi (šajā gadījumā – tērauda plāksnes).

1.9. Metodoloģija citos zinātniskajos darbos

Par kokmateriālu ballistiku ir veikti pētījumi un atklātas zinātniskas inovācijas ASV, piemēram, *Dr. K. Sanborn, Marco T. Lo Ricco*, Nīderlandē, *L. Koene, F. Broekhuis, G. Willemsen*, zinātnieki Austrālijā [18], Vācijā [22], Vjetnamā [24], [27], Brazīlijā [27] un citur. Pētījumi atšķiras pēc izmantotajiem materiāliem un iekārtām, testēšanas pieejas, mērīšanas tehnikas, datu analīzes metodes, teorētisko modeļu validācijas. To kopīgā iezīme – eksperimentāla mērķu materiāla šaušana un datu apstrāde.

Ballistikas pētnieku grupa ar *L. Koene* priekšgalā ar kolēģiem *F. Broekhuis, G. Willemsen* [45], [53], [61] apskata 9 mm ložu caurīšanu gan masīvkoksnē (eglē, priedē, ozolkokā un tādā svešzemju koksnē kā *Merbau, Bangkirai, Azobe*), gan saplāksnī (bērza, apses un *Okoume* jeb Gabonas 40 mm biežam saplāksnim). Līmēšanai izmantota formaldehīda (MUF) līme, ko izmanto ārtelpās. Vidējais mitruma saturs 10–55 %, atkarībā no koksnes parauga. Viņu metodoloģija balstās uz eksperimentālo pieeju ar kvantitatīvu datu analīzi, izmantojot fizikālus un mehāniskus modeļus.

Galvenie etapi ir

- 1) mērķu paraugu sagatavošana un to fizikālo īpašību klasifikācija;
- 2) eksperimentālā gaita (šaušana) un caursišanas dziļuma noteikšana;
- 3) datu apstrāde ar formulu modeļiem;
- 4) salīdzinājums ar citiem koksnes materiāliem empīrisku sakarību noteikšanai.

Abos eksperimentos viņi izmanto laboratorijas fiksētus ieročus, šaušanas attālums 5–20 metri, trieciena kontrolei izmanto augstas ātrdarbības kameras un Doplera radaru trieciena

ātruma mērīšanai. Katram ātrumam veikti pieci atkārtojumi, lai mazinātu materiāla neviendabīguma ietekmi. Lodes caursišanas dziļuma mērīšanai izmanto rentgenogrāfiju (*Rhythm Review 6.1.*, *Digitizelt 2.2* un *Gwyddion 2.47* programmatūru). Analītiskajā aprēķinā daļā viņi izmanto gan Ponceleta modeli, gan Robinsa-Eilera formulu, kur no materiāla atkarīgos parametrus zinātnieki pieņem, pielāgojot tos eksperimentālajiem datiem. Datu analīze tiek veikta atkarībā no lodes masas. Iegūtā dinamiskā stiprība tiek salīdzināta ar koksnes bīdes stiprību un Janka cietību, atklājot korelāciju starp fizikālajām un ballistikajām īpašībām. Mērījumu kļūdām noteiktas standartnovirzes.

Sanborn (2018) [8] disertācijas metodoloģija ir plaša un daudzslāņaina – tā apvieno eksperimentālus testus, empīrisku modelēšanu, analītisku aprēķinu metodes un daudzfaktoru lēmumu pieņemšanas pieeju (Analītiskais hierarhijas process jeb AHP un SMART jeb *Simplified Multi-Attribute Rating Tool*). Mērķa materiāli ir priede un egle, kas atrodami Ziemeļamerikas klimatiskajos apstākļos. Eksperimentāli tiek pārbaudīti gan vienkārši *CLT*, gan vairāku slāņu paraugi, lai salīdzinātu līmējuma un slāņu ietekmi uz ložu drošumu. Eksperimenti tiek veikti pēc ASTM standartiem. Eksperimenti sasaistīti ar teorētiskajiem modeļiem – mērķa cietības, lodes ātruma, bīdes deformācijas (līmes ietekme) un sprādziena režīma analīze.

Marco T. Lo Ricco et.al. [44] testē aizsardzības efektivitāti dažādi izveidotu *CLT* paneļu ballistisko un sprādzienu pretestībā. Metodoloģija apvieno eksperimentālu pieeju (ballistiskie testi, radiogrāfija, enerģijas aprēķini) ar salīdzināšanas fāzi starp dažādiem *CLT* materiālu paraugiem.

Darba metodoloģija sastāv no soļiem:

- 1) Paraugu izgatavošana – 8 dažādi *CLT* paraugi (12% mitrums), 7 slāņi, biezums 225 mm līdz 262 mm. Testēti 3 paraugi no katra tipa.
- 2) Testēšanas apstākļi:
Šāviņu veids – 3 līdzīgi kalibri, sākuma ātrums 823–986 m/s.
Šāviena attālums: 6,1 m.
Reģistrācijas ar augstas ātrdarbības kamerām.
3 šāviņi katrā mērķī.
Causišanas dziļums tika mērīts ar rentgena jeb radiogrāfijas palīdzību.
- 3) Datu analīze: aprēķināta absorbētā kinētiskā enerģija, analizēta enerģijas absorbcija, iespiešanās dziļums un variācijas koeficients rezultātu ticamības novērtēšanai.

Šī metodoloģija deva salīdzināmus datus vispārēja priekšmeta iegūšanai par izgatavoto *CLT* ballistisko veikspēju un labāko risinājumu aizsargpaneļu izveidei.

Metāla plātņu perforācijas testos *J. Awerbuch* un *S.R. Bodner* [42] pielieto eksperimentālu metodoloģiju, lai empīriski pārbaudītu teorētisko caursišanas modeļu precizitāti. Galvenie metodoloģiskie elementi ir

- 1) Eksperimentāla iekārta – testi notika šautuvē ar lodes ātruma mērītāju pirms un pēc parauga, izmantojot fotodiodes un augstas ātrdarbības fotofiksāciju lodes gājienam.
- 2) Izmantotās ierīces – trīs veida kalibri, ieskaitot 9 mm pusautomātisko pistoli, svina lodes. Tērauda un alumīnija plātņu mērķi, no 1 līdz 19 mm biezums, definētas mehāniskās īpašības.
- 3) Mērījumi – sākuma un atlikušais lodes ātrums, perforācijas ilgums, fotofiksācijas, mikroskopiski pētīju plūsmas līnijām un bīdes zonu platumiem.
- 4) Datu apstrāde un analīze – eksperimentālie tika salīdzināti ar teorētiskajiem aprēķiniem, iepriekš izstrādātajiem analītiskajiem modeļiem, skatīta caursišanas ģeometrija, ilgums.

Apkopojot šo darbu pētījumu metodoloģijas, var secināt, ka visos ziņojumos atklāts, ka izmantota eksperimentāla pieeja un datu analīze ar precīzu mērījumu kontroli un teorētisko modeļu validāciju.

Tomēr šajos darbos nav

- izstrādāta līmētu konstrukciju specifika BR1 līdz BR4 aizsardzības klases lodēm atbilstoši Eiropas noteiktajiem standartiem, kā *EN 1063*, un *NIJ 0108.01* standartiem,
- pārbaudīti biežumu variācijas *CLT* un saplākšņa paneļiem un to reakcija uz lodi,
- visos darbos ietverta ātruma samazinājums un enerģijas absorbcijas spēja,
- empīriskā un teorētiskā sasaiste ar Ponceleta modeli,
- *CLT* paneļu eksperimentālie rezultāti izmantoti Ponceleta formulas validācijai un optimizācijai, nosakot *CLT* materiāla šķietamo dinamisko stiprību pēc empīriskas metodes. Šāda pieeja iepriekšējos pētījumos netika lietota – tie pārsvarā izmantoja modeli teorētiski, bez lokāli iegūtu parametru noteikšanas.
- Skaitliskā modelēšana ar galīgo elementu metodi. Tā citos pētījumos (īpaši *Sanborn* un *Lo Ricco* darbos) tika aplūkota tikai konceptuāli.
- iekļauta parametru optimizācijas analīze,
- integrācija ar tādiem papildmateriāliem kā *Kevlar* un minerālvate, *UHMWPE*.

1.10. Teorētiskā apskata kopsavilkums

Laikā, kad palielinās drošības un aizsardzības jautājums, ložu drošas ēku sienu konstrukcijas kalpo kā fizisks un psiholoģisks vairogs. Analizējot pieejamo literatūru par ballistiku un potenciāli pielietojamiem būvmateriāliem bruņota uzbrukuma gadījumā, nākas secināt, ka kokmateriālam ir savas perspektīvas un trūkumi, salīdzinot ar citiem materiāliem, īpaši tēraudu un betonu, kas tiek plaši pielietots aizsardzības nolūkos. Līmētas koksnes izgatavošanas tehnoloģija palielina materiāla cietību un tā pretošanos trieciena slodzei.

Ballistika ir plaša nozare. Ieroču izmēri un to dažādās masas, vairāku diametru un formu ložu raidītie ātrumi variē no 360 m/s līdz 820 m/s, tāpēc pētījuma apgabals noteikti ir jāierobežo jeb jānosaka eksperimentālie limiti. Turklāt eksperimenta rezultātus ietekmē lodes raidīšanas leņķis un iespējamās neprecizitātes (rikošets, gaisa pretestība u. tml.). Testēšanas apstākļus pilnībā vai daļēji nosaka standarti *EN 1063*, *EN 1522/DIN EN 1522*; *EN 1523/DIN EN 1523*; *BS 5051*; *UL 752*; *ASTM F1233-08*; *NIJ Standard-0108.01*; dokuments *UFC 4-023-07*.

Lodes ielidošanas spēks materiālā ir atkarīgs no lodes raksturlielumiem un no mērķa materiāla īpašībām – tā struktūras sarežģītības, slāņainības, austu vai adītu šķiedru veida, blīvuma, cietības un izturības liela trieciena gadījumā. Līme nav galvenais faktors ballistikās pretestības prognozēšanā, tomēr tā tieši ietekmē kokmateriāla mehāniskās īpašības, kas korelē ar lodes trieciena izturību. Caursišanas formulu aprēķini atrodami, sākot no 18. gadsimta. Zināmākās un pielietotākās ir *de Marra*, *Eulera-Robinsa*, *Ponceleta*, un *Resāla* formulas. Formulu noteikšana ir laikietilpīga un prasa ievērojamu laika resursu, pie tam formulu precizitātei piemīt gadījuma raksturs, tāpēc empīriski vai daļēji empīriski modeļi [108] dod efektīvu un ātru rezultātu analīzi.

Ponceleta formula ir ērti izmantojama formula, lai aprēķinātu lodes caursišanas dziļumu. Tā ietver no mērķa materiāla īpašībām atkarīgus parametrus, kas nav vai tikai daļēji atrodami

zinātniskajā literatūrā, tāpēc tā nav pilnīga, kā arī tā neļauj aprēķināt slāņainu materiālu caursišanas dziļumu, tai skaitā *CLT*. Nepieciešami papildinājumi jeb noteikt šos parametrus mērķa materiāliem.

Par kokmateriālu ballistiku ir veikti pētījumi ASV, piemēram, *Dr. K. Sanborn, Marco T. Lo Ricco*, Nīderlandē, *L. Koene, F. Broekhuis, G. Willemsen*, zinātnieki Austrālijā [18], Vācijā [22], Vjetnamā [24], [27], Brazīlijā [27] un citur.

Arī Latvijā šajā nozarē ir ierobežotā skaitā pētījumu rezultātu, ekspertīzes un ekspertu vai arī šāдай informācijai ir ierobežota piekļuve nozares specifikas dēļ. Tāpēc pētījumā kā mērķa materiāls tiek izvēlēts ilgtspējīgs būvmateriāls – kokmateriāls – tā vēl līdz galam neizpētīto ballistisko īpašību dēļ. Aizsardzības klases izvēle sakrīt ar praktisko pielietojumu un atbilstību reālam incidentam biežāk civilās iestādēs. BR2 aizsardzības klase prognozējoši ir piemērota, lai atklātu materiāla ballistikās priekšrocības un trūkumus, vienlaikus izpildot eksperimentus pieejamā šautuvē, iztiekot bez lielas masas paraugiem, lai rezultāti būtu salīdzināmi, atkārtojami un nodrošinātu metodoloģijas pārskatāmību.

Teorētisko un eksperimentālo pētījumu rezultāti apliecina nepieciešamību pēc jaunas zinātniskas metodoloģijas līmētu koka sienu konstrukciju ballistikās pretestības noteikšanai. Līdz šim pieejamie pētījumi nav veikti Latvijā. *CLT* pētījumos nav ņemta vērā slāņu pretložu ietekme, turklāt masīvkoksnes un saplākšņa pētījumi nav pielāgoti Eiropas standartiem, kā *EN 1063*, kas nosaka prasības pēc septiņām aizsardzības klasēm.

Jaunas metodoloģijas nepieciešamību parāda arī eksperimentāla un teorētiska salīdzinājuma trūkums. Iepriekšējie darbi ir izmantojuši teorētiskajiem moduļiem Ponceleta un Eulera-Robinsa formulas, tomēr pietrūkst to validācija ar eksperimentu rezultātiem. Nav atklāti visi formulas parametri, kā šķietamā dinamiskā stiprība, kas ļautu precīzāk noteikt lodes caursišanas dziļumu. Pētījumos par koksnes ballistisko pretestību, nav ietvertas tādas sadaļas kā optimizācija un skaitliskā modelēšana, izmantojot galīgo elementu metožu rīkus. Ne visos zinātniskajos darbos ir pieminēts, ka aizsardzības klasi varētu uzlabot, izmantojot papildus materiālus, kā aramīds, augsta blīvuma polietilēns, nav minēta siltumizolācijas ietekme ballistikas efektivitātes paaugstināšanai.

Pirmreizējo ballistisko eksperimentu rezultāti pierāda, ka ballistikā izturība ir atkarīga no izmantotā materiāla veida, mitruma, slāņa biezuma. Tādēļ ir nepieciešama metodoloģija, kas ļautu noteikt optimālo sienas biezumu pie dažādām aizsardzības klasēm, balstoties uz *EN 1063* standartu.

Secinājums no šī ir, ka jaunas teorētiskas un eksperimentālas metodoloģijas izstrāde nodrošinātu zinātniski pamatotu veidu, kā novērtēt līmētu koka konstrukciju ballistisko pretestību, sniedzot ieguldījumu gan ballistisko materiālu zinātnes, gan būvzinātnes attīstībā.

Līdz ar to jaunā metodoloģija atšķirtos ar to, ka tajā būs:

- eksperimentu sasaiste ar Eiropas standartiem,
- materiāla dažādu biezumu ballistikā analīze,
- rezultātu validācija galīgo elementu programmā,
- parametru optimizācija.

2. PĒTĪJUMA TEORĒTISKAIS UN EKSPERIMENTĀLAIS PAMATOJUMS

Lai izveidotu promocijas darba metodoloģiju, promocijas darba eksperimentālajā daļā izveidoti empīriski modeļi un veikta datu analīze, lai izpētītu kokmateriālu pretestību un uzvedību ārēja trieciena ietekmē.

2.1. Koksnes pirmreizējās ballistiskās pārbaudes

Pētījuma sākuma daļā apskatīta šāviņu iedarbība uz koksnes izstrādājuma paneļiem, kas būtu piemēroti moduļveida ēkām, kas atrodas ballistiski jutīgās vietās (armijas štābi, kazarmas, bēgļu patversmes). Tika pārbaudīta kokmateriālu ballistiskā izturība, tieši caursišanas dziļums egles šķērsām līmētam kokmateriāliem (*CLT*) un bērza saplāksnim – dažāda biezuma paraugiem. Lodes caursišanas teorētiskajam aprēķinam izmantots Ponceleta modelis, kas atbilst eksperimentālajiem rezultātiem. Eksperimenta rezultātā ēkas sienām iesaka izmantot 84 mm saplākšņa paneli un kombinēto paneli, toties neiesaka izmantot pārējos eksperimentā testētos – *CLT* līdz 120 mm un saplāksni, kas mazāks par 84 mm. Tika apstiprināts, ka testa parauga/sienu biezuma izvēle jāveic, pamatojoties uz teorētiskiem aprēķiniem.

Eksperimentā tiek pārbaudīta dažādu koksnes izstrādājumu ballistiskā izturība (caursišanas dziļums):

- *CLT* materiāla paraugi ir ražoti uz vietas uzņēmumā SIA Profi (Latvija). Tā mitruma saturs ir 12 ± 2 %. Egles, C24 klase.
- Saplākšņa paraugi tika izgatavoti no LF-CPR/CE-DoP-01 – Riga® bērza saplākšņa (AS “Latvijas Finieris”) bez virsmas pārklājuma, līmēta ar fenol-formaldehīda līmi. Tā pielietojums ir nesošajās būvkonstrukcijās.

Šie materiāli tika izvēlēti, ņemot vērā to lielo pielietojamu Ziemeļvalstu reģionā. Koka šķiedras virziens netika ņemts vērā. Pirmajā eksperimentā izmantoja BR2 aizsardzības klases ieroči – *Glock 17* pistoli, 9 x 19 mm munīcija, pilnībā apvalkota lode (*FJM*), kam raksturojums ir stabils lidojums. *CLT* paraugu biezumus un slāņu skaitu skatīt 2.1. tabulā.

2.1. tabula

CLT paraugu biezumi un slāņi

Paraugšs	Materiāls	Biezums, mm	Slāņi	Līmes veids
C60	egles <i>CLT</i>	60	20-20-20 mm	karbamīda formaldehīds
C80	egles <i>CLT</i>	80	30-20-30 mm	
C100	egles <i>CLT</i>	100	20-20-20-20-20 mm	
C130	egles <i>CLT</i>	130	30-20-30-20-30 mm	
P1	bērza saplāksnis	28	19	fenol-formaldehīds
P2	bērza saplāksnis	56	19 x 2	
P3	bērza saplāksnis	84	19 x 3	

Nepieciešams ievērot ieroču noteikumus un ballistiskās aizsardzības standartu [92], [95], [99]. Eksperimentā izmantotie ieroči atbilst BR2 drošības līmenim, kuri nosaka lodes masu un ātrumu atbilstoši tehniskajai informācijai. Tādējādi revolverim *Glock 17* lodes sākuma ātrums 345 m/s un lodes masa 8,0 gramī. Ar šāviņu, kura šaušanas leņķis bija 90°, šāva no 5 metru

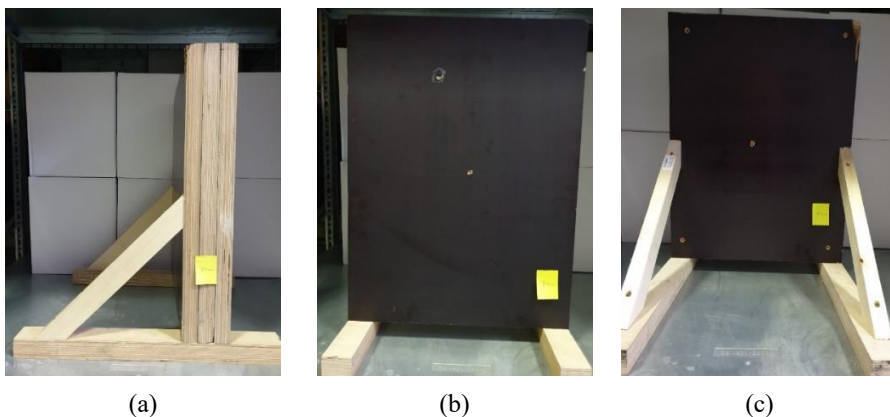
attāluma. Šis attālums bija atkarīgs no izvēlēta ieroča veida. Šaušanas attālums 5 metri ir *EN 1063* standartā noteiktais testēšanas attālums, taču tas ne vienmēr atbilst reāla apdraudējuma situācijai.

Eksperiments tika organizēts šautuvē Rīgas pilsētā. Iekšējā gaisa temperatūra svārstījās no +19 °C līdz +21 °C, pielāgojoties vasaras āra temperatūrai. Teorētiskie aprēķini apstiprināja eksperimenta rezultātus. Katrs eksperiments tika veikts vienu reizi. Šaušanu vadīja cilvēks, tas ir, šaušanas precizitāte bija atkarīga no profesionāla šāvēja panākumiem reālas situācijas atveidošanā.

Saplākšņu ballistiskā pārbaude

Eksperimentā tika testēti 3 dažādi bērza saplākšņa paraugi ar izmēriem 40x60 cm bērza LF-CPR/CE-DoP-01 - Rīga ® AS Latvijas Finieris ražoto saplākšni.

Tika šauts no rokas pistoles *Glock 17*, pa vienam šāvienam uz katru mērķi. 2.1. attēlā redzams sānskats P3 paraugam, lodes krāteris tās iekļūšanas brīdī un materiāla bojājums pēc šaušanas. Bojājumi mērķī ir radušies lodes formas un ātruma dēļ. Kad lode sāk iespieties materiālā, tās ātrums samazinās.



2.1. att. P3 saplākšņa mērķi – sastiprinātas 3 plātnes; (a) sānskats; parādīts sastatnis; (b) lodes ieeja; (c) lodes izejas skats.

Tikai trīs slāņu P3 paraugā (2.2. attēls a) *Glock 17* lode ir iespiedusies starp otro un trešo saplākšņa plātni. To noteikti ietekmē arī nobīdes virsmas pretestība. Tātad iespiešanās jeb caursišanas dziļums P ir diapazonā 56–84 mm. Plānākiem paraugiem P1 un P2 lodes izgāja tiem cauri.

CLT ballistiskā pārbaude

Eksperimentā tika testēti četri $(500 \pm 5) \text{ mm} \times (500 \pm 5) \text{ mm}$ izmēra dažāda biezuma egļu CLT paraugi (2.2. att.). Paraugi tika eksperimentāli pārbaudīti ar pistoli *Glock 17*, citu (lielāku) ieroču izmantošana netika turpināta, jo paredzams, ka spēcīgāku ieroču lodes arī mērķi neapstādinās. Lodes caursāva paraugus. Tātad lodes iespiešanās dziļums pārsniedz mērķa biezumu.



(a)



(b)



(c)

2.2. att. C130 paraugs: (a) skats no malas; parādīts statīvs; (b) lodes ieeja; (c) lodes izeja.

Teorētiskie aprēķini caursišanas dziļumam

Lodes iespiešanās dziļumu P teorētiskās vērtības ir aprēķinātas no (1.8.) formulas un parādītas 2.2. tabulā ar dotajām vērtībām. Izmantotais ierocis (*Glock 17* pistole), šāviņu masa ir 8 gramu, šāviņu ātrums ir attiecīgi 400 m/s, tāpēc aprēķinātais dziļums ir parādīts kolonnā P , salīdzinot ar parauga biezumu h .

Egles *CLT* Parametri α un β ir ņemti no [45] no Douglas egles parametriem ($\alpha = 0,013 \text{ kg/m}$ un $\beta = 2300 \text{ kg} \times \text{m/s}^2$). Teorētiskais caursišanas dziļuma P aprēķins *CLT* paraugam:

$$P = \frac{0,008 \text{ kg}}{2 \times 0,0028 \text{ kg/m}} \ln \left(1 + \frac{0,0028 \text{ kg/m} \cdot (400 \text{ m/s})^2}{1500 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2} \right) = 0,198 \text{ m.}$$

Bērza saplākšņa caursišanas dziļums tika iegūts vidēji no citiem lapu kokiem (zema vērtība $\alpha = 1 \times 10^{-13} \text{ kg/m}$ un salīdzinoši liela vērtības $\beta = 9000 \text{ kg} \times \text{m/s}^2$), kas pamatos ar to, ka publikācijā [45] norādītās Merbau koksnes blīvums ir tuvāks bērza blīvumam.

$$P = \frac{0,008 \text{ kg}}{2 \times 1 \times 10^{-13} \text{ kg/m}} \ln \left(1 + \frac{1 \times 10^{-13} \text{ kg/m} \cdot (400 \text{ m/s})^2}{9000 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2} \right) = 0,071 \text{ m.}$$

Teorētiskie aprēķini (2.2. tabula), kas tika veikti pēc eksperimentālajiem aprēķiniem, apstiprināja praktiskajos testos (šaušanā) iegūtos caursišanas dziļuma rezultātus.

2.2. tabula

Eksperimentālie lielumi un teorētiskie aprēķini caursišanas dziļumam P

Parauga Nr.	Eksperimentālie caursišanas dziļumi P , m	Teorētiskie aprēķini caursišanas dziļumam P , m
	Testa parauga biezums, m	<i>Glock 17</i> $m=8 \text{ g}$ $v_o=400 \text{ m/s}$
C100	0,100*	0,198
C130	0,130*	
P1	0,027*	
P2	0,056*	
P3	0,084 – apstājās starp 2. un 3. saplāksni	

*lode izgāja cauri mērķa paraugam

Izmantojot Poncelet modeli, aprēķini parādīja, ka izvēlētie materiālu biezumi nav piemēroti ložu pretestībai. Tikai P3 paraugs izturēja *Glock 17* (BR2 aizsardzības klases) pretestību.

CLT līdz 130 mm un saplākšnis, kas mazāks par 54 mm, nav ieteicams sienu ballistikās pretestības nodrošināšanai.

Secinājumi

1. Eksperimentu rezultāti liecina, ka moduļveida ēku sienu konstrukcijās optimāls ballistisks BR2 aizsardzības klases risinājums ir 84 mm biezs saplākšņa panelis. BR2 aizsardzības klasei panākšanai nepieciešami sienu izmēriem jābūt lielākiem par *CLT* 130 mm un saplākšni 71 mm.
2. Teorētiskie iespēšanās dziļuma aprēķini ar Ponceleta formulu uzrādīja labu atbilstību eksperimentālajiem datiem. Līdz ar to testa parauga/sienas biezuma izvēle tika apstiprināta, pamatojoties uz teorētiskajiem aprēķiniem.
3. Šādas ložu necaurļaidīgas ēku konstrukcijas var tikt izmantotas kā sākotnējie ievaddati moduļveida ēku projektēšanai nestandarta situācijās, nodrošinot aizsardzību pret tiešu un netiešu ložu iedarbību
4. Turpmākajos pētījumos ieteicams veikt eksperimentus ar lielāka biezuma *CLT* un saplākšņa sienu konstrukcijām.

2.2. Aprēķina metodoloģijas eksperimentālais un teorētiskais pamatojums

Lai izveidotu aprēķina metodoloģiju, pamatojoties uz iepriekšējiem secinājumiem tika testētas biežākas un dažāda biezuma un *CLT* un bērza saplākšņa sienas, noteikta šo koksnes kompozītmateriālu spēja absorbēt lodes kinētisko enerģiju un noteikts minimālais sienas biezums, kas nodrošina aizsardzību saskaņā ar *EN 1063* standarta BR1, BR2 klasēm un veidojot tendenci BR3 un BR4 klasēm.

Lai izstrādātu aprēķina metodoloģijas eksperimentālo un teorētisko pamatojumu, tika noteikti šādi uzdevumi:

- a) Veikt ballistiskos eksperimentus *CLT* un saplākšņa materiālam. Izveidot *CLT* paneļu pārbaudi matemātiskajā modelī, izmantojot galīgo elementu metodi.
- b) Noteikt mērķa materiāla šķietamo dinamisko stiprību *CLT* un saplākšņa materiāliem katrai aizsardzības klasei, kas ļautu pēc Ponceleta formulas aprēķināt lodes caursišanas maksimālo dziļumu (jeb minimālo sienas biezumu) citam ierocim BR1 un BR2 aizsardzības klasēm ar lodes masu līdz 8,0 g un lodes sākuma ātrumu līdz 400 m/s, veidojot tendenci ieročiem ar lodes masu līdz 15,6 g un lodes sākuma ātrumu līdz 440 m/s (BR3 un BR4).
- c) Veikt parametru optimizācijas analīzi.
- d) Veikt secinājumus.

2.2.1. Pētījumu apstākļi

Paraugi tika izgatavoti RTU laboratorijā un transportēti uz šautuvi saliktā stāvoklī. Eksperimentu telpā jeb šautuvē eksperimenta laikā bija temperatūra +10,4 °C un 72 % mitrums, kas visnotaļ maz ietekmēja eksperimenta gaitu, jo paraugi šautuvē atradās maksimums stundu.

Eksperimentā izmantoto materiālu paraugu mitrums pirms testēšanas bija *CLT* 5,3 %, saplāksnis 5 %. Zems mitrums ietekmē ballistisko veiktspēju ar mazāku spēju plastiski deformēties, augstāku elastības moduli, koksne ir trauslāka, tai vieglāk veidojas plaisas un caursišanas dziļums ir lielāks nekā mitrākas koksnes rezultātā. Tātad tas parāda sliktāko iespējamo gadījumu.

Eksperimentā izmantoto līmēto kokmateriālu parametri (fizikālās īpašības un ģeometrija) salīdzināšanai parādīti 2.3. tabulā.

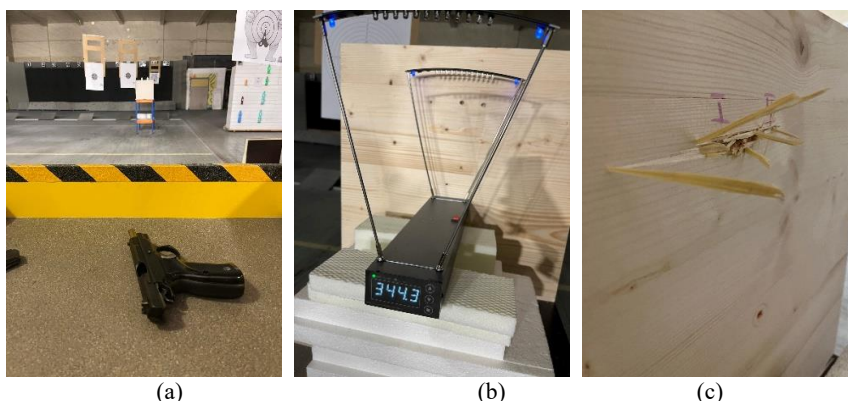
2.3. tabula

Testēšanas materiālu parametri				
Materiāls	Blīvums, kg/m ³	Mitruma saturs, %	Līmes veids	Paraugu biezumi, mm
<i>CLT</i>	461,7	5,3	karbamīda formaldehīds	80, 100, 140, 150, 240, 260
Bērza saplāksnis	669,9	5,0	fenola formaldehīds	27, 54, 81 (1, 2, 3 plātnes)

Eksperimentu apstākļi:

- Temperatūra šautuvē: 10,4 °C (maiņa sākuma neapsildītu telpu temperatūra)
- Mitrums šautuvē: 72 %
- Šaušanas attālums: 8–9 m (standartā 5 m)
- Kopumā tika veikti vairāk nekā 35 šāvienī, kas nodrošina augstu datu ticamību un statistisko stabilitāti.
- Ierocis: CZ 75 (9 x 19 mm Parabellum lodes, FJM), lodes masa: 8 g
- Lodes sākuma mērītais ātrums: 339,7–345,8 m/s. Lodes ātrums pirms un pēc materiāla tika fiksēts ar Slingshot Speed Tester hronogrāfu, mērījuma kļūda līdz 1 %.
- Caursišanas dziļums mērīts ar tērauda lineālu (± 1 mm).

Šis pētījums bija limitēts ar vienu rokas ieroci un vienu patronas tipu. Eksperimentā izmantotais ierocis CZ 75 (2.3. att. a), masa 0,77 kg, kalibrs 9x19 mm Parabellum. Ieroča un tā parametru izvēle ir pamatota ar to, ka CZ-75 ir standartizēts zemas-vidējas kinētiskās enerģijas avots. Šī ieroča izmantošana samazina eksperimentālo mainīgo skaitu, nodrošina mērījumu atkārtojamību, tas ir raksturīgs urbanizētai videi, kas pietuvina eksperimentu reāliem apstākļiem.

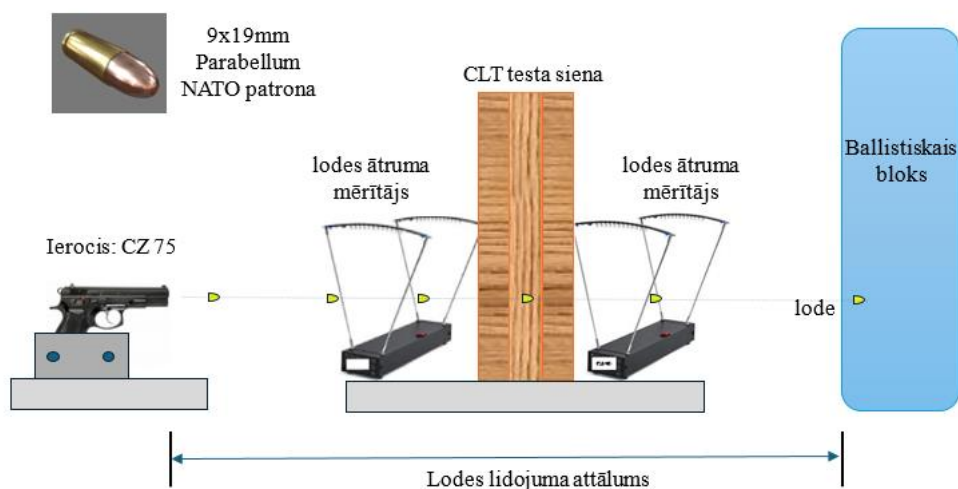


2.3. att. Izmantotais ierocis CZ 75 (a), ātruma mērīšanas velosimetri ballistiskajai pārbaudei (b), lodes izeja (c).

Testa režīmā vienu reizi tika izšauts ar automātisko ieroci AK-47. Lode izlidoja cauri paraugam. Tika pieņemts lēmums neturpināt tālākos pētījumus ar šo ieroci, jo pēc pieredzes autores pētījumā “*Projectile penetration depth into wood-based frames of unclassified buildings*” [29] tas iet cauri visiem koka vai koka kompozītmateriālu paraugiem un šajā pētījumā lodes ar ātrumu vairāk par 440 m/s (atbilst BR1–BR4 klasei, standarts *EN 1063*) nav paredzētas apskatīt, limitējot apskatāmo ātruma un ieroču izmantošanas diapazonu.

Ātruma mērīšanai tika izmantoti divas N\P firmas “*Slingshot*” *Speed tester* hronogrāfa ierīces (2.3. att. b) ar mērījumu kļūdu $\leq 1\%$ un precizitāti 0,1 m/s. Velosimetri tika novietoti pirms un pēc mērķa materiāla, maksimāli tuvu sienas paraugam. Caursišanas garumi tika mērīti ar tērauda stieplīti un lineālu. Kļūdas precizitāte ir ± 1 mm (mazākās iedaļas vērtība) līdz lodes aizmugurējai daļai.

Eksperimenta darbības shēma attēlota 2.4. attēlā. Lodes lidojuma attālums ir no ieroča stobra līdz paraugam lodes iesprūšanas rezultātā vai līdz ballistiskajam blokam lodes pilnīgas caursišanas gadījumā.



2.4. att. Eksperimenta darbības shēma

Šaušanas attālums 8,315 m un 9 m (eksperiments tapa divos piegājienos). Standarts nosaka paraugu izmērus (500 ± 5) mm $\times$ (500 ± 5) mm. Tests atbilst BR2 klasei pēc *EN 1063* vai 1. klasei pēc *UL752*, ko nosaka izmantotās *Parabellum* patronas. Uz katru sienu tika veikti 3–5 šāviņi.

Eksperimentā, atšķirībā no citiem ballistiskiem pētījumiem *M. T. Lo Ricco, M. K. Weaver, C. Adam Senalik, J. Henjum, and J. Cattelino, “Ballistic testing of cross-laminated timber layouts to further develop protective panels,” L. Koene and F. R. Broekhuis, “Bullet penetration into wooden targets,” K. Sanborn, B. Riser, R. Gentry, and L. Stewart, “Ballistic performance of enhanced cross-laminated timber (ECLT)”*, tika izmantots nosacīti konstants lodes ieiešanas ātrums. Ieroča CZ 75 izšautās lodes vidējais ātrums pirms lodes ielidošanas paraugā bija 341,8 m/s, mērīts no 5 mērījumiem. Otrā eksperimenta piegājiēnā lodes vidējais ātrums pirms lodes ielidošanas paraugā bija 339,7 m/s. Tie atbilst standartam *NIJ standard-0108.01*, kur 9 mm lodes sākuma ātrumam jābūt (332 ± 12) m/s, bet nesakrīt ar *EN 1063* tabulu (1.3. tab.), kur tie ir diapazonā no (360 ± 10) m/s līdz (440 ± 10) m/s.

2.2.2. CLT eksperimentālā un teorētiskā izpēte

Par pētījuma objektu tika ņemti plašs praktisks testēšanas diapazons *CLT* sienu biezumiem no 80 mm līdz 260 mm (skatīt 2.4. tabulu). Materiālos pielietotā līme praksē ir karbamīda formaldehīds. Pētījumā izmantoti Latvijā ražoti *CLT* paneļi. *CLT* eksperimentāli noteiktais blīvums ir 461,7 kg/m³, toties ražotāja noteiktais ir 420 kg/m³ (vadoties pēc C24 koksnes klases). Pieļaujams, ka līmes kārtā veido *CLT* materiālu smagāku uz vienu kubikvienību, nekā masīvkoksnes normās (*Eurocode 5*) bez līmes. Toties ir novērots, ka vienas sugas koksnei blīvums var būt atšķirīgs dabīgu iemeslu dēļ, kā arī to ietekmē mitruma daudzums. [45]

2.4. tabula

CLT paraugu biezumi un slāņi

Parauga Nr.	Biezums, mm	Slāņi	Līmes veids
C80	80	30-20-30	karbamīda formaldehīds
C100	100	20-20-20-20-20	
C140	140	40-20-20-20-40	
C150	150	30-30-30-30-30	
C240	240	40-40-20-40-20-40-40	
C260	260	40-40-30-40-30-40-40	

CLT paneļu ballistiskie testi

Par pētījuma objektu sākumā tika ņemti C80, C100, C140 paraugi, kuriem tika šauts cauri 3–5 reizes un mērīti lodes ātrumi pirms un pēc lodes iziešanas caur materiālu. Ātrumu starpība parāda, cik metrus sekundē materiāls “atņem lodei”. Pētījums bija par *CLT* materiālu spēju aizkavēt lodi, samazinot tās ātrumu.

- C140 parauga maksimālais ielidošanas ātrums bija 345,8 m/s, bet izlidošanas ātrums 164,8 m/s, mazākais ātruma samazinājums 181 m/s.
- C100 parauga vidējais ielidošanas ātrums bija 339,9 m/s, bet izlidošanas ātrums 197,6 m/s, mazākais ātruma samazinājums 142,3 m/s.
- C80 parauga maksimālais ielidošanas ātrums bija 339,9 m/s, bet izlidošanas ātrums 252,4 m/s, mazākais ātruma samazinājums 87,5 m/s.

Viena no pētījuma rezultātu ieguves versijām ir pieņemt, ka lodes caursišanas dziļums ir lineāri atkarīgs no materiāla biezuma un aprēķināt materiāla 1 mm spēju samazināt lodes pretestību, izsakot to metros sekundē. Jāņem vērā, ka koksne ir anizotropa un *CLT* ir slāņains materiāls, iekļaujot līmes kārtu starp *CLT* dēļiem. Noteicošie jeb bīstamākie rezultāti atspoguļoti 2.5. tabulā, vidējie rezultāti – 2.6. tabulā. Rezultāti parāda, ka *CLT* materiāla 1 milimetra spēja apturēt lodi ir mazākais 1,1 m/s uz 1 mm, kas iegūts C80, bet vidējais 1,61 m/s uz 1 mm. Redzams, ka, salīdzinot C140 un C100 slāņu sastāvu, to slāņu skaits neatšķiras, bet atšķiras ārējo slāņu biezums. Šajā eksperimentā jāsecina, ka slāņu skaits un biezums ir būtisks kritērijs. Redzams, ka vidēji lodes absorbē ātrumu vienādi katram materiālam, neatkarīgi no slāņu skaita un biezuma. Kas liek secināt, ka eksperiments ir noritējis veiksmīgi.

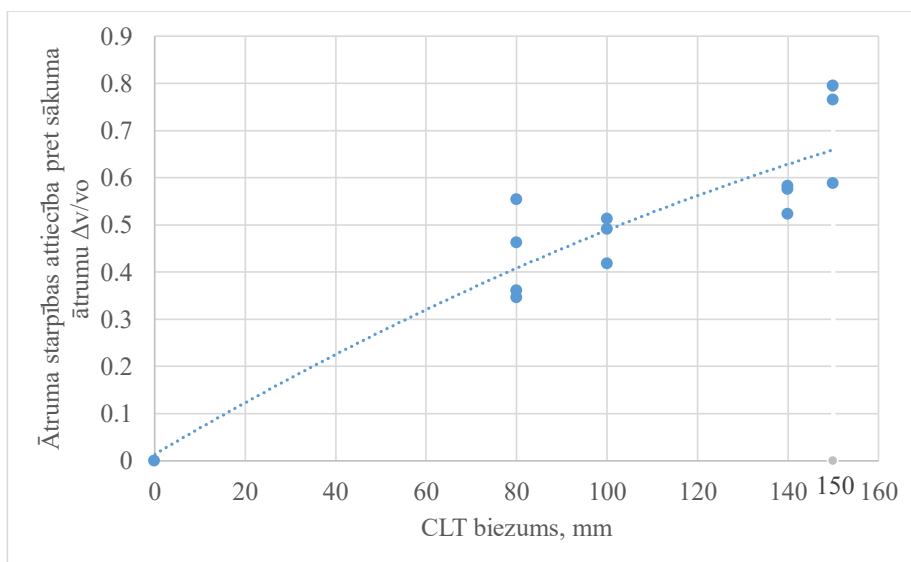
CLT paneļu šaušanas noteicošie rezultāti

Parauga Nr.	v_o , m/s	v_r , m/s	Δv , m/s	Δv uz 1 mm, (m/s)/mm
C140	345,8	164,8	181,0	1,3
C100	339,9	197,6	142,3	1,4
C80	339,9	252,4	87,5	1,1
				Min 1,1

CLT paneļu šaušanas vidējie rezultāti

Parauga Nr.	v_o , m/s	v_r , m/s	Δv , m/s	Δv uz 1 mm, (m/s)/mm
C140	343,7	117,8	225,9	1,61
C100	339,7	178,7	161,0	1,61
C80	339,7	210,9	128,8	1,61
				Vid. 1,61

2.5. attēlā parādīta CLT materiāla absorbētās ātruma starpības pret lodes sākuma ātrumu attiecība atkarībā no materiāla biezuma.

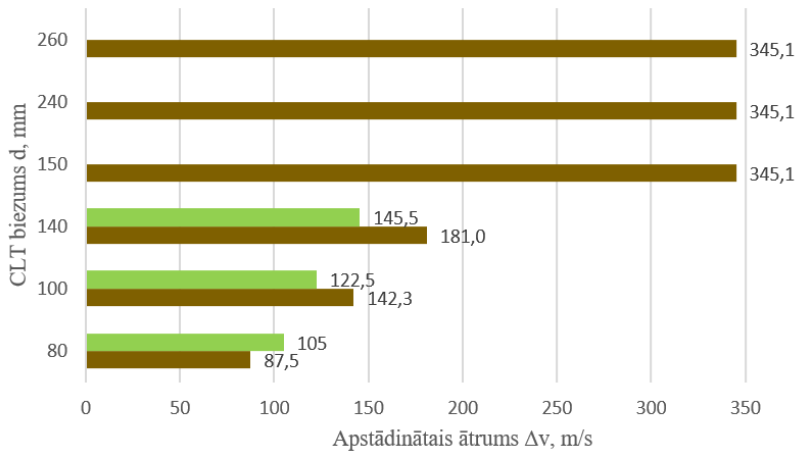


2.5. att. CLT materiāla absorbētās ātruma starpības pret lodes sākuma ātrumu attiecība atkarībā no materiāla biezuma. Zilā līnija – tendence.

Eksperimentā pārbaudot C240 sienas paraugu, lodes maksimālais caursišanas dziļums bija 154 mm, bet C260 bija 159 mm, toties C150 sienai 2 lodes gāja cauri, bet trīs lodes veidoja caursišanas dziļumu maksimāli 105 mm. Šie rezultāti sakrīt ar secinājumu par garantēto CLT biezumu, kas nepieļauj lodes cauriēšanu. 2.7. tabulā un 2.6. un 2.7. attēlos parādīts apkopojums eksperimenta datiem, kur Δv , m/s ir mazākā ātruma izmaiņa (enerģijas samazināšanās), ko konkrētā siena samazina.

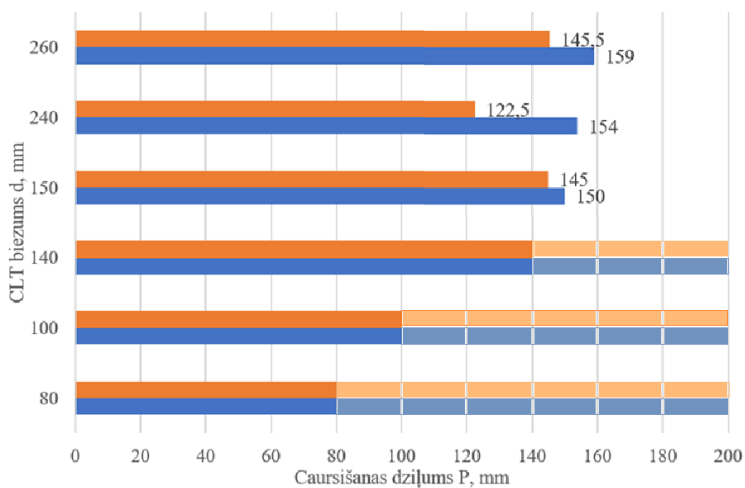
CLT paneļu šaušanas rezultātu apkopojums

Parauga Nr.	Maksimālie (iekavās vidējie) rādītāji caursišanas dziļumam	Minimālā (iekavās vidējā) ātrumu starpība	Minimālā (iekavās vidējā) ātrumu starpība
	P , mm	Δv , m/s	Δv uz 1 mm, (m/s)/mm
C80	Cauršauts	87,5 (128,9)	1,29 (1,611)
C100	Cauršauts	142,3 (161,0)	1,42 (1,610)
C140	Cauršauts	181,0 (225,9)	1,09 (1,614)
C150	145,0 (105,0)	Apstādināta lode	-
C240	154,0 (122,5)	Apstādināta lode	-
C260	159,0 (145,5)	Apstādināta lode	-



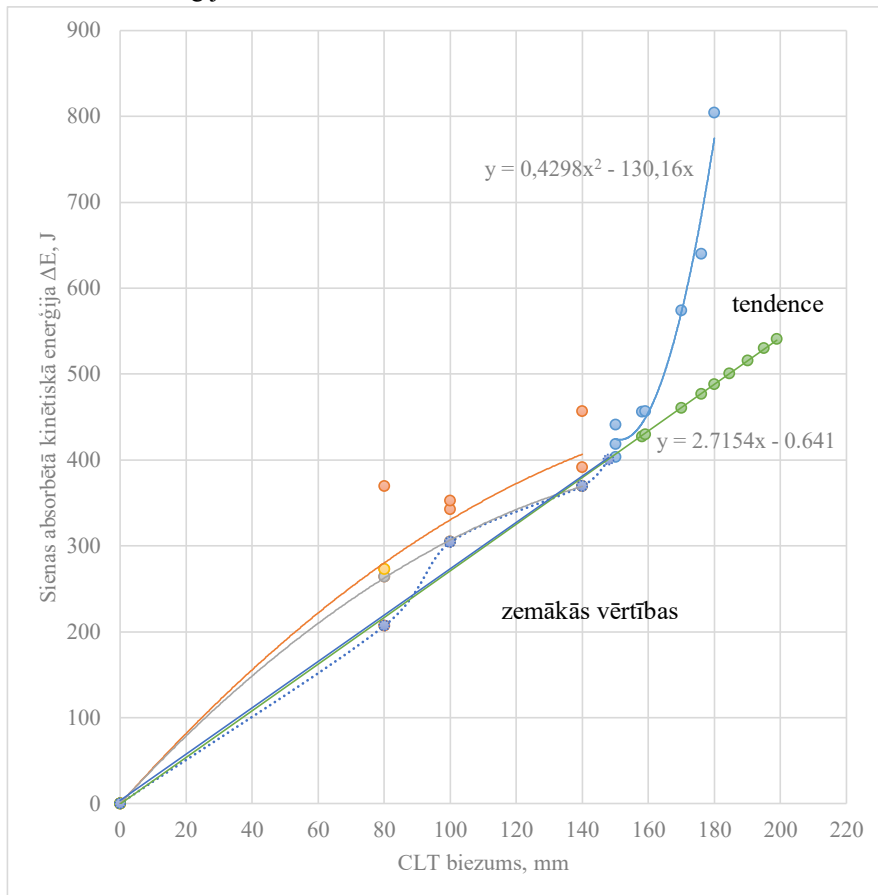
2.6. att. Apstādinātie lodes ātrumi CLT sienām, zaļie stabiņi – minimālie, tumšie – vidējais ātrums starpība.

C150, C240 un C240 paraugi varēja apstādināt vairāk nekā 345,1 m/s.



2.7. att. Caursišanas dziļumi (sarkans – vidējais, zils – maksimālais) katram materiāla biezumam. C80, C100 un C140 paraugi tika cauršauti.

CLT bloki absorbē noteiktu daudzumu lodes kinētiskās enerģijas, kas noteikts pēc (1.53.) formulas, kur izmantota eksperimentāli iegūta absorbēta enerģija. Kinētiskās enerģijas daudzums atkarībā no *CLT* bloku biezuma parādīts 2.8. attēlā, ja lodes masa ir 8 grami. Grafikumam ir līklīnijas raksturs. Pēc šādas līknes var prognozēt katra biezuma *CLT* materiāla absorbēto kinētisko enerģiju.



2.8. att. Eksperimentāli iegūtais *CLT* paneļu absorbētās lodes kinētiskā enerģijas daudzums atkarībā no materiāla biezuma. Punkti un līkne oranžā krāsā – eksperimentālie dati. Punkti zilā krāsā – zemākās vērtības un tendence. Punkti zaļā krāsā – lineāra tendence.

150 mm biezs *CLT* sienas materiālu varētu izmantot kā V50 ballistisko robežtestu, jo C150 bija paraugs, kurā lodes gan izgāja cauri, gan apstājās.

Tālāk parādīta šķietamās dinamiskās stiprības R_t aprēķināšana BR2 aizsardzības klasei:

- 1) Eksperimentu ceļā tiek noteikts mērķa absorbētais ātrums

$$\Delta v = v_r - v_o = 345,8 - 164,8 = 181 \text{ m/s (C140).}$$

- 2) Eksperimentu ceļā tiek noteikts mērķa absorbētais ātruma kvadrāts

$$v_r^2 - v_o^2 = 345,8^2 - 164,8^2 = 92418,6 \text{ m}^2/\text{s}^2.$$

- 3) Pēc kinētiskās enerģijas pamatformulas (1.53) tiek aprēķināta lodes absorbētā enerģija

$$E_{\text{kin}} = \frac{0,008 \text{ kg} \cdot 92418,6 \text{ m}^2/\text{s}^2}{2} = 369,7 \text{ J}.$$

- 4) Tiek izveidots grafiks absorbētās enerģijas atkarību no mērķa biezuma BR1, BR2 aizsardzības klasēm, veidojot tendenci aizsardzības klasēm BR3 un BR4 (2.8. att.)
- 5) No grafika tiek nolasīts katra materiāla biezums (kas būtu vienāds ar minimālo caursišanas dziļumu P) atkarībā no BR1–BR4 klasei nepieciešamās enerģijas.
Skatīt 2.8. tabulu. BR2 klasei $P = 176$ mm.

- 6) Izmantojot Ponceleta formulu (1.8), tiek aprēķināts materiāla stiprības parametrs β , to izsakot. Formula arī sastāv no lodes masas, ātruma un α – materiāla iekšējo spriegumu koeficienta, kas ir vienāds ar mērķa blīvuma ρ , lodes formas koeficienta C un lodes šķērsriezuma laukuma A reizinājumu, kg/m.

$$\alpha = \rho \cdot C \cdot A = 461,7 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,342 \cdot 6,36 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 = 0,0100 \text{ kg/m}$$

kur lodes laukums A, m², ja lodes diametrs ir 9 mm:

$$A = \pi \cdot \frac{d^2}{4} = \pi \cdot \frac{0,009 \text{ m}^2}{4} = 6,36 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$$

Materiāla stiprības parametru β iegūst izsakot to no (1.8.) formulas:

$$\beta = \frac{\alpha \cdot v_0^2}{e^{\frac{2 \cdot P \cdot \alpha}{m} - 1}} = \frac{0,0100 \text{ kg/m} \cdot (400 \text{ m/s})^2}{e^{\frac{2 \cdot 0,176 \text{ m} \cdot 0,0100 \text{ kg/m}}{0,008 \text{ kg}} - 1}} = 2892 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2$$

- 7) Aprēķina šķietamo dinamisko stiprību R_t , materiāla stiprības parametru β izdalot ar lodes šķērsriezuma laukumu A, formula (1.10).

$$R_t = \frac{\beta}{A} = \frac{2892 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2}{6,36 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2} = 45,48 \text{ MPa}$$

Absolūtā kļūda aprēķināta no iesaistīto lielumu mazākās iedaļas vērtībām.

Pārējām aizsardzības klasēm aprēķini parādīti 2.8. tabulā.

2.8. tabula

Lodes un CLT raksturlielumi katrai aizsardzības klasei

Aizsardzības klases saskaņā ar EN1063	Lodes raksturlielumi						Materiāla raksturlielumi					
	Masa	Sākuma ātrums	Kinētiskā enerģija	Formas koef.	Diametrs	Šķērsriezuma laukums	Blīvums	Iekšējo spriegumu koeficients	Caursīšanas dziļums	Stiprības parametrs	Šķietamā dinamismā. stiprība	Absolūtā kļūda
	m , g	v_0 , m/s	E , J	C	d , mm	A , m ²	ρ , kg/m ³	α , kg/m	P , mm	β , kg×m /s ²	R_t , MPa	ΔR_t , MPa
BR1	2,6	360	168	0,34	5,7	2,46×10 ⁻⁵	461,7	0,0039	60	2565	104,19	1,04
BR2	8,0	400	640	0,342	9,0	6,36×10 ⁻⁵	461,7	0,0100	176	2892	45,48	0,45
BR3	10,2	430	943	0,34	9,0	6,36×10 ⁻⁵	461,7	0,0100	185	4245	66,76	0,65
BR4	15,6	440	1510	0,30	10,9	9,33×10 ⁻⁵	461,7	0,0127	199	6425	68,89	0,68

Pamatojoties uz iegūtajiem datiem par patērēto kinētisko enerģiju konkrētam CLT materiāla biezumam, no grafika 4.4. att. tika nolasīti CLT minimāli nepieciešamais biezums katrai aizsardzības klasei (pēc EN 1063). Tie bija attiecīgi BR1 līdz BR4 klasēm 60 mm, 176 mm, 185 mm un 199 mm. Iegūtie sienas biezumi jeb caursišanas dziļumi drošības nolūkos tiek noapaļoti uz augšu līdz 1 mm, bet tā kā izstrādātājiem parasti ir standarta CLT biezumi, tad tie tiktu noapaļoti uz drošāko pusi, attiecīgi 60 mm, 180 mm, 200 mm. Ņemot vērā, ka α jeb

materiāla iekšējo spriegumu koeficients ir vienāds ar mērķa blīvuma ρ , lodes formas koeficienta C un lodes šķērsgriezuma laukuma A reizinājumu, tie ir $0,0039 \text{ kg/m} \div 0,0127 \text{ kg/m}$. Caur Ponceleta formulu tika iegūti materiāla stiprības parametri β katrai aizsardzības klasei, kas nav konstants lielums, jo atkarīgs no lodes šķērsgriezuma laukuma. Dotie ložu sākuma ātrumi un lodes masas ir noteikti pēc standarta *EN 1063*. Sākuma ātrums BR2 klasei atšķiras no eksperimentāli pētītā maksimālā $345,1 \text{ m/s}$. Redzams, ka lodes masai ir būtiska nozīme caursišanas dziļuma noteikšanai.

Izmantojot formulu (1.10.), nosaka materiāla šķietamo dinamisko stiprību R_t , MPa, kas ir unikāla tieši katram mērķa materiālam. Tāpat empīriskā ceļā ir iegūta *CLT* šķietami dinamiskā stiprība atbilstoši BR1, BR2 aizsardzības klasēm ir $100,24 \text{ MPa}$, $45,48 \text{ MPa}$, ar tendenci BR3, BR4 klasēm ir $66,70 \text{ MPa}$ un $68,93 \text{ MPa}$, kas ļauj ar Ponceleta formulas palīdzību aprēķināt *CLT* jebkura potenciālo biežumu lodes (ne)caursišanai.

Šie šķietami dinamiskās stiprības ir lielumi, ar ko tiktu papildināti tehnisko datu literatūras dati *CLT* materiāla ballistikās veiktspējas noteikšanai. Iegūtie dati prognozētu apstākļus sagatavojoties citam eksperimentam vai reālajiem apstākļiem

Parametru optimizācijas analīze pēc *CLT* materiāla īpašību koeficientiem

Izmantojot matemātisko modelēšanu, tiek veikta sienas paneļa caursišanas dziļuma optimizācija jeb racionālu elementu analīze, izmantojot Poncelet formulu (1.8.). Optimizācija notiek ar 9 mainīgajiem. Otrās pakāpes polinoms ir visbiežāk pielietojamais regresijas vienādojuma veids praksē. Tiek izvēlēti divi vadāmie faktori (X_1 un X_2). Ponceleta formulā tie ir koeficienti α un β , kas ir atkarīgi no mērķa un materiāla īpašībām. Parametru α un β vērtības tiek mainītas ar konkrētu soli, lai sasniegtu optimizācijas mērķi – palielinātu Ponceleta formulas efektivitāti pie izdevīgākajiem lielumiem.

2.9. tabula

Parametru vērtības un aproksimācijas kļūdas noteikšana

Nr.p.k.	Faktors $X_1 (\alpha)$, kg/m	Faktors $X_2 (\beta)$, kg×m/s ²	Parametrs P , m	Parametra atvasinājums P' , m	Novirze ε_i	Aproksimācija (vidējā novirze)
1	0,0001	2892	0,1644	0,1627	1,06%	
2	0,0001	4241	0,1122	0,1144	-1,98%	
3	0,0001	5590	0,0851	0,0846	0,62%	
4	0,0100	2892	0,1379	0,1393	-0,99%	
5	0,0100	4241	0,0990	0,0986	0,40%	0,028%
6	0,0100	5590	0,0773	0,0763	1,30%	
7	0,0199	2892	0,1203	0,1206	-0,24%	
8	0,0199	4241	0,0892	0,0874	2,14%	
9	0,0199	5590	0,0710	0,0725	-2,05%	

Izvēlētie maināmie parametri jeb vadāmie faktori ir:

X_1 – koeficienta α vērtības, kas raksturo materiāla iekšējos spriegumus. Pēc literatūras datiem [45] un eksperimentāli iegūtajiem lielumiem izvēlas *CLT* materiāla vērtības $0,0001$; $0,0100$; $0,0199$; ar soli $0,0099 \text{ kg/m}$. Skatīt 2.9. tabulu.

X_2 – parametra β vērtības, kas raksturo materiāla stiprību. Pēc eksperimentāliem datiem, kas redzamas 2.8. tabulā, izvēlas vērtības 2892; 4241, jo tās ir BR2 un BR3 klasēm, kurām ir vienāds koeficients α , bet dažādi parametri β un trešā vērtība tiek izvēlēta 5590 $\text{kg} \times \text{m/s}^2$, lai saglabātu soli 1349 $\text{kg} \times \text{m/s}^2$, kas ir difference starp pirmajām divām parametra β vērtībām.

Parametru vērtības un aproksimācijas kļūdas noteikšana parādīta 2.9. tabulā, kurā parametra P aprēķina pēc Ponceleta formulas (1.8.),

$$P = \frac{0,008 \text{ kg}}{2 \times 0,0001 \text{ kg/m}} \ln \left(1 + \frac{0,0001 \text{ kg/m} \cdot (345,1 \text{ m/s})^2}{2892 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2} \right) = 0,1644 \text{ m}.$$

bet parametra atvasinājums ir regresijas vienādojums pēc diviem vadāmiem faktoriem, piemēram, 1. gadījumā iegūts:

$$P' = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_{12} X_1 X_2 + b_{11} X_1^2 + b_{22} X_2^2 \quad (1.54.)$$

kur b_0, b_1, b_2 – regresa koeficienti pie atbilstošiem mainīgiem (faktoriem);

$$P' = 0,328497 - 4,21802 \times 0,0001 - 7,18719 \times 10^{-5} \times 2892 + 0,000561583 \times 0,0001 \times 2892 + 23,467 \times 0,0001^2 + 5,0555 \times 10^{-9} \times 2892^2 = 0,01627 \text{ m}.$$

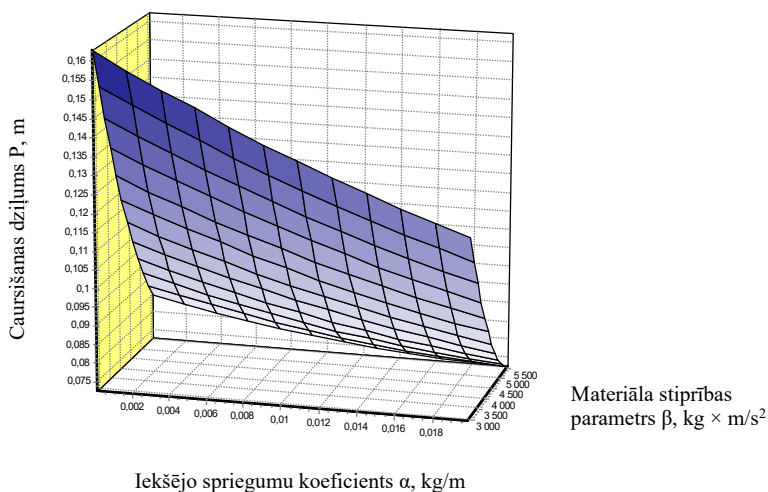
Lai noskaidrotu racionālākās parametru vērtības, ar datorprogrammas EdaOpt palīdzību (vai analītiski) tiek iegūti regresa koeficienti:

b_0 .	0,328497
b_1	-4,21802
b_2	-7,18719 $\times 10^{-5}$
b_{11}	23,467
b_{12}	0,000561583
b_{22}	5,0555 $\times 10^{-9}$

Optimizācijas uzdevums ir atrast tādus parametru lielumus, ar kuriem mērķa funkcija sasniedz ekstrēmu. Tie sanāca $X_1 = \alpha = 0,0968 \text{ kg/m}$ un $X_2 = \beta = 3467 \text{ kg} \times \text{m/s}^2$, tādā veidā iegūstot caursišanas dziļumu $P = 0,1401 \text{ m} = 140,1 \text{ mm}$

$$P = \frac{0,008 \text{ kg}}{2 \times 0,0968 \text{ kg/m}} \ln \left(1 + \frac{0,0968 \text{ kg/m} \cdot (345,1 \text{ m/s})^2}{3467 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2} \right) = 0,1401 \text{ m},$$

kas būtu teorētiski optimālākais caursišanas dziļums CLT materiālam. 2.9. attēlā grafiski parādīta caursišanas dziļuma P atkarība no parametriem α un β .



2.9. att. Caursišanas dziļuma optimizācijas grafiks atkarībā no parametriem.

Tāpat arī tiek noteikta kļūdas **aproximācija** jeb adekvātuma pārbaude. Rezultātā vidēji tā sanāk 0,203 %, līdz ar to var secināt, ka aprēķinos (regresijas vienādojuma koeficientos) rupjas un neuzmanības kļūdas (>20 %) nav pieļautas. Šie lielumi ir optimāli ballistikas gadījumam.

Ballistikajos pētījumos papildus jautājums ir par sprādziena drošību un šķembu bīstamību. Šis pētījums tiek limitēts ar to, ka netiek fiziski apskatīta materiālu reakcija uz sprādzienu, jo tāds netika pieļauts šajos eksperimentos. Bet no lādiņa šķembām šautuvē zāle tika pasargāta ar biezu audumu, kas neļāva aizejošo ložu atliekām ietekmēt šautuves grīdu un sienas. Šajā eksperimentā pieļaujamās rokas pistoles ātrums ir diapazonā līdz 440 m/s. Viens no skaidrojumiem par šo limitu papildus aktualitāti ir tas, ka uzbrukumos ar granātām rodas šķembas un atlūzas, kuras arī lido ar sprādzienā iegūto ātrumu, kas strauji samazinās.

CLT galīgo elementu analīze

Eksperiments tika teorētiski pārbaudīts, izmantojot *Ansys Workbench* programmatūru *ANSYS 2023R2* un *Explicit Dynamics* galīgo elementu risināšanas moduli, līdzīgi kā *LS-Dyna* lieto pie liela trieciena ātruma īsa laika sadursmju modelēšanas. Galīgo elementu metodē konstrukcija tiek sadalīta diskrētos jeb galīgos elementos, kuriem ir vienkārša ģeometriskā forma. Galīgo elementu modelis tika skaitliski modelēts, lai pārbaudītu iegūtos rezultātus. Šāda eksperimentāla simulācija nodrošina lielāku izpratni par materiāla deformācijām, spriegumiem un lodes un materiāla mijiedarbību. [113]

Parauga ģenerēšanai tika izmantotas *CLT* plāksnes. Ēku drošības jautājumā lielākā daļa ballistisko pētījumu ņem vērā tikai normāles triecienus, kur leņķis starp šāviņa ātruma vektoru un šāviņa normālo vektoru ir nulle, jo tas dod visdziļāko lodes iecurbšanās dziļumu.

Kā pirmie tiek definēti izmantotie materiāli:

- Svins (*NATO 9 mm Parabellum* tipa lodei).
- *CLT* materiāls tiek definēts pašrocīgi, jo tas nav pieejams *ANSYS* materiālu bibliotēkā. Modelēšana ar koksni arī citiem zinātniekiem šķiet izaicinoša. [45]
- *CLT* līmes materiāls netiek specifiski norādīts, jo tā ietekme uz materiāla viendabīgumu ir minimāla, kā arī tas apgrūtinātu procesa simulāciju līmes slāņa vietā mazo režģa izmēru dēļ. Līmes slāņa biezums ir gandrīz neievērojams attiecībā pret pārējā materiāla biezumu.

Zemāk 2.10. un 2.11. attēlos parādīti secīgi *CLT* un svina materiāla īpašību ekrānšāviņi *Ansys* materiālu bibliotēkā.

Properties of Outline Row 6: CLT-materials				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Density	550	kg m ⁻³	
3	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			
4	Coefficient of Thermal Expansion	6.93E-06	C ⁻¹	
5	Reference Temperature	0	C	
6	Isotropic Elasticity			
7	Derive from	Young's Modulus...		
8	Young's Modulus	11000	MPa	
9	Poisson's Ratio	0.33		
10	Bulk Modulus	1.078E+10	Pa	
11	Shear Modulus	4.1353E+09	Pa	
12	Field Variables			
13	Temperature	Yes		
14	Shear Angle	No		
15	Degradation Factor	No		
16	Tensile Yield Strength	14	MPa	
17	Compressive Yield Strength	24	MPa	
18	Tensile Ultimate Strength	30	MPa	
19	Isotropic Thermal Conductivity	0.324	W m ⁻¹ C ⁻¹	
20	Specific Heat	1680	J kg ⁻¹ C ⁻¹	
21	Isotropic Resistivity	1.1E+06	ohm m	

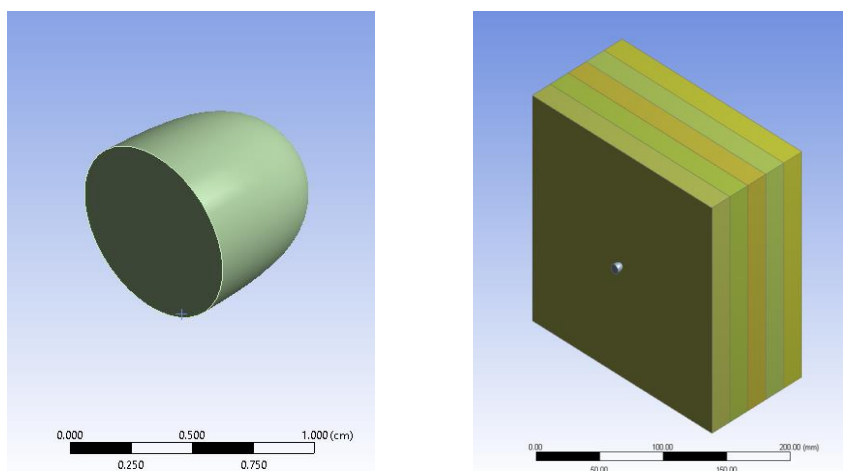
2.10. att. *CLT* materiāla fizikālās īpašības.

Properties of Outline Row 8: LEAD				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Density	11340	kg m ⁻³	
3	Specific Heat	124	J kg ⁻¹ C ⁻¹	
4	Steinberg Guinan Strength			
5	Initial Yield Stress Y	8E+06	Pa	
6	Maximum Yield Stress Ymax	1E+08	Pa	
7	Hardening Constant B	110		
8	Hardening Exponent n	0.52		
9	Derivative dG/dP GP	1		
10	Derivative dG/dT GT	-9.976E+06	Pa C ⁻¹	
11	Derivative dY/dP YP	0.0009304		
12	Melting Temperature Tmelt	486.85	C	
13	Shear Modulus	8.6E+09	Pa	
14	Shock EOS Linear			
15	Gruneisen Coefficient	2.74		
16	Parameter C1	2006	m s ⁻¹	
17	Parameter S1	1.429		
18	Parameter Quadratic S2	0	s m ⁻¹	

2.11. att. Svina lodes materiāla īpašības.

Modeļa ģeometrijas izveide

Kad materiāli ir definēti un izvēlēti, tiek izveidots lodes un *CLT* bloka ģeometriskie objekti *Ansys Design Modeler* vidē (2.12. att.). Objekti tiek veidoti kā cietā tipa (*solid*) objekti. Lode tiek veidota vienkāršotā formā, lai saglabātu vēlāk nepieciešamā režģa elementu kvalitāti, ņemot vērā *NATO Parabellum* 9 mm lodes dimensijas.

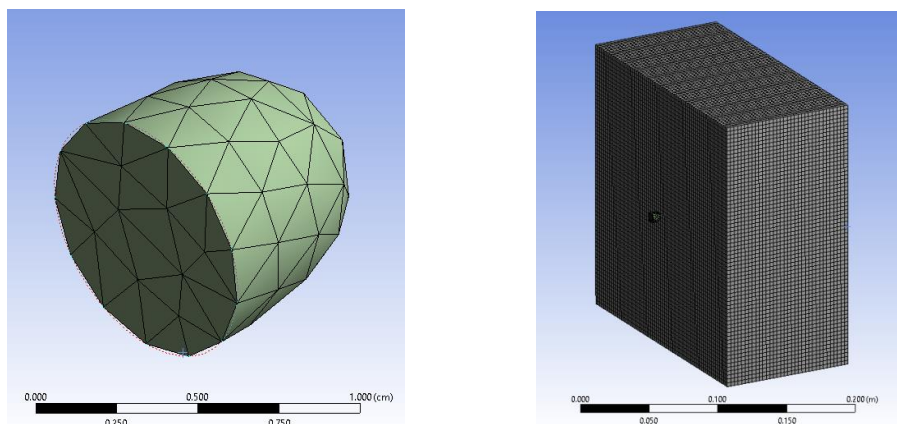


2.12. att. Svina lode un *CLT* (20-20-20-20-20) materiāla ģeometrijas.

Modeļa režģis

Datorsimulācijas modelēšanas metode izmanto galīgo elementu režģi, kas nepieciešams procesa simulācijas nodrošināšanai. *CLT* plāksnes režģa izveidei tiek lietota *Hex* tipa galīgo elementu metode (6 skaldņu kubi ar izmēriem 2 mm x 2 mm x 2 mm). Respektīvi, visas *CLT* plāksnes tiek aizstātas ar maziem 2 mm izmēra kubiņiem, kur kopējais skaits tika izvēlēts tā, lai iegūtu stabilu modeļa konverģenci jeb tas ir kompromiss starp solvera (*Autodyn*) darbības laiku un kvalitāti. Savukārt, 9 mm lodei tiek lietots trijstūra piramīdu galīgo elementu režģis, kas ir vairāk piemērots lodes ovālās formas veidošanai. Lodes režģa kvalitāte tās formas dēļ tika vairākkārt pārskatīta, lai novērstu ļoti mazu režģa elementu klātbūtni, kas būtiski ietekmē

risinājuma atrašanas (t.i. simulācijas) laiku. Kopējais elementu skaits tika izvēlēts virs 150 000, kas izvēlēts, kā labākais kompromiss starp procesa simulācijas laiku un precizitāti. Lodes un CLT plāksnes galīgo elementu režģis *Ansys* vidē parādīti 2.13. attēlā.



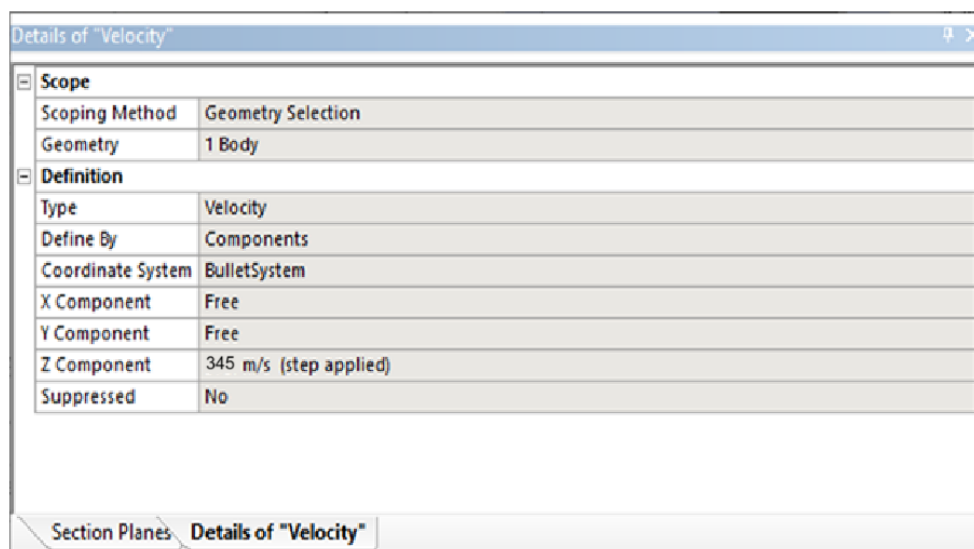
2.13. att. Lodes un CLT plāksnes galīgo elementu režģis *Ansys* vidē.

Explicit Dynamics analītiskie uzstādījumi

Modelis iesākumā netiek pakļauts sākotnējiem stresiem vai deformēts. Vairums *Ansys* analīzes nosacījumi tiek atstāti negrozīti. Manuāli norādīts ir simulācijas laiks 0,0004 sekundes un lodes sākuma lidojuma ātrums 345 m/s. Tiek fiksēts CLT plāksņu atbalsts (*Fixed Support*) visās sānu sienās. Lode tiek arī iegriezta lidojuma laikā, kā tas notiek realitātē, jo ieroča stobrā pēc noklusējuma ir vītne. Tas nodrošina lodei taisnu lidojuma trajektoriju.

Details of "Analysis Settings"	
[-] Analysis Settings Preference	
Type	Program Controlled
[-] Step Controls	
Resume From Cycle	0
Maximum Number of Cycles	1e+07
End Time	4.e-004 s
Maximum Energy Error	100.
Reference Energy Cycle	0
Initial Time Step	Program Controlled
Minimum Time Step	Program Controlled
Maximum Time Step	Program Controlled
Time Step Safety Factor	0.9
Characteristic Dimension	Diagonals
Automatic Mass Scaling	No
Section Planes Details of "Analysis Settings"	

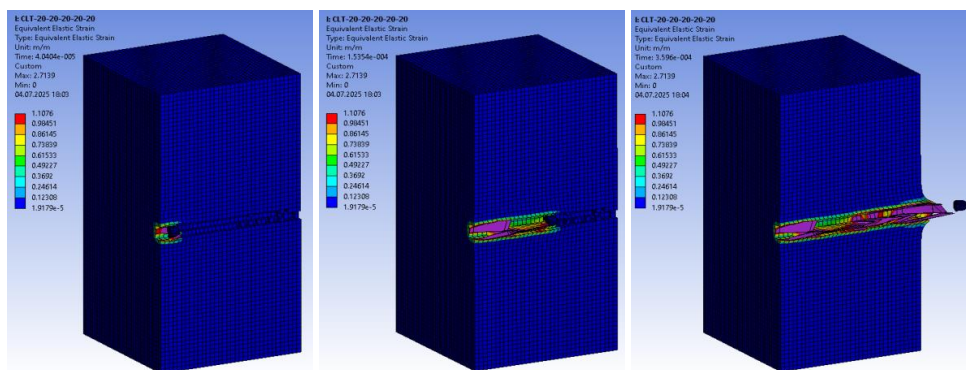
2.14. att. Simulācijas laiks (*End Time*) 0,0004 s.



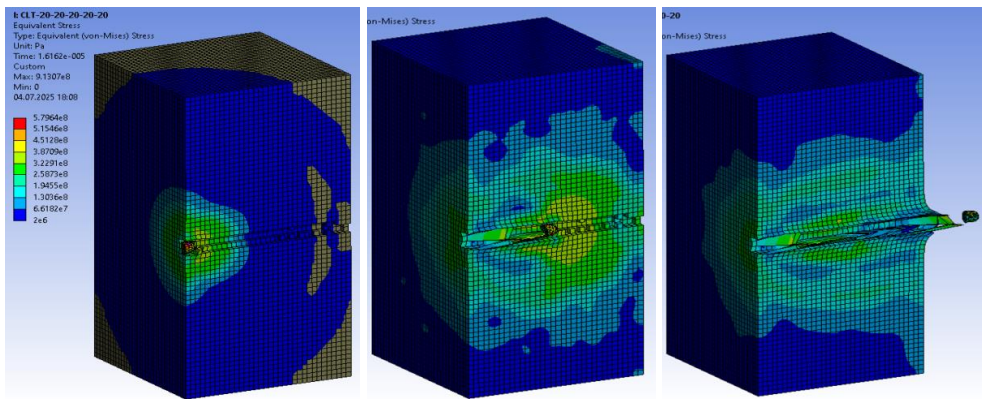
2.14. att. Lodes lidojuma sākuma ātrums 345 m/s.

Simulācija rezultāti

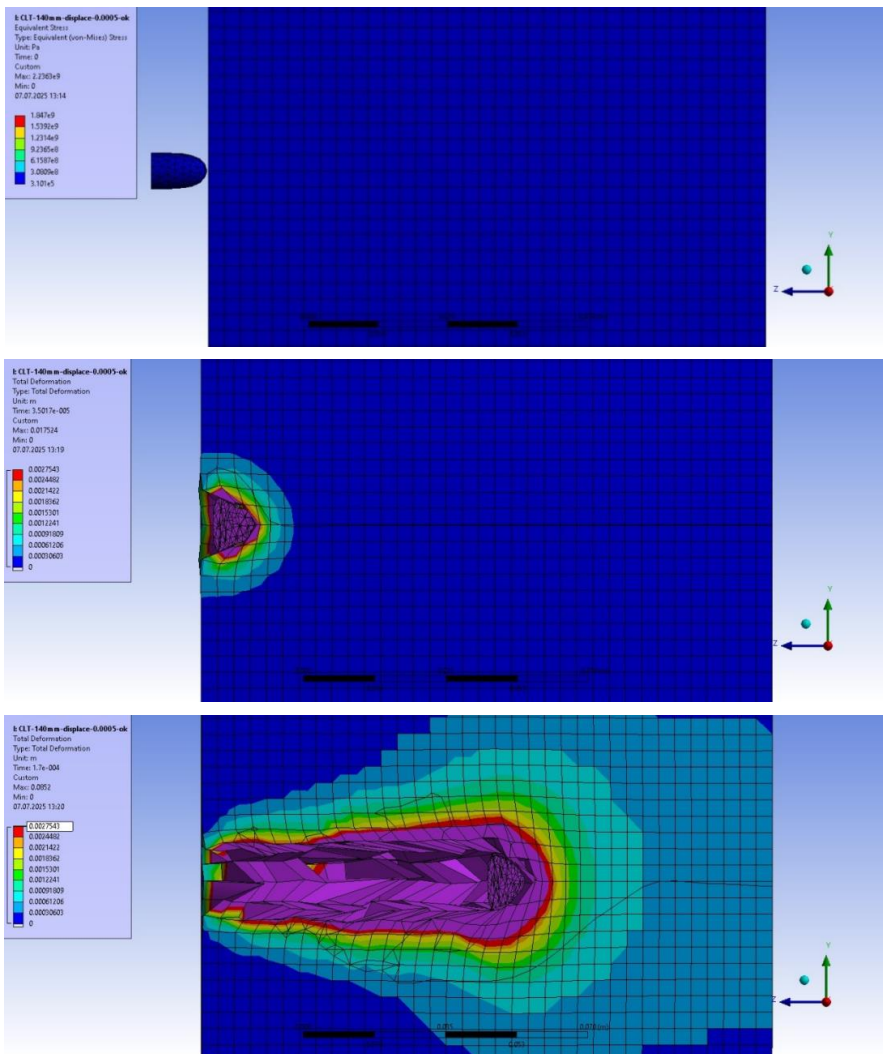
Simulācijas rezultātos, kā interesējošie lielumi tiek apskatīti materiāla elastīgā deformācija (*Equivalent Elastic Strain*) un ekvivalentais spriegums (*Equivalent von-Mises Stress*). Tika simulēta 9 mm lodes mijiedarbība ar C100, C140 un C150 materiāliem. Zemāk 2.15.–2.18. attēlos parādīti iegūtie rezultāti.

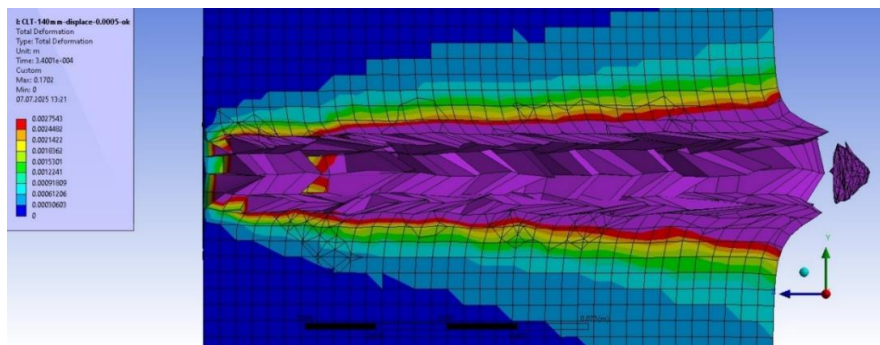


2.15. att. Materiāla elastīgā deformācija (šķērsgriezums). Lodes ieuršanās C100 materiālā un tā caursišana. Redzams, kā CLT materiāls ticis pakļauts ievērojamai deformācijai.



2.16. att. Lodes un *CLT* materiāla ekvivalents spriegums C100 materiālā (šķērsgriezums).
Lode iurbjas *CLT* materiālā un iziet tam cauri atstājot lodes ceļu.





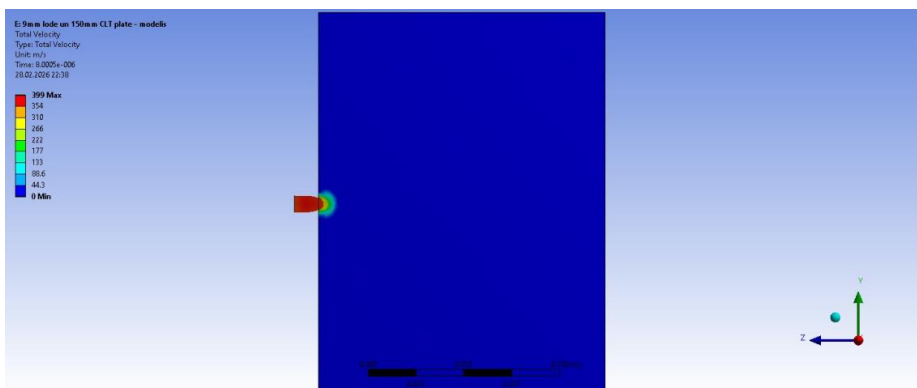
2.17. att. Lodes ieburbšanās C140 materiālā un tā caursišana. Redzams, ka lode ir deformēta.

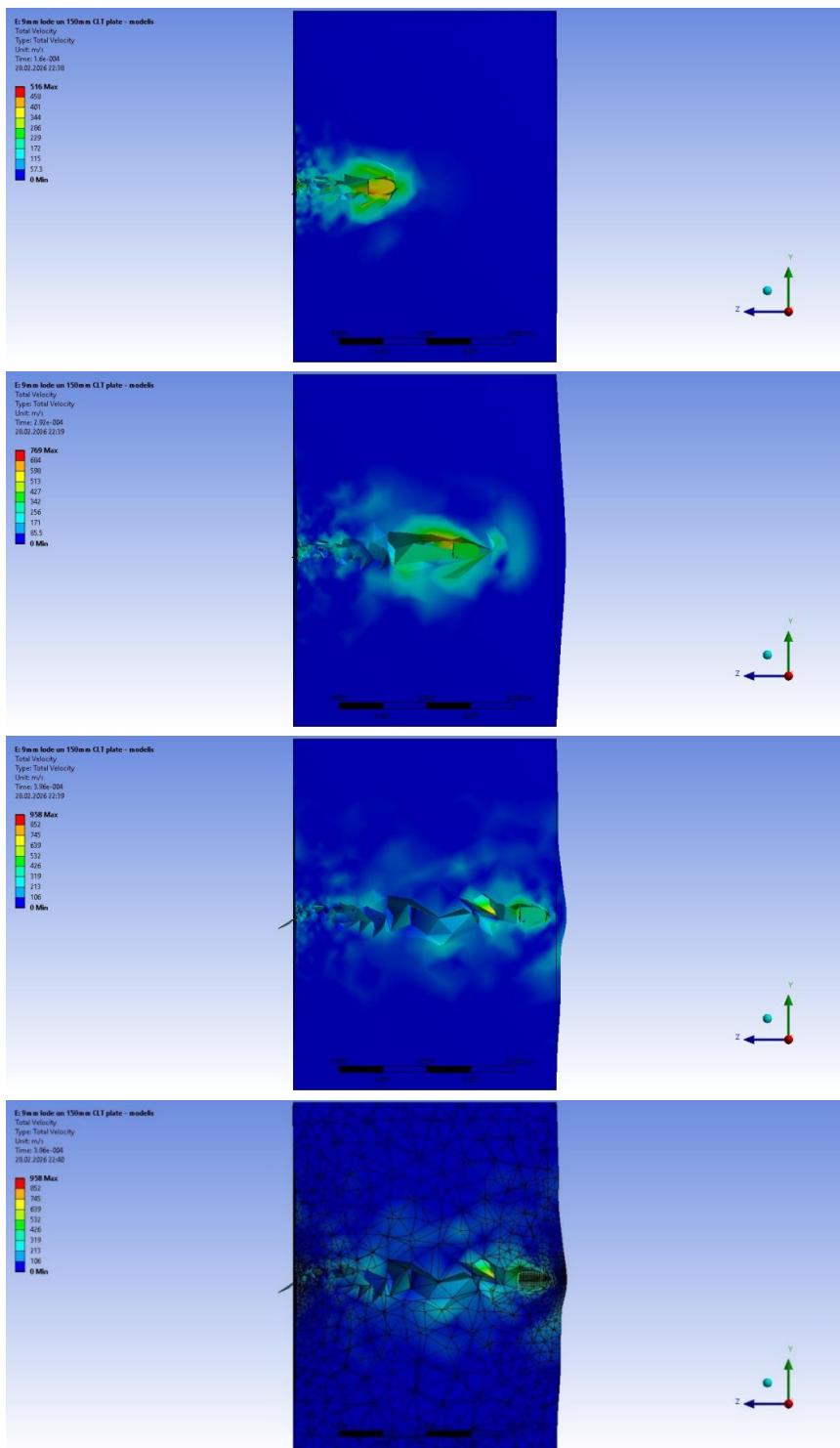
Simulācijas rezultāti dod ieskatu slodzēs, kādām ir pakļauts *CLT* materiāls, kad tajā ieburbjas lode. C100 paraugam lode iziet cauri, kā tas tika novērots eksperimentāli. Lai arī lodes ieejas izmērs ir mazs, tās trieciens materiāla vietā izraisa ievērojamu šoka vilni pār ievērojamu pārējo materiāla daļu, kas vairākkārtīgi pārsniedz lodes izmēru. Arī materiāla destrukcija un galīgo (režģa) elementu izkropļojums ir visai ievērojams lodes ceļā. Lodei, izejot no materiāla, tā bojājums ir izvirzīts izejas virzienā, kas sakrīt ar eksperimentāli novēroto.

C140 materiālā lode iziet cauri. Lai arī lodes ieejas izmērs ir mazs, tās trieciens materiāla vietā izraisa šoka vilni pār ievērojamu materiāla daļu, kas vairākkārtīgi pārsniedz lodes izmēru. Spriežot pēc simulācijas rezultāta, *CLT* materiāls šāda trieciena rezultātā tiek bojāts vairāk nekā lodes ieejas laukuma zonā, tāpēc blakus sekojošu ložu kūlis iespējams spētu aizkļūt arvien tālāk.

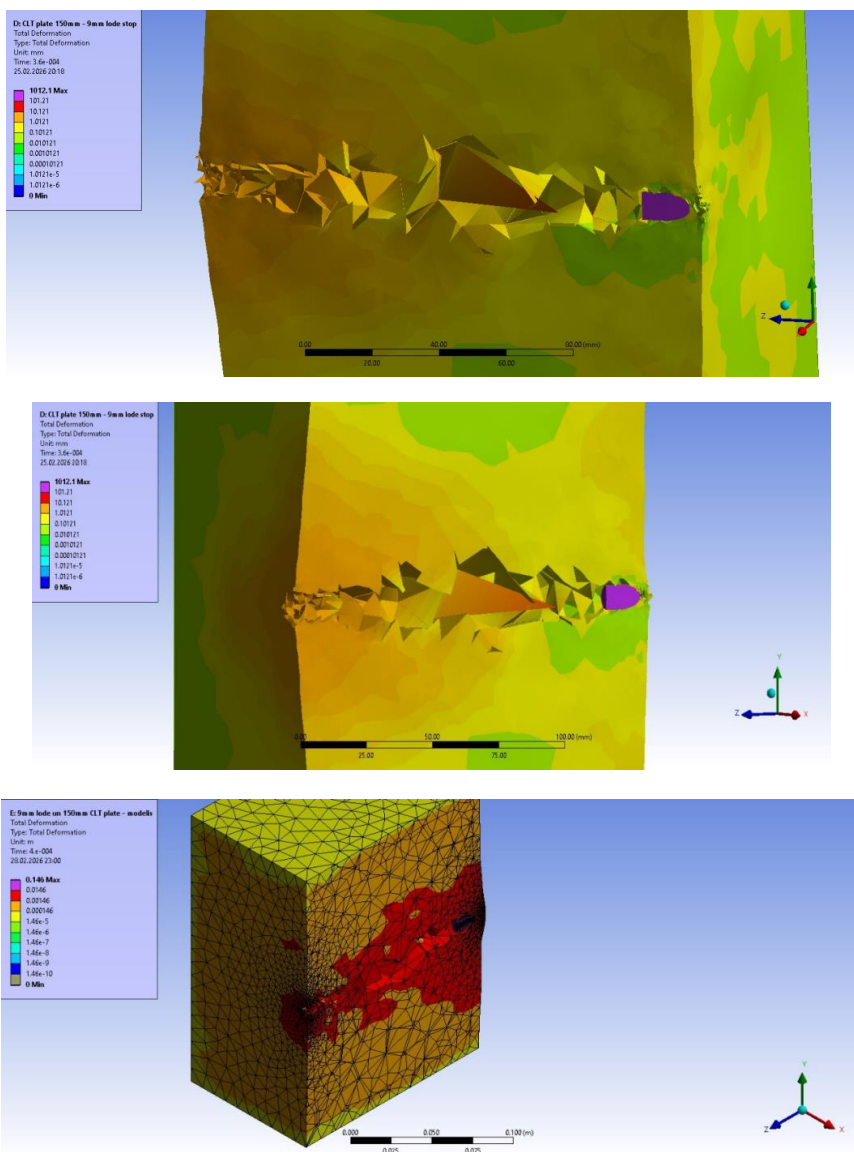
Secinājums ir tāds, ka 9 mm lodi ne 100 mm, ne 140 mm *CLT* no 8 m šāvienu attāluma nespēj aizturēt. Tas sakrīt ar eksperimentāliem rezultātiem. Šos paneļus varētu izmantot kombinācijās ar citiem materiāliem (speciālo ģipša plāksni Torro, *UHMWPE* vai citus) pārvietojamu ēku norobežojošo sienu vajadzībām. Tika secināts, ka ar skaitlisko modeli var pietiekami precīzi (90 %) prognozēt *CLT* materiāla uzvedību lodes ietekmē.

2.18. un 2.19. attēlos redzama lodes darbība C150 materiālā. Lode apstājas tieši pirms izejas 146 mm dziļumā, kas sakrīt ar eksperimenta datiem.





2.18. att. Lodes ceļš C150 materiālā. C150 materiālā lode apstājas tieši pirms materiāls tiek pilnībā penetrēts.



2.19. att. Lodes ieurbšanās C150 materiālā un tā caursišana. Redzama materiāla deformēšanās. C150 materiālā lode apstājas tieši pirms izejas.

Secinājumi

1. Eksperimentāli tika pierādīts, ka katrs 1 mm *CLT* materiāla var apturēt ātrumu pēc lineāra likuma. Vidēji 1 mm *CLT* biezums samazina lodes ātrumu par 1,61 m/s, bet zemākā prognoze 1,1 m/s.
2. Eksperimentāli un teorētiski tika apstiprināts, ka 158–160 mm *CLT* ir robežbiezums, pie kura tiek absorbēti lodes ātrums pie 340 m/s, kas sakrīt ar kinētiskās enerģijas absorbcijas tendencēm un Ponceleta formulas aprēķiniem.

3. Eksperimentālie dati parādīja, ka atbilstoši *EN 1063* klasēm minimālais *CLT* materiāla biezums ir BR1 60 mm, BR2 180 mm (176 mm), BR3 un BR4 200 mm (185 mm un 199 mm).
4. Precīzēti eksperimentā iegūti Ponceleta formulas parametri. Pēc autores ieviestās metodes empīriski noteikta *CLT* šķietamā dinamiskā stiprība R_t atbilstoši BR1, BR2, BR3, BR4 klasēm: 100,24 MPa, 45,48 MPa, 66,70 MPa un 68,93 MPa. Šie lielumi papildina tehnisko datu literatūru un var tikt izmantoti *CLT* materiāla ballistikās veiktspējas modelēšanā.
5. Ponceleta modeļa parametru optimizācija ($\alpha = 0,0968 \text{ kg/m}$; $\beta = 3467 \text{ kg}\times\text{m/s}^2$) dod prognozējamo caursišanas dziļumu nosacīto ekstrēmu 140,1 mm, ar augstu modeļa ticamību (aproximācijas kļūda 0,028 %).
6. Lodes pretestību *CLT* materiālā būtiski ietekmē ārējo slāņu biezums un kopējais slāņu strukturālais izvietojums, ne tikai kopējais paneļa biezums, kas jāņem vērā, projektējot *CLT* ballistikos paneļus.
7. *CLT* nodrošina ievērojamu kinētiskās enerģijas absorbciju, bet pētījumā netika apskatīti sprādziena un fragmentācijas drošības risinājumi, un tas paliek kā nākamo pētījumu virziens.
8. Paraugu modelēšana *Ansys Workbench* programmatūrā atkārtoja eksperimentu rezultātus. Tikai minimāli 150 mm bieža *CLT* siena spēj apstādināt lodi.

Ieteikumi turpmākiem pētījumiem

Turpmākiem pētījumiem, lai tie būtu veiksmīgāki, izvirzīti vairāki ieteikumi:

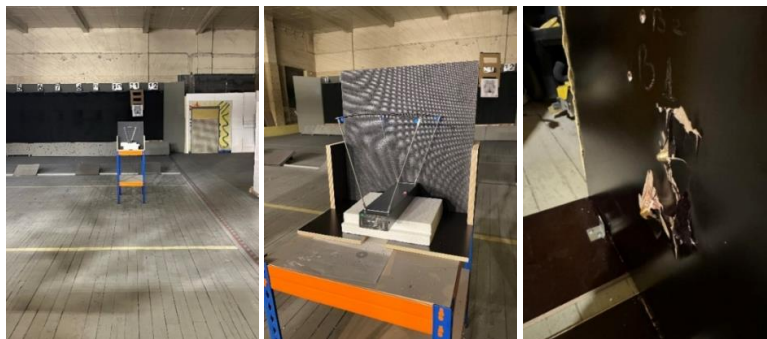
1. Testēt paraugus, izmantojot testēšanas šaujaniekārtu, tādā veidā izvairoties no šāvēja gadījumā kļūdām un spējām iespējamām nevajadzīgām kustībām un iegūtu lielāku rezultātu precizitāti.
2. Testēt *CLT* vienāda biezuma, bet dažādu slāņu līmējumu, lai jau detalizētāk analizētu slāņojuma, kārtu biezumu, skaita un arī līmes ietekmi ballistikajos rezultātos.
3. Paraugā izmantot austo *Kevlar* audumu, kura šķiedras teorijā labāk uztver un izkliedē lodes kinētisko enerģiju pa šķiedras garumu.
4. Lai arī paraugu skaits bija pietiekošs, tomēr skaitliski vairāk eksperimentā iegūto datu daudzums dotu lielāku pārliecību par iegūtajiem rezultātiem.

2.2.3. Saplākšņa eksperimentālā un teorētiskā izpēte

Eksperimentāli noteikts caursišanas dziļums

Eksperimentāli šautuvē testēja 27 mm biezu laminēto vienas plātnes bērza LF-CPR/CE-DoP-01 - Riga ® AS Latvijas Finieris ražoto saplāksni (19 finiera kārtas, līme - formaldehīds), saliktas divas un trīs vienkārši savienotas plātnes. Lai arī saplākšņa pārbaudes tika daļēji veiktas preliminārajos eksperimentos, tomēr tagad uzmanība tiek vērsta uz velosimetra rādījumiem. Pētījuma uzdevums – noteikt atlikušo (*residual*) lodes ātrumu, lādiņam izejot no mērķa materiāla, vai lodes apstāšanās vietu un atbilstošo caursišanas dziļumu gadījumā, ja saplākšņa ballistikā pretestība pārvar lodes kinētisko enerģiju. Saplākšņa mērītais blīvums ir 770 kg/m^3 un mitrums 5,0 %. Paraugu izmēri ir kvadrāta formā $(500 \pm 5) \text{ mm} \times (500 \pm 5) \text{ mm}$, kā to nosaka standarts *EN 1063*. Testējamie paraugi tika brīvi iestiprināti rāmī, lai nepieļautu ballistikā trieciena papildus ietekmi (izkustēšanos) uz mērķa materiālu. Eksperimenta telpas apstākļi sakrita ar 2.4. nodaļas apstākļiem (temperatūra $+10,4 \text{ }^\circ\text{C}$ un 72 % mitrums), jo tie notika secīgi.

2.19. attēlā parādīta eksperimenta norise šautuvē. Attēlā “a” redzams šaušanas attālums līdz mērķa paraugam (8,315 metri), un attēlā “b” redzams ātruma mērītājs jeb velosimēturs materiālā izejošās lodes ātruma noteikšanai. C attēlā redzams jau ložu deformētais saplākšnis. Deformācijas ir relatīvi nelielas. Plaisas vērojamas galvenokārt laminētajā ārējā slānī. Saplākšnim veidojas neregulāras formas šķembas krustenisko slāņu dēļ. Koksne parasti lūzt gar šķiedru, šķiedru virzienā. Šķembas izplatās no lodes iziešanas punkta uz āru lodes ceļa virzienā, visbiežāk ārpusē veidojot nelīdzenu lūzuma “konusu”, kas ir viegli saskatāms.



a

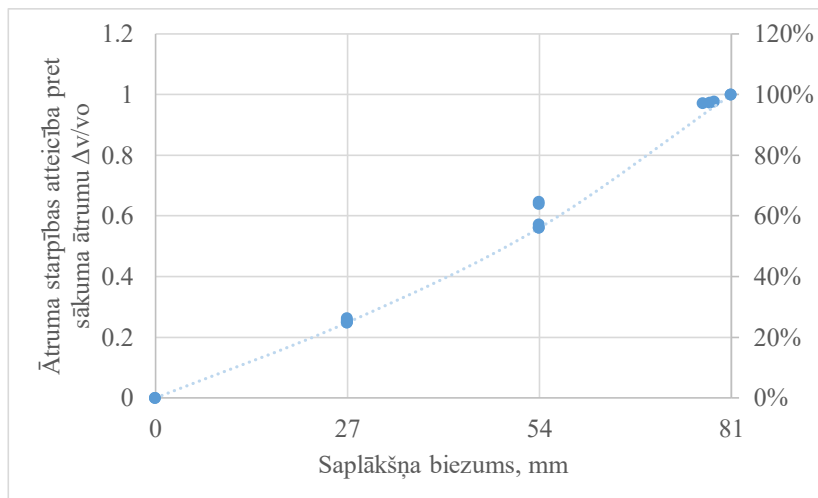
b

c

2.19. att. Eksperiments šautuvē (a), ātruma mērītājs jeb velosimēturs novietots pirms parauga (b) un lodes iestrēgšana trešajā saplākšņa plātnē (c).

Rezultāti

Viena saplākšņa plātne samazināja lodes ātrumu vidēji par 85,8 m/s, kas ir nepilni 25 % no lodes sākuma ātruma 345,1 m/s un tikai 32 % no nepieciešamās kinētiskās enerģijas, lai atbilstu BR2 klasei. Lode izgāja plāksnei cauri, kas bija vērojams arī pirmreizējās pārbaudēs.

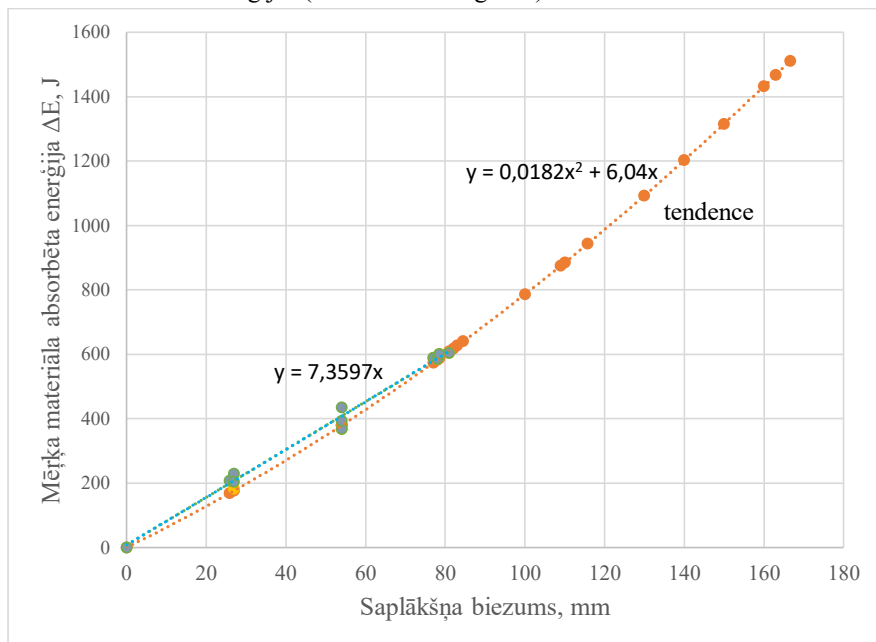


2.20. att. Saplākšņa materiāla absorbētās ātruma starpības pret lodes sākuma ātrumu attiecība atkarībā no materiāla biezuma.

Divas kopā saliktas plātnes samazināja lodes ātrumu vidēji 204,4 m/s, kas ir 57 % no ātruma 339,7 m/s, ar kādu lode iedarbojās uz materiālu pirms caursīšanas, un 59 % no slāpējamās

enerģijas BR2 klasei. Tas arī bija paredzams, jo pirmā testa rezultāti un aprēķini (2.1. apakšnodaļā) parādīja viennozīmīgu divu plāksņu nespēju pretoties lodei. 2.20. attēlā parādīti testēšanas rezultāti.

Eksperimentāli pārbaudot trīs plātnes jeb $3 \times 27 \text{ mm} = 81 \text{ mm}$ saplāksni, lodes iestrēga trešajā plāksnē, kā tas redzams 4.16. c attēlā, radot caursišanas dziļumu 79 mm, kas ir 72 % no nepieciešamās kinētiskās enerģijas (lodes masa ir 8 gramu).



2.21. att. Saplākšņa materiāla absorbētā enerģija atkarībā no materiāla biezuma. Zaļais apzīmējums ir eksperimentu rezultāti. Oranžā taisne – ekstrapolēta tendence.

Tā kā lodes sākuma ātrums nesakrīt ar maksimāli novērtēto BR2 aizsardzības klasei, tad pēc empīriskiem datiem (grafiks 4.18. attēlā) tika noteikts, ka 84,5 mm biezs saplāksnis garantēti atbilstu BR2 aizsardzības klasei. Grafikos 4.17. un 4.18. attēlos var novērot otrās pakāpes polinoma sakarības. Kvadrātiskā locekļa klātbūtne rāda, ka, palielinoties saplākšņa biezumam, lodes ātruma zudums pieaug arvien straujāk jeb materiāls absorbē arvien vairāk trieciena impulsa.

Tātad rezultāti sakrīt ar teorētiskajiem – ka 81 mm saplākšņa nodrošina lodes ar ieiešanas ātrumu 340,5 m/s apturi, tomēr te jau pieslēdzas dažādi aizsardzības kritēriji – nodrošina lodes apturēšanu pēc viena aizsardzības kritērija (skatīt 1.8. att. un 1.9. att. 1.9. apakšnodaļā), bet nenodrošina pēc otra. Ņemot vērā, ka BR2 klases maksimālais lodes sākuma ātrums ir 400 m/s un lodes masa ir 8,0 gramu, kas veido 640 J enerģijas, tad nepieciešams 87 mm biezs saplāksnis, lai apturētu lodi. Ja jebkura saplākšņa biezuma plātne, kas mazāka par 87 mm, savieno ar, piemēram, Kevlar slāņu plātne, UHMWPE, speciālā ģipša plāksnes vai starp plātnēm ir gaisa spraugas, tad no grafika var nolasīt šī slāņa potenciālo enerģijas absorbēšanas spēju. Grafiku turpinājuma tendenci biezākiem saplākšņa paraugiem var iegūt ar ekstrapolācijas palīdzību.

Teorētiski aprēķināts caursišanas dziļums aizsardzības klasēm

Zinātniskajā pētījumā zinātnieki *Koene* un *Willemsen* [57] pēc Ponceleta formulas, kad mērķa materiālam saplāksnim Janka cietība ir 5,01 kN, mitrums 12,7 % un blīvums 682 kg/m³, pie uzdotā saplākšņa iekšējo spriegumu koeficienta $\alpha = (0,0167 \pm 0,0040)$ kg/m un materiāla stiprības parametra $\beta = (5053 \pm 200)$ kg $\times$ m/s², var iegūt caursišanas dziļumu $P = (77,7 \pm 23,4)$ mm. Absolutā kļūda iegūta netiešās kļūdas aprēķina ceļā. Šī novirze ir 30 % liela. Līdz ar to P iespējamais diapazons ir (54,3 mm ÷ 101,1 mm), kas ir ļoti plašs rezultātu intervāls. Tāpēc būtu lietderīgi atrast šos formulas parametrus precīzākam caursišanas dziļumam.

Pamatojoties uz iegūtajiem datiem par patērēto kinētisko enerģiju konkrētam saplākšņa biezumam, no grafika (4.18. att.) tika nolasīts saplākšņa minimāli nepieciešamais biezums katrai aizsardzības klasei (pēc *EN 1063*). Tie bija attiecīgi BR1 ÷ BR4 klasēm 26 mm, 85 mm, 122 mm un 167 mm. Iegūtie sienas biezumi jeb caursišanas dziļumi drošības nolūkos tiek noapaļoti uz augšu līdz 1 mm. Ņemot vērā, ka α jeb materiāla iekšējo spriegumu koeficients ir vienāds ar mērķa blīvuma ρ , lodes formas koeficienta C un lodes šķērsriezuma laukuma A reizinājumu, caur Ponceleta formulu tika iegūti materiāla stiprības parametri β katrai aizsardzības klasei. Dotie ložu sākuma ātrumi un lodes masas ir noteikti pēc standarta *EN 1063*. Sākuma ātrums BR2 klasei atšķiras no eksperimentāli pētītā maksimālā 345,1 m/s. Redzams, ka lodes masai ir būtiska nozīme caursišanas dziļuma noteikšanai. Iegūtie caursišanas dziļumiem būtu jāpiemēro vēl drošības kritērijs, palielinot saplākšņa slāņu skaitu uz biezāko pusi.

Izmantojot formulu (1.10.), nosaka materiāla šķietamo dinamisko stiprību R_t , MPa, kas ir unikāla tieši katram mērķa materiālam kombinācijā ar aizsardzības klasi. Tātad empīriskā ceļā ir iegūta bērza saplākšņa šķietami dinamiskā stiprība atbilstoši BR1, BR2, BR3, BR4 klasēm ir 238,46 MPa, 99,29 MPa, 98,84 MPa un 76,85 MPa, kas ļauj ar Ponceleta formulas palīdzību aprēķināt saplākšņa jebkura biezuma lodes caursišanas dziļumu. BR1 ir vājāka (mazjaudas pistole), tāpēc tā šķietamā dinamiskā pretestība ir krasi atšķirīga.

Šķietamās dinamiskās stiprības R_t aprēķināšana BR2 aizsardzības klasei:

- 1) Eksperimentu ceļā nosaka mērķa absorbēto ātrumu

$$\Delta v = v_r - v_o = 340,5 - 145,3 = 195,2 \text{ m/s (54 mm, } 2 \times \text{ plāksnes)}$$

- 2) Eksperimentu ceļā nosaka mērķa absorbēto ātruma kvadrātu

$$v_r^2 - v_o^2 = 340,5^2 - 145,3^2 = 94828,16 \text{ m}^2/\text{s}^2$$

- 3) Pēc kinētiskās enerģijas pamatformulas (1.53) aprēķina lodes absorbēto enerģiju.

$$E_{\text{kin}} = \frac{0,008 \text{ kg} \cdot 94828,16 \text{ m}^2/\text{s}^2}{2} = 379,3 \text{ J}$$

- 4) Izveido grafiku: absorbētās enerģijas atkarību no mērķa biezuma BR1, BR2 aizsardzības klasēm, veidojot tendenci aizsardzības klasēm BR3 un BR4.

Skatīt 2.21. attēlu.

- 5) No grafika nolasā katra materiāla biezumu (kas būtu vienāds ar minimālo caursišanas dziļumu P) atkarībā no BR1–BR4 klases nepieciešamās enerģijas.

Skatīt 2.10. tabulu. BR2 klasei $P = 84,5$ mm.

- 6) Izmantojot Ponceleta formulu (1.8), tiek aprēķināts materiāla stiprības parametrs β , to izsakot. Formula arī sastāv no lodes masas, ātruma un α – materiāla iekšējo spriegumu koeficienta, kas ir vienāds ar mērķa blīvuma ρ , lodes formas koeficienta C un lodes šķērsriezuma laukuma A reizinājumu, kg/m.

$$\alpha = \rho \cdot C \cdot A = 700 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,342 \cdot 6,36 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 = 0,0167 \text{ kg/m},$$

kur lodes laukums A pie 9 mm lodes diametra:

$$A = \pi \cdot \frac{d^2}{4} = \pi \cdot \frac{0,009 \text{ m}^2}{4} = 6,36 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2.$$

Materiāla stiprības parametru β iegūst izsakot to no (1.8.) formulas:

$$\beta = \frac{\alpha \cdot v_0^2}{e \cdot \frac{2 \cdot P \cdot \alpha}{m} - 1} = \frac{0,0167 \text{ kg/m} \cdot (400 \text{ m/s})^2}{e \cdot \frac{2 \cdot 0,0845 \text{ m} \cdot 0,0167 \text{ kg/m}}{0,008 \text{ kg}} - 1} = 6313 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2.$$

- 7) Aprēķina šķietamo dinamisko stiprību R_t , materiāla stiprības parametru β izdalot ar lodes šķēsgriezuma laukumu A, formula (1.10).

$$R_t = \frac{\beta}{A} = \frac{6313 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2}{6,36 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2} = 99,29 \text{ MPa}.$$

Absolūtā kļūda aprēķināta no iesaistīto lielumu mazākās iedaļas vērtībām.

Pārējām aizsardzības klasēm aprēķini parādīti 2.10. tabulā.

2.10. tabula

Lodes un saplākšņa raksturlielumi katrai aizsardzības klasei

Aizsardzības klases saskaņā ar EN1063	Lodes raksturlielumi						Materiāla raksturlielumi					
	Masa	Sākuma ātrums	Kinētiskā enerģija	Formas koef.	Diametrs	Šķēsgriezuma laukums	Bļivums	Iekšējo spriegumu koeficients	Cauršanas dziļums	Stiprības parametrs	Šķietamā dinamiskā stiprība	Absolūtā kļūda
	m, g	v_0 , m/s	E, J	C	d, mm	A, m ²	ρ , kg/m ³	α , kg/m	P, mm	β , kg×m/s ²	R_t , MPa	ΔR_t , MPa
BR1	2,6	360	168	0,34	5,7	2,46E-05	770	0,0067	26	6082	238,46	1,04
BR2	8,0	400	640	0,342	9,0	6,36E-05	770	0,0167	84,5	6313	99,29	0,45
BR3	10,2	430	943	0,34	9,0	6,36E-05	770	0,0167	122	6284	98,84	0,65
BR4	15,6	440	1510	0,30	10,9	9,33E-05	770	0,0212	167	7167	76,85	0,68

Šie šķietami dinamiskās stiprības ir lielumi, ar ko tiktu papildināti tehnisko datu literatūras dati saplākšņa materiāla ballistikās veikspējas noteikšanai. Iegūtie dati prognozētu apstākļus sagatavojoties citam eksperimentam vai reālajiem apstākļiem.

Pēc *UFC* standarta piedāvātās formulas (1.51.), pielīdzinot bērsa saplākšņa cietību 2205 *lb*f (9,828 kN), caursiņas dziļums BR2 aizsardzības klasei tika noteikts 82,4 mm, kas ir nedaudz mazāk nekā noteikts eksperimentāli 84,5 mm. Lai arī prognoze ir 3% robežās, tomēr šī formula ir vairāk paredzēta tērauda mērķiem.

Parametru optimizācijas analīze pēc saplākšņa materiāla īpašību koeficientiem

Mainīgie faktori:

X_1 – koeficienta α vērtības, kas raksturo saplākšņa materiāla iekšējos spriegumus. Izvēlas vērtības 0,0067; 0,0167; 0,0267; ar soli 0,0167 kg/m, balstoties uz zinātniskiem eksperimentiem literatūrā [61]. Skatīt 2.11. tabulu.

X_2 – parametra β vērtības, kas raksturo materiāla stiprību. Pēc eksperimentāliem datiem, kas redzamas 2.10. tabulā, izvēlas vērtības 6082; 6313, jo tās ir BR1 un BR2 klasēm un trešā vērtība tiek izvēlēta 6544 kg×m/s², lai saglabātu soli 231 kg×m/s².

Parametru vērtības un aproksimācijas kļūdas noteikšana parādīta 2.11. tabulā, kurā parametra P aprēķina pēc Ponceleta formulas (1.8.),

$$P = \frac{0,008kg}{2 \cdot 0,0067 kg/m} \ln \left(1 + \frac{0,0001kg/m \cdot (345,1m/s)^2}{6082 kg \cdot m/s^2} \right) = 0,07360 m.$$

bet parametra atvasinājums ir regresijas vienādojums pēc diviem vadāmiem faktoriem, piemēram, 1. gadījumā tas iegūts pēc 1.54. formulas:

$$P' = 0,197059 - 1,47574 \times 0,0067 - 2,71784 \times 10^{-5} \times 6082 + 0,00012987 \times 0,0067 \times 6082 + 4,66666666 \times 0,0067^2 + 1,24935 \times 10^{-9} \times 6082^2 = 0,07359 m.$$

2.11. tabula

Parametru vērtības un aproksimācijas kļūdas A noteikšana

Nr.p.k.	Faktors X ₁ (α), kg/m	Faktors X ₂ (β), kg × m/s ²	Parametrs P, m	Parametra atvasinājums P'	Novirze ε _i	Aproksimācija (vidējā novirze)
1	0,0067	6082	0,07360	0,07359	0,01%	0,011 %
2	0,0067	6313	0,07106	0,07109	-0,04%	
3	0,0067	6544	0,06869	0,06872	-0,05%	
4	0,0167	6082	0,06777	0,06782	-0,08%	
5	0,0167	6313	0,06560	0,06562	-0,04%	
6	0,0167	6544	0,06356	0,06356	0,01%	
7	0,0267	6082	0,06301	0,06299	0,03%	
8	0,0267	6313	0,06111	0,06109	0,04%	
9	0,0267	6544	0,05933	0,05932	0,01%	

Lai noskaidrotu racionālākās parametru vērtības, ar datorprogrammas EdaOpt palīdzību tiek iegūti regresijas vienādojuma koeficienti:

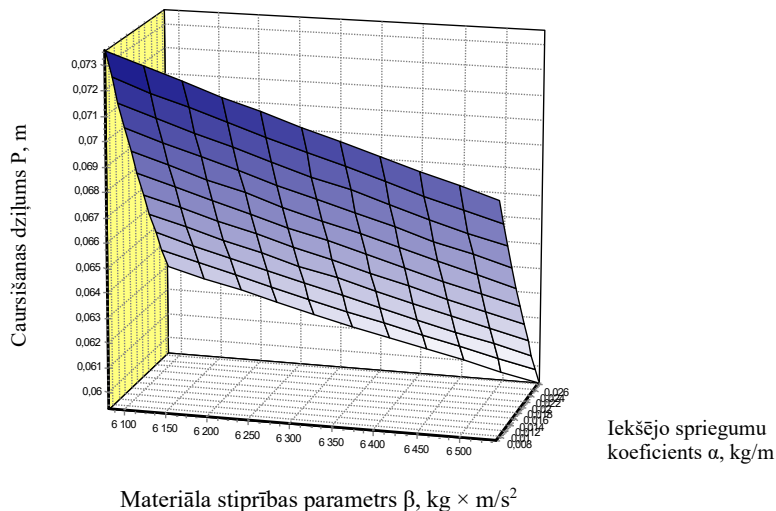
$$\begin{aligned} b_0 &= 0,197059 \\ b_1 &= -1,47574 \\ b_2 &= -2,71784 \times 10^{-5} \\ b_{11} &= 4,66666666 \\ b_{12} &= 0,00012987 \\ b_{22} &= 1,24935 \times 10^{-9} \end{aligned}$$

Optimizācijas uzdevuma mērķis ir identificēt tādu parametru lielumu kopumu, ar kuriem mērķa funkcija sasniedz atbilstoši maksimumu vai minimumu. Tie sanāca X₁= α= 0,0153 kg/m un X₂= β= 5874 kg × m/s², tādā veidā iegūstot caursišanas dziļumu P = 0,0805 m = 80,5 mm

$$P = \frac{0,008kg}{2 \cdot 0,0153 kg/m} \ln \left(1 + \frac{0,0153kg/m \cdot (345,1m/s)^2}{5874 kg \cdot m/s^2} \right) = 0,0805 m,$$

kas būtu teorētiski optimālākais caursišanas dziļums saplākšņa materiālam.

Šajā gadījumā ir nosacītā optimizācija jeb nosacītais ekstrēms, jo uzdotajā diapazonā maksimālā un minimālā vērtība atrodama uz diapazona robežām. 2.23. attēlā trīsdimensionālā grafikā parādīta caursišanas dziļuma P atkarība no atšķirīgajiem parametriem α un β BR2 klasei pēc EN 1063. Tāpat arī tiek noteikta kļūdas aproksimācija jeb adekvātuma pārbaude, kas izpildās, ja rezultāts tuvinās nullei. Rezultātā vidēji tā sanāk 0,011 %, līdz ar to var secināt, ka aprēķinos (regresijas vienādojuma koeficientos) rupjas un neuzmanības kļūdas (>20 %) nav pieļautas. Šie lielumi ir optimāli ballistikas gadījumam.



2.22. att. Caursišanas dziļuma optimizācijas grafiks atkarībā no parametriem.

Secinājumi

1. Eksperimentāli apstiprināta lodes kinētiskās enerģijas absorbcijas atkarība no bērza saplākšņa biezuma. Viena 27 mm plātne samazina lodes ātrumu vidēji par 85,8 m/s (25 % no sākuma ātruma), divas plātnes – par 204,4 m/s (60 %), savukārt 81 mm (3 slāņi) nodrošina pilnīgu lodes apturēšanu ar caursišanas dziļumu 79 mm. Tādējādi saplākšņa pretestība uzrāda nelineāru, otrās pakāpes polinoma līkni atkarībā no biezuma.
2. Noteikts, ka 81 mm biezs saplākšnis aptur 8 g smagu lodi ar sākuma ātrumu no 339,5 m/s līdz 345,1 m/s, bet tas nesasniedz BR2 aizsardzības klases maksimālo enerģiju (sākuma ātrums 400 m/s, kinētiskā enerģija 640 J). Balstoties uz grafiku un eksperimentālā ceļā iegūto ekstrapolēto līkni, BR2 aizsardzības klases atbilstība tiek sasniegta pie 84,5 mm bieza saplākšņa.
3. Mazākais saplākšņa biezums, lai aizturētu standarta *EN 1063* aizsardzības klašu maksimālā sākuma radīto kinētisko enerģiju ir BR1 – 26 mm, BR2 – 85 mm, BR3 – 122 mm, BR4 – 167 mm.
4. Precizēti eksperimentā iegūti Ponceleta formulas parametri. Pēc autores ieviestās metodes empīriski noteikta bērza saplākšņa šķietamā dinamiskā stiprība R_t atbilstoši BR1, BR2, BR3, BR4 klasēm: 238,46 MPa, 99,29 MPa, 98,84 MPa un 76,85 MPa. Šie lielumi papildina tehnisko datu literatūru un var tikt izmantoti saplākšņa materiāla ballistikās veiktspējas modelēšanā.
5. Ponceleta modeļa parametru optimizācija ($\alpha = 0,0153 \text{ kg/m}$; $\beta = 5874 \text{ kg}\times\text{m/s}^2$) dod prognozējamo caursišanas dziļumu nosacīto ekstrēmu 80,5 mm, ar augstu modeļa ticamību (aproximācijas kļūda 0,011 %). Optimizācija Ponceleta formulai parādīja nosacīto ekstrēmu.
6. Pētījuma rezultāti apstiprina, ka bērza saplākšnis ir nosacīti prognozējams, modelējams un kvantitatīvi raksturojams ballistisks materiāls, kura pretložu aizsardzību var matemātiski aprakstīt un izmantot praktisku sienu konstrukciju projektēšanā.

2.2.4. Kopsavilkums

1. *CLT* un saplākšnis var nodrošināt ballistisko aizsardzību rokas ieročiem ar lodes sākuma ātrumu līdz 400 m/s, bet augstākai aizsardzības pakāpei būtu jāpalielina sienas biezums, kas līdz ar to ietekmē izmaksas un papildus svaru. Tādēļ ir jāizvēlas kompromisa risinājums – vai nu izvēlēties zemāku aizsardzību ar zemām izmaksām vai lielāka aizsardzība, bet ar papildus darba un materiālu izmaksām.
 2. Ponceleta formula ir ērti izmantojama formula, lai aprēķinātu lodes caursišanas dziļumu. Tā ietver no mērķa materiāla īpašībām atkarīgus parametrus, kas nav vai tikai daļēji atrodamī zinātniskajā literatūrā, tāpēc tā nav pilnīga, kā arī tā neļauj aprēķināt slāņainu materiālu caursišanas dziļumu, tai skaitā *CLT*. Salīdzinot eksperimentālos rezultātus ar Ponceleta formulas teorētiskajiem, tika secināts, ka ir jāprecizē no materiāla atkarīgie parametri. Atrastie parametri palīdzētu noteikt maksimālo caursišanas dziļumu jeb minimālo sienas biezumu *CLT* un bērsa saplākšņa materiāliem pie cita ieroča lodes ātruma un lodes masas ietvaros: BR1–BR4 aizsardzības klase; 330–450 m/s, 2,5–15,7 g. Egles *CLT* un bērsa saplākšņa ballistisko raksturojumu datubāzei tiek pievienoti jauni parametri.
 3. Eksperimentālo datu apstrāde. Eksperimentāli noteikts, ka *CLT* paneļiem:
 - vidēji *CLT* absorbē 1,61 m/s uz 1 mm biezuma;
 - eksperimentālie dati parādīja, ka atbilstoši *EN 1063* klasēm minimālais *CLT* materiāla biezums ir BR1 60 mm, BR2 180 mm (176 mm), BR3 un BR4 200 mm (185 mm un 199 mm);
 - precizēti eksperimentā iegūti Ponceleta formulas parametri. Pēc autores ieviestās metodes empīriski noteikta *CLT* šķietamā dinamiskā stiprība R_t atbilstoši BR1, BR2, BR3, BR4 klasēm: 100,24 MPa, 45,48 MPa, 66,70 MPa un 68,93 MPa. Šie lielumi papildina tehnisko datu literatūru un var tikt izmantoti *CLT* paneļu ballistiskās veikspējas modelēšanā;
 - skaitliskā modelēšana (Ansys Explicit Dynamics) sprieguma analīze parādīja, ka lode caursit 100 mm un 140 mm *CLT* un apstājas pirms 150 mm, kas saskan ar eksperimentu.
- Saplākšņa paraugiem:
- mazākais saplākšņa biezums, lai aizturētu standarta *EN 1063* aizsardzības klašu maksimālā sākuma radīto kinētisko enerģiju ir BR1 – 26 mm, BR2 – 85 mm, BR3 – 122 mm, BR4 – 167 mm;
 - precizēti eksperimentā iegūti Ponceleta formulas parametri. Pēc autores ieviestās metodes empīriski noteikta bērsa saplākšņa šķietamā dinamiskā stiprība R_t atbilstoši BR1, BR2, BR3, BR4 klasēm: 238,46 MPa, 99,29 MPa, 98,84 MPa un 76,85 MPa. Šie lielumi papildina tehnisko literatūru un izmantojami saplākšņa ballistiskās veikspējas modelēšanā.
4. Empīrisko datu pielietojums aizsardzības klašu noteikšanai.
Pamatojoties uz *EN 1063*, noteikts minimālais ložudrošais biezums katram materiālam (2.12. tab.):

Materiālu minimālo biezumu salīdzinājums savā starpā un starp klasēm

Aizsardzības klase	Lodes masa (EN 1063), g	Ātrums, m/s	CLT min. biezums, mm	Saplākšņa min. biezums, mm	Atšķirība biezumos, %
BR1	2,6	360	60	26	57
BR2	8,0	400	176 (~180)	85	52
BR3	10,2	430	185 (~200)	122	34
BR4	15,6	440	199 (~200)	167	16

BR1 un BR2 aizsardzības klasēm bērza saplāksnis uzrāda par 54% augstāku ballistisko efektivitāti nekā CLT. Toties BR1 līdz BR4 klasēm – par 40 %. Tā kā atšķirība efektivitātē samazinās, tad jāsecina, ka būtu jāveic papildus pētījumi tieši BR3 un BR4 klasēm, lai precīzāk noteiktu minimālo materiāla biezumu lodes pretestībai un pierādītos šī vai cita tendence.

5. Racionālo parametru noteikšana jeb Optimizācija BR2 klasei

CLT materiālam (α , β)

$$\alpha = 0,0968 \text{ kg/m} \quad \beta = 3467 \text{ kg} \times \text{m/s}^2$$

Nosacītais optimālais caursišanas dziļums $P=140,1 \text{ mm}$.

Saplākšņa materiālam

$$\alpha = 0,0167 \text{ kg/m} \quad \beta = 5874 \text{ kg} \times \text{m/s}^2$$

Nosacītais optimālais caursišanas dziļums $P=80,5 \text{ mm}$.

Optimizācijā aproksimācijas kļūda $< 0,2 \%$, kas norāda uz matemātiskā modeļa precizitāti.

6. Šie veikumi nodrošina teorētisko un eksperimentālo pamatu metodoloģijas izveidei par minimālo sienas biezumu noteikšanu līmētiem kokmateriāliem.

3. METODOLOĢIJA BALLISTISKĀS PRETESTĪBAS NOVĒRTĒŠANAI

Lai nodrošinātu pētījuma validitāti un atbilstību mērījumu standartiem, tiek izstrādāta pētījuma metodoloģija, kura jāievēro cikliski darba gaitā. Vispārīgajā ballistikas eksperimenta metodoloģijā svarīgākie posmi ir pētījuma koncepta izstrāde, pamatojoties uz teorētiskās literatūras analīzi, eksperimentālo datu izlases veidošana, rezultātu analīze un verifikācija un datu pielāgošana citām aizsardzības klasēm datu aprobācijai.

Metodoloģijas kopsavilkums veikts, balstoties uz apskatīto zinātnisko literatūru, īpaši ņemti vērā K. Sanborn, L. Koene un M. T. Lo Ricco zinātniskie darbi. Metodoloģijas sistēmā izmantota kvalitatīvā metode, kurā izklāstīti pieci punkti, kas parāda pētījuma veikšanas soļus – kāds ir minimāli nepieciešamais sienas biezums *CLT* un bērsa saplākšņa sienām atkarībā no nepieciešamās aizsardzības klases BR1 un BR2 saskaņā ar standartu *EN 1063*.

3.1. Vispārīgās metodoloģijas algoritms

Vispārīgā metodoloģija eksperimentālam darbam tiek iedalīta 5 posmos:

Vispārīgā metodoloģija eksperimentālam darbam tiek iedalīta piecos posmos:

1. daļa ir teorētiskā daļa, kas ietver literatūras analīzi par esošajām ložu drošajām sienām, zinātniskiem atklājumiem, salīdzinājumu, un to teorētisko modeļu pielāgošanu.

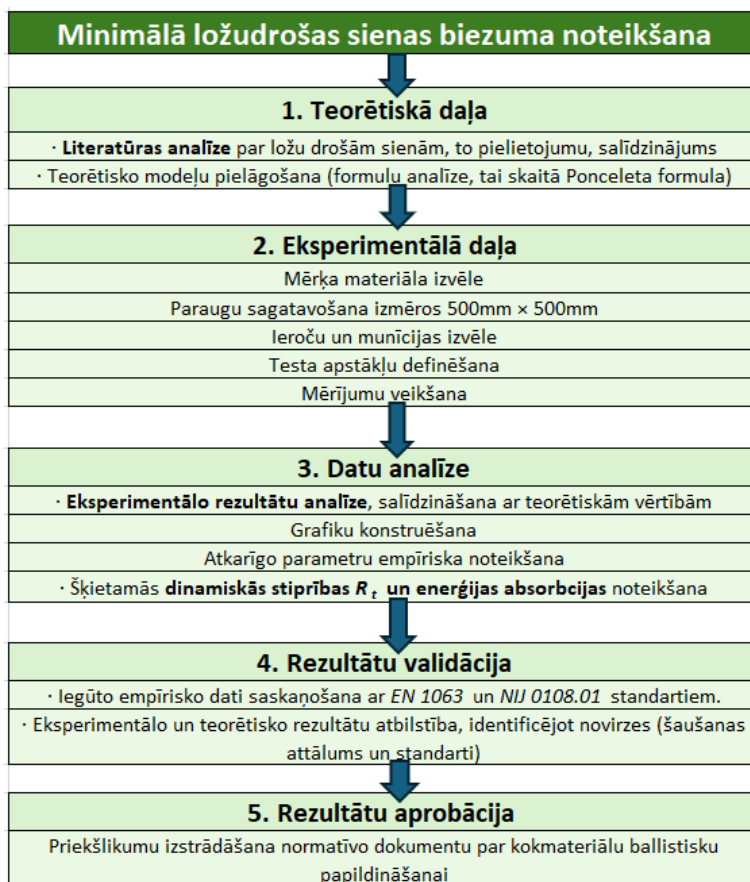
2. daļa ir eksperimentālā daļa, kas ietver mērķa materiāla izvēli (mērķa materiāla koka suga, blīvums, biezums, šķiedru orientācija, mitruma saturs, cietība, līmēto materiālu slāņu skaits, slāņu biezums, līmes veids), paraugu sagatavošanu standartu izmērā, ieroču un munīcijas izvēli atkarībā no eksperimenta mērķa, testa apstākļu definēšanu (šaušanas modeļa izkārtojums, stenda izvietojums, stenda balsti, ložu uztveršanas siena, šāvienu skaits), tehnisko nodrošinājumu (lodes ātruma mērījumi, izmantojot hronogrāfu jeb velosimetru sākuma ātruma un izejošā ātruma noteikšanai pirms un pēc parauga, liela ātruma fiksēšanas kameras, kas dokumentē lodes un mērķa triecienu, deformāciju, fragmentāciju). Caursišanas dziļuma mērīšanai un lodes deformēšanās (fragmentu skaits, izmērs, trāpījumu skaits), kanāla diametra, šķembu noteikšanai tiek izmantota radiogrāfijas un vizualizācijas metode. Papildu aprīkojums: lāzerskenēšana, akustiskie impulsu sensori un mērījumu veikšana, kā arī drošības nodrošinājums (sertificēta šautuve, personāla un eksperimenta dalībnieku drošības instruktāža, legāla munīcija, šaušanas atļaujas). Testēšanas apstākļus pilnībā vai daļēji nosaka ballistiskie standarti *EN 1063*, *EN 1522/DIN EN 1522*; *EN 1523/DIN EN 1523*; *BS 5051*; *UL 752*; *ASTM F1233-08*; *NIJ Standard-0108.01*; dokuments *UFC 4-023-07*.

3. daļa ir eksperimentālo datu analīze (ātrums, enerģija), kas ataino testa rezultātus, un tie tiek salīdzināti ar teorētiskajām vērtībām, konstruēti grafiki, empīriskā ceļā noteikti atkarīgie parametri. Noteiktas vidējās vērtības, ticamības intervāli.

4. daļā notiek rezultātu validācija – pārbaude, vai iegūtie dati saskan ar standartiem un teorētiskajiem modeļiem, identificējot atkāpes no reglamenta.

5. daļa ir rezultātu aprobācija – priekšlikumu izstrādāšana normatīvo dokumentu papildināšanai ballistikas jomā.

Metodoloģijas algoritma shēma parādīta 3.1. attēlā.



3.1. att. Metodoloģijas vispārīgais algoritms.

3.2. Metodoloģijas apraksts

Tālāk aprakstīts ballistikas jomas tiešāks metodoloģijas izklāsts, kurā parādīts, kā praktiski piemērot ballistikas eksperimentus caursiņas dziļuma un parametru noteikšanai, esošie ierobežojumi un pieņēmumi. Metodoloģija balstās uz materiālu mehānisko īpašību analīzi, trieciena kinētiskās enerģijas starpību un empīrisku sakarību starp koksnē blīvumu, lādiņa parametriem un trieciena izraisīto caursiņas dziļumu.

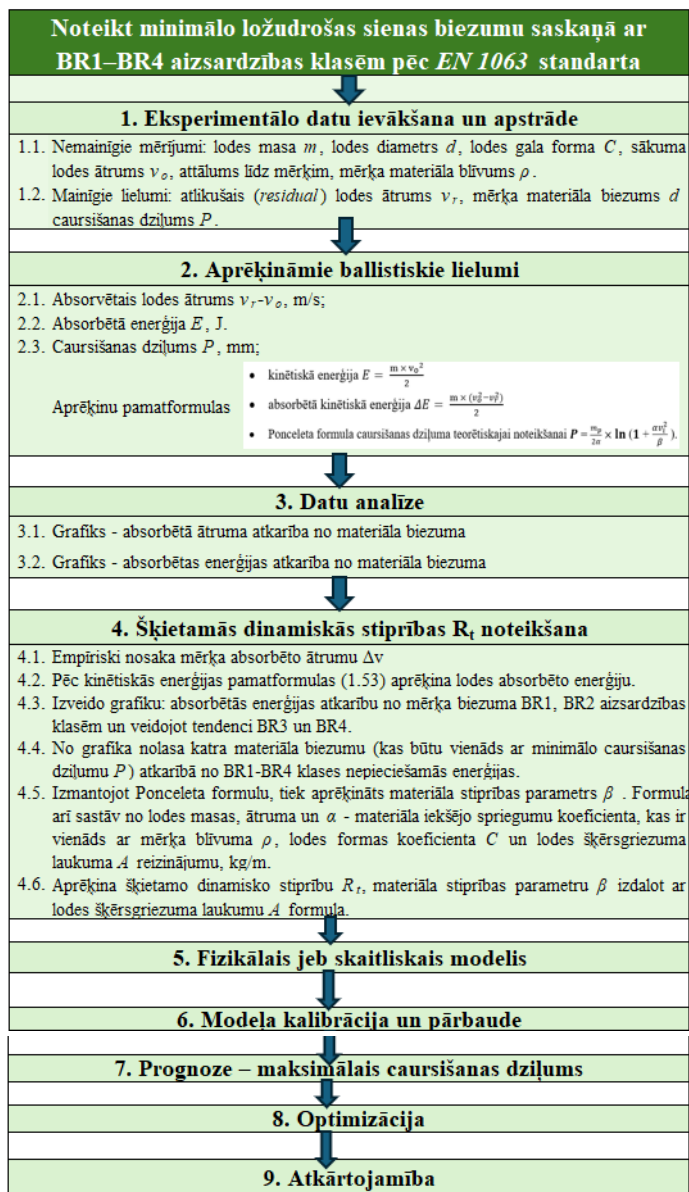
Lai pārbaudītu metodoloģijas precizitāti, tika veikta eksperimentālo rezultātu salīdzināšana ar standarta *EN 1063* noteiktajām robežvērtībām aizsardzības klasēm BR1 un BR2 un izteikta tendence BR3, BR4 klasēm.

Izstrādātā metodoloģija ļauj prognozēt nepieciešamo koksnē sienas biezumu bez pilna procesa eksperimenta veikšanas, tādā veidā samazinot finansiālus ieguldījumus, riska aspektus un paātrinot ložu drošu ēku projektēšanas laiku. Šajā darbā redzama integrētā eksperimentāli-analītiskā un skaitliskā pieeja *CLT* un saplākšņa paneļu ballistikās izturības izpētē, kas dod sasaisti reāliem eksperimentāliem datiem ar teorētiskiem un skaitliskiem modeļiem.

Metodoloģijas praktiskajā daļā aprēķini veikti, izmantojot eksperimentāli noteiktus materiāla parametrus. Par eksperimentālo klasifikācijas bāzi ir izvēlēta tuvinātā BR2 aizsardzības klase, pēc kuras datiem pāriet uz pārējām klasēm, ņemot vērā citas klases trieciena

kinētisko enerģiju, ko nosaka standartizēti lielumi lodes masai un sākuma maksimālajam ātrumam.

3.2. attēlā parādīts metodoloģijas grafisks attēlojums.



3.2. att. Metodoloģijas grafisks attēlojums.

Iegūtie aprēķinu rezultāti ir salīdzināti ar eksperimentālajiem datiem metodoloģijas precizitātes validācijai. Salīdzinājums pierāda, ka piedāvātā metodoloģija ļauj ar pietiekamu ticamību prognozēt līmētas koksnes sienas biezumu aizsardzības klasēm BR1 un BR2 un tendenci BR3, BR4 klasēm pēc standarta EN 1063.

Metodoloģija apvieno eksperimentāli iegūtos datus ar teorētisko modelēšanu, izmantojot Ponceleta formulu, absorbēto enerģiju un galīgo elementu metodi.

Tālāk uzskaitīti metodoloģijas posmi (Eksperimentālo datu iegūšana, Aprēķināmie ballistikas lielumi, Datu analīze, Šķietamās dinamiskās stiprības R_t noteikšanas metode, Fizikālais jeb skaitliskais modelis, Modeļa kalibrācija un pārbaude, Prognoze, Optimizācija, Atkārtojamība) un detalizētāks to skaidrojums.

1. Eksperimentālo datu iegūšana.

- 1.1. Vispirms tiek noteikti nemainīgie lielumi un mērījumi, kas ballistikas gadījumā ir: lodes masa m , lodes diametrs, attiecīgi lodes gala forma C , lodes sākuma ātrums v_o , attālums līdz mērķim, mērķa materiāla blīvums ρ .
- 1.2. Mainīgie lielumi: mērķa materiāla biezums, atlikušais (*residual*) lodes ātrums v_r pēc tam, kad lode ir izgājusi no mērķa parauga, lodes caursišanas dziļums P .
- 1.3. Skaitliskā vienība tiek noteikta starptautiskajā mērvienību SI sistēmā (kg, m, s, J)
- 1.4. Katru lodes trāpījumu atzīmē uz mērķa parauga un fiksē ar fotogrāfiju.
- 1.5. Izmērīts lodes ātrums pirms un pēc trieciena mērķa materiālā.

2. Aprēķināmie ballistikas lielumi.

- 2.1. Absorbētais lodes ātrums Δv , m/s tiek iegūts no atlikušā ātruma un sākuma ātruma starpības;
- 2.2. Absorbētā kinētiskā enerģija ΔE , J tiek iegūta no atlikušā ātruma kvadrāta un sākuma ātruma kvadrāta starpības un masas reizinājuma puses.
- 2.3. Caursišanas dziļums P , mm tiek izmērīts ar nelokāmu stieplīti un rokas lineālu;
- 2.4. Fizikālā modelēšana jeb aprēķinu pamatformulas:

- kinētiskā enerģija $E = \frac{m \times v_o^2}{2}$

- absorbētā kinētiskā enerģija $\Delta E = \frac{m \times (v_o^2 - v_r^2)}{2}$

- Ponceleta formula caursišanas dziļuma teorētiskajai noteikšanai $P = \frac{m_p}{2\alpha} \times \ln \left(1 + \frac{\alpha v_i^2}{\beta} \right)$.

3. Datu analīze.

- 3.1. Izveidotas tabulas un grafiki ar iegūtajiem datiem.
- 3.2. Aprakstīti novērojumi, tendences un prognozes par ietekmējošiem faktoriem.

4. Šķietamās dinamiskās stiprības R_t noteikšanas metode.

- 4.1. Eksperimentu ceļā tiek noteikts mērķa absorbētais ātrums $\Delta v = v_r - v_o$.
- 4.2. Eksperimentu ceļā tiek noteikts mērķa absorbētais ātruma kvadrāts $v_r^2 - v_o^2$.
- 4.3. Pēc kinētiskās enerģijas pamatformulas (1.53. formula) tiek aprēķināta lodes absorbētā enerģija.

4.4. Izveidots grafiks absorbētās enerģijas atkarība no mērķa biezuma BR1, BR2 aizsardzības klasēm, veidojot tendenci aizsardzības klasēm BR3 un BR4.

4.5. No grafika tiek nolasīts katra materiāla biezums (kas būtu vienāds ar minimālo caursišanas dziļumu P) atkarībā no BR1–BR4 klasei nepieciešamās enerģijas.

4.6. Izmantojot Ponceleta formulu (1.8. formula), tiek aprēķināts materiāla stiprības parametrs β .

4.7. Tiek aprēķināta šķietamā dinamiskā stiprība R_t , materiāla stiprības parametru β izdalot ar lodes šķērsgriezuma laukumu A (1.10. formula).

5. Skaitliskais modelis tiek veidots ar galīgo elementu metodes palīdzību, izmantojot *Ansys Workbench* programmatūru *ANSYS 2023R2* un *Explicit Dynamics* galīgo elementu risināšanas moduli, līdzīgi kā *LS-Dyna*, liela trieciena ātruma īsa laika sadursmju modelēšanā.

6. Modeļa kalibrācija un pārbaude. Eksperimentāli iegūto caursišanas dziļumu salīdzinājums ar teorētiski noteiktajiem.
7. Prognoze – maksimālais caursišanas dziļums.
8. Optimizācijas uzdevuma atrisināšana, kas ļauj noteikt optimālo caursišanas dziļumu un modelēt robežvērtības, kas padara darbu metodoloģiski pārāku un praktiski lietojamāku.
9. Atkārtojamība. Atkārtojumu skaits ir 3–5 šāvienī.
10. Drošības ievērošana. Šaušanu un drošības pārraudzību šautuvē veic kompetentas personas. Pirms šaušanas notiek stobra un munīcijas pārbaude un atbilstība drošības standartiem. Šaušanas zonā atrodas tikai šāvējs. Lodes ceļa telpa tiek nodalīta. Novērotāji lieto trokšņa slāpētājus (austiņas).

Atšķirībā no citiem starptautiskiem pētījumiem, šī metodoloģija ir uzlabota ar to, ka tā

- sniedz eksperimentāli pārbaudītus, praktiski izmantojamus datus un rezultātus *CLT* un saplākšņa ballistisku sienu konstrukciju projektēšanai;
- parāda teorētisku un skaitlisku modeļu validāciju ar empīriskajiem rezultātiem.

Tādējādi darba zinātniskā aktualitāte parādās metodoloģijas praktiskajā lietojamībā, integritātē un eksperimentāli – skaitliskajā precizitātē, kas kopā ļauj prognozēt un optimizēt līmētu kokmateriālu aizsargkonstrukciju reakciju pie dažādiem aizsardzības līmeņiem.

Izstrādātā metodoloģija ļauj prognozēt līmēta kokmateriāla paneļu ballistisko veiktspēju, kas ir izmantojama aizsargkonstrukciju projektēšanā.

4. METODOLOĢIJAS PIELĀGOŠANA

Praktisks piemērs ballistikas sienas biezuma projektēšanai

Tālāk parādīts praktisks piemērs ar izejas datiem un ballistisku risinājumu kokmateriālu sienas izmantošanai.

Izejas dati

Itālijas pilsētā Varnā tiek projektēts policijas iecirknis, izmantojot *CLT* kokmateriālus. Pasūtītājs iecirkņa telpās izvēlas konkrētas ballistiski aizsargātas sienas, piemēram, īslaicīgas izolācijas istabā. Atbildīgais inženieris piedāvā 140 mm *CLT* un 27 mm saplākšņa paneļu kombināciju. Vai šāda siena būs ballistiski izturīga? Un – vai ir svarīga materiālu secība, kādā aizsargsiena ir ar lielāku vai mazāku ballistisko pretestību?

Papildu dati

Zināms, ka policistu ieroči ir .44 *Remington Magnum* ieroči jeb BR4 klases pēc *EN 1063*. Tas nozīmē, ka, atšķirībā no eksperimentālā promocijas darba, kurā ir BR2 klase ar lodes masu 8 gramu un lodes sākuma ātrums ir 340 m/s, tagad lodes masa ir 15,6 gramu un lodes sākuma ātrums 440 m/s. Lodes masas un sākuma ātruma salīdzinājums starp klasēm parādīts 4.1. tabulā. Tātad tagad ir jāaizsargājas pret gandrīz 2 reizes smagāku lādiņu un par 99 m/s lielāku lodes sākuma ātrumu, kas veido par 870 džouliem jeb 2,36 reizes lielāku sākuma kinētisko enerģiju. Lai gan siltumizolācijas materiālu integrēšana sienu konstrukcijās palielina sistēmas kopējo ballistisko pretestību, pie tipiskajiem ekspluatācijā lietotajiem slāņu biezumiem šī ietekme ir sekundāra. Detalizēta šī faktora izpēte prasītu atsevišķu eksperimentālu pieeju, kas pārsniedz šī pētījuma uzdevumu ietvaru.

4.1. tabula

Lodes masas un sākuma ātruma salīdzinājums starp klasēm

	Lodes masa <i>m</i> , g	Lodes sākuma ātrums <i>v₀</i> , m/s	Sākuma kinētiskā enerģija <i>E</i> , J
BR2	8	400 ± 10	640
BR4	15,6	440 ± 10	1510
Starpība	7,6	99	870
Reižu palielinājums	1,95	1,29	2,36

Jautājums – vai iegūtie dati palīdz aprēķināt *CLT* un saplākšņa sienas minimālos biezumus, lai siena spētu pretoties nejaušai vai tīšai lodei?

Problēmas risinājums:

1) **Pirmais risinājums** – 140 mm *CLT* un 27 mm saplākšņa paneļu kombinācija.

Pēc iegūtajiem eksperimentālajiem datiem lodei 27 mm biezs saplākšnis aiztur 204 J kinētiskās enerģijas, bet 140 mm biezs *CLT* absorbē garantēti 370 J. Līdz ar to 27 mm biezs saplākšnis + *CLT* 140 mm aiztur tikai 574 J. Tas pasaka, ka izvēlētais risinājums aizturētu tikai 38 % no nepieciešamās enerģijas, kas parādīts 4.2. tabulā.

Pirmā risinājuma apskats

Materiāls	Biezums, mm	Aizturētā enerģija pēc empīriskajiem datiem ΔE , J	Procenti no nepieciešamās 1511 J aizturētās enerģijas
<i>CLT</i>	140	370	24,5 %
Saplāksnis	27	204	13,5 %
Summā	167	574	38 %

2) **Otrais risinājums** – kāda būtu optimālākā *CLT* un saplākšņa kombinācija?

Pēc Ponceleta formulas un darbā noteiktajiem empīriskajiem rezultātiem tiek noteikts, ka 180 mm *CLT* + trīs plāksnes jeb 81 mm saplākšņa aiztur 1374 J lielu enerģiju, kas vēl ir nepietiekama, kā redzams 4.3. tabulā.

4.3. tabula

Otrā risinājuma apskats

Materiāls	Biezums, mm	Aizturētā enerģija pēc empīriskajiem datiem ΔE , J	Procenti no nepieciešamās 1511 J aizturētās enerģijas
<i>CLT</i>	180	770	50,1 %
Saplāksnis	81 (3 × 27)	604	40,0 %
Summā	261	1374	90,1 %

<i>CLT</i>	200	1511	100 %
Saplāksnis	167 (~6 × 28)	1511	100 %

Pēc aprēķiniem iegūst, ka lietderīgi ir apsvērt iespēju izmantot 200 mm biezu *CLT* sienu vai 167 mm saplāksni, bez to kombinācijas, lai aizsargsiena spētu apturēt BR4 aizsardzības klases spēcīgākos ieročus.

3) **Trešais risinājums** – izmantot 180 mm biezu *CLT* paneli un pastiprināt to ar Knauf *Torro* vai Knauf *Diamant* plātnēm.

180 mm *CLT* šādā gadījumā aizsargātu tikai 770 enerģijas vienības jeb 50,1 % no visas nepieciešamās enerģijas. Tātad pilnīgi noteikti nepieciešamas papildu ballistikas plāksnes, lai nodrošinātu ēkas lietotāju fizisku un psiholoģisku komfortu. Vairāk informācijas par *Knauf Torro* vai *Knauf Diamant* plātnēm autores darbā E. Barone, R. Vetra, B. Gaujena, and M. Vilnitis, “*Ordinary gypsum plasterboard and Knauf Torro gypsum plasterboard bullet-proofing*” [37], kurā aprakstīts, ka 28 mm *Torro* ģipškartona plāksne vien spēj absorbēt 9 mm lodi un absorbēt sākotnējo ātrumu 338 m/s. Ballistikas standartu ražotājs *Knauf Torro* plāksni ir testējis ar .44 *Remington Magnum* (ātrums 430–450 m/s), apstiprinot EN 1063 standartā noteikto BR4 rādītāju.

5. PĒTĪJUMI DAUDZSLĀŅU SIENU BALLISTIKĀ

Aprēķinu metodoloģija ir pielāgojama vai daļēji pielāgojama arī daudzslāņu konstrukciju atsevišķu slāņu ballistikās veiktspējas noteikšanai, tāpēc eksperimentāli testētas *CLT* un saplākšņa kombinētas sienu konstrukcijas un noslēgumā teorētiski salīdzinātas astoņas ballistikās sienas.

Šajā nodaļā veikti

- a) ballistiski pētījumi par saliktām koksnes ballistisko pretestības sienām: *CLT* sienām ar siltumizolāciju un adīto aramīda šķiedru audumu, saplākšni-*UHMWPE* plāksni, lai pielāgotu aprēķina metodoloģija papildinošo materiālu ballistikās pretestības noteikšanai vai prognozēšanai,
- b) astoņu ballistisko sienu salīdzinājums, lai sagrupētu jau zināmās un arī autores pētītās ballistikās barjeras to spēju robežās pēc trim papildus aspektiem – cenas, siltumcaurlaidības un svara.

5.1. *CLT* sienu ar siltumizolāciju eksperimentālā un teorētiskā izpēte

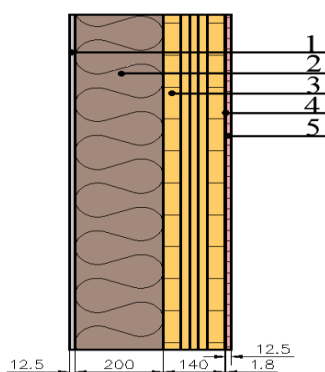
Pētījumā tika testētas divas *CLT* sienas, kuru 140 mm biezums aiztur 58 % no nepieciešamās BR2 aizsardzības klases kinētiskās enerģijas. Taupot materiālu un tādā veidā samazinot sienas svaru, paredzams, ka pieliktie papildus materiāli potenciāli nodrošinās nepieciešamo lodes pretošanās enerģiju. Viena siena (A, A2, B, B2) ar aramīda auduma (*Kevlar*) slāni katrreiz savā pusē *CLT* paraugam un bez aramīda slāņa kā references siena (paraugs C, C2). Sienas sastāvēja no 12,5 mm parastā ģipša plāksnes, 200 mm minerālvates slāņa, 140 mm *CLT* slāņa (40-20-20-20-40 mm) un 12,5 mm ugunsdrošā ģipša plāksne, jo to pieprasa ugunsdrošības prasības. Sienas konstrukcijai par pamatu tika izmantots SIA *CLT* Profī (Latvija) tirgū piedāvātais sienas sastāvs, kurā standartā ir 80 mm biezs *CLT* bloks, bet ballistiskiem mērķiem to eksperimentā aizvieto ar 140 mm biezu bloku. Materiālos pielietotā līme praksē ir karbamīda formaldehīds. Sienas panelis parasti vēl ir papildināts ar tvaika barjeras plēvi un apdares materiālu, kam ballistikā pretestība ir neievērojama, tāpēc tas netika pielietots eksperimentā. Latojuma, uz kā balstās apdares materiāls, ballistikā pretestība būtu būtiska, bet tā kā tas neklāj visu paneli, tad reālā situācijā var gadīties, ka lode to nešķērso, tāpēc koka papildus detaļas netika pievienotas. Eksperimentā kā ballistisks papildinājums tika pievienots aramīda austais *Kevlar* divos slāņos divās variācijās – starp *CLT* un ugunsdrošo ģipša plāksni (paraugs A) un starp siltumizolāciju un *CLT* (paraugs B). Šaušanas notika no abām pusēm *CLT* sienai, pārbaudot, cik un vai *CLT* slānis aptur lodi. Testējamās sienas siltumvadītspēja tika aprēķināta teorētiski, nosakot $U = 0,154 \text{ W}/(\text{m}^2 \times \text{K})$. Pēc teorētiskiem aprēķiniem minerālvates biezums varēja būt arī mazāks, t.i., 150 mm, lai izpildītos LBN 002-19 prasības par apdzīvojamu ēku sienu siltumcaurlaidības maksimālajām vērtībām.

Saliktās *CLT* sienas sastāvs

Sienas sastāvs pa slāņiem sienai A (*Kevlar* audums starp *CLT* un ugunsdrošo ģipša plāksni), slāņu biezumi, esošais blīvums (mērīti un nosvērti paraugi) un salīdzinoši teorētiskais blīvums uzrādīts 5.1. tabulā un 5.1. attēlā. *CLT* materiāls tiek pieņemts kā C24 klases masīvkoksne pēc ražotāja datiem.

CLT sienas sastāvs paraugam A, ar siltumvadītspēju $U = 0,154 \text{ W}/(\text{m}^2 \times \text{K})$

Nr.	Sienas sastāvs	Biezums, mm	Aprēķinātais blīvums, kg/m^3	Ražotāja noteiktais blīvums, kg/m^3
1	Ģipša plāksnes pelēkas <i>Knauf mini GKB</i>	12,5	641,6	641,0
2	Minerālvate <i>Knauf Insulation Ekoboard</i>	200	13,9	13,8
3	CLT, CLT Profi	140	461,7	420 (C24 klase)
4	<i>Kevlar</i> audums x2	$2 \times 0,9$	217,8	222,2
5	Ģipša plāksnes, ugunsdrošas <i>Knauf red GKF</i>	12,5	829,8	800



5.1. att. CLT sienas (A paraugs) kārtu shematisks attēlojums (skatīt kopā ar 5.1. tabulu) un fotouzņēmums, sānskats. (Sarkanā atzīme ir koka rāmis ģipša plāksnes stiprināšanai. Tas nav iekļauts sienas sastāvā un neietekmē eksperimenta gaitu, jo neatrodas lodes ceļā.)

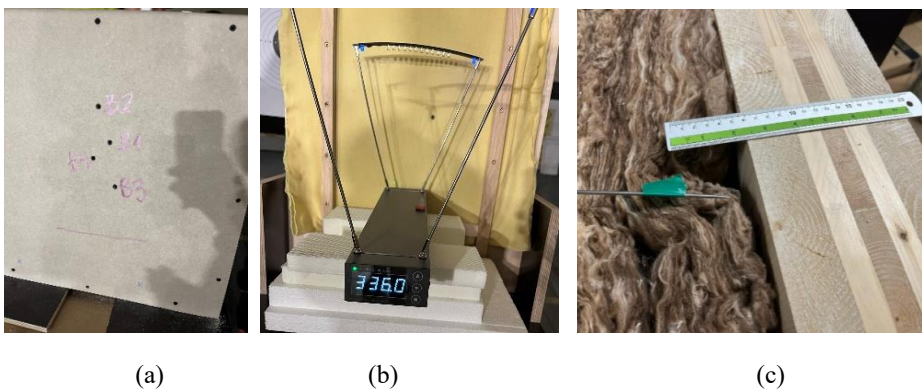
Kā redzams, blīvumi gandrīz sakrīt ar teorētiskajiem, izņemot CLT, bet pieļaujams, ka līmes kārtā veido CLT materiālu smagāku uz vienu kubikvienību, nekā masīvkoksnes normās (Eurocode 5) bez līmes.

Parastajai ģipša plāksnei ir maza ballistiskā pretestība [31]. To izmanto CLT sienās kā uguns aizsardzības slāni, ko pieprasa daļa Eiropas valstu normatīvi par ugunsdrošību koka ēkās. Izmantotais *Kevlar* audums ir adīts (2 pavedienu adījums), nevis austs. Izvēle tika izdarīta atkarībā no tirgus pieejamības. Adīto *Kevlar* audumu izmanto kā papildus aizsardzību abrazīvai videi, piemēram, sportistu apģērbā tādos sporta veidos kā motosports.

Pētījumu apstākļi sakrīt ar 2. nodaļā minētajiem.

Eksperiments un rezultātu analīze

Rezultāti parādīja, ka, šaujot A paraugā virzienā (5.2. a att.) no ārpuses (sākot ar pelēko ģipša plāksni), lodes palika CLT materiālā maksimāli 127 mm dziļumā. Lodes noteicošais lodes ieiešanas dziļums ir nevis vidējais no pieciem, bet maksimālais, jo tieši maksimālais lodes caursišanas dziļums materiālā ir bīstamākais civilajiem ēkas/sienas lietotājiem. *Kevlar* audums pilnībā neapturēja lodes, kā tas bija iecerēts, tās izurbās cauri audumam un iestrēga CLT. Caursišanas maksimālais dziļums saliktajā sienā 339,5 mm (12,5 mm + 200 mm + 127 mm).



5.2. att. CLT sienu paraugi pēc eksperimenta.

Divas no 4 lodēm B parauga siena absorbēja, bet otras divas nespēja apturēt. Caurejošo divu ložu maksimālais atlikušais (*residual*) ātrums bija 57,1 m/s un tāpēc pēc atņemšanas noteikts, ka siena spēj samazināt lodes ātrumu par 289,3 m/s, skaitot no lodes maksimālā ātruma pirms ieiešanas paraugā 345,8 m/s. Necaurejošo ložu caursišanas maksimālais dziļums sienā 343,3 mm (12,5 mm + 200 mm + 1,8 mm + 129 mm). Lodes iestrēga CLT materiālā maksimāli 129 mm dziļumā, nesasniedzot Kevlar audumu slāni. Otrā sienas šaušanas virzienā (paraugam B2) datu nav.

Salīdzinot paraugus A un B, var secināt, ka Kevlar audums rada papildus pretestību, jo caursišanas dziļums paraugā A ir mazāks nekā paraugā B, un paraugs A apturēja visas 4 lodes. Ļoti iespējams tas ir saistīts ar to, ka lodei jāpārvar vēl papildus 1 plakne, lai turpinātu kustību. Lai gan eksperimentālais tests parādīja, ka, ja lodi izšauj tikai caur $2 \times 0,9$ mm Kevlar audumu, tas samazina ātrumu tikai par 5 m/s (skatīt 5.2. b attēlu). Tikai vēlāk teorijā tika atrasts pētījums, ka maz Kevlar auduma slāņi nav efektīvi, lai apturētu šāviņus, bet drīzāk liek šāviņiem turpināt kustību tālāk [konkrētajā gadījumā – ballistikajā gēlā]. Tikai pie palielināta slāņu skaita (12 slāņi), tika novērots, ka lode tiek bremsēta un šāviņa iespiešanās dziļums materiālā samazinās. [77]

References sienai C bez Kevlar lode gāja cauri abos virzienos, tā maksimālais atlikušais ātrums pēc izešanas no sienas bija 43,5 m/s, un siena samazina ātrumu par 296,3 m/s, kas ir līdzīgi kā tad, ja Kevlar audums ir sienā, tāpēc var secināt, ka adītajam Kevlar audumam nav ļoti liela ietekme uz ballistisko pretestību tā struktūras dēļ. Nākošajā pētījumā būtu jāveic ballistikais eksperiments ar austu (nevis adīto) Kevlar audumu, kura šķiedras teorijā labāk uztver un izkliedē lodes kinētisko enerģiju pa šķiedras garumu.

Šaujot no otras sienas puses, kad priekšā ir ugunsdrošā ģipša plāksne, rezultāti ir citādi. Nesimetriskai slāņainai sienai ir būtiski, no kuras materiāla puses tiek šauts.

Paraugs A2 ir paraugs A, šaujot otrā virzienā. Ugunsdrošā ģipša plāksne ar papildus stikla šķiedrām un CLT 140 mm siena apstādina lodi, tā maksimāli ieurbās 76,5 mm dziļumā jeb tikai 64 mm iekš CLT materiāla. Tas nozīmē, ka ugunsdrošajam ģipša plāksnei Knauf Red ar ugunsreakcijas klasi A2-s1,d0 ir salīdzinoši liela ballistiskā pretestība.

References sienā C2 otra virziena atlikušais ātrums lodei pēc izešanas no parauga bija 22,0 m/s un ātrumu starpība ir 317,9 m/s. Sienas caursišanas dziļums pārsniedza sienas biezumu 365 mm, lai gan tikai 1 lode tika izšauta.

Šaušanas rezultāti apkopoti 5.2. tabulā.

5.2. tabula

CLT trīs sienu šaušanas rezultāti

Paraugs	Nr.	Lodes ātrums			Absorbētā enerģija	Cauršanās dziļums*	
		v_0 , m/s	v_r , m/s	Δv , m/s	ΔE , J	visā sienā, mm	tikai CLT, mm
<i>Kevlar</i> starp siltumizolāciju un CLT	A	345,8	0	345,8**	478**	339,5	127
otrā virzienā	A2	345,8	0	345,8**	478**	76,5	64
<i>Kevlar</i> starp CLT un ugunsdrošā ģipša plāksni	B_1a	345,0	0	345,8**	476	343,3	129
	B_1b	341,8	56,8	288,7	454	0	0
otrā virzienā	B2	-	-	-	-	-	-
References siena bez <i>Kevlar</i>	C_1a	339,5	56,6	282,9	448	0	0
	C_1b	339,9	30,3	309,6	458	0	0
otrā virzienā	C2	339,9	22,0	317,9	460	0	0

*neskaitot deformētās lodes izmērus, jo paraugi netika "taisīti vaļā", bet mērīti ar metāla stienīti līdz lodes aizmugurējai daļai.

** lode izgāja sienai cauri, tāpēc absorbētā enerģija pārsniedz minimālo vērtību.

5.3. tabulā parādīta rezultātu analīze, balstoties uz iepriekš eksperimentāli iegūto, ka 140 mm CLT (C140) materiāla absorbē 380 džoulus kinētiskās enerģijas. Lai noteiktu pārējo slāņu nozīmi enerģijas dispācijā, no kopējās sienas parauga absorbētās enerģijas tika atņemta CLT slāņa apslāpētā enerģija.

Izmantojot iepriekš iegūto grafiku (2.8. att.), tiek iegūta absorbētā enerģija. Paraugos A, A2 un B lode apstājās, tāpēc analizējams ir dažāda caursiņas dziļums CLT materiālā. Bet tā kā lode šiem paraugiem izgāja cauri, tad iegūtie lielumi ir izslēdzami no analīzes.

5.3. tabula

CLT trīs sienu šaušanas rezultātu analīze

lodes virziens	Paraugs	Nr.	Lielumi			Absorbētā enerģija	CLT absorbē	vate+ģipš+K
			E_0 J	E_r J	$\Delta v/v_0$, m/s	ΔE J	ΔE J	ΔE J
vate-CLT	<i>Kevlar</i> starp siltumizolāciju un CLT	A	478	0	1,00	478	344	134
CLT-vate	otrā virzienā	A2	478	0	1,00	478	173	305
vate-CLT	<i>Kevlar</i> starp CLT un ugunsdrošā ģipša plāksni	B_1a	476	0	1,00	476	350	118
		B_1b	467	12,9	1,00	454		69
CLT-vate	otrā virzienā	B2	-	-	-	-		
vate-CLT	References siena bez	C_1a	461	12,81	0,83	448		79
vate-CLT	<i>Kevlar</i>	C_1b	462	3,672	0,91	458		81
CLT-vate	otrā virzienā	C2	462	2	0,94	460		97

Paraugiem B, C_1a, C1b un C2 lode neizgāja cauri. Tie pēc aprēķiniem parāda, ka minerālvates+ģipša plāksnes+Kevlar kopā absorbē 69–81 J enerģiju, kas ir salīdzinoši mazs

enerģijas intervāls. No autores pētījuma *Ordinary gypsum plasterboard and Knauf Torro gypsum plasterboard bullet-proofing* zināms, ka viena ģipša plāksne absorbē nelielu kinētiskās enerģijas daudzumu, kā arī to, ka *Kevlar* divu slāņu ietekme nav statistiski nozīmīga, rodas priekšstats par tieši 200 mm minerālvates ballistisko pretestību.

Aprēķinot absorbēto kinētisko enerģiju (formula 1.53.) B, C un C2 paraugiem, tā redzami nesasniedz robežu 640 J, kas atbilstu BR2 klases līmenim.

Secinājumi

1. Adītajam *Kevlar* audumam ir ietekme uz ballistisko pretestību, bet tā nav ievērojama tā struktūras dēļ. Nākotnē būtu jāveic ballistiskais eksperiments ar austu *Kevlar* audumu, kas teorijā labāk uztver un izkliedē lodes kinētisko enerģiju. Turpmākiem ballistiskiem pētījumiem izmantot austu *Kevlar* audumu, kura šķiedras teorijā labāk uztver un izkliedē lodes kinētisko enerģiju pa šķiedras garumu.
2. Rezultāti parādīja, ka 140 mm *CLT* kompozītsiena ar 200 mm minerālvates izolāciju un *Kevlar* slāni starp izolācijas slāni ir pietiekams, lai apturētu lodi, ja tā izšauta līdz 341,6 m/s. Bet tā nenodrošina BR2 līmeņa aizsardzību, jo kinētiskā enerģija nesasniedz BR2 prasītos 640 J.
3. Lodes apturēšanas spēja atšķirās atkarībā no šaušanas virziena un slāņu secības.
4. *CLT* slānis ir galvenais enerģijas absorbētājs, jo lodes iestrēga tieši *CLT* materiālā.
5. Aprēķini parāda, ka minerālvates+ģipša plāksnes+*Kevlar* kopā absorbē 69–81 J kinētisko enerģiju. Ugunsdrošības (ģipša plāksnes) un siltumizolācijas slāņi nevar tikt uzskatīti par nozīmīgu ballistisko aizsargvairogu.
6. Lai *CLT* daudzslāņu siena sasniegtu BR2 aizsardzības līmeni, nepieciešams uzlabot sastāvu, tajā skaitā:
 - palielināts *CLT* biezums (>140 mm),
 - efektīvāks šķiedru slānis (austs *Kevlar* ≥ 12 kārtas vai *UHMWPE*).
7. Iepriekš izstrādātā metodoloģiju ļauj veikt kvantitatīvu novērtējumu un formulēt secinājumus arī par daudzslāņu konstrukciju ballistiskās pretestības raksturlielumiem.

5.2. *UHMWPE*-saplākšņa eksperimentālā un teorētiskā izpēte

Šajā pētījumā paplašināti saplākšņa pētījumi ar saliktajām saplākšņa-*UHMWPE* sienām – izstrādāti slodzi nesoši un nenesoši ēku sienu paneļi, kas izgatavoti, izmantojot *UHMWPE* plātnes dažādās konfigurācijās ar bērsa saplākšni. Ballistiskajā eksperimenta gaitā atklājās, ka paneļu ballistisko reakciju ietekmē materiālu izvietojums panelī. Eksperimentā tika testēti arī atsevišķi *UHMWPE* paneļi dažādā biezumā, lai veiktu materiāla bojājumu monitoringu. Novērojumos tika piefiksēts, ka *UHMWPE* paneļi bez saplākšņa 20 mm un 25 mm biezumā nav piemēroti praktiskai izmantošanai aizsardzībā pret mazkalibra patronu šāviņiem. Materiāla bojājumu rezultāti ir aprakstīti pētījuma darbā, pamatojoties uz fotofiksācijām eksperimentu gaitā. Tika apskatīti iespējami materiāla bojājumi un paneļa ballistiskā izturība atkarībā no paneļu fasādes materiāla. Mērķis ir pārbaudīt, vai polietilēna–saplākšņa plātnes iztur ballistisko slodzi, izmantojot 9 mm kalibra rokas pistoli *Glock 17* Luger lodes.

Šos slodzi nesošos vai nenesošos ēku paneļus paredzēts izmantot gan atsevišķi, gan kompleksai aizsardzībai pret mazkalibra šāviņiem vai sprādziena šķembām, aizsargājoties no tiešas vai nejaušas lodes.

Pētījuma apstākļi

Konkrētie saplākšņa biezums un marka tika izvēlēti tāpēc, ka tie ir salīdzinoši plaši izmantoti, kā arī pietiekami biezs un ar augstu stiprību un cietību, lai prognozētu 9 mm kalibra lodes aizturēšanu. Materiāls darbojas kā lodes sapīšanās "tīkls" kompozītā, lodei deformējoties, un nodrošinot būtiskus enerģijas zudumus šāviņam, izkliedējot tā enerģiju lielākā platībā un tādējādi samazinot tā spēju turpināt kustību. Pētījumā, kur *UHMWPE* panelis tika mehāniski piestiprināts pie *CLT* materiāla, tādā veidā uzlabojot *CLT* materiāla ballistikās īpašības, šis *UHMWPE* panelis bija vienu collu (25,4 mm) biezs un ievietots starp diviem un trīs *CLT* slāņu blokiem, veidojot gandrīz 8 collu (20,32 cm) biezu paraugu. Šādi paraugi palielināja paneļa ballistisko pretestību un bija ievērojami vieglāki nekā izstrādājumi ar metāla plāksnēm [60]. *UHMWPE* kombinācijā ar *CLT* materiālu trūkst kopējās izturības un stingrības, lai to izmantotu kā konstrukcijas paneli. *UHMWPE* materiāls ir dārgs salīdzinājumā ar citiem ložu necaurlaidīgiem materiāliem [8], [55], piemēram, stikla šķiedru, metāla plāksnēm u. c. Skaitliskie rezultāti atklāj, ka materiāla hibridizācija un atšķirīga hibridkompozītu slāņu kārtojuma secība parāda būtisku ietekmi uz materiāla ballistisko veiktspēju. Enerģijas absorbcijas spēja un ballistiskais robežātrums ir jutīgi pret šāviņa priekšgala formu [114].

Šī darba mērķis ir pārbaudīt, vai polietilēna un saplākšņa paneli iztur ballistisko spēku, izmantojot 9 mm kalibra *Glock 17* Luger lodes. Abu materiālu termiskās izplešanās koeficienti nav līdzīgi – *UHMWPE* tas ir $\alpha = 2 \times 10^{-6}$ K [115], bet saplāksnim (20 °C temperatūrā un 65 % relatīvajā mitrumā) $\alpha = 28\text{--}31 \times 10^{-6}$ K.

Eksperiments notika kontrolētos apstākļos Rīgas šautuvē. Gaisa temperatūra eksperimenta laikā bija +5,1...+7,0 °C (janvārī), relatīvais mitrums – 65...70 % (mērījumu ilgums 2 stundas). Ar lodēm šāva pus-profesionāls šāvējs, tādējādi pietuvinot situāciju realitātei.

Ierobežoto testa apstākļu dēļ netika izpildītas EN 1522/23 prasības, piemēram:

- paraugu skaits – katram konstrukcijas variantam nepieciešami vismaz 3 paraugi;
- netika izmantota šāviņa indikācijas folija plāksne;

Materiālu bojājumu rezultāti ir aprakstīti darbā, pamatojoties uz eksperimentos iegūtajiem fotoierakstiem. Tika aplūkoti iespējamie materiāla bojājumi un paneļa ballistikā izturība, atkarībā no paneļa fasādes materiāla.

Paraugu paneļi, uzskaitīti 5.4. tabulā, tika sagatavoti no *UHMWPE*, kas ir 150 mm plati un 20 mm biezi, un laminēta saplākšņa, kas ir 32 mm biezs (1 mm no katras puses ir laminējums), ar izmēriem (500 ± 5) mm $\times$ (500 ± 5) mm. Tie tika mehāniski piestiprināti, izmantojot SPEC 17 cinkotas skrūves ar diametru $\varnothing$ 6 mm, pie speciāli sagatavota koka balsta (1000 mm augsts, 1500 mm plats), lai samazinātu materiāla relaksāciju trieciena brīdī, novēršot netiešu šāviņa radītās enerģijas absorbciju mehānismos. Paraugi tika testēti bez aizmugurējā atbalsta. Saplākšņa paraugi tika izgatavoti no LF-CPR/CE-DoP-01 – Rīga® bērza saplākšņa (AS "Latvijas Finieris") ar laminētu virsmas pārklājumu, līmēta ar fenolformaldehīda līmi. Saskaņota tehniskā specifikācija ar EN 13986+A1:2015. Pētījuma ierobežojums bija izmantot *UHMWPE* materiālu tikai vienā slānī, jo *UHMWPE* materiāls nav ekonomiski visizdevīgākais. Nākotnes uzdevums ir izmantot pārstrādātu *UHMWPE* materiālu, tādējādi samazinot paneļu izmaksas un palielinot ilgtspēju.

Vispirms eksperimentā tika testēti atsevišķi *UHMWPE* paneļi un laminētais saplākšņa materiāls, lai novērtētu ballistiskos bojājumus katrā no tiem. Pirmajā daļā tika testēti četri dažādi materiālu paraugi: Materiāla paraugs Nr. 1 ir 32 mm biezs bērza saplāksnis "Rīga" ar

laminētu virsmas pārklājumu. Materiāla paraugs Nr. 2 ir 2×32 mm bieza bērza saplākšņa plāksne "Rīga" ar virsmas pārklājumu – 2 slāņi, kas mehāniski savienoti ar četrām SPEC 17 metāla skrūvēm Ø6 mm. Kopējais biežums 64 mm. Materiāla paraugs Nr. 3: UHMW PE1000, krāsa balta, biežums 20 mm. Materiāla paraugs Nr. 4: UHMW PE1000, zaļš – biežums 25 mm. Otrkārt, tika veikti eksperimenti ar UHMWPE dažādās kombinācijās ar saplākšni. Paraugi uzrādīti 5.4. tabulā.

5.4. tabula

Izmantoto materiālu ekonometriskie rādītāji (cena noteikta 2022. gada augustā)					
Parauga Nr.	Materiāls	Biezums, mm	Blīvums, kg/m ³	Svars, kg/m ²	Cena, €/m ²
1	Saplākšnis 32 mm	32	670	21,44	26,06
2	Saplākšnis 2×32 mm	64	670	42,88	52,12
3	UHMW PE1000 (balts)	20	930	23,25	310,29
4	UHMW PE1000 (zaļš)	25	930	18,60	256,29

Saskaņā ar EN 1522/23 un EN 1063 BR2 klasi visos testos tika izmantota 9 mm Luger patronas. Eksperimentālā lode bija standarta 9 mm pilnmetāla vara apvalka lode ar 9 mm, 9x19 mm "Parabellum-Luger" munīciju, kas sver 8 gramus. Šā tipa patronas izmanto testos, kuros testējamajai (sertificētajai) konstrukcijai vai materiālam ir deklarēta BR2 ballistiskā izturība. Izstrādātajai plāksnei piemīt īpašības, kas neļauj šāviņiem iekļūt vismaz 9 mm kalibra patronām. Eksperimentā tika izmantota Glock 17 pistole. Tas pieder Austrijas uzņēmuma GmbH GLOCK sērijas pistolēm.

Paraugus testēja ar trieciena ātrumu 345 m/s ar tērauda apvalka teorētiski nedeformējamu lodi 10 metru attālumā no mērķa. Lidojošās lodes diametrs 9 mm un masa 8 grami. Pamatojoties uz veiktajiem aprēķiniem, tika aprēķināta trieciena enerģija jeb kinētiskā enerģija, ko izmanto, lai novērtētu šāviņa radītos bojājumus. Šo materiāla absorbēto enerģiju aprēķina, izmantojot 1.53. formulu. Ja šāviņš izlido cauri mērķim ar atlikušo enerģiju, kas ir tuvu nullei, tiek uzskatīts, ka materiāls ir sasniedzis savu ballistisko robežu [8], [32], [55].

$$E_{\text{kin}} = \frac{0,008\text{kg} \cdot (345\text{m/s})^2}{2} = 476,1 \text{ J}.$$



5.3. att. Caursišanas dziļuma mērījumi.

Eksperimentālais caursišanas dziļums tika mērīts manuāli, izmantojot tērauda stieni ar diametru 3 mm un lineālu ar precizitāti 1 mm (skatīt 5.3. attēlu).

Šim pētījumam ir atsevišķi ierobežojumi:

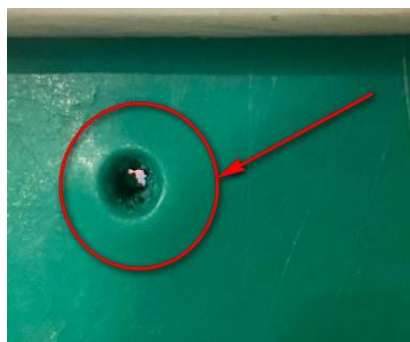
- izmantots tikai *Glock 17* ierocis, 9 mm × 19 mm Luger, ar lodes ātrumu 345 m/s.
- lodes gala forma ir *ogive* veida.
- Šaušanas rezultātā leņķa lielums var būt nejaušs, nevis 90° leņķis starp lodi un virsmu.
- šaušanas poligona temperatūra janvārī ir +6–7 °C
- izmantoti 2 materiāli – saplāksnis un *UHMWPE*.

Saplākšņa un *UHMWPE* paraugu atsevišķie testi

Saplākšņa un *UHMWPE* paraugi atsevišķi tika testēti ar *Glock 17* pistoli 9 mm *Luger* patronu. Šāvienis tika izdarīts no 10 m attāluma. Gaisa temperatūra šautuvē tajā laikā bija +7 °C, relatīvais mitrums 65 %. Paraugi neapturēja lodi, kā arī tas tika paredzēts. Ložu radītos kanālus un izejas skatīt 5.4. un 5.5. attēlus.



5.4. att. 3. paraugs. *UHMW PE1000*, 150 mm plats, biezums 20 mm, balts.



5.5. att. 4. paraugs. *UHMW PE1000*, 150 mm plats, biezums 25 mm, zaļš.

Saplākšņa-polietilēna plātņu testi

Materiāli atsevišķi lodes neapturēja, tāpēc eksperimenta otrajā daļā jāpārbauda, vai šo divu materiālu kombinācija ir ballistiski izturīgāka.

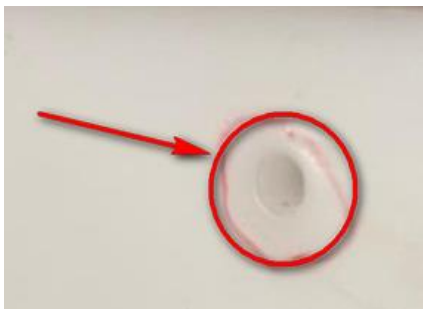
5.5. tabula

Saplākšņa-polietilēna plātņu ložu pretestība

Paneļa Nr.	Pozīcija	Materiāls	Lādiņš	Vai lode izgāja cauri?	Materiāls, kurā lode apstājās	Eksperimentāli izmērītais caursišanas dziļums, mm
1_1	priekšā	20 mm <i>UHMWPE</i>	9 mm <i>Luger</i>	jā	–	>53
	aizmugurē	32 mm saplāksnis				
1_2	priekšā	32 mm saplāksnis		nē	<i>UHMWPE</i>	53 ± 1
	aizmugurē	20 mm <i>UHMWPE</i>				
2_1	priekšā	20 mm <i>UHMWPE</i>		nē	saplāksnis, 2. slānis	61 ± 1
	aizmugurē	2 × 32 mm saplāksnis				
2_2	priekšā	2 × 32 mm saplāksnis		nē	<i>UHMWPE</i>	74 ± 1
	aizmugurē	20 mm <i>UHMWPE</i>				

Tāpēc tika izveidoti nesoši un nenesoši paneļi ēku sienām, izmantojot *UHMWPE* dažādās kombinācijās ar bērza saplāksni. Šīs kombinācijas redzamas arī 5.5. tabulā.

Panelis Nr. 1_1. Lode cauršāva abus materiālus. Rezultātā saplāksnim adhezīvajā slānī ir atslāņojušās 11 krusteniski līmētās bērza saplākšņa loksnes (katra 1,45 mm bieza), 5.6. attēls, 5.7. attēls, no tām trešajā slānī no plātnes malas ir bojājumi koka finiera slānī. Tika veikti 2 kontrolšāvienī, abas lodes netika aizturētas.



5.6. att. 1_1 paraugs. *UHMWPE* 20 mm – saplāksnis 32 mm priekšskats.

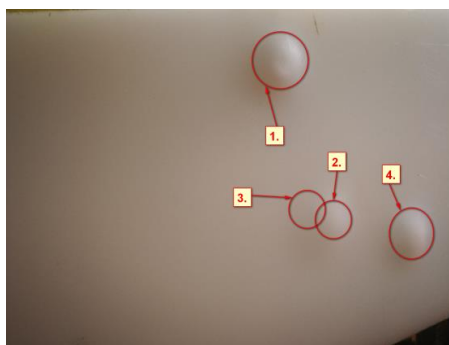


5.7. att. 1_1 paraugs. *UHMWPE* 20 mm – saplāksnis 32 mm sānskats.

Panelis Nr. 1_2. No rokas pistoles tika izdarīti četri šāvienī. Plāksne apturēja lodi ar pirmo šāvienu (5.8. attēlā). Lodes cauršāva saplāksni, bet *UHMWPE* lodi apturēja. Polietilēnā tika konstatētas lokālas deformācijas, kas sakrita ar lodes trajektoriju. Pēc PE paneļa izspiešanas (5.9. attēlā) viduspunktā tika konstatēts materiāla sabiezējums, ko, iespējams, izraisīja straujas iekšējās temperatūras svārstības. Tā kā *UHMWPE* materiāla kušanas temperatūra ir 130 °C, īslaicīgs trieciens šādā temperatūrā neizraisa paliekošu deformāciju. Šāvējs veica vēl trīs kontrolšāvienus. Visas lodes, tostarp Nr. 2 un Nr. 3, tika apstādinātas, tās tika izšautas tuvu viena otrai un tāpēc iestrēga tajā pašā kanālā. Interesanti, ka polietilēna fasādes deformācijas pieaugums netika konstatēts pēc lodes Nr.3 sitiena lodē Nr.2. Iespējams, izšautās lodes enerģija daļēji tika pārnesta uz esošo lodes Nr. 2 kanālu. Temperatūra paaugstinājās, tomēr enerģija nebija pietiekama, lai deformācijas progresētu. Maksimālais eksperimentāli izmērītais iespiešanās dziļums bija 53 mm.



5.8. att. 1_2 paraugs. Saplāksnis–*UHMWPE*.



5.9. att. 1_2 paraugs. Saplāksnis–*UHMWPE*, PE izspiešanās.

2_1 paraugs (5.10. attēls). Lode iespiedās otrajā saplākšņa plāksnē. Eksperimentāli tika izmērīts 61 mm liels caursišanas dziļums. Bija redzams, ka lode caururbusi polietilēna un

saplākšņa pirmo slāni, bet iesprūdusi otrajā saplākšņa slānī. Ballistiskais eksperiments atklāja, ka polietilēna slāņa izvietojums ietekmē ballistisko reakciju.



5.10. att. 2_1 paraugs. *UHMWPE* 20 mm–saplākšnis 32 mm.

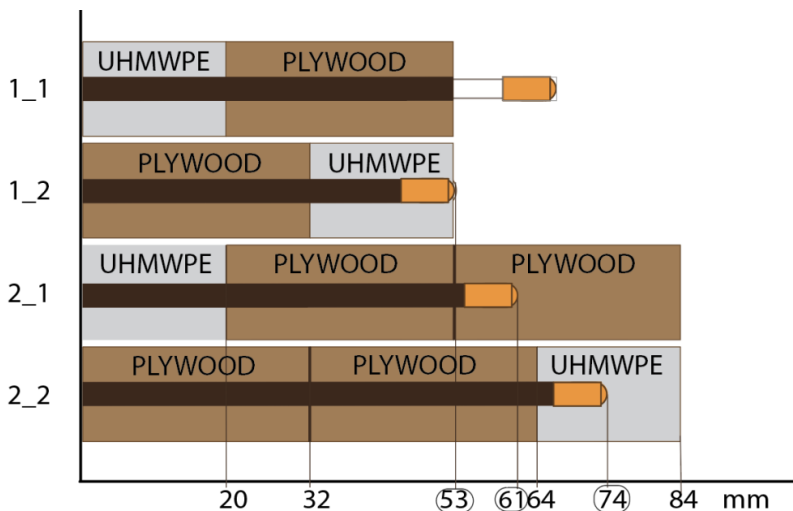


5.11. att. 2_2 paraugs. Saplākšnis 2x32 mm–*UHMWPE* 20 mm.

2_2 paraugs (5.11. attēls). Plāksne apturēja lodi. Lode izšāva cauri 2 saplākšņa slāņiem un apstājās polietilēnā. Eksperimentāli tika izmērīts 74 mm liels caursišanas dziļums. Polietilēnā netika konstatēta lokāla fasādes deformācija.

Eksperimenta pirmajā daļā neviens plākšņu materiāla paraugs (tos nesavienojot) neapturēja izšautās lodes. Novērojumi parādīja, ka 20 mm un 25 mm biezās *UHMWPE* plātnes un saplākšnis atsevišķi nav piemēroti praktiskai aizsardzībai pret maza kalibra šāviņiem.

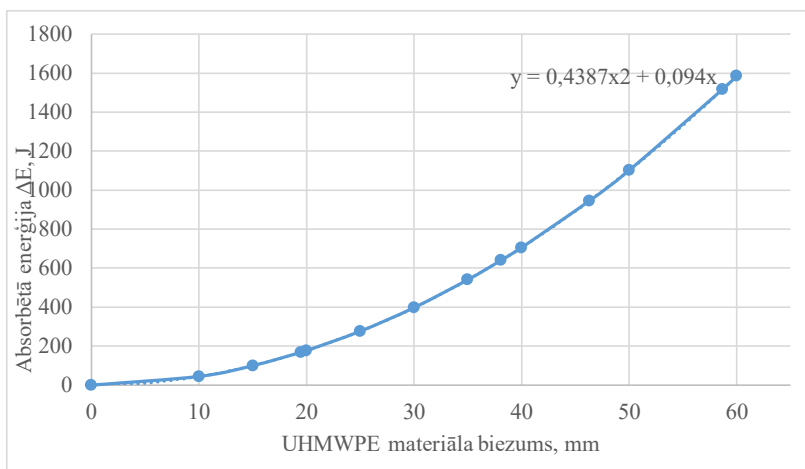
5.12. attēlā shematiski attēlotā plākšņu šķērsriezuma imitācijā redzams, ka *UHMWPE* 1_1 paraugs neaptur lodi. Bet, ja aiz *UHMWPE* ir divi saplākšņa dēļi (2_1), tad lode apstājas otrajā saplākšņa plāksnē, veidojot 61 mm lodes caursišanas dziļumu. 1_2 variācija radīja 53 mm termināli. Bet, izmantojot 2 × 32 mm saplākšni, tad lode apstājas 74 mm dziļumā. Tā kā šī pētāmā sienas izmantošana būtu rekonstrukcijas projektos, tad, lai aizsargātu ēkas iedzīvotājus, visplānākā siena ir 52 mm bieza.



5.12. att. Eksperimentālais lodes caursišanas dziļums (mm) katrai plākšņu kombinācijai.

Rezultātu analīze

Analizējot iegūtos caursišanas dziļumus un izmantojot jau zināmos, eksperimentos iepriekš iegūtos ballistikos datus par saplākšņa materiālu, tiek veikts *UHMWPE* materiāla ložu pretestības aprēķins. Iegūts grafiks un otrās pakāpes polinoma sakarība, kas parāda materiāla spēju pretoties lodei atkarībā no *UHMWPE* plāksnes biezuma.



5.13. att. Absorbētās enerģijas daudzums atkarībā no *UHMWPE* biezuma.

No grafika var nolasīt, ka BR1 un BR2 aizsardzības klases sasniegšanai *UHMWPE* vajag būt attiecīgi 19,5 mm (noapaļojot 20 mm) un 38,1 mm (noapaļojot 40 mm) biežam.

Izmantojot izstrādāto metodoloģiju, var noteikt šķietamo dinamisko stiprību R_t arī *UHMWPE* materiālam.

Parādīts piemērs 1_2 parauga aprēķinā.

- 1) Aprēķina 20 mm *UHMWPE* absorbēto ātrumu, ja zināms, ka 32 mm saplākšnis absorbē 241,9 J enerģijas (skatīt 5.13. attēlu).

$$476,1 - 241,9 = 234,2 \text{ J.}$$

- 2) Ja zināms, ka sākuma ātrums lodei bija 345 m/s un tā zaudēja 241,9 J enerģijas, tad var aprēķināt lodes ieiešanas ātrumu otrā materiālā:

$$v_s = \sqrt{(345 \text{ m/s})^2 - 2 * \frac{241,9 \text{ J}}{0,008 \text{ kg}}} = 242,0 \text{ m/s.}$$

- 3) Tā kā 1_2 paraugā lode apstājās tieši aiz materiāla beigām, tad var uzskatīt, ka materiāls tika izmantots lietderīgi un 20 mm var apstādināt lodi ar kinētisko enerģiju, kas aprēķināts pēc pamatformulas (1.53):

$$E_{\text{kin}} = \frac{0,008 \text{ kg} \cdot (242,0 \text{ m/s})^2}{2} = 234,2 \text{ J.}$$

- 4) Izveido grafiku: absorbētās enerģijas atkarību no *UHMWPE* mērķa biezuma, iegūstot absorbētās enerģijas pietiekamību BR1, BR2 aizsardzības klasēm, ar tendenci BR3 un BR4 (5.13. att.).

- 5) No grafika nolasā katra materiāla biezumu (kas būtu vienāds ar minimālo caursišanas dziļumu P) atkarībā no BR1–BR4 klases nepieciešamās enerģijas.

Skatīt 5.5. tabulu. BR2 klasei $P = 38,1 \text{ mm}$.

- 6) Izmantojot Ponceleta formulu (1.8), tiek aprēķināts materiāla stiprības parametrs β , to izsakot. Formula arī sastāv no lodes masas, ātruma un α – materiāla iekšējo spriegumu koeficienta, kas ir vienāds ar mērķa blīvuma ρ , lodes formas koeficienta $C=0,3$ (9 mm Glock lodei) un lodes šķēsgriezuma laukuma A reizinājumu, kg/m .

$$\alpha = \rho \cdot C \cdot A = 930 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,3 \cdot 6,36 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 = 0,0177 \text{ kg/m},$$

kur lodes laukums A pie 9 mm lodes diametra:

$$A = \pi \cdot \frac{d^2}{4} = \pi \cdot \frac{0,009 \text{ m}^2}{4} = 6,36 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$$

Materiāla stiprības parametru β iegūst izsakot to no (1.8.) formulas:

$$\beta = \frac{\alpha \cdot v_0^2}{e^{\frac{2 \cdot P \cdot \alpha}{m} - 1}} = \frac{0,0177 \text{ kg/m} \cdot (400 \text{ m/s})^2}{e^{\frac{2 \cdot 0,0381 \text{ m} \cdot 0,0177 \text{ kg/m}}{0,008 \text{ kg}} - 1}} = 537 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2.$$

- 7) Aprēķina šķietamo dinamisko stiprību R_t , materiāla stiprības parametru β izdalot ar lodes šķēsgriezuma laukumu A , formula (1.10).

$$R_t = \frac{\beta}{A} = \frac{537 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2}{6,36 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2} = 8,44 \text{ MPa}.$$

Pārējām aizsardzības klasēm aprēķini parādīti 5.6. tabulā.

5.6. tabula

Lodes un saplākšņa raksturlielumi katrai aizsardzības klasei

Aizsardzības klases saskaņā ar EN1063	Lodes raksturlielumi						Materiāla raksturlielumi					
	Masa	Sākuma ātrums	Kinētiskā enerģija	Formas koef.	Diametrs	Šķēsgriezuma laukums	Blīvums	Iekšējo spriegumu koeficients	Cauršīšanas dziļums	Stiprības parametrs	Šķietamā dinamiskā stiprība	Absolūtā kļūda
	m, g	v_0 , m/s	E, J	C	d, mm	A, m ²	ρ , kg/m ³	α , kg/m	P, mm	β , kg·m/s ²	R_t , MPa	ΔR_t , MPa
BR1	2,6	360	168	0,34	5,7	2,46E-05	930	0,0081	20	29	1,15	0,01
BR2	8,0	400	640	0,30	9,0	6,36E-05	930	0,0177	40	537	8,44	0,08
BR3	10,2	430	943	0,30	9,0	6,36E-05	930	0,0177	46	1059	16,65	0,17
BR4	15,6	440	1510	0,30	10,9	9,33E-05	930	0,0260	59	3127	33,53	0,34

Šie šķietami dinamiskās stiprības ir lielumi, ar ko tiktu papildināti tehnisko datu literatūras dati saplākšņa materiāla ballistikās veiktspējas noteikšanai. Iegūtie dati prognozētu apstākļus sagatavojoties citam eksperimentam vai reālajiem apstākļiem.

Šī pētījuma daļas mērķis ir sasniegts – polietilēna un saplākšņa paneļi pareizā kārtībā izturēja vieglās pistoles šāviņu frontālos triecienus, izmantojot *Glock 17* ieroča 9 mm kalibra *Luger* lodes. Labākā secība attiecībā uz lodes pretestību bija 1×32 mm saplākšnis un 20 mm *UHMWPE*. Lodes apstājās polietilēnā. *UHMWPE* cietība apvienojumā ar saplākšni nodrošina lodes triecienizturību, ja lodes sākotnējais ātrums ir līdz 345 m/s. Šīs plātnes var būt lodēm necaurlaidīgas sienas.

UHMW polietilēns sāk kust pēc lodes sākotnējās enerģijas saņemšanas. Kušanas process nozīmē, ka kinētiskā enerģija ir pietiekama, lai polietilēnu uzsildītu līdz 130 °C.

Plāksne 1_2, kas sastāv no diviem 32 mm bieziem saplākšņa slāņiem, kas no ārpuses mehāniski savienoti ar 20 mm biezu *UHMW* polietilēna plāksni, var atbilst ballistikās izturības

klasei BR2 saskaņā ar *EN 1063* un *EN 10522/10523*. Bērza saplāksnis 32 mm biezumā absorbē lodes kinētisko enerģiju tādā daudzumā, ka atlikusī enerģija nav pietiekama, lai caurdurtu 20 mm biezu UHMW polietilēna plāksni. Šis panelis absorbē 440 J enerģijas, kas ir 69 % no BR2 aizsardzības klases uzstādītas enerģijas.

Pēc šāvienu ir iespējams vizuāli atjaunot paneli, izmantojot dažādas iespējas, piemēram, paaugstinātu temperatūru, sakausējot *UHMWPE* materiālu. Tomēr maza ticamība, ka šim salabotajam laukumam būs tāds pats aizsardzības līmenis pret nākamo iespējamo lodi. Alternatīvi bojāto vietu var aizstāt ar stiprāku materiālu (piemēram, metāla stieni). To var izdarīt nekavējoties, lai nebūtu atvērtu kanālu nākamajam šāvienam.

Polietilēna-saplākšņa plātnes var izmantot konstrukcijās Arktikas reģionos, kur temperatūra ir pastāvīgi zema (līdz $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$). Tā kā polietilēns ir radioviļņu necaurlaidīgs, plāksnes varētu izmantot gan dzīvojamo Arktikas kompleksu būvniecībā gan zinātnisko būvju konstrukcijās, ar plāksnēm aizsargājot Arktikas reģiona attīstībai nepieciešamās radiosakaru iekārtas, kā arī militārajiem lietojumiem. Arktikas reģions tiek uzskatīts par dabas resursu ziņā perspektīvāko reģionu. Kā rāda pasaules vēsture, lielākā daļa no pasaules lielākajiem bruņotajiem konfliktiem notiek ar dabas resursiem bagātos reģionos, tāpēc plātņu izmantošana būtu atbilstoša ballistikajai aizsardzībai.

Nākamais eksperiments būtu saplākšņa un *UHMWPE* plātņu biezuma variēšana (īpaši testos 2_1 un 2_2 saplākšņa biezumu varētu samazināt), lai pārliecinātos, ka tiek izmantots minimālais iespējamais biezums, lai iegūtu maksimāli vieglu sienu, kā arī kombinācijā ar citiem ballistiskiem materiāliem, piemēram, aramīda šķiedru plātņi [9].

Turpmākai izpētei tiktu apsvērta datorsimulācija. Lodes izraisītās slodzes nav statiskas un dinamiskas, bet gan liela ātruma trieciena slodzes, kas simulāciju padara darbietilpīgu.

Secinājumi

1. Īpaši augstas molekulas polietilēnam ir daudzas priekšrocības, tostarp ballistikā aizsardzība, īpaši kombinācijā ar zināmiem materiāliem, piemēram, laminētu saplāksni.
2. Paneļos, kas veidoti no vairākiem materiāliem ar dažādām fizikālajām īpašībām, būtiska ir katra materiāla atrašanās vieta (secība) saliktā paneļa struktūrā. Materiālu secība var būtiski ietekmēt paneļa spēju izturēt ballistikās slodzes.
3. Laminēta saplākšņa un *UHMWPE* paraugi atsevišķi nerasniedza BR2 klases prasīto ballistisko robežu, turpretī paraugu slāņu saplāksnis ārpusē (vismaz 32 mm) – *UHMWPE* iekšpusē (20 mm) ieguva labākus rezultātus nekā pretējā secībā. Šis panelis absorbē 440 J enerģijas, kas ir 69 % no BR2 aizsardzības klases uzstādītas enerģijas. Šie paneļi var būt **daļa** no sienām dažādās patvertnēs, piemēram, armijas štābos, un drošajās istabās, jo to blīvums ir salīdzinoši neliels.
4. Mazākais *UHMWPE* biezums, lai aizturētu standarta *EN 1063* aizsardzības klašu maksimālā sākuma radīto kinētisko enerģiju ir BR1 – 20 mm, BR2 – 38 mm, tendence: BR3 – 46 mm, BR4 – 59 mm. precizēti eksperimentā iegūti Ponceleta formulas parametri. Pēc autores ieviestās metodes empīriski noteikta *UHMWPE* šķietamā dinamiskā stiprība R_t atbilstoši BR1, BR2, BR3, BR4 klasēm: 1,15 MPa, 8,44 MPa, tendence: 16,65 MPa un 33,53 MPa. Šie lielumi papildina tehnisko datu literatūru un var tikt izmantoti *UHMWPE* materiāla ballistikās veiktspējas modelēšanā. Tomēr šie rezultāti būtu eksperimentāli

jāpārbauda, lai pārliccinātos, vai šī metode ir izmantojama arī ārpus koksnes līmētiem elementiem.

5.3. Ballistisko sienu salīdzinājums

Pētījumā teorētiski tiek salīdzinātas zināmākās un biežāk lietotajās, kā arī BR2 klasi notestējušās ballistiski vienlīdz efektīvas astoņas sienu konstrukcijas (5.14. att.), kas ietver vienu vai vairākus materiālu slāņus. Šī salīdzinājuma mērķis ir analizēt ložu necaurlaidīgās sienas un noskaidrot labāko (izdevīgāko), sliktāko (neizdevīgāko) vienā kategorijā un vidēji labāko kopumā, izvirzot labākās pēc trim papildu aspektiem – cena, siltumcaurlaidība un svars. Šis apskats palīdzētu būvfirmām, aizsardzības iestādēm, sabiedriskas nozīmes ēku pārvaldītājiem izvēlēties piemērotu ballistisko materiālu paaugstināta riska ēku sienām, kā arī – tam, lai parādītu, ka tradicionālajiem materiāliem nav tikai priekšrocības, bet arī būtiski trūkumi.

Šīs astoņas sienas ir:

- 1) 176 mm CLT,
- 2) CLT siena ar siltumizolāciju un aramīda slāni
- 3) 85 mm saplāksnis,
- 4) 20 mm UHMWPE plātne ar 32 mm saplāksni šaušanas pusē,
- 5) 6 mm metāla plāksne,
- 6) 70 mm stiegrbetona (dzelzsbetona) siena,
- 7) 120 mm māla ķieģeļu siena,
- 8) 28 mm Knauf ražots speciālais Torro ģipškartons.

			
176 mm CLT	CLT siena ar siltumizolāciju un aramīda slāni	Saplāksnis 85 mm	Saplāksnis 32 mm UHMWPE 20 mm
			
Metāla plāksne 6 mm	Betons 70 mm	Māla ķieģeļu siena 120 mm	Ģipškartona plāksne Torro 28 mm

5.14. att. Astoņas aplūkotās ballistiskās sienas, uzskatāmi attēli.
[9], [20], [28], [29], [31], [116]

Šo sienu sarakstu noteikti var turpināt, izmantojot arī citus materiālus vai kombinējot no apskatītajiem, piemēram, stiegrbetons ar augsnes/smilšu slāni [19], tomēr šie 8 sienu veidi ir izvēlēti pēc papildus literatūras pieejamības un tāpēc, ka tie jau ir pēti eksperimentos citās

zinātniskās institūcijās vai autore pati ir veikusi šādu potenciālu ballistisko sienu ložu izturības eksperimentus.

Ēkas lietotāji ir pilnībā ballistiski aizsargāti pret tīšu vai nejaušu lodi tad, ja materiāls lodi absorbē un tā neiziet cauri sienai. Šīs sienas pārsvarā ir ložudrošas gan no ārpuses, gan no iekšpuses, neatkarīgi no tā, no kuras puses notiek uzbrukums. Ballistiskā aizsardzība lielā mērā ir atkarīga no šaušanas leņķa un attāluma [5]. Tomēr šajā pētījumā nav ietverti tādi mainīgie faktori kā leņķa un šaušanas attāluma (standarta laboratorijas eksperimentos tie ir 5 m līdz mērķim) ietekme, kā arī ir noteiktas eksperimenta robežas. Pētījums neietver materiāla montāžas detaļas un izmaksas, savienojumu dažādību, savienojumu ballistisko pretestību, pēkšņas lodes ātruma izmaiņas (nejauši šķēršļi lodes ceļā), lodes izmērus, lodes gala formu un arī rikošeta iespējamību, kā arī šķembu izplatību. Šo astoņu sienu materiālu biezums nodrošina 9 mm *Glock 17* lodes minimālo ballistisko pretestību, kas konstatēta citu pētnieku teorētiskajā literatūrā vai autores iepriekšējos pētījumos. To klase pēc *EN 1063* standarta ballistiski izturīgiem aizsargmateriāliem ir BR2 [37], kas paskaidro, ka tas aiztur lodes ātrumu līdz 400 m/s. Materiāla biezums varētu mainīties (palielināties) atkarībā no jaudīgāka ieroča iespējamā lietojuma.

Sienu salīdzinājumā izvirzītie kritēriji

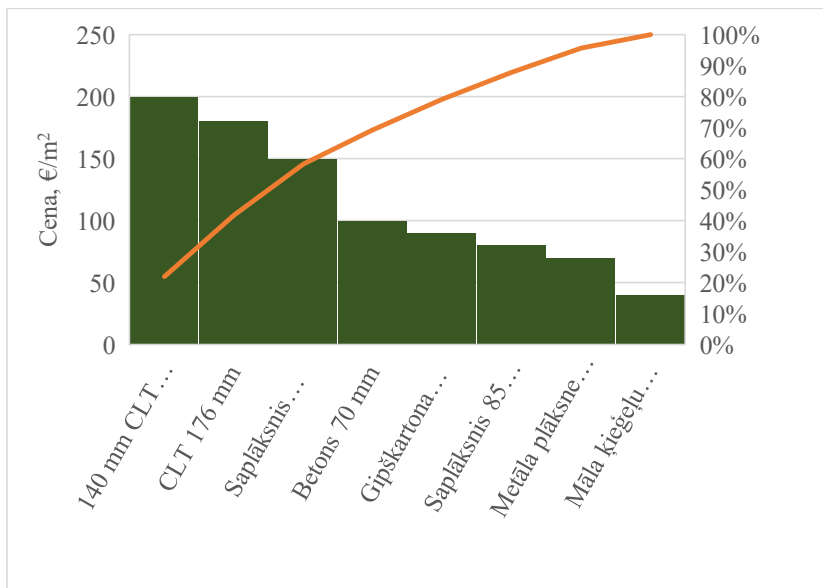
Pētījumā tiek ņemti vērā četri kritēriji (sienas biezums, cena, siltumcaurlaidība un masa uz vienu kvadrātmētru), pamatojoties uz materiāla ballistisko spēju. Kategorijas – cena, siltuma caurlaidība un sienas masa uz platības vienību – tiek vērtēti punktu sistēmā no 1 līdz 8. Cenas vērtējumā ar atzīmi “1” ir vērtēts lētākās sienas risinājums, ar “8” – dārgākais. Siltumcaurlaidības vērtējumā ar “1” novērtēts siltākais risinājums, ar “8” – siltuma neuzturoša siena. Masas vērtējumā ar atzīmi “1” novērtēta vieglākā siena, ar “8” – smagākā siena. Materiālu cenu aprēķina kā 50 m² ēkas platības 80 m² sienai, pamatojoties uz moduļveida ēku kritēriju, ja sienas augstums ir 2,7 m. [5], [10], [13]. Montāžas izdevumi šajā cenā nav iekļauti. Siltuma caurlaidību nosaka lieluma lambdas (siltuma vadītspējas) attiecība pret sienas biezumu. Sienas ārējās un iekšējās virsmas siltuma pretestības vērtība netiek ņemta vērā. Sienas materiāla masa tiek aprēķināta, pamatojoties uz katra slāņa blīvumu un biezumu. 5.7. tabulā un 5.15. attēlā redzami šīs teorētiskās izpētes rezultāti, izmantojot daudzkritēriju novērtēšanas rīku jeb radara diagrammas formātu, kas ilustrētā veidā grafiski parāda iegūtos salīdzināmos rezultātus dažādām kategorijām.

5.15. attēlā parādīts diagramma, kurā uzskaitītas sienu izmaksas lejupejošā secībā, sākot no dārgākās sienas. Komponētā *CLT* siena ir dārgāka, tāpēc tā ir novērtēta ar 8 punktiem, bet māla ķieģeļu siena ir novērtēta ar zemākajām izmaksām, tāpēc tai ir piešķirts 1 punkts kopējā 5.7. tabulā.

5.7. tabula

BR2 aizsardzības klases ložu drošu 8 sienu salīdzinājums pēc 3 dažādiem aspektiem: cena, siltuma caurlaidība un masa

	Sienas biezums BR2 mm	Atsauce sienai	Cena, €/m ²	Cenas vērtējums	Siltumvadītspēja λ , W/(m×K)	Siltumcaurlaidība $U=\lambda/d$, W/m ² ×K	Siltumcaur- laidības vērtējums	Blīvums kg/m ³	Masa kg/m ²	Masas vērtējums	Vidējais vērtējums
CLT 176 mm	176		180	7	0,13	0,7	2	461	81	6	5,00
140 mm CLT siena ar siltumizolāciju un aramīda slāni	366		200	8	0,056	0,154	1	500	80	5	4,67
Saplāksnis 85 mm	85		80	3	0,17	2,0	3	770	65	4	3,33
Saplāksnis 32mm + UHMWPE 20 mm	52		150	6	4,64	89,3	7	770+930	43	2	5,00
Metāla plāksne 6 mm	6		70	2	17	2833	8	7800	47	3	4,33
Betons 70 mm	70	[25], [38]	100	5	2,1	30,0	6	2500	175	7	6,00
Māla ķieģeļu siena 120 mm	120	[28]	40	1	1,0	8,3	4	2000	240	8	4,33
Gipškartona plāksne Torro 28 mm	28	[31]	90	4	0,25	8,9	5	1500	42	1	3,33



5.15. att. Diagramma, kas grafiski salīdzina sienu izcenojumus eiro uz 1 kvadrātmētru

Rezultātu analīze

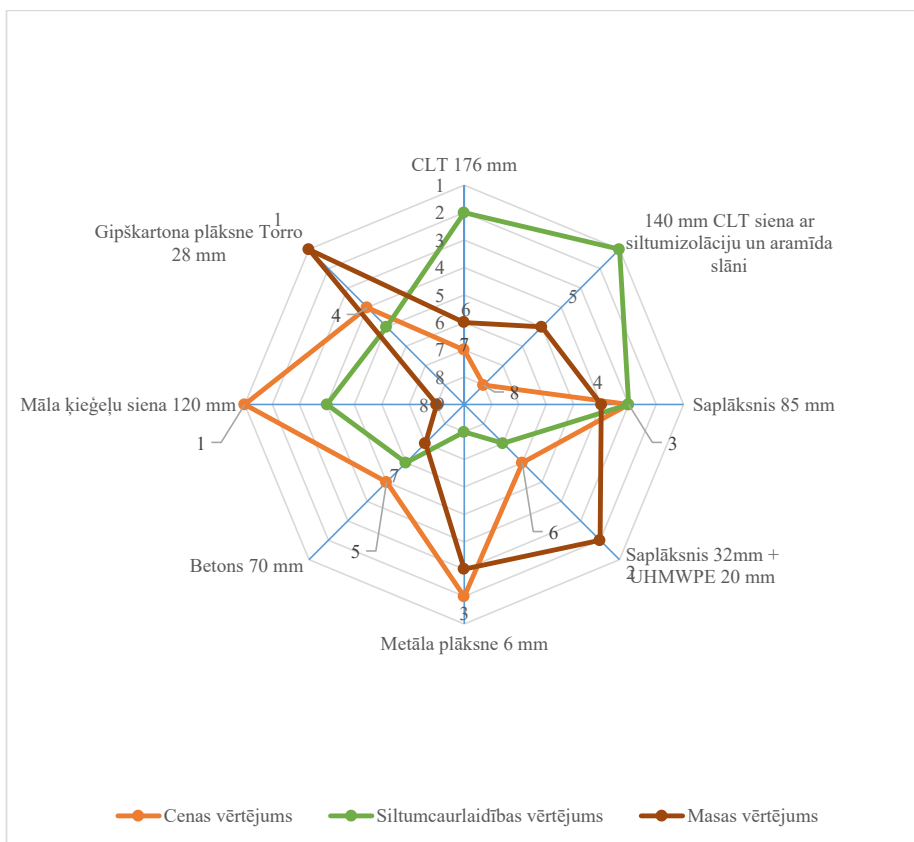
Radara veida diagrammā (5.16. attēls) materiāls, kas aptver lielāku laukumu kopumā ir izdevīgākais risinājums. Ekonomiski izdevīgākā (lētākā) ir 120 mm māla ķieģeļu siena turpretim, dārgākā siena ir 140 mm *CLT* siena ar siltumizolāciju un aramīda slāni tās tehnoloģiskās ražošanas sarežģītības dēļ, bet tā ir augstvērtīgākā siltuma (ne)caurlaidības ziņā. Vislielākie siltuma zudumi ir metāla plāksnei 6 mm bez pievienotas siltumizolācijas. Visvieglākās ballistiskās sienas ir 28 mm ģipškartona plāksnes *Torro*, savukārt vissmagākā ir 120 mm māla ķieģeļu siena augstā blīvuma un biezuma dēļ.

5.8. tabula

Sienu apkopojums pēc dažādiem kritērijiem

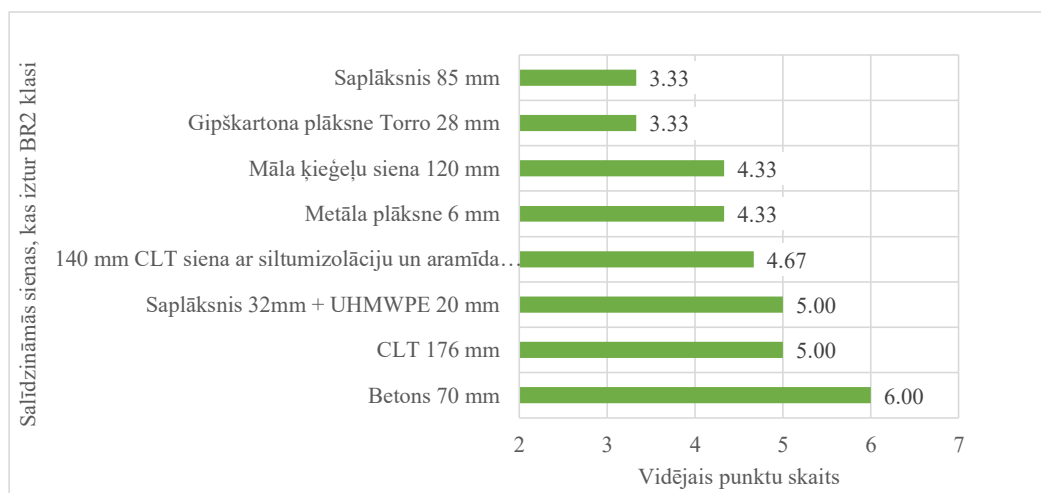
Kritērijs	Labākie rādītāji	Sliktākie rādītāji
Cena	Māla ķieģeļu siena 120 mm	140 mm <i>CLT</i> siena ar siltumizolāciju un aramīda slāni
Siltumcaurlaidība U	140 mm <i>CLT</i> siena ar siltumizolāciju un aramīda slāni	Metāla plāksne 6 mm
Masa	Ģipškartona plāksne <i>Torro</i> 28 mm	Māla ķieģeļu siena 120 mm
Vidējais	Ģipškartona plāksne <i>Torro</i> 28 mm	Betons 170 mm

Kopsummā visvērtīgākais un ieteicamākais sienas materiāls ir saplāksnis 85 mm biezumā un *Knauf Torro* 28 mm plātne, lai gan saplāksnis nebija vislabākais nevienā no jomām, tomēr saglabāja optimālu vērtējumu katrā kategorijā. Vismazāk rekomendējamā šajā vērtējumā ir tradicionālā betona siena tās lielās masas un relatīvi zemo siltumtehniko īpašību dēļ, tomēr, pieliekot siltumizolāciju, šo mīnusu iespējams novērst.



5.16. att. Radara diagramma, kas grafiski parāda labāko materiālu atkarībā no izmantošanas mērķa un ekspluatācijas vēlmēm (izvēlēties lētāko, siltāko vai vieglāko materiālu), kur 1 ir labākais rezultāts; 8 ir sliktākais.

Rezultātu kopsavilkums redzams pārskatāmā 5.8. tabulā un 5.17. attēlā.



5.17. att. Vidējais vērtējums katrai sienai.

Visas šīs 8 sienas ir izmantojamas kā ballistiski paneļi koka karkasa ēkai, kas ne vienmēr paredzēta ilgstošai lietošanai. Neskatoties uz to, ir pienākums padomāt par šo ēkas karkasā izmantoto materiālu ilgtspēju. Līdz ar to, materiālu otrreizēja izmantošana būtu aktuāls un risināms jautājums – otrreizēji izmantojami un reizē ballistiski droši paneļi. Piemēram, *UHMWPE* var izmantot kā otrreiz izmantojamu polietilēnu, kas prasa papildus eksperimentus, kas būtu saistīti ar materiālu ilgtspēju.

Par savienojumu lietošanu – koka karkasa ēkai paredzēts piestiprināt ložu uztverošus/absorbējošus paneļus. Tos piestiprina ar skrūvēm pie karkasa, kas līdz ar to veido lielāku sienas biezumu, līdz ar to ir ballistiski drošāks, jo lodei ir jāpārvar papildus barjera kinētiskās enerģijas samazināšanai. Tāpat – visbiežāk lietotais skrūvju materiāls ir *AR500* tērauds, kas jau pats ir izturīgs pret lodēm, vismaz lodēm ar sākuma ātrumu līdz 400 m/s.

Secinājumi

1. Visas analizētās 8 sienu konstrukcijas nodrošina BR2 klases (lodes sākuma ātrums līdz 400 m/s) 9 mm lodes aizsardzību, taču atšķiras pēc izmaksām, siltumtehniskās efektivitātes un svara, kas nosaka to praktisko izmantošanu.
2. Pētījums parādīja, ka ne tikai būtiska ballistiskā efektivitāte, bet arī vislētākās izmaksas piemīt māla ķieģeļu sienai, bet visdārgākās *CLT* slāņainā siena.
3. Siltuma caurlaidības parametros visoptimālākā ir *CLT* siena ar 200 mm minerālvates un aramīda slāni, bet vislielākie siltuma zudumi – 6 mm tērauda plāksne bez siltumizolācijas.
4. Visvieglākās ballistiskās sienas būtu Knauf Torro 28 mm plātne, bet vissmagākās ir 120 mm māla ķieģeļu un 70 mm betona sienas, kas ierobežo to vienkāršu izmantošanu.
5. Kopsummā visvērtīgākās sienas ir 85 mm saplāksnis un *Knauf Torro* 28 mm plātne, kas nodrošina optimālu izmaksu, siltumtehnisko parametru un masas attiecību. Šīs sienas koka karkasa konstrukcijā ir ieteicamas izmantot kā pagaidu ēku sienas nejaušas vai mērķtiecīgas apšaudes gadījumā. Salīdzinājumā pierādīts, ka tradicionālā betona siena ir visneefektīvākā no cenas, siltumcaurlaidības un svara kopējā kritērija.
6. Šajā pētījumā gūtie rezultāti palīdzētu drošības nozares pārstāvjiem lēmumu pieņemšanas procesā, lai izvēlētos piemērotu ballistisko materiālu paaugstināta riska aizsardzības sienām.

Nodaļas kopsavilkums

1. Iepriekš izstrādātā metodoloģiju ļauj veikt kvantitatīvu novērtējumu un formulēt pamatotus secinājumus arī par daudzslāņu konstrukciju ballistiskās pretestības raksturlielumiem. Metodoloģija balstās uz atsevišķu slāņu enerģijas absorbcijas ieguldījuma noteikšanu un enerģijas bilances principu pielietošanu. Papildus piedāvātas kompozītmateriāla aizsardzības risinājumi daudzslāņu sienas *CLT-Kevlar*-siltumizolācija un saplāksnis-*UHMWPE* potenciāli uzlabotu modulveida ēku konstrukciju ballistisko izturību un samazinātu ēkas svaru. Analīze parāda, ka metodoloģijas pielietošana ir precīzāka sienām, kas sastāv no diviem dažādiem slāņiem, nevis trīs un vairāk slāņu sistēmām. Divu materiālu gadījumā enerģijas starpības metode precīzāk norāda uz parauga ballistisko parametru iegūšanu, jo samazinās savstarpējās ietekmes un kumulatīvās kļūdas efekts.
2. Mazākais *UHMWPE* biezums, lai aizturētu standarta *EN 1063* aizsardzības klašu maksimālā sākuma radīto kinētisko enerģiju ir BR1 – 20 mm, BR2 – 38 mm, tendence:

BR3 – 46 mm, BR4 – 59 mm. precizēti eksperimentā iegūti Ponceleta formulas parametri. Pēc autores ieviestās metodes empīriski noteikta *UHMWPE* šķietamā dinamiskā stiprība R_t atbilstoši BR1, BR2 klasēm: 1,15 MPa, 8,44 MPa, tendence BR3, BR4: 16,65 MPa un 33,53 MPa. Šie lielumi papildina tehnisko datu literatūru un var tikt izmantoti *UHMWPE* materiāla ballistikās veiktspējas modelēšanā. Tomēr šie rezultāti būtu eksperimentāli jāpārbauda, lai pārlicinātos, vai šī metode ir izmantojama arī ārpus koksnes līmētiem elementiem.

2. Salīdzinot perspektīvākās ballistikās sienas, pētījums parādīja, ka finansiāli izdevīgākā ir 85 mm saplākšņa un *Knauf Torro* 28 mm plātnes siena. No siltuma caurlaidības viedokļa vislabākās ir *CLT* sienas ar 200 mm minerālvates izolāciju, bet vissliktākā – tērauda plāksne (bez siltumizolācijas). Toties svara ziņā visvieglākās ballistikās sienas būtu *Knauf Torro* 28 mm plātne, bet vissmagākās māla ķieģeļu un betona sienas. Kopsummā visvērtīgākās ir 85 mm saplākšņa un *Knauf Torro* 28 mm plātne. Šīs plātnes koka karkasa konstrukcijās ir ieteicamas kā pagaidu ēku būvkonstrukcijas nejaušas vai mērķtiecīgas apšaudes gadījumā. Vissliktākā kopsummā izrādījās tradicionālā betona siena.

SECINĀJUMI

Promocijas darba mērķis un uzdevumi ir sasniegti. Pētījums atklāj aprēķina metodoloģiju moduļveida ēku ložu izturīgu sienu konstrukcijām.

Promocijas darba rezultātā iegūtie secinājumi

1. Jaunas metodoloģijas nepieciešamību parāda eksperimentālā un teorētiskā salīdzinājuma trūkums. Citiem zinātniskiem darbiem ir izmantoti Ponceleta un Eulera-Robinsa formulu teorētiskie modeļi, tomēr pietrūkst to validācijas ar eksperimentu rezultātiem. Nav atklāti visi formulas parametri, piemēram, šķietamā dinamiskā stiprība, kas ir būtisks lielums lodes caursišanas dziļuma teorētiskā aprēķināšanā.
2. Pirmreizējās ballistikās pārbaudēs teorētiskie iespēšanās dziļuma aprēķini ar Ponceleta formulu uzrādīja atbilstību eksperimentālajiem datiem. Līdz ar to testa parauga/sienas biezuma izvēle tika apstiprināta, pamatojoties uz teorētiskajiem aprēķiniem.
3. Aprēķina metodoloģija moduļveida ēku ložu izturīgas sienas konstrukcijas ballistikās pretestības prognozēšanai BR1 un BR2 aizsardzības klasēm pēc *EN 1063* standarta balstīta uz materiāla mehānisko īpašību analīzi, trieciena enerģijas starpību un empīrisku sakarību starp koksnes blīvumu un lādiņa parametriem un izraisīto cauršaušanas dziļumu. Metodoloģijas posmi: eksperimentālo datu iegūšana, aprēķināmie ballistikas lielumi, datu analīze, šķietamās dinamiskās stiprības R_t noteikšanas metode, fizikālais jeb skaitliskais modelis, modeļa kalibrācija un pārbaude, prognoze, optimizācija, atkārtojamība.
4. Pēc autores ieviestās metodes noteikta mērķa materiāla šķietamā dinamiskā stiprība *CLT* un saplākšņa materiāliem BR1 un BR2 aizsardzības klasei, kas ļauj aprēķināt lodes caursišanas maksimālo dziļumu (jeb minimālo sienas biezumu) ierocim ar lodes masu līdz 8,0 g un ātrumu līdz 400 m/s, kā arī veidot tendenci BR3 un BR4 aizsardzības klasei ar lodes masu līdz 15,6 g un ātrumu līdz 440 m/s.
5. Aprēķina metodoloģijas izstrādāšanai tika veikta iegūto eksperimentālo datu analīze ar *EN 1063* standarta noteiktajām robežvērtībām aizsardzības klasēm BR1, BR2, kā arī tendencei BR3 un BR4.

Rezultāti

- Līmētas koksnes ballistikā pretestība nav lineāra; to iespējams modelēt, izmantojot Ponceleta formulu, polinomu grafikus un empīriski iegūtos parametrus.
- BR1 un BR2 aizsardzības klasēm bērza saplāksnis uzrāda par 54% augstāku ballistisko efektivitāti nekā *CLT*. BR1 līdz BR4 klasēm – par 40 %.
- *CLT* paneļiem:
 - eksperimentālie dati parādīja, ka atbilstoši *EN 1063* klasēm minimālais *CLT* materiāla biezums ir BR1 60 mm, BR2 176 mm, ar tendenci BR3 185 mm un BR4 199 mm;
 - precizēti eksperimentā iegūti Ponceleta formulas parametri; pēc autores ieviestās metodes empīriski noteikta *CLT* šķietamā dinamiskā stiprība R_t atbilstoši BR1, BR2, BR3, BR4 klasēm: 100,24 MPa, 45,48 MPa, 66,70 MPa un 68,93 MPa. Šie lielumi papildina tehnisko datu literatūru un var tikt izmantoti saplākšņa materiāla ballistikās veikspējas modelēšanā;
 - skaitliskā modelēšana (*Ansys Explicit Dynamics*) *von Mises* sprieguma analīze parādīja, ka lode ar ātrumu 345 m/s caursit 100 mm un 140 mm *CLT*, bet apstājas 146 mm dziļumā 150 mm biežam *CLT*, kas saskan ar eksperimentu rezultātiem.

- Saplākšņa paraugiem:
 - mazākais saplākšņa biezums, lai aizturētu *EN 1063* standarta aizsardzības klašu maksimālā sākuma radīto kinētisko enerģiju ir BR1 – 26 mm, BR2 – 85 mm, BR3 – 122 mm, BR4 – 167 mm;
 - precizēti eksperimentā iegūti Ponceleta formulas parametri; pēc autores ieviestās metodes empīriski noteikta bērsa saplākšņa šķietamā dinamiskā stiprība R_t atbilstoši BR1, BR2, BR3, BR4 klasēm: 238,46 MPa, 99,29 MPa, 98,84 MPa un 76,85 MPa. Šie lielumi papildina tehnisko datu literatūru un var tikt izmantoti saplākšņa materiāla ballistikās veiktspējas modelēšanā.
 - Pārejot no BR2 uz BR4 aizsardzības klases, pēc empīriski iegūtajiem datiem iegūts, ka nepieciešama 200 mm bieza *CLT* siena vai 167 mm saplākšnis, bez to kombinācijas. Saliekot kopā 180 mm *CLT* un 81 mm saplākšni (trīs loksnes), siena nespēj nodrošināt nepieciešamo enerģijas absorbcijas prasību 1511 J, līdz ar to tieši šo materiālu kombinēšana nav pamatota.
6. Izstrādātā metodoloģija ļauj prognozēt nepieciešamo koksnes sienas biezumu bez pilna procesa eksperimenta veikšanas, tādā veidā samazinot finansiālos ieguldījumus, riska aspektus un paātrinot ložudrošu ēku projektēšanas laiku.
 7. Parametru optimizācijas analīze noteica optimālo caursišanas dziļumu un ekstrēmās robežvērtības. Optimizācijas rezultātu nosacītais ekstrēms *CLT* materiālam ($\alpha = 0,0968 \text{ kg/m}$; $\beta = 3467 \text{ kg} \times \text{m/s}^2$) dod prognozējamo caursišanas dziļumu 140,1 mm, savukārt saplākšnim ($\alpha = 0,0153 \text{ kg/m}$; $\beta = 5874 \text{ kg} \times \text{m/s}^2$) prognozējamo caursišanas dziļumu dod 80,5 mm, kas saskan ar eksperimentāliem datiem.
 8. Efektīvākas pretložu konstrukcijas var panākt koksni integrējot ar papildmateriāliem (*Kevlar* un minerālvate, *UHMWPE*). Autores ieviesto metodoloģiju var pielāgot arī slāņainu sienu konstrukciju atsevišķu slāņu ballistisko parametru noteikšanai, balstoties uz jau iegūtajiem saplākšņa un *CLT* zināmajos enerģijas absorbcijas raksturotājos.
 9. Precizēti eksperimentā iegūti Ponceleta formulas parametri; pēc autores ieviestās metodes empīriski noteikta arī *UHMWPE* šķietamā dinamiskā stiprība R_t atbilstoši BR1, BR2, BR3, BR4 klasēm: 1,15 MPa, 8,44 MPa, tendence: 16,65 MPa un 33,53 MPa. Mazākais *UHMWPE* biezums, lai aizturētu *EN 1063* standarta aizsardzības klašu maksimālā sākuma radīto kinētisko enerģiju ir, BR1 – 20 mm, BR2 – 38 mm, tendence: BR3 – 46 mm, BR4 – 59 mm. Šie lielumi papildina tehnisko datu literatūru un var tikt izmantoti *UHMWPE* materiāla ballistikās veiktspējas modelēšanā. Tomēr šie rezultāti būtu eksperimentāli jāpārbauda, lai pārliecinātos, vai šī metode ir izmantojama arī ārpus koksnes līmētiem materiāliem.
 10. Iepriekš izstrādātā metodoloģija ļauj veikt kvantitatīvu novērtējumu un formulēt pamatotus secinājumus arī par daudzslāņu konstrukciju ballistikās pretestības raksturlielumiem. Metodoloģija balstās atsevišķu slāņu enerģijas absorbcijas ieguldījuma noteikšanā un enerģijas bilances principu lietošanā. Papildus piedāvātas kompozītmateriāla aizsardzības risinājumi, piemēram, *CLT-Kevlar*-siltumizolācijas un saplākšņa-*UHMWPE* daudzslāņu sienas, kas potenciāli uzlabotu moduļveida ēku konstrukciju ballistisko izturību. Analīze parāda, ka metodoloģijas lietošana ir precīzāka sienām, kas ietver divus dažādus slāņus, nevis trīs un vairāk slāņu sistēmām. Enerģijas starpības metode divu savienoto materiālu

gadījumā precīzāk parāda parauga ballistisko parametru iegūšanu, jo samazinās slāņu skaita savstarpējās ietekmes un kumulatīvās kļūdas efekts.

11. Paneļos, kas veidoti no vairākiem materiāliem ar dažādām fizikālajām īpašībām, būtiska ir katra materiāla atrašanās vieta (secība) saliktā paneļa struktūrā. Materiālu secība var būtiski ietekmēt paneļa spēju izturēt ballistiskās slodzes.
12. Salīdzinot perspektīvākās ballistiskās sienas, pētījums parādīja, ka finansiāli izdevīgākā ir *Torro* 28 mm siena. No siltumcaurlaidības viedokļa vislabākās ir *CLT* sienas ar 200 mm minerālvates izolāciju, bet vissliktākā – tērauda plāksne (bez siltumizolācijas). Savukārt svara ziņā visvieglākās ballistiskās sienas ir *Knauf Torro* 28 mm plātne, vissmagākās – māla ķieģeļu un betona sienas. Kopsummā visvērtīgākās ir 85 mm saplākšņa un *Knauf Torro* 28 mm plātnes. Šie materiāli koka karkasa konstrukcijās ir ieteicamas kā pagaidu ēku būvkonstrukcijas nejaušas vai mērķtiecīgas apšaudes gadījumā. Vissliktākā kopsummā izrādījās tradicionālā betona siena.
13. Priekšlikumi metodoloģijas praktiskai ieviešanai un normatīvo dokumentu ieviešanai:
 - Ieviest Ponceleta formulu kā galveno aprēķina formulu un definēt šķietamās dinamiskās stiprības R_t vērtības 100,24 MPa, 45,48 MPa *CLT* paraugiem un 238,46 MPa, 99,29 MPa saplākšņa paraugiem atbilstoši BR1 un BR2 klasēm.
 - Ieviest nosacījumu, ka minimālais *CLT* materiāla biezums ir BR1 60 mm, BR2 176 mm un saplākšņa materiāla biezums BR1 26 mm, BR2 85 mm.

IETEIKUMI TĀLĀJIEM PĒTĪJUMIEM

Ballistikas nozares attīstībai aizsargsienų jomā līdzīgu pētījumu sākšanai autore iesaka šādi sagatavoties eksperimentiem:

- testēt paraugus, izmantojot testēšanas šaujamiekārtu, tādā veidā izvairoties no šāvēja gadījuma kļūdām un spējām iespējamām nevajadzīgām kustībām un iegūtu lielāku rezultātu precizitāti;
- testēt *CLT* vienāda biezuma, bet dažādu slāņu līmējumu, lai jau detalizētāk analizētu slāņojuma, kārtu biezumu, skaita un arī līmes ietekmi ballistiskajos rezultātos.

LITERATŪRAS SARAKSTS

- [1] Apollo.lv, "Caur Krieviju bēgošie ukraiņi rindā pie Latvijas robežas gaidīja pat sešas diennaktis." Accessed: Aug. 30, 2024. [Online]. Available: <https://www.apollo.lv/7622948/caur-krieviju-begosie-ukraini-rinda-pie-latvijas-robezas-gaidija-pat-sesas-diennaktis>
- [2] U. DoD and E. Warfare Center, "Unified Facilities Criteria (UFC) Design to resist direct fire weapons effects approved for public release," 2008. [Online]. Available: <http://dod.wbdg.org/>.
- [3] LSM.lv_Freidenfelds D, "Uz Čerņihivas apgabalu Ukrainā sūta Latvijā ražotas moduļu mājas," LSM ziņu dienests, Latvia, Sep. 18, 2023. Accessed: Aug. 30, 2024. [Online]. Available: <https://www.lsm.lv/raksts/zinas/latvija/18.09.2023-uz-cernihivas-apgabalu-ukraina-suta-latvija-razotas-modulu-majas.a524393/>
- [4] T. Borvik, S. Dey, and L. Olovsson, "Penetration of granular materials by small-arms bullets," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 75, pp. 123–139, 2015, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2014.07.016.
- [5] A. Borodinecs, A. Geikins, E. Barone, V. Jacnevs, and A. Prozuments, "Solution of Bullet Proof Wooden Frame Construction Panel with a Built-In Air Duct," *Buildings*, vol. 12, no. 1, 2022, doi: 10.3390/buildings12010030.
- [6] "Eiropas Parlamenta un Padomes regula Nr. 305/2011," Mar. 2011.
- [7] Postimees.ee, "Skolas darbinieki arestē zēnu, kurš nošāva skolotāju," <https://www.postimees.ee/2969175/opetaja-maha-lasknud-poise-votsid-kinni-kooli-tootajad>, Oct. 28, 2014.
- [8] K. Sanborn, "Exploring cross-laminated timber use for temporary military structures: ballistic considerations," 2018. Accessed: Feb. 22, 2021. [Online]. Available: <https://smartech.gatech.edu/handle/1853/59910>
- [9] A. Borodinecs, A. Geikins, E. Barone, V. Jacnevs, and A. Prozuments, "Solution of Bullet Proof Wooden Frame Construction Panel with a Built-In Air Duct," *Buildings*, vol. 12, no. 1, Jan. 2022, doi: 10.3390/buildings12010030.
- [10] A. Borodinecs, A. Geikins, and S. Smirnov, "Energy performance of temporary shelters," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Institute of Physics Publishing, Dec. 2019. doi: 10.1088/1757-899X/660/1/012017.
- [11] X. Wu, B. Tang, and H. Li, "Research on the effect of UHMWPE cavity protection board on rapid enhancement of wall anti-blast performance," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 647, no. 1, p. 012084, 2021, doi: 10.1088/1755-1315/647/1/012084.
- [12] A. Prozuments, A. Borodinecs, and J. Zemitis, "Survey based evaluation of indoor environment in an administrative military facility," *Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering*, vol. 27, no. 2, pp. 96–107, 2020, doi: 10.5755/j01.sace.26.2.26079.
- [13] A. Borodinecs, A. Geikins, and A. Prozuments, *Energy consumption and retrofitting potential of Latvian unclassified buildings*, vol. 163. 2020. doi: 10.1007/978-981-32-9868-2_27.
- [14] A. Borodinecs, J. Zemitis, M. Dobelis, M. Kalinka, and A. Geikins, "Development of prefabricated modular retrofitting solution for post-world War II buildings," in *10th International Conference on Environmental Engineering, ICEE 2017*, Vilnius Gediminas Technical University Publishing House "Technika," 2017. doi: 10.3846/enviro.2017.252.
- [15] A. Borodinecs, A. Prozuments, J. Zemitis, D. Zajecs, and G. Bebre, "Hydrothermal performance of the external wooded frame wall structure reinforced with ballistic panels," *12th Nordic Symposium on Building Physics (NSB 2020)*, vol. 172, no. E3S Web Conf., 2020, doi: 10.1051/e3sconf/20201720.
- [16] A. Geikins, A. Borodinecs, G. Daksa, R. Bogdanovics, and D. Zajecs, "Typology of Unclassified Buildings and Specifics of Input Parameters for Energy Audits in Latvia,"

- in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Institute of Physics Publishing, Jun. 2019. doi: 10.1088/1755-1315/290/1/012131.
- [17] J. Wimbiscus, "Finding The Right Material For Your Backyard Ballistics Tests." Accessed: Jul. 21, 2023. [Online]. Available: <https://www.guns.com/news/2017/06/16/think-of-all-the-fun-you-could-have-with-backyard-ballistic-testing-materials>
 - [18] L. Wang, S. Kanesalingam, R. Nayak, and R. Padhye, "Recent Trends in Ballistic Protection," *Textiles and Light Industrial Science and Technology*, vol. 3, no. 0, p. 37, 2014, doi: 10.14355/tlist.2014.03.007.
 - [19] M. E. Backman, *Terminal Ballistics*. Naval weapons center China Lake LA, 1976.
 - [20] A. Crispin, "Wood in warfare." Accessed: Jul. 26, 2023. [Online]. Available: <https://eandt.theiet.org/content/articles/2012/09/wood-in-warfare/>
 - [21] J. Melderis, "Principles of construction and operation of weapons and ammunition," Riga, 2008. Accessed: Oct. 15, 2021. [Online]. Available: <http://virsnieki.lv/wp/wp-content/uploads/2016/03/Iero%C4%8Du-un-mun%C4%ABcijas-uzb%C5%ABve-un-darb%C4%ABbas-principi.pdf>
 - [22] Beat P. Kneubuehl, *Ballistics: Theory and Practice*. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2024.
 - [23] M. E. Backman and W. Goldsmith, "The mechanics of penetration of projectiles into targets," *Int. J. Eng. Sci.*, vol. 16, no. 1, pp. 1–99, 1978, doi: [https://doi.org/10.1016/0020-7225\(78\)90002-2](https://doi.org/10.1016/0020-7225(78)90002-2).
 - [24] D. B. Phan Ba and Phan Van Vu, "Determination of the kinetic parameters of the projectile when penetrating the wooden target by finite element methods," *Journal of Military Science and Technology*, vol. 104, no. 104, pp. 164–172, Jun. 2025, doi: 10.54939/1859-1043.j.mst.104.2025.164-172.
 - [25] M. Esaker, G. E. Thermou, and L. Neves, "Impact resistance of concrete and fibre-reinforced concrete: A review," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 180, pp. 734–743, 2023, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2023.104722.
 - [26] C. Menna, D. Asprone, G. Caprino, V. Lopresto, and A. Prota, "Numerical simulation of impact tests on GFRP composite laminates," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 38, no. 8, pp. 677–685, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2011.03.003>.
 - [27] A. B. Dresch, J. Venturini, S. Arcaro, O. R. K. Montedo, and C. P. Bergmann, "Ballistic ceramics and analysis of their mechanical properties for armour applications: A review," *Ceram. Int.*, vol. 47, no. 7, Part A, pp. 8743–8761, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.12.095>.
 - [28] S. D. Kashuba, M. D. Kuzik, and M. A. Hatzinikolas, "Resistance of Exterior Walls to High Velocity Projectiles," 2002.
 - [29] E. Barone, B. Gaujena, and J. Videmanis, "Projectile penetration depth into wood-based frames of unclassified buildings," *Far East Journal of Mathematical Sciences (FJMS)*, pp. 11–20, Jul. 2022, doi: 10.17654/2229451122002.
 - [30] "Torro | Pommel." Accessed: Sep. 27, 2022. [Online]. Available: <https://www.Knauf.de/profi/sortiment/produkte/torro.html>
 - [31] E. Barone, R. Vetra, B. Gaujena, and M. Vilnitis, "Ordinary gypsum plasterboard and Knauf Torro gypsum plasterboard bullet-proofing," in *Journal of Physics: Conference Series*, 2023. doi: 10.1088/1742-6596/2423/1/012016.
 - [32] D. E. Carlucci and S. S. Jacobson, *Ballistics: Theory and Design of Guns and Ammunition*. Third edition. | Boca Raton : Taylor & Francis, 2018.: CRC Press, 2018. doi: 10.1201/B22201.
 - [33] Valmieras fibreglass, "What is glass fibre and its value." Accessed: Jul. 21, 2023. [Online]. Available: <https://www.valmiera-glass.com/lv/produkti/stikla-skiedras-priekšrocibas/>
 - [34] Hesco, "Hesco." Accessed: Aug. 03, 2023. [Online]. Available: <https://www.hesco.com/>

- [35] S. Szabo, R. Toth, and Z. Kovacs, "Force protection solutions with HESCO Bastion Concertainer.," *AARMS: Academic & Applied Research in Military Science*, vol. 10, no. 1, pp. 31–59, 2011, Accessed: Aug. 03, 2023. [Online]. Available: <https://rb.gy/mlz4>
- [36] J. W. Heselden, "Reinforcement and Control Using Concertainers," Bangalore, India: Geosynthetics Asia '97, 1997. Accessed: Aug. 03, 2023. [Online]. Available: https://books.google.lv/books?id=yYFKGHm4yLYC&pg=PA129&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
- [37] F. A. Soriano-Moranchel, J. M. Sandoval-Pineda, G. J. Gutiérrez-Paredes, U. S. Silva-Rivera, and L. A. Flores-Herrera, "Simulation of bullet fragmentation and penetration in granular media," *Materials*, vol. 13, no. 22, pp. 1–13, Nov. 2020, doi: 10.3390/ma13225243.
- [38] S. J. Hanchak, M. J. Forrestal, E. R. Youngt, and J. Q. Ehrgott~, "Perforation of concrete slabs with 48 MPa (7 ksi) and 140 MPa (20 ksi) unconfined compressive strengths," 1992.
- [39] M. H. Zhang, V. P. W. Shim, G. Lu, and C. W. Chew, "Resistance of high-strength concrete to projectile impact," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 31, no. 7, pp. 825–841, Aug. 2005, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2004.04.009.
- [40] J. T. Gomez and A. Shukla, "Multiple impact penetration of semi-infinite concrete," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 25, no. 10, pp. 965–979, Nov. 2001, doi: 10.1016/S0734-743X(01)00029-X.
- [41] Ken J., "Bullet Proofing Walls | Resistant Wall Construction." Accessed: Jul. 21, 2023. [Online]. Available: <https://modernsurvivalblog.com/security/bullet-resistant-wall-construction/>
- [42] J. Awerbuch and S. R. Bodner, "Experimental investigation of normal perforation of projectiles in metallic plates," Pergamon Press, 1974.
- [43] R. A. Nolte and D. L. Selke, "U.S. Patent," US 7661228 B1, Feb. 16, 2010
- [44] M. T. Lo Ricco, M. K. Weaver, C. Adam Senalik, J. Henjum, and J. Cattelino, "Ballistic testing of cross-laminated timber layups to further develop protective panels," in *13th World Conference on Timber Engineering, WCTE 2023*, World Conference on Timber Engineering (WCTE), 2023, pp. 75–83. doi: 10.52202/069179-0010.
- [45] L. Koene and F. R. Broekhuis, "Bullet penetration into wooden targets," in *30th International Symposium on Ballistics, Long Beach, CA*, Sep. 2017, pp. 1905–1916. doi: 10.12783/ballistics2017/16976.
- [46] S. Boatright and G. Garrett, "The effect of knots on the fracture strength of wood - I. A review of methods of assessment," 1979.
- [47] L. Koene, R. Hermsen, and S. D. Brouwer, *Projectile ricochet from wooden targets*, vol. 2. 2013.
- [48] Nardin A., Boström L., and Zaupa F., "The effect of knots on the fracture of wood," Whistler Resort, British Columbia, Canada, 2000.
- [49] M. Hughes, "4 - Plywood and other veneer-based products," in *Wood Composites*, M. P. Ansell, Ed., Woodhead Publishing, 2015, pp. 69–89. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-454-3.00004-4>.
- [50] S. Turopoljac, Z. Trzun, and M. Vrdoljak, "Analysis of the Pistol Bullet Penetration through a Wooden Barrie," in *Annals of DAAAM and Proceedings of the International DAAAM Symposium*, DAAAM International Vienna, 2022, pp. 285–294. doi: 10.2507/33rd.daaam.proceedings.039.
- [51] D. W. Green, J. Winandy, and D. E. Kretschmann, "Mechanical properties of wood," *Wood handbook : wood as an engineering material*. Madison, WI : USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, 1999. General technical report FPL ; GTR-113: Pages 4.1-4.45, vol. 113, 1999, Accessed: Jun. 07, 2026. [Online]. Available: <https://research.fs.usda.gov/treesearch/7149>

- [52] R. Brandner, G. Flatscher, A. Ringhofer, G. Schickhofer, and A. Thiel, "Cross laminated timber (CLT): overview and development," *European Journal of Wood and Wood Products*, vol. 74, no. 3, pp. 331–351, 2016, doi: 10.1007/s00107-015-0999-5.
- [53] L. Koene and F. R. Broekhuis, "Bullet penetration into medium density fibreboard targets," in *31st International Symposium on Ballistics, Hyderabad, India*, 2019, pp. 1363–1373.
- [54] J. Swinea, K. Sanborn, M. Weaver, M. Lo Ricco, C. A. Senalik, and L. K. Stewart, "Enhanced cross laminated timber (ECLT) for ballistic resistant design," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 189, p. 104931, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2024.104931>.
- [55] J. G. Carrillo, R. A. Gamboa, and P. I. González-Chi, "Performance improvement on aramid/polypropylene composite for high velocity impacts," in *Antec*, 2011, pp. 695–699. Accessed: Jul. 22, 2022. [Online]. Available: https://www.academia.edu/34399073/Performance_Improvement_on_Aramid_Polypropylene_Composite_for_High_Velocity_Impacts?email_work_card=thumbnail
- [56] C. Pirvu and L. Deleanu, "Ballistic Testing of Armor Panels Based on Aramid," in *Ballistics*, IntechOpen, 2019. doi: 10.5772/intechopen.78315.
- [57] V. Anand, A. Edwin, D. Justus, K. Prasanna, S. Ramesh, and S. Arun, "Energy absorption and ballistic impact behavior of Kevlar woven fabrics," 2018. [Online]. Available: www.tjprc.org
- [58] A. Majumdar, B. S. Butola, and A. Srivastava, "An analysis of deformation and energy absorption modes of shear thickening fluid treated Kevlar fabrics as soft body armour materials," *Mater. Des.*, vol. 51, pp. 148–153, 2013, doi: 10.1016/j.matdes.2013.04.016.
- [59] H. M. Cho, S. Wi, S. J. Chang, and S. Kim, "Hygrothermal properties analysis of cross-laminated timber wall with internal and external insulation systems," *J. Clean. Prod.*, vol. 231, pp. 1353–1363, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.05.197.
- [60] K. Sanborn, T. R. Gentry, Z. Koch, A. Valkenburg, C. Conley, and L. K. Stewart, "Ballistic performance of cross-laminated timber (CLT)," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 128, pp. 11–23, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2018.11.007>.
- [61] L. Koene and G. Willemsen, "Bullet Penetration into Plywood targets," in *33rd International symposium on Ballistics, Belgium*, 2023.
- [62] C. A. Senalik and B. Farber, *Wood handbook wood as an engineering material. General Technical Report FPL-GTR-282.*, vol. Chapter 5. Madison, WI: Forest Products Laboratory, 2021. Accessed: Jan. 30, 2024. [Online]. Available: <https://www.fs.usda.gov/research/treesearch/62244>
- [63] R. J. Ross, "Wood handbook: wood as an engineering material," 2010. [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:139247795>
- [64] M. Cao, L. Chen, R. Xu, and Q. Fang, "Effect of the temperature on ballistic performance of UHMWPE laminate with limited thickness," *Compos. Struct.*, vol. 277, p. 114638, Dec. 2021, doi: 10.1016/J.COMPSTRUCT.2021.114638.
- [65] J. van Dingenen, "High performance dyneema fibres in composites," *Mater. Des.*, vol. 10, no. 2, pp. 101–104, Mar. 1989, doi: 10.1016/S0261-3069(89)80021-4.
- [66] J. G. Carrillo, R. A. Gamboa, and P. I. González-Chi, "Performance improvement on aramid/polypropylene composite for high velocity impacts," 2011.
- [67] I. G. Crouch, "Critical interfaces in body armour systems," *Defence Technology*, vol. 17, no. 6, pp. 1887–1894, Dec. 2021, doi: 10.1016/J.DT.2020.11.006.
- [68] D. Firouzi, P. Mudzi, C. Y. Ching, T. H. Farncombe, and P. Ravi Selvaganapathy, "Use of pressure sensitive adhesives to create flexible ballistic composite laminates from UHMWPE fabric," *Compos. Struct.*, vol. 287, p. 115362, May 2022, doi: 10.1016/J.COMPSTRUCT.2022.115362.
- [69] Z. Ur Rehman, A. K. Niazi, J. Il Song, and B. Heun Koo, "Excellent fire retardant properties of cnf/vmt based lbl coatings deposited on polypropylene and wood-ply," *Polymers (Basel)*, vol. 13, no. 2, pp. 1–13, Jan. 2021, doi: 10.3390/POLYM13020303.

- [70] Wood W, "Processing, wear, and mechanical properties of polyethylene composites prepared with pristine and organosilane-treated carbon nanofibers," *Materials Science*, 2012, Accessed: Jul. 21, 2022. [Online]. Available: <https://www.semanticscholar.org/paper/PROCESSING%2C-WEAR%2C-AND-MECHANICAL-PROPERTIES-OF-WITH-Wood/696d10cd6ceb864433bf3ca43886e7d803b8f3c0>
- [71] S. Karmakar, "Rheological Behaviors of Ultra High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE)," *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*, pp. 700–707, Jan. 2022, doi: 10.1016/B978-0-12-820352-1.00226-1.
- [72] "Dyneema® Composite Fabrics (DCF) and Cuben Fiber Explained | Hyperlite Mountain Gear." Accessed: Oct. 30, 2022. [Online]. Available: <https://www.hyperlitemountaingear.com/pages/dcf-dyneema-cuben-fiber>
- [73] J. P. Attwood, B. P. Russell, H. N. G. Wadley, and V. S. Deshpande, "Mechanisms of the penetration of ultra-high molecular weight polyethylene composite beams," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 93, pp. 153–165, Jul. 2016, doi: 10.1016/J.IJIMPENG.2016.02.010.
- [74] "E-plastena.lv/polietilēns." Accessed: Nov. 10, 2022. [Online]. Available: <https://e-plastena.lv/20-polietilēns-pe#/page-4>
- [75] V. Tulatarn, S. Ouajai, R. Yeetsorn, and N. Chanunpanich, "Mechanical Behavior Investigation of UHMWPE Composites for Pile Cushion Applications," *KMUTNB International Journal of Applied Science and Technology*, pp. 1–12, Oct. 2015, doi: 10.14416/J.IJAST.2015.08.001.
- [76] K. Karthikeyan, B. P. Russell, N. A. Fleck, M. O'Masta, H. N. G. Wadley, and V. S. Deshpande, "The soft impact response of composite laminate beams," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 60, pp. 24–36, Oct. 2013, doi: 10.1016/J.IJIMPENG.2013.04.002.
- [77] R. Stopforth and S. Adali, "Experimental study of bullet-proofing capabilities of Kevlar, of different weights and number of layers, with 9 mm projectiles," *Defence Technology*, vol. 15, no. 2, pp. 186–192, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.dt.2018.08.006.
- [78] Engr. Reashad Bin Kabir and Engr. Nasrin Ferdous, "Kevlar-The Super Tough Fiber," *International Journal of Textile Science*, vol. 1, no. 6, pp. 78–83, Jan. 2013, doi: 10.5923/j.textile.20120106.04.
- [79] S. D. Salman, Z. Leman, M. T. H. Sultan, M. R. Ishak, and F. Cardona, "Ballistic impact response of Kevlar® reinforced thermoplastic composite armors," 2016.
- [80] E. Haro Albuja, J. A. Szpunar, and A. G. Odeshi, "Ballistic impact response of laminated hybrid materials made of 5086-H32 aluminum alloy, epoxy and Kevlar® fabrics impregnated with shear thickening fluid," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 87, pp. 54–65, Aug. 2016, doi: 10.1016/j.compositesa.2016.04.007.
- [81] S. Chocron, A. J. Carpenter, N. L. Scott, R. P. Bigger, and K. Warren, "Impact on carbon fiber composite: Ballistic tests, material tests, and computer simulations," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 131, pp. 39–56, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2019.05.002.
- [82] M. Heine, "Carbon Fibers," in *Industrial Carbon and Graphite Materials: Raw Materials, Production and Applications: Volume 1 and 2*, vol. 1–2, Wiley, 2021, pp. 603–695. doi: 10.1002/9783527674046.ch11.
- [83] C. Ulven, U. K. Vaidya, and M. V. Hosur, "Effect of projectile shape during ballistic perforation of VARTM carbon/epoxy composite panels," *Compos. Struct.*, vol. 61, no. 1–2, pp. 143–150, 2003, doi: 10.1016/S0263-8223(03)00037-0.
- [84] L. Fortified Estate, "How to Bulletproof Walls." Accessed: Jul. 27, 2023. [Online]. Available: <https://fortifiedestate.com/how-to-bulletproof-walls/>
- [85] K. Weimann, C. Adam, M. Buchert, and J. Sutter, "Environmental evaluation of gypsum plasterboard recycling," *Minerals*, vol. 11, no. 2, pp. 1–13, Feb. 2021, doi: 10.3390/MIN11020101.
- [86] C. Gaião, J. de Brito, and J. Silvestre, "Inspection and Diagnosis of Gypsum Plasterboard Walls," *Journal of Performance of Constructed Facilities*, vol. 25, no. 3, pp. 172–180, Jun. 2011, doi: 10.1061/(asce)cf.1943-5509.0000149.

- [87] Y. Zhanga, L. Ma, S. Ren, M. Huang, Y. Wang, and Q. Zhang, "Comparative life cycle assessment between ordinary gypsum plasterboard and functional phase-change gypsum plasterboard," *Materials Science Forum*, vol. 993 MSF, pp. 1473–1480, 2020, doi: 10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/MSF.993.1473.
- [88] C. Baux, Y. Mélinge, C. Lanos, and R. Jauberthie, "Enhanced Gypsum Panels for Fire Protection," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 20, no. 1, pp. 71–77, Jan. 2008, doi: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2008)20:1(71).
- [89] A. De Korte and H. J. H. Brouwers, "Thermal conductivity of gypsum plasterboards," in *International Conference in Prague*, Prague: Czech Technical University in Prague, Feb. 2009, pp. 158–163. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/233895675>
- [90] Knauf, "Knauf." Accessed: Sep. 27, 2022. [Online]. Available: <https://www.Knauf.lv/lv/produkti-un-sistemas/specialas-plaksnes/detail-page-32.html>
- [91] "Damasec Defence Systems | Ring 7023 0093." Accessed: Sep. 27, 2022. [Online]. Available: <https://defence.damasec.com/>
- [92] DIN EN 1522 standards, *Windows, doors, shutters and blinds - Bullet resistance*. Germany, 1999, pp. 1–9.
- [93] Maxim Popenker, "Modern Firearms." Accessed: Nov. 08, 2025. [Online]. Available: <https://modernfirearms.net/en/cartridge/9x39-2/>
- [94] NATO Armed Forces, *TECHNICAL PERFORMANCE SPECIFICATION PROVIDING FOR THE INTERCHANGEABILITY OF 9 mm x 19 AMMUNITION - AOP-4090*. 2020.
- [95] BS EN 1063:2000, *Glass in building. Security glazing. Testing and classification of resistance against bullet attack*. Great Britain, 2000.
- [96] EN-1523, *Windows, Doors, Shutters and Blinds - Bullet Resistance – Test Methods*. Belgium, 1998, pp. 1–18. Accessed: Jun. 30, 2025. [Online]. Available: <https://www.bodyarmornews.com/wp-content/uploads/2013/10/EN-1523.pdf>
- [97] British Standard, *BS 5051-1-1988*.
- [98] UL LLC: UL 752, *Standard for bullet-resisting equipment*. 2005.
- [99] ASTM D905-08, *Standard test method for strength properties of adhesive bonds in shear by compression loading*. American Society of Testing and Materials. 2013.
- [100] U.S. Department of Justice, *NIJ Standart-0108.01 Ballistic Resistant Protective Materials*. 1985.
- [101] N. Engineering and E. Warfare Center, "UNIFIED FACILITIES CRITERIA (UFC) DESIGN TO RESIST DIRECT FIRE WEAPONS EFFECTS APPROVED FOR PUBLIC RELEASE; DISTRIBUTION UNLIMITED," 2008. [Online]. Available: <http://dod.wbdg.org/>.
- [102] NATO, "Standardization Agreement. Procedures for evaluating the protection levels of logistic and light armoured vehicles for ke and artillery threats," Jan. 2004.
- [103] P. Weinacht, J. Newill, and P. Conroy, "Conceptual Design Approach for Small-Caliber Aeroballistics With Application to 5.56-mm Ammunition," p. 74, Sep. 2005.
- [104] A. S. Aarønaes and H. Nilsson, "Dynamic response of pipe rack steel structures to explosion loads," 2014.
- [105] D. R. Christman and J. W. Gehring, "Analysis of High-Velocity Projectile Penetration Mechanics," *J. Appl. Phys.*, vol. 37, no. 4, pp. 1579–1587, Mar. 1966, doi: 10.1063/1.1708570.
- [106] J. López-Puente, A. Arias, R. Zaera, and C. Navarro, "The effect of the thickness of the adhesive layer on the ballistic limit of ceramic/metal armours. An experimental and numerical study," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 32, no. 1–4, pp. 321–336, Dec. 2005, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2005.07.014.
- [107] Rosenberg Z and Dekel E, *Terminal ballistics*, 2nd ed., vol. XIV. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012.

- [108] H. M. Wen, "Predicting the penetration and perforation of FRP laminates struck normally by projectiles with different nose shapes," *Compos. Struct.*, vol. 49, no. 3, pp. 321–329, 2000, doi: [https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(00\)00064-7](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(00)00064-7).
- [109] J. Melderis, *Ieroču un munīcijas unbūves un darbības principi - Latvian [Principles of construction and operation of weapons and ammunition]*. 2008. Accessed: Jul. 26, 2024. [Online]. Available: <https://virsnieki.lv/wp-content/uploads/2022/04/Ierocu-un-municijas-uzbuve-un-darbibas-principi.pdf>
- [110] C. Andres and W. Boughers, "AN ANALYSIS OF V 50 BALLISTIC LIMIT RESULTS ADJUSTING 1ST SHOT VELOCITY, STEP-UP STEP-DOWN INCREMENTS, TRUTH CHARACTERISTICS AND VELOCITY CONTROL DISTRIBUTIONS."
- [111] N. Mohd Yusof, P. Md Tahir, S. H. Lee, M. A. Khan, and R. Mohammad Suffian James, "Mechanical and physical properties of Cross-Laminated Timber made from Acacia mangium wood as function of adhesive types," *Journal of Wood Science*, vol. 65, no. 1, p. 20, 2019, doi: 10.1186/s10086-019-1799-z.
- [112] C. A. Finch, "Advanced wood adhesives technology. A. Pizzi. Marcel dekker, New York, Basel, 1994. pp. viii + 289, price US\$115.00. ISBN 0-8247-9266-1," *Polym. Int.*, vol. 39, no. 1, p. 78, Jan. 1996, doi: <https://doi.org/10.1002/pi.1996.210390117>.
- [113] R. Rikards and A. Čāte, *Galīgo elementu metode*, vol. 1. Rīgas Tehniskā universitāte, 2001.
- [114] P. Karthick and K. Ramajeyathilagam, "Numerical study on ballistic impact behavior of hybrid composites," *Mater. Today Proc.*, vol. 59, pp. 995–1003, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.MATPR.2022.02.270.
- [115] P. S. Rama Sreekanth and S. Kanagaraj, "Influence of MWCNTs and gamma irradiation on thermal characteristics of medical grade UHMWPE," *Bulletin of Materials Science*, vol. 37, no. 2, pp. 347–356, 2014, doi: 10.1007/S12034-014-0640-Y.
- [116] E. Barone, E. Velicko, B. Gaujena, and M. Vilnitis, "Plywood Panel with UHMW Polyethylene Board Ballistic Resistance," *Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering*, vol. 32, no. 1, pp. 233–243, Jun. 2023, doi: 10.5755/j01.sace.32.1.32822.



Elīna Barone (dzim. Indriksone) dzimusi 1987. gadā Bauskā. Rīgas Tehniskajā universitātē (RTU) ieguvusi inženierzinātņu bakalaura (2011) un profesionālo maģistra (2013) grādu būvniecībā. 2012. gadā bijusi *Erasmus+* praksē *Fraunhofer* institūtā Drēzdenē, Vācija. Patlaban ir būvmehānikas un būvkonstrukciju docētāja RTU un Rīgas Būvniecības koledžā.

Savu profesionālo karjeru apvieno ar bērnu audzināšanu un sporta aktivitātēm vidējo un garo distanču skriešanā.