



RĪGAS TEHNISKĀ  
UNIVERSITĀTE

**Ernests Jansons**

# **GAISA MITRUMA, GAISA UN LEDUS TEMPERATŪRAS IETEKME UZ BERZES PĀRA NERŪSĒJOŠAIS TĒRAUDS-LEDUS SLĪDĒŠANU RAKSTUROJOŠIEM PARAMETRIEM**

Promocijas darbs



# RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Mašīnzinību, transporta un aeronautikas fakultāte  
Mehānikas un mašīnbūves institūts

**Ernests Jansons**

Doktora studiju programmas “Ražošanas tehnoloģija” doktorants

## GAISA MITRUMA, GAISA UN LEDUS TEMPERATŪRAS IETEKME UZ BERZES PĀRA NERŪSĒJOŠAIS TĒRAUDS-LEDUS SLĪDĒŠANU RAKSTUROJOŠIEM PARAMETRIEM

**Promocijas darbs**

Nozare: Mašīnbūve un mehānika  
Apakšnozare: Mēraparāti un metroloģija

Zinātniskie vadītāji

profesore *Dr.sc.ing.*  
IRĪNA BOIKO

profesors *Dr.sc.ing.*  
KĀRLIS AGRIS GROSS

profesors *Dr.habil.sc.ing.*  
**JĀNIS RUDZĪTIS**

Rīga 2022

## SADARBĪBA

Promocijas darbs “Gaisa mitruma, gaisa un ledus temperatūras ietekme uz berzes pāra nerūsējošais tērauds-ledus slīdēšanu raksturojošiem parametriem” izstrādāts un finansēts sadarbībā ar:

- Eiropas reģionālā attīstības fonda (ERAF) projektu “Virsmas īpašību ietekmes uz slīdamību pa ledu pētījumi” (The Quest for Disclosing how Surface Characteristics Affect Slideability). Projekta Nr.1.1.1.1/16/A/129;



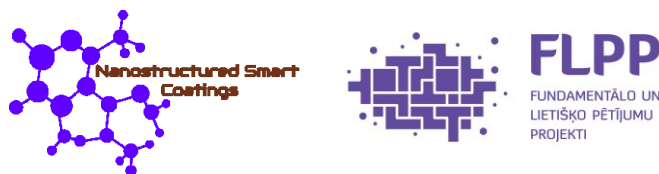
- Valsts pētījumu programmas (VPP) “Inovatīvi materiāli un viedās tehnoloģijas vides drošumam” projektu Nr.6 “Metāla virsmas apstrāde berzes un nodiluma samazināšanai”. Projekta Nr. Y8085.6;



- SAM 8.2.2. “Stiprināt augstākās izglītības institūciju akadēmisko personālu stratēģiskās specializācijas jomās” projekts Rīgas Tehniskajā universitātē Nr.8.2.2.0/18/A/017.



- LZP projekts Z19/1-0385 “Ar oglekli bagātināti daudzfunkcionāli nanostrukturētie viedie pārklājumi (NVP) augsto tehnoloģiju lietojumiem un to iegūšana izmantojot lieljaudas magnētiski saspīestās plazmas metodi”.



- Austrian COMET programme (Project K2 InTribology, no. 872176) un “Excellence Centre of Tribology” (AC2T research GmbH) sadarbībā ar V-Research GmbH. Austrian Cooperative Research (ACR) finansēja ārvalstu mobilitātes izmaksas.

Ārvalstu mobilitāte promocijas darba ietvaros:

- V-Research GmbH, Austrija (01.12.2019 – 10.12.2019);
- Hysitron Inc., ASV (17.06.2018 – 27.06.2018).

## PATEICĪBAS VĀRDI

Darba autors izsaka pateicību promocijas darba zinātniskajiem vadītājiem: Profesorei Dr.sc.ing Irīnai Boiko par konsultēšanu, milzīgo atsaucību un padomu darba struktūras sakārtošanā; Profesoram Dr.sc.ing. Kārlim Agrim Grosam par izglītošanu zinātnisko rakstu izveidē; Profesoram Dr.habil.sc.ing. Jānim Rudzītīm par ievilināšanu doktorantūrā un zinātnē.

Paldies Jānim Lungevičam par ilgstošo un veiksmīgo sadarbību ledus berzes izpētes jomā, paldies profesoram Oskaram Liniņam un Armandam Leitānam par diskusijām, kas veltītas rezultātu, eksperimentu, mērīšanas tehnoloģiju apspriešanai. Paldies Mašīnbūves un mehatronikas katedras atsaucīgajiem kolēģiem, klausoties promocijas darbam veltītos seminārus un izsakot savu viedokli.

Paldies Igoram Velkavrh un V-Research GmbH par sadarbību, zinātniskām diskusijām ledus berzes izpētē un finansiālu atbalstu zinātnisko rakstu un mobilitātes jautājumos.

Paldies Dainim Dukuram un Latvijas skeletoņa komandas pārstāvjiem par atsaucību un lieliski sagatavoto ledus trasi kvalitatīvu eksperimentu veikšanai.

Pateicība ģimenei – Montai un Emmai par atbalstu un saprati, kad tika veikti eksperimenti vēlās vakara stundās un, brīžos, kad vajadzēja doties ārvalstu mobilitātes braucienos, vai uz zinātniskajām konferencēm. Paldies Guntai par milzīgo atbalstu studijas uzsākot.

## ANOTĀCIJA

Promocijas darbā “Gaisa mitruma, gaisa un ledus temperatūras ietekme uz berzes pāra nerūsējošais tērauds-ledus slīdēšanu raksturojošiem parametriem” izstrādāts berzes pāra nerūsējošais tērauds-ledus slīdēšanu raksturojošu parametru prognozēšanas modelis un metodika, atkarībā no vides apstākļu – gaisa mitruma, gaisa temperatūras, ledus temperatūras mijiedarbības.

Veikts zināmās literatūras apskats un definēti pētījumu virzieni. Balstoties uz empīriski veiktiem pētījumiem reālu apstākļu eksperimentu režīmā, kas ietver gan ledus virskārtas tekstūras analīzi un ietekmi uz slīdēšanas laiku, gan slīdošā parauga virsmas tekstūras ietekmi uz slīdēšanas laiku, kā arī eksperimentālā parauga vibrāciju analīzi, izstrādāta reālu apstākļu eksperimentu veikšanas procedūra. Pēc izstrādātas eksperimentu procedūras, veikti vides apstākļu (gaisa un ledus temperatūra, gaisa mitrums) ietekmes uz slīdēšanas laiku mērījumi.

Izstrādāts slīdēšanas raksturojošu parametru prognozēšanas modelis, balstoties uz reālu apstākļu eksperimentu rezultātiem, tādējādi pietuvinot eksperimentu apstākļus tuvāk reālām dzīves situācijām. Iegūtās likumsakarības starp konkrētiem vides apstākļu raksturojošiem parametriem un berzes pāra nerūsējošais tērauds-ledus slīdēšanas laiku, tika skaidrotas ar, izstrādāto slīdēšanas laika prognozēšanas modeli. Izstrādāta slīdēšanas raksturojošu parametru mērīšanas un prognozēšanas metodika reālu apstākļu eksperimentu režīmā.

Veikta prognozēšanas modeļa praktiskā aprobācija. Analizēta berzes pāra nerūsējošais tērauds-ledus prognozēšanas modeļa korelācija ar skeletoņa sacensībās iegūtiem slīdēšanas laika mērījumiem. Pētīta vides apstākļu un virsmas tekstūras ietekme uz berzes pāra nerūsējošais tērauds-ledus slīdēšanas raksturojošu parametru – berzes koeficientu – laboratorijas apstākļos.

Promocijas darbs satur 105 lapas teksta, 14 tabulas, 48 attēlus, 11 pielikumus un 104 informācijas avotus.

## ABSTRACT

In the doctoral thesis “Influence of humidity, air and ice temperature on sliding ability characteristics of friction pair stainless steel-ice” prediction model and methodology of friction pair stainless steel-ice sliding parameters depending on air humidity, air temperature, and ice temperature interaction were developed.

A review of the known literature was performed, and research directions were defined. Based on empirical studies in the field type experimental mode, which includes the analysis of the ice surface texture and the effect on sliding time, the effect of the sliding sample surface texture on the sliding time, and the analysis of the experimental sample vibration analysis, the experimental procedure was developed. The effects of environmental conditions (air and ice temperature, air humidity) on the sliding time measured based on developed experimental procedure.

A model for predicting sliding parameters was developed based on field-type experiments, thus bringing the experimental conditions closer to real-life situations. The developed sliding time prediction model explained the obtained regularities between specific parameters characterizing the environmental conditions and the sliding time of the friction pair stainless steel-ice. A methodology for measuring and predicting sliding parameters in the field type experimental mode was developed.

Practical approbation of the prediction model was performed. The correlation of the friction pair stainless steel-ice prediction model with the sliding time measurements obtained in the skeleton competition is analyzed. The influence of environmental conditions and surface texture on the characteristic parameter of friction pair stainless steel-ice - friction coefficient - under laboratory conditions studied.

The thesis contains 105 pages of text, 14 tables, 48 figures, 11 appendices, and 104 literature sources.

# SATURA RĀDĪTĀJS

IEVADS .....	7
DARBĀ IZMANTOTIE APZĪMĒJUMI UN TERMINI.....	12
1. LITERATŪRAS APSKATS.....	14
1.1. Robežslānis starp paraugu un ledu .....	14
1.2. Berzes režīmi paraugam slīdot pa ledu.....	16
1.3. Parauga slīdēšanas pa ledu ietekmējošie faktori .....	17
1.4. Berzes teorijas paraugam slīdot pa ledu .....	24
1.5. Eksperimentālo pētījumu apskats .....	31
1.6. Literatūras analīzes kopsavilkums.....	37
2. EKSPERIMENTĀLIE PĒTĪJUMI .....	39
2.1. Eksperimentālā parauga slīdēšanu raksturojošu parametru mērīšanas iekārta.....	39
2.2. Ledus virsmas izpēte .....	45
2.3. Ledus tekstūras ietekme uz parauga slīdēšanu pa ledu .....	50
2.4. Eksperimentālā parauga vibrāciju analīze .....	53
2.5. Eksperimentālā parauga virsmas tekstūras ietekme uz slīdēšanu pa ledu .....	55
2.6. Reālu apstākļu eksperimentu procedūra .....	57
2.7. Vides apstākļu ietekme uz slīdēšanas laiku.....	64
3. SLĪDĒŠANAS LAIKA PROGNOZĒŠANAS MODELIS UN METODIKA.....	71
3.1. Vides apstākļu sakarības ar slīdēšanas laiku .....	71
3.2. Slīdēšanas laika daudzfaktoru prognozēšanas modelis .....	74
3.3. Slīdēšanas laika mērīšanas un prognozēšanas metodikas izstrāde .....	83
4. PROGNOZĒŠANAS MODEĻA APROBĀCIJA UN TĀLĀKĀS IZPĒTES VIRZIENI ..	86
4.1. Prognozēšanas modeļa aprobācija un salīdzinājums ar skeletoņa sacensību rezultātiem .....	86
4.2. Vides apstākļu un virsmas raupjuma ietekme uz berzes koeficientu laboratorijā.....	88
NOSLĒGUMS UN SECINĀJUMI.....	93
REKOMENDĀCIJAS TĀLĀKAI IZPĒTEI .....	98
INFORMĀCIJAS AVOTI .....	99
PIELIKUMI .....	106

## IEVADS

Zemais berzes koeficients ledum tiek skaidrots ar to, ka starp paraugu, kas slīd pa ledu un ledus virskārtu veidojās plāna ūdens kārtiņa, jeb robežslānis (no angļu valodas: *liquid-like layer*), kura biezums lielā mērā ietekmē slīdēšanu [1–4]. Attiecīgi robežslāņa biezumu ietekmē vides apstākļi, slīdošais paraugs, ledus un izvēlēta berzes pāra sistēmas mērījumu metode (skat. 1.3. att.). Izmērīt robežslāņa biezumu uz ledus virsmas un attiecīgi prognozēt tā ietekmi uz parauga slīdēšanu pa ledu, ledus berzes pētīšanai paliek joprojām neatrisināts jautājums.

Līdz šim zinātnieki ar ledu saistītos pētījumos [1,5,14,6–13] nedefinē pilnvērtīgi apstākļus kādos norisinās eksperiments (skat. 1.1. tabulu), lielākoties ņemot vērā tikai ledus temperatūru, kā eksperimentu apstākļus raksturojošo parametru. Taču norādot tikai ledus temperatūru un, neņemot vērā citus parametrus, kā gaisa mitrumu un gaisa temperatūru, kas ietekmē robežslāņa uz ledus biezumu un attiecīgi parauga slīdēšanu pa ledu [15], rodas neizskaidrojami eksperimentu rezultāti, un zūd salīdzināšanas iespējas starp dažādu autoru darbiem. Rezultātā, ja tiek pētītas, piemēram, parauga slīdošās virsmas tekstūras izmaiņas, var rasties būtiski atšķirīgi rezultāti ar dažādām slīdēšanas raksturojošu parametru mērīšanas metodēm pie it kā līdzīgiem, nepietiekami definētiem, eksperimentu uzstādījumiem. Turklāt nav izpratnes kā dažādu vides aprakstošo parametru mijiedarbība ietekmē parauga slīdēšanu pa ledu.

Hipotēze: gaisa un ledus temperatūra, gaisa mitrums mijiedarbojoties ietekmē berzes pāra nerūsējošais tērauds-ledus parauga slīdēšanas pa ledu raksturojošos parametrus. Zinot vides parametru ietekmi, būtu iespējams prognozēt berzes pāra nerūsējošais tērauds-ledus slīdēšanu raksturojošus parametrus atkarībā no vides apstākļiem, kā arī nodrošināt slīdēšanu pa ledu raksturojošu parametru mērījumu precizitāti un eksperimentu reproducējamību.

Promocijas darba “Gaisa mitruma, gaisa un ledus temperatūras ietekme uz berzes pāra nerūsējošais tērauds-ledus slīdēšanu raksturojošiem parametriem” mērķis ir noteikt likumsakarības starp slīdēšanas laiku un vides parametriem (gaisa, ledus temperatūras un gaisa mitruma) berzes pārim nerūsējošais tērauds-ledus, lai nodrošinātu mērījumu precizitāti un eksperimentu reproducējamību reālu apstākļu eksperimentu režīmā.

Mērķa sasniegšanai, izpildīti vairāki uzdevumi.

1. Līdzšinējo pētījumu izpēte un analīze.
2. Slīdēšanas laika mērīšanas procedūras izstrāde reālu apstākļu eksperimentu režīmā.
3. Eksperimentālie pētījumi.
4. Slīdēšanas laika prognozēšanas modeļa izstrāde atkarībā no vides parametru (gaisa temperatūra, ledus temperatūra, gaisa mitrums) mijiedarbības.
5. Slīdēšanas laika mērīšanas un prognozēšanas metodikas izstrāde.
6. Prognozēšanas modeļa aprobācija un tālākās izpētes virzienu izstrāde.

Lai sasniegtu definēto mērķi un atrisinātu uzdevumus, izmantotas kvantitatīvās un kvalitatīvās pētījumu metodes, kā arī uzskaitītais eksperimentu veikšanas tehniskais nodrošinājums.

Empīriski iegūti triboloģiskie mērījumi veikti, izmantojot virsmu slīdēšanu raksturojošu parametru noteikšanas mēriekārtu, balstītu slīpās plaknes principā. Izstrādājot triboloģijas



mērījumu procedūru, veikti šādi papildu kvantitatīvie pētījumi – pārbaudīta ledus tekstūras ietekme uz slīdēšanu raksturojošiem parametriem, slīdošā parauga virsmas tekstūras ietekme, kā arī vibrāciju analīze. Veikti ledus virsmas vizuālie novērojumi laika gaitā un ledus cietības mērījumi ar nanoindentoru *Hysitron TI980* (ASV) ar papildu saldēšanas moduli ASV uzņēmumā “*Bruker*”. Sadarbībā ar uzņēmumu *V-Research GmbH (Industrial Research and Development)* veikti papildu triboloģijas mērījumi Austrijā, izmērot vides parametru ietekmi uz berzes koeficientu, ar ledus berzes pētniecībā biežāk izmantoto tipa iekārtu – *RVM 1000* (Austrija) lineāro tribometru.

Virsmas tekstūras mērījumi slieču un laboratorijas paraugiem veikti, izmantojot *Taylor Hobson Form Talysurf Intra 50* (*Taylor Hobson*, Lielbritānija) kontakta tipa profilometru un lāzerskenējošo mikroskopu *Confocal microscope VK-X250/260* (*Keyence International NV/SA, Mechelen*, Beļģija), slieču ģeometrija mērīta ar *Mitutoyo CRYSTA-PLUS M500* (*Mitutoyo*, Japāna) manuālo koordinātu mērīšanas iekārtu. Ledus virsmas tekstūras mērīšanai izmantots portatīvais mikroskops *1000x USB Digital Microscope* (*Gaosuo*, Ķīna), datu apstrādei – *Adobe Photoshop* datorprogramma. Vibrācijas mērītas, izmantojot portatīvo akselometru *X16-1D* (*GCDC*, ASV). Ledus temperatūras mērīšanai izmantots termopāris *TP-122-100-MT-K* (*Czaki*, Polija), kas savienots ar *Proscan 520* (*Dostmann*, Vācija). Gaisa temperatūra un gaisa mitrums mērīts ar *P330 Temp* (*Dostmann*, Vācija). Slieču temperatūra pirms eksperimentu veikšanas mērīta ar termokameru *Thermal Imager Testo 871* (*Testo*, Vācija).

Datu apstrādē izmantotas statistikas metodes: aprakstošā/deskriptīvā statistika, prognozēšanas modeļa izstrādē izmantota sakarību noteikšanas secinošā statistikas metode – daudzfaktoru regresijas analīze un korelācijas analīze. Rezultātu attēlošana nodrošināta grafiku, attēlu un tabulu veidā. *CAD* modeļu izstrādē izmantota *Solidworks 2019* datorprogramma.

#### Aizstāvēšanai izvirzītie pētījumu rezultāti:

- *Eksperimentālo pētījumu rezultāti, kas apraksta berzes pāra nerūsējošais tērauds-ledus likumsakarības starp vides apstākļiem un slīdēšanas laiku.* Apskatītajā vides apstākļu diapazonā (relatīvais gaisa mitrums no 55 % līdz 95 %; gaisa temperatūra no –4 °C līdz +10 °C; ledus temperatūra no –6 °C līdz –1 °C), relatīvā gaisa mitruma gadījumā iegūta lineāra sakarība, gaisa mitrumam palielinoties, samazinās slīdēšanas laiks. Gaisa temperatūras un ledus temperatūras gadījumā iegūtos rezultātus raksturo 2. kārtas polinoma līkne. Palielinoties temperatūrai, slīdēšanas laiks samazinās, sasniedzot optimuma vērtību (gaisa temperatūra aptuveni no +2 līdz +4 °C; ledus temperatūra no –4 °C līdz –3 °C), pēc tam slīdēšanas laiks palielinās.
- *Izstrādātais slīdēšanas laika prognozēšanas modelis atkarībā no gaisa, ledus temperatūras un gaisa mitruma mijiedarbības.* Izmantotā trīs vides apstākļu mijiedarbība būtiski ietekmē parauga slīdēšanas raksturojošus parametrus (slīdēšanas laiks, slīdēšanas ātrums, berzes koeficients u. c.) pa ledu. Slīdēšanas laika prognozēšanas kļūda, izmantojot izstrādāto prognozēšanas modeli, tika samazināta vismaz par 40 %.

*Izstrādātā slīdēšanas laika mērīšanas un prognozēšanas metodika atkarībā no vides apstākļiem.* Izmantojot metodiku, mērījumu rezultāti iekļaujas absolūto kļūdu robežās:

gaisa mitrums  $\pm 4\%$ , gaisa temperatūra  $\pm 1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ledus temperatūra  $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , slīdēšanas laiks  $\pm 0,01\text{ s}$  pie ticamības līmeņa  $95\%$ , kas nodrošina mērījumu precizitāti. Izmantojot izstrādāto metodiku, prognozēšanas modeļa atbilstības novērtēšanas kritēriji iekļaujas robežās, kas liecina par korektu modeļa izstrādi. Metodika nosaka mērīšanas procedūras vadlīnijas vides apstākļu diapazonā: relatīvais gaisa mitrums no  $50\%$  līdz  $95\%$ , gaisa temperatūra no  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$  līdz  $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ledus temperatūra no  $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$  līdz  $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

#### Darba zinātniskā novitāte:

- Pierādīts, ka nerūsējošā tērauda slīdēšanu pa ledu būtiski ietekmē trīs vides apstākļu aprakstošo parametru – gaisa un ledus temperatūra, gaisa mitrums – mijiedarbība, proti, nodrošinot augstu gaisa mitrumu ( $\sim 90\%$ ), ledus temperatūru diapazonā aptuveni no  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  līdz  $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$  un gaisa temperatūru diapazonā aptuveni no  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  līdz  $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$ , tiek sasniegtas optimālās slīdēšanu raksturojošo parametru vērtības, samazinot berzi starp paraugu un ledu.
- Izstrādāts jauns berzes pāra nerūsējošais tērauds-ledus slīdēšanu raksturojošu parametru prognozēšanas modelis, kas iekļauj trīs vides aprakstošu parametru mijiedarbību. Uz modeļa pamata izveidota funkcionāla sakarība, kas ļauj samazināt slīdēšanas laika prognozēšanas vidējo procentuālo kļūdu par vismaz  $40\%$  nekā tad, ja tiek izmantotas sakarības, kas apraksta vienu (gaisa mitrums vai gaisa temperatūras, vai ledus temperatūras) vides parametra ietekmi uz slīdēšanas laiku. Balstoties uz prognozēšanas modeli, izstrādāta berzes pāra nerūsējošais tērauds-ledus slīdēšanu raksturojošu parametru mērīšanas un prognozēšanas metodika.
- Konstatēts, ka eksperimentos reālos apstākļos nerūsējošā tērauda parauga virsmas tekstūrai izpētītajā diapazonā ( $Sa\ 0,02\text{--}0,22\ \mu\text{m}$ ) nav būtiska ietekme uz slīdēšanu pa ledu raksturojošiem parametriem, turpretī kontrolētos un stabilos laboratorijas apstākļos parauga virsmas tekstūra berzes koeficienta vērtību ietekmē līdz pat  $3,8$  reizēm.

Promocijas darbā iegūtie rezultāti kalpos kā pierādījums, ka ir nepieciešams pilnvērtīgāk raksturot ledu berzes eksperimentu apstākļus. Ledus pētniecībā būtu iespējams paaugstināt dažādu pētnieku darbu salīdzināšanas iespējas. Zināšanas par vides parametru savstarpēju ietekmi uz nerūsējošais tērauds-ledus slīdēšanu raksturojošiem parametriem nodrošinātu citu parametru kvalitatīvāku izpēti, t. i., ja ir zināma vides apstākļu ietekme, ir iespējams pilnvērtīgāk analizēt citu nerūsējošais tērauds-ledus parametru ietekmi, piemēram, virsmas tekstūras, spiediena, formas u. c.

Attīstot promocijas darba rezultātus, būtu iespējams tos izmantot ar ledu saistītās nozarēs, piemēram, ceļu uzturēšanā, kuģniecībā, kā arī ledu sporta veidu pārstāvjiem, ļaujot izvēlēties atbilstošas slieces, slidas, kas var sniegt priekšrocības attiecīgos apstākļos. Izstrādātais prognozēšanas modelis izmantots Latvijas skeletoņa izlases treniņos, lai prognozētu skeletoņa slīdēšanu raksturojošus parametrus noteiktos vides apstākļos, attiecīgi pielāgojot slieces. To aplicina promocijas darba pilnajā versijā 10. pielikumā pievienotā Latvijas skeletoņa izlases trenera D. Dukura vēstule.

### **Promocijas darbā:**

1. nodaļā, veikta literatūras analīze, apskatot vispārpieņemtus berzes režīmus, parauga slīdēšanas pa ledu ietekmējošos faktorus, berzes teorijas, eksperimentālos pētījumus. Balstoties uz literatūras analīzi, definēti galvenie pētījumu virzieni.
2. nodaļā, veikti eksperimentālie pētījumi. Balstoties uz empīriski veiktiem pētījumiem reālu apstākļu eksperimentu režīmā, kas ietver gan ledus virskārtas tekstūras analīzi un ietekmi uz slīdēšanas laiku, gan slīdošā parauga virsmas tekstūras ietekmi uz slīdēšanas laiku, kā arī eksperimentālā parauga vibrāciju analīzi, izstrādāta reālos apstākļos eksperimentu veikšanas procedūra. Pēc izstrādātas eksperimentu procedūras, veikti vides apstākļu ietekmes uz slīdēšanas laiku mērījumi.
3. nodaļā, izstrādāts prognozēšanas modelis, balstoties uz iepriekšējā nodaļā aprakstītajiem vides apstākļu uz slīdēšanas laiku mērījumu rezultātiem. Izstrādāta slīdēšanas laika mērīšanas un prognozēšanas metodika reālu apstākļu eksperimentu režīmā.
4. nodaļā, veikta prognozēšanas modeļa aprobācija un izstrādāti tālākās izpētes virzieni. Prognozēšanas modeļa rezultāti salīdzināti ar skeletoņa sacensībām, apskatīta vides apstākļu un virsmas raupjuma ietekme uz berzes koeficientu laboratorijas apstākļos.

### **Darba aprobācija**

#### **Starptautiskās zinātniskās konferences (kopā: 8, norādītas būtiskākās)**

1. Jansons E., Irbe M., Kalniņa I., Gross K. A. The influence of environmental conditions on sliding over ice: An experimental study from bobsled push-start facility. 7th European Conference on Tribology, June 12–14, 2019, Wien, Austria. *Ar nopublicētu tēzi.*
2. Jansons E., Gross K. A., The Influence of Ice Topography on Sliding over Ice. ICTIE 2018: 20th International Conference on Tribology and Interface Engineering, November 14–15, 2018, Venice, Italy. *Ar nopublicētu tēzi.*
3. Jansons E. Regularities of friction pair steel – ice sliding properties depending on ambient conditions. The RTU 60th International Scientific Conference. October 14, 2019, Riga, Latvia.
4. Jansons E., Boiko I. The effect of Temperature and Humidity on Steel-Ice Sliding Ability. The RTU 61st international Scientific Conference on Mechanical Engineering and Technology and Heat Engineering. October 14, 2020, Riga, Latvia. *Ar nopublicētu tēzi.*

### **Patenta pieteikums**

1. Jansons E., Lungevičs J., Boiko I. Portable sliding ability measurement device and method used in on-field type experiments. Pat. pieteikuma nr. LVP2020000098, 04.03.2021, īpašnieks – RTU.

## **Publikācijas** (kopā: 12, norādītas būtiskākās)

### Publikācijas zinātniskajos žurnālos (SCOPUS)

1. Jansons, E., Irbe, M., Gross, K. A. Influence of weather conditions on sliding over ice at a push-start bobsled facility. *Biotribology*, 2021, Vol. 25. ISSN 2352-5738. Pieejams: <https://doi.org/10.1016/j.biotri.2020.100152>.
2. Lungevics, J., Jansons, E., Boiko, I., Velkavrh, I., Voyer, J., Wright, T. A Holistic Approach Towards Surface Topography Analyses for Ice Tribology Applications, *Front. Mech. Eng.* 7 (2021) 56. Pieejams: <https://doi.org/10.3389/FMECH.2021.691485>.
3. Jansons, E., Lungevičs, J., Stiprais, K., Plūduma, L., Gross, K. A. Measurement of Sliding Velocity on Ice, as a Function of Temperature, Runner Load and Roughness, in a Skeleton Push-Start Facility. *Cold Regions Science and Technology*, 2018, Vol. 151, 260.–266. lpp. ISSN 0165-232X. Pieejams: <https://doi:10.1016/j.coldregions.2018.03.015>.
4. Jansons, E., Gross, K. A., Lungevičs, J., Plūduma, L. The Influence of Ice Texture on Sliding Over Ice. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, 2018, Vol. 55, No. 5, 54.–64. lpp. ISSN 0868-8257. Pieejams: <https://doi:10.2478/lpts-2018-0036>.

### Raksts pilna teksta konferenču rakstu krājumā (SCOPUS)

1. Lungevičs, J., Jansons, E., Gross, K. Skeleton Runner Roughness and Surface Contact Area Influence on Sliding Ability: Field Experiments. *Key Engineering Materials*, Latvia, Riga, October 26, 2018. Switzerland: Trans Tech Publications Ltd., 2019, 303.–307. lpp. ISSN 1013-9826. e-ISSN 1662-9795. Pieejams: <doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.800.303>.
2. Jansons, E., Gross, K. The Impact of Ice Texture on Coefficient of Friction for Stainless Steel with Different Surface Roughness. *Key Engineering Materials*, Latvia, Riga, October 26, 2018. Switzerland: Trans Tech Publications Ltd., 2019, 308.–312. lpp. ISSN 1013-9826. e-ISSN 1662-9795. Pieejams: <https://doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.800.308>.
3. Velkavrh, I., Voyer, J., Wright T., Lungevičs J., Jansons, E., Boiko, I., Variations of ice friction regimes in relation to surface topography and applied operating parameters, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 1140 (2021) 012033. Pieejams: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1140/1/012033>.

## **Promocijas darba apjoms un struktūras apraksts**

Promocijas darbs ir latviešu valodā, satur ievadu, 4 nodaļas, noslēgumu un secinājumus, rekomendācijas tālākai izpētei, literatūras sarakstu, 11 pielikumus, 48 attēlus, 14 tabulas. Darba apjoms 105 lappuses. Literatūras saraksts sastāv no 104 informācijas avota.

## DARBĀ IZMANTOTIE APZĪMĒJUMI UN TERMINI

- $\lambda$  – materiāla siltumvadītspējas koeficients,  $W/mK$ ;  
 $T$  – temperatūra,  $K$ ;  
 $V$  – slīdēšanas ātrums,  $m/s$ ;  
 $F_N$  – pieliktais spēks,  $N$ ;  
 $\mu$  – berzes koeficients;  
 $A$  – kontakta laukums,  $m^2$ ;  
 $c$  – materiāla siltumietilpība,  $kJ/kgK$ ;  
 $\rho$  – blīvums,  $kg/m^3$ ;  
 $\eta_0$  – ūdens kinemātiskā viskozitāte,  $m^2/s$ ;  
 $h$  – robežslāņa biezums,  $m$ ;  
 $\gamma$  – virsmas enerģija,  $N/m$ ;  
 $\cos\theta$  – kontakta leņķis,  $^\circ$ ;  
 $H$  – materiāla cietība,  $MPa$ ;  
 $F_p$  – spēks uz kontakta punktu,  $N$ ;  
 $E$  – Junga, jeb elastības modulis,  $N/m^2$ ;  
 $m$  – masa,  $kg$ ;  
 $g$  – brīvās krišanas paātrinājums,  $m/s^2$ ;  
 $r_1; r_2$  – slieces izliekuma rādiuss un slieces rādiuss,  $rad$ ;  
 $b_{sliec.}$  – slieces kontakta garums,  $m$ .  
 $\kappa_i$  – termiskā difūzija,  $m^2/s$ ;  
 $Ra$  – vidējā aritmētiskā novirze negludumiem, mērot profilu,  $\mu m$ ;  
 $Sa$  – vidējā aritmētiskā novirze negludumiem, mērot virsmu,  $\mu m$ ;  
 $b_0, b_1 \dots b_n$  – regresijas koeficienti;  
 $x_1, x_2 \dots x_n$  – neatkarīgie saistītie mainīgie;  
 $\sigma$  – standartnovirze, jeb vidējā kvadrātiskā novirze;  
 $\Delta x_s$  – mērījuma absolūtā kļūda;  
 $\Delta x_\delta$  – mērījuma sistemātiskā kļūda, kas nosaka mērinstrumenta precizitāti;  
 $\Delta x$  – galīgā absolūtā kļūda;  
 $RH$  – izmērītais relatīvais gaisa mitrums, %;  
 $T_{gais}$  – izmērītā gaisa temperatūra,  $^\circ C$ ;  
 $T_{ledus}$  – izmērītā ledus temperatūra,  $^\circ C$ ;  
 $T_{ks}$  – izstrādātā prognozēšanas modeļa, berzes pāra nerūsējošais tērauds-ledus slīdēšanu raksturojošs parametrs,  $s$ ;  
 $r$  – korelācijas koeficients;  
 $R^2$  – determinācijas koeficients;  
 $\bar{R}^2$  – koriģētais determinācijas koeficients;  
 $\sigma_{reg}$  – daudzfaktoru regresijas modeļa standartnovirze.

*Nerūsējošais tērauds* – promocijas darbā izmantots nerūsējošais tērauds *Uddeholm Ramax HH*.

*Ledus* – promocijas darbā aprakstā, kur nav izcelts robežslānis, termins (ledus) apzīmē gan ledus pamatni, gan uz tā veidojušos robežslāni.

*Robežslānis* – promocijas darbā apzīmē slāni uz ledus virskārtas (no angļu valodas: *liquid-like layer*).

*Eksperimentālais vai slīdošais paraugs* – promocijas darbā apzīmē slīdni (no angļu valodas: *slider*), kas ir saskarsmē ar ledu. Atšķirties var materiāls, ģeometrija, svars u.c. parametri.

*Slīdēšanu raksturojošie parametri* – promocijas darbā apzīmē parametrus ar kuriem var raksturot parauga slīdēšanu pa ledu (no angļu valodas: *sliding ability*). Tie var būt slīdēšanas laiks, ātrums, berzes koeficients u.c.

*Slīdēšanas laiks* – promocijas darbā apzīmē izmērīto kopējo slīdēšanas laiku 24 m garā posmā.

*Eksperimenti reālos apstākļos* – promocijas darbā apzīmē eksperimentus, kas tiek veikti ārpus laboratorijas (no angļu valodas: *field experiments*).

*Vides apstākļi* – promocijas darbā apzīmē relatīvo gaisa mitrumu, gaisa temperatūru, ledus temperatūru.

*Renes sporta veidi* – promocijas darbā apzīmē bobsleju, skeletonu, kamaniņu sportu.

*Atbalsta virsma* – promocijas darbā apzīmē materiāla atbalsta virsmu, %, kāda tā tiek iegūta, to šķeļot attiecīgā līmenī no virsmas augstākās virsotnes (no angļu valodas: *bearing ratio*).

*Eksperimentu sesija* – promocijas darbā apzīmē vismaz 10 secīgus slīdēšanas laika mērījumus reālu apstākļu eksperimentu režīmā.

*IBSF* – Internacionālā bobsleja un skeletoņa federācija.

# 1. LITERATŪRAS APSKATS

Ledus izpētes pirmsākumi meklējami jau vairāk kā 150 gadus atpakaļ, kad Faradey eksperimentēja ar diviem ledus klucīšiem, kuri kontaktā uzreiz savstarpēji sasala, nonākot pie secinājuma, ka ledus virskārta ir klāta ar plānu ūdens slānīti, jeb robežslāni. Vēlāk Reynolds, pamatojoties uz ūdens fāžu diagrammu (skat. 1.4. att.), zemo berzes koeficientu uz ledus skaidroja ar ledus virsmas kušanu spiediena ietekmē, līdz ar to rodas robežslānis uz ledus virskārtas, kas padara ledus virskārtu slidenu. Šis ledus berzes skaidrojums eksistēja vairāk kā 40 gadus, līdz Bowden pierādīja, ka ledus virsmas kušana spiediena ietekmē var teorētiski darboties tikai tuvu pie ledus kušanas temperatūras, neizskaidrojot ledus zemo berzes koeficientu pie zemākām temperatūrām. Bowden ierosināja, ka galvenais iemesls zemajam berzes koeficientam ir ledus uzsilšana berzes rezultātā. Šobrīd tiek uzskatīts, ka šī teorija galvenokārt izskaidro ledus berzi [15].

Zināšanas par ledus berzi pārsvarā tiek izmantotas divos virzienos – sports un drošība. Ledus sporta veidos, piemēram, hokejs, ātrslidošana, renes sporta veidi, samazinot berzes koeficientu ir iespējams panākt ātrāku pārvietošanos pa ledu, kas atlētiem var dot vērtīgu pienesumu, lai izcīnītu augstākas pozīcijas sacensībās. Hainzmaier [16] savā disertācijā pētīja bobsleja slieču ģeometrijas ietekmi uz slīdēšanas ātrumu, izveidojot dažādas makro ģeometrijas slieces un tās salīdzināja, nonākot pie secinājuma, ka slieču ģeometrijai ir optimuma punkts, sasaucoties ar teoriju, ka ir optimālais spiediens, kas nodrošina ātrāku slīdēšanu pa ledu. Lozowski ar komandu [3,17,18] izveidoja teorētiskos ledus berzes modeļus bobslejam, ātrslidošanai un skeletonam. De Koning [19] un Colbeck [20] pētīja ledus berzi slidošanā. De Koning eksperimentāli izdevās pierādīt, ka ir optimuma punkts starp ledus temperatūru un berzes koeficientu. Colbeck pētījumos eksperimentāli pierādīja, ka zemais berzes koeficients slīdot pa ledu, rodas galvenokārt, ledus uzsilšanai berzes rezultātā.

No drošības puses, berzes koeficienta palielināšanās pie konkrētiem apstākļiem var būt pat vitāli svarīga, piemēram, riepu ražošanā, kurpju zoļu izstrādē [21–23]. Tā pat zināšanas var būt noderīgas, piemēram, lai novērstu apsaluma veidošanos uz lidmašīnu spārniem, vēja turbīnām, kuģiem [24–27].

## 1.1. Robežslānis starp paraugu un ledu

Uz ledus virskārtas veidojās robežslānis, kas padara ledu slidenu un spēlē nozīmīgu lomu ar slīdēšanu pa ledu saistītos procesos. Lai gan joprojām nav vienota uzskata, kas veido un kā pareizi definēt robežslāni uz ledus virsmas un vairāki pētnieki ir centušies to aprakstīt (no angļu valodas – *Liquid like layer* [4,28,29] vai *Quasi liquid layer* [30–32]), tomēr ir skaidrs, ka robežslānis uz ledus virsmas eksistē [2,33]. Vēsturiski tiek izšķirtas 3 galvenās teorijas, kā ūdens kārtiņa parādās uz ledus virsmas:

- **Spiediena rezultātā tiek kausēts ledus (*no angļu valodas: Pressure melting*)**

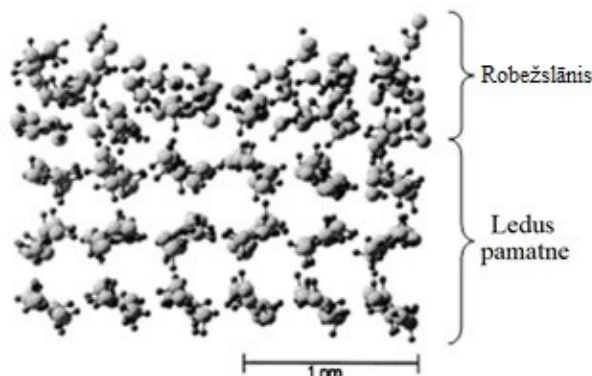
Ledus virsmas kušana spiediena ietekmē daudzus gadus tika uzskatīta, kā skaidrojums zemajam berzes koeficientam ledum. Ūdens šķidrā formā ir blīvāks par ledu un aizņem aptuveni 10 % mazāk tilpumu uz molu. Līdz ar to balstoties uz *Le Chatelier* principu, jeb līdzsvara

likumu [34] palielinoties spiedienam, ledus virskārta sāk kust [33]. Izkusušais ūdens ģenerē slidenu slāni uz ledus virskārtas.

Bowden bija pirmais, kurš norādīja uz nepilnībām šim skaidrojumam [35], proti, tika pierādīts, ka ledus kausēšana spiediena rezultātā nerada pietiekamu efektu, lai uz ledus veidotos ūdens kārtiņa un tas attiecīgi kļūtu slidenāks. Colbeck [36] savā publikācijā izskaidroja kāpēc spiediena rezultātā ledus kausēšana nebūs cēlonis ledus zemajam berzes koeficientam. Viens no galvenajiem iemesliem ir nepieciešamais lielais spiediens, lai kausētu ledus virskārta, kas novestu ledus virskārta līdz saplaisāšanai. Turklāt, ja ledus temperatūra ir zemāka par  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , balstoties uz ūdens fāžu diagrammu (skat. 1.4. att.), robežslānis teorētiski nevar eksistēt uz ledus virskārtas pat pie liela spiediena.

- **Ledus virsmas kušana, jeb robežslāņa veidošanās no brīvajām ūdens molekulām (no angļu valodas: *Surface melting*)**

Ledus virsmas kušana, jeb robežslāņa veidošanos no brīvajām ūdens molekulām uz ledus virskārtas tika aprakstīta jau Faraday novērojumos 19. gadsimtā [15,16,37]. Slānis eksistē uz ledus neatkarīgi no kontakta ar citu paraugu. Vairāk pierādījumus par šī slāņa esamību piedāvāja Petrenko [38], Makkonen [39]. Teorētiskais modelis par robežslāņa veidošanos, tiek bāzēts uz ideju, ka ledus molekulām ir brīvā enerģija ledus virskārtā, tādēļ veidojās “pārejas slānis” šķidra ūdens formā (skat. 1.1. att.). Zemākās temperatūras, pie kurām tika novērota robežslāņa veidošanās ir no  $-30$  līdz  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , kas attiecīgi rada pretrunas ar iepriekš apskatīto teoriju [2,33].



1.1. att. Ledus virskārtas struktūra [15].

Vairāki pētnieki ar dažādām metodēm ir mērījuši robežslāņa biezumu uz ledus virsmas, bet izmērītais biezums variējis no 1 nm, izmantojot lāzer staru izkliedi (no angļu valodas: *x-ray scattering*) un silikona virsmu, līdz 100 nm izmantojot atom spēku mikroskopu (no angļu valodas: *atomic force microscope*) pie  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  ledus temperatūras [2,33]. Lai arī ir izdevies pierādīt, ka robežslānis uz ledus virsmas atrodas, lielā biezuma variācija norāda, ka izmantot konkrētu vērtību nav korekti.

- **Ledus uzsilšana berzes rezultātā (no angļu valodas: *Frictional heating*)**

Bowden, kā alternatīvu ledus kausēšanai spiediena rezultātā, [15,33,37] piedāvāja, ka ledus uzsilšana berzes laikā ir galvenais iemesls ledus zemajam berzes koeficientam. Siltums, kas rodas berzes rezultātā, uzsilda ledus virskārta kontakta punktus. Tā kā ledus virskārta kūst

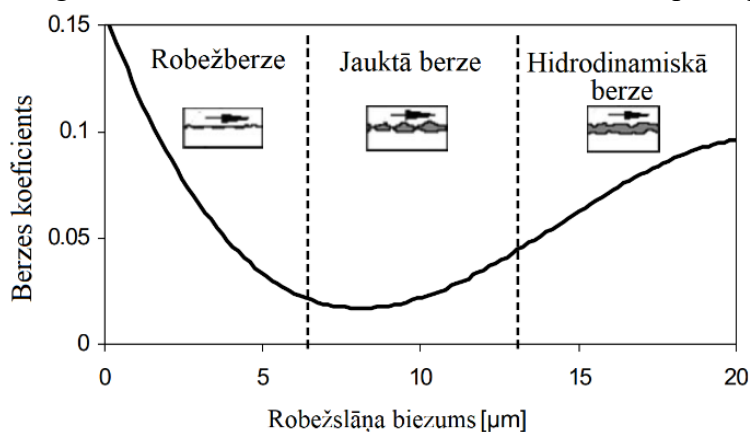


kontakta punktā, kušana rada plānu ūdens kārtiņu. Tā piedalās ledus un parauga virsmas slīdēšanu raksturojošu parametru uzlabošanā. Tiesa, siltums netiek pilnībā izmantots, lai kausētu ledu, rodas siltuma zudumi apkārtējā vidē, virsmas deformācijā u.c. Autors norāda, ka slidenais slānis, var kļūt nepārtraukts, ja apkārtējās vides temperatūra ir tuvu ledus kušanas temperatūrai.

Lai eksperimentāli pierādītu, ka ledus uzsilst berzes rezultātā nevis spiediena, Colbeck veica praktisku eksperimentu ar termopāri mērot slidas temperatūru [20]. Temperatūra palielinājās, kad cilvēks eksperimentā slidoja, taču samazinājās, kad apstājās. Līdz ar to varēja secināt, ka galvenais mehānisms, kas uzsilda ledu ir berze, nevis spiediens.

## 1.2. Berzes režīmi paraugam slīdot pa ledu

Ņemot vērā vispārpieņemtus fizikālos principus, ledus berzei var piemērot berzes režīmus, kur starp diviem paraugiem ir robežslānis, balstoties uz *Stribeck* līknes principu (skat. 1.2. att.).



1.2. att. Robežslāņa biezuma ietekme uz berzes koeficientu [15,38,40].

Izšķir trīs berzes režīmus [15,40]:

- **Robežberze (*no angļu valodas: boundary friction*)**

Ūdens slāniņa biezums starp ledu un paraugu ir no dažām molekulām līdz 5  $\mu\text{m}$ . Salīdzinājumā ar sauso berzi, slānītis samazina berzes koeficientu. Temperatūrai kontakta zonā ir jābūt zem kušanas temperatūras, kā arī robežslānim ir jābūt mazākam kā slīdošās virsmas raupjumam. Šāds berzes veids pārsvarā var tikt novērots pie zemām ledus temperatūrām.

- **Jauktā berze (*no angļu valodas: mixed friction*)**

Slāniņa biezums no 5 – 15  $\mu\text{m}$ . Ledus virskārtas temperatūra dažos kontakta punktos ir lielāka par ledus kušanas temperatūru, kā arī slīdošās virsmas raupjums joprojām ir lielāks par slāņa biezumu. Šajā gadījumā paraugs tiek daļēji balstīts gan uz ledus virsmas izciļņiem, gan uz robežslāņa.

- **Hidrodinamiskā berze (*no angļu valodas: hydrodynamic friction*)**

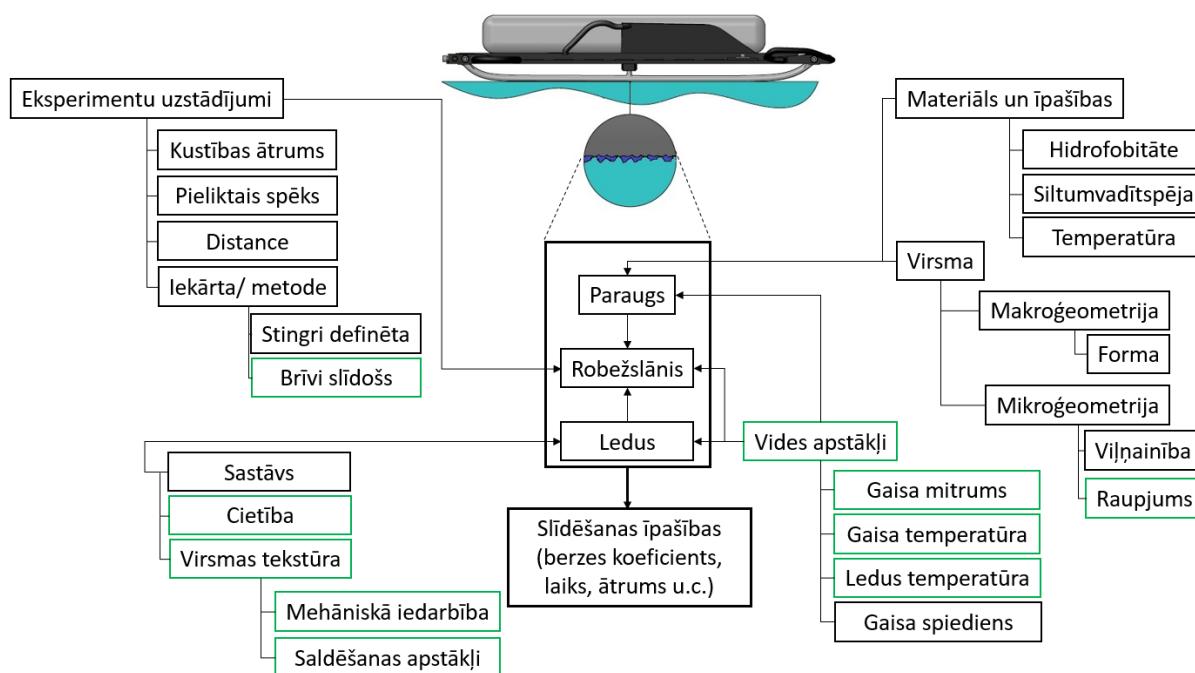
Slāniņa biezums virs 15  $\mu\text{m}$ . Ledus virskārtas temperatūra kontakta zonā ir virs kušanas temperatūras un robežslānis ir biezāks par izciļņu augstumu. Šajā gadījumā paraugs balstās teorētiski tikai uz robežslāņa.

Robežslāņa biezums ietekmē berzes koeficientu starp slīdošo paraugu un ledu. Slānim palielinoties, samazinās berzes koeficients, arvien vairāk pārnesot tiešu kontaktu starp ledus izciļņiem uz jauktu kontaktu starp izciļņiem un robežslāni, līdz tiek sasniegta optimuma vērtība (skat. 1.2. att.). Jauktās berzes režīms tiek uzskatīts par optimālajiem apstākļiem [5,9,15,40], lai nodrošinātu mazāko berzes koeficientu. Robežslāņa biezums ir pietiekams, lai tas nodrošinātu mazāku berzes koeficientu, taču nav arī pārāk biezs, kas rada jau hidrodinamiskus apstākļus.

Pie hidrodinamiskās berzes, kad kontakts teorētiski notiek tikai pa slāni, berzes koeficients pieaug. Kā skaidrojums tam ir viskozā pretestība (no angļu valodas: *viscous drag*) starp parauga virsmu un robežslāni [15,40].

### 1.3. Parauga slīdēšanas pa ledu ietekmējošie faktori

Nerūsējošais tērauds-ledus un citu berzes pāru pētījumos jāapskata gan paraugu, kas slīd pa ledu, piemēram slidas hokejā, ātrslidošanā, slieces renes sporta veidos, gan ledus virskārtu, kas ir atkarīga no apkārtējiem apstākļiem – 1) vides apstākļiem; 2) apstākļiem, kas veidojušies no mehāniskas iedarbības uz ledu virsmu (skat. 1.3. att.).



1.3. att. Nerūsējošais tērauds-ledus ietekmējošie faktori (zaļā krāsā izcelti parametri, kas tika apskatīti šī promocijas darba ietvaros).

#### Slīdošais paraugs

Paraugs, kas slīd pa ledu var būt dažādas formas, izmēra, materiāla utt., taču jāņem vērā vairāki parametri, kas ietekmē tā slīdēšanu:

- Pieliktais spēks;

Slīdošajam paraugam pieliktais spēks tieši ietekmē tā slīdēšanu pa ledu. Lielākoties pastāv uzskats, ka lielāks pieliktais spēks nodrošina mazāku berzes koeficientu – tiek kausēta ledus

virskārta, kas rada biezāku robežslāni starp paraugu un ledu [15,16,38]. Baurle, pētīja polietilēna parauga slīdēšanu pa ledu, izmantojot rotācijas tipa tribometru ar diametru 1,8 m, ieguva rezultātus, kur berzes koeficients samazinās, palielinot pielikto spēku (52 N un 84 N) [7]. Bottcher [41] eksperimentos izmantoja UHMWPE polietilēna slēpes. Ar lineāra tribometra palīdzību tika veikti eksperimenti ar 40, 60 un 80 N pielikto spēku. Rezultāti uzrādīja berzes koeficienta samazināšanos, palielinot pielikto spēku. Scherge [8] izmantojot rotācijas tribometru, kas ļauj veikt mērījumus pie liela ātruma (līdz pat 100 km/h), veica eksperimentus ar metāla sliecēm pa ledu un ieguva līdzīgus datus, kā iepriekš aprakstītie pētnieki, proti, palielinot pielikto spēku, samazinās berzes koeficients. Scherge izmantoja lielāku pielikto spēku (no 100 līdz 500 N).

- Materiāla īpašības;

Veicot pētījumus, jāņem vērā izvēlēta materiāla īpašības, proti, siltumvadītspēja, hidrofobitāte jeb slapināmības īpašības.

Materiāla siltumvadītspējas ietekmi uz slīdēšanu pa ledu ir sarežģīti analizēt, jo jāsalīdzina dažādi materiāli, kam ir arī citas īpašību atšķirības (hidrofobitāte, cietība). Matemātiskajos modeļos pārsvarā materiāla siltumvadītspēja tiek iekļauta kā viens no parametriem [15,17,42]. Kietzig [43] testēja 14 dažādus materiālus, lai noskaidrotu, kā siltumvadītspēja ietekmē slīdēšanu pa ledu, nonākot pie secinājuma, ka palielinoties ātrumam, materiāla siltumvadītspējas ietekme uz slīdēšanu raksturojošiem parametriem samazinās. Zema siltumvadītspēja pie robežberzes režīma un zema ātruma uzrādīja lielāko ietekmi uz berzes koeficientu samazināšanu, tiesa, ir jāskata arī citi materiālu raksturojošie parametri, lai šis apgalvojums būtu korekts. Tas varētu tikt skaidrots ar to, ka materiāla temperatūra ir augstāka kā ledus virsmai pie robežberzes režīma, līdz ar to zemā siltumvadītspēja materiālam nodrošina, ka tas neatdziest tik ātri kā materiāli ar augstāku siltumvadītspēju. Tādējādi siltākam materiālam slīdot pa ledus virsmu ir tendence ģenerēt biezāku robežslāni, kas attiecīgi samazina berzes koeficientu.

Materiāla hidrofobitāte, jeb slapināmības īpašības. Kietzig [1] savos eksperimentos parauga virsmu apstrādāja ar lāzeru, tādējādi iegūstot hidrofobākas virsmas īpašības (Kontakta leņķis pirms apstrādes – 84 °, pēc – 128 °). Rezultāti uzrādīja berzes koeficienta atšķirības pie salīdzinoši siltiem (–1,5 °C ledus temperatūra) apstākļiem, proti, palielinoties slīdēšanas ātrumam virs 0,5 m/s, hidrofobāka parauga virsma uzrādīja zemāku berzes koeficientu, kā virsma pirms apstrādes ar lāzeru. Tas tika skaidrots ar mazāku kapilāro spēku ietekmi pie siltiem apstākļiem uz paraugu ar apstrādātu virskārta, salīdzinot ar pulētu paraugu. Līdzīgs rezultāts tika iegūts [44], salīdzinot paraugus ar dažādām virsmas apstrādes metodēm. Eksperimentus veicot uz iekārtas, balstītu uz slīpo plakni, tika secināts, ka pie siltākiem eksperimentu apstākļiem, paraugiem ar lielāku atbalsta virsmu, uzsākot kustību no miera stāvokļa, ir tendence uzrādīt zemāku slīdēšanas ātrumu (lielāku berzes koeficientu), kā paraugiem ar apstrādātu virsmu un attiecīgi mazāku kontakta laukumu.

- Virsmas tekstūra;

Virsma var tikt apstrādāta noteiktā virzienā, radot speciāli iestrādātas gropes, vai ko citu virskārtā. Kietzig [1] savos pētījumos izveidoja paraugus ar līdzīgu raupjumu, taču dažādām apstrādes pēdām – koncentriskas un gadījuma rakstura. Eksperimentu rezultāti uzrādīja, ka

paraugiem ar koncentrisku apstrādes veidu slīdēšanas virzienā ir zemāks berzes koeficients pie zema ātruma (līdz 0,1 m/s), kā paraugiem ar gadījuma rakstura apstrādes pēdām. Bottcher [41] veidoja paraugus ar gropēm paralēli slīdēšanas virzienam. Distance starp gropēm – 100 μm līdz 400 μm. Slīdēšanas ātrums – 1 m/s. Zemāks berzes koeficients tika iegūts paraugiem ar mazāku gropju skaitu (lielākā distance starp gropēm). Kim [12] eksperimentēja ar silikona paraugiem (3,5 x 3,5 cm<sup>2</sup>), izveidojot taisnvirziena tekstūru (taisnstūrveida paralēlskalnis 10 μm augstumā un 20 μm platumā) ar attālumiem starp tiem 20 un 200 μm. Līdzīgi kā Bottcher darbā, eksperimentos tika iegūts, ka zemāks berzes koeficients ir paraugiem ar lielākiem attālumiem starp veidojumiem uz virsmas. Eksperimentēts tika ar tiem pašiem paraugiem ar veidojumiem perpendikulāri un paralēli slīdēšanas virzienam un iegūts, ka pie siltākām ledus temperatūrām (no –8 līdz –2 °C), paraugi ar izveidoto virsmas tekstūru perpendikulāri slīdēšanas virzienam uzrādīja mazāku berzes koeficientu.

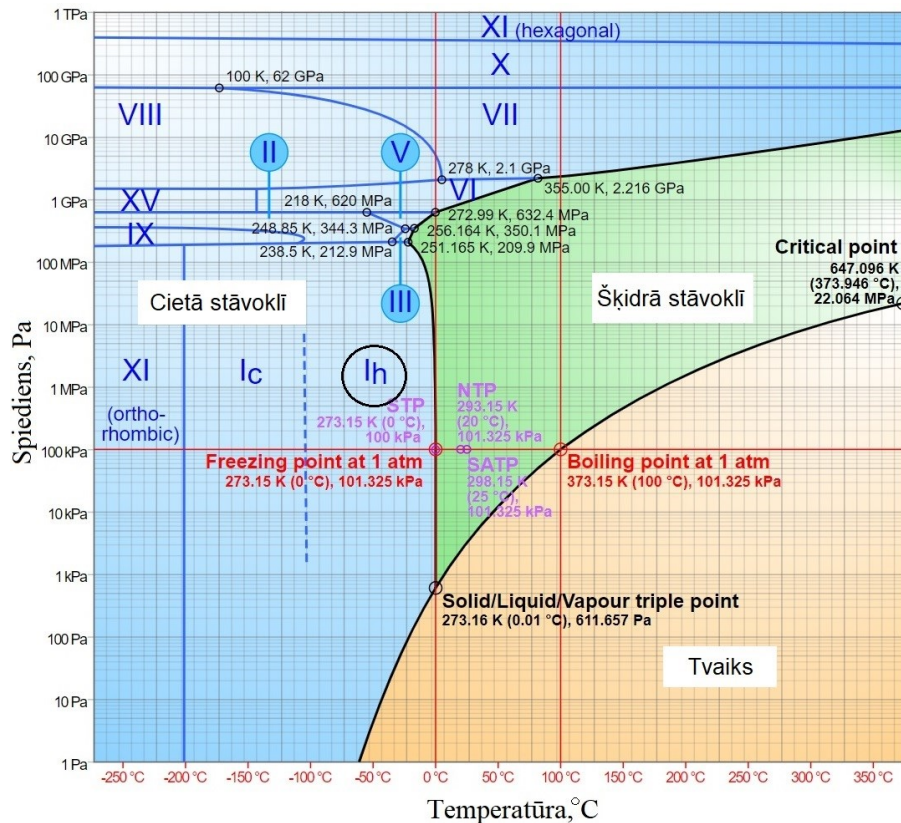
Tika veikts pētījums, salīdzinot paraugus ar atšķirīgām virsmas tekstūrām, izmantojot skrošu apstrādi, skrāpēšu ar smilšpapīru, frēzēšanu un pulēšanu ERAF projekta “Virsmas īpašību ietekmes uz slīdamību pa ledu pētījumi” ietvaros [44]. Rezultātā tika iegūts, ka lielākā ietekme uz slīdēšanu raksturojošiem parametriem ir atbalsta virsmai starp slīdošo paraugu un ledu, proti, samazinoties atbalsta virsmai, palielinās slīdēšanas ātrums. Te gan jāņem vērā divi būtiski faktori: 1) tika testēti salīdzinoši viegli paraugi (~ 68 g) bez uzspiestas kustības, kas nozīmē, ka paraugu virsmas tekstūra nekonzfliktēja ar ledus virskārtu, neradot papildus berzi; 2) Iestrādātās frēzētās gropes un skrāpējumu virziens paraugiem tika veidots paralēli slīdēšanas virzienam ar mērķi uzlabot slīdēšanu raksturojošus paramterus, līdz ar to izveidojot paraugus ar tādu pašu apstrādes tehnoloģiju, piemēram, perpendikulāri slīdēšanas virzienam un iegūstot līdzīgu kontakta laukumu, slīdēšanas ātrums varētu samazināties.

Virsmas tekstūra iekļauj virsmas raupjumu. Rohm [45] eksperimentos ar metāla slēpi uz presēta sniega, izmantojot 24 m garu lineāro tribometru, nonākot pie secinājuma, ka raupjāka slēpes virsma nodrošina mazāku berzes koeficientu, turklāt efekts ir vislabāk novērojams pie siltākām sniega temperatūrām (–3,2 °C). Rohm skaidroja, ka raupjākām slēpēm ir mazāks kontakta laukums, kas samazina adhēziju starp slēpi un sniegu. Spagni [5] eksperimentēja ar dažāda raupjuma metāla diskām (apstrādāti ar smilšu strūklu) pie dažādām temperatūrām, izmantojot rotācijas tipa tribometru. Rezultāti ir pretēji Rohm prezentētajiem datiem, proti, paraugi ar mazāko raupjumu uzrādīja mazāku berzes koeficientu. Spagni eksperimenti tika veikti pie citādākiem apstākļiem kā Rohm.

VPP projekta ietvaros “Metāla virsmas apstrāde berzes un nodiluma samazināšanai” tika pētīta virsmas raupjuma ietekme uz slīdēšanas ātrumu laboratorijā, izmantojot virsmu slīdēšanu raksturojošu parametru noteikšanas mēriekārtu balstītu uz slīpās plaknes principu [46]. Tika sagatavoti metāla paraugi ar atšķirīgu virsmas raupjumu, tos skrāpējot ar smilšpapīru. Iegūtie rezultāti pierādīja, ka virsmas raupjums ietekmē slīdēšanas ātrumu laboratorijas apstākļos (gaisa temperatūra –5,5 °C), taču virsmas raupjuma ietekme uz berzes pāra nerūsējošais tērauds – ledus slīdēšanas procesu nav izpētīta pilnvērtīgi, ņemot vērā dažādus berzes režīmus [15].

## Ledus

Ledus kristāli var veidoties vienā no 18 zināmajām ūdens kristālu struktūrām atkarībā no saldēšanas apstākļiem (spiediena, temperatūras, saldēšanas ātruma), vai arī atrasties amorfā stāvoklī. Amorfu ledu attiecīgi iedala 3 stāvokļos, atkarībā no blīvuma un to var iegūt ātri vai zem liela spiediena saldējot ledu. Pārsvārā ledus dabā ir sastopams sešstūrīgu kristālu formā, jeb  $I_h$  formā [47] (skat. 1.4. att.).



1.4. att. Spiediena – temperatūras ūdens fāžu diagramma [48].

- Ledus tekstūra;

Ledus tekstūra var ietekmēt ledus eksperimentu rezultātus. Lielākoties, lai analizētu ledus tekstūru, tiek izmantotas ledus replikas un tām mērīti 2D raupjuma profili.

Baurle [49], lai izmērītu ledus raupjumu, veidoja ledus replikas. Tika izmantots dimetila siloksāna polimērs. Attiecīgi replikai tika mērīts raupjums ar 2D profilometru. Vidējais  $R_a$  (vidējā aritmētiskā novirze profilam), pēc Baurle datiem, gludam ledum ir aptuveni 0,07  $\mu\text{m}$ , taču ledum, kas tiek izmantots, piemēram, bobsleja trasē aptuveni 0,3  $\mu\text{m}$ .

Spagni [5], līdzīgi kā Baurle, ledus paraugiem, veidoja replikas, izmantojot uz vinilpoli siloksāna bāzes šķidro termo polimēru. Raupjums tika mērīts ar *Stylus 2D* profilometru un tika novērota vidējā  $R_a$  vērtība 0,1  $\mu\text{m}$ . Rezultāts ir līdzīgs Baurle iegūtajiem datiem gludai ledus virsmai.

Ducret [9], pētīja nodilumu polimēram (UHMWPE), slidinot to pa ledu. UHMWPE tiek izmantots slēpju virsmas apstrādei, pateicoties tā zemajam berzes koeficientam. Ducret izmantoja netradicionālāku metodi, viņš veidoja silikona formas ar atšķirīgu topogrāfiju, kurās tika saldēts eksperimentos izmantotais ledus. Pēc tam formām, ar interferometru tika nomērīta

virsmā un ar 3D topogrāfijas mērīšanas programmu izmērīts vidējais leņķis starp ledus nelīdzenuma virsotnēm un paraugu uz tā. Izmērītais leņķis tika izmantots, kā raupjuma raksturojoša mērvienība – jo mazāks leņķis, jo gludāka virsma.

- Ledus cietība;

Barns [50] veica ledus cietības mērījumus uz ledus virskārtas klimata simulācijas kamerā. Tika izmantota saspiešanas iekārta, kur ar metāla lodīti tika spiests uz ledus virsmu noteiktu laiku, līdz tā sāk plaisāt. Iekārta uzrādīja spiedienu, kāds ir plaisāšanas brīdī. Rezultātā Barns un Tabor piedāvāja modeli, kur ledus cietība ir atkarīga no kontakta laika un temperatūras.

Poirier [51] analizējot Barns modeli, nonāca pie secinājuma, ka tas nestrādā pie dinamiskas ledus slodzes, tāpēc izstrādāja savu eksperimentu. Metāla lodes ar dažādiem izmēriem un svaru, tika mestas no 0,3 līdz 1,2 m augstuma uz ledus virsmu. Eksperimentos tika mērīts atstātā nospieduma, jeb krātera diametrs, lai aprēķinātu ledus cietību. Ledus cietības analīze tika balstīta uz 2 pieņēmumiem – metāla lode netiek deformēta eksperimenta laikā un, ka tilpums krāterim, kas veidojās uz ledus ir proporcionāls lodes enerģijai. Eksperimenti tika veikti uz 3 dažādām ledus virsmām Kanādas Olimpiskajā parkā un Kalgari Olimpiskajā ovālā. Iegūtie dati parāda ledus cietības atkarību no ledus temperatūras. Makkonen [42] savā darbā izmantoja līdzīgu pieeju, lai apstiprinātu Poirier iegūtos datus.

- Ledus sastāvs;

Zināmajā literatūrā, pētījumi pārsvarā tiek veikti ar saldētu sālsūdeni [52–54] vai saldūdeni [5,8], atkarībā no mērķa. Sālsūdens tiek raksturots ar sāls koncentrāciju tajā vai atkarībā no vietas kur tiek iegūts. Saldūdens gadījumā tiek izmantots vai nu krāna ūdens, vai arī destilēts ūdens ar nelielu krāna ūdens piejaukumu, neraksturojot sastāvu.

Sukhorukov [55] laboratorijā pētīja tērauda un ledus slīdēšanu raksturojošus parametrus, izmantojot virzuļa tipa sagatavi pie kā piesaldēja ledu. Ar saspiešanas iekārtu, tas tika spiests ārā no cilindra. Pētījums vairāk tika orientēts uz dažāda raupjuma cilindriem un virzuļiem, taču tika veikts gan ar sālsūdeni, gan saldūdeni. Iekārta nedeva precīzu berzes koeficienta vērtību, taču nepieciešamais spēks, lai izspiestu virzuli ar ledu no cilindra, tika novērots lielāks saldūdens ledus gadījumā. Autors skaidroja, ka sāls piejaukums varētu strādāt kā papildus eļļotājs, samazinot pretestību.

### **Eksperimentu apstākļi**

Lai aprakstītu berzes procesu starp tēraudu un ledu, jāņem vērā, kādos apstākļos tiek veikti eksperimenti – kāda eksperimentu metode tiek izmantota un kādi ir eksperimentu uzstādījumi (slīdēšanas ātrums, gaisa un ledus temperatūra, gaisa mitrums). Gaisa temperatūra, ledus temperatūra un relatīvais gaisa mitrums tika izvēlēti kā parametri, kas tiek izmantoti eksperimentu vides apstākļu aprakstīšanā, kā arī šie parametri ir salīdzinoši vienkārši izmērāmi. 1.1. tabulā ir apkopoti dati no dažādiem pētījumiem, kas saistīti ar parauga slīdēšanu pa ledus virsmu.

Pēc tabulas datiem var secināt, ka pētnieki ledus temperatūru pārsvarā izmanto kā vides apstākļu aprakstošo parametru (14 gadījumos no 16, jeb 88 % gadījumu), tas saistīts ar ledus temperatūras tiešo ietekmi uz ledus cietību. Gaisa temperatūra pārsvarā tiek izmantots kā sekundārs vides apstākļu aprakstošs parametrs (8 gadījumi no 16, jeb 50 % gadījumu). Gaisa mitrums reti tiek ņemts vērā, vai norādīts publikācijās (3 gadījumi no 16, jeb 19 % gadījumu).

Pētnieku veikto eksperimentu apkopojums

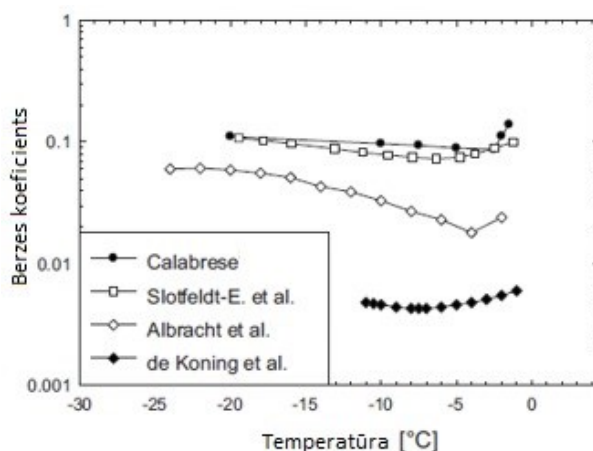
	Eksperiments	Atsauce	Slīdēšanas ātrums, m/s	Vides apstākļi		
				Gaisa temperatūra, °C	Ledus temperatūra, °C	Gaisa mitrums, %
Eksperimenti laboratorijas apstākļos	Lodīte pret disku tribometrs	Spagni [5]	0,25...1	-2;-6;-10;-13;-17	?	?
	Lodīte pret disku mikrotribometrs	Scherge [6]	1...65	?	-6;-10;-17	?
	Ø 1,8 m tribometrs	Baurle [7]	0,5...20	-20...1	-7...-5	?
	Ø 3,8 m tribometrs	Scherge [8]	2,8...28	?	-12...-2	?
	Lineārs tribometrs	Ducret [9]	0,003	-15...5	?	?
	Lineārs tribometrs	Marmo [11]	0,01...0,4	?	-27...-0,5	?
	Lineārs tribometrs	Bottcher [41]	1	?	-2;-6;-10	?
	Lineārs tribometrs	Rohm [45]	0,1...12	-2;-3,5;-6,3;-9,8	-3,2;-4,6;-7,4;-11,7*	79...82
	Reometrs	Kietzig [1]	0,1...1,2	-4	-14...-2	?
	Rotācijas tipa tribometrs	Akkok [14]	0,05...5	-30...-10	-30...-10	?
	Rotācijas tipa tribometrs	Liefferink [13]	0...1	?	-110...0	?
	Lineārs tribometrs	Kim [12]	0,003	?	-18...-2	?
Reālu apstākļu eksperimenti	Rāmis ar 4 bobsleja sliecēm	Poirier [10]	1...10	?	-4,6...-2,2	?
	Cilvēks uz slidām	Koning [19]	4...11	12	-11...-2	55
	Cilvēks uz slidām	Colbeck [20]	?	?	-13,5...-2,5	?
	Rāmis ar slidām	Federolf [56]	1...2	14...16	-6...-5	17...26
Gadījumu skaits				<b>8 no 16</b>	<b>14 no 16</b>	<b>3 no 16</b>

\* Eksperimenti veikti uz sapsesēta sniega nevis ledus

Calabrese pētīja gaisa mitruma ietekmi uz berzes pāra nerūsējošais tērauds–ledus berzes koeficientu pie  $-29\text{ °C}$  (robežberzes režīms) un ieguva datus, ka lielāks gaisa mitrums samazina berzes koeficientu [15]. Zināmajā literatūrā, nav datu par gaisa mitruma ietekmi uz parauga slīdēšanu raksturojošiem parametriem pie citiem berzes režīmiem. Iespējams, tiek uzskatīts, ka pie siltākas temperatūras gaisa mitruma ietekme ir niecīga un netiek pētīta padziļināti.

Tā kā gaisa mitrums ir ūdens tvaika koncentrācija gaisā, tam palielinoties arī ūdens tvaiks gaisā palielinās un tā kā gaiss ir kontaktā ar virsmām, arī ar uz ledus esošo robežslāni, gaisā esošajām ūdens tvaika molekulām kohēzijas rezultātā ir tendence sajaukties ar ūdens

molekulām uz ledus esošajā robežslānī, starpmolekulāro ūdeņraža saišu dēļ [57]. Ņemot vērā šo aspektu un Calabrese pētījumu, gaisa mitrumam ne tikai robežberzes gadījumā, bet arī pie citiem berzes režīmiem, vajadzētu būt ietekmei uz robežslāņa biezumu un tādējādi uz parauga slīdēšanu pa ledu.



1.5. att. Berzes koeficients atkarībā no ledus temperatūras [15].

Kietzig [15] savā darbā apkopoja informāciju par veiktajiem berzes koeficienta mērījumiem dažādu autoru pētījumos pie atšķirīgām ledus temperatūrām (1.5. att.). Pēc attēla datiem redzams, ka var tikt novērota līdzība ar berzes režīmu grafiku (1.2. att.), proti, palielinoties ledus temperatūrai, berzes koeficients samazinās, līdz tiek sasniegta optimuma vērtība, pie kura tas ir vismazākais ( $\sim -7$  līdz  $-3$  °C) un pēc tam berzes koeficients nedaudz pieaug. Kim [12] pētījumā parādījās līdzīga tendence kā 1.5. att., proti, berzes koeficients krītas, līdz tiek sasniegta optimuma vērtība (atkarīgs no paraugu virsmas tekstūras (no  $-10$  līdz  $-4$  °C) un tad atkal pieaug. Lai arī eksperimentu uzstādījumi katra autora pētījumos ir atšķirīgi (skat. 1.2. tabulu), tomēr ir vērojama liela berzes koeficienta vērtības izkliede tos savstarpēji salīdzinot (līdz 100 %) pie līdzīgas ledus temperatūras. Zemākais berzes koeficients tika iegūts pie lielāka slīdēšanas ātruma 8 m/s de Koning pētījumā. Scherge [8] savā darbā analizēja berzes koeficienta atkarību no ledus temperatūras un slīdēšanas ātruma (skat. 1.6. att.), kā rezultātā var netieši salīdzināt de Koning rezultātus ar Scherge iegūtajiem rezultātiem, t.i., pie  $-6$  °C ledus temperatūras un 8 m/s slīdēšanas ātruma. De Koning iegūtā berzes koeficienta vērtība ir  $\sim 0,007$ , Scherge darbā  $\sim 0,015$  pie tās pašas ledus temperatūras (rezultāts atšķiras 2x).

1.2. tabula

Eksperimentu uzstādījumu salīdzinājums dažādu autoru darbos [15]

Autors	Pieliktā slodze, N	Slīdēšanas ātrums, m/s	Kontakta laukums, mm <sup>2</sup>
Calabrese	890	1	1235
Slotfeldt	100	0,3	15000
Albracht	1	0,13	2
De Koning	700	8	400

Liefferink [13] pētīja kā temperatūra, kontakta spiediens un slīdēšanas ātrums ietekmē berzi starp dažāda materiāla lodītēm un ledus virsmu (ledus temperatūra no  $-110$  līdz  $0$  °C). Lai gan



pētījumā ir vairāki ļoti būtiski atklājumi, piemēram, ka pieliktais spēks būtiski ietekmē berzes koeficientu pie augstas ledus temperatūras, jo ledus cietība samazinās un lodīte sāk “grauzties” ledū. Tomēr, ņemot vērā, ka publikācijas virsraksts norāda uz temperatūras ietekmi, ir nepietiekami uzrādīt tikai ledus temperatūru un, piemēram, gaisa temperatūru neminēt.

Pēc 1.1. tabulas datiem un apskatītajiem eksperimentu rezultātiem, var secināt, ka vides apstākļi eksperimentos tiek aprakstīti nepietiekami, pārsvarā pētniekiem mērot ledus temperatūru. Iespējams, ka atšķirības, teorētiski pie līdzīgiem eksperimentu apstākļiem, var skaidrot ar atšķirībām, piemēram, gaisa mitrumā.

### 1.1. – 1.3. Kopsavilkums

- Starp ledu un slīdošo paraugu ir robežslānis, kas lielā mērā ietekmē slīdēšanas procesu un tā biezums ir atkarīgs no apkārtējiem vides apstākļiem un slīdēšanas apstākļu aprakstošiem parametriem;
  - Ledus berzē ir pieņemts izšķirt 3 berzes režīmus – robežberze, jauktā berze un hidrodinamiskā berze;
  - Nerūsējošais tērauds-ledus ir jāapskata no 3 pozīcijām: slīdošais paraugs, ledus un eksperimenta apstākļi;
  - Ledus temperatūra ietekmē tā cietību un ir parametrs, kuru pārsvarā izmanto kā apstākļu aprakstošo parametru;
  - Gaisa mitrums, zināmajā literatūrā praktiski netiek norādīts, taču iespējamā ietekme uz rezultātiem var būt būtiska;
  - Nav informācijas kā gaisa mitrums, gaisa temperatūra un ledus temperatūra mijiedarbojoties ietekmē parauga slīdēšanu pa ledu.

### 1.4. Berzes teorijas paraugam slīdot pa ledu

Ledus berzes gadījumā ir daudz dažādu parametru, kas būtiski ietekmē slīdēšanas procesu, turklāt savstarpēja parametru atkarība vienam no otra pie dažādiem ledus berzes režīmiem, teorijas izveidi padara sarežģītu, iekļaujot parametrus, kas praktiski nav izmērāmi, nosakāmi. Vairāki autori [3,5,6,17,41,42,58,59] ar dažādām sekmēm ir mēģinājuši attīstīt un modelēt ledus berzes teoriju.

#### Evans teorija

Evans ar kolēģiem [15,58] bija viens no pirmajiem, kas piedāvāja teorētiski aprakstīt berzes koeficientu atkarībā no ledus uzsilšanas berzes rezultātā (no angļu valodas: *Frictional heating*). Piedāvātais berzes koeficienta aprēķins tiek pierakstīts sekojoši:

$$\mu = \frac{A_{const} \lambda (T_m - T_0)}{F_N V} + \frac{B_{const} (T_m - T_0)}{F_N V^{0.5}} + \mu_m, \quad (1.1.)$$

kur  $A_{const}$ . – konstante, kas atkarīga no kontakta laukuma;

$B_{const}$ . – konstante, kas atkarīga no kontakta laukuma, siltumvadītspējas ledum un difūzijas ledum;

$\lambda$  – materiāla siltumvadītspēja,  $W/mK$ ;

$T_m$  – ledus kušanas temperatūra,  $K$ ;  
 $T_0$  – apkārtējās vides temperatūra,  $K$ ;  
 $V$  – slīdēšanas ātrums,  $m/s$ ;  
 $F_N$  – pieliktais spēks,  $N$ ;  
 $\mu_m$  – berzes koeficients atkarībā no siltuma, kas kausē ledu.

Ledus virsmas kausēšanas berzes koeficientu  $\mu_m$  aprēķināt nevar, taču var noteikt robežas pēc eksperimentu datiem. Norādītās konstantes modelī, kas atkarīgas no kontakta laukuma arī nebūs precīzas, ņemot vērā, ka to izmērīt ledus berzes procesā, ir praktiski neiespējami. Ņemot vērā eksperimentālus un teorētiskus datus, autori min, ka šis matemātiskais modelis strādās jauktās berzes režīmā, jo robežslānis būs mazāks, kā slīdošās virsmas raupjums.

### Oksanen un Keinonen teorija

Oksanen un Keinonen [15,59], tālāk attīstīja Evans modeli, piedāvājot apskatīt apstākļus hidrodinamiskās berzes režīmā. Berzes koeficients starp ledu un paraugu tika aprēķināts, ņemot vērā, ka berze rodas no robežslāņa, kas veidojās uz kontakta virsmām no ledus uzsilšanas berzes rezultātā.

Balstoties uz principa, ka berze, kas rodas kustībā rada nevienmērīgu siltuma pānesi, tika izveidots berzes koeficienta aprēķināšanas modelis. Berzes rezultātā radies siltums  $Q_f$ , kas rodas noteiktā kustības laikā  $b/V$ , var tikt pierakstīts sekojoši:

$$Q_f = \mu F_N V \frac{b}{V}, \quad (1.2.)$$

kur  $b$  – kontakta garums,  $m$ .

Savienojot (1.2.) formulu ar Evans vienādojumiem, berzes koeficients ir:

$$\mu = \frac{\frac{1}{z^4} \frac{A^3}{F_N}}{\frac{1}{(2V)^2}} \left[ \Delta T_1 (\lambda_l c_l p_l)^{\frac{1}{2}} + \Delta T_2 (\lambda_s c_s p_s)^{\frac{1}{2}} \right] + \left\{ \frac{1}{8v} [\Delta T_1 (\lambda_l c_l p_l)^{\frac{1}{2}} + \Delta T_2 (\lambda_s c_s p_s)^{\frac{1}{2}}]^2 + \eta_0 V h p_0 \right\}^{\frac{1}{2}}, \quad (1.3.)$$

kur  $\Delta T_1$  – starpība starp ledu un ledus kušanas temperatūru,  $K$ ;

$\Delta T_2$  – starpība starp slīdošā parauga un ledus kušanas temperatūru,  $K$ ;

$z$  – kontakta punktu skaits;

$A$  – kontakta laukums,  $m^2$ ;

$\lambda_l$ ;  $\lambda_s$  – siltumvadītspēja ledum un slīdošā parauga materiālam,  $W/mK$ ;

$c_l$ ;  $c_s$  – siltumietilpība ledum un slīdošā parauga materiālam,  $kJ/kgK$ ;

$\rho_l$ ;  $\rho_s$  – blīvums ledum un slīdošā parauga materiālam,  $kg/m^3$ ;

$\rho_0$  – ūdens blīvums,  $kg/m^3$ ;

$\eta_0$  – ūdens viskozitāte,  $m^2/s$ ;

$h$  – robežslāņa biezums,  $m$ .

Autori akcentē divus reģionus ar ietekmes atšķirībām starp berzes koeficientu un slīdēšanas ātrumu. Ja ir liela temperatūru starpība starp ledu un paraugu, siltumvadītspējas ietekme ir lielāka kā viskozitātei. Ja temperatūru gradients ir mazs, tad lielāka ietekme uz berzes

koeficientu būs viskozitātei. Tā pat autori norāda, ka siltumvadītspējas loma būs lielāka pie zema ātruma un tā samazināsies, palielinoties slīdēšanas ātrumam. Tas sasaucās ar Kietzig [43] darbā praktiski iegūtajiem datiem (skat. 1.3. *Parauga slīdēšanas pa ledu ietekmējošie faktori*).

Modelis iekļauj, tādus parametrus, kā kontakta punktu skaitu, kontakta laukumu, robežslāņa biezumu, kurus izmērīt vai kontrolēt praktiski nav iespējams.

### Makkonen teorija

Makkonen [42] gandrīz pēc 30 gadiem, ņemot vērā, ka attīstās tehnoloģijas un iespējas veikt eksperimentālus pētījumus pa ledu ar lielāku precizitāti, izmantoja eksperimentālos rezultātus no dažādu autoru darbiem, un daļēji iepriekš piedāvāto Oksanen teoriju, izveidojot matemātisko modeli ar domu, lai tas ir reāli pielietojams ledus berzes izpētē.

Makkonen izšķīra 2 berzes režīmus: 1) berze tālu no kušanas punkta, jeb berze starp paraugu un ledu pie aukstiem klimatiskajiem apstākļiem, kad robežslānis ir ļoti plāns un 2) berze tuvu kušanas punktam, jeb berze starp paraugu un ledu pie siltākiem vides apstākļiem, kad veidojās hidrodinamiskais berzes režīms.

Pirmajā gadījumā berzes koeficienta aprēķins ir sekojošs:

$$\mu = \frac{\gamma(1 + \cos\theta)}{2bH}, \quad (1.4.)$$

kur  $\gamma$  – virsmas enerģija slīdošajam paraugam,  $N/m$ ;

$\cos\theta$  – kontakta leņķis, °;

$H$  – materiāla cietība,  $MPa$ .

Berzes koeficients šajā gadījumā praktiski balstās uz kontakta leņķi, ko ir viegli izmērīt, bet pilnīgi sausas ledus berzes režīmi praktiski nav, līdz ar to, tuvāk realitātei ir otrs berzes koeficienta aprēķins:

$$\mu = \frac{F_{\mu}}{F_N} = \frac{\eta v A}{h F_N}. \quad (1.5.)$$

kur  $F_{\mu}$  – berzes spēks,  $N$ ;

Lai atbrīvotos no praktiski neizmērāmā  $h$  robežslāņa biezuma, Makkonen pēc matemātiskām manipulācijām un Oksanen teorijas, piedāvā sekojošu risinājumu:

$$h = \frac{1}{L\rho} \left( \frac{\mu F_N}{za} - \sqrt{\frac{d}{2V} (\Delta T_1 \sqrt{\lambda_1 c_1 \rho_1} + \Delta T_2 \sqrt{\lambda_2 c_2 \rho_2})} \right), \quad (1.6.)$$

kur  $L$  – ledus īpatnējais kušanas siltums,  $kJ/kg$ ;

$a$  – kontakta platums,  $m$ ;

$d$  – slīdēšanas distance,  $m$ .

Ievietojot iegūto formulu, berzes koeficienta aprēķina formulā un veicot matemātiskas manipulācijas, pieņemot, ka kontakta platums ir vienāds ar kontakta garumu un cietība mīkstākajam materiālam var tikt aprakstīta, kā:

$$H_I = \frac{F_N}{A} = \frac{F_N}{nab}. \quad (1.7.)$$

Rezultātā tika iegūta sekojoša formula:

$$\mu = z^{1/4} H_I^{-3/4} F_N^{-1/4} \left( \frac{1}{2\sqrt{2V}} (\Delta T_1 \sqrt{\lambda_1 c_1 \rho_1} + \Delta T_2 \sqrt{\lambda_2 c_2 \rho_2}) + \sqrt{\frac{1}{8V} (\Delta T_1 \sqrt{\lambda_1 c_1 \rho_1} + \Delta T_2 \sqrt{\lambda_2 c_2 \rho_2})^2 + \eta V L \rho} \right). \quad (1.8.)$$

Ņemot vērā (1.7.) formulu, tad:

$$z^{1/4} H_I^{-3/4} F_N^{-1/4} = \frac{1}{\sqrt{aH}}. \quad (1.9.)$$

Attiecīgi, berzes koeficienta formula var tikt pārveidota sekojoši:

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{aH}} \left( \frac{1}{2\sqrt{2V}} (\Delta T_1 \sqrt{\lambda_1 c_1 \rho_1} + \Delta T_2 \sqrt{\lambda_2 c_2 \rho_2}) + \sqrt{\frac{1}{8V} (\Delta T_1 \sqrt{\lambda_1 c_1 \rho_1} + \Delta T_2 \sqrt{\lambda_2 c_2 \rho_2})^2 + \eta V L \rho} \right). \quad (1.10.)$$

Modelī ir iekļauts arī kontakta spiediena efekts uz ūdens/ledus fāžu maiņām, balstoties uz kušanas temperatūras tiešu sakarību ar kontakta spiedienu. Tas ir balstīts uz teoriju, ka kontakta spiediens ir vienāds ar cietību mīkstākajam materiālam. Kušanas temperatūra ledum  $T_f$  atkarībā no  $H$ :

$$T_f = -7,43 \cdot 10^{-2} H. \quad (1.11.)$$

Ņemot vērā (1.11.) formulu, robežslāņa temperatūra atbilst kontakta spiedienam, kas ir vienāds ar ledus cietību. Līdz ar to  $\Delta T_1$  ir starpība starp robežslāņa temperatūru  $T_f$  un ledus temperatūru un  $\Delta T_2$  ir starpība starp robežslāņa temperatūru un slīdošā parauga temperatūru.

Diemžēl Makkonen darbā nav atrunāta slīdošā parauga temperatūra un tā ietekme uz slīdēšanu. Tiek pieņemts, ka starp ledus un parauga temperatūru iestājas līdzsvars, līdz ar to kontakta punktos temperatūra ir 0 °C. Oksanen, Keinonen [59] uz kuru teorijas ir balstīts Makkonen modelis, pamatojoties uz citu autoru eksperimentu rezultātiem, pieņēma, ka starpību starp robežslāņa temperatūru un slīdošā parauga temperatūru  $\Delta T_2$  tēraudam var pieņemt vienādu ar 0 °C.

Makkonen berzes modelī piedāvā 3 režīmus:

1) Berze, kas pārsvarā tiek kontrolēta ar virsmas enerģijas ietekmi. Šāds variants tiek piedāvāts, kad ledus temperatūra ir tālu no kušanas temperatūras, t.i. vismaz -20 °C. Tiek pieņemts, ka berzes koeficients nav atkarīgs no slīdēšanas ātruma pie šādiem režīmiem;

2) Berze, kas pārsvarā tiek kontrolēta ar siltum vadītspēju. Šajā gadījumā ir ļoti maza starpība starp kušanas un ledus temperatūru (līdz -2 °C ledus temperatūra). Pie šāda režīma, tiek piedāvāts, ka berzes koeficients  $\mu$  ir aptuveni proporcionāls  $1/\sqrt{V}$ ;

3) Berze, kas pārsvarā tiek kontrolēta ar ledus kušanu un ūdens viskozitāti. Šajā gadījumā ir lielāka starpība starp kušanas un ledus temperatūru, kā iepriekš apskatītajā režīmā, taču mazāka, kā 1. režīmā (-2 °C līdz -20 °C). Pie šāda režīma, berzes koeficients  $\mu$  ir aptuveni proporcionāls  $\sqrt{V}$ ;

Modelim teorētiski var pievienot arī ūdens izspiešanu, taču tad parādās tādi parametri kā  $h(t)$  robežslāņa biezums atkarībā no slīdēšanas laika un  $V_0$  aprēķinātais robežslāņa tilpums, kas

ir teorētiski parametri. Lai arī Makkonen piedāvātais aprēķinu modelis līdz šim ir vispraktiskākais, tomēr tajā joprojām figurē kontakta laukums, kā arī temperatūru starpības tiek apraksītas kontaktu punktus, ko arī nav iespējams kustībā izmērīt.

### Bottcher teorija

Bottcher [41], izmantojot Makkonen formulu, piedāvā risinājumu, kā aprēķināt kontaktu starp paraugu un ledu, izmantojot Hertz [60] modeļa principus. Rezultātā iegūstot formulu:

$$A = 4 \sqrt{\frac{F_p r_c}{\pi E^* b}}, \quad (1.12.)$$

kur  $r_c$  – kontakta rādiuss, *rad*;

$F_p$  – spēks uz kontakta punktu, *N*;

$E^*$  – paplašinātais Junga, jeb elastības modulis (gan ledum, gan materiālam), *N/m<sup>2</sup>*.

Apvienojot iegūto formulu ar Makkonen modeli:

$$\mu = \frac{1}{4 \sqrt{\frac{F_p r_c}{\pi E^* b} H}} \left( \frac{1}{2\sqrt{2V}} (\Delta T_1 \sqrt{\lambda_1 c_1 \rho_1} + \Delta T_2 \sqrt{\lambda_2 c_2 \rho_2}) + \sqrt{\frac{1}{8V} (\Delta T_1 \sqrt{\lambda_1 c_1 \rho_1} + \Delta T_2 \sqrt{\lambda_2 c_2 \rho_2})^2 + \eta V L \rho} \right). \quad (1.13.)$$

Bottcher salīdzināja aprēķinātās berzes koeficienta vērtības ar eksperimentos iegūtajām un secināja, ka tendences ir līdzīgas, taču vērtības atšķiras aptuveni 2,5 reizes.

### Lozowski teorija

Lozowski ar kolēģiem [3,17,18] izstrādāja atsevišķus berzes koeficienta aprēķinu modeļus, ņemot vērā, kontakta ģeometrijas īpatnības, tādiem sporta veidiem, kā skeletons, bobslejs un ātrslidošana. Modeļos tika pieņemts, ka kontakts ir pilnīgā hidrodinamiskā režīmā, netiek ņemts vērā slīdošā parauga virsmas un ledus raupjums.

Zemāk apskatīts piedāvātais modelis skeletoņa slieču gadījumā. Berzes koeficientu aprēķina:

$$\mu = \frac{F_N + F_s}{G_f m g}, \quad (1.14.)$$

kur  $F_s$  – bīdes sprieguma spēks, *N*;

$G_f$  – faktors, kas atkarīgs no *g*-spēka (smagumspēka) līkumos, *N/mg*;

$m$  – masa, *kg*;

$g$  – brīvās krišanas paātrinājums, *m/s<sup>2</sup>*.

Attiecīgi bīdes sprieguma spēku  $F_s$  aprēķina:

$$F_s = \eta V \int_0^l \frac{w(x)}{h(x)} dx, \quad (1.15.)$$

kur  $w(x)$  – kontakta zonas platums pa *x* asi, *m*;

$h(x)$  – robežslāņa biezums pa *x* asi, *m*.

Attiecīgi  $w(x)$ :

$$w(x) = 2\left(\frac{r_2}{r_1}\right)^{\frac{1}{2}}(2x_{att} \cdot b_{sliec.} - x^2)^{\frac{1}{2}}, \quad (1.16.)$$

kur  $r_1, r_2$  – slieces izliekuma rādiuss un slieces rādiuss, *rad*;

$x_{att.}$  – attālums no kontakta sākumpunkta, līdz punktam, kur kontakta platums sasniedz maksimālo vērtību, *m*;

$b_{sliec.}$  – slieces kontakta garums, *m*.

Un  $h(x)$ :

$$\frac{dh}{dx} = \frac{\mu V}{h(x)\rho_0 L} - \frac{\lambda \Delta T_1}{\sqrt{\pi \kappa_i x_{att} V \rho_0 L}} - \frac{H(T)h^3(x)}{\mu V w^2(x)}, \quad (1.17.)$$

kur  $\kappa_i$  – ledus termiskā difūzija,  $m^2/s$ ;

$H(T)$  – ledus cietība atkarībā no ledus temperatūras, *MPa*.

Lozowska piedāvātajā modelī lielu lomu spēlē makroģeometrija – kontakta garums, platums, kā arī, lai arī modeļi ir līdzīgi, katrs ir pielāgots konkrētam sporta veidam, iekļaujot specifiskus parametrus. Kontakta ģeometriju, kā arī robežslāņa biezumu nav praktiski iespējams nomērīt, kā arī modelim nav eksperimentālu pierādījumu, kurus iegūt būtu problemātiski.

Salīdzinot Makkonen [42] un Lozowski [3] teorijas pie slīdēšanas ātruma 10 m/s un pie trīs dažādām ledus temperatūrām, tika iegūtas berzes koeficienta vērtības (skat. 1.3. tabulu). Pēc tabulas datiem var secināt, ka teorētiski aprēķinātās berzes koeficienta vērtības pie viena uzstādījuma atšķiras līdz pat divām reizēm. Nav praktisku mērījumu, kas apstiprinātu aprēķināto berzes koeficientu vērtības.

1.3. tabula

Berzes koeficienta aprēķinātās vērtības, izmantojot Makkonen un Lozowski teoriju

Autors	-10 °C	-20 °C	-40 °C
Makkonen [42]	0,005	0,007	0,008
Lozowski [3]	0,003	0,0035	0,004

### Regresijas analīze

Ņemot vērā, ka berzi starp paraugu un ledu ietekmē liels skaits dažādu vairāk vai mazāk nozīmīgu faktoru, kuru saistību ir grūti definēt, var tikt izmantoti analītiskie modeļi. Lai definētu sakarības starp parametriem, var izmantot saistību noteikšanas statistikas metodes. Ja korelācijas analīze apskata sakarību starp parametriem, tad lai noteiktu kā vismaz viens neatkarīgais mainīgais ietekmē rezultatīvo pazīmi, var izmantot regresijas analīzi ar kuras palīdzību var pētīt mainīgu lielumu kvantitatīvās sakarības [61–63].

Korelācija un vienkārša lineārā regresija tiek lietotas, lai pētītu, vai analizētie dati pakļaujas taisnes sakarībām. Tādējādi, aprēķinot taisnes vienādojumu, ir iespējams prognozēt likumsakarības starp rezultatīvo pazīmi  $y$  un faktoriālo pazīmi  $x$ .

Vienkāršas lineārās regresijas vienādojumu var uzrakstīt sekojoši un aprēķināt pēc mazāko kvadrātu metodes [63]:

$$y = b_0 + b_1x_1, \quad (1.18.)$$

kur  $y$  – atkarīgais mainīgais;

$b_0, b_1 \dots b_n$  – regresijas koeficienti;

$x_1, x_2 \dots x_n$  – neatkarīgie saistītie mainīgie.

Vienkāršu lineārās regresijas vienādojumu var izmantot, ja ir viens neatkarīgs mainīgais  $x$ , taču bieži tie ir vairāki, tādā gadījumā var izmantot daudzfaktoru regresijas analīzi. Lineārās daudzfaktoru regresijas vienādojums vispārējā formā var tikt uzrakstīts sekojoši [61]:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n. \quad (1.19.)$$

Ja daudzfaktoru regresijas gadījumā ir novērojams, ka rezultatīvo pazīmi labāk apraksta, piemēram, 2. kārtas polinoms, tad to var pārveidot sekojoši (šajā gadījumā divi mainīgie):

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_1x_2 + b_4x_1^2 + b_5x_2^2. \quad (1.20.)$$

Lai arī, piemēram, polinomu regresijas modelis satur nelineāras sakarības (1.20.), tas joprojām tiek uzskatīts par lineāru modeli, jo regresijas koeficienti  $b$  joprojām ir lineāri. Līdz ar to, šāda tipa lineāru modeli, var vienkārši pārveidot, ņemot vērā taisnes vienādojumu, pie dažādiem eksperimentālajiem apstākļiem [61].

Akkok [14] pētīja parametrus, kas ietekmē berzi starp metālu, stiklu, neilonu un ledu. Eksperimenti tika veikti pie  $-20$  °C temperatūras ar rotācijas tipa tribometru ātruma diapazonā no 0,05 – 5 m/s pie trīs dažādām slodzēm (30, 75, 150 N). Iegūtos rezultātus Akkok aprakstīja ar daudzfaktoru regresijas analīzi, tādējādi iegūstot sakarības starp ietekmējošajiem faktoriem (slīdēšanas ātrumu, slodzi, siltumvadītspēju, blīvumu, siltumietilpību un starpību starp maksimāli pieļaujamo parauga virsmas temperatūru kontaktā ar ledu un parauga temperatūru pirms kontakta):

$$\mu = D_1 + b_1 \cdot V + b_2 \cdot F_N + b_3 \cdot (T_f - T_a) + b_4 \cdot (\lambda\rho c), \quad (1.21.)$$

kur  $D_1$  – konstante;

$T_f$  – maksimāli pieļaujamā parauga virsmas temperatūra kontaktā ar ledu, °C;

$T_a$  – parauga virsmas temperatūra pirms saskares ar ledus virsmu, °C.

Izmantojot regresijas modeli (1.21.) Akkok secināja, ka materiāla īpašībām ( $k, \rho, c$ ), šajā gadījumā, ir maza ietekme uz berzes koeficientu. Lielākā ietekme tika novērota temperatūru starpībai. Pieliktā slodze un slīdēšanas ātrums uzrādīja līdzīgu ietekmi uz berzes koeficientu.

#### 1.4. Kopsavilkums

- Makkonen ledus berzes modeļa princips [42] visbiežāk tiek pieņemts kā pamats dažādu analītisku modeļu izveidē [5,6,12,41];
- Lozowski modeļi ir balstīti uz konkrētu ģeometriju konkrētam sporta veidam un iekļauj neizmērāmus, nekontrolējamus parametrus;

- Aprēķinātās berzes koeficienta vērtības, izmantojot Makkonen un Lozowski teorijas var atšķirties līdz pat 2 reizēm. Turklāt tām nav praktisku pierādījumu;
- Apskatītajās ledus berzes teorijās nav iekļauta gaisa temperatūra un gaisa mitrums;
- Regresijas analīzi var izmantot, ja ir vairāki ietekmējoši faktori uz tieši nesaistītu rezultējošo parametru [14].

## 1.5. Eksperimentālo pētījumu apskats

Nerūsējošais tērauds–ledus eksperimenti ir veikti gan laboratorijās pie kontrolētiem apstākļiem, gan reālu apstākļu eksperimentos. Tiek izmantotas dažādas iekārtas – dažāda izmēra un parametru rotācijas vai lineārie tribometri, reometri. Reālu apstākļu eksperimentos pārsvarā tiek izmantots ekipējums dažādiem sporta veidiem, kas ir aprīkots ar sensoriem, rezultātu iegūšanai. Būtiskākie eksperimenti ir apvienoti 1.1. tabulā. Eksperimentālo rezultātu apskatā ir iekļauti ne tikai nerūsējošais tērauds-ledus eksperimenti, bet arī citu materiālu – ledus eksperimentu rezultāti.

### Laboratorijā veiktie eksperimenti

Laboratorijas apstākļos, lielākoties tiek izmantotas rotācijas vai lineāra tipa iekārtas. Visbiežāk tie ir dažāda izmēra tribometri, reometri, kas nodrošina iespēju salīdzinoši viegli iestatīt slodzi un slīdēšanas ātrumu. Šāda tipa iekārtas parasti ir ievietotas noslēdzošā apvalkā, kas nodrošina stabilus un maināmus apstākļus.

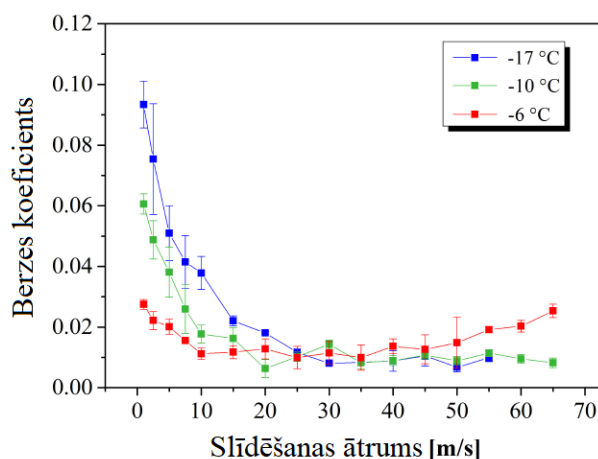
#### • *Rotācijas tipa iekārtas*

Spagni [5] savos eksperimentos izmantoja rotācijas tipa tribometru ar konstantu slodzi (15 N), lai analizētu dažāda raupjuma metāla disku ( $Ra = 0,1; 1,4; 2,6$ ) berzes koeficientu pie zema ātruma (0,1 – 1 m/s, jeb 80 rpm – 800 rpm). Eksperimenti tika veikti pie 5 dažādām gaisa temperatūrām, pieņemot, ka ledus temperatūra atbilst gaisa temperatūrai. Rezultātā tika iegūts, ka palielinoties slīdēšanas ātrumam, samazinās berzes koeficients (līdz 0,02 pie 1 m/s). Turklāt, raupjākie paraugi pie  $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$  temperatūras uzrādīja līdzīgu berzes koeficientu ( $\sim 0,02$ ) kā gludākais paraugs. Temperatūras ietekme eksperimentos uzrādīja niecīgu efektu, kas, kā autori min, varētu būt saistīts ar to, ka eksperimentos paraugs slīdēja pa to pašu ceļu un pateicoties uzsilšanai berzes rezultātā, ledus virskārta un paraugs uzsila līdz ir sasniegts balanss.

Scherge [6] ar paštaisītu mikotribometru ( $\varnothing 30$  mm) analizēja parauga ( $\varnothing 3$  mm) berzes koeficientu pie 3 dažādām ledus temperatūrām un rezultātus salīdzināja ar aprēķinātiem vērtībām, izmantojot Makkonen [42] formulu. Eksperimenti tika veikti robežās no 1 līdz 65 m/s ar pielikto slodzi 500 mN.

Rezultātā tika iegūts, ka berzes koeficients samazinās palielinoties slīdēšanas ātrumam pie visām 3 ledus temperatūrām līdz sasniedz  $\sim 25$  m/s (skat. 1.6. att.), pēc tam tas paliek stabils. Izņēmums ir pie  $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$  ledus temperatūras. Palielinoties ātrumam, berzes koeficients atkal palielinās. Tas varētu būt saistīts ar hidrodinamisko berzes režīmu, proti, pie  $\sim 45$  m/s robežslānis starp ledu un paraugu ir tik biezs, ka viskozās pretestības rezultātā, berzes koeficientam ir tendence palielināties.



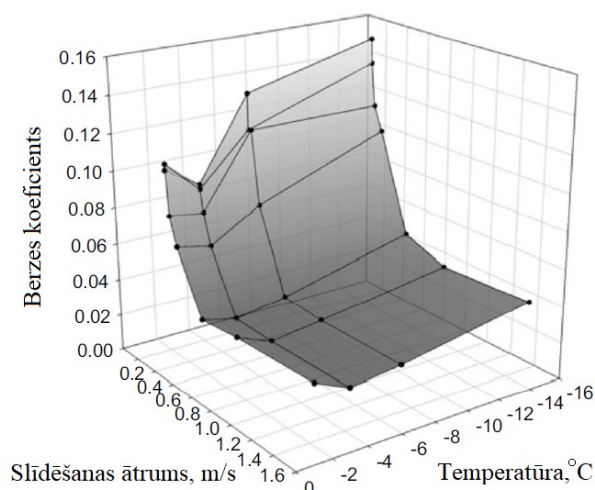


1.6. att. Berzes koeficienta atkarība no slīdēšanas ātruma pie  $-17$ ;  $-10$ ;  $-6$  °C, izmantojot mikrotribometru [6].

Lai pietuvinātu eksperimentus tuvāk realitātei, Scherge [8] veica eksperimentus ar  $\varnothing 3,8$  m tribometru, kas tika izveidots riepu testēšanas stendā. Tam ir izolējošs apvalks ar iespēju veikt eksperimentus pie lielākām slodzēm (600 N), lielāka ātruma (28 m/s) un ar lielākiem paraugiem – bobsleja sliece. Eksperimenti tika veikti ar bobsleja sliecēm ar diviem dažādiem noapaļojuma rādiusiem (4 un 8 mm). Berzes koeficients, palielinoties ātrumam, samazinājās abām sliecēm līdzīgi. Tika veikts arī eksperiments pie konstanta ātruma (14 m/s), mainot slodzi un sliece ar mazāku rādiusu pie mazākas pieliktās slodzes uzrādīja zemāku berzes koeficientu (No 100 – 300 N), palielinoties slodzei virs 300 N, berzes koeficients starp sliecēm izlīdzinājās. Tas tika skaidrots ar kontakta laukumu, kur mazākam rādiusam pie mazākas slodzes ir nepieciešams izkausēt mazāk ledus virskārtu, lai palielinātos robežslāņa biezums.

Baurle [7] eksperimentēja ar polietilēna paraugu slīdēšanu pa ledu, izmantojot  $\varnothing 1,8$  m rotācijas tipa tribometru, to ievietojot klimata simulācijas kamerā. Ātrums variēja no 0,5 – 20 m/s un pieliktā slodze no 20 – 100 N. Eksperimentos Baurle pierādīja, ka kontakta laukumam ir ietekme uz berzes koeficientu – jo mazāks kontakta laukums, jo mazāks berzes koeficients.

Kietzig [64] izmantoja pielāgotu reometru, kas pateicoties papildus apvalkam nodrošina stabilus apstākļus berzes mērīšanas zonā. Eksperimentos tika izmantoti nerūsējošā tērauda paraugi ar  $\varnothing 25$  mm. Pieliktais spēks tika saglabāts konstants – 3 N, ātrums no 0,2 – 1,4 m/s. Rezultātā tika iegūts 3D grafiks, kas atspoguļo berzes koeficienta atkarību no slīdēšanas ātruma un temperatūras (skat. 1.7. att.). Redzams, ka berzes koeficients samazinās, palielinoties ātrumam, kas sasaucas ar iepriekš apskatīto autoru darbiem. Mazākais berzes koeficients tika sasniegts pie  $-4$  °C ledus temperatūras. Samazinoties temperatūrai, berzes koeficients pieaug, autore to skaidro ar robežslāņa samazināšanos. Temperatūrai, kas ir augstāka par  $-4$  °C redzams arī berzes koeficienta pieaugums, kas varētu būt saistīts ar adhēziju starp paraugu un ledu.



1.7. att. Berzes koeficienta atkarība no slidēšanas ātruma un temperatūras, izmantojot reometru [1].

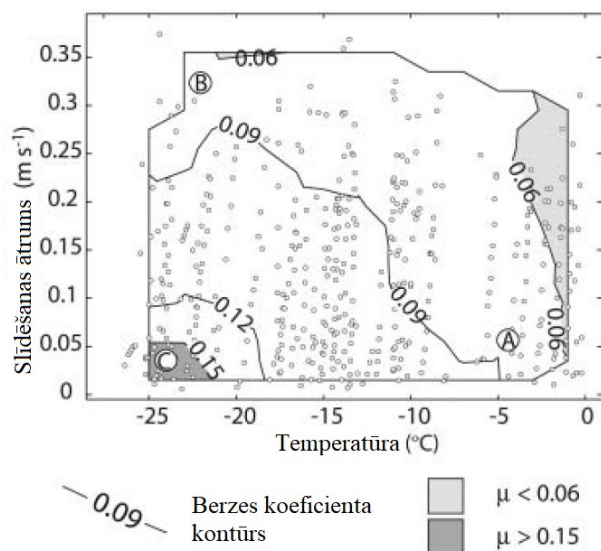
- *Lineāra tipa iekārtas*

Ducret [9] pētījis polietilēna (UHMPE) parauga triboloģiskās īpašības pa ledu, izmantojot lineāro tribometru (slidēšanas ātrums – 0,003 m/s). Šajā gadījumā, Ducret pievērsa uzmanību ledus raupjumam un tā ietekmei uz rezultātu, iegūstot, ka pie dažāda ledus raupjuma, pie vienas slodzes (10 N) un temperatūras ( $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  gaisa temp.), berzes koeficients var atšķirties pat 4 reizes (0,04 un 0,16). Palielinoties apkārtējai temperatūrai no  $-15$  līdz  $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , tika novērota berzes koeficienta samazināšanās.

Bottcher [41], izmantoja to pašu materiālu, lai pētītu un modelētu materiāla berzes koeficientu ar dažādu virsmas topogrāfiju pa ledu pie dažādām temperatūrām un slodzēm. Izmantots tika lineārais tribometrs ar konstantu slidēšanas ātrumu – 1 m/s. Ja salīdzina pieliktās slodzes datus (40, 60 un 80 N) atšķirības berzes koeficientā pie dažādām temperatūrām novērot nevar. Iespējams, ka slodzes izmaiņas ir pārāk nebūtiskas. Līdzīgi, kā citu autoru darbos, temperatūras samazināšanās, izraisa berzes koeficienta palielināšanos.

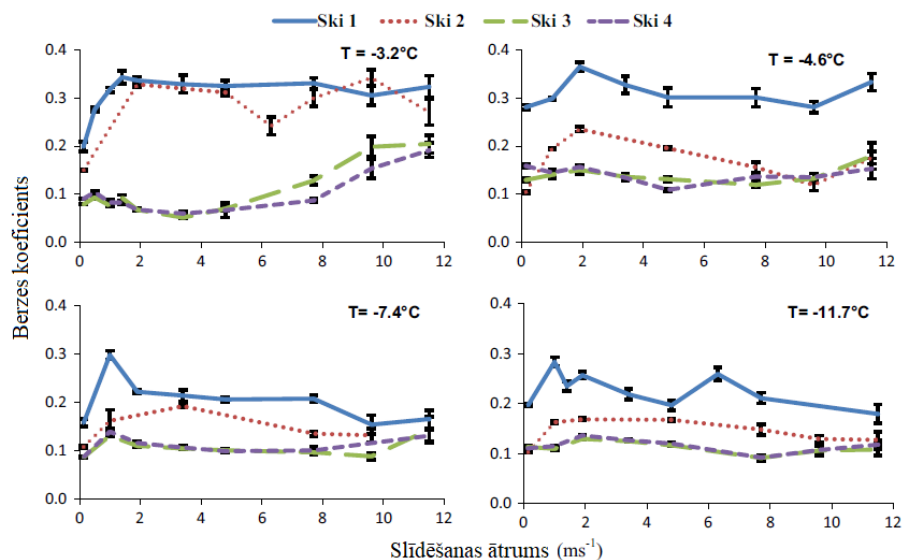
Marmo [65] veica nerūsējošais tērauds-ledus berzes eksperimentus ar lineāro tribometru, pie zema ātruma (0,008 – 0,37 m/s), ar mērķi noskaidrot, kā dažādas ledus “atlūzas” ietekmē berzes koeficientu temperatūru reģionā no  $-25$  līdz  $-0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Pieliktā slodze 2,1 līdz 4,2 N. Rezultātā tika iegūta nerūsējošais tērauds-ledus berzes karte (skat. 1.8. att.).

Pēc kartes datiem, redzams, ka lielākais berzes koeficients ir pie maza ātruma ( $\sim 0,05\text{ m/s}$ ) un zemas temperatūras ( $-20$  līdz  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), mazākais pie augstas temperatūras un palielinoties ātrumam (gaiši pelēkā zona).



1.8. att. Nerūsējošais tērauds-ledus berzes koeficienta karte, izmantojot lineāra tipa tribometru pie zema slīdēšanas ātruma [65].

24 metrus garu tribometru kontrolētos laboratorijas apstākļos izmantoja Rohm [45]. Tribometru var izmantot gan eksperimentiem ar presētu sniegu, gan ledu. Rohm pētīja metāla slēpju ar dažādu virsmas raupjumu ( $S_a = 0,16; 0,28; 0,92; 6,63 \mu\text{m}$ ) pa presētu sniegu (Ski 1;2;3;4 attiecīgi Slēpe 1;2;3;4) berzes koeficientu. Eksperimenti tika veikti pie 4 dažādām temperatūrām ( $-3,2; -4,6; -7,4; -11,7 \text{ }^\circ\text{C}$ ) (skat. 1.9. att.) un pie 3 dažādiem piespiešanas spēkiem (56; 98; 140 N).



1.9. att. Berzes koeficienta atkarība no ātruma pie dažādām sniega temperatūrām, izmantojot slieces ar atšķirīgu virsmas raupjumu [45].

Mazāko berzes koeficientu pie visām temperatūrām uzrāda raupjākās slieces (Ski3 un Ski4), turklāt lielākās atšķirības ir redzamas pie siltākās temperatūras ( $-3,2 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Autors to skaidro ar mazāku kontakta laukumu raupjākām sliecēm, kas samazina adhēzijas spēkus starp slieci un sniegu. Pieliktā spēka ietekmes eksperimenti nerada pietiekami lielu nozīmi, lai varētu analizēt

tā ietekmi. Iespējams, ka vajadzētu izvēlēties atšķirīgākus spēkus, lai redzētu pārliecinošu ietekmi uz berzes koeficientu.

Šāda tipa lineārs tribometrs (24 m), nodrošina garāku sniega/ledus virsmu, līdz ar to, teorētiski, katru reizi, kad slēpe slīd pāri, sniegs/ledus paspēj atjaunoties un nav gandrīz nepārtraukts kontakts ar to, kā tas ir lielā daļā rotācijas tribometros un lineārajos laboratorijas tribometros, kur paraugs veic īsu slīdēšanas distanci pa “svaigu” ledu. Eksperimentu rezultāti, iespējams, nesasaucas pilnībā ar citu autoru rezultātiem, kas varētu būt skaidrojams ar, šajā gadījumā, sniega nevis ledus virskārtu, un iepriekš minēto virskārtas iespēju atjaunoties pēc slīdēšanas pa to. Salīdzinoši lielais slīdēšanas ātrums (līdz 12 m/s) arī ietekmē rezultātus, ņemot vērā, ka citi lineārie tribometri lielākoties tiek izmantoti līdz 1 m/s.

Lungevičs ar kolēģiem [66], lai atbrīvotos no situācijas, kad paraugs nepārtraukti slīd pa vienu un to pašu ceļu un praktiski visu laiku ir kontaktā ar konkrētu punktu uz ledus virskārtas, tādējādi to mainot, piedāvāja nerūsējošais tērauds-ledus berzes testēšanas iekārtu, kas balstīta uz slīpās plaknes principa. Iekārtai piešķirts arī Latvijas patents Nr. 15305 [67]. Paraugs tiek palaists no miera stāvokļa pa 2,4 m garu trasi, kas iestatīta konkrētā leņķī. Tika pētīta gan apkārtējās vides temperatūras, raupjuma un slodzes ietekme uz slīdēšanas ātrumu trases beigās (lielāks slīdēšanas ātrums – mazāks berzes koeficients). Iegūtie rezultāti uzrādīja līdzīgas tendences, kādas ir iegūtas ar citu laboratorijas aprīkojumu dažādu autoru darbos. Ar šāda tipa iekārtu ir limitētas iespējas kontrolēt slīdēšanas ātrumu, ja netiek pievienots kāds palaišanas mehānisms, taču darbības princips nodrošina labas iespējas pētīt nerūsējošais tērauds-ledus berzes parametrus.

### **Reālu apstākļu eksperimenti**

Šāda tipa eksperimenti ir maksimāli pietuvināti reāliem apstākļiem. Tas nozīmē, ka iegūtie dati, teorētiski, būs uzticamāki konkrētam slīdēšanas procesam. No otras puses, nav iespējams kontrolēt tādus faktorus, kā apkārtējā temperatūra, gaisa mitrums.

Colbeck [20] eksperimentēja ar slīdu temperatūru, tādējādi pierādot, ka ledus kušana berzes rezultātā ir galvenais iemesls zemajam berzes koeficientam. Pie slīdām tika pievienots termopāris temperatūras mērīšanai. Slīdu temperatūra tika novērota augstāka pie ātras slīdošanas, taču apstājoties un stāvot uz ledu, slīdu temperatūra kritās.

Koning [19], līdzīgi kā Colbeck, veica eksperimentus ar slīdām. Tika pētīta ledus berze ātrslīdošanas gadījumā, ar pielāgotām slīdām, kurās tika iebūvēti sensori, kas mērīja spēkus gan horizontālā, gan vertikālā virzienā. Rezultātā tika iegūts, ka berzes koeficientam, slidojot pa taisni ar ātrumu 8m/s, ir optimuma punkts ap  $-7$  °C ledu temperatūras. Optimuma punkts ir rezultāts robežslāņa biezumam un ledu cietībai, proti, robežslāņa biezums pieaug, paaugstinoties ledu temperatūrai, taču ledu cietība samazinās, kas noved pie slīdu vieglākas iegriešanās ledū un berzes koeficienta paaugstināšanās. Slidojot līkumos berzes koeficients pieauga aptuveni par 28 %. Tas tika skaidrots, ar lielāku ledu deformāciju līkumos, jo slīdu asmeņi vairāk griežas ledū.

Federolf [56], izmantoja pielāgotas dažādas eksperimentālās hokeja slidas, lai noteiktu, vai tās samazina berzes koeficientu salīdzinājumā ar standarta hokeja slīdām. Tika izgatavotas kamanas ar slīdām un uz katras slīdas pieliktā masa (53 kg). Kamanas tika palaistas ar konstantu

ātrumu – 1,8 m/s, ko nodrošināja starta mehānisms un šķērsoja vairākus laika uzņemšanas punktus (tālākais 14 m attālumā no starta) uz hokeja laukuma. Attiecīgi berzes koeficients tika rēķināts no iegūtajiem laika datiem. Rezultātā tika iegūti berzes koeficienta dati standarta slidas asmenim un pielāgotajām eksperimentālajām slidām un secināts, ka eksperimentālās slidas uzrāda mazāku berzes koeficientu. Eksperimentu metode nenodrošināja kamanu taisnu kustību un autori akcentēja, ka daļā mērījumu, kamanas saslēdēja.

Poirier [10] veica eksperimentus ar bobsleja kamanām, lai noteiktu berzes koeficienta atkarību no slīdēšanas ātruma (1 – 10 m/s). Sportists iestūma kamanas līdz noteiktam ātrumam un tad ļāva tām brīvi slīdēt. Ar radaru tika fiksēts slīdēšanas ātrums. Izmantojot šo eksperimentu metodi, netika novērotas izmaiņas berzes koeficientā. Poirier eksperimentu rezultāti lielā mērā bija atkarīgi no sportista, kurš iestūma kamanas, slīdēšanas ceļa, jo tās nekādi netika kontrolētas.

Hainzmaier [16] savā doktora disertācijā veidoja triboloģiski uzlabotas bobsleja slieces. Tika izgatavoti 7 dažādu slieču komplekti. Dažādi piloti (6) ar dažādām sliecēm veica braucienus pa Kēnigzes bobsleja trasi un slīdēšanas laiks tika fiksēts kā rezultāts. Eksperimenti tika veikti dažādās dienās pie dažādiem vides apstākļiem.

Reālu apstākļu eksperimentos liela ietekme ir cilvēka faktoram, piemēram, Koning, Poirier, Hainzmaier pētījumos. Tas samazina rezultātu ticamību, ja salīdzina ar kontrolētiem apstākļiem laboratorijās. Federolf eksperimentā cilvēka faktors tika izslēgts, tomēr, netika nodrošināta kamanu slīdēšana taisnā trajektorijā, kas var būtiski ietekmēt rezultātu. Temperatūras, gaisa mitruma fiksēšana ir būtiska, jo ir jāņem vērā, ka apkārtējie apstākļi netiek kontrolēti, un kā iepriekš jau tika analizēts, apkārtējo apstākļu ietekmei ir būtiska loma nerūsējošais tērauds-ledus eksperimentos.

### 1.5. Kopsavilkums

- Rotācijas tipa iekārtu uzbūve, it īpaši diametrā mazu, nenodrošina pilnvērtīgus apstākļus, lai noteiktu temperatūras ietekmi uz berzes koeficientu;
- Maza izmēra iekārtas nenodrošina parauga slīdēšanu pa svaigu ledu, t.i. paraugs šķērso konkrētu ledus virsmas punktu atkārtoti īsā laika periodā;
  - Palielinoties slīdēšanas ātrumam, berzes koeficients samazinās;
  - Berzes koeficientu būtiski var ietekmēt ledus kvalitāte (raupjums, tekstūra);
  - Iekārta, balstīta uz slīpās plaknes principu, var dot pilnvērtīgu informāciju nerūsējošais tērauds-ledus berzes pāra izpētē;
- Lai arī laboratorijas iekārtas nodrošina iespēju analizēt ledus berzes procesu, tomēr, reālu apstākļu eksperimenti ir pietuvinātāki reālām sporta/ dzīves situācijām;
  - Līdzšinējiem reālu apstākļu eksperimentiem trūkst kontroles pār uzstādījumiem, t.i. nav izslēgts cilvēka faktors, nav nodrošināti maksimāli vienādi slīdēšanas apstākļi vairākiem braucieniem pēc kārtas;
  - Reālu apstākļu eksperimentos pārsvarā nav iespējams kontrolēt apkārtējo apstākļu ietekmi.

## 1.6. Literatūras analīzes kopsavilkums

Ledus berzē ir pieņemts izšķirt 3 berzes režīmus – robežberze, jauktā berze un hidrodinamiskā berze. Kāds berzes režīms teorētiski tiek novērots ir atkarīgs no robežslāņa biezuma starp paraugu un ledus virsmu. Robežslāņa biezums savukārt ir atkarīgs no vides apstākļiem, eksperimentu uzstādījumiem.

Vairāki pētnieki ir veikuši ļoti būtisku ieguldījumu ledus berzes izpētē. Eksperimenti ir veikti laboratorijas apstākļos, kas dod stabilus un kontrolējamus klimata apstākļus, taču ir ierobežojumi izmēru ziņā. Tribometri pārsvarā ir konstruēti tā, ka paraugs slīd pa vienu un to pašu ceļu nepārtraukti un salīdzinoši mazā slīdēšanas diapazonā. Eksperimentu apstākļi, t.i. pieliktais spēks un slīdēšanas ātrums laboratorijā ir ierobežots, kas būtiski atšķiras no reālās dzīves. Reālu apstākļu eksperimenti ir veikti pārsvarā ar cilvēka līdzdalību. Ir eksperimenti, kur tas ir pieļaujams, taču, lai nodrošinātu ticamus rezultātus, pētot slīdēšanu starp paraugu un ledu, ir jābūt maksimālai kontrolei pār eksperimentu. Lai iegūtu rezultātus pietuvinātus realitātei, eksperimenti ir jāveic ar konkrētam mērķim paredzētu slīdošo paraugu; apstākļi jāpietuvina realitātei (pieliktais spēks un slīdēšanas ātrums); jānodrošina maksimāla slīdēšanas procesa kontrole.

Nerūsējošais tērauds-ledus berzi ietekmē daudz faktori, gan no parauga, kas slīd pa ledu, gan ledus puses, līdz ar to ir nepieciešamība rūpīgi definēt eksperimentu apstākļus. Vides parametrs kā gaisa mitrums (skat. 1.1. tabulu) praktiski netiek vispār mērīts, kaut gan tiek uzsvērts, ka gaisa mitrumam varētu būt būtiska ietekme uz slīdēšanu raksturojošiem parametriem starp slīdošo paraugu un ledu. Izmantojot regresijas analīzi, pētījumos ir secināts, ka parauga temperatūrai ir lielāka ietekme uz parauga slīdēšanu pa ledu, kā materiāla īpašībām, slīdēšanas ātrumam un slodzei. Ledus temperatūra, kas attiecīgi ietekmē ledus cietību, pārsvarā, tiek izmantota kā noteicošais parametrs apstākļu definēšanā gan teorētisko modeļu izveidē, gan praktisko eksperimentu veikšanā. Teorētiski pie vienādiem apstākļiem, izmantojot atšķirīgas ledus berzes teorijas, berzes koeficienta vērtības var atšķirties līdz pat divām reizēm. Iegūtās eksperimentālās vērtības variē vēl lielākā diapazonā, kas liek domāt, ka ledus temperatūra kā vienīgais vides apstākļu aprakstošs parametrs var nebūt pietiekams. Ņemot vērā, ka teorētiskie modeļi, lai aprakstītu ledus berzi, pēc savas būtības ir sarežģīti un iekļauj reāli neizmēramus parametrus, ir potenciāls izmantot regresijas analīzi, kas balstīta uz empīriski iegūtiem eksperimentu rezultātiem, ledus berzes procesu pētīšanai.

Pēc veiktās literatūras analīzes, var secināt, ka pārsvarā netiek veikta pilnvērtīga ledus berzes eksperimentu uzstādījumu aprakstīšana. Trīs vides apstākļu (gaisa temperatūra, ledus temperatūra un gaisa mitrums) mijiedarbība var būtiski ietekmēt slīdēšanu raksturojošus parametrus starp paraugu un ledu. Zinot šo apstākļu potenciālo ietekmi uz rezultātu, varētu samazināt neprecizitātes jau tā sarežģītajos ledus berzes pētījumos jau saknē un uzlabot salīdzināšanas iespējas starp dažādu autoru darbiem.

Galvenie pētījumu virzieni:

- Ledus virskārtas un tekstūras izpēte;
- Eksperimentu slīdēšanas iekārtas analīze reālos apstākļos;

- Berzes pāra nerūsējošais tērauds-ledus slīdēšanu raksturojošu parametru mērīšanas procedūras izstrāde reālos eksperimentu apstākļos;
- Eksperimentālā parauga virsmas tekstūras ietekme uz slīdēšanu raksturojošiem parametriem reālos eksperimentu apstākļos;
- Eksperimentu veikšana un datu ievākšana pie atšķirīgiem vides apstākļiem;
- Iegūto rezultātu apstrāde, analīze un prognozēšanas modeļa izstrāde;
- Izstrādātā prognozēšanas modeļa metodikas izstrāde un aprobācija;
- Tālāko izpētes virzienu izstrāde.

## 2. EKSPERIMENTĀLIE PĒTĪJUMI

Lai iegūtu korektus rezultātus par interesējošo parametru ietekmi, šajā gadījumā, gaisa un ledus temperatūras, un gaisa mitruma ietekmi uz berzes pāra nerūsējošais tērauds-ledus slīdēšanu raksturojošiem parametriem, nepieciešams nodrošināt atbilstošus eksperimentu apstākļus. Lai to sasniegtu, tika izvēlēta eksperimentālā iekārta un paraugs ar kuru palīdzību tika realizēti reālu apstākļu eksperimenti un veikti eksperimentālie pētījumi.

Tika veikta ledus virsmas izpēte un noteikta ledus tekstūras ietekme uz interesējošā berzes pāra nerūsējošais tērauds-ledus slīdēšanas laiku. Ar parauga vibrāciju analīzes palīdzību tika iegūta informācija par eksperimentos izmantoto virsmu slīdēšanu raksturojošu parametru noteikšanas mēriekārtu balstītu uz slīpās plaknes principu un kā vibrācijas mainās pie atšķirīgiem vides apstākļiem. Ņemot vērā, ka eksperimentālā parauga virsma netika kontrolēta no mērījuma uz mērījumu, tika apskatīta parauga virsmas tekstūras izmaiņu ietekme uz rezultātu. Pēc pietiekamu eksperimentālo pētījumu veikšanas, tika izstrādāta eksperimentu veikšanas procedūra, pēc kuras tika mērīts slīdēšanas laiks un pētīta vides apstākļu ietekme uz to.

Slīdošā parauga īpašības (materiāls un tā īpašības, forma, pieliktais spēks u.c.) un to ietekme uz slīdēšanu, sekojošajos eksperimentos netika pētīta, līdz ar to, iespēju robežās, tās tika atstātas konstantas visos eksperimentos.

### 2.1. Eksperimentālā parauga slīdēšanu raksturojošu parametru mērīšanas iekārta

Ņemot vērā apskatīto literatūru un tehnoloģisko nodrošinājumu, lai iegūtu eksperimentu apstākļus maksimāli pietuvinātus reālās dzīves situācijām, jāveic reālu apstākļu eksperimenti. Pēc literatūras analīzes, lai to veiksmīgi izmantotu, jānodrošina sekojošais:

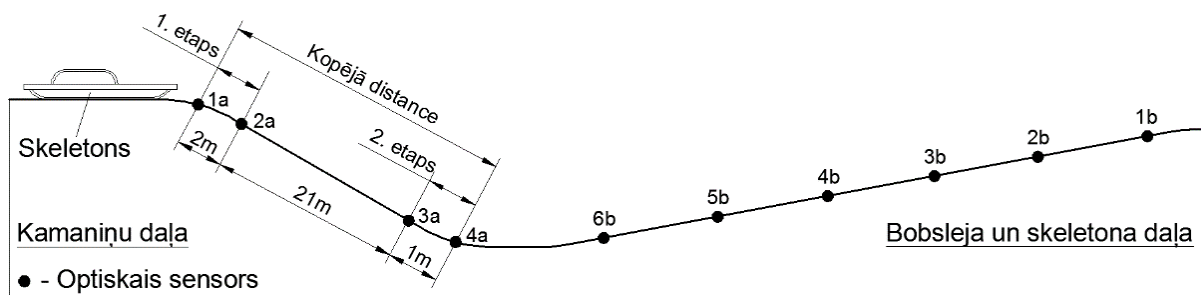
- Cilvēka faktors nevar tieši ietekmēt slīdēšanu raksturojošu parametru mērījumus;
- Kontrolēta kustības trajektorija;
- Vides apstākļi ir jāapraksta pilnvērtīgi.

#### Slīdēšanu raksturojošu parametru mērīšanas iekārta

Reālu apstākļu eksperimenti tika veikti, izmantojot virsmu slīdēšanu raksturojošu parametru noteikšanas mēriekārtu balstītu uz slīpās plaknes principu, bobsleja, skeletona un kamaniņu starta treniņu estakādē Siguldā. Estakāde ir daļēji noslēgta, novēršot vēja, sniega, lietus un tiešu saules staru ietekmi, taču gaisa temperatūra un mitrums ir tieši atkarīgs no klimatiskajiem apstākļiem. Estakāde ir sadalīta divās daļās – kamaniņu starta treniņu estakāde un bobsleja, skeletona treniņu estakāde (skat. 2.1. att.). Eksperimentiem tika izmantota kamaniņu starta treniņu estakādes puse (kopējā distance – 24 m), jo ir iespējams, neveicot lielas ledus trases modifikācijas, fiksēt eksperimentālā parauga starta pozīciju, kā arī slīpuma leņķis (~14 ° pret zemes līmeni), nodrošina parauga kustības uzsākšanu no miera stāvokļa pie jebkādiem eksperimentu vides apstākļiem. Bobsleja un skeletona daļa ir piemērota startam ar

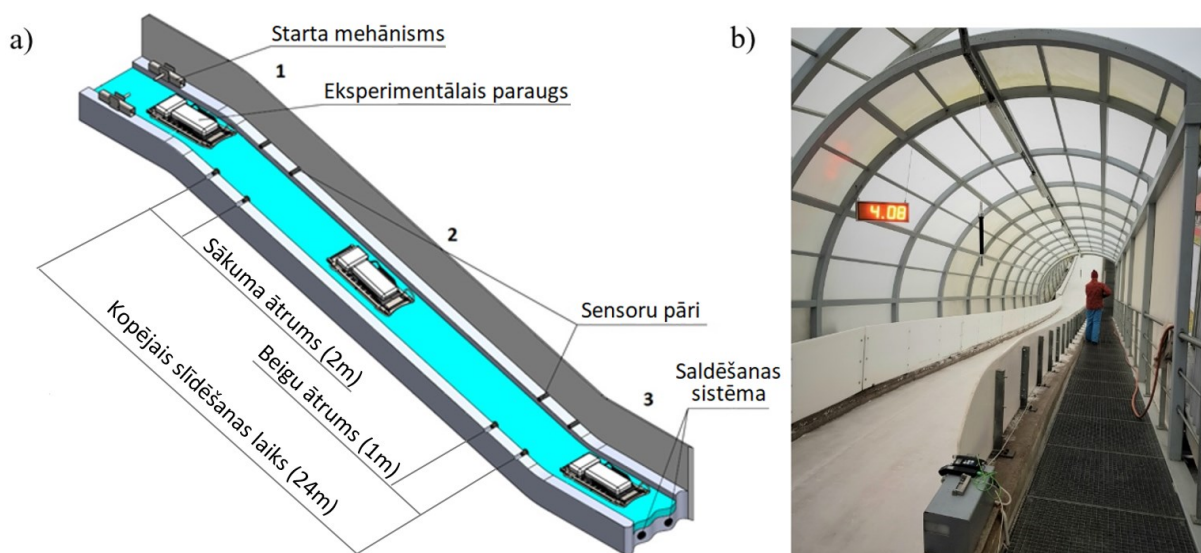


ieskrējienū, līdz ar to slīpuma leņķis ir mazs un kustības uzsākšana no miera stāvokļa ir problemātiska.



2.1. att. Shematisks starta treniņu estakādes attēlojums.

Ledus tika saldēts slāņos, samazinot poru un plaisu veidošanos. Ledus saldēšana notiek ar pamatā iestrādātu saldēšanas sistēmu. Iegūstot nepieciešamo ledus kārtas biezumu, tas tika apstrādāts ar pielāgotu ēveli, nogludinot tā virskārtu. Lai nodrošinātu, parauga kustības trajektorijas stabilitāti, ledus virskārtā tika iestrādāta  $\varnothing 20$  mm grope paralēli slīdēšanas virzienam, kas nodrošina eksperimentālā parauga kontrolētu kustību pa to (skat. 2.6. att. b.).



2.2. att. Kamaniņu starta treniņu estakāde: a) CAD shēma; b) foto.

Kamaniņu estakādes daļa ir aprīkota ar 4 optiskajiem sensoriem, kas fiksē slīdēšanas laiku, sākuma un beigu ātrumu. Estakādes daļas sākumā sensori ir izvietoti ar atstatumu 2 m, beigu daļā – 1 m (skat. 2.2. att. a).

### Eksperimentālais paraugs

Eksperimentos tika izmantots skeletoņš ar divām vienādām sliecēm, kā eksperimentālais paraugs. Šāds variants ļauj veikt dažāda tipa eksperimentus, mainot slieču spriegojumu, pielikto spēku, slieču raupjumu utt.

Slieču diametrs – 16 mm, garums ~ 1 m (skat. 2.3. att.). Tās ir veidotas atbilstoši 2019. gada Internacionālās Bobsleja un Skeletoņa federācijas (IBSF) standartam [68]. Slieču materiāls –

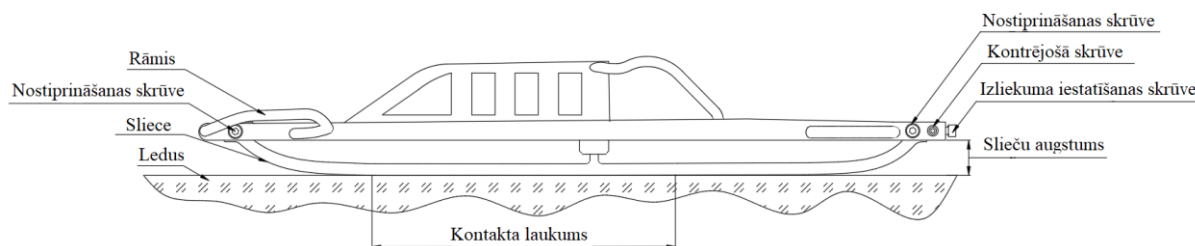
Uddeholm Ramax HH nerūsējošais tērauds (Fe – 82 %; Cr – 13,25 %; Ni – 1,75 %; Mn – 1,49 %; Mo – 0,56 %; C – 0,46 %; V – 0,23 %; Al – 0,20 %; S – 0,11 %).



2.3. att. Reālu apstākļu eksperimentos izmantotās skeletoņa slieces (lineāla garums – 50 cm).

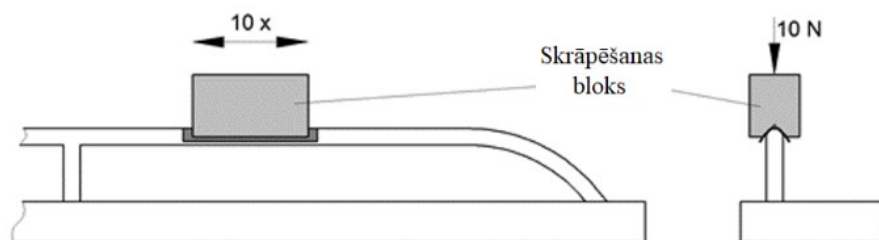
Slieces pie skeletoņa tika spriegotas ar izliekuma iestatīšanas skrūvi, tādējādi mainot teorētisko kontakta laukumu un skeletoņa slieču augstumu no ledus virsmas (skat. 2.4. att.) [69]. Spriegojums tika izvēlēts 9 mm no nulles spriegojuma (slieces nav piespriegotas), iegūstot rādīšus ~11850 m labajai sliecei un ~11337 m kreisajai. (izmērīts ar *Mitutoyo CRYSTA-PLUS M500* (*Mitutoyo, Japāna*) manuālo koordinātu mērīšanas iekārtu). Mērījumu protokols pievienots 7. pielikumā.

Izmērs tika kontrolēts ar dziļuma mērīšanas bīdmēru. Šāds spriegojums, nodrošina pietuvinātus apstākļus sacīkšu režīmam, kā arī skeletoņa vadāmību – lielāks spriegojums padara skeletoņu mazāk vadāmu un var būt tendence rezultātiem svārstīties (informācija iegūta eksperimentāli un sarunās ar skeletoņa sporta veida pārstāvjiem).



2.4. att. Skeletoņa shematisks attēlojums [69].

Skeletoņa slieces tika pulētas ar roku, izmantojot 600, 1500 un 3000 *3M* smilšpapīru uz auduma bāzes, līdz tika iegūta spoguļgluda virsma. Slieces raupjums –  $Sa \sim 0,03 \mu\text{m}$ . Lai iegūtu saskrāpētu slieci, tika izmantots 600 *3M* smilšpapīrs un sliece skrāpēta ar konstantu skrāpēšanas spēku un ceļu (skat. 2.5. att.). Spēks tika izvēlēts atbilstoši skeletoņa sacensībās izmantotajam skrāpēšanas spēkam – 10 N. Slieces raupjums pēc skrāpēšanas –  $Sa \sim 0,12 \mu\text{m}$ . Pēc apstrādes ar smilšpapīru, slieces tika notīrītas ar etanolā iemērktu salveti, tādējādi slieču virsma tika atbrīvota no metāla skaidiņām un smilšpapīra graudiem.



2.5. att. Slieču skrāpēšanas princips [70].

Lai noteiktu virsmas raupjumu pulētām un skrāpētām skeletoņa sliecēm, tika veikti 3D raupjuma mērījumi atbilstoši EN ISO 25178 standartam [71], izmantojot *Taylor Hobson Form Talysurf Intra 50* (*Taylor Hobson, Lielbritānija*) profilometru (mērīšanas uzstādījumi norādīti 2.1. tabulā).

2.1. tabula

Slieču virsmas raupjuma mērīšanas uzstādījumi

Skeletoņa sliece	
Mērīšanas adata	<i>Standard Stylus Arm 112/2009, tip radius</i> <i>2 μm</i>
Punktu skaits (X;Y)	300 x 2500
Mērījuma zona (X;Y)	2 x 5 mm
Mērīšanas ātrums	0,5 mm/s
Bāzes garums (Atbilstoši EN ISO 4288 [72])	0,25 mm Pulētai; 0,8 mm Skrāpētai sliecei

Iegūtie mērījumu dati tika apstrādāti sekojoši:

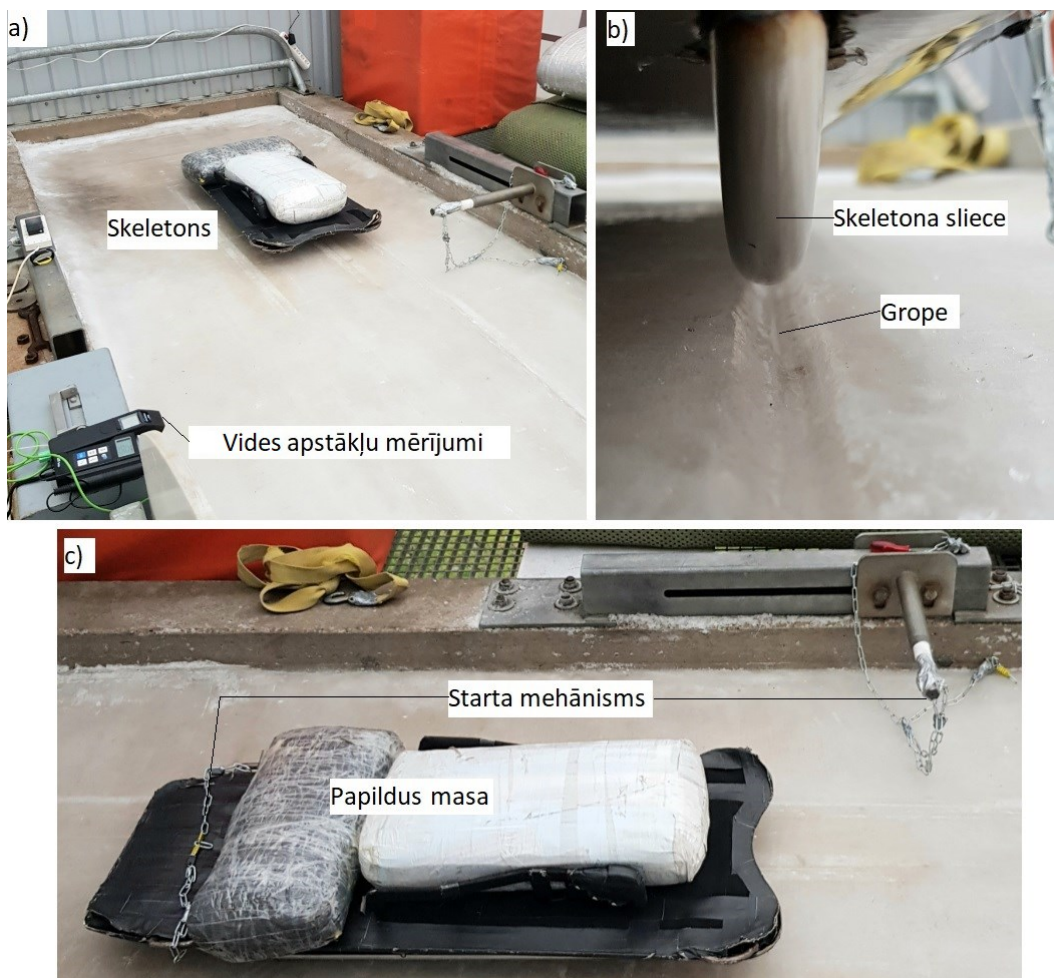
- Iegūtā virsma tika izlīmeņota un noņemta formas kļūda, lai kompensētu pozicionēšanas kļūdas;
- Izmantojot Gausa filtru, tika atdalītas viļņainības un raupjuma komponentes pēc EN ISO 25178;
- No filtrētās raupjuma virsmas, tika aprēķināti 3D raupjuma parametri;

Tika veikti 2 mērījumi katra tipa sliecei un vidēji iegūts, ka *Sa* pulētai sliecei – 0,03 μm, skrāpētai – 0,12 μm. Pilns mērījumu protokola piemērs pulētai un skrāpētai sliecei – 5. pielikumā.

Analogi aprakstītajai raupjuma mērīšanas procedūrai un datu apstrādei, tika mērīta virsmas tekstūra paraugiem ar dažādiem ar oglekli bagātinātiem nanostrukturētiem pārklājumiem LZP projekta “Z19/1–0385 Ar oglekli bagātināti daudzfunkcionāli nanostrukturētie viedie pārklājumi (NVP) augsto tehnoloģiju lietojumiem un to iegūšana izmantojot lieljaudas magnētiski saspīstās plazmas metodi” ietvaros.

### Eksperimentu apstākļi

Lai nodrošinātu pietuvinātus apstākļus sacīkšu režīmam, skeletonam tika pievienota papildus masa – 65 kg, kas atbilst sieviešu un vieglāku vīriešu sportistu masai, sasniedzot kopējo eksperimentālā parauga masu – 95 kg. Papildus masa tika nodrošināta ar smilšu maisiem, kas tika pielīmēti pie skeletoņa nemainīgā pozīcijā no dienas uz dienu (skat. 2.6. att. c). Pieliktā spēka ietekme uz slīdēšanas laiku, tika apskatīta [70] publikācijā. Iegūtie rezultāti norādīja, ka apskatītās masas diapazonā (30 – 50 kg), palielinoties pieliktajai slodzei, palielinās slīdēšanas ātrums.

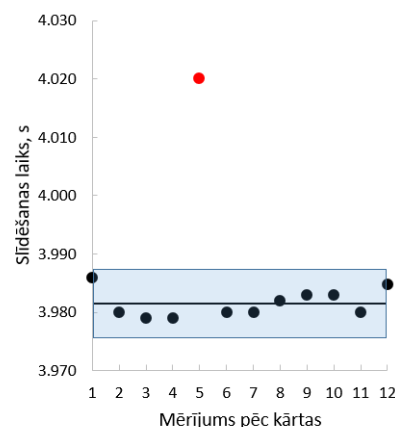


2.6. att. Eksperimentālā parauga attēlojums starta treniņu estakādē: a) skeletons pirms eksperimentiem un vides apstākļu mēraparāti; b) skeletona sliece iestrādātajā ledus gropē; c) starta mehānisma un papildus masas attēlojums.

Eksperimentālā parauga sākuma pozīcija tika saglabāta nemainīga dažādos eksperimentos ar ķēdes palīdzību (2.6. att. c) starta mehānisms). Ķēde tika izvēlēta, jo tā nav elastīga. Pirms skeletona palaišanas no miera stāvokļa, ķēde pie roktura un ķēde piestiprināta pie skeletona tika savienotas ar tapu un nospriegotas. Skeletons uzsāk kustību, kad tapa starp ķēdēm tiek izrauta.

Optiskie sensoru pāri fiksēja sākuma ātrumu (2 m pēc starta pozīcijas), beigu ātrumu (24 m pēc starta pozīcijas), kā arī kopējo slīdēšanas laiku (optisko sensoru mērījumu precizitāte 0,0005 s [73]). Taisnvirziena kustību lejā pa trasi nodrošināja iestrādātā grope ledū (skat. 2.6. att. b). Katrā eksperimentu sesijā tika veikti vismaz 10 mērījumi. Ja tika novērotas rupjas kļūdas (no angļu valodas: *outliers*), mērījumu skaits tika palielināts (vienas eksperimentu sesijas mērījumu apstrādes piemērs – 2.7. att.). Mērījumu datu apstrādi skatīt 2.7. *Vides apstākļu ietekme uz slīdēšanas laiku* nodaļā.

Eksperiments X; 9; beta 0.95									
	Laiks 1.posmā, s	Ātrums 1.posmā, m/s	Laiks starpposm ā, s	Laiks 2.posmā, s	Ātrums 2.posmā, m/s	Vid. ātr., m/s	Gaisa mitrums, %	Gaisa temp., °C	Ledus temp., °C
1	0.833	2.401	3.882	3.986	9.830	6.021	95.5	1.8	-4.0
2	0.832	2.404	3.876	3.980	9.830	6.030	95.4	2.0	-4.1
3	0.831	2.407	3.875	3.979	9.830	6.032	95.3	2.0	-4.3
4	0.831	2.407	3.875	3.979	9.800	6.032	95.2	1.6	-4.5
5	0.852	2.347	3.921	4.020	9.860	5.970	94.8	1.5	-4.4
6	0.832	2.404	3.876	3.980	9.810	6.030	95.1	1.3	-4.3
7	0.832	2.404	3.876	3.980	9.860	6.030	95.5	1.1	-4.1
8	0.833	2.401	3.878	3.982	9.830	6.027	95.4	1.4	-4.0
9	0.833	2.401	3.879	3.983	9.820	6.026	95.3	1.5	-4.3
10	0.834	2.398	3.880	3.983	9.890	6.026	95.1	1.5	-4.1
11	0.831	2.407	3.877	3.980	9.860	6.030	95.2	1.5	-4.2
12	0.834	2.398	3.881	3.985	9.838	6.023	95.3	1.6	-4.2
vid.	0.834	2.398	3.881	3.982	9.839	6.023	95.2	1.5	-4.2
Standartnovirze	0.006	0.018	0.014	0.002	0.027	0.019	0.2	0.3	0.2
Absolūtā kļūda	0.014	0.040	0.032	0.005	0.060	0.042	0.465	0.623	0.371
Mērīinstrumenta precizitāte	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.960	0.980	0.653
$\Delta x$							2.014	1.162	0.751
Relatīvā kļūda				0.14	0.61	0.70	2.12	75.42	-17.76

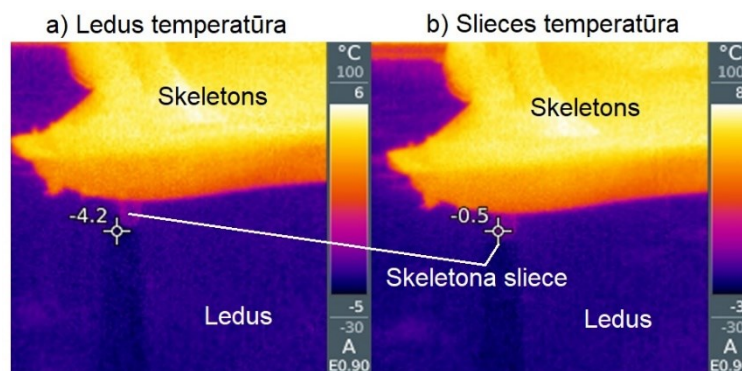


2.7. att. Eksperimentu datu apstrādes piemērs: tabula ar mērījumiem un mērījumu grafiskā reprezentācija.

Parasti praksē ir pieņemts, ka berzes pāra slīdēšanu aprakstošais parametrs ir berzes koeficients [5,6,15,45], pateicoties iekārtām, kas mēra berzes spēku no kura attiecīgi var iegūt berzes koeficientu. Eksperimentos reālos apstākļos tika mērīts slīdēšanas laiks (īsaks slīdēšanas laiks ir ekvivalents mazākam berzes koeficientam). Berzes koeficienta vērtības teorētiski var aprēķināt, ņemot vērā iegūto slīdēšanas laiku un beigu ātrumu. Nodaļā 2.4. *Eksperimentālā parauga vibrāciju analīze* ir aprakstīts kādēļ tas netika darīts.

### Vides apstākļu mērījumi

Ledus temperatūra tika mērīta izmantojot kontakta tipa termopāri *TP-122-100-MT-K (Czaki, Polija)* savienotu ar *Proscan 520 (Dostmann, Vācija)* termometru. Ledus berzes pētījumos, ledus temperatūru mēdz pieņemt atkarībā no eksperimentos iestatītās ledus temperatūras, vai nenorādīt mērīšanas metodi [9,64,74], vai gaisa temperatūras saldēšana kamerā [5]. Citos gadījumos, tiek izmantoti termopāri [7,41,45], tādēļ ledus temperatūras kontrolei, tika izmantots termopāris. Gaisa temperatūra un gaisa mitrums tika mērīts ar *P330 Temp (Dostmann electronic, Vācija)* termometru. Abas iekārtas tika novietotas vienā pozīcijā, veicot eksperimentus (skat. 2.6. att. a). Vides apstākļu mērījumi tika fiksēti pirms katra slīdēšanas laika mērījuma eksperimentu sesijā. Pirms eksperimentiem skeletons ar sliecēm tika novietots uz ledus virsmas, lai slieču temperatūra būtu maksimāli pietuvināta ledus temperatūrai. Kopējais gaidīšanas laiks no 5 – 15 minūtēm, atkarībā no vides apstākļiem (augstāka gaisa temperatūra – ilgāks nogaidīšanas laiks). Slieču temperatūra tika mērīta ar termokameru *Thermal imager Testo 871 (Testo, Vācija)* (skat. 2.8. att.). Iekārtas, mērījumu kļūdas un mērījumu diapazons ir apkopots 2.2. tabulā. Diemžēl termokameras pieejamība bija limitēta, līdz ar to slieču temperatūras kontrole netika veikta visos eksperimentos. Taču iegūtie slieču temperatūras mērījumu rezultāti, ļāva noteikt aptuveno gaidīšanas laiku, lai slieču temperatūra būtu maksimāli līdzīga ledus temperatūrai.



2.8. att. Skeletons slieces un ledus virsmas temperatūras mērījumi, izmantojot termokameru: a) ledus temperatūra; b) slieces temperatūra [75].

2.2. tabula

Izmantotie mēraparāti

Mērītie parametri	Nosaukums	Mēraparāta pamatkļūda	Mērījumu diapazons eksperimentos
Ledus temperatūra, °C	Termopāris TP-122-100-MT-K (Czaki, Polija) savienots ar Proscan 520 (Dostmann, Vācija)	±1 °C	-11 ... -1 °C
Gaisa temperatūra, °C	P330 Temp (Dostmann, Vācija)	±0.5 °C	-11 ... +10.5 °C
Relatīvais gaisa mitrums, %	P330 Temp (Dostmann, Vācija)	±3 %	58 ... 96 %
Slieču temperatūra, °C	Termokamera Testo 871 (Testo, Vācija)	±2 °C	-10 ... +3 °C

## 2.2. Ledus virsmas izpēte

Ņemot vērā, ka ledus virsmu vistiešāk ietekmē vides apstākļi, tika apskatīts, kā ledus vizuāli mainās laika gaitā pie atšķirīgām ledus temperatūrām. Ledus cietība tiešā veidā ir atkarīga no ledus temperatūras un tiek iekļauta dažādos matemātiskajos modeļos [3,42,50,51], tādēļ tika apskatīta arī ledus cietības izmaiņas atkarībā no ledus temperatūras. Veicot ledus virsmas izpēti, izdevās arī izmērīt robežslāņa biezumu uz ledus virsmas.

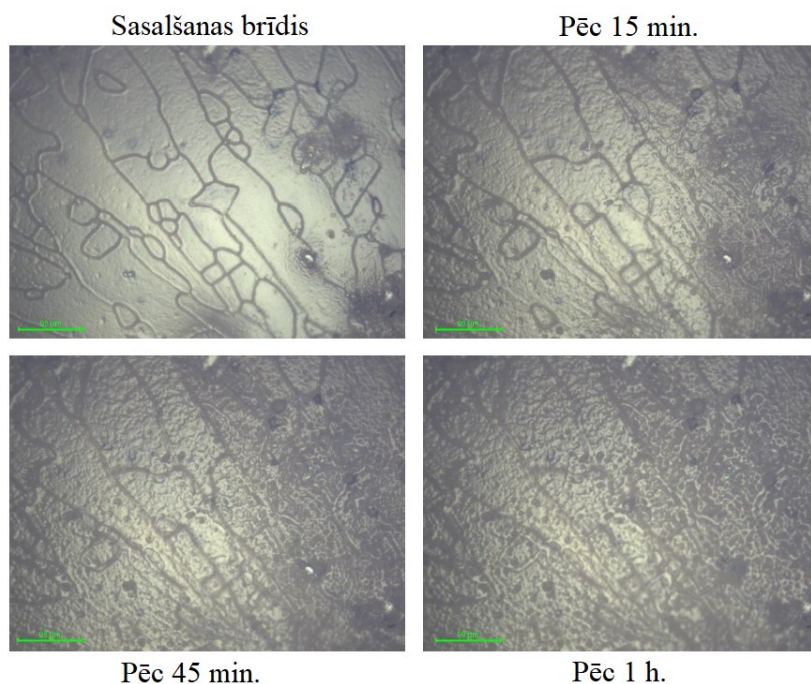
Nodaļā apskatītie eksperimenti tika veikti ar nanoindentoru *Hysitron TI980 (ASV)* ar papildus saldēšanas moduli uzņēmumā “Bruker” Minesotā, ASV ārvalstu mobilitātes ietvaros. Destilēts ūdens ar nelielu piejaukumu krāna ūdens tika izmantots (lai veidotos ātrāk kristalizācijas centri), lai nelielā – Ø4 traukā sasaldētu ūdeni un veiktu novērojumus un mehāniskos testus. Mehāniskie testi tika veikti ar “*Berkovich*” mērīšanas taustu, kas plaši tiek izmantots nanoindentācijas testos [76,77].

### Ledus virskārtas vizuālas izmaiņas laika gaitā

Novērojumu aprakstīšanā tiek izmantoti termini – raupjāka un gludāka ledus virsma, kuriem ir tikai vizuāls pamatojums.

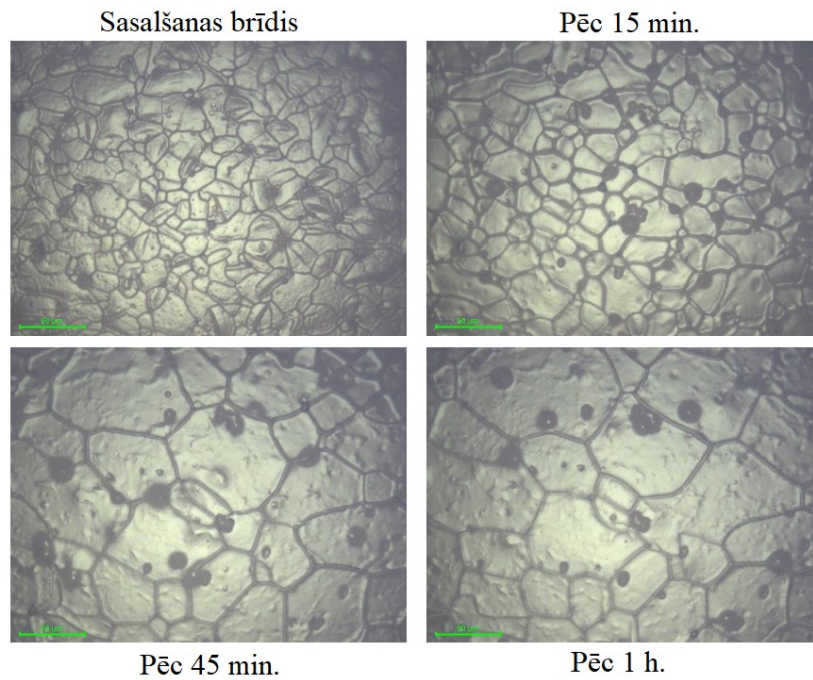
Tika veikti 2 eksperimenti:

1. eksperiments: Ledus sasaldēts pie  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$  un noturēts  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  temperatūrā 1 stundu (2.9. att.). Pēc uzņemtajiem attēliem, redzams, ka sasalšanas brīdī ir labi redzamas kristālu robežas un virsma ir nosacīti gluda. Turpinoties novērojumiem, kristālu robežas paliek grūtāk nosakāmas, turklāt virsma izskatās raupjāka, kā sasalšanas brīdī.



2.9. att. Ledus virsmas novērojumi pie  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  ledus temperatūras.

2. eksperiments: Ledus sasaldēts pie  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  un noturēts pie  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$  ledus temperatūras 1 stundu (2.10. att.). Salīdzinot ar 1. eksperimentu, sasalšanas brīdī redzami vairāk un mazāki kristāli, taču novērojumiem turpinoties, kristālu robežas saplūst un veidojas lielāki, bet mazāk kristālu, kā arī ledus virsma neveidojas raupjāka.



2.10. att. Ledus virsmas novērojumi pie  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$  ledus temperatūras.

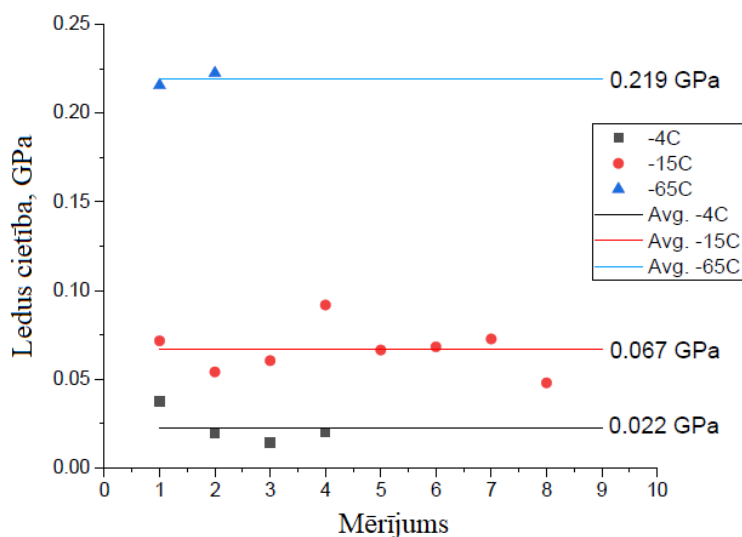
Pēc novērojumiem pie 2 dažādiem apstākļiem, var secināt, ka pie zemākas ledus temperatūras (šajā gadījumā  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), ledus virsma paliek raupjāka, iespējams, ka uz virskārtas plānā ūdens kārtiņa, nepieskaroties ledum, sasilst, bet pie nosacīti siltākas temperatūras ( $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), ūdens kārtiņa saglabājas un veicina kristālu saplūšanu un gludāku ledus virsmu.

### Ledus cietības mērījumi

Ledus cietība tiek izmantota gan Makkonen [42], gan Lozowski [3] matemātiskajos modeļos, jo tā ir tieši atkarīga no ledus temperatūras. Kā jau iepriekš aprakstīs, Tabor un Barnes [50] izveidoja ledus temperatūras un cietības sakarību grafiku, balstoties uz apjomīgu skaitu eksperimentu. Gan Makkonen, gan Poirier [51] veica vienkārša veida eksperimentus uz dažādām ledus virsmām, lai noskaidrotu ledus cietību.

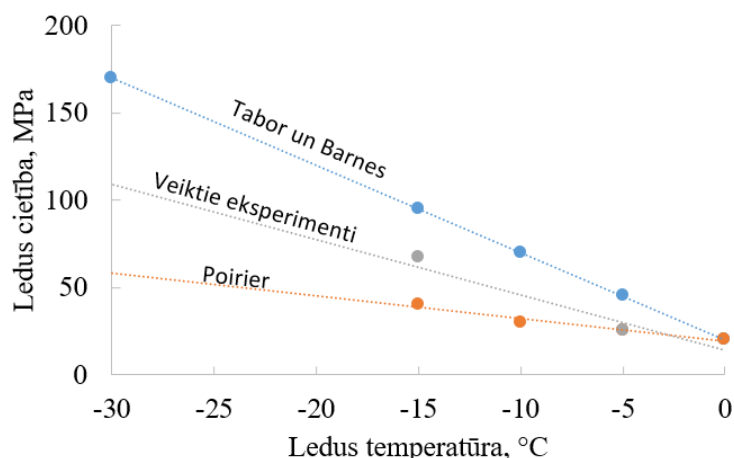
Uzņēmumā “Bruker” tika veikti ledus cietības mērījumi pie  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$  (tumši pelēks);  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  (sarkans) un  $-65\text{ }^{\circ}\text{C}$  (zils) (skat. 2.11. att.). Rezultātā no vairākiem mērījumiem, tika iegūta vidējā ledus cietība (0,022; 0,067 un 0,219 GPa) pie attiecīgajām ledus temperatūrām. 1. pielikumā pievienotas neapstrādātu mērījumu līknes pie attiecīgajām ledus temperatūrām.





2.11. att. Ledus cietības mērījumi, izmantojot nanoindentoru.

Ja salīdzina ar citu autoru darbos atrodamo informāciju (skat. 2.12. att.), redzams, ka iegūtie rezultāti ir aptuveni pa vidu Tabor un Barnes [50] rezultātiem un Poirier [51] datiem. Tabor un Barnes veica apjomīgu 130 mērījumu eksperimentu, kā arī matemātisko modeļu autori ledus cietības aprēķinam, izmantot Tabor un Barnes līkni.

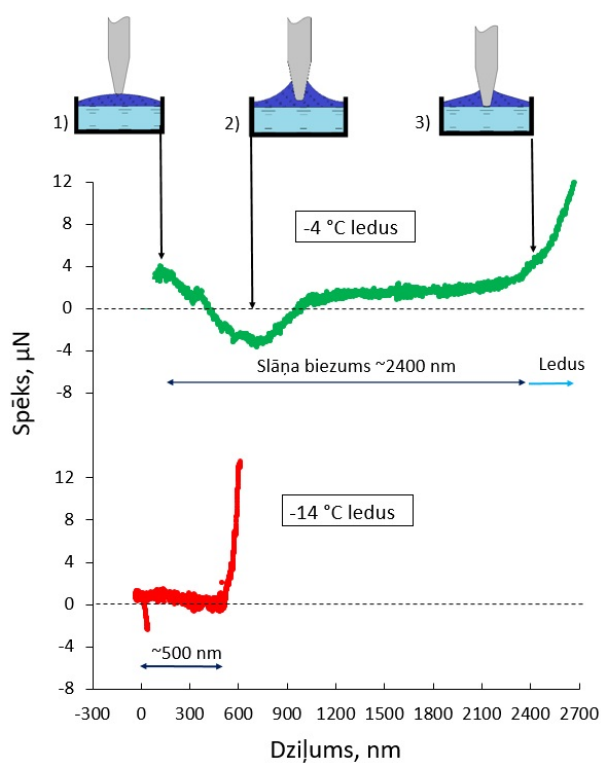


2.12. att. Veikto ledus cietības mērījumu salīdzinājums ar citu autoru iegūtajām vērtībām [42,51].

Veiktie eksperimenti, izmantojot nanoindentoru norāda uz mazāku ledus temperatūras ietekmi uz cietību, kā Tabor un Barnes eksperimenti, taču trūkst vairāk eksperimentu datu, kā arī nav nodrošināts, ka izmantotais ledus cietības mērīšanas tausts (*Berkovich*), nav siltāks par ledus temperatūru, tādējādi veicinot tausta “iespiešanos” ledū, kas attiecīgi samazina ledus cietību. Nanoindentors var veiksmīgi tikt izmantots, lai mērītu ledus cietību, taču jāveic vairāk eksperimentu un jānodrošina tausta un apkārtējās vides temperatūras kontrole.

## Robežslāņa biezuma mērījumi

Veicot ledus cietības mērījumus pie  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ , tika novērotas nestandarta spēka līknes izmaiņas, taustam tuvojoties ledus virsmai (2.13. att.) – “viltus” kontakts. Līknes tendences saglabājās vairākos mērījumos.



2.13. att. Robežslāņa mērījumi pie  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$  ledus temperatūras (zaļa līkne);  $-14\text{ }^{\circ}\text{C}$  ledus temperatūras (sarkana līkne).

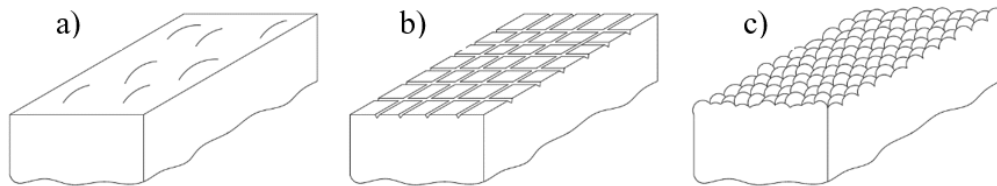
Sākumā notiek it kā kontakts ar virsmu, kas šajā gadījumā, iespējams ir robežslānis (skat. 2.13. att. pozīcija 1). Pēc tam spēks paliek negatīvs (pozīcija 2), ko varētu skaidrot ar robežslāņa daļiņu atrašanās no virskārtas un pieķeroties lēnām tuvojošajam mērīšanas taustam (no angļu valodas: *meniscus force*). Tad iestājas līdzsvars, kamēr tausts tiek cauri robežslānim un beidzot nonāk kontaktā ar ledu (pozīcija 3). Līdzīgu “viltus” kontaktu var novērot arī pie  $-14\text{ }^{\circ}\text{C}$  mērījuma (skat. 2.13. att. sarkano līkni).

Iegūtie mērījumu rezultāti norādīja uz  $\sim 2400\text{ nm}$  biezu robežslāni pie  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$  ledus temperatūras un  $\sim 500\text{ nm}$  biezu robežslāni pie  $-14\text{ }^{\circ}\text{C}$  ledus temperatūras. Ja salīdzina ar citu pētnieku mērījumu rezultātiem [33], tad potenciālais slāņa biezums ir par kārtu lielāks, proti, pie  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  ledus temperatūras, mērījumu rezultāti citu autoru darbos variē no  $\sim 1$  līdz  $100\text{ nm}$ . Tā kā robežslāņa biezums ir mērāms nanometru, mikrometru līmenī katrs mainīgais var būtiski ietekmēt mērījumu rezultātus (gaisa temperatūra, mitrums, tausta temperatūra, mērīšanas metode utt.), līdz ar to, lai iegūtu precīzus biezuma mērījumus, jāveic eksperimenti pie kontrolētākiem apstākļiem. Lai arī robežslāņa biezuma vērtības iespējams ir neprecīzas, taču izdevās pierādīt robežslāņa esamību uz ledus virsmas un pilnveidojot mērījumu metodi, būtu iespējams izmērīt tā biezumu.

### 2.3. Ledus tekstūras ietekme uz parauga slīdēšanu pa ledu

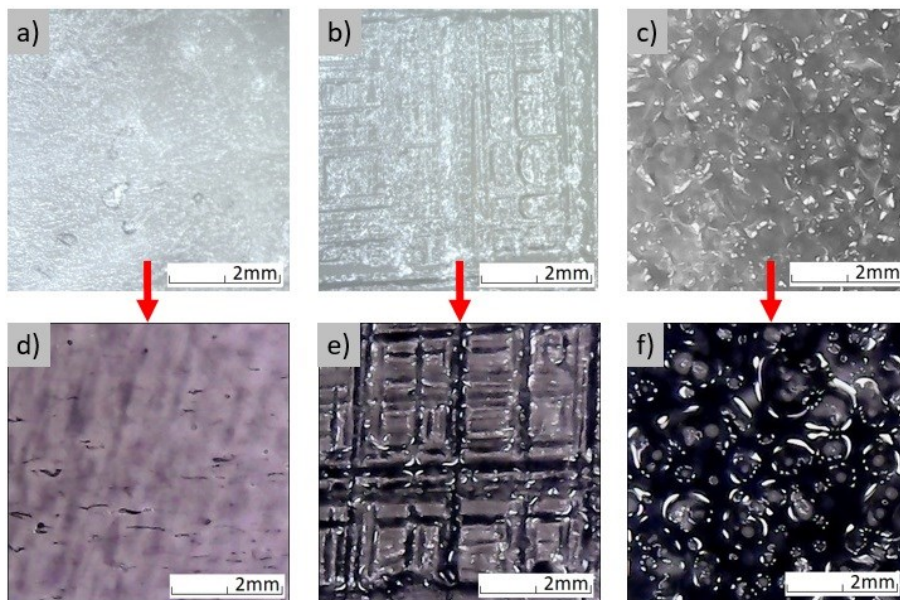
Pētījumos izmantotā starta treniņu estakāde tiek nolīdzināta ar speciāli pielāgotiem instrumentiem, tomēr laika gaitā var rasties uz trases nelīdzenumi, kas saistīti ar vides apstākļiem vai sportistu treniņu laikā izveidotiem mehāniskiem bojājumiem, tādēļ tika veikta papildus analīze, kā šāda ledus virsma var ietekmēt slīdēšanas laiku.

Lai noteiktu, kā ledus virskārta var ietekmēt slīdēšanu raksturojošus parametrus starp nerūsējošo tēraudu un ledu, tika izveidotas 3 izteikti atšķirīgas ledus virsmas: 1 – gluds ledus; 2 – saskrāpēts ledus; 3 – ledus ar ūdens pilītēm (skat. 2.14. att.)



2.14. att. Teorētiskais ledus virsmu attēlojums: a) gluds ledus; b) saskrāpēts ledus; c) ledus ar pilītēm [78].

Gluds ledus tika iegūts, izmantojot karstu ūdeni ( $\sim 65\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), to lēnām uzlejot uz ledus virskārtas. Karstais ūdens izlīdzināja jebkādus izciļņus uz ledus virsmas. Saskrāpēts ledus tika iegūts ar 80 raupjuma *Radex* smilšpapīru to saskrāpējot gan paralēli, gan perpendikulāri slīdēšanas virzienam. Ledus ar pilītēm tika iegūts, simulējot smalku lietu, ar smidzinātāju smidzinot aukstu ūdeni ( $\sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), tādējādi veidojās nosacīti grubuļaina virsma. Ledus apstrāde tika veikta visā estakādes kamaniņu daļas garumā gan gropē, gan uz gludās ledus virsmas.



2.15. att. Ledus virskārtas: a) gluda ledus virskārta; b) saskrāpēta ledus virskārta; c) ar ūdens pilītēm apsmidzināta ledus virskārta; d) gluda ledus virskārta pēc apstrādes ar tinti; e) saskrāpēta ledus virskārta pēc apstrādes ar tinti; f) ar ūdens pilītēm apsmidzināta ledus virskārta pēc apstrādes ar tinti [78].

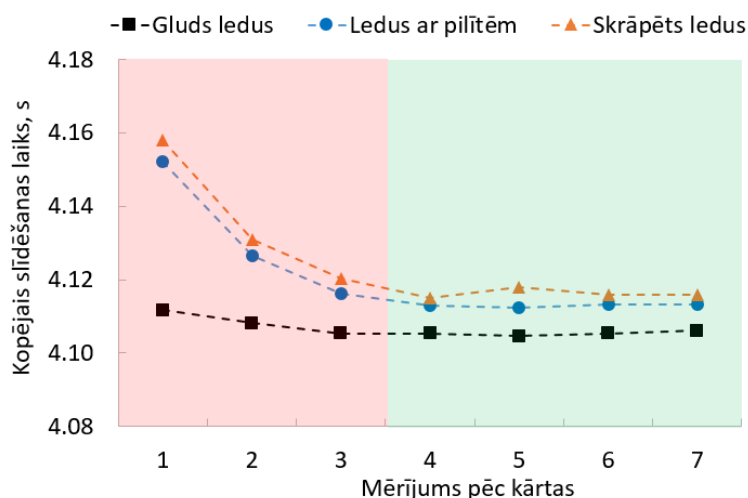
Ledus virskārtas raksturošanai, tika izstrādāta tieša kontakta laukuma mērīšanas metode, izmantojot tinti kā indikatoru. Uzklājot tinti uz ledus virskārtas, tā noslīd no virsotnēm un sakrājas ieplakās. Ar portatīvo mikroskopu *1000x USB Digital Microscope (Gaosuo, Ķīna)*, tika uzņemti attēli tieši no ledus virskārtas, tādējādi tā netika nekādā veidā mainīta, kā tas notiktu, ja ledus virskārta tiktu analizēta ar sarežģītāko repliku metodi [5,9,49]. Attēli tika uzņemti pirms tintes uzklāšanas un pēc (skat. 2.15. att.).

Pēc attēlu uzņemšanas ar portatīvo mikroskopu, tie tika apstrādāti ar *Adobe Photoshop 2017* datorprogrammu, tādējādi nosakot procentuālo laukumu ledum, kas attiecīgi teorētiski ir kontaktā ar paraugu. Ledus 2.15. att. d; e; f ir redzams pelēkā tonī un tinte melnā. Procentuāli kontakta laukums gludam ledum ir  $97 \pm 1$  %; skrāpētam  $81 \pm 1$  % un ledum ar pilītēm  $38 \pm 5$  %.

Lai noskaidrotu, kā ledus virsmas tekstūra var ietekmēt berzes pāra nerūsējošais tērauds-ledus slīdēšanu raksturojošus parametrus, izmantojot virsmu slīdēšanu raksturojošu parametru noteikšanas mēriekārtu balstītu uz slīpās plaknes principu, starta treniņu estakādē, tika sagatavotas 3 atšķirīgas ledus virsmas – gluds ledus, skrāpēts ledus un ledus ar pilītēm. Pa sagatavotajām virsmām tika veikti slīdēšanas laika mērījumi.

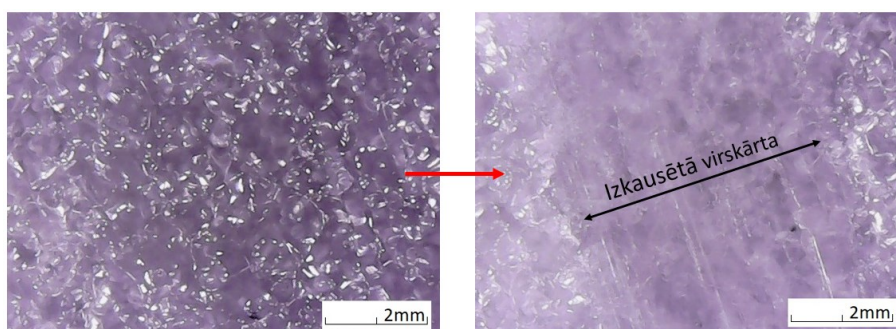
Eksperimenti tika veikti 3 dažādās eksperimentu dienās (skat. 2.3. tab.), katrā no tām uzrādot līdzīgu tendenci, tādēļ grafiskā reprezentācija (2.16. att.) ir norādīta tikai vienai eksperimentu dienai (1) ar sekojošiem apstākļiem – ledus temperatūra:  $-8$  °C; gaisa temperatūra:  $-7$  °C; relatīvais gaisa mitrums: 69 %. Ledus tekstūras eksperimentu dati no visām eksperimentu dienām pievienoti 4. pielikumā. Pēc grafika datiem redzams, ka visām ledus virsmām ir novērojama tendence slīdēšanas laikam samazināties pirmajos trīs mērījumos un pēc tam stabilizēties.

Ledus virskārta tika apskatīta ar portatīvo mikroskopu *1000x USB Digital Microscope (Gaosuo, Ķīna)*, lai noteiktu izmaiņas pirms mērījuma veikšanas un pēc viena mērījuma (skat. 2.17. att.) ledum ar pilītēm. Redzams, ka ir izteiktas skeletoņa slīdēšanas pēdas un virsmas tekstūras deformācija. Iespējams, ka skeletonam slīdot, ir jāpatērē enerģija nolīdzinot ledus tekstūras virskārtu, līdz tiek iegūta gluda virskārta pie kuras stabilizējas slīdēšanas ātrums.



2.16. att. Ledus virsmas ietekme uz kopējo slīdēšanas laiku. Kvadrāts – gluds ledus; aplis – ledus ar ūdens pilītēm; trijstūris – skrāpēts ledus.

Šajā darbā uzsvars ir likts uz vides apstākļiem starta treniņu estakādē reālos eksperimentu apstākļos, taču pētot, kā ledus virskārta ietekmē slīdēšanas ātrumu un statisko berzes koeficientu laboratorijas apstākļos, ar vieglākiem paraugiem, tika iegūti rezultāti, ka ledus ar ūdens pilītēm nodrošina mazāko statisko berzes koeficientu un ātrāko slīdēšanas laiku [78,79]. Tas tika skaidrots ar teorētiski mazo kontakta laukumu starp ledu un paraugu, līdz ar to adhēzijas spēks nav tik izteikts, kā arī mazāka parauga masa nodrošina kustību pāri ledus virskārtai, nevis enerģijas patērēšanu virskārtas izlīdzināšanai. Teorētiski, ja tiktu nodrošināta lielāka pilīšu cietība, iespējams, ka slīdēšanas laika rezultāti, veicot reālu apstākļu eksperimentus, būtu pretēji.



2.17. att. Ledus ar ūdens pilītēm: a) Pirms mērījuma; b) Pēc viena mērījuma [78].

Padziļinātai analīzei, tika apskatīti rezultāti no trīs atšķirīgām eksperimentu dienām (skat. 2.3. tab.). Tabulā ir norādīti katras eksperimentu dienas pirmo trīs mērījumu atšķirība procentos (sarkanais laukums 2.16. att.) pret vidējo aprēķināto slīdēšanas laiku no 4. līdz 7. mērījumam (zaļais laukums 2.16. att.). Redzams, ka pirmais mērījums ledum ar pilītēm un skrāpētam ledum visās 3 eksperimentu dienās ir lēnākais (procentuālā atšķirība starp mērījumu un vidējo aprēķināto slīdēšanas laiku vislielākā), veicot nākamās mērījumus, starpība samazinās. Ja apskata eksperimentu vides apstākļu ietekmi, tad pie siltākiem, samazinās pirmo mērījumu atšķirības no vidējā (3 eksperiments).

2.3. tabula

Pirmo trīs mērījumu salīdzinājums ar vidējo slīdēšanas laiku no 4. līdz 7. mērījumam

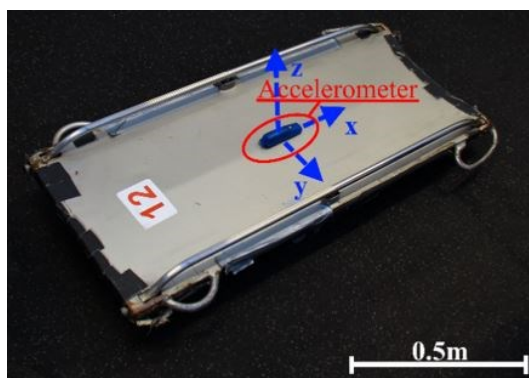
Eksperiments un vides apstākļi	Mērījums pēc kārtas	Starpība starp katru mērījumu un vidējo slīdēšanas laiku, aprēķinātu no 4. līdz 7. mērījumam, %		
		Gluds ledus	Ledus ar pilītēm	Skrāpēts ledus
1 (Mitrums: 69 %; Gaiss: -7 °C; Ledus: -8 °C)	1	0,15	1,08	1,00
	2	0,07	0,58	0,35
	3	0,00	0,32	0,10
2 (Mitrums: 72 %; Gaiss: -3.5 °C; Ledus: -4.5 °C)	1	0,14	0,95	0,71
	2	0,09	0,39	0,32
	3	0,12	0,34	0,14
3 (Mitrums: 70 %; Gaiss: 3 °C; Ledus: -4 °C)	1	0,04	0,63	—
	2	0,07	0,28	—
	3	0,04	0,08	—

Ekspērimētā tika pierādīts, ka ledus virskārta var būtiski ietekmēt slīdēšanas laika mērījumu, izmantojot virsmu slīdēšanu raksturojošu parametru noteikšanas mēriekārtu balstītu uz slīpās plaknes principu, reālu apstākļu ekspērimētū režīmā. Pie aukstākiem apstākļiem, ledus piestrāde notiek lēnāk, kā pie siltākiem. Ir nepieciešami vismaz 3 “tukšie” mērījumi, kas netiek ņemti vērā, pirms tiek uzsākta ekspērimētū sesija.

## 2.4. Ekspērimētālā parauga vibrāciju analīze

Ekspērimētālajam paraugam slīdot pa ledus trasi, tika veikta vibrāciju analīze. Dati tika iegūti ar 3 asu akselometru *X16-ID (ASV)*. Akselometrs tika piestiprināts pie ekspērimētālā skeletoņa masas centrā (skat. 2.18. att.). Datu ierakstīšanas ātrums – 400 Hz. Skeletonam slīdot lejā pa ledus trasi, paātrinājumi tika mērīti slīdēšanas virzienā (x ass), šķērsvirzienā (y ass) un vertikālā (z ass) virzienā. Ekspērimētū dati tika filtrēti, izmantojot *Box-Jenkins* modeli [80]. Dati tika ierakstīti 5 sekundes, kas ir laiks, kāds ir nepieciešams, lai skeletons veiktu pilnu 24 m distānci no pirmā sensora līdz pēdējam, izmantotajā ledus trases posmā.

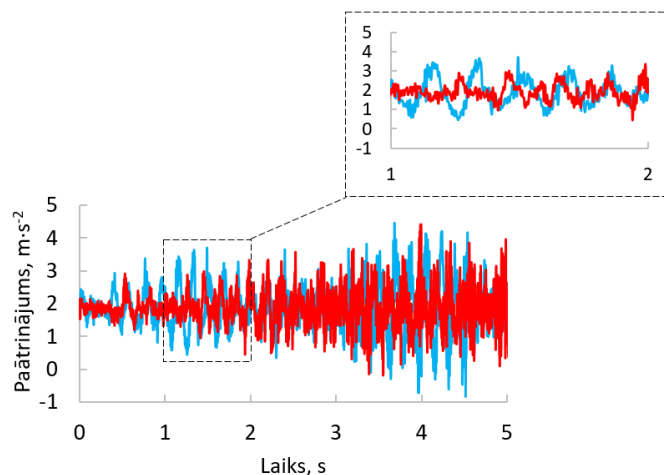
Ekspērimētū tika veikti divās būtiski atšķirīgās ekspērimētū dienās (Pirmāis ekspērimētū: gaisa temperatūra  $-10.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; ledus temperatūra  $-10.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , relatīvais gaisa mitrums 70 % – iespējams robežberzes režīms. Otrāis ekspērimētū: gaisa temperatūra  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; ledus temperatūra  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ , relatīvais gaisa mitrums 70 % – iespējams jauktās berzes režīms), iegūstot informāciju par trases profilu, ledu un gropes kvalitāti un, iespējamo vibrāciju ietekmi uz slīdēšanas laiku pie atšķirīgiem vides apstākļiem (atšķirīgiem berzes režīmiem). Tālāk tekstā, lai raksturotu abus ekspērimētū, tiek izmantoti termini – robežberzes režīms un jauktās berzes režīms. Izvēlētajiem apzīmējumiem ir tikai paskaidrojoša nozīme, balstoties uz ledus berzes režīmu līkni un vides apstākļu potenciālo ietekmi uz berzes režīmu (skat. 1.2. att.). Akselometri tiek plaši izmantoti dažādu sporta procesu novērošanai [81–83], taču to izmantošana, lai analizētu vibrācijas pie atšķirīgiem berzes režīmiem, pēc zināmās literatūras analīzes, iepriekš nav veikta.



2.18. att. Skeletons ar piestiprinātu akselometru [75].

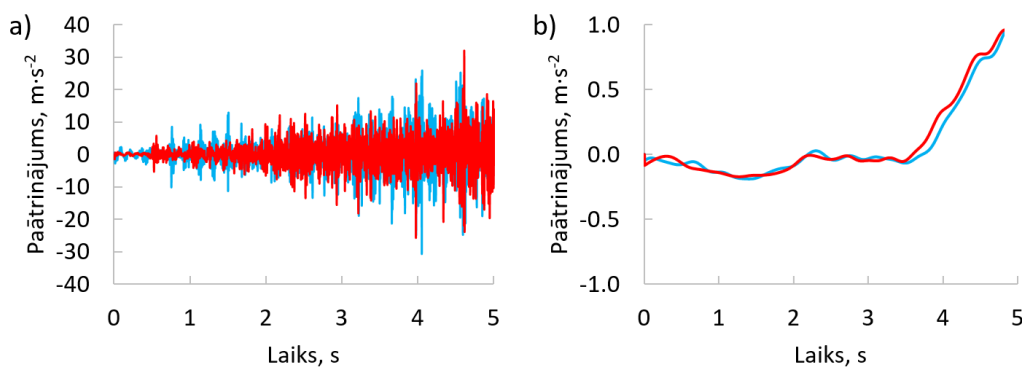
Abās ekspērimētū dienās, raksturojošā frekvence slīdēšanas virzienā ir pie  $\sim 5,5\text{ Hz}$  (skat. 2.19. att.). Pie potenciāli robežberzes apstākļiem (zila līkne), svārstības slīdēšanas virzienā ir stabilas un praktiski nemainās slīdēšanas laikā, mainās amplitūda. Ekspērimētā pie potenciāli

jauktās berzes režīma, svārstības slīdēšanas virzienā nav tik pat stabilas un ir grūtāk identificējamās. Svārstību amplitūda ir mazāka. Vidējā standartnovirze paātrinājuma datiem robežberzes gadījumā  $a_{1xSD} = 0.68 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ , attiecīgi jauktās berzes gadījumā  $a_{2xSD} = 0.55 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ , kas ir aptuveni par 20 % mazāka.



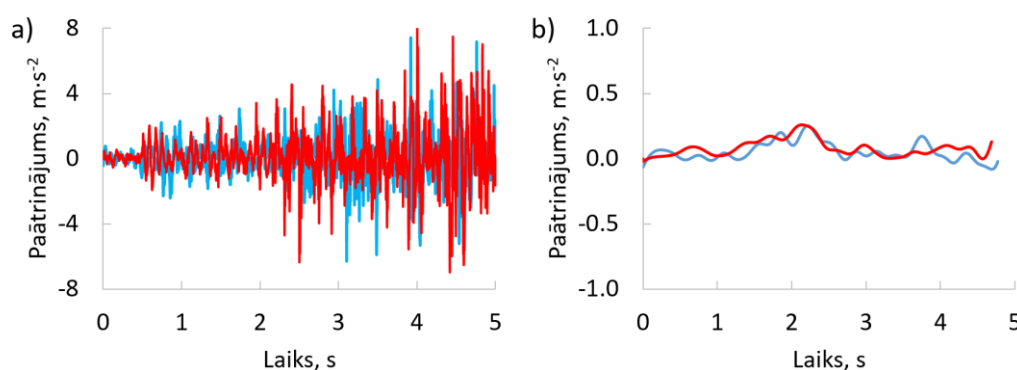
2.19. att. Slīdēšanas virziena paātrinājumi  $a_x$ . Robežberzes režīms ( $-10.5 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $-10.5 \text{ }^\circ\text{C}$ ; 70 %) – zila līkne; jauktās berzes režīms ( $2 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $-4 \text{ }^\circ\text{C}$ ; 70 %) – sarkana līkne. Palielinājums norāda uz raksturojošo frekvenci [75].

Pie jauktās berzes režīma (sarkana līkne), vertikālo paātrinājumu amplitūda  $a_z$  ir mazāka, salīdzinot ar robežberzes režīmu (zila līkne) (skat. 2.20. att. a), līdzīgi kā kustības virzienā novērotajam paātrinājumam  $a_x$ . Vidējās z ass paātrinājuma vērtības ir norādītas 2.20. att. b, no kā var novērot, ka pie  $\sim 4$  sekunžu atzīmes, vērtības pie abiem vides apstākļiem, būtiski pieaug. Tas norāda uz trases profila izmaiņām pie mērījumu beigu daļas, veidojot noapaļojumu. Negatīvās paātrinājuma vērtības arī norāda, ka trases profils nav pilnībā taisns. Abi eksperimenti norāda uz praktiski identisku trases profilu, līdz ar to akselometra izmantošana šāda tipa datu ievākšanai ir pamatota. Vidējā standartnovirze vertikālajam paātrinājumam pirmajā eksperimentā (zila līkne)  $a_{1zSD} = 5.43 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$  un otrajā eksperimentā (sarkana līkne)  $a_{2zSD} = 4.38 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ , kas līdzīgi kā kustības virziena paātrinājuma mērījumiem, ir  $\sim 20 \%$  mazāk pie jauktās berzes apstākļiem.



2.20. att. Vertikāla virziena paātrinājumi  $a_z$ . a) signāls no abiem eksperimentiem (zils – robežberzes režīms ( $-10.5 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $-10.5 \text{ }^\circ\text{C}$ ; 70 %), sarkans – jauktās berzes režīms ( $2 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $-4 \text{ }^\circ\text{C}$ ; 70 %)); b) vidējās vērtības [75].

Pie zemākām temperatūrām (zilās līknes 2.19. un 2.20. att.), svārstību amplitūdas tika novērotas lielākas, kā pie siltākām. Šādi rezultāti norāda uz iespējamu svārstību slāpēšanu vides apstākļiem kļūstot siltākiem.



2.21. att. Šķērsvirziena kustības paātrinājumi  $a_y$ . a) Signāls no abiem eksperimentiem (zils – robežberzes režīms ( $-10.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $-10.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 70 %), sarkans – jauktās berzes režīms ( $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 70 %)); b) vidējās vērtības [75].

Gropes efektu uz slīdēšanu var apskatīt ar paātrinājuma mērījumiem šķērsvirzienā (skat. 2.21. att.). Pretēji paātrinājumiem x un z ass virzienos, y ass virzienā standartnovirze paātrinājuma mērījumiem, mazāka tika novērota pie robežberzes režīma (zilā līkne)  $a_{1ySD} = 1.37\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ , kā pie jauktās berzes režīma (sarkana līkne)  $a_{2ySD} = 1.52\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$  (starpība  $\sim 10\%$ ). Šāds novērojums varētu norādīt uz augstāku gropes kvalitāti, samazinoties ledus temperatūrai. To varētu izskaidrot ledus cietības pieaugums, samazinoties ledus temperatūrai.

Vibrāciju analīze, izmantojot akselometru, norāda uz informāciju par ledus trasi, apkārtējo vides apstākļu ietekmi uz vibrācijām pie potenciāli diviem berzes režīmiem un vibrāciju izmaiņām laikā. Tika izmērīts trases profils (skat. 2.20. att. b), iegūstot informāciju, ka trases beigās ir vērā ņemams noapaļojums. Pie jauktās berzes režīma, paātrinājuma standartnovirzes vērtības vertikālā un slīdēšanas virzienā ir  $\sim 20\%$  mazākas, kā pie robežberzes režīma, kas norāda uz “mierīgāku” skeletoņa slīdēšanu, kas attiecīgi var ietekmēt mērāmos slīdēšanas parametrus, ņemot vērā, ka tiek zaudēta enerģija skeletonam svārstoties. Palielinoties slīdēšanas ātrumam, paātrinājumu svārstību amplitūdai ir tendence pieaugt, līdz ar to, iespējams, ka izvēlētajam eksperimentam bez uzspiestas kustības, var būt neprecizitātes iegūstamo parametru mērījumos pie lielāka slīdēšanas ātruma. Ņemot to vērā, novēroto trases rādītājus un tikai 1 m attālumu starp beigu ātruma mērīšanas sensoriem, beigu ātrums eksperimentos netika ņemts vērā un tika mērīts slīdēšanas laiks no pirmā līdz pēdējam sensoram.

## 2.5. Eksperimentālā parauga virsmas tekstūras ietekme uz slīdēšanu pa ledu

Tā kā eksperimentālā skeletoņa slieces pirms eksperimentiem tika apstrādātas ar roku un netika veikta virsmas kvalitātes kontrole pirms katra eksperimenta, tika veikta nevēlamu skrāpējumu uz slieču virsmas ietekmes uz slīdēšanas laiku, izpēte. Tika veikti 5 eksperimenti pie atšķirīgiem vides apstākļiem. Sākotnēji slieces tika nopulētas, iegūstot virsmas raupjumu



$Sa \sim 0,03 \pm 0,01 \mu\text{m}$ . Tika veikts eksperiments ar vismaz 10 mērijumiem, iegūstot slīdēšanas laiku. Pēc tam tās pašas slieces tika saskrāpētas kustības virzienā ar 600 3M smilšpapīru, iegūstot virsmas raupjumu  $Sa \sim 0,12 \pm 0,03 \mu\text{m}$  un atkārtota eksperimentu procedūra.

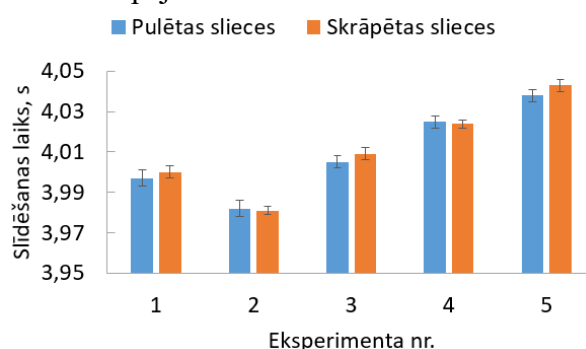
2.4. tabula

Virsmas tekstūras ietekme uz slīdēšanas laiku

Eksperiments	1	2	3	4	5	
Gaisa mitrums, $\pm 5\%$	90	95	85	85	60	
Gaisa temperatūra, $\pm 1\text{ }^\circ\text{C}$	10	2	-2	-3	-3,5	
Ledus temperatūra, $\pm 1\text{ }^\circ\text{C}$	-1,5	-4	-3	-5	-5,5	
Slīdēšanas laiks						
Pulētām sliecēm, s	3,997	3,982	4,005	4,025	4,038	Vidējā starpība, %
Skrāpētām sliecēm, s	4,000	3,981	4,009	4,024	4,043	
Starpība, %*	0,10	-0,03	0,07	-0,03	0,12	<b>0,07</b>

\*– negatīva zīme norāda uz gadījumu, kad skeletons ar skrāpētām sliecēm uzrādīja mazāku slīdēšanas laiku, kā skeletons ar pulētām.

Iegūtie slīdēšanas laika mērijumi un procentuālā starpība starp rezultātiem ar pulētām un skrāpētām sliecēm pie dažādiem vides apstākļiem ir apkopti 2.4. tabulā un grafiski attēloti 2.22. attēlā. Trīs no piecām eksperimentu dienām, pulētās skeletona slieces uzrādīja mazāku slīdēšanas laiku. Vidējā starpība starp slīdēšanas laika rezultātiem ar pulētām un skrāpētām sliecēm sasniedza 0,07 % (iekļaujas slīdēšanas laika standartnovirzes robežās). Slīdēšanas laika vidējā starpība starp eksperimentu dienām – 0,77 %. No iegūtajiem datiem, var secināt, ka apskatītajā virsmas raupjuma diapazonā, apkārtējo vides apstākļu ietekme ir aptuveni 11 reizes lielāka, kā iespējamā virsmas skrāpējumu ietekme uz slīdēšanas laiku.



2.22. att. Virsmas tekstūras eksperimenti. Zils – pulētas slieces, oranžs – skrāpētas slieces.

Kā pierādīts vairākās publikācijās [5,15,45,46], virsmas tekstūra var būtiski ietekmēt slīdēšanas rezultātus, taču eksperimentu apstākļi – pieliktais spēks, ātrums, ir krasi atšķirīgi, salīdzinot ar reālu apstākļu eksperimentiem, līdz ar to šāda tipa eksperimentos lielāka ietekme uz slīdēšanas rezultātiem ir vides apstākļiem, nevis slieču raupjumam apskatītajā diapazonā.

## 2.6. Reālu apstākļu eksperimentu procedūra

Ņemot vērā iepriekšējās nodaļās aprakstītos eksperimentālos mērījumus un izdarītos secinājumus, svarīgi ir izstrādāt reālu apstākļu eksperimentu procedūru, kas novērš dažādu blakus apstākļu ietekmi uz pētāmo procesu. Veicot tiešos slīdēšanas laika mērījumus (absolūtos) ar optisko sensoru palīdzību, iegūst berzes pāra nerūsējošais tērauds-ledus slīdēšanas raksturojošu parametru – slīdēšanas laiks, s. Tas tiek mērīts 24 m garā trases posmā (skat. 2.2. att. un 2.1. *Eksperimentālā parauga slīdēšanu raksturojošu parametru mērīšanas iekārta* nodaļā).

### 1. Pētījuma veikšanai nepieciešamie mērīšanas līdzekļi un aprīkojums

#### 1.1. Specifiska infrastruktūra:

- Slīdēšanas laika mērījumu veikšanai paredzēta ledus trase, kas izveidota leņķī; Pētījumā tika izmantots 24 m garš ledus trases posms izveidots 14 ° leņķī (skat. 2.2. att.) pret zemes līmeni. Šāds leņķis nodrošina eksperimentālā parauga kustības uzsākšanu no miera stāvokļa, neatkarīgi no vides apstākļu izmaiņām. Ir jāparedz arī parauga apturēšana, līdz ar to trases garumam ir jābūt lielākam. Trases minimālais platums ~ 1,5 m ērtai eksperimentu veikšanai.

- Ledus saldēšanas iekārta;

Pētījuma trase jānodrošina ar iestrādātu ledus saldēšanas sistēmu. Tai ir jāspēj nodrošināt maināmu ledus temperatūru.

- Ledus apstrāde;

Pēc saldēšanas, ledus virsmu ir jānoēvelē un ar ūdens palīdzību jāizlīdzina. Ar pielāgotu ēveli (Ø20 mm) tiek izveidota grope paralēli slīdēšanas virzienam, kas nodrošinās eksperimentālā parauga taisnvirziena kustību lejup pa ledus trasi.

- Trase aprīkota ar sensoriem slīdēšanas laika fiksēšanai;

Pētījumā izmantotā trase tika aprīkota ar 2 optisko sensoru pāriem. Pirmais pāris izvietots startā (attālums starp sensoriem 2 m), otrais pāris trases beigu daļā (attālums starp sensoriem 1 m) (skat. 2.2. att.). Eksperimentālajam paraugam šķērsojot sensoru starus, tiek fiksēts slīdēšanas laiks (optisko sensoru mērījumu kļūda 0,0005 s [73]).

- Konstanta eksperimentālā parauga starta pozīcija;

Eksperimentālajam paraugam jānodrošina konstanta sākuma pozīcija. To var darīt pēc 2.1. *Eksperimentālā parauga slīdēšanu raksturojošu parametru mērīšanas iekārta* nodaļā aprakstītā analogijas vai nodrošināt citādāk. Paraugam ir jāatrodas nelielā attālumā no pirmā sensoru pāra (~ 0,5 m) un trases daļā, kas ir leņķī. Tādējādi tiek nodrošināts, ka tas, neatkarīgi no vides apstākļiem, uzsāk kustību lejup pa ledus trasi.

#### 1.2. Eksperimentālais paraugs:

- Rāmis un slieces;

Pētījumā tika izmantots skeletoņa rāmis un slieces, kas izgatavotas atbilstoši IBSF noteiktajam standartam [68]. Tādējādi pielāgojot eksperimentus pēc iespējas tuvāk

skeletona sacensībām. Skeletonu un tā slieces nedrīkst mainīt, ja ir nepieciešams salīdzināt rezultātus dažādās eksperimentu sesijās.

- Papildus masa;

Lai simulētu cilvēka svaru, uz slidošā parauga jāpievieno papildus masa (65 kg). Tas tiek nodrošināts ar blīvi sapildītiem smilšu maisiem (novietojums redzams 2.6. att.). Maisu novietojumu nedrīkst mainīt, ja ir nepieciešams salīdzināt rezultātus dažādās eksperimentu sesijās.

- Slieču pulēšanai paredzēti smilšpapīri.

Pētījumā tika izmantoti 400, 600, 1500, 3000 3M smilšpapīri uz auduma bāzes.

### 1.3. Mērījumu veikšanai nepieciešamie mēraparāti:

- Slieču virsmas tekstūras mērījumi;

Lai nodrošināt slieču virsmas tekstūras kontroli, ir jāveic virsmas raupjuma mērīšana (Jānodrošina vismaz parametra  $Ra$  mērīšana). Pētījumā tas tika darīts izmantojot *Taylor Hobson Form Talysurf Intra 50 (Taylor Hobson, Lielbritānija)* profilometru, taču var izmantot alternatīvas 2D un 3D raupjuma mērīšanas iekārtas.

- Dziļuma mērīšanas bīdmērs;

Lai kontrolētu slieču izliekumu, nepieciešams bīdmērs ar nolasišanas precizitāti vismaz 0,05 mm. Pētījumā tika izmantots dziļuma mērīšanas bīdmērs, bet var tikt izmantoti arī praksē biežāk sastopamie standarta bīdmēri. Pētījuma ietvaros tika arī noteikts nospriegotu slieču izliekuma rādiuss, izmantojot *Mitutoyo CRYSTA-PLUS M500 (Mitutoyo, Japāna)* manuālo koordinātu mērīšanas iekārtu. Taču ņemot vērā limitētu piekļuvi šāda tipa iekārtām, slieču izliekuma kontrolei pietiek ar bīdmēru.

- Vides apstākļu mērījumi;

Pētījumā tika izmantoti noteikti mēraparāti vides apstākļu mērījumiem (aprakstīts 2.1. *Eksperimentālā parauga slīdēšanu raksturojošu parametru mērīšanas iekārta* nodaļā), taču var tikt izmantotas alternatīvi, kas nodrošina nepieciešamo vides apstākļu mērījumus – gaisa un ledus temperatūras, gaisa mitruma. Rekomendējams ir kontrolēt arī slieču virsmas temperatūru.

- Slīdēšanas laika mērījumi.

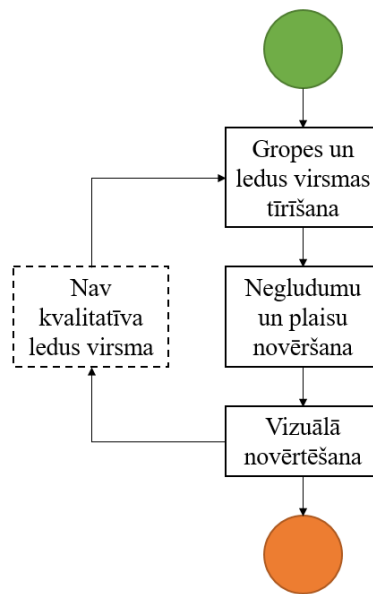
Slīdēšanas laika mērījumi var tikt veikti ar *ALGE PR1a (ALGE Timing GmbH, Vācija)* vai alternatīviem optiskajiem sensoriem (optisko sensoru mērījumu kļūda 0,0005 s).

### 1.4. Operatoru skaits.

Eksperimenti tika veikti ar 3 operatoru līdzdalību. Pirmais operators nodrošina eksperimentālā parauga novietošanu un palaišanu no miera stāvokļa. Otrais operators skeletonu sagaida un nobremzē trases beigu daļā un nodrošina, ka tas neizslīd no iestrādātas gropes. Tālāk eksperimentālo paraugu iestumj atpakaļ uz, pētījumos izmantojamo, trases daļu, kur to pārtver pirmais un trešais operators, un nogādā uz starta pozīciju. Trešais operators nodrošina arī vides apstākļu manuālu pierakstīšanu.

## 2. Ledus virsmas sagatavošana eksperimentu veikšanai

Procedūras izstrādē tiek pieņemts, ka ledus virsma ar iestrādātu gropi, kas paredzēta eksperimentālā parauga kustības vadīšanai, ir sasaldēta un sagatavota iepriekš.



2.23. att. Ledus virsmas sagatavošanas algoritms.

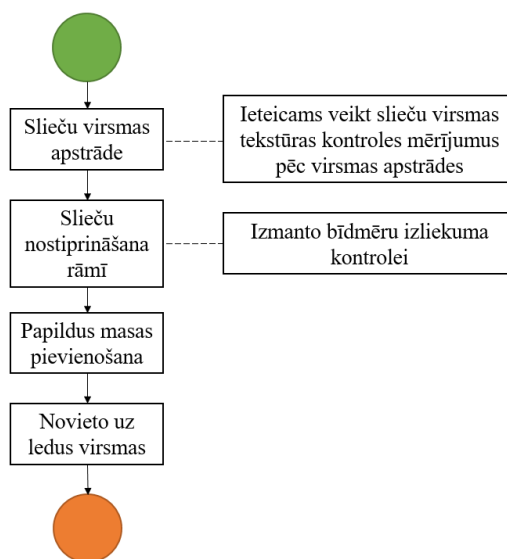
Ledus virsmas sagatavošana eksperimentu veikšanai pa soļiem ir sekojoša (2.23. att.):

- Gropes un ledus virsmas tīrīšana. Ledus virsma pa kuru tiks veikts eksperiments, tiek notīrīta ar birsti, grope skeletona vadīšanai iztīrīta ar gropes diametram pielāgotu ēveli (Ø20 mm).
- Negludumu un plaisu novēršana. Ledus virsmas, pa kurām slīdēs slieces, tiek nolietas ar karstu ūdeni (~65 °C) plānā kārtiņā, lai tiktu aizpildītas plaisas, nolīdzināti izciļņi vai kādi citi defekti uz ledus virsmas.
- Vizuālā novērtēšana. Vizuāli novērtē ledus virsmu, lai tā būtu ar pēc iespējas mazāk defektiem, kas var ietekmēt slīdēšanas mērījumu precizitāti.

Ja pēc vizuālās novērtēšanas, tiek konstatēti iespējamo mērījumu precizitāti ietekmējoši defekti uz ledus virsmas, ledus virsmas sagatavošana tiek atkārtota pa iepriekš aprakstītajiem soļiem.

## 3. Eksperimentālā parauga un slieču sagatavošana

Procedūras izstrādē tiek pieņemts, ka ir izvēlēts viens eksperimentālais skeletons un tiek izmantots viens slieču pāris, kas atbilst *IBSF* standarta prasībām. Tie, veicot eksperimentus dažādās dienās/ sesijās netiek mainīti.



2.24. att. Eksperimentālā parauga un slieču sagatavošanas algoritms.

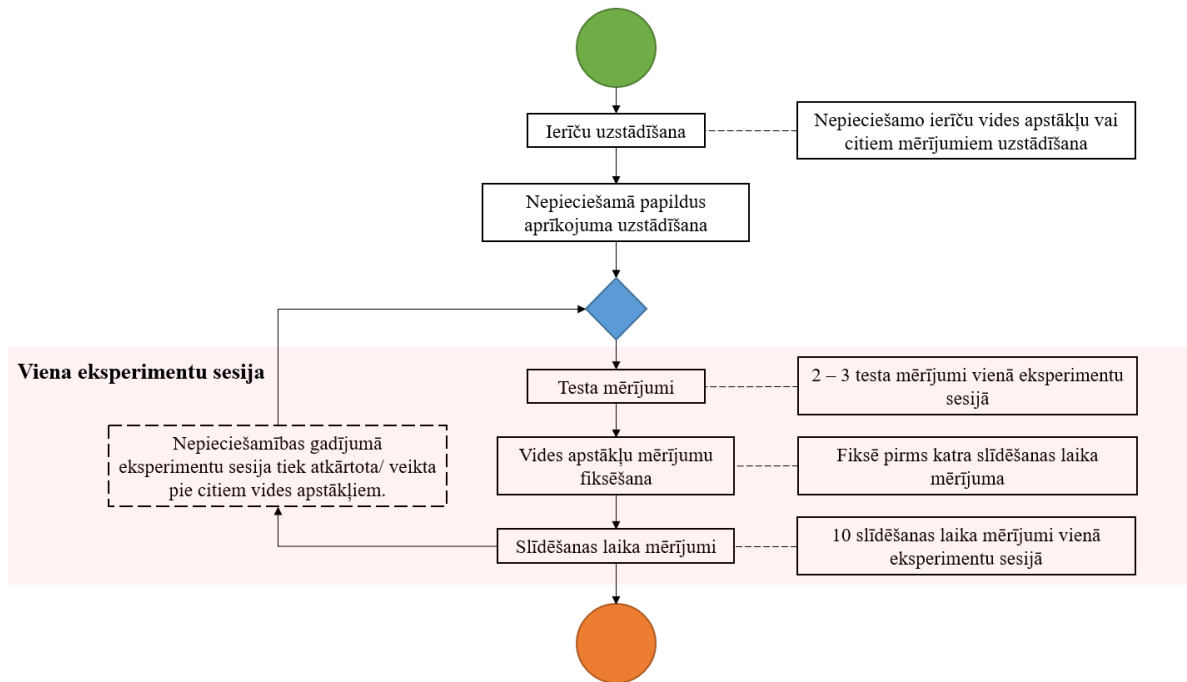
Eksperimentālā parauga un slieču sagatavošana pa soļiem ir sekojoša (2.24. att.):

- Veic slieču virsmas apstrādi, iegūstot virsmas raupjuma parametru  $S_a$  robežās no 0,02 līdz 0,15  $\mu\text{m}$  (mērot pēc standarta EN ISO 25178 [71]). Skeletona slieces tiek pulētas ar roku, izmantojot 600, 1500 un 3000 3M smilšpapīru uz auduma bāzes, līdz tiek iegūta spoguļgluda virsma ( $S_a \sim 0,03 \mu\text{m}$ ). Informācija par virsmas tekstūras mērījumiem 2.1. Eksperimentālā parauga slīdēšanu raksturojošu parametru mērīšanas iekārta nodaļā. Ņemot vērā, ka nav iespējams katru eksperimentu sesiju nokontrolēt slieču virsmas kvalitāti, Eksperimentālā parauga virsmas tekstūras ietekme uz slīdēšanu pa ledu nodaļā tika iegūts, ka skeletona slieču virsmas raupjums  $S_a \sim 0,12 \pm 0,03 \mu\text{m}$  šādos eksperimentu uzstādījumos nebūtiski ietekmē slīdēšanu pa ledu, ja salīdzina ar eksperimentu rezultātiem, izmantojot pulētas slieces ( $S_a \sim 0,03 \mu\text{m}$ ).
- Slieces tiek nostiprinātas skeletona rāmī un ar slieču izliekuma regulēšanas skrūvi abām sliecēm iestata interesējošo slieču izliekumu (šajā gadījumā 9 mm no “nulles” spriegojuma, jeb izliekuma rādiuss  $\sim 11500 \text{ m}$ ). Vairāk informācija 2.1. Eksperimentālā parauga slīdēšanu raksturojošu parametru mērīšanas iekārta nodaļā.
- Skeletonam pievieno papildus masu. Šajā eksperimentā tika izvēlēti 65 kg, kas atbilst sieviešu un vieglāku vīriešu sportistu masai, sasniedzot kopējo eksperimentālā parauga masu – 95 kg. Papildus masa tika nodrošināta ar blīvi aptītiem smilšu maisiem. Tie tika novietoti konkrētā un nemainīgā pozīcijā uz skeletona no dienas uz dienu (skat. 2.6. att. a, c), izmantojot abpusējo līmlentu.
- Eksperimentālais skeletona ar sliecēm tiek novietots uz ledus virsmas, līdz slieču temperatūra ir nostabilizējusies un nav vērojama slieču temperatūras atdzišana noteiktā laika periodā ( $\sim 2 \text{ min.}$ ). Pie aukstākiem vides apstākļiem, slieču temperatūra sasniedz ledus temperatūru. Ja vides apstākļi ir silti (piemēram, gaisa temperatūra no  $+1 \text{ }^\circ\text{C}$ ), slieču temperatūra ledus temperatūru nesasniedz. Kopējais skeletona slieču atdzišanas laiks svārstās no 5 – 15 min. un tiek kontrolēts ar termokameru *Thermal*

*imager Testo 871 (Testo, Vācija)*. Ja nav iespējama slieču temperatūras kontrole, skeletoņa slieču atdzesēšanu ieteicams veikt ilgākā laika periodā.

#### 4. Eksperimentu veikšanas secība.

Eksperimenti var tikt veikti, ja ir izpildīti iepriekš aprakstītie punkti, proti, sagatavota ledus virsma un sagatavots eksperimentālais paraugs.



2.25. att. Eksperimentu veikšanas algoritms.

Vides apstākļu ietekmes uz slīdēšanu raksturojošiem parametriem izpētes gadījumā, eksperimentu veikšanas algoritms pa punktiem ir sekojošs (2.25. att.):

- Uzstāda ledus temperatūras, gaisa temperatūras un gaisa mitruma mērīšanas ierīces. Ledus temperatūra tika mērīta, izmantojot kontakta tipa termopāri savienotu ar termometru. Pirms termopāra nostiprināšanas, ledū izurbj 1 – 3 mm dziļu un atbilstoši termopāra jūtīgā elementa diametram, lielu urbumu, kurā tas tiek nostiprināts. Gaisa temperatūras un mitruma mērījumi tiek veikti ar *P330 Temp (Dostmann electronic, Vācija)* termometru, kas novietots blakus ledus trasei. Pozīciju vēlamā izvēlēties tādu, kas nav tuvā saskarsmē ar operatoru. Vairāk informācija par izmantojamajām vides apstākļu mērīšanas iekārtām 2.1. *Eksperimentālā parauga slīdēšanu raksturojošu parametru mērīšanas iekārta* nodaļā un 2.6. a) attēlā. Nogaida 5 – 10 min., lai mērīparātu vērtības nostabilizējās.
- Veic papildus aprīkojuma sagatavošanu un uzstādīšanu. Lai eksperimentālais skeletoņs uzsāk kustību lejā pa ledus trasi no definētas pozīcijas, tika izmantota metāla ķēde. Daļa tika piestiprināta pie starta treniņu estakādē esošās konstrukcijas (roktura, kas paredzēts kamaniņu startam). Otra daļa pie eksperimentālā skeletoņa (skat. 2.6. att. c). Tās tiek nospriegotas un savienotas ar tapu. Izraujot tapu, eksperimentālais skeletoņs uzsāk kustību. Ķēdes garums tika kontrolēts.

- Veic 2 – 3 testa mērījumus. Ņemot vērā iegūto informāciju 2.3. *Ledus tekstūras ietekme uz parauga slīdēšanu pa ledu* nodaļā, jāveic vismaz 2 – 3 testa mērījumi (atkarībā no vides apstākļiem), lai slīdēšanas mērījumu rezultāti nostabilizētos. Šo mērījumu laikā, iespējamie negludumi, sarma vai citi traucējoši apstākļi uz ledus virsmas, tiek nogludināti. Paralēli tiek pārbaudīts, vai optisko sensoru laika mērīšanas sistēma strādā bez problēmām.
- Nolasa vides apstākļu mērījumus. Pirms eksperimentu sesijas tiek nolasīti ledus un gaisa temperatūras, gaisa mitruma mērījumi un piefiksēti. Vides apstākļu mērījumus vēlams fiksēt pirms katra slīdēšanas laika mērījuma.
- Veic slīdēšanas laika mērījumus. Atkarībā no mērīšanas sensoru sistēmas, ledus trases vai citiem aspektiem, var tikt mērīti dažādi parametri, piemēram, kopējais slīdēšanas ātrums, kopējais slīdēšanas laiks, momentānais ātrums konkrētā posmā u.c. Ņemot vērā iegūto informāciju 2.4. *Eksperimentālā parauga vibrāciju analīze* nodaļā, eksperimentos, kā slīdēšanas raksturojošais parametrs, tika izmantots kopējais slīdēšanas laiks. Kopā var veikt zināmu skaitu mērījumu, bet eksperimentāli tika iegūts, ka pietiekami ir 10 mērījumi, lai aprēķinātu vidējo slīdēšanas laiku vienā eksperimentu sesijā ar pietiekami mazu slīdēšanas laika standartnovirzi (zem 0,006) un vides apstākļi būtiski šajā laika periodā nemainītos. Kopējais patērētais laiks vienai eksperimentu sesijai ~20 minūtes.

## 5. Reālu apstākļu eksperimentu procedūras novērtēšanas kritēriji

Lai novērtētu veiktās reālu apstākļu eksperimentu procedūras kvalitāti, var tikt izvirzīti vairāki kritēriji (šajā gadījumā, balstoties uz standarta EN ISO 9000:2005 [84] terminu skaidrojumiem). Tiem ir jābūt izpildītiem, lai iegūtos mērījumu datus var izmantot tālākai apstrādei. Izvirzītie eksperimentu procedūras novērtēšanas kritēriji ir sekojoši:

- Slieču virsmas tekstūras raupjuma raksturojošais parametrs  $S_a$  robežās no (0,02 līdz 0,15  $\mu\text{m}$  mērot pēc standarta EN ISO 25178 [71]);

Norādītais  $S_a$  vērtību diapazons iegūts pamatojoties uz 2.5. *Eksperimentālā parauga virsmas tekstūras ietekme uz slīdēšanu pa ledu* nodaļā iegūtajiem datiem.

- Vides apstākļu mērījumu vienas eksperimentu sesijas absolūtā kļūda relatīvajam gaisam mitrumam  $\pm 5\%$ , gaisa temperatūrai  $\pm 2\text{ }^\circ\text{C}$ , ledus temperatūrai  $\pm 1\text{ }^\circ\text{C}$ ;

Norādītās mērījumu kļūdu robežas aprēķinātas pēc 2.7. *Vides apstākļu ietekme uz slīdēšanas laiku* nodaļā norādītajām formulām un veicot literatūras analīzi [5,12,15,70]. Šādai novirzei vienas sesijas ietvaros, nevajadzētu būtiski ietekmēt slīdēšanas laika mērījumus. Ja ir iespējams, rekomendējams izmantot mēraparātus ar mazāku mēraparāta pamatkļūdu.

- Vienas sesijas kopējā slīdēšanas laika absolūtā kļūda ne lielāka par  $\pm 0,01\text{ s}$ ;  
Absolūtās kļūdas robežas iegūtas eksperimentāli. Vēlams pēc iespējas mazāka absolūtā kļūda.
- Kopējais vienas sesijas eksperimenta laiks zem 20 min.

Ja eksperimentu sesija ir ilgāka, ņemot vērā, ka eksperimenti tiek veikti reālu apstākļu eksperimentu režīmā, var būtiski mainīties kāds no vides apstākļiem, attiecīgi ietekmējot mērāmo slīdēšanas laiku.

## **6. Reālu apstākļu eksperimentu procedūras variācijas iespējas**

Pēc vienas eksperimentu sesijas, ja nepieciešams, var tikt veiktas attiecīgās manipulācijas, piemēram, sliecēm, ledus trasei, eksperimentālajam paraugam. Ja tiek pētīta vides apstākļu ietekme uz slīdēšanu, nav nepieciešams veikt eksperimentālā skeletoņa sagatavošanas izmaiņas.

Pētījuma ietvaros, tika izmantota specifiska infrastruktūra, proti, starta treniņu estakāde renes sporta veida pārstāvjiem, taču var tikt izmantotas līdzīga tipa konstrukcijas, lai pielāgotu izstrādāto procedūru. Tas pats attiecās uz eksperimentālo paraugu – skeletoņa kamanām, var tikt izmantots cits līdzīga tipa eksperimentālais paraugs.

Šajā pētījumā tika izmantoti divi optisko sensoru pāri, kas tika pozicionēti noteiktās estakādes vietās (skat. 2.2. att. a), taču pilnvērtīgāku datu ieguvei par berzes pāra nerūsējošais tērauds – ledus slīdēšanu noteiktā distancē, būtu nepieciešams izvietot vairāk sensoru pārus, kas ļautu novērot slīdēšanas izmaiņas laika gaitā.

Turklāt, lai šādu reālo apstākļu eksperimentiem nebūtu nepieciešama pietiekami sarežģīta infrastruktūra un būtu iespējams variēt ar eksperimentālā parauga sākuma slīdēšanas ātrumu, varētu tikt izgatavota iekārta, kas ar noteikta spēka palīdzību iestumj eksperimentālo paraugu. Tādēļ tika izstrādāts iekārtas prototips *Solidworks 2019* CAD programmatūrā, kas ar pneimocilindra palīdzību iestumj eksperimentālo paraugu. Lai nebūtu nepieciešama optisko vai citu sensoru sistēma, kas jāizvieto uz ledus vai kāda cita materiāla trases, iekārtai tika paredzēta slīdēšanas procesa nepārtraukta kontrole ar inkrementālo rotācijas enkoderu palīdzību. Iekārtas konstrukcija ir aizsargāta ar patenta pieteikumu Nr. LVP2020000098 (ziņas par patenta pieteikumu pievienotas 9. pielikumā).

## **7. Reālu apstākļu eksperimentu procedūru salīdzinājums**

Izstrādātā reālu apstākļu eksperimentu veikšanas procedūra tika salīdzināta ar zināmāajā literatūrā atrodamajām eksperimentu procedūrām, kas teorētiski varētu nodrošināt vides apstākļu ietekmes uz berzes pāra nerūsējošais tērauds-ledus izpēti. Tika apskatīti Federolf eksperimenti [56], kur tika iestumtas kamanas pa ledu ar noteiktu starta ātrumu un optiskie sensori fiksēja slīdēšanas ātrumu. Poirier izmantotā eksperimentu procedūra [10] pēc būtības ir līdzīga Federolf procedūrai, taču, šajā gadījumā, bobsleja eksperimentālās kamanas tika iestumtas ar cilvēku palīdzību un ar radaru fiksēts slīdēšanas ātrums. Hainzmaier disertācijā [16] analizēja slieču ģeometrijas ietekmi uz slīdēšanu pa ledu. Vairāki sportisti veica braucienus Kēnigzes bobsleja trasē un tika salīdzināti slīdēšanas laiki. Vairāk informācija par salīdzināmajām procedūrām 1.5. *Eksperimentālo pētījumu apskats* nodaļā.

Kā salīdzināmie parametri apskatītajām eksperimentu procedūrām, tika izvēlēti iepriekš izvirzītie reālu apstākļu eksperimentu kritēriji, balstoties uz literatūras analīzi (skat. 2.5. tabulu). Papildus kritērijs – variācijas iespējas apzīmē iespēju mainīt eksperimentu uzstādījumu, proti, sākuma ātrumu, pielikto spēku, ģeometriju u.c.



Eksperimentu procedūru salīdzinājums

Eksperimentu procedūra	Izslēgts cilvēka faktors	Kontrolēta kustības trajektorija	Pilnvērtīga vides apstākļu kontrole	Variācijas iespējas
Federolf eksperimenti [56]	Jā	Nē	Jā	Jā
Poirier eksperimenti [10]	Nē	Nē	Nē	Daļēji
Hainzmaier eksperimenti [16]	Nē	Nē	Nē	Nē
<i>Izstrādātā procedūra</i>	Jā	Jā	Jā	Daļēji

Pēc 2.5. tabulas datiem, redzams, ka Poirier [10] un Hainzmaier [16] eksperimentu procedūras, lai analizētu vides apstākļu ietekmi uz nerūsējošā tērauda slīdēšanu pa ledu, nevar tikt izmantotas. Tas ir tādēļ, ka cilvēks tieši ietekmē eksperimentu rezultātu, līdz ar to kustības trajektorija var būtiski atšķirties. Pilnvērtīga vides apstākļu kontrole varētu tikt veikta Poirier eksperimentos, taču Hainzmaier gadījumā, tiek izmantota visa bobsleja trase, kur vides apstākļi var atšķirties dažādās trases vietās, turklāt tā nav pasargāta no saules stariem, vēja un citiem klimatiskajiem apstākļiem. Federolf [56] eksperimentu procedūra būtu vispiemērotākā, taču, to izmantojot, netiktu kontrolēta eksperimentālā parauga kustības trajektorija, kas radītu neprecizitātes rezultātos. Izstrādātā procedūra prasa specifisku infrastruktūru, taču ar to var izpildīt izvirzītos kritērijus.

## 2.7. Vides apstākļu ietekme uz slīdēšanas laiku

Ņemot vērā izstrādāto reālu apstākļu slīdēšanas laika mērījumu veikšanas procedūru, tika veikti vides apstākļu ietekmes uz slīdēšanas laiku eksperimenti. Tā kā eksperimenti tika veikti reālu apstākļu eksperimentu režīmā, vides apstākļu kontrole nebija iespējama (gaisa mitrums, gaisa temperatūra un ledus temperatūra), tādēļ no visiem veiktajiem eksperimentiem, tālākai analīzei tika ņemti vērā tikai tie eksperimenti, kur atšķīrās novērotie vides apstākļi (kopā 14 gadījumi, apkopoti 2.6. tabulā). Datu tabulas pievienotas 2. pielikumā. Balstoties uz vides apstākļu eksperimentu rezultātiem, tika izstrādāta [75] literatūras avotā, apskatāmā publikācija.

Kā mērāmais parametrs, tika izmantots slīdēšanas laiks, jo tas tiek iegūts 24 m garā trases posmā, līdz ar to ir mazāk jūtīgs pret dažādiem blakus apstākļiem, kas var ietekmēt rezultātu īsākā posmā (piemēram, beigu ātrums). Slīdēšanas laiks katrā eksperimentā tika aprēķināts no vismaz 10 mērījumiem, ņemot vērā iepriekšējās nodaļās iegūto informāciju. Gaisa, ledus temperatūra un relatīvais gaisa mitrums tika mērīts pirms katra slīdēšanas laika mērījuma. Mērījumi tika apstrādāti, izmantojot (2.1. – 2.5.) formulas [61,85–88].

Standartnovirze  $\sigma$ , kas raksturo datu izkliedi ap vidējo vērtību, katram eksperimentam tika aprēķināta sekojoši:

$$\sigma = \sqrt{\frac{(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + \dots + (x_n - \bar{x})^2}{n - 1}}, \quad (2.1.)$$

kur  $\bar{x}$  – datu kopas vidējā vērtība;

$n$  – gadījumu skaits.

Attiecīgi tālāk tika aprēķināta lielāko iespējamo mērījumu kļūdu robežas:

$$\Delta_{lim} = \pm 3\sigma. \quad (2.2.)$$

Mērījumi, kas pārsniedz kļūdu robežas, var tikt uzskatīti kā mērījumi ar rupju kļūdu un tie tika izslēgti.

Tālāk tika izvēlēts ticamības varbūtības  $\beta$  līmenis – 0,95 un noteikta Stjudenta koeficienta vērtība  $t_\beta(n)$  pēc Stjudenta koeficienta vērtību tabulām [88].

Attiecīgi aprēķina mērījuma absolūto kļūdu:

$$\Delta x_s = \sigma t_\beta(n), \quad (2.3.)$$

kur  $t_\beta(n)$  – Stjudenta koeficienta vērtība, kas atkarīga no veikto mērījumu skaita.

Tā kā izmantotie vides apstākļu mērinstrumenti ir ar zināmu mērījumu pamatkļūdu (skat. 2.2. tabulu), tika aprēķināta sistemātiskās kļūdas daļa, kas nosaka mērinstrumenta precizitāti:

$$\Delta x_\delta = \frac{\delta x}{3} t_\beta(\infty), \quad (2.4.)$$

kur  $\delta x$  – mērinstrumenta pamatkļūda lieluma  $x$  mērījumam;

$t_\beta(\infty)$  – Stjudenta koeficienta vērtība, kas atbilst bezgalīgam mērījumu skaitam.















Galīgā absolūtā kļūda  $\Delta x$  tiek pieņemta lielākā vērtība no gadījuma (2.3.) un sistemātiskās kļūdas (2.4.) vērtībām. Ja  $\Delta x_s$  un  $\Delta x_\delta$  atšķirās mazāk kā trīs reizes, tad galīgo absolūto kļūdu  $\Delta x$  aprēķina pēc sekojošas formulas:

$$\Delta x = \sqrt{(\Delta x_s)^2 + (\Delta x_\delta)^2}. \quad (2.5.)$$

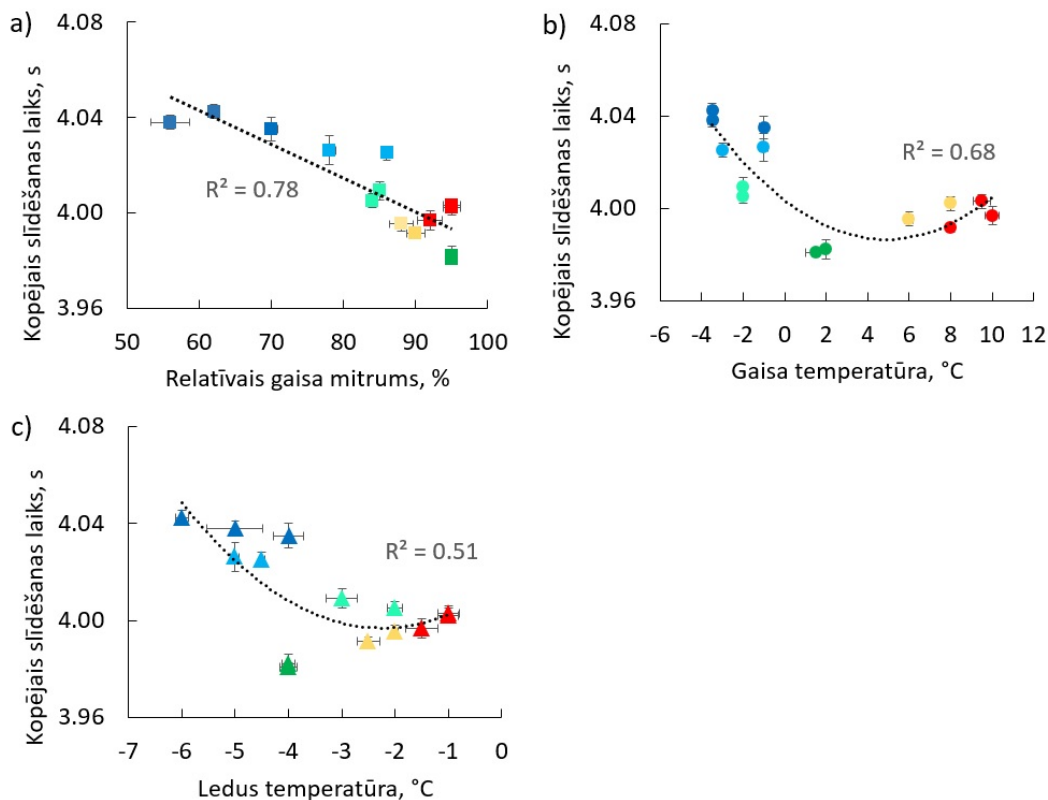
Galīgo absolūto mērījumu kļūdas norādītas 2.6. tabulā. Vides apstākļu mērījumiem, lielāko kļūdas daļu sastāda sistemātiskā mērinstrumenta precizitātes kļūda, kaut gan vides apstākļu mērījumu standartnovirze ir maza. Līdz ar to, ja tiktu izmantoti precīzāki mērinstrumenti, iespējams, ka vides apstākļu mērījumu kļūdas būtu mazākas.

Rezultāti tika analizēti kā neatkarīgu parametru – gaisa mitruma, gaisa temperatūras un ledus temperatūras ietekme uz slīdēšanas laiku (skat. 2.26. att.), kā arī kā 3 parametru savstarpējā mijiedarbība uz slīdēšanas laiku (skat. 2.27. att.).

Eksperimentos izmērītie vides apstākļi un slīdēšanas laiks

Eksperiments	Krāsa 2.23. att.	Relatīvais gaisa mitrums, %	Gaisa temperatūra, °C	Ledus temperatūra, °C	Slīdēšanas laiks, s
1		90 ±2,2	8 ±1,1	-2,5 ±0,7	3,991 ±0,004
2		95 ±2,0	2 ±1,2	-4 ±0,7	3,982 ±0,004
3		95 ±2,0	1,5 ±1,1	-4 ±0,8	3,981 ±0,005
4		95 ±3,3	8 ±1,1	-1 ±0,7	4,002 ±0,006
5		92 ±3,0	10 ±1,0	-1,5 ±0,7	3,997 ±0,009
6		88 ±3,6	6 ±1,0	-2 ±0,7	3,995 ±0,006
7		95 ±3,0	9,5 ±1,1	-1 ±0,7	4,003 ±0,006
8		86 ±2,0	-3 ±1,0	-4,5 ±0,7	4,025 ±0,006
9		84 ±2,1	-2 ±1,0	-2 ±0,7	4,005 ±0,006
10		85 ±2,4	-2 ±1,0	-3 ±0,8	4,009 ±0,008
11		56 ±3,9	-3,5 ±1,0	-5 ±0,8	4,038 ±0,008
12		62 ±2,7	-3,5 ±1,0	-6 ±0,7	4,043 ±0,008
13		78 ±2,5	-1 ±1,0	-5 ±0,7	4,026 ±0,009
14		70 ±2,5	-1 ±1,1	-4 ±0,9	4,035 ±0,007

2.26. attēlā katrs izmērītais vides apstākļu parametrs (relatīvais gaisa mitrums, gaisa temperatūra, ledus temperatūra) tika salīdzināts ar slīdēšanas laiku, tādējādi iegūstot sakarības, kas tiktu iegūtas, ja mērīts būtu tikai kāds no 3 vides apstākļu aprakstošajiem parametriem, lai gan pārējie parametri arī mainījās no eksperimenta uz eksperimentu. Krāsas 2.26. attēlā atbilst norādītajām krāsām 2.6. tabulā un ir paredzētas, lai uzskatāmāk varētu analizēt attiecīgus eksperimentu rezultātus. Izmantojot datorprogrammas *Microsoft Excel 2017* iespējas, katram gadījumam tika izvilktā līkne, kas raksturo konkrētu sakarību visciešāk [89]. Determinācijas koeficients  $R^2$  tika izmantots, lai novērtētu sakarības ciešumu (vērtības 0 – 1, jo lielāka vērtība, jo ciešāka sakarība). Relatīvā gaisa mitruma gadījumā (skat. 2.26. att. a), starp mitrumu un slīdēšanas laiku veidojās lineāra sakarība, taču gaisa un ledus temperatūras (skat. 2.23. att. b un c) gadījumā, visprecīzāk tendences aprakstīja 2. kārtas polinoms.



2.26. att. Vides apstākļu un slīdēšanas laika sakarības: a) slīdēšanas laika atkarība no relatīvā gaisa mitruma; b) slīdēšanas laika atkarība no gaisa temperatūras; c) slīdēšanas laika atkarība no ledus temperatūras [75].

Relatīvā gaisa mitruma un slīdēšanas laika gadījumā (skat. 2.26. att. a), var novērot krītošu slīdēšanas laika tendenci viscaur grafikam, kas norāda, ka palielinoties gaisa mitrumam, uzlabojas slīdēšanas apstākļi. Determinācijas koeficients  $R^2 = 0,78$  norāda uz ciešu lineāru sakarību, taču pie  $\sim 85\%$  mitruma un  $\sim 95\%$  mitruma redzams, ka var būt gadījumi, kad pie aptuveni viena mitruma, ir novērojamas pietiekami lielas izmaiņas slīdēšanas laika vērtībās, līdz ar to, ir nepieciešama papildus informācija par citiem vides apstākļiem.

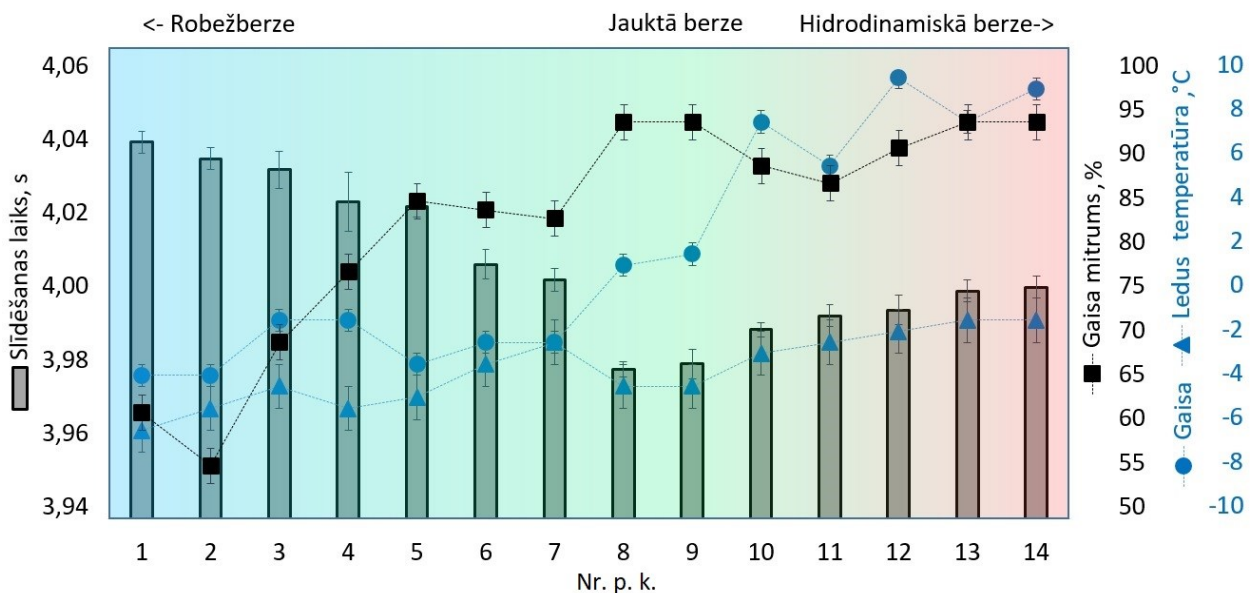
Gaisa temperatūras un slīdēšanas laika gadījumā (skat. 2.26. att. b), var novērot, ka slīdēšanas laiks krītas līdz  $\sim +2\text{ °C}$  temperatūras un no  $\sim +6\text{ °C}$  temperatūras slīdēšanas laiks atkal nedaudz palielinās. Determinācijas koeficients  $R^2 = 0,68$  šajā gadījumā norāda uz vājāku sakarību kā slīdēšanas laikam ar gaisa mitrumu, taču 2. kārtas polinoma līkne šķietami tendenci parāda. Lielākās novirzes slīdēšanas laikā ir novērojamas pie  $\sim -2\text{ °C}$  temperatūras.

Ledus temperatūras un slīdēšanas laika gadījumā (skat. 2.26. att. c), savstarpējās tendences tika novērotas visvājākās,  $R^2 = 0,51$ . Aptuveni tikai 50% gadījumu var tikt aprakstīti ar 2. kārtas polinoma līkni. Paaugstinoties ledus temperatūrai līdz  $\sim -2\text{ °C}$ , novērojams zināms kritums slīdēšanas laikā, attiecīgi temperatūrai paliekot siltākai, slīdēšanas laiks arī palielinās.

Pēc katra vides parametra un slīdēšanas laika sakarību analīzes, var secināt, ka visnozīmīgākā sakarība ir vērojama starp ledus temperatūru un slīdēšanas laiku (parametrs, ko eksperimentu apstākļu aprakstīšanā zinātnieki izmanto visbiežāk (skat. 1.1. tabulu)). Gaisa temperatūras un ledus temperatūras grafiku līknes zināmā mērā sakrīt ar Kietzig [15] rakstā

apkopoto dažādu autoru iegūtajām līknēm starp ledus temperatūru un berzes koeficientu (skat. 1.5. att.).

Lai iegūtu vairāk informāciju par eksperimentu apstākļiem un to sakarību ar slīdēšanas laiku, tika izveidots 2.27. attēls. Slīdēšanas laiks ir attēlots stabiņu veidā un sakārtots, balstoties uz apkārtējiem vides apstākļiem no aukstākiem un sausākiem uz siltākiem un mitrākiem. Zilie aplīši norāda uz izmērīto gaisa temperatūru, zilie trijstūri uz izmērīto ledus temperatūru un melnie kvadrāti uz izmērīto relatīvo gaisa mitrumu (punktētās līnijas, kas savieno šo parametru vērtības tiek izmantotas, lai vizuāli labāk parādītu izmaiņas starp parametriem dažādās eksperimentu dienās). Skaidrākam rezultātu skaidrojumam ir pievienoti teorētiskie berzes režīmi (balstoties uz [15,38,40] un 1.2. attēla datiem). Zilā krāsa apzīmē reģionu, kur berze tuvojas teorētiski robežberzes režīmam, zaļā apzīmē jauktās berzes režīmu un sarkanā – hidrodinamiskās (Berzes režīmi ir norādīti, balstoties uz iegūtajiem datiem un loģiskiem pieņēmumiem, lai uzskatāmāk skaidrotu rezultātus, tiem nav cita pamatojuma).



2.27.att. Slīdēšanas laika atkarība no gaisa temperatūras, ledus temperatūras un relatīvā gaisa mitruma. Eksperimenti ir sakārtoti no aukstākiem un sausākiem uz siltākiem un mitrākiem vides apstākļiem, balstoties uz ledus berzes režīmu līkni.

Mazākais slīdēšanas laiks (potenciāli ātrākie slīdēšanas apstākļi), tika iegūts 8 un 9 eksperimentā, kad gaisa mitrums ir augstākais (~ 95 %), gaisa temperatūra ir ~ 2 °C un ledus temperatūra ~ -4 °C. Balstoties uz berzes režīmiem, šis reģions tika pieņemts kā jauktās berzes režīms, kas nodrošina ātrākos slīdēšanas apstākļus, pateicoties biežākam robežslānim starp ledu un slieci, kā robežberzes gadījumā, taču tas joprojām nav pārāk biezs, kas var palielināt slīdēšanas laiku viskozās pretestības dēļ [15]. No 10 līdz 14 eksperimentam, slīdēšanas laiki ir savstarpēji līdzīgi. Augstās gaisa un ledus temperatūras dēļ, šis reģions tika pieņemts kā hidrodinamiskās berzes režīms. Relatīvajam gaisa mitrumam un temperatūrām krītoties no septītā uz pirmo eksperimentu, kopējais slīdēšanas laiks pieaug. Gaisa temperatūras un mitruma būtisks pieaugums no septītā uz devīto eksperimentu, norāda, ka vairāku parametru izmaiņas, ietekmē slīdēšanas laiku. Ledus temperatūras kritums no septītā uz piekto eksperimentu, kā arī

gaisa mitruma kritums no piektā uz pirmo eksperimentu, kamēr pārējie apstākļi saglabājas līdzīgi, norāda, ka arī viens parametrs var būtiski ietekmēt slīdēšanas laiku. Rezultātā, var secināt, ka vides apstākļu savstarpēja mijiedarbība ietekmē slīdēšanas laiku.

Kā tika novērots vibrāciju analīzes eksperimentos, izmaiņas svārstību amplitūdā iespējamās robežberzes un jauktās berzes gadījumā, tika novērotas ap 20 %, izmantojot virsmu slīdēšanu raksturojošu parametru noteikšanas mēriekārtu balstītu uz slīpās plaknes principu, reālu apstākļu režīmā, līdz ar to ir iespējams, ka slīdēšanas laiks pie aukstākiem apstākļiem var tikt pastarpināti ietekmēts lielāku vibrāciju dēļ. Šis novērojums var tikt skaidrots ar Seymour–Pierce eksperimentu rezultātiem [90], proti, lielākas vibrācijas pie aukstākiem vides apstākļiem var rasties plaisu, negludumu ledus virskārtā, kas ir veidojušies no iepriekšējiem eksperimentiem, dēļ. Attiecīgi pie siltākiem apstākļiem, skeletoņa kustība lejā pa ledus trasi, veicina robežslāņa kušanu un virsmas cietības samazināšanos, kas attiecīgi noved pie virsmas rekristalizācijas un gludākas ledus virskārtas nākamajos mērījumos. Turklāt, ja salīdzina 2.9. un 2.10. attēlu, kur ir attēlota ledus virskārta pie  $-4\text{ °C}$  un  $-15\text{ °C}$  un kā tā mainās laika gaitā, redzams, ka pie siltākas ledus temperatūras, ledus virskārtā kristālu robežas saplūst un tie veidojās lielāki, bet mazāk, vizuāli ledus virsma izskatās gludāka. Attiecīgi pie zemākas ledus temperatūras, tika novērots, ka pēc sasalšanas brīža ledus virsma paliek raupjāka. Lai gan, precīzi nedefinēt ledus virskārtas izmaiņas šajā eksperimentā nebija iespējams, tomēr vizuāli novērojumi pamato ledus virsmas iespējamo raupjumu. Iespējams, ka eksperimentu metode ar uzspiestu kustību varētu nodrošināt precīzākus datus, izslēdzot iespējamo vibrāciju ietekmi, bet tad varētu palielināties berzes spēks, ņemot vērā, ka parauga virsma pārvietotos pa atšķirīgām ledus virsmām. Jebkurā gadījumā, tā kā slīpās plaknes eksperimenti reālu apstākļu režīmā ir tuvāk reālās dzīves apstākļiem (piemēram, skeletoņa sacensībām), iespējams, novērotais vibrāciju pieaugums, vides apstākļu dēļ, ir pamatots un tā ietekme nedrīkst tikt izslēgta, kā arī, visticamāk, ņemot vērā apskatīto literatūru [6,15], ar uzspiestu eksperimentu metodi (tribometri), tiktu iegūtas līdzīgas sakarības, iespējams, ar ne tik stāvu slīdēšanas laika pieaugumu, tuvojoties robežberzes režīmam.

Novērotās tendences sasauca ar informāciju Kietzig [15] publikācijā (1.5. att.). Ledus temperatūras ietekme uz berzes koeficientu tika salīdzināta no 4 dažādu autoru eksperimentiem, izmantojot dažādas eksperimentu metodes. Berzes koeficienta samazināšanas, palielinoties ledus temperatūrai līdz punktam, kad berzes koeficients atkal sāk palielināties, norāda uz to, ka ir optimāla, šajā gadījumā, ledus temperatūra, ātrākiem slīdēšanas apstākļiem. Protams, ņemot vērā, ka tika salīdzinātas dažādas eksperimentu metodes, optimuma punkts variēja no  $-7\text{ °C}$  to  $-2\text{ °C}$ , kā arī berzes koeficienta vērtības atšķīrās līdz pat 100 %, pie nosacīti vienas ledus temperatūras.

Spagni darbā [5], berzes koeficients tika mērīts pie piecām dažādām gaisa temperatūrām, izmantojot rotācijas tipa tribometru. Gludākajiem eksperimentālajiem paraugiem ( $Ra \sim 0,11 \pm 0,02\ \mu\text{m}$ ), zemākās berzes koeficienta vērtības tika novērotas pie  $-2$  un  $-6\text{ °C}$  gaisa temperatūras ( $\sim 0,02$ ) un lielākās vērtības pie  $-10$ ;  $-13$  un  $-17\text{ °C}$  ( $\sim 0,03$ ). Raupjākajiem paraugiem ( $Ra \sim 1,4$  un  $2,6 \pm 0,1\ \mu\text{m}$ ), zemākās berzes koeficienta vērtības tika sasniegtas pie  $-6\text{ °C}$  gaisa temperatūras ( $\sim 0,02$ ), bet pie pārējām temperatūrām berzes koeficienta vērtības

tika novērotas līdzīgas ( $\sim 0,03$ ). Līdz ar to, var secināt, ka Spagni eksperimentu iestatījumu gadījumā, optimālā gaisa temperatūra ir pie  $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Abi Kietzig un Spagni darbi pierāda, ka ir optimāli slīdēšanas apstākļi, kas var tikt uzskatīti par jauktās berzes režīmu un sasaucās ar iegūtajiem eksperimentu rezultātiem. Atšķirība ir, ka tikai viens parametrs (ledus temperatūra Kietzig darbā un gaisa temperatūra Spagni eksperimentos) tika kontrolēts, bet citi apstākļi netika norādīti, radot salīdzinoši lielas novirzes berzes koeficienta vērtībās ( $\sim 100\%$ ), pie nosacīti vienādiem vides apstākļiem. No iegūtajiem datiem (skat. 2.27. att.), var secināt, ka izmaiņas slīdēšanas laikā var ietekmēt gan viena parametra izmaiņa, gan vairāku. Līdz ar to, vajadzētu mērīt un uzrādīt vismaz 3 (gaisa mitrums, ledus un gaisa temperatūra) apskatītos vides apstākļu parametrus, lai iegūtu pilnvērtīgu eksperimentu apstākļu aprakstu un salīdzināmākus datus, izslēdzot nezināmos parametrus.

### 3. SLĪDĒŠANAS LAIKA PROGNOZĒŠANAS MODELIS UN METODIKA

Vides apstākļu eksperimentu rezultāti norādīja, ka berzes pāra nerūsējošais tērauds-ledus slīdēšanas raksturojošo parametru (slīdēšanas laiku), var ietekmēt gan viena vides apstākļu parametru izmaiņa, gan vairāku parametru mijiedarbība. Tika iegūtas katra mērītā vides apstākļu sakarības ar slīdēšanas laiku un izveidots katrai sakarībai raksturojošs vienādojums. Tas tika izmantots, lai prognozētu slīdēšanas laiku, atkarībā no konkrētā vides parametra un salīdzināts ar izmērīto slīdēšanas laiku. Šāda pieeja parādīja, kāda būtu situācija, ja tiktu izmantots tikai viens vides apstākļu raksturojošs parametrs, kā tas tiek pārsvarā definēts zināmajā literatūrā.

Lai tiktu analizēta visu iekļauto mērīto vides apstākļu mijiedarbība, tika izveidots daudzfaktoru regresijas modelis. Izstrādātajam modelim tika veikta atbilstības pārbaude. Iegūtie prognozētie rezultāti tika salīdzināti ar izmērītajiem slīdēšanas laika rezultātiem un attiecīgi kļūda tika salīdzināta ar iegūtajām kļūdām, ja tiek izmantots viens vides apstākļu raksturojošs parametrs.

Daudzfaktoru slīdēšanas laika prognozēšanas modelim, tika izstrādāta mērīšanas un prognozēšanas metodika.

#### 3.1. Vides apstākļu sakarības ar slīdēšanas laiku

Lai apskatītu, sakarību starp izmērīto slīdēšanas laiku un prognozējamo, izmantojot vienu vides apstākļu aprakstošu parametru, sākotnēji tika izveidoti attiecīgi grafiki (skat. 2.26. att.), ņemot vērā, iepriekš apskatītos eksperimentu apstākļus (skat. 2.6. tab.). No iegūtajiem grafikiem ar *Microsoft Excel 2017* datorprogrammas palīdzību iegūts vienādojums, kas apraksta konkrēta vides parametra un slīdēšanas laika sakarību. Determinācijas koeficients  $R^2$  tika izmantots, lai novērtētu sakarības ciešumu.

Lai aprēķinātu slīdēšanas laiku, izmantojot izmērīto relatīvo gaisa mitrumu,  $T_{ks(RH)}$ , %, tika iegūts sekojošs taisnes vienādojums:

$$T_{ks(RH)} = -1,4 \cdot 10^{-3} \cdot RH + 4,128, \quad (3.1.)$$

kur  $RH$  – izmērītais relatīvais gaisa mitrums, %.

Lai aprēķinātu slīdēšanas laiku, izmantojot izmērīto gaisa temperatūru  $T_{ks(gaiiss)}$ , °C, tika iegūts sekojošs otrās kārtas polinoma vienādojums:

$$T_{ks(gaiiss)} = 0,7 \cdot 10^{-3} \cdot T_{gaiiss}^2 - 6,9 \cdot 10^{-3} \cdot T_{gaiiss} + 4,003, \quad (3.2.)$$

kur  $T_{gaiiss}$  – izmērītā gaisa temperatūra, °C.

Lai aprēķinātu slīdēšanas laiku, izmantojot izmērīto ledus temperatūru  $T_{ks(ledus)}$ , °C, tika iegūts sekojošs otrās kārtas polinoma vienādojums:



$$T_{ks(ledus)} = 3,7 \cdot 10^{-3} \cdot T_{ledus}^2 + 16,4 \cdot 10^{-3} \cdot T_{ledus} + 4,015, \quad (3.3.)$$

kur  $T_{ledus}$  – izmērītā ledus temperatūra, °C.

Izmērītais slīdēšanas laiks un aprēķinātais slīdēšanas laiks no relatīvā gaisa mitruma, gaisa temperatūras un ledus temperatūras, izmantojot augstāk minētos vienādojumus (3.1. – 3.3.), ir apkopots 3.1. tabulā.

3.1. tabula

Izmērītais slīdēšanas laiks un aprēķinātais

Eksperiments	Izmērītais slīdēšanas laiks, s	Aprēķinātais slīdēšanas laiks, izmantojot $RH$ (3.1.), s			Aprēķinātais slīdēšanas laiks, izmantojot $T_{gais}$ (3.2.), s			Aprēķinātais slīdēšanas laiks, izmantojot $T_{ledus}$ (3.3.), s		
		$\Delta$ Slīdēšanas laiks, s	$\Delta$ Slīdēšanas laiks, %		$\Delta$ Slīdēšanas laiks, s	$\Delta$ Slīdēšanas laiks, %		$\Delta$ Slīdēšanas laiks, s	$\Delta$ Slīdēšanas laiks, %	
1	3,991	4,002	0,011	0,27	3,992	0,001	0,02	4,000	0,009	0,21
2	3,982	3,995	0,013	0,33	3,992	0,010	0,25	4,015	0,033	0,83
3	3,981	3,995	0,015	0,37	3,994	0,014	0,35	4,015	0,035	0,86
4	4,002	3,995	0,007	0,16	3,992	0,010	0,24	4,003	0,001	0,03
5	3,997	4,000	0,003	0,07	4,003	0,007	0,16	4,000	0,003	0,09
6	3,995	4,005	0,010	0,25	3,987	0,009	0,22	3,999	0,004	0,10
7	4,003	3,995	0,008	0,19	4,000	0,003	0,07	4,003	0,000	0,01
8	4,025	4,008	0,017	0,42	4,031	0,006	0,14	4,024	0,001	0,02
9	4,005	4,011	0,006	0,14	4,020	0,015	0,38	3,999	0,006	0,14
10	4,009	4,009	0,000	0,00	4,020	0,011	0,27	4,003	0,006	0,15
11	4,038	4,050	0,012	0,30	4,036	0,002	0,04	4,035	0,003	0,07
12	4,043	4,042	0,001	0,02	4,036	0,006	0,15	4,063	0,021	0,51
13	4,026	4,019	0,007	0,17	4,011	0,015	0,38	4,035	0,009	0,22
14	4,035	4,030	0,005	0,11	4,011	0,024	0,59	4,015	0,020	0,49
Vidējā kļūda			0,008	<b>0,20</b>		0,010	<b>0,23</b>		0,011	<b>0,26</b>
Lielākā kļūda			0,017	<b>0,42</b>		0,024	<b>0,59</b>		0,035	<b>0,86</b>

Absolūtā kļūda  $\epsilon$ , s, jeb  $\Delta$  slīdēšanas laiks, tika aprēķināta sekojoši [85]:

$$\epsilon = |y_{izm.} - y_{apr.}|, \quad (3.4.)$$

kur  $y_{izm.}$  – izmērītais slīdēšanas laiks, s;

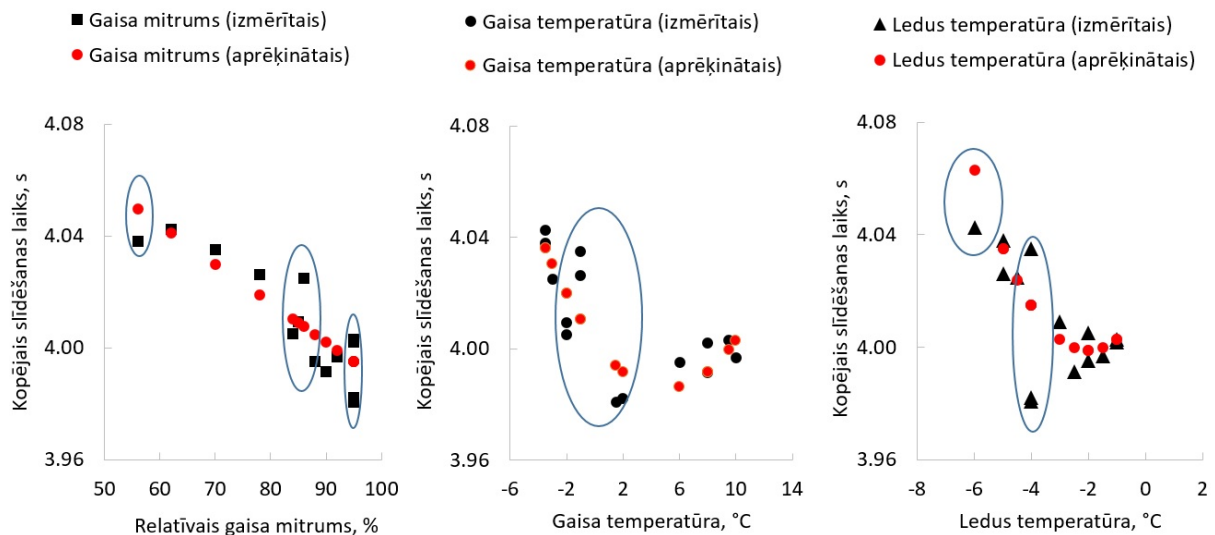
$y_{apr.}$  – aprēķinātais slīdēšanas laiks, s.

Procentuālā kļūda  $\eta$ , %, jeb  $\Delta$  slīdēšanas laiks, tika attiecīgi aprēķināts [91]:

$$\eta = \left| \frac{y_{izm.} - y_{apr.}}{y_{izm.}} \right| \cdot 100. \quad (3.5.)$$

Attiecīgi, lai iegūtu vidējo absolūto procentuālo kļūdu, (3.5.) formulā tika saskaitīta procentuālā kļūda katram mērījumam un izdalīta ar eksperimentu skaitu. Tā kā vidējā absolūtā procentuālā kļūda ir tieši atkarīga no mērījuma vērtības [92], kļūdas robežu, kas ir pieņemama attiecīgā situācijā, ir jāizvērtē.

Iegūtie rezultāti norāda uz vismaz 0,20 % vidējo procentuālo kļūdu (skat. 3.1. tabulu), ja tiek izmantots viens konkrēts vides parametrs (šajā gadījumā relatīvais gaisa mitrums), kopējā slīdēšanas laika prognozēšanā. Augstākā vidējā procentuālā kļūda – 0,26 % un lielākā procentuālā kļūda – 0,86 % tika iegūta, ja tiek izmantota ledus temperatūra slīdēšanas laika prognozēšanas veikšanā. Lai arī kļūda ir šķietami maza, jāņem vērā, ka slīdēšanas laika lielākā starpība starp dažādiem eksperimentiem ir tikai 0,062 s, līdz ar to lielu kļūdu nebūtu iespējams iegūt.



3.1. att. Prognozētā slīdēšanas laika salīdzinājums ar izmērīto un neprecizitātes apgabali: a) izmantojot relatīvo gaisa mitrumu; b) izmantojot gaisa temperatūru; c) izmantojot ledus temperatūru.

Lai veiktu padziļinātu datu analīzi, tika izveidoti sekojoši grafiki (skat. 3.1. att.), kur tika salīdzināts aprēķinātais (sarkani punkti), izmantojot 3.1. – 3.3. formulas un izmērītais slīdēšanas laiks (melni punkti), un ar zilu apvilkti apgabali, kur var novērot vislielākās atšķirības starp aprēķināto un izmērīto slīdēšanas laiku. Šie apgabali norāda uz vietām, kur teorētiski būtu nepieciešama papildus informācija par citiem vides apstākļiem (turpmāk tekstā saukti par – neprecizitātes apgabaliem). Slīdēšanas laika aprēķināšanā atkarībā no gaisa mitruma, neprecizitātes apgabals ir atrodams pie 85 – 95 % gaisa mitruma, gaisa temperatūras gadījumā, tas ir novērojams starp –2 un +2 °C, ledus temperatūras gadījumā, pie aukstākajām fiksētajām temperatūrām (–4 līdz –6 °C).

Ja tiek izmantots viens vides apstākļu raksturojošs parametrs, lai aprēķinātu nerūsējošais tērauds-ledus berzes pāra raksturojošo slīdēšanas parametru (slīdēšanas laiku), lielākās kļūdas starp izmērīto un prognozēto tika novērotas, ja tiek izmantota ledus temperatūra. Mazākās prognozēšanas kļūdas, ja izmanto relatīvo gaisa mitrumu. Protams, izmantot gaisa mitrumu, kā raksturojošu vides apstākļu parametru ledus berzes izpētē nebūtu adekvāti, taču iegūtie rezultāti, ka, šajā gadījumā, ledus temperatūras izmantošana rezultējas lielākajās kļūdās starp izmērīto un prognozēto slīdēšanas laiku, norāda, ka arī viena parametra izmantošana nav pietiekama, lai aprakstītu eksperimentu vides apstākļus.

### 3.2. Slīdēšanas laika daudzfaktoru prognozēšanas modelis

Tā kā iepriekš tika iegūts, ka gaisa temperatūras un ledus temperatūras izmantošanas gadījumā, ar slīdēšanas laiku, neveidojas lineāra sakarība, tika izmantota daudzfaktoru regresijas analīze, kas iekļauj gan 2. pakāpes polinomu, gan lineāru sakarību, kura vispārējā formā norādīta (1.20.) formulā.

Prognozēšanas modeļa izstrādei ar regresijas analīzes palīdzību, tika izmantoti 2.6. tabulā izmērītie neatkarīgie saistītie mainīgie – relatīvais gaisa mitrums, gaisa temperatūra un ledus temperatūra, kā arī rezultējošais atkarīgais mainīgais – slīdēšanas laiks. Novērtējot iepriekš iegūtās sakarības starp gaisa mitrumu, ledus temperatūru, gaisa temperatūru un slīdēšanas laiku, iegūst, ka gaisa mitruma sakarību visciešāk raksturo taisnes vienādojums, taču gaisa temperatūru un ledus temperatūru – otrās pakāpes polinoma vienādojums. Regresijas vienādojums tika veidots, ņemot vērā novērotās tendences. Modelis joprojām tiek uzskatīts par lineāru, lai arī satur nelineāras sakarības neatkarīgajiem mainīgajiem, jo regresijas koeficienti ir lineāri [61]. Daudzfaktoru regresijas modelis  $T_{ks}$ , s, kas raksturo slīdēšanas laiku atkarībā no vides apstākļu mijiedarbības, tika veidots sekojoši:

$$T_{ks} = b_0 + b_1 T_{gais} + b_2 T_{ledus} + b_3 T_{gais} T_{ledus} + b_4 T_{gais}^2 + b_5 T_{ledus}^2 + b_6 RH. \quad (3.6.)$$

Darbā tika izmantots *Microsoft Excel Data Solver*, taču var veiksmīgi tikt izmantotas arī citas statistikas programmas, piemēram, *MatLab*, *MiniTab*, u.c., lai aprēķinātu regresijas koeficientus –  $b_0; b_1; b_2; b_3; b_4; b_5; b_6$ . Datorprogrammā koeficienti tika aprēķināti pēc mazāko kvadrātu metodes [61]. Regresijas modelis tika veidots pie ticamības līmeņa  $\alpha = 0,05$ , jeb 95 %. Regresijas analīzes aprēķinātie raksturlielumi pievienoti 6. pielikumā. Iegūtie regresijas koeficienti tika ievietoti (3.6.) formulā:

$$T_{ks} = 4,064 + 4,1 \cdot 10^{-3} \cdot T_{gais} - 1,2 \cdot 10^{-2} \cdot T_{ledus} + 2,1 \cdot 10^{-3} \cdot T_{gais} \cdot T_{ledus} - 5,5 \cdot 10^{-5} \cdot T_{gais}^2 - 1,8 \cdot 10^{-3} \cdot T_{ledus}^2 - 9 \cdot 10^{-4} \cdot RH. \quad (3.7.)$$

Iegūtajam regresijas vienādojumam tika veikta atbilstības pārbaude. Pīrsona korelācijas koeficients  $r$  (robežās no  $-1$  līdz  $1$ ), kas raksturo lineāras sakarības ciešuma pakāpi [61,63], tika iegūts  $0,94$ :

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (y_{izm.} - \bar{y}_{izm.}) \cdot (y_{apr.} - \bar{y}_{apr.})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_{izm.} - \bar{y}_{izm.})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_{apr.} - \bar{y}_{apr.})^2}} \quad (3.8.)$$

kur  $\overline{y_{izm.}}$  – vidējā eksperimentāli izmērītā slīdēšanas laika vērtība;

$\overline{y_{apr.}}$  – vidējā aprēķinātā slīdēšanas laika vērtība, izmantojot regresijas analīzi;

Iegūtais korelācijas koeficients norāda uz ciešu lineāru sakarību starp aprēķināto slīdēšanas laiku, izmantojot daudzfaktoru regresijas analīzi un eksperimentāli iegūtajiem slīdēšanas laika mērījumiem. Lai pārliecinātos, ka iegūtais korelācijas koeficients var tikt izmantots atkarības vērtēšanai, tas tika salīdzināts ar kritisko vērtību  $r_{\alpha;n}$  (nolasa no normālā sadalījuma tabulām, nosakot korelācijas koeficienta kritisko vērtību, atkarībā no gadījumu skaita [63]). Pie 14 gadījumu skaita, kritiskā vērtība  $r_{\alpha;n}$  tika nolāsīta – 0,532. Korelācija ir ticama, ja  $r_{\alpha;n} < r$ .

Determinācijas koeficients  $R^2$ , kas raksturo daudzfaktoru regresijas analīzes ciešumu, proti, kādu daļu no kopējām variācijām, izskaidro novērtētais regresijas vienādojums [61], (robežās no 0 līdz 1), tika iegūts 0,89, ko var interpretēt, ka 89 % gadījumu var tikt izskaidroti ar izstrādāto regresijas vienādojumu (skat. 3.2. att.):

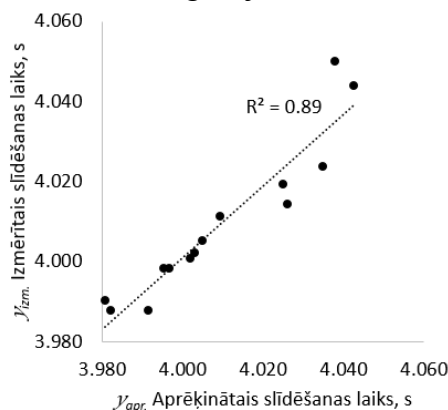
$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_{izm.} - \overline{y_{izm.}})^2 - \sum_{i=1}^n (y_{izm.} - y_{apr.})^2}{\sum_{i=1}^n (y_{izm.} - \overline{y_{izm.}})^2}. \quad (3.9.)$$

Tā kā determinācijas koeficients ir saistīts ar neatkarīgo mainīgo skaitu (5 šajā gadījumā), proti, palielinoties neatkarīgo mainīgo skaitam, determinācijas koeficients palielinās (jo regresijas koeficienti tiek aprēķināti pēc mazāko kvadrātu metodes, līdz ar to palielinoties neatkarīgo mainīgo skaitam, determinācijas koeficients nevar samazināties), tiek izmantots koriģētais determinācijas koeficients, kur tiek ņemts vērā neatkarīgo mainīgo skaits un mērījumu skaits [61]:

$$\bar{R}^2 = 1 - (1 - R^2) \frac{n - 1}{n - p - 1}, \quad (3.10.)$$

kur  $p$  – neatkarīgo mainīgo skaits.

Attiecīgi koriģētais determinācijas koeficients  $\bar{R}^2$  tika iegūts 0,80, kas joprojām norāda uz ciešu sakarību starp daudzfaktoru regresijas modeli un mērījumiem, proti 80 % rezultātu var tikt izskaidroti ar izmantoto daudzfaktoru regresijas modeli.



3.2. att. Aprēķinātais slīdēšanas laiks, izmantojot daudzfaktoru regresijas analīzi pret eksperimentāli izmērīto slīdēšanas laiku.

Izmantojot *Microsoft Excel Data Solver* datorprogrammas nodrošinājumu, empīriskam prognozēšanas modelim statistiskais nozīmīgums tika novērtēts ar dispersijas analīzes metodi (*ANOVA (Analysis of Variance)*), veicot nulles hipotēzes pārbaudi pie noteiktas varbūtības – 95 %. Prognozēšanas modelim statistiskās nozīmības pārbaudi veic pēc determinācijas koeficienta nozīmības pārbaudes, izvirzot nulles hipotēzi, ka  $R^2 = 0$ . Ja regresijas vienādojumam pēc Fišera kritērija  $F$  testa,  $p$ -vērtība (nozīmības līmeņa faktiskā vērtība), jeb varbūtība, ka nulles hipotēze regresijas modelī nevar tikt noraidīta, nesasniedz 0,05, tad izstrādātais regresijas modelis ir statistiski nozīmīgs, jeb ar 95 % varbūtību var pieņemt, ka regresijas vienādojums ir statistiski nozīmīgs [61,93,94].  $P$ -vērtība daudzfaktoru regresijas modelim tika aprēķināta 0,004 (skat. 6. pielikumu (*significance F*)), kas liecina par to, ka izstrādātais modelis ir statistiski nozīmīgs (rezultāts nav attiecināms uz nejaušību).

Lai gan prognozēšanas modelim  $p$ -vērtība norādīja, ka izstrādātais modelis ir statistiski nozīmīgs,  $p$ -vērtības atsevišķiem neatkarīgajiem mainīgajiem, lielākajā daļā gadījumu, tika iegūtas lielākas par 0,05 (skat. 6. pielikumu ( $P$ -value)). Tas lineārās regresijas gadījumā norādītu uz to, ka attiecīgie neatkarīgie mainīgie nav statistiski nozīmīgi. Tas tiek skaidrots ar multikolinearitāti starp mainīgajiem, proti, starp mainīgajiem pastāv korelācija. Tomēr, ņemot vērā, ka izstrādātais daudzfaktoru regresijas modelis iekļauj polinomālas sakarības, tā neatkarīgie mainīgie korelē savā starpā (piemēram,  $T_{gais}$  un  $T_{gais}^2$ ), līdz ar to multikolinearitāte pastāvēs. Tā kā primārais mērķis modelim ir prognozēt slīdēšanu raksturojošu parametru atkarībā no vides apstākļiem un, šajā gadījumā, nav nepieciešamība izprast katra neatkarīgā mainīgā ietekmi neatkarīgi, multikolinearitāti nav nepieciešams novērst, jo tā neietekmē prognozēšanu, precizitāti, atbilstību [95,96].

Regresijas modeļa standartnovirze, kas parāda regresijas modeļa analīzes precizitāti – jo mazāka iegūtā vērtība, jo regresijas modelis ir precīzāks, tika iegūta – 0,009. Regresijas modeļa standartnovirze ir absolūts parametrs, kas parāda vidējo attālumu, kādā datu punkti atrodas no regresijas līnijas [61]:

$$\sigma_{reg} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_{apr.} - y_{izm.})^2}{n - p - 1}. \quad (3.11.)$$

3.2. tabula

Daudzfaktoru regresijas modeļa atbilstības pārbaudes kritēriju skaitliskās vērtības

Korelācijas koeficients $r$	Determinācijas koeficients $R^2$	Koriģētais determinācijas koeficients $\bar{R}^2$	Regresijas modeļa standartnovirze $\sigma_{reg}$	$p$ -vērtība
0,94	0,89	0,80	0,009	0,004

Veicot prognozēšanas modeļa atbilstības pārbaudi, var secināt, ka, izmantojot ar daudzfaktoru regresijas analīzes palīdzību iegūto vienādojumu, tika iegūta cieša lineāra sakarība starp aprēķinātajām slīdēšanas laika vērtībām un izmērītajām slīdēšanas laika vērtībām. Apskatītais gadījumu skaits ir pietiekams, lai korelācija būtu ticama. Koriģētais determinācijas koeficients norāda, ka 80 % gadījumu var tikt izskaidroti ar iegūto regresijas

vienādojumu. Regresijas vienādojuma standartnovirze tika iegūta 0,009. Atbilstības pārbaudes kritēriji izstrādātajam prognozēšanas modelim apkopoti 3.2. tabulā.

3.3. tabula

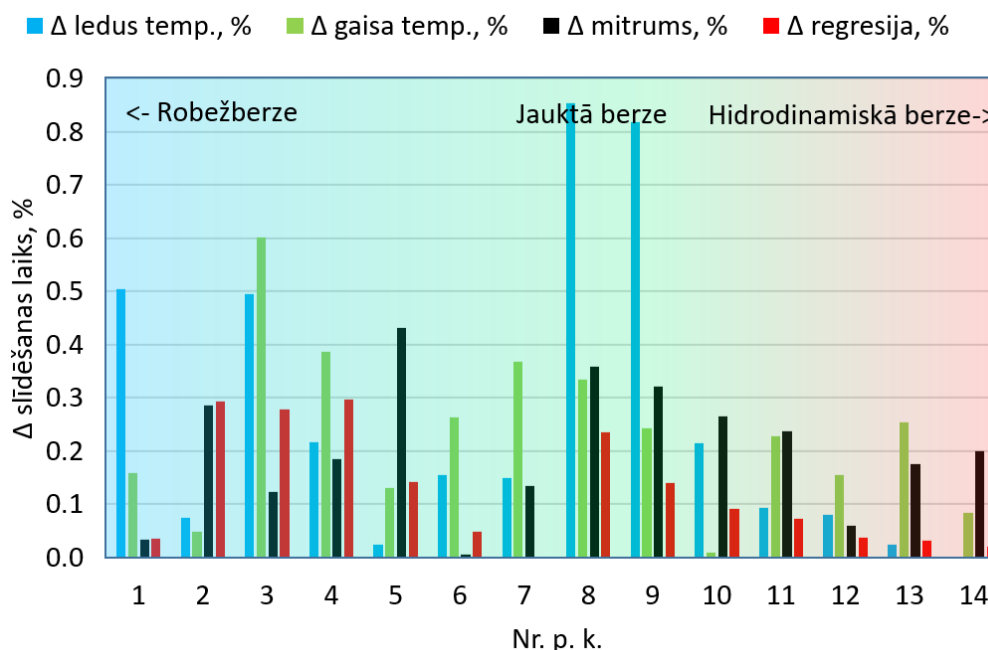
Ar regresijas analīzi prognozētā slīdēšanas laika salīdzinājums ar izmērīto

Eksperiments	Izmērītais slīdēšanas laiks, s	Aprēķinātais slīdēšanas laiks, izmantojot (3.7.), s	$\Delta$ Slīdēšanas laiks, s	$\Delta$ Slīdēšanas laiks, %
1	3,991	3,988	0,004	0,09
2	3,982	3,988	0,006	0,14
3	3,981	3,990	0,009	0,24
4	4,002	4,001	0,001	0,03
5	3,997	3,998	0,001	0,04
6	3,995	3,998	0,003	0,07
7	4,003	4,002	0,001	0,02
8	4,025	4,019	0,006	0,14
9	4,005	4,005	0,000	0,00
10	4,009	4,011	0,002	0,05
11	4,038	4,050	0,012	0,29
12	4,043	4,043	0,000	0,03
13	4,026	4,014	0,012	0,30
14	4,035	4,024	0,011	0,28
Vidējā kļūda			0,005	<b>0,12</b>
Lielākā kļūda			0,012	<b>0,30</b>

Izmantojot (3.7.) formulu, tika aprēķināts slīdēšanas laiks (skat. 3.3. tabulu). Pēc iegūtajiem datiem, var secināt, ka vidējā absolūtā prognozēšanas procentuālā kļūda, izmantojot daudzfaktoru regresijas analīzi, ir par 40 % mazāka, kā, izmantojot relatīvā gaisa mitruma un slīdēšanas laika sakarību (0,20 % pret 0,12 %). Lielākā novērotā procentuālā kļūda ir par 29 % mazāka, kā, izmantojot relatīvā gaisa mitruma un slīdēšanas laika sakarību (0,42 % un 0,30 %). Salīdzinājums tika veikts ar relatīvā gaisa mitruma un slīdēšanas laika sakarību, jo tā uzrādīja mazākās kļūdas, ja tiek ņemts vērā viens vides apstākļu raksturojošs parametrs.

Lai grafiski ilustrētu iegūtos datus, tika izveidots 3.3. att., un salīdzināta ar konkrētu vides parametru un ar daudzfaktoru regresijas analīzes vienādojumu iegūtā procentuālā prognozēšanas kļūda katram eksperimentam. Uz Y ass ir attēlota prognozēšanas kļūda, %, uz X ass attiecīgi eksperimenti pēc kārtas, balstoties uz berzes režīmiem (secība tāda pati, kā 2.27. att.). Var novērot, ka lielākas prognozēšanas kļūdas rodas pie jauktās berzes apstākļiem, kas ir pamatoti, ņemot vērā, ka šis teorētiski ir optimuma punkts, līdz ar to precīzi to prognozēt ir sarežģīti. Mazākā kļūda šajos apstākļos ir iegūta, izmantojot regresijas analīzi (sarkani stabiņi), kur tiek ņemti vērā visi 3 vides apstākļu parametri. Lielākā prognozēšanas kļūda jauktās berzes režīmā rodas, izmantojot ledus temperatūru, lai prognozētu slīdēšanas laiku. Tas ir tādēļ, ka šajā

režīmā ledus temperatūra ir salīdzinoši zema ( $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), ņemot vērā, ka mērīšanas diapazons ir no  $-1$  līdz  $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ , līdz ar to prognozējot slīdēšanas laiku šādos apstākļos, lielākas prognozēšanas kļūdas iespējamība ir atbilstoša. Stabilākie prognozēšanas apstākļi (ņemot vērā visas iegūtās prognozēšanas kļūdas), tika novēroti pie hidrodinamiskā berzes režīma.



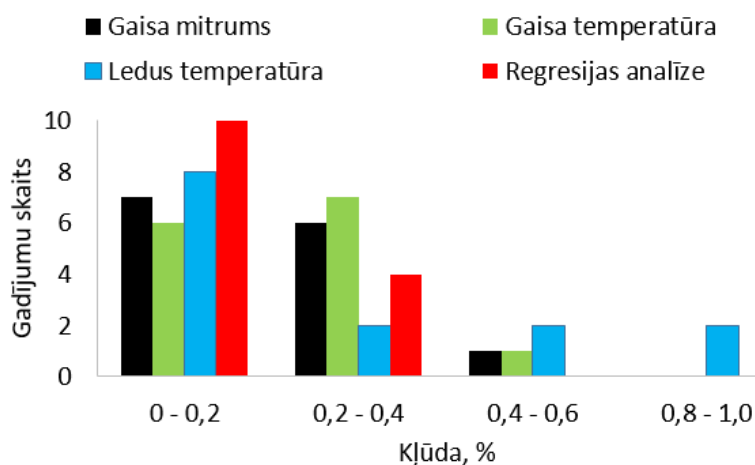
3.3. att. Prognozēšanas kļūdu salīdzinājums katram eksperimentam, prognozējot slīdēšanas laiku, izmantojot katru vides apstākļu parametru atsevišķi un, izmantojot regresijas analīzi. *Dati sakārtoti pēc 2.27. att. analogijas.*

Lai pilnvērtīgāk salīdzinātu datus, tika izveidota histogramma (skat. 3.4. att.), kur tika salīdzināts ar relatīvo gaisa mitrumu, ledus temperatūru, gaisa temperatūru un daudzfaktoru regresijas analīzi iegūto rezultātu gadījumu skaits konkrētās kļūdas robežās – intervālos (dati ņemti no 3.1. un 3.3. tabulām). Intervālu skaits tika izvēlēts pēc formulas [61]:

$$I_{sk} = 2n^{1/3}. \quad (3.12.)$$

Pēc histogrammas datiem redzams, ka lielākais gadījumu skaits zem 0,2 % kļūdas robežām ir iegūts ar daudzfaktoru regresijas analīzes palīdzību (10), vismazākais gadījumu skaits ar gaisa temperatūras un slīdēšanas laika aprakstošo vienādojumu (6). Kļūdas robežās no 0,2 līdz 0,4 %, lielākais gadījumu skaits tika novērots ar gaisa temperatūras un slīdēšanas laika aprakstošo vienādojumu (7), mazākais ar ledus temperatūras un slīdēšanas laika aprakstošo vienādojumu (2). Ar daudzfaktoru regresijas analīzes palīdzību iegūtais gadījumu skaits ir līdz 0,4 % kļūdas robežās. Ar viena vides apstākļu aprakstoša parametra palīdzību, ir novērojams vismaz viens gadījumu skaits kļūdas robežās no 0,4 līdz 0,6 %. Izmantojot ledus temperatūras un slīdēšanas laika aprakstošo vienādojumu, ir novērojams, ka divi gadījumi pārsniedz 0,8 % kļūdas robežas. Intervālā no 0,6 līdz 0,8 % netika fiksēts neviens gadījums, tādēļ tas nav attēlots 3.4. attēlā. Lielāks, iegūto gadījumu skaits pie mazākas prognozēšanas kļūdas procentos, izmantojot

daudzfaktoru regresijas analīzi, vēlreiz norāda uz prognozēšanas modeļa, iekļaujot 3 parametrus (gaisa un ledus temperatūru, relatīvo gaisa mitrumu), augstāku prognozēšanas precizitāti, kā izmantojot vienu vides apstākļu parametru.



3.4. att. Prognozēšanas kļūdu histogramma, izmantojot katru vides apstākļu parametru atsevišķi un daudzfaktoru regresijas analīzi.

Lai noteiktu, kurš no vides apstākļu parametriem potenciāli ir nozīmīgāks, prognozējot kopējo slīdēšanas laiku, izmantojot daudzfaktoru regresijas analīzi, tika veikta regresijas koeficientu standartizācija. Regresijas koeficientu standartizāciju izmanto, ja viena regresijas vienādojuma koeficienti nav savstarpēji salīdzināmi (tie ir dažādi, ar dažādām mērvienībām). Izmantojot regresijas koeficientu standartizāciju, visi mainīgie tiek izteikti standartnovirzēs no aritmētiskā vidējā [93]:

$$\frac{x_1 - \bar{x}_1}{\sigma_1}, \frac{x_2 - \bar{x}_2}{\sigma_2}, \dots, \frac{x_k - \bar{x}_k}{\sigma_k}. \quad (3.13.)$$

Rezultātā tika iegūts sekojošs vienādojums:

$$\begin{aligned} T_{ks(stand)} = & 2,2 \cdot 10^{-14} + 1 \cdot T_{gais(stand)} - 0,9 \cdot T_{ledus(stand)} + 1,3 \\ & \cdot T_{gais(stand)} \cdot T_{ledus(stand)} - 0,09 \cdot T_{gais(stand)}^2 - 0,9 \\ & \cdot T_{ledus(stand)}^2 - 0,6 \cdot RH(stand). \end{aligned} \quad (3.14.)$$

Šajā gadījumā regresijas koeficienti var tikt salīdzināti savā starpā, lai iegūtu vispārēju iespaidu par parametru ietekmi (jo lielāks koeficients, jo lielāka ietekme). Pēc koeficientu vērtībām, var secināt, ka mazākā ietekme ir gaisa mitrumam (0,6), tiesa standartizētais regresijas koeficients gaisa mitrumam nav ievērojami zemāks, kā, piemēram, ledus vai gaisa temperatūrām (0,9; 1), līdz ar to, šajā gadījumā, nevar izslēgt kādu konkrētu parametru no regresijas vienādojuma. Iegūtais rezultāts norāda uz to, ka visi 3 parametri ir nozīmīgi, lai skaidrotu vides apstākļu ietekmi uz slīdēšanas laiku.

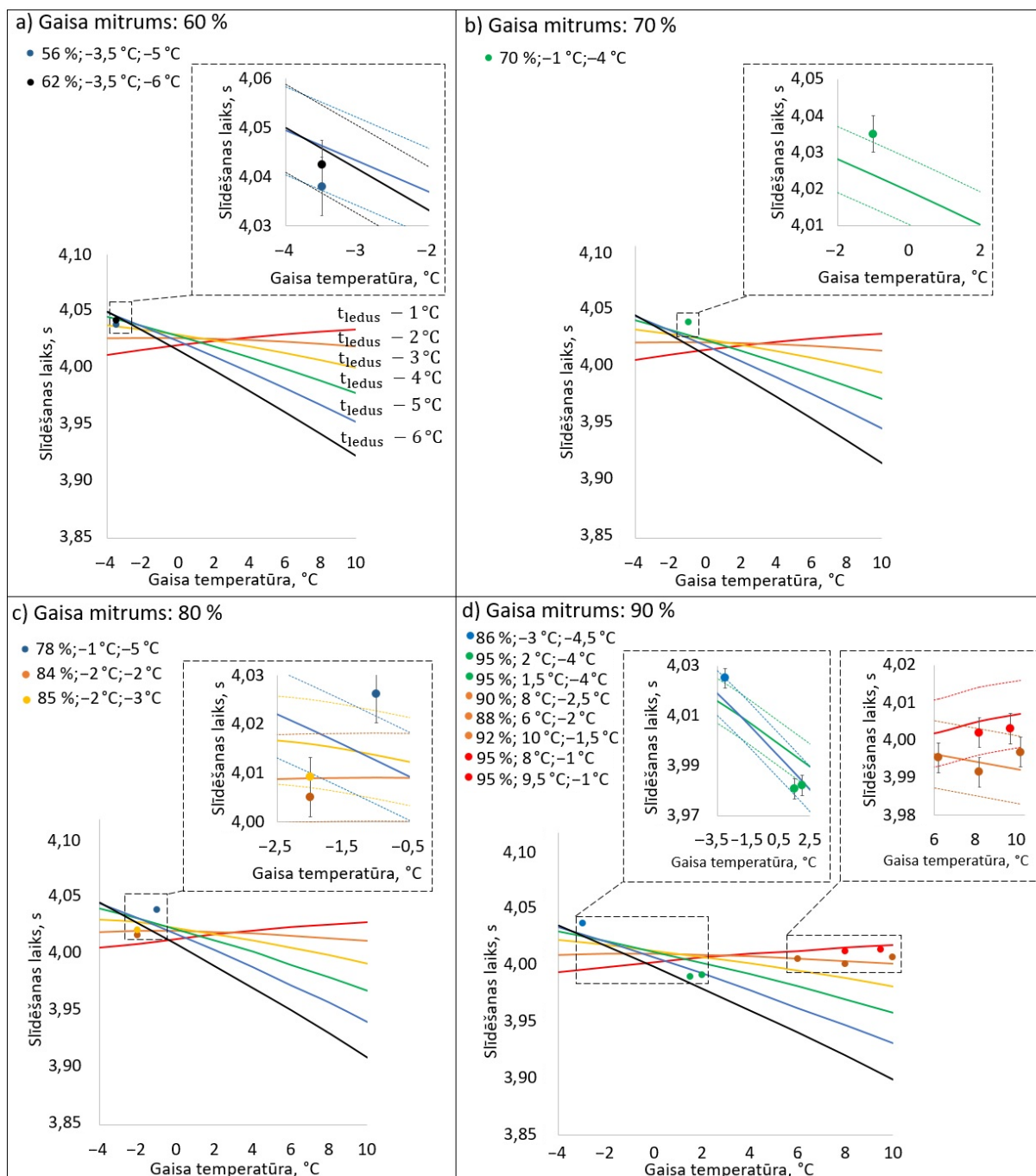
Lai arī šādai koeficientu standartizācijai ir trūkumi, proti, var rasties novirzes konkrētas izlases kļūdu dēļ, kad mainīgie tiek standartizēti, izmantojot vidējos lielumus un standarta novirzes katram mainīgajam, it īpaši, ja izlase ir maza [97,98]. Tā kā šajā gadījumā, izmantojot



koeficientu standartizāciju, mērķis bija saprast vai ir kāds vides parametrs, ko var neņemt vērā, tad šīs metodes izmantošana tika novērtēta kā pietiekami precīza un vienkārša, lai šo mērķi sasniegtu.

Eksperimentālo datu salīdzināšanai ar teorētiski aprēķinātajiem datiem, izmantojot daudzfaktoru regresijas analīzes modeli, tika izveidots 3.5. attēls. Tas ir sadalīts 4 daļās, balstoties uz gaisa mitrumu (relatīvais gaisa mitrums no 60 – 90 %). Izmantojot iegūto prognozēšanas modeli (3.7.), tika aprēķinātas teorētiskās slīdēšanas laika līknes pie sešām ledus temperatūrām (no –1 līdz –6 °C) pie norādītā relatīvā gaisa mitruma un gaisa temperatūras diapazona (no –4 līdz +10 °C). Attiecīgi iegūtie eksperimentu rezultāti (punkti grafikos) tika analizēti, atbilstoši norādītajiem vides apstākļiem. Punktu atšifrējums pie palielinājuma norāda uz eksperimentos izmērītajiem vides apstākļiem, secībā: relatīvais gaisa mitrums, gaisa temperatūra, ledus temperatūra. Palielinājums katram grafikam paredzēts, lai apskatītu katru eksperimentāli iegūto rezultātu ar tam atbilstošu aprēķināto līkni. Raustītās tievākās līnijas norāda regresijas modeļa standartnovirzes robežas ( $\pm 0,009$ ).

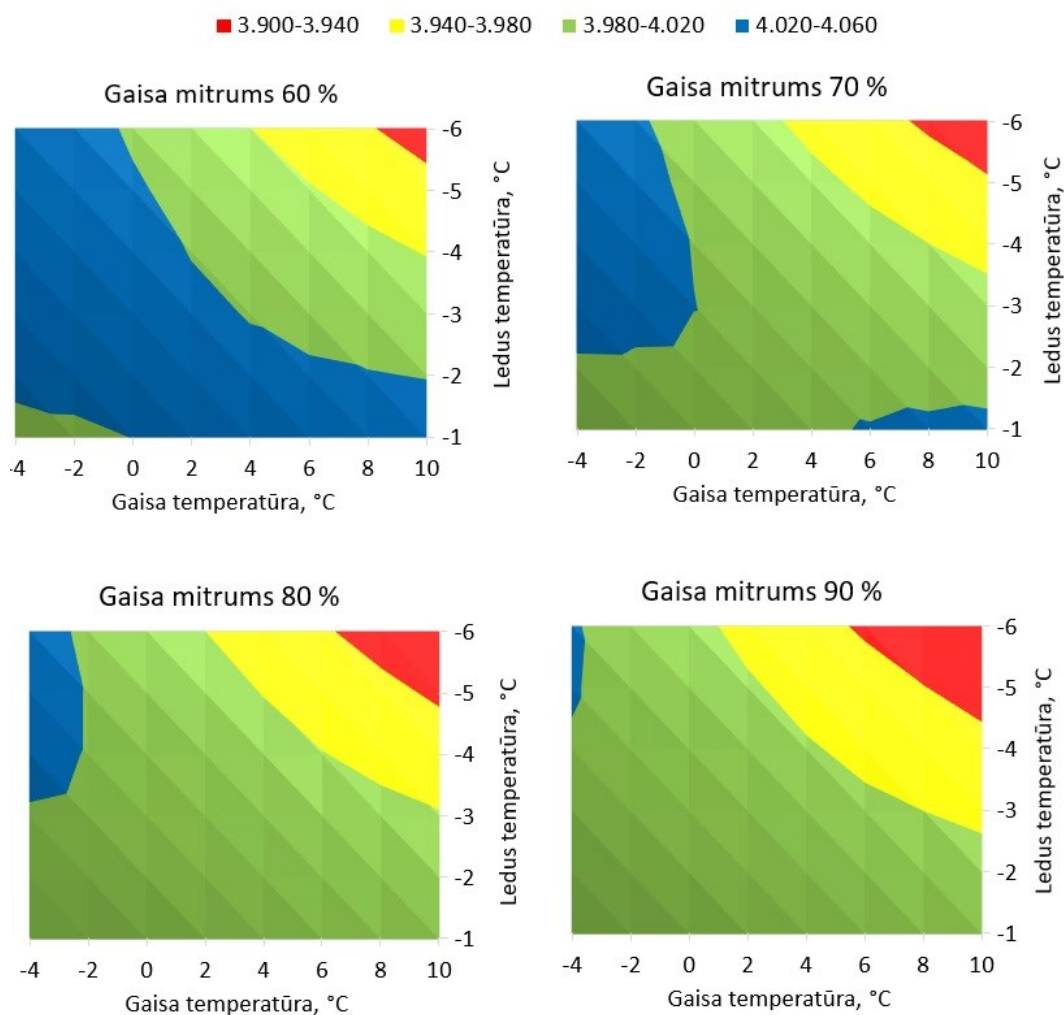
Pēc 3.5. attēla datiem, var secināt, ka eksperimentāli iegūtie slīdēšanas laika rezultāti, regresijas modeļa standartnovirzes un eksperimentāli iegūto punktu standartnovirzes robežās, atbilst teorētiski aprēķinātajam slīdēšanas laikam, izmantojot prognozēšanas modeli, balstītu uz daudzfaktoru regresijas analīzi. Tas norāda uz to, ka teorētiskais modelis, var tikt izmantots, lai prognozētu slīdēšanu raksturojošus parametrus, atkarībā no vides apstākļiem (gaisa, ledus temperatūras, relatīvā gaisa mitruma). Lai arī eksperimentāli iegūtie punkti standartnovirzes robežās atbilst aprēķinātajai līknei, tomēr ir novērojamas zināmas neprecizitātes (zaļais punkts pie 70 % gaisa mitruma; zilais punkts pie 80 % gaisa mitruma; zaļie punkti pie 90 % gaisa mitruma). Tās var tikt skaidrotas ar to, ka teorētiskās līknes ir aprēķinātas pie konkrēta gaisa mitruma, taču eksperimentālie punkti ir iegūti pie nedaudz atšķirīgiem apstākļiem. Papildus, ņemot vērā, ka reālu apstākļu eksperimenti ir pakļauti vides apstākļu izmaiņām eksperimentu gaitā un izmantotajiem mēraparātiem ir pietiekami liela ražotāja noteiktā kļūda, iespējamās neprecizitātes eksperimentālo punktu vides apstākļu mērījumiem. Iespējams, ka būtu jāveic papildus eksperimentu, lai uzlabotu prognozēšanas modeli un attiecīgi teorētiskās līknes.



3.5. att. Aprēķinātā slīdēšanas laika salīdzinājums ar eksperimentāli iegūto slīdēšanas laiku: a) pie relatīvā gaisa mitruma 60%; b) pie relatīvā gaisa mitruma 70%; c) pie relatīvā gaisa mitruma 80%; d) pie relatīvā gaisa mitruma 90%. *Norādītās teorētiski aprēķinātās ledus temperatūras a) atbilst arī b), c), d).*

Tā kā visi 3 vides apstākļu parametri ir ar nozīmīgu ietekmi uz slīdēšanas laika prognozēšanu, tika izveidota slīdēšanas laika karte (skat. 3.6. att.), kas vispārināti parāda, kā savstarpēji parametri mijiedarbojoties, veidojas ātrākas vai lēnākas slīdēšanas zonas, atkarībā no vides apstākļiem. Zinot vides apstākļus, balstoties uz slīdēšanas laika karti, var primāri noteikt vai slīdēšana pa ledu būs ātrāka vai lēnāka. Attēlā sarkanā, dzeltenā zona apzīmē ātrāku slīdēšanu pa ledu (zemāks slīdēšanas laiks), zaļo var uzskatīt par nosacīti vidēju

slīdēšanas ātruma zonu un zilā norāda uz lēnāko zonu. Iegūtās skaitliskās vērtības katrai zonu kartei ir norādītas 3. pielikumā.



3.6. att. Slīdēšanas apstākļu zonu karte, izmantojot regresijas analīzi. Sarkans – ātrākie slīdēšanas apstākļi, dzeltens – vidēji ātri apstākļi, zaļš – vidēji apstākļi, zili – lēnākie apstākļi.

Pēc 3.6. attēla, var novērot, ka palielinoties gaisa mitrumam, slīdēšanas ātrums palielinās. Ledus un gaisa temperatūrai mijiedarbojoties, ātrākais slīdēšanas ātrums var tikt prognozētas pie nosacīti siltākas gaisa temperatūras un aukstākas ledus temperatūras.

Lai arī modelis atļauj prognozēt rezultātu jebkādos apstākļos, tomēr ātrākie rezultāti (sarkanā zona 3.6. att. un ātrākās līknes 3.5. att.) ir jāapskata ar zināmu piesardzību, jo eksperimentos nebija apstākļi, kad ir augsta gaisa temperatūra un zema ledus temperatūra (arī reālos apstākļos šāds gadījums var būt ar mazu iespējamību), līdz ar to apgalvot, ka šādi apstākļi dos ātrākos rezultātus nav droši. Tādēļ, prognozējot slīdēšanas laiku pie konkrētiem apstākļiem, visticamāk, tas neparādīsies sarkanajā zonā 3.6. att., vai arī pie silto gaisa temperatūru un auksto ledus temperatūru zonas 3.5. att.

Lai arī regresijas modelis teorētiski var darboties plašā vides apstākļu diapazonā, tomēr ticamai rezultātu iegūšanai, vides apstākļiem jābūt sekojošās robežās: ledus temperatūra no  $-6$  līdz  $-1$  °C; gaisa temperatūra no  $-4$  līdz  $10$  °C un gaisa mitrumam 50 līdz 100 %. Tāpat var rasties neprecizitātes, ja gaisa temperatūra ir robežās no aptuveni 5 līdz  $10$  °C un ledus

temperatūra ir zemāka par  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Prognozēšanas modeļa robežas sastādītas, pamatojoties uz veikto eksperimentu datiem.

### 3.3. Slīdēšanas laika mērīšanas un prognozēšanas metodikas izstrāde

Izstrādāta *Berzes pāra nerūsējošais tērauds-ledus slīdēšanu raksturojošu parametru mērīšanas un prognozēšanas metodika reālu apstākļu eksperimentu režīmā* pievienota 11. pielikumā.

Mērīšanas un prognozēšanas metodika paredzēta eksperimentālā parauga slīdēšanas raksturojoša parametra, slīdēšanas laiks,  $s$ , kā arī vides apstākļu – relatīvais gaisa mitrums, %, gaisa temperatūra,  $^{\circ}\text{C}$ , ledus temperatūra,  $^{\circ}\text{C}$ , mērīšanai, un prognozēšanas modeļa, kas prognozē slīdēšanas laiku atkarībā no vides apstākļiem, izstrādei, reālu apstākļu eksperimentu režīmā.

Slīdēšanas laika parametra  $T_{ks}$ ,  $s$ , kas raksturo parauga slīdēšanu pa ledu atkarībā no vides apstākļiem, prognozēšanas metodika paredzēta izmantot ar ledu saistītās izpētes sfērās. Iespējams, līdzīgā veidā, izmantojot metodiku, var iegūt sakarības, pētot parauga slīdēšanu pa sniegu [15,38].

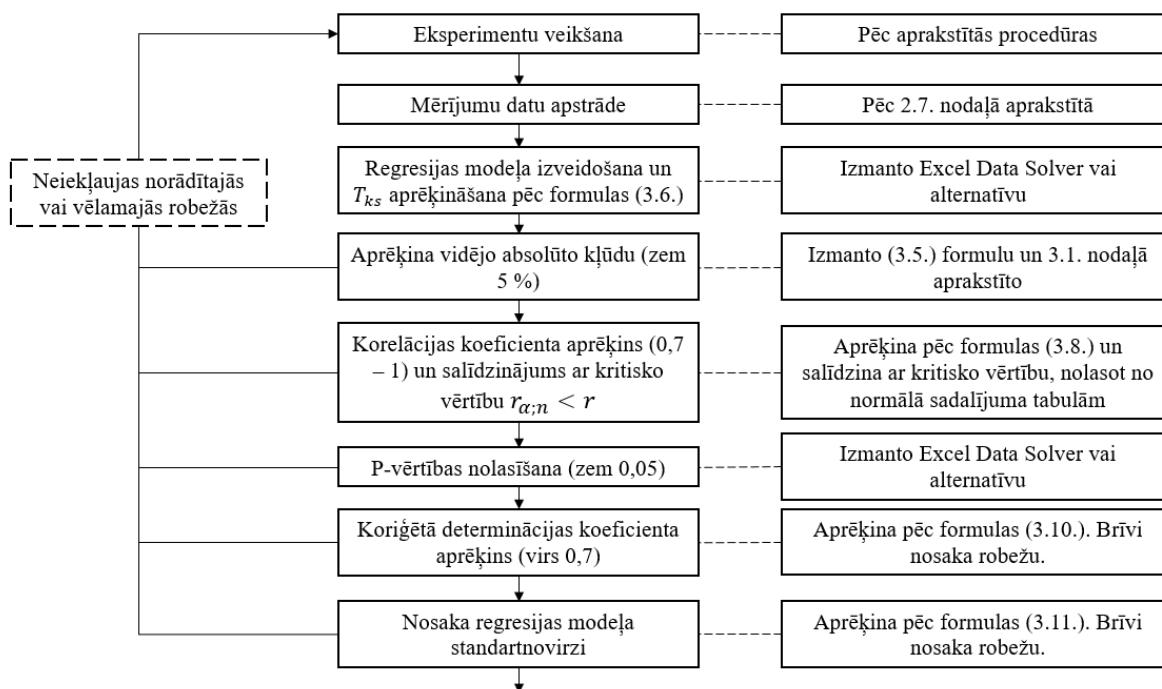
#### **Eksperimentālie un teorētiskie pētījumi**

Eksperimentālo datu ievākšanai, tika izmantota kvantitatīvā mērīšanas metode. Veicot tiešos slīdēšanas laika mērījumus ar optisko sensoru palīdzību, iegūst berzes pāra nerūsējošais tērauds-ledus slīdēšanas raksturojošu parametru – slīdēšanas laiks,  $s$ . Ja nepieciešams, netieši var iegūt praksē biežāk izmantotu parametru – berzes koeficientu, taču var rasties netiešajiem mērījumiem raksturīgas kļūdas.

Lai eksperimentāli iegūtie dati būtu izmantojami prognozēšanas metodikas izstrādē, tika izstrādāta slīdēšanas laika mērīšanas procedūra. Tā iekļauj nepieciešamos līdzekļus un aprīkojumu, eksperimentu veikšanas algoritmu (skat. 2.23. – 2.25. att.) un prasības eksperimentālo mērījumu precizitātei (skat. 2.6. *Reālu apstākļu eksperimentu procedūra*). Tālāk parametra  $T_{ks}$  prognozēšanas metodikas izstrādē tiek pieņemts, ka eksperimentālie pētījumi ir veikti atbilstoši mērīšanas procedūrai un iegūtie slīdēšanas laika mērījumu rezultāti iekļaujas izvirzītajos kritērijos. Tiek veikts noteikts skaits slīdēšanas laika mērījumu pie dažādiem vides apstākļiem. Precīzu sākotnējo eksperimentu skaitu definēt ir sarežģīti, taču pēc autora iegūtās pieredzes, vēlams būtu veikt vismaz 10 eksperimentus pie dažādiem vides apstākļiem.

Pēc veiktajiem eksperimentālajiem pētījumiem, veic iegūto datu apstrādi atbilstoši 2.7. *Vides apstākļu ietekme uz slīdēšanas laiku*, teorētiskā prognozēšanas modeļa izstrādi un atbilstības pārbaudi. Iegūto slīdēšanas laika mērījumu un vides apstākļu mērījumu dati tiek apstrādi atbilstoši 2.7. *Vides apstākļu ietekme uz slīdēšanas laiku* un 2.6. *Reālu apstākļu eksperimentu procedūra* nodaļās aprakstītajam.

Datu apstrādē tika izmantotas statistikas metodes: aprakstošā/ deskriptīvā statistika, prognozēšanas modeļa izstrādē tika izmantota sakarību noteikšanas secinošā statistikas metode – daudzfaktoru regresijas analīze un korelācijas analīze.



3.7. att. Prognozēšanas modeļa izstrādes un atbilstības pārbaudes algoritms.

Slidēšanas laika parametra  $T_{ks}$ , kas raksturo parauga slidēšanu pa ledu atkarībā no vides apstākļiem, aprēķināšanas un atbilstības pārbaudes algoritms (skat. 3.7. att.) pa soļiem ir sekojošs:

1. Parametra  $T_{ks}$  aprēķināšanai tiek veidots daudzfaktoru regresijas modelis pēc (3.6.) formulas. Lai aprēķinātu regresijas koeficientus –  $b_0; b_1; b_2; b_3; b_4; b_5; b_6$ , tiek izmantots *Microsoft Excel Data Solver*, taču var veiksmīgi tikt izmantotas arī citas statistikas programmas, piemēram, *MatLab*, *MiniTab*, u.c.
2. Aprēķinātās vērtības salīdzina ar izmērītājām, aprēķinot vidējo absolūto procentuālo kļūdu pēc (3.5.) formulas un informācijas 3.1. nodaļā. Lai arī zināmajā literatūrā vidējā absolūtā procentuālā kļūda zem 10 % tiek uzskatīta ar augstu aproksimācijas precizitāti [99], tomēr, tā kā, tā ir tieši atkarīga no mērāmā parametra vērtības, augstas aproksimācijas precizitātes robežas ir jāapskata ar zināmu piesardzību [92]. Ja tiek mērīts slidēšanas laiks pēc izstrādātās metodikas, autors rekomendē vidējās absolūtās procentuālās kļūdas robežu samazināt vismaz 2 reizes.
3. Vispārējai sakarības novērtēšanai, primāri tiek izmantots korelācijas koeficients  $r$  (robežās no  $-1$  līdz  $1$ ), kas raksturo lineāras sakarības ciešuma pakāpi pēc (3.8.) formulas. Attiecīgi,  $|r|$  robežās no  $0,7$  līdz  $1$  norāda uz ciešu sakarību,  $|r|$  robežās no  $0,5$  līdz  $0,69$  uz vidēju, un, ja  $|r|$  ir zem  $0,5$ , tad uz vāju/ nenožīmīgu sakarību.
4. Lai pārlicinātos, ka iegūtais korelācijas koeficients var tikt izmantots atkarības vērtēšanai, tas jāsalīdzina ar kritisko vērtību  $r_{\alpha;n}$  (nolasa no normālā sadalījuma tabulām, nosakot korelācijas koeficienta kritisko vērtību, atkarībā no gadījumu skaita [56]). Korelācija ir ticama, ja  $r_{\alpha;n} < r$ . Tādējādi ir iespējams saprast, vai veikto eksperimentālo mērījumu skaits ir pietiekams.

5. Izmantojot iegūto dispersijas analīzi, nosaka  $P$ -vērtību (no angļu val. *significance F*) daudzfaktoru regresijas modelim, lai novērtētu, vai izstrādātais modelis ir statistiski nozīmīgs (rezultāts nav attiecināms uz nejaušību). Ja  $P$ -vērtība ir mazāka par 0,05, izstrādātais modelis ir statistiski nozīmīgs.
6. Tiek aprēķināts koriģētais determinācijas koeficients  $\bar{R}^2$  pēc formulas (3.10.), lai novērtētu cik eksperimentālos mērījumus procentuāli, ar iegūto teorētisko prognozēšanas modeli var izskaidrot. Determinācijas koeficienta (robežās no 0 līdz 1) pieļaujamā vērtība, kas norāda uz, konkrētā gadījumā, ciešu sakarību zināmajā literatūrā nav stingri definēta, līdz ar to pieļaujamā robeža var tikt brīvi izvēlēta. Autors uzskata, ka tai ir jābūt lielākai par 0,7.
7. Regresijas modeļa standartnovirze, kas parāda regresijas modeļa analīzes precizitāti, tiek aprēķināta pēc formulas (3.11.). Regresijas modeļa standartnovirze parāda vidējo attālumu, kādā datu punkti atrodas no regresijas līnijas. Arī šajā gadījumā apmierinošs regresijas modeļa standartnovirzes lielums, tiek brīvi izvēlēts.

Ja kādā no aprakstītajiem soļiem neizpildās noteiktās vai vēlamās prasības, tiek veikti papildus eksperimentālie mērījumi, vēlams pie citiem vides apstākļiem, pēc aprakstītās reālu apstākļu eksperimentu veikšanas procedūras un modificēts prognozēšanas modelis.

Ņemot vērā, ka prognozēšanas metodikas izstrādei ir nepieciešams noteikts skaits precīzi veiktu eksperimentālu mērījumu (saskaņā ar 2.6. *Reālu apstākļu eksperimentu procedūra* nodaļā aprakstīto procedūru), prognozēšanas metodikas aprēķina un atbilstības pārbaudes piemērs var tikt apskatīts 11. pielikumā.

### **Metodikas vērtējums**

Izstrādātā slīdēšanas laika mērīšanas un prognozēšanas metodika atkarībā no vides parametriem (gaisa mitrums, gaisa un ledus temperatūra), ir balstīta uz eksperimentāliem mērījumiem, aprakstot slīdēšanas laika mērīšanas procedūru reālu apstākļu eksperimentu režīmā. Tiek aprēķināts prognozēšanas parametrs  $T_{ks}$ , kas raksturo parauga slīdēšanu pa ledu atkarībā no vides apstākļiem, izmantojot daudzfaktoru regresijas analīzi un veikts regresijas modeļa novērtējums.

Tika izmantoti vides apstākļu mēraparāti ar zināmu mēraparāta pamatklūdu (skat. 2.2. tabulu), kas lielā mērā ietekmē mērījumu absolūto klūdu. Līdz ar to, izmantojot precīzākus mēraparātus, pieļaujamo absolūto klūdu robežas vides apstākļu mērījumiem tiktu samazinātas.

Metodika reālu apstākļu eksperimentu režīmā prasa pietiekami specifisku tehnisko nodrošinājumu, kas, var tikt modificēts pēc vajadzībām. Nodaļā 2.6. *Reālu apstākļu eksperimenta procedūra* tika aprakstīts par iespēju izstrādāt iekārtu (patenta pieteikuma Nr. LVP2020000098), ar kuras palīdzību varētu veikt līdzīga tipa eksperimentus ne tikai estakādē, bet arī pa plakanu virsmu (piemēram, hokeja laukums). Tas attiecīgi atvieglotu eksperimentu veikšanas procedūru un varētu tikt ievākti dati pie dažādiem slīdēšanas ātrumiem. Rezultātā būtu iespējams uzlabot teorētisko slīdēšanu raksturojošu parametru prognozēšanas modeli.

## 4. PROGNOZĒŠANAS MODEĻA APROBĀCIJA UN TĀLĀKĀS IZPĒTES VIRZIENI

Slīdēšanu raksturojošu parametru prognozēšanas modelis tika aprobēts Latvijas skeletoņa komandas treniņos un salīdzināts ar skeletoņa sacensību rezultātiem sievietu un vīriešu ieskaitē.

Iegūti pirmie rezultāti kā vides apstākļi un virsmas raupjums ietekmē berzes koeficientu laboratorijas apstākļos.

### 4.1. Prognozēšanas modeļa aprobācija un salīdzinājums ar skeletoņa sacensību rezultātiem

#### Praktiskā aprobācija

Izstrādātais slīdēšanu raksturojošu parametru prognozēšanas modelis tika praktiski aprobēts Latvijas skeletoņa komandas treniņos Siguldas bobsleja un kamaniju trasē, kā arī starta treniņu estakādē. Modelis tika izmantots, lai prognozētu slīdēšanas laiku atkarībā no vides apstākļiem, mainot gan ledus temperatūru, gan veicot treniņus dažādās dienās. Līdz ar to, tika analizēts, kuru skeletoņa slieču pāri sportistiem izmantot pie konkrētiem vides apstākļiem. Aprobācijas atzinuma vēstuli skatīt 10. pielikumā.

#### Salīdzinājums ar skeletoņa sacensībām

Lai pārbaudītu, kā berzes pāra nerūsējošais tērauds-ledus slīdēšanas raksturojošais parametrs, kas iegūts, balstoties uz vides apstākļu likumsakarībām ( $T_{ks}$ ), korelē ar *IBSF* Pasaules kausa skeletoņa sacensībās uzrādītiem sportistu rezultātiem, tika veikts salīdzinājums.

Parametrs  $T_{ks}$  tika aprēķināts pēc (3.7.) formulas, atkarībā no vides apstākļiem sacensību norises laikā. Kā *IBSF* Pasaules kausa skeletoņa sacensību salīdzināmais rezultāts tika izvēlēts 2. brauciena 5. – 10. vietas vidējais kopējais slīdēšanas laiks. Šāds salīdzināmais rezultāts tika izvēlēts, jo 2. braucienā sportisti startē apgrieztā secībā pēc uzrādītā laika pirmajā braucienā, līdz ar to, līdzvērtīgāki sportisti veic savus braucienus viens pēc otra (īsākā laika periodā). Tas savukārt nodrošina līdzvērtīgāku trases kvalitāti un vides apstākļus. Vidējā slīdēšanas laika aprēķināšanai tika izvēlēti rezultāti no 5. līdz 10. vietai. Tas tika darīts tādēļ, ka šādā veidā tiek iegūta mazāka standartnovirze starp slīdēšanas laika rezultātiem (stabilākie slīdēšanas laiki). Dažkārt skeletoņa sacensībās gadās, ka līderi, iespējams, citu faktoru dēļ (meistarība konkrētā trasē, veiksmīgi izvēlētas slieces u.c.) uzrāda krietni ātrākus rezultātus, kā pārējie, līdz ar to vidējais slīdēšanas laiks samazinās, bet standartnovirze palielinās. Savukārt, braucēji, kas finišē zemāk kā 10. vietā, mēdz uzrādīt dažādu faktoru dēļ (kļūdas trasē, neveiksmīgi izvēlētas slieces u.c.), lēnākus rezultātus, kas attiecīgi atkal palielina standartnovirzes vērtības. Sacensību rezultātu slīdēšanas laika standartnovirze aprēķināta pēc (2.1.) formulas.

*IBSF* Pasaules kausa skeletoņa sacensību rezultāti tika iegūti no 3 pēdējiem posmiem Siguldas bobsleja un skeletoņa sacensību trasē. Tas tika darīts tādēļ, ka pēdējie 3 posmi iekļaujas viena gada intervālā un netika novērots sniegs vai lietus, kas ietekmē rezultātus. Attiecīgi tieši Siguldas trase tika izvēlēta, jo prognozēšanas modelis tika izstrādāts Siguldas

starta treniņu estakādē. Salīdzināti tika *IBSF* Pasaules kausa skeletoņa sacensību rezultāti gan vīriešu, gan sievietu ieskaitē.

Ledus un gaisa temperatūras vērtības tika pieņemtas no oficiālajiem mērījumiem pirms 2. brauciena. Relatīvais gaisa mitrums attiecīgi tika noteikts no vērtībām, kas uzrādītas meteoroloģisko novērojumu stacijā. Vides apstākļu parametri, aprēķinātais  $T_{ks}$ , un 5. – 10. vietas uzrādītais vidējais slīdēšanas laiks 2. braucienā gan sievietu, gan vīriešu *IBSF* Pasaules kausa skeletoņa sacensībās norādīts 4.1. tabulā. *IBSF* Pasaules kausa skeletoņa sacensību rezultāti Siguldā pievienoti 8. pielikumā.

4.1. tabula

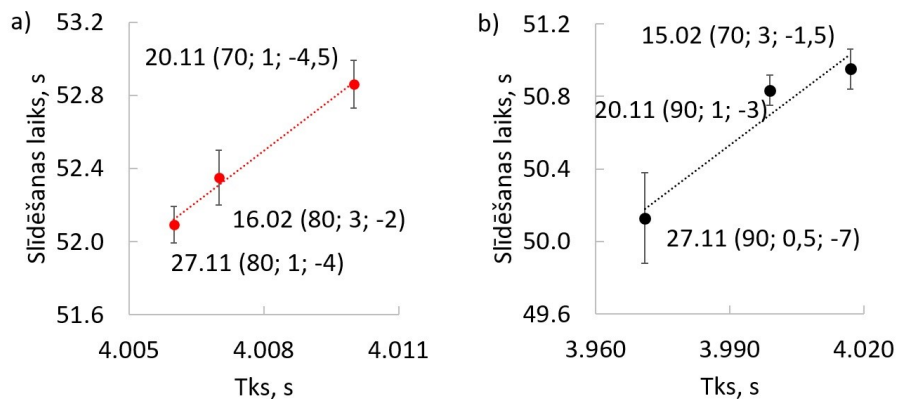
Vides apstākļi un rezultāti *IBSF* Pasaules kausa skeletoņa sacensībās Siguldā

Sieviešu skeletoņa sacensību rezultāti			
Norises datums	16.02.2020	20.11.2020	27.11.2020
Relatīvais gaisa mitrums, %	80 ±3	70 ±2	80 ±2
Gaisa temperatūra, °C	3	1	1
Ledus temperatūra, °C	-2	-4,5	-4
$T_{ks}$ (3.7.), s	4,007	4,010	4,006
5.–10. pozīcijas vidējais slīdēšanas laiks 2. braucienā	52,35 ±0,15	52,86 ±0,13	52,09 ±0,10
Vīriešu skeletoņa sacensību rezultāti			
Norises datums	15.02.2020	20.11.2020	27.11.2020
Relatīvais gaisa mitrums, %	70 ±5	90 ±3	90 ±2
Gaisa temperatūra, °C	3	1	0,5
Ledus temperatūra, °C	-1,5	-3	-7
$T_{ks}$ (3.7.), s	4,017	3,999	3,971
5.–10. pozīcijas vidējais slīdēšanas laiks 2. braucienā	50,95 ±0,11	50,83 ±0,08	50,13 ±0,25

Datu salīdzināšanai, tika izveidots 4.1. attēls, kur uz X ass ir norādīta aprēķinātā  $T_{ks}$  vērtība un uz Y ass 5. – 10. pozīcijas vidējais slīdēšanas laiks 2. braucienā: a) sievietu sacensību rezultāti, b) vīriešu sacensību rezultāti. Skaitļi grafikos reprezentē sacensību norises datumu 2020. gadā un vides apstākļus.

Pēc 4.1. attēla datiem, var novērot lineāru sakarību starp  $T_{ks}$  un 5. – 10. pozīcijas vidējo slīdēšanas laiku gan sievietu, gan vīriešu sacensībās, proti, ja samazinās prognozētais slīdēšanas laika parametrs, atkarībā no vides apstākļiem, estakādē  $T_{ks}$ , samazinās arī sacensībās uzrādītais vidējais slīdēšanas laiks. Turklāt, norises datumi nav sakārtoti secīgi vīriešu un sievietu sacensībās, kas norāda uz atšķirībām vides apstākļos. Vīriešu sacensībās (4.1. att. b), redzams, ka 27.11.2020, izdevās uzrādīt ievērojami mazāku vidējo slīdēšanas laiku, kā 20.11.2020 (50,13 un 50,83), pie līdzīgiem gaisa vides apstākļu parametriem, taču mainījās ledus temperatūra (skat. 4.1. tabulu), kas pie nosacīti siltiem un mitriem vides apstākļiem, nodrošināja ātrāku skeletoņa slīdēšanu pa ledu. Šī ietekme ir redzama arī parametra  $T_{ks}$  salīdzinoši lielā izmaiņā (0,7 %), proti, ledus temperatūras pazemināšanās pie siltiem un mitriem vides apstākļiem, radīja ātrākus slīdēšanas apstākļus (sasauca ar tendenci 3.5. att. d).





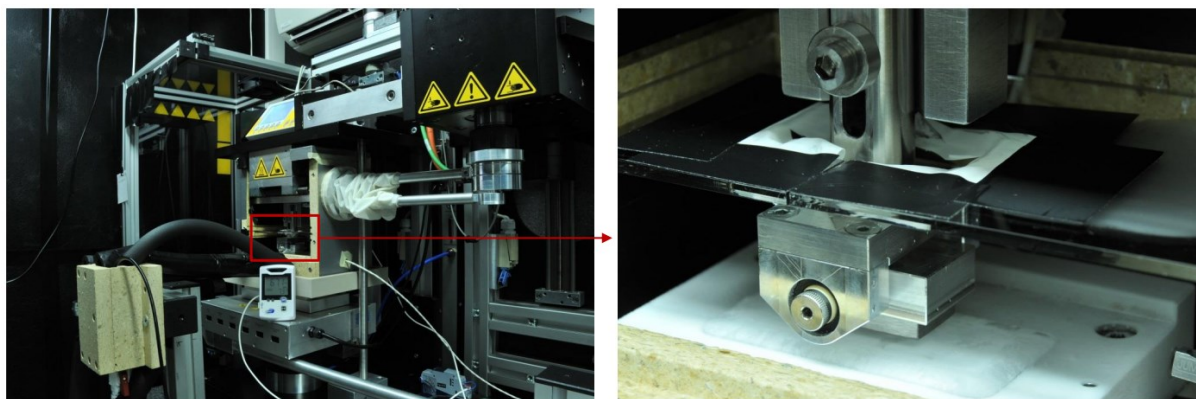
4.1. att. 2. brauciena 5.–10. pozīcijas vidējais slīdēšanas laiks pret  $T_{ks}$ : a) sieviešu sacensību rezultāti; b) vīriešu sacensību rezultāti. *Pie rezultātu punktiem pievienota sekojoša informācija: datums, iekavās (gaisa mitrums, %; gaisa temperatūra °C; ledus temperatūra °C).*

Iegūtie rezultāti, salīdzinot sacensībās sportistu uzrādītos slīdēšanas laikus ar aprēķināto parametru  $T_{ks}$ , šobrīd ir daļējs apstiprinājums, ka izveidotais prognozēšanas modelis, var tikt veiksmīgi izmantots, lai prognozētu slīdēšanas tendences atkarībā no vides apstākļiem arī reālu sacensību režīmā. Ideālā gadījumā, lai varētu prognozēt jau konkrētus slīdēšanas laikus, atkarībā no vides apstākļiem, būtu nepieciešams veikt slīdēšanas laika mērījumus trasē vairākiem sportistiem dažādos apstākļos, taču realizācijas iespējas tam ir ierobežotas.

## 4.2. Vides apstākļu un virsmas raupjuma ietekme uz berzes koeficientu laboratorijā

Vides apstākļu ietekme uz berzes pāra nerūsējošais tērauds-ledus slīdēšanas raksturojošu parametru tika pētīta, mērot kopējo slīdēšanas laiku noteiktā trases posmā, izmantojot virsmu slīdēšanu raksturojošu parametru noteikšanas mēriekārtu balstītu uz slīpās plaknes principu, reālu apstākļu eksperimentu režīmā. Lai iegūtu vispārēju iespaidu, cik liela ietekme vides apstākļu izmaiņām ir uz cita veida iegūstamo rezultātu (berzes koeficientu), tika veikti pētījumi V-Research GmbH (*Industrial Research and Development*) uzņēmumā, Austrijā ārvalstu mobilitātes ietvaros.

Pētījumiem tika izmantots lineārais tribometrs *RVM 1000 (Austrija)* ar saldēšanas kameru (skat. 4.2. att.). Līdzīga tipa iekārtas ir izmantotas citos pētījumos [9,41,45,65], tādējādi ir iespējams novērot tendences, kas visticamāk atkārtotos attiecīgi citu autoru darbos. Ar tribometru kā slīdēšanas raksturojošais parametrs, tika mērīts dinamiskais berzes koeficients.



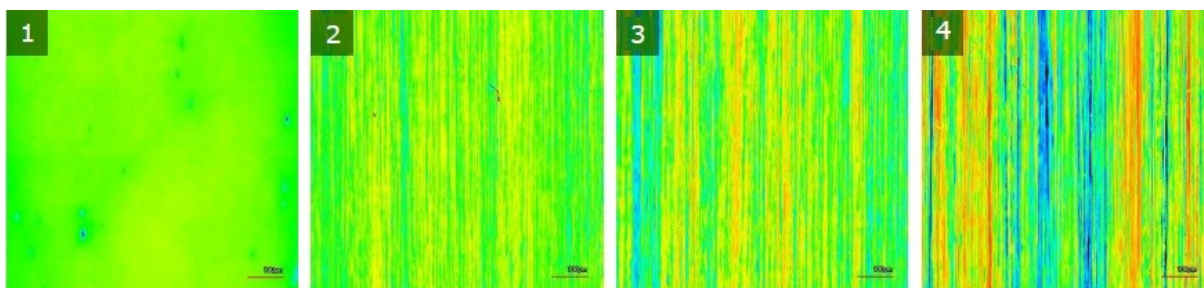
4.2. att. Eksperimentos izmantotais lineāra tipa tribometrs *RVM 1000*.

Kā eksperimentālie paraugi tika izgatavoti taisnstūrveida paralēlskaldņa paraugi ar dimensijām –  $35 \times 18 \times 14 \pm 0,1$  mm (skat. 4.3. att.). Paraugu masa –  $68 \pm 0,5$  g. Paraugi tika frēzēti un plakanslīpēti no vienas sagataves. Materiāls – nerūsējošais tērauds *Uddeholm Ramax HH* (Fe – 82 %; Cr – 13,25 %; Ni – 1,75 %; Mn – 1,49 %; Mo – 0,56 %; C – 0,46 %; V – 0,23 %; Al – 0,20 %; S – 0,11 %). Paraugu darba virsmas kantes tika apfrēzētas ar 1 mm fāzīti, nodrošinot, ka asie stūri neduras ledū eksperimentu laikā. Darba virsma tika pulēta ar *Mecatech 334 TI 15 (Presi, Francija)* autopulētāju, nodrošinot virsmas raupjumu –  $Sa \sim 0,03$   $\mu\text{m}$ .



4.3. att. Eksperimentālais paraugs.

Lai iegūtu dažādas pakāpes virsmas raupjumu, paraugi tika skrāpēti ar dažāda raupjuma smilšpapīriem uz auduma bāzes (400; 600; 1500 (*3M*)) paralēli parauga slīdēšanas virzienam [44,46] ar konstantu 10 N slodzi un kopējo distanci 2400 mm. Rezultātā tika iegūti 4 paraugi ar sekojošu virsmas raupjumu  $Sa \sim 0,02$  (netika skrāpēts – pulēts paraugs); 0,07; 0,14; 0,22  $\mu\text{m}$  (skat. 4.4. att.). Raupjums tika mērīts ar lāzerskenējošo mikroskopu *Confocal microscope VK-X250/260 (Keyence International NV/SA, Mechelen, Beļģija)*  $2 \times 2$  mm lielam laukumam. Mērīšanas uzstādījumi atbilstoši EN ISO 4288 un EN ISO 3274 [72,100].



4.4. att. Virsmas tekstūra: 1) Pulēts paraugs; 2) Skrāpēts paraugs ar 1500 raupjuma smilšpapīru; 3) Skrāpēts paraugs ar 600 raupjuma smilšpapīru; 4) Skrāpēts paraugs ar 400 raupjuma smilšpapīru [101].

Ledus pirms katras eksperimentu sērijas tika sagatavots no jauna, speciāli izveidotā ledus saldēšanas traukā (20 x 80 x 5 mm). Lai veidotos ledus, tika izmantots destilēts ūdens (18 ml) ar nelielu piejaukumu krāna ūdens (0,5 ml), kas veicināja kristālisko centru veidošanos. Ledus tika saldēts no saldēšanas trauka apakšas, virskārtā iegūstot aptuveni  $-9\text{ }^{\circ}\text{C}$  temperatūru. Ledus temperatūra tika mērīta ar kontakta tipa termometru *JUMO dTRANS T04 (JUMO, Vācija)* un gaisa temperatūra un relatīvais gaisa mitrums attiecīgi ar *Dostmann electronic LOG 110-EXF (Dostmann electronic, Vācija)* termometru. Eksperimentālais paraugs tika atdzesēts klimata kamerā, tādējādi parauga temperatūra tika pieņemta līdzīga gaisa temperatūrai.

4.2. tabula

Iegūto rezultātu apkopojums

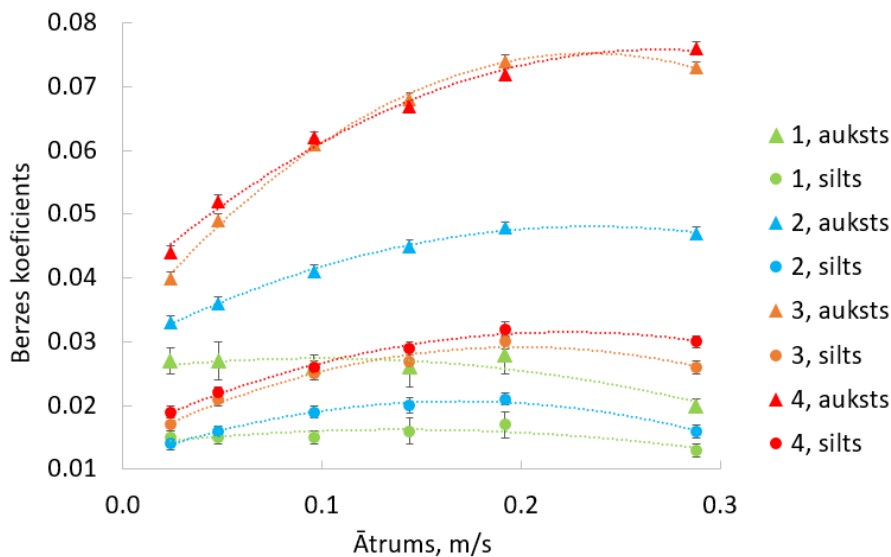
Parauga nr.	Sa, $\mu\text{m}$	Gaisa temperatūra, $^{\circ}\text{C}$	Ledus temperatūra, $^{\circ}\text{C}$	Relatīvais gaisa mitrums, %	$T_{ks}$ , s	$\Delta T_{ks}$ , %	Slīdēšanas ātrums, m/s						$\Delta$ berzes koeficientam, %
							0,024	0,048	0,096	0,144	0,192	0,288	
1	0,02	$3,4 \pm 0,2$	$-8,5 \pm 0,1$	$22 \pm 2$	3,967	2	0,027	0,027	0,026	0,026	0,028	0,020	70
		$6,5 \pm 0,3$	$-8,6 \pm 0,1$	$59 \pm 3$	3,887		0,015	0,015	0,015	0,016	0,017	0,013	
2	0,07	$3,2 \pm 0,1$	$-8,5 \pm 0,1$	$21 \pm 3$	3,969	2	0,033	0,036	0,041	0,045	0,048	0,047	129
		$6,4 \pm 0,2$	$-8,7 \pm 0,2$	$57 \pm 4$	3,890		0,014	0,016	0,019	0,020	0,021	0,016	
3	0,14	$3,4 \pm 0,1$	$-8,5 \pm 0,1$	$18 \pm 2$	3,969	2	0,040	0,049	0,061	0,068	0,074	0,073	144
		$6,2 \pm 0,3$	$-8,5 \pm 0,1$	$60 \pm 2$	3,890		0,017	0,021	0,025	0,027	0,030	0,026	
4	0,22	$3,2 \pm 0,1$	$-8,7 \pm 0,2$	$20 \pm 1$	3,965	1,8	0,044	0,052	0,062	0,067	0,072	0,076	134
		$6,2 \pm 0,1$	$-8,5 \pm 0,2$	$56 \pm 3$	3,894		0,019	0,022	0,026	0,029	0,032	0,030	

\*– standartnovirzes berzes koeficienta visām vērtībām zem 0,003.

Pirms eksperimentiem, ledus virskārta tika nogludināta ar speciāli pielāgotu alumīnija plāksni. Eksperimenti tika veikti pie diviem vides apstākļiem (tālāk tekstā apzīmēti ar terminiem: “auksti” un “silti”), pie 6 dažādiem slīdēšanas ātrumiem (0,024 – 0,288 m/s) ar 4 paraugiem ar dažādas pakāpes virsmas raupjumu (skat. 4.2. tabulu). Papildus informāciju skatīt [101–103] literatūras avotos. Aprakstītie rezultāti iekļauti [101] literatūras avotā. Lai definētu vides apstākļus, tika aprēķināts slīdēšanas raksturojošais parametrs  $T_{ks}$ , pēc (3.7.) formulas.

$\Delta T_{ks}$ , % norāda procentuālās izmaiņas starp “aukstiem” un “siltiem” apstākļiem. Pēc tabulas datiem redzams, ka katrs paraugs tika testēts pie diviem vides apstākļiem un procentuālā starpība starp vides apstākļiem ir  $\sim 2$  %. Šajā gadījumā  $T_{ks}$  tiek izmantots tikai kā indikators, lai teorētiski raksturotu vides apstākļu ietekmi uz nerūsējošais tērauds-ledus slīdēšanu (lielāks  $T_{ks}$  atbilst lielākam slīdēšanas laikam).

Kā iegūstamais rezultāts, tika izmērīts dinamiskais berzes koeficients (12 mērījumi katrai berzes koeficienta vērtībai) pie 6 dažādiem ātrumiem un diviem dažādiem vides apstākļiem katram paraugam. 4.3. tabulā ir norādītas skaitliskās vērtības, 4.5. attēls grafiski ilustrē iegūtos datus. Zaļā krāsā apzīmē 1. paraugu ( $Sa \sim 0,02 \mu\text{m}$ ), zilā 2. paraugu ( $Sa \sim 0,07 \mu\text{m}$ ), oranžā 3. paraugu ( $Sa \sim 0,14 \mu\text{m}$ ) un sarkanā 4. paraugu ( $Sa \sim 0,22 \mu\text{m}$ ). Trijstūris norāda uz mērījumiem pie “aukstiem” apstākļiem, aplis uz mērījumiem pie “siltiem” apstākļiem. Pēc iegūtajiem datiem ir redzams, ka berzes koeficienta vērtība visiem paraugiem būtiski atšķiras (vairāk kā 2 x) starp diviem vides apstākļu mērījumiem.  $\Delta$  berzes koeficientam, % tabulā norāda uz vidējo berzes koeficienta vērtības izmaiņu starp eksperimentu apstākļiem katram paraugam (aprēķināts pēc (3.7.) formulas). To var skaidrot sekojoši, pie  $\sim 2$  % izmaiņām  $T_{ks}$ , ietekme uz berzes koeficientu ir attiecīgi  $\sim 70$  % pirmajam paraugam,  $\sim 129$  % otrajam paraugam,  $\sim 144$  % trešajam un  $\sim 134$  % ceturtajam. Ja otrajam līdz ceturtajam paraugam, izmaiņas berzes koeficientā ir līdzīgas, tad pirmajam paraugam ir aptuveni 2 reizes mazākas kā pārējiem. Iespējams, ka eksperimentālo paraugu virsmām ar mazāku virsmas raupjumu (pulētām), vides apstākļu ietekme uz rezultātu ir mazāka, kā virsmām ar lielāku virsmas raupjumu.



4.5. att. Dinamiskā berzes koeficienta vērtības paraugiem 1 ( $Sa \sim 0,02 \mu\text{m}$ ); 2 ( $Sa \sim 0,07 \mu\text{m}$ ); 3 ( $Sa \sim 0,14 \mu\text{m}$ ); 4 ( $Sa \sim 0,22 \mu\text{m}$ ), atkarībā no vides apstākļiem (“aukststs” – gaisa temp.  $\sim 3$  °C; ledus temp.  $\sim -9$  °C; mitrums  $\sim 20$  %. “silts” – gaisa temp.  $\sim 6$  °C; ledus temp.  $\sim -9$  °C; mitrums  $\sim 60$  %) un slīdēšanas ātruma.

Šāds novērojums sasaucās ar Spagni [5] pētījumā novēroto, proti, tika testēti 3 paraugi (apstrādāti ar smilšu strūklu) ar atšķirīgu virsmas raupjumu ( $Ra \sim 0,1; 1,4; 2,6 \mu\text{m}$ ) un, palielinoties raupjumam, starpība starp izmērīto berzes koeficientu pie 5 dažādām ledus

temperatūrām (no  $-2$  līdz  $-17$  °C), attiecīgi palielinājās no  $\sim 0,007$  pie gludākā parauga līdz  $\sim 0,018$  pie raupjākā parauga. Iespējams, ka raupjākiem paraugiem, palielinoties ledus temperatūrai, līdz ar to ledus cietībai, virsmas negludumi kalpo kā, nosacīti arks, kas saskarē ar ledus virskārtu veicina berzes koeficienta palielināšanos. Paraugiem ar mazāku virsmas raupjumu, negludumu augstums ir mazāks, līdz ar to saskarē ar ledu, neveidojas papildus pretestība, ja palielinās ledus cietība.

Pēc eksperimentiem V-Research GmbH (*Industrial Research and Development*) laboratorijā var secināt, ka eksperimentos, kur tiek mērīts berzes koeficients, vēl būtiskāk ir pilnvērtīgi definēt vides apstākļus, jo nosacīti 2 % izmaiņa ar regresijas vienādojumu aprakstītajā vides apstākļu raksturojošajā parametrā, rezultējas ar vismaz 70 % vidējo izmaiņu berzes koeficienta mērījumā.

Balstoties uz šo pētījumu, tiks veikti mērījumi pie lielāka skaita dažādiem vides apstākļiem, tādējādi pielāgojot prognozēšanas modeli berzes koeficienta mērījumiem un iegūstot pilnvērtīgāku informāciju, kā vides apstākļi un cik ļoti ietekmē berzes koeficientu, izmantojot, līdzīga tipa laboratorijas iekārtas. Paredzēts arī izmantot paraugus ar dažādas pakāpes virsmas raupjumu pie atšķirīgiem vides apstākļiem, tādējādi būtu iespējams iegūt mijiedarbību starp vides apstākļiem un parauga virsmas tekstūru.

## NOSLĒGUMS UN SECINĀJUMI

Ledus berzes pētījumi jau pēc būtības ir sarežģīti, ņemot vērā mainīgo ledus virskārtu un robežslāņa veidošanos uz tās, atkarībā no vairākiem faktoriem, kas var būt saistīti ar izvēlēto eksperimentu metodi, vides apstākļiem, slīdošā parauga virsmas īpašībām (skat. 1.3. att.).

Pilnvērtīga eksperimentu vides apstākļu ietekme ledus berzes pētījumos iepriekš nav apskatīta. Pārsvārā pētnieki izvēlās nepilnīgi aprakstīt eksperimentu apstākļus un noteikt tos kā sekundārus parametrus, pētot, citu parametru, piemēram, slīdošā parauga virsmas tekstūras [5,45,64], siltumvadītspējas [43], kontakta laukuma [41,49] u.c. ietekmi uz slīdēšanu pa ledu. Dažos pētījumos parādās kā ledus temperatūras izmaiņas var ietekmēt berzes koeficientu [6,15,41] un ledus temperatūra tiek izmantota dažādos teorētiskajos modeļos [18,42]. Iegūtie rezultāti mēdz manāmi svārstīties, apskatot dažādus teorētiskos modeļus pie teorētiski tādiem pašiem apstākļiem.

Līdz ar to, promocijas darba "*Gaisa mitruma, gaisa un ledus temperatūras ietekme uz berzes pāra nerūsējošais tērauds-ledus slīdēšanu raksturojošiem parametriem*" ietvaros, tika apskatīts kā vides apstākļu parametru izmaiņas ietekmē slīdēšanas īpašības pa ledu. Sākotnēji tika izstrādāta reālu apstākļu eksperimentu procedūra, izmantojot virsmu slīdēšanu raksturojošu parametru noteikšanas mēriekārtu balstītu uz slīpās plaknes principu. Reālu apstākļu eksperimenti tika izvēlēti ar mērķi pietuvināt eksperimentus reālām dzīves situācijām, piemēram, šajā gadījumā – skeletoņa sacensībām. Rezultātā eksperimenti tika veikti pie lielāka ātruma, lielāka pieliktā spēka, garākā trases posmā, nekā, ja eksperimenti tiktu veikti laboratorijas apstākļos. Lai pilnvērtīgi izstrādātu eksperimentu veikšanas procedūru tika veikti papildus pētījumi.

Ledus virsmas tekstūras izpēte norādīja uz būtisku ledus negludumu ietekmi uz slīdēšanas laika rezultātiem (skat. 2.16. att.). Tika iegūts, ka ir nepieciešami piestrādes mērījumi, pirms tiek veikti aktuālie mērījumi. Turklāt pie aukstākiem/ sausākiem vides apstākļiem, nepieciešamais piestrādes mērījumu skaits tika iegūts lielāks (skat. 2.3. tabulu). Tas ir skaidrojams ar ledus cietības pieaugumu [50,51]. Ņemot vērā, ledus virsmas tekstūras izpētes iegūtos rezultātus, ledus virsma pirms katra eksperimenta tika notīrīta ar speciāli pielāgotu ēveli un birsti, un aplieta ar karstu ūdeni, lai novērstu ledus virsmas negludumu un ieplaku ietekmi uz rezultātiem. Papildus tam, pirms slīdēšanas laika mērījumiem, tika veikti vismaz 3 piestrādes mērījumi.

Eksperimentālā parauga vibrāciju analīze sniedza informāciju par trases profilu un vibrācijām kustības laikā. Tika iegūts, ka vibrācijas palielinās, palielinoties slīdēšanas ātrumam (skat. 2.19. – 2.21. att.), kā arī pirms pēdējā trases sensoru pāra, ir noapaļojums (skat. 2.20. att.), kas var ietekmēt slīdošā parauga kustību. Turklāt, attālums starp sensoriem trases beigās, ir tikai viens metrs (skat. 2.2. att.). Novērojumi tika ņemti vērā, izvēloties slīdēšanas raksturojošu parametru, proti, slīdēšanas laiku 24 m garā trases posmā. Ja apskata vibrāciju atšķirības pie dažādiem vides apstākļiem, tika iegūts, ka svārstību amplitūda pie aukstiem apstākļiem (gaisa temperatūra  $-10.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; ledus temperatūra  $-10.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , relatīvais gaisa mitrums 70 %) palielinās par 20 %, ja salīdzina ar siltākiem apstākļiem (gaisa temperatūra  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; ledus temperatūra  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ , relatīvais gaisa mitrums 70 %). Šis novērojums attiecīgi norādīja uz to, ka biežāks

robežslānis iespējams slāpē vibrācijas un padara kustību “mierīgāku” lejā pa ledus trasi. Tas var tikt skaidrots ar Seymour-Pierce eksperimentu rezultātiem [90], proti, lielākas vibrācijas pie aukstākiem vides apstākļiem var rasties plaisu, negludumu ledus virskārtā, kas ir veidojušies no iepriekšējiem eksperimentiem, dēļ. Attiecīgi pie siltākiem apstākļiem, skeletoņa kustība lejā pa ledus trasi, veicina robežslāņa kušanu un virsmas cietības samazināšanos, kas attiecīgi noved pie virsmas rekrystalizācijas un gludākas ledus virskārtas nākamajos mērījumos.

Lai apskatītu nevēlamu skrāpējumu ietekmi, tika analizēts kā parauga virsmas tekstūra apskatītajā diapazonā ( $Sa$  0,03 pulētai un 0,12  $\mu\text{m}$  skrāpētai sliecei) ietekmē slīdēšanas laiku pie dažādiem vides apstākļiem. Tika iegūts, ka kopējais slīdēšanas laiks, veicot eksperimentus ar skrāpētām un pulētām sliecēm uzrāda rezultātus standartnovirzes robežās (skat. 2.22. att.). Līdz ar to skrāpējumu, kas var rasties eksperimentu laikā, potenciālā ietekme uz rezultātu ir niecīga.

Ņemot vērā eksperimentāli iegūto informāciju par dažādiem faktoriem, kas var ietekmēt berzes pāra nerūsējošais tērauds – ledus slīdēšanas laika mērīšanas precizitāti, tika izstrādāta slīdēšanu raksturojošu parametru mērīšanas procedūra, kas tālāk tika izmantota slīdēšanas laika mērīšanas un prognozēšanas metodikas izstrādē.

Izvēlēti tika trīs vides apstākļu aprakstoši parametri – gaisa, ledus temperatūra un relatīvais gaisa mitrums un veikti 14 slīdēšanas laika mērījumi pēc izstrādātās procedūras pie dažādiem vides apstākļiem. Iegūtās sakarības starp vides apstākļiem un slīdēšanas laiku norādīja, ka, izmantojot ledus temperatūru (parametrs, ko pārsvarā izmanto pētnieki (skat. 1.1. tab.)), kā vides apstākļu aprakstošu parametru norāda uz visneviennozīmīgāko sakarību ar slīdēšanas laiku (skat. 2.26. att.). Analizējot izvēlēto trīs vides parametru ietekmi uz slīdēšanu pa ledu, tika iegūts, ka izmantot vienu parametru, lai aprakstītu vides apstākļus nav pietiekami. Jāņem vērā vismaz apskatīto trīs vides parametru kopējo ietekmi uz berzes pāra nerūsējošais tērauds–ledus slīdēšanu raksturojošiem parametriem (skat. 2.27. att.).

Lai to izdarītu, tika izstrādāts slīdēšanas laika prognozēšanas modelis, iekļaujot gaisa, ledus temperatūru un gaisa mitrumu. Prognozēšanas modelis tika izstrādāts, ņemot vērā eksperimentāli izmērītos slīdēšanas laikus pie konkrētiem vides apstākļiem, izmantojot daudzfaktoru regresijas analīzi (3.7.). Tika veikta prognozēšanas modeļa atbilstības pārbaude, iegūstot, ka tas ir izstrādāts korekti. Prognozēšanas modelis norādīja uz vismaz 40 % mazāku vidējo procentuālo prognozēšanas laika kļūdu, kā izmantojot vienu vides apstākļu aprakstošu parametru (skat. 3.1. un 3.2. tabulas). Regresijas koeficientu standartizācija (3.13) attiecīgi norādīja uz to, ka visi izvēlētie vides aprakstošie parametri būtiski ietekmē slīdēšanu pa ledu. Salīdzinot eksperimentāli iegūtos rezultātus ar teorētiski aprēķinātiem, izmantojot prognozēšanas modeli (skat. 3.5. att.), tika iegūts, ka eksperimentos iegūtie rezultāti sakrīt ar teorētiski aprēķinājumiem.

Tika izstrādāta *Berzes pāra nerūsējošais tērauds-ledus slīdēšanu raksturojošu parametru mērīšanas un prognozēšanas metodika reālu apstākļu eksperimentu režīmā*, kas pievienota 11. pielikumā.

Prognozēšanas modelis tika praktiski aprobēts Latvijas izlases skeletoņa treniņos, pielāgojot slieces vides apstākļiem. Salīdzinot ar prognozēšanas modeli, iegūtās parametra  $T_{ks}$  vērtības ar *IBSF* Pasaules kausa skeletoņa sacensību rezultātiem Siguldas trasē pēdējā gada

laikā, tika iegūta lineāra sakarība, proti, samazinoties  $T_{ks}$ , samazinās arī sportistu uzrādītais vidējais slīdēšanas laiks gan sieviešu, gan vīriešu sacensībās (skat. 4.1. att.). Protams, ir nepieciešami papildus mērījumi, taču iegūtā tendence norāda, ka ir iespējams, izveidoto prognozēšanas modeli, pielāgot reālu sacensību režīmam.

*V-Research* laboratorijā Austrijā, tika veikti pētījumi laboratorijas apstākļos ar lineāra tipa tribometru un mērīts berzes koeficients. Kā indikators, lai aprakstītu vides apstākļus, tika aprēķināts  $T_{ks}$  (3.7.). Rezultātā tika iegūts, ka berzes koeficienta vērtība paraugiem ar dažādas pakāpes virsmas raupjumu pie apskatītajiem vides apstākļiem (skat. 4.2. tabulu), atšķīrās vismaz 2 reizes. Turklāt, tika novērota būtiska raupjuma ietekme uz berzes koeficientu apskatītajā raupjuma diapazonā (Sa 0,02 – 0,22  $\mu\text{m}$ ). Šāda tendence ir pretēja novērotajam, izmantojot virsmu slīdēšanu raksturojošu parametru noteikšanas mēriekārtu balstītu uz slīpās plaknes principu, reālu apstākļu eksperimentu režīmā. Pie “aukstiem” vides apstākļiem, berzes koeficienta vērtības paraugiem atšķīrās līdz pat 4 reizēm. Iegūtie rezultāti norādīja, ka laboratorijas apstākļos dažādi faktori vēl būtiskāk ietekmē mērāmo slīdēšanas raksturojošu parametru – berzes koeficientu.

Promocijas darbā “Gaisa mitruma, gaisa un ledus temperatūras ietekme uz berzes pāra nerūsējošais tērauds-ledus slīdēšanu raksturojošiem parametriem”, tika pierādīts, ka vides apstākļi būtiski ietekmē berzes pāra nerūsējošais tērauds – ledus slīdēšanu raksturojošus parametrus reālu apstākļu eksperimentos. Turklāt, lai pilnvērtīgi aprakstītu vides apstākļus, ir jāņem vērā vismaz 3 parametru (gaisa mitrums, gaisa un ledus temperatūras) mijiedarbība. Izstrādātais prognozēšanas modelis un slīdēšanas laika mērīšanas un prognozēšanas metodika reālu apstākļu eksperimentos, var tikt izmantoti, lai prognozētu nerūsējošā tērauda slīdēšanu raksturojošus parametrus pa ledu, atkarībā no vides apstākļiem.



## Pētījuma būtiskākie rezultāti un secinājumi

1. Ņemot vērā zināmās literatūras analīzi, tika secināts, ka eksperimentu apstākļu aprakstīšana dažādu pētnieku darbos ir nepietiekama. Līdz ar to veidojas nesalīdzināmi, haotiski rezultāti. Ņemot vērā, ka pārsvarā vides apstākļi tiek aprakstīti ar ledus temperatūru, retāk ar gaisa temperatūru vai gaisa mitrumu, šie parametri tika izvēlēti vides apstākļu ietekmes uz parauga slīdēšanu pa ledu izpētē.
2. Līdz šim izmantotās reālu apstākļu eksperimentu veikšanas procedūras ir nepilnīgas, kas liek apšaubīt iegūto rezultātu kvalitāti, tāpēc tika izstrādāta reālu apstākļu eksperimentu veikšanas procedūra, kas novērš iepriekš zināmo procedūru trūkumus.
3. No empīriski iegūtām katra vides parametra (relatīvais gaisa mitrums, ledus temperatūra un gaisa temperatūra) sakarībām ar slīdēšanas laiku tika secināts, ka, lai izskaidrotu rezultātus, ir nepieciešama informācija par trīs apskatītajiem vides parametriem. Slīdēšanas laiks samazinās, ja palielinās gaisa mitrums, ledus temperatūra ir aptuveni  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$  un gaisa temperatūra ir aptuveni no  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  līdz  $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
4. Tika izstrādāts slīdēšanas laika prognozēšanas modelis, ņemot vērā trīs vides apstākļu aprakstošu parametru mijiedarbību, izmantojot daudzfaktoru regresijas analīzi (vides apstākļu diapazons: gaisa temp. – no  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$  līdz  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; ledus temp. – no  $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$  līdz  $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; relatīvais gaisa mitrums – no  $60\%$  līdz  $95\%$ ). Modelim tika veikta tā atbilstības pārbaude, iegūstot korektu tā izveidi. Prognozēšanas vidējā procentuālā kļūda, izmantojot izstrādāto prognozēšanas modeli, tika aprēķināta par vismaz  $40\%$  mazāka nekā tad, ja tiek izmantots viens vides apstākļu aprakstošs parametrs (relatīvo gaisa mitrumu), kas veido visciešāko sakarību ar slīdēšanas laiku.
5. Izstrādāta slīdēšanas laika atkarībā no vides apstākļiem mērīšanas un prognozēšanas metodika. Mērīšanas un prognozēšanas metodika nosaka izmantotās mērījumu metodes, prasības mērinstrumentiem, palīgierīcēm, materiāliem, prasības operatoru kvalifikācijai un drošības prasības, prasības mērījumu apstākļiem un mērījumu veikšanas kārtību, mērījumu rezultātu apstrādi un precizitātes kontroli, prasības mērījumu precizitātei.
6. Ar prognozēšanas modeļa regresijas koeficientu standartizācijas palīdzību konstatēts, ka būtisku ietekmi uz slīdēšanas laiku dod visi trīs aprēķinos izmantotie vides apstākļu raksturojošie parametri.
7. Izstrādājot prognozēšanas modeli, konstatēts, ka, lai samazinātu slīdēšanas laiku, ir jābūt augstam gaisa mitrumam ( $\sim 90\%$ ) un lielai gaisa un ledus temperatūras starpībai. Lai šo rezultātu apstiprinātu, jāveic eksperimenti laboratorijas apstākļos ar iespēju nodrošināt šādus apstākļus. Skeletona sacensību analīze norādīja, ka šāda likumsakarība pastāv, jo tika iegūts būtiski ātrāks vidējais slīdēšanas laiks šādos vides apstākļos: gaisa mitrums ir  $90\%$ , gaisa temperatūra ir  $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ledus temperatūra ir  $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
8. Vides apstākļu ietekme, mērot dinamisko berzes koeficientu laboratorijas apstākļos, tika novērota vēl būtiskāka nekā reālu apstākļu eksperimentu režīmā.  $2\%$  vides apstākļu izmaiņas (raksturotas ar prognozēšanas modeļa slīdēšanas laika parametru  $T_{ks}$ ) rada vismaz  $70\%$  izmaiņas berzes koeficienta vērtībā.

9. Slīdošā parauga virsmas tekstūra (raupjuma diapazons:  $Sa$  0,03–0,12  $\mu\text{m}$ ) nebūtiski ietekmē slīdēšanas laika rezultātu reālu apstākļu eksperimentu režīmā. Laboratorijas apstākļos virsmas tekstūras (raupjuma diapazons:  $Sa$  0,02–0,22  $\mu\text{m}$ ) ietekme ir būtiska, un berzes koeficienta vērtības var atšķirties līdz pat četrām reizēm.

Iegūtie darba rezultāti liecina par būtisku vides apstākļu ietekmi uz slīdēšanu starp nerūsējošo tēraudu un ledu, kā arī nepieciešamību vides apstākļus aprakstīt ar vairāk nekā vienu raksturojošo parametru. Līdz ar to var secināt, ka izvirzītā hipotēze – gaisa un ledus temperatūra, gaisa mitrums mijiedarbojoties ietekmē berzes pāra nerūsējošais tērauds-ledus parauga slīdēšanas pa ledu raksturojošos parametrus; zinot vides parametru ietekmi, būtu iespējams prognozēt berzes pāra nerūsējošais tērauds-ledus slīdēšanu raksturojošus parametrus atkarībā no vides apstākļiem, kā arī nodrošināt slīdēšanu pa ledu raksturojošu parametru mērījumu precizitāti un eksperimentu reproducējamību – promocijas darbā ir apstiprināta.

## REKOMENDĀCIJAS TĀLĀKAI IZPĒTEI

- Iegūtais prognozēšanas modelis tika izstrādāts, izmantojot trīs visbiežāk izmantotos vides apstākļu aprakstošos parametrus (relatīvais gaisa mitrums, gaisa un ledus temperatūras). Iespējams, ņemot vērā, ka eksperimenti var tikt veikti dažādās valstīs, ir nepieciešams modelī iekļaut, piemēram, gaisa spiedienu. Tā pat, pētot dažādus vides apstākļus, tika novērots, ka specifiskais gaisa mitrums, varētu tikt izmantots vides apstākļu aprakstīšanā, jo pakārtoti iekļauj gaisa temperatūru, relatīvo gaisa mitrumu un gaisa spiedienu [104]. Iespējams, ka prognozēšanas modeli var vienkāršot, izmantojot specifisko gaisa mitrumu.
- Veicot eksperimentus Austrijā V-Research GmbH (*Industrial Research and Development*) laboratorijā, tika iegūts, ka vides apstākļiem ir lielāka ietekme uz rezultātu (berzes koeficientu) laboratorijā veiktos eksperimentos, kā reālu apstākļu eksperimentu režīmā. Līdz ar to ir nepieciešams, izmantojot izstrādātā prognozēšanas modeļa iestrādnes, atkārtot līdzīga tipa eksperimentus laboratorijas apstākļos. Iespējams, tas ir jāmodificē. Tā pat tika novērots, ka būtiskāka vides apstākļu ietekme uz rezultātu ir paraugiem ar mazāku virsmas raupjumu. Vajadzētu padziļināti izpētīt virsmas tekstūras un vides apstākļu ietekmes mijiedarbību.
- Nākotnē varētu tikt uzlabota reālu apstākļu eksperimentu veikšanas procedūra, kas pietuvina eksperimentus tuvāk realitātei. Vajadzētu nodrošināt slīdēšanas pa ledu monitoringu visa slīdēšanas procesa laikā. Tādējādi varētu pētīt, kā mainās slīdēšanas aprakstoši parametri laika gaitā. Lai nebūtu pilnīga atkarība no praktiski viena slīdēšanas ātruma konkrētā posmā, būtu nepieciešams nodrošināt maināmu sākuma ātrumu. Šāda tipa iekārtas konstrukcija ir aizsargāta ar patenta pieteikumu Nr. LVP2020000098. Tā nodrošinātu iespēju veikt reālu apstākļu eksperimentus ne tikai pa slīpo plakni, kas prasa attiecīgu infrastruktūru, bet arī pa plakanu horizontālu virsmu. Ziņas par patenta pieteikumu pievienotas 9. pielikumā.

## INFORMĀCIJAS AVOTI

- [1] A.-M. Kietzig, S.G. Hatzikiriakos, P. Englezos, Ice friction: The effects of surface roughness, structure, and hydrophobicity, *J. Appl. Phys.* 106 (2009) 024303. <https://doi.org/10.1063/1.3173346>.
- [2] A. Döppenschmidt, H.-J. Butt, Measuring the Thickness of the Liquid-like Layer on Ice Surfaces with Atomic Force Microscopy, *Langmuir.* 16 (2000) 6709–6714. <https://doi.org/10.1021/la990799w>.
- [3] E. Lozowski, K. Szilder, L. Poirier, A bobsleigh ice friction model, *Int. J. Offshore Polar Eng.* 24 (2014) 52–60.
- [4] A.M. Kietzig, S.G. Hatzikiriakos, P. Englezos, Physics of ice friction, *J. Appl. Phys.* 107 (2010) 081101. <https://doi.org/10.1063/1.3340792>.
- [5] A. Spagni, A. Berardo, D. Marchetto, E. Gualtieri, N.M. Pugno, S. Valeri, Friction of rough surfaces on ice: Experiments and modeling, *Wear.* 368–369 (2016) 258–266. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.10.001>.
- [6] M. Scherge, R. Böttcher, A. Spagni, D. Marchetto, High-Speed Measurements of Steel–Ice Friction: Experiment vs. Calculation, *Lubricants.* 6 (2018) 26. <https://doi.org/10.3390/lubricants6010026>.
- [7] L. Bäurle, D. Szabó, M. Fauve, H. Rhyner, N.D. Spencer, Sliding friction of polyethylene on ice: tribometer measurements, *Tribol. Lett.* 24 (2006) 77–84. <https://doi.org/10.1007/s11249-006-9147-z>.
- [8] M. Scherge, R. Bottcher, M. Richter, U. Gurgel, High-Speed Ice Friction Experiments under Lab Conditions: On the Influence of Speed and Normal Force, *ISRN Tribol.* 2013 (2013) 1–6. <https://doi.org/10.5402/2013/703202>.
- [9] S. Ducret, H. Zahouani, A. Midol, P. Lanteri, T.G. Mathia, Friction and abrasive wear of UHMWPE sliding on ice, no: *Wear*, 2005: lpp. 26–31. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.09.026>.
- [10] L. Poirier, E.P. Lozowski, S. Maw, D.J. Stefanyshyn, R.I. Thompson, Experimental analysis of ice friction in the sport of bobsleigh, *Sport. Eng.* 14 (2011) 67–72. <https://doi.org/10.1007/s12283-011-0077-0>.
- [11] B.A. Marmo, J.R. Blackford, C.E. Jeffree, Ice friction, wear features and their dependence on sliding velocity and temperature, *J. Glaciol.* 51 (2005) 391–398. <https://doi.org/10.3189/172756505781829304>.
- [12] S. Kim, H. Kang, D. Kim, Y.-Z. Lee, J. Lee, Measurement of sliding friction coefficient of micro-line patterned surfaces on ice, *Appl. Phys. Lett.* 111 (2017) 211601. <https://doi.org/10.1063/1.4995493>.
- [13] R.W. Liefferink, F.C. Hsia, B. Weber, D. Bonn, Friction on Ice: How Temperature, Pressure, and Speed Control the Slipperiness of Ice, *Phys. Rev. X.* 11 (2021) 011025. <https://doi.org/10.1103/PhysRevX.11.011025>.
- [14] M. Akkok, C.M.M.C. Ettles, S.J. Calabrese, Parameters affecting the kinetic friction of ice, *J. Tribol.* 109 (1987) 552–559. <https://doi.org/10.1115/1.3261503>.
- [15] A.M. Kietzig, S.G. Hatzikiriakos, P. Englezos, Physics of ice friction, *J. Appl. Phys.* 107

- (2010) 081101. <https://doi.org/10.1063/1.3340792>.
- [16] C. Hainzmaier, PhD: A new tribologically optimized bobsleigh runner, Munich, 2005.
- [17] E. Lozowski, K. Szilder, S. Maw, A model of ice friction for a speed skate blade, *Sport. Eng.* 16 (2013) 239–253. <https://doi.org/10.1007/s12283-013-0141-z>.
- [18] E.P. Lozowski, K. Szilder, S. Maw, A. Morris, A model of ice friction for skeleton sled runners, *Proc. Int. Offshore Polar Eng. Conf.* (2014).
- [19] J.J. de Koning, G. de Groot, G.J. van Ingen Schenau, Ice friction during speed skating., *J. Biomech.* 25 (1992) 565–71. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/1517252>.
- [20] S.C. Colbeck, L. Najarian, H.B. Smith, Sliding temperatures of ice skates, <http://jobs.aapt.org/>. (1998). <https://doi.org/10.1119/1.18576>.
- [21] S. Hemette, Rubber-ice friction : a multi-scale and multi-physical approach, University de Lyon, 2019. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03142673> (skatīts 2021. gada 3. jūnijā).
- [22] Y. Zhang, J. Gao, Q. Li, Experimental study on friction coefficients between tire tread rubber and ice, *AIP Adv.* 8 (2018) 75005. <https://doi.org/10.1063/1.5041049>.
- [23] O. Lahayne, B. Pichler, R. Reihnsner, J. Eberhardsteiner, J. Suh, D. Kim, S. Nam, H. Paek, B. Lorenz, B.N. J Persson, Rubber Friction on Ice: Experiments and Modeling Heat flow into ice, *62* (2016) 17. <https://doi.org/10.1007/s11249-016-0665-z>.
- [24] Y. Cao, W. Tan, Z. Wu, Aircraft icing: An ongoing threat to aviation safety, *Aerosp. Sci. Technol.* 75 (2018) 353–385. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2017.12.028>.
- [25] O. Fakorede, Z. Feger, H. Ibrahim, A. Ilinca, J. Perron, C. Masson, Ice protection systems for wind turbines in cold climate: characteristics, comparisons and analysis, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 65 (2016) 662–675. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.06.080>.
- [26] S. Dierer, R. Oechslein, R. Cattin, Wind turbines in icing conditions: performance and prediction, *Adv. Sci. Res.* 6 (2011) 245–250. <https://doi.org/10.5194/asr-6-245-2011>.
- [27] S.Y. Jeong, K. Choi, H.S. Kim, Investigation of ship resistance characteristics under pack ice conditions, *Ocean Eng.* 219 (2021) 108264. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108264>.
- [28] M.M. Conde, C. Vega, A. Patrykiewicz, The thickness of a liquid layer on the free surface of ice as obtained from computer simulation, *J. Chem. Phys.* 129 (2008) 014702. <https://doi.org/10.1063/1.2940195>.
- [29] M.P. Goertz, X.Y. Zhu, J.E. Houston, Exploring the liquid-like layer on the ice surface, *Langmuir.* 25 (2009) 6905–6908. <https://doi.org/10.1021/la9001994>.
- [30] H. Asakawa, G. Sazaki, K. Nagashima, S. Nakatsubo, Y. Furukawa, Two types of quasi-liquid layers on ice crystals are formed kinetically, *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 113 (2016) 1749–1753. <https://doi.org/10.1073/pnas.1521607113>.
- [31] J.G. Constantin, M.M. Gianetti, M.P. Longinotti, H.R. Corti, The quasi-liquid layer of ice revisited: The role of temperature gradients and tip chemistry in AFM studies, *Atmos. Chem. Phys.* 18 (2018) 14965–14978. <https://doi.org/10.5194/acp-18-14965-2018>.
- [32] T. Kling, F. Kling, D. Donadio, Structure and Dynamics of the Quasi-Liquid Layer at the Surface of Ice from Molecular Simulations, *J. Phys. Chem. C.* 122 (2018) 24780–24787. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.8b07724>.

- [33] R. Rosenberg, Why Is Ice Slippery?, *Phys. Today*. 58 (2005) 50–54. <https://doi.org/10.1063/1.2169444>.
- [34] A. Nassif, Le Chatelier's Principle: A Guide to this Exciting Principle in Science, b.g.
- [35] F.P.. H.T.P. Bowden, The mechanism of sliding on ice and snow, *Proc. R. Soc. London. Ser. A. Math. Phys. Sci.* 172 (1939) 280–298. <https://doi.org/10.1098/rspa.1939.0104>.
- [36] S.C. Colbeck, Pressure melting and ice skating, *Am. J. Phys.* 63 (1995) 888–890. <https://doi.org/10.1119/1.18028>.
- [37] X. Zhang, Y. Huang, Z. Ma, L. Niu, C.Q. Sun, From ice superlubricity to quantum friction: Electronic repulsivity and phononic elasticity, *Friction*. 3 (2015) 294–319. <https://doi.org/10.1007/s40544-015-0097-z>.
- [38] S.C. Colbeck, A Review of the Processes That Control Snow Friction, Hanover, N.H.: U.S. Army Corps of Engineers, Cold Regions Research & Engineering Laboratory., 1992. <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a252362.pdf>.
- [39] L. Makkonen, Surface Melting of Ice, *J. Phys. Chem. B.* 101 (1997) 6196–6200. <https://doi.org/10.1021/jp963248c>.
- [40] B. Bhushan, Introduction to tribology, Wiley, New York, 2013.
- [41] R. Böttcher, M. Seidelmann, M. Scherge, Sliding of UHMWPE on ice: Experiment vs. modeling, *Cold Reg. Sci. Technol.* 141 (2017) 171–180. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2017.06.010>.
- [42] L. Makkonen, M. Tikanmäki, Modeling the friction of ice, *Cold Reg. Sci. Technol.* 102 (2014) 84–93. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2014.03.002>.
- [43] A.M. Kietzig, S.G. Hatzikiriakos, P. Englezos, Ice friction: The effect of thermal conductivity, *J. Glaciol.* 56 (2010) 473–479. <https://doi.org/10.3189/002214310792447752>.
- [44] E. Jansons, J. Lungevics, I. Jerane, K. Gross, A smaller bearing ratio, as a surface texture measure, promotes faster sliding on ice, *J. Tribol.* 143 (2021) 1–17. <https://doi.org/10.1115/1.4049704>.
- [45] S. Rohm, M. Hasler, C. Knoflach, J. van Putten, S.H. Unterberger, K. Schindelwig, R. Lackner, W. Nachbauer, Friction Between Steel and Snow in Dependence of the Steel Roughness, *Tribol. Lett.* 59 (2015) 27. <https://doi.org/10.1007/s11249-015-0554-x>.
- [46] E. Jansons, J. Lungevics, K.A. Gross, Surface roughness measure that best correlates to ease of sliding, no: *Eng. Rural Dev.*, 2016.
- [47] N. Anderson, The Many Phases of Ice, (b.g.). [http://atom.me.gatech.edu/zhut/Courses/Courses\\_HarvardCollection/caiwei/phasesofice.pdf](http://atom.me.gatech.edu/zhut/Courses/Courses_HarvardCollection/caiwei/phasesofice.pdf) (skatīts 2020. gada 29. jūnijā).
- [48] M. Chaplin, Water Structure and Science, (2008). [https://www.researchgate.net/publication/33373597\\_Water\\_Structure\\_and\\_Science](https://www.researchgate.net/publication/33373597_Water_Structure_and_Science) (skatīts 2021. gada 9. aprīlī).
- [49] L. Baurle, T.U. Kaempfer, D. Szabo, N.D. Spencer, Sliding friction of polyethylene on snow and ice: Contact area and modeling, *Cold Reg. Sci. Technol.* 47 (2007) 276–289. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2006.10.005>.
- [50] P. Barnes, D. Tabor, J.C.F. Walker, The Friction and Creep of Polycrystalline Ice, *Proc.*

- R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci. 324 (1971) 127–155. <https://doi.org/10.1098/rspa.1971.0132>.
- [51] L. Poirier, E.P. Lozowski, R.I. Thompson, Ice hardness in winter sports, *Cold Reg. Sci. Technol.* 67 (2011) 129–134. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2011.02.005>.
- [52] Q. Wang, Z. Li, P. Lu, X. Cao, M. Leppäranta, In situ experimental study of the friction of sea ice and steel on sea ice, *Appl. Sci.* 8 (2018). <https://doi.org/10.3390/app8050675>.
- [53] E.M. Schulson, Friction of sea ice, *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.* 376 (2018). <https://doi.org/10.1098/rsta.2017.0336>.
- [54] R.J. Frederking, A. Barker, Friction of Sea Ice On Steel For Condition of Varying Speeds, (2002).
- [55] S. Sukhorukov, A. Marchenko, Geometrical stick-slip between ice and steel, *Cold Reg. Sci. Technol.* 100 (2014) 8–19. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2013.12.007>.
- [56] P.A. Federolf, R. Mills, B. Nigg, Ice friction of flared ice hockey skate blades., *J. Sports Sci.* 26 (2008) 1201–8. <https://doi.org/10.1080/02640410802027360>.
- [57] Adhesion and Cohesion of Water, (b.g.). [https://www.usgs.gov/special-topic/water-science-school/science/adhesion-and-cohesion-water?qt-science\\_center\\_objects=0#qt-science\\_center\\_objects](https://www.usgs.gov/special-topic/water-science-school/science/adhesion-and-cohesion-water?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects) (skatīts 2020. gada 23. jūlijā).
- [58] D.C.B. Evans, J.F. Nye, K.J. Cheeseman, The Kinetic Friction of Ice, *Proc. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.* 347 (1976) 493–512. <https://doi.org/10.1098/rspa.1976.0013>.
- [59] P. Oksanen, J. Keinonen, The mechanism of friction of ice, *Wear.* 78 (1982) 315–324. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(82\)90242-3](https://doi.org/10.1016/0043-1648(82)90242-3).
- [60] Hertz Theory - an overview | ScienceDirect Topics, (b.g.). <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/hertz-theory> (skatīts 2019. gada 15. novembrī).
- [61] W.C. Navidi, Statistics for engineers and scientists, 2015. [https://mirlyn.lib.umich.edu/Record/014865504\\_CN - QA 276.4 .N38 2015](https://mirlyn.lib.umich.edu/Record/014865504_CN_-_QA_276.4_.N38_2015).
- [62] P. Mishra, C. Pandey, U. Singh, A. Keshri, M. Sabaretnam, Selection of appropriate statistical methods for data analysis, *Ann. Card. Anaesth.* 22 (2019). [https://doi.org/10.4103/aca.ACA\\_248\\_18](https://doi.org/10.4103/aca.ACA_248_18).
- [63] Vienkāršā lineārā regresija un korelācija, no: RTU Inženiermatemātikas Katedr. Lēc. konspekts, RTU lekciju konspekts, b.g. [https://estudijas.rtu.lv/file.php/63844/Matematiska\\_statistika/regresija\\_un\\_korelacija.pdf](https://estudijas.rtu.lv/file.php/63844/Matematiska_statistika/regresija_un_korelacija.pdf) (skatīts 2020. gada 1. jūlijā).
- [64] A.M. Kietzig, S.G. Hatzikiriakos, P. Englezos, Ice friction: The effects of surface roughness, structure, and hydrophobicity, *J. Appl. Phys.* 106 (2009) 024303. <https://doi.org/10.1063/1.3173346>.
- [65] B.A. Marmo, J.R. Blackford, C.E. Jeffree, Ice friction, wear features and their dependence on sliding velocity and temperature, (b.g.). <https://www.cambridge.org/core/services/aop-cambridge-core/content/view/BA93FF3B7A4C51829AB743F81C6B505B/S0022143000209465a.pdf/div-class-title-ice-friction-wear-features-and-their-dependence-on-sliding-velocity-and-temperature-div.pdf>.

- [66] J. Lungevics, E. Jansons, K.A. Gross, An Ice Track Equipped with Optical Sensors for Determining the Influence of Experimental Conditions on the Sliding Velocity, *Latv. J. Phys. Tech. Sci.* 55 (2018). <https://doi.org/10.2478/lpts-2018-0007>.
- [67] Lungevičs J., Jansons E., K.A. Gross, K. Stiprais, A Device for Measurements of Sliding Properties, *Pat. LV 15305*, 2018.
- [68] 2019\_International Rules SKELETON, (2019). [https://www.ibsf.org/images/documents/downloads/Rules/2019\\_2020/2019\\_International\\_Rules\\_SKELETON\\_cl.pdf](https://www.ibsf.org/images/documents/downloads/Rules/2019_2020/2019_International_Rules_SKELETON_cl.pdf) (skatīts 2021. gada 2. martā).
- [69] J. Lungevics, E. Jansons, K.A. Gross, Skeleton Runner Roughness and Surface Contact Area Influence on Sliding Ability: Field Experiments, *Key Eng. Mater.* 800 (2019) 303–307. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.800.303>.
- [70] E. Jansons, J. Lungevics, K. Stiprais, L. Pluduma, K.A. Gross, Measurement of sliding velocity on ice, as a function of temperature, runner load and roughness, in a skeleton push-start facility, *Cold Reg. Sci. Technol.* 151 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2018.03.015>.
- [71] ISO 25178-2:2012(en), Geometrical product specifications (GPS) — Surface texture: Areal — Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters, (b.g.). <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:25178:-2:ed-1:v1:en> (skatīts 2020. gada 1. jūlijā).
- [72] ISO 4288:1996 - Geometrical Product Specifications (GPS) — Surface texture: Profile method — Rules and procedures for the assessment of surface texture, (b.g.). <https://www.iso.org/standard/2096.html> (skatīts 2020. gada 1. jūlijā).
- [73] Alge-Timing Photocell PR1a, b.g. <https://alge-timing.com/alge/download/manual/PR1a/PR1a-BE.pdf> (skatīts 2021. gada 6. aprīlī).
- [74] N. Maeno, M. Arakawa, A. Yasutome, N. Mizukami, S. Kanazawa, Ice-ice friction measurements, and water lubrication and adhesion-shear mechanisms, *Can. J. Phys.* 81 (2003) 241–249. <https://doi.org/10.1139/p03-023>.
- [75] E. Jansons, M. Irbe, K.A. Gross, Influence of weather conditions on sliding over ice at a push-start training facility, *Biotribology.* 25 (2020) 100152. <https://doi.org/10.1016/j.biotri.2020.100152>.
- [76] W.J. Zong, D. Wu, C.L. He, Radius and angle determination of diamond Berkovich indenter, *Meas. J. Int. Meas. Confed.* 104 (2017) 243–252. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.03.035>.
- [77] T. Chudoba, P. Schwaller, R. Rabe, J.M. Breguet, J. Michler, Comparison of nanoindentation results obtained with Berkovich and cube-corner indenters, no: *Philos. Mag.*, 2006: lpp. 5265–5283. <https://doi.org/10.1080/14786430600746424>.
- [78] E. Jansons, K.A. Gross, J. Lungevics, L. Pluduma, The Influence of Ice Texture on Sliding Over Ice, *Latv. J. Phys. Tech. Sci.* 55 (2018) 54–64. <https://doi.org/10.2478/lpts-2018-0036>.
- [79] E. Jansons, K.A. Gross, The impact of ice texture on coefficient of friction for stainless steel with different surface roughness, no: *Key Eng. Mater.*, Trans Tech Publications Ltd, 2019: lpp. 308–312. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.800.308>.

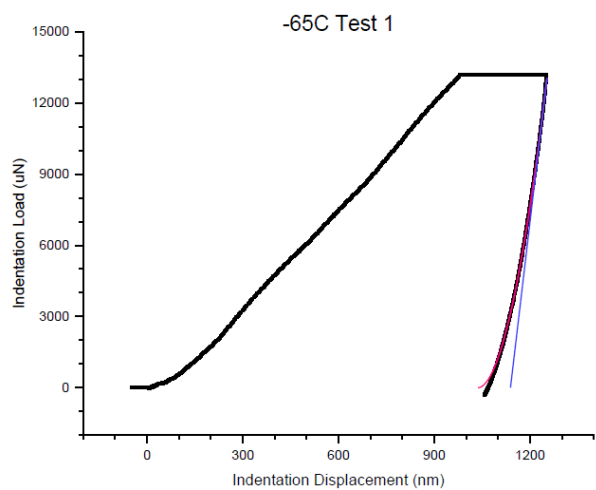
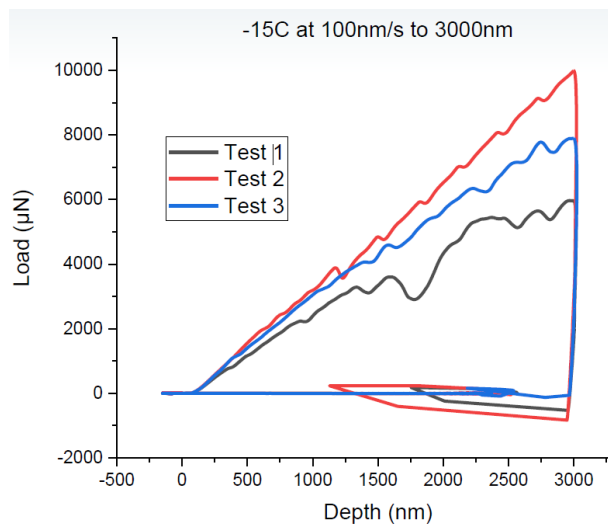
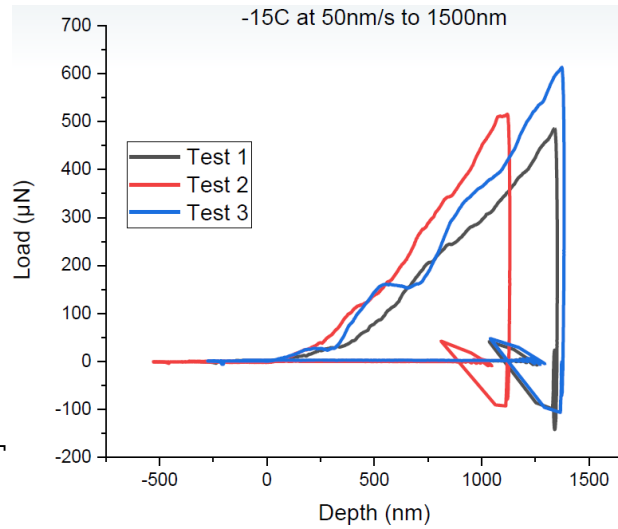
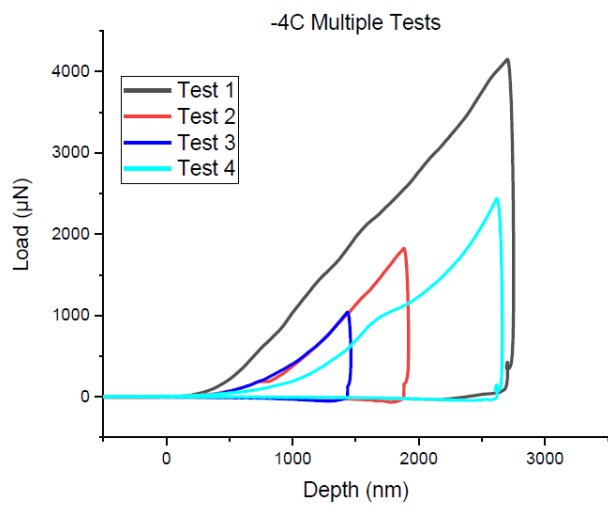


- [80] A. Pankratz, *Forecasting with Univariate Box-Jenkins Models*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA, 1983. <https://doi.org/10.1002/9780470316566>.
- [81] M. Lukášek, R. Vychodilová, *Accelerometry in sport*, *J. Hum. Sport Exerc.* 11 (2015) 125–136. <https://doi.org/10.14198/jhse.2016.11.Proc1.03>.
- [82] J. Neville, A. Wixted, D. Rowlands, D. James, *Accelerometers: An underutilized resource in sports monitoring*, no: *Proc. 2010 6th Int. Conf. Intell. Sensors, Sens. Networks Inf. Process. ISSNIP 2010*, 2010: lpp. 287–290. <https://doi.org/10.1109/ISSNIP.2010.5706766>.
- [83] D. V. Thiel, A.K. Sarkar, *Swing profiles in sport: An accelerometer analysis*, no: *Procedia Eng., Elsevier Ltd*, 2014: lpp. 624–629. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.06.106>.
- [84] ISO - ISO 9000:2005 - Quality management systems — Fundamentals and vocabulary, (b.g.). <https://www.iso.org/standard/42180.html> (skatīts 2021. gada 14. aprīlī).
- [85] E. Širons, J. Rudzītis, I. Odītis, *Vispārīgās metroloģijas pamatkurss*, RTU, Rīga, 2008.
- [86] A. Valtera redakcijā, *Fizika, Zvaigzne*, Rīga, 1992.
- [87] RTU, *Mērījumu rezultātu matemātiskās apstrādes pamati*, b.g. [https://estudijas.rtu.lv/pluginfile.php/1475390/mod\\_resource/content/1/Matem\\_apstr1.pdf](https://estudijas.rtu.lv/pluginfile.php/1475390/mod_resource/content/1/Matem_apstr1.pdf) (skatīts 2021. gada 26. maijā).
- [88] J. Rudzītis, R. Laaenots, *Fundamentals of measurement*, Rīga, 2007.
- [89] Rīgas Tehniskā universitāte. Inženiermatemātikas katedra. *Lekciju konspekts: Nelineāra regresija*. [https://estudijas.rtu.lv/pluginfile.php/634599/mod\\_resource/content/0/Matematiska\\_statistika/Nelineara\\_regresija.pdf](https://estudijas.rtu.lv/pluginfile.php/634599/mod_resource/content/0/Matematiska_statistika/Nelineara_regresija.pdf), Rīga, b.g.
- [90] A. Seymour-Pierce, B. Lishman, P. Sammonds, *Recrystallization and damage of ice in winter sports*, *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.* 375 (2017) 20150353. <https://doi.org/10.1098/rsta.2015.0353>.
- [91] S. School of Physics, *Errors and Error Estimation Errors, precision and accuracy: why study them?*, Sydney, b.g. [https://www.animations.physics.unsw.edu.au/sf/toolkits/Errors\\_and\\_Error\\_Estimation.pdf](https://www.animations.physics.unsw.edu.au/sf/toolkits/Errors_and_Error_Estimation.pdf) (skatīts 2020. gada 24. augustā).
- [92] A. Davydenko, R. Fildes, *Forecast error measures: Critical review and practical recommendations*, *Bus. Forecast. Pract. Probl. Solut.* (2016) 1–12. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4539.5281>.
- [93] O. Krastiņš, *Statistika un ekonometrija, Mācību grāmata augstskolām.*, Rīga, 1998. [http://ezis.appspot.com/Statistika/d.00\\_ievads.htm](http://ezis.appspot.com/Statistika/d.00_ievads.htm) (skatīts 2020. gada 1. jūlijā).
- [94] R.L. Mason, R.F. Gunst, J.L. Hess, *Statistical Design and Analysis of Experiments, with Applications to Engineering and Science*, Second edition, A JOHN WILEY & SONS PUBLICATION, New Jersey, 2003. <https://www.abebooks.com/9780471372165/Statistical-Design-Analysis-Experiments-Applications-0471372161/plp> (skatīts 2020. gada 30. novembrī).
- [95] M.H. Kutner, C.J. Nachtsheim, J. Neter, W. Li, *Applied Linear Statistical Models Fifth Edition*, 5-ā red., McGraw-Hill/Irwin, New York, 2005.

- [96] J. Frost, *Regression Analysis: An Intuitive Guide for Using and Interpreting Linear Models*, Statistics By Jim Publishing, 2019.
- [97] L. Schroeder, *Understanding regression analysis: an introductory guide*, 1986. <https://archive.org/details/understandingreg00larr/page/32/mode/2up> (skatīts 2020. gada 1. jūlijā).
- [98] Standardized Regression Coefficient - an overview | ScienceDirect Topics, (b.g.). <https://www.sciencedirect.com/topics/mathematics/standardized-regression-coefficient> (skatīts 2021. gada 2. martā).
- [99] M. Gilliland, *The Business Forecasting Deal: Exposing Myths, Eliminating Bad Practices, Providing Practical Solutions: Forecasting FAQs*, no: Bus. Forecast. Deal, John Wiley & Sons, Inc., 2015: lpp. 193–246. <https://doi.org/10.1002/9781119199885.app1>.
- [100] ISO 3274:1996 - Geometrical Product Specifications (GPS) — Surface texture: Profile method — Nominal characteristics of contact (stylus) instruments, (b.g.). <https://www.iso.org/standard/1916.html> (skatīts 2020. gada 1. jūlijā).
- [101] I. Velkavrh, J. Voyer, T. Wright, J. Lungevičs, E. Jansons, I. Boiko, Variations of ice friction regimes in relation to surface topography and applied operating parameters, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 1140 (2021) 012033. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1140/1/012033>.
- [102] Velkavrh, Lungevičs, Jansons, Klien, Voyer, Ausserer, The Influence of Isotropic Surface Roughness of Steel Sliders on Ice Friction Under Different Testing Conditions, *Lubricants.* 7 (2019) 106. <https://doi.org/10.3390/lubricants7120106>.
- [103] J. Lungevics, E. Jansons, I. Boiko, I. Velkavrh, J. Voyer, T. Wright, A Holistic Approach Towards Surface Topography Analyses for Ice Tribology Applications, *Front. Mech. Eng.* 7 (2021) 56. <https://doi.org/10.3389/FMECH.2021.691485>.
- [104] The University of Arizona, Lekciju konspekts: Water Vapor in Air, b.g. [http://www.atmo.arizona.edu/students/courselinks/spring08/atmo336s1/courses/fall13/atmo551a/Site/ATMO\\_451a\\_551a\\_files/WaterVapor.pdf](http://www.atmo.arizona.edu/students/courselinks/spring08/atmo336s1/courses/fall13/atmo551a/Site/ATMO_451a_551a_files/WaterVapor.pdf) (skatīts 2020. gada 3. septembrī).

# PIELIKUMI

Uzņēmumā "Bruker" eksperimentos iegūtie neapstrādātie ledus cietības dati pie  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $-65\text{ }^{\circ}\text{C}$  ledus temperatūrām



## Reālu apstākļu eksperimentos iegūtie mērījumu rezultāti

Eksperiments Nr.1; 9;									
	Laiks 1.posmā, s	Ātrums 1.posmā, m/s	Laiks starppos mā, s	Laiks 2.posmā, s	Ātrums 2.posmā, m/s	Vid. ātr., m/s	Gaisa mitrums, %	Gaisa temp., °C	Ledus temp., °C
1	0.840	2.381	3.928	3.993	9.650	6.011	90.0	7.7	-2.8
2	0.836	2.392	3.895	3.995	9.730	6.008	90.2	7.8	-2.7
3	0.835	2.395	3.889	3.992	9.770	6.012	90.0	7.9	-2.6
4	0.836	2.392	3.886	3.990	9.760	6.015	90.2	7.8	-2.4
5	0.837	2.389	3.887	3.991	9.790	6.014	90.2	8.0	-2.5
6	0.837	2.389	3.888	3.992	9.790	6.012	89.6	8.1	-2.6
7	0.835	2.395	3.888	3.991	9.830	6.014	89.8	8.2	-2.5
8	0.838	2.387	3.886	3.989	9.830	6.017	91.0	8.3	-2.5
9	0.838	2.387	3.887	3.991	9.790	6.014	90.4	8.3	-2.4
10	0.836	2.392	3.885	3.990	9.740	6.015	91.2	8.0	-2.5
11	0.831	2.407	3.882	3.986	9.770	6.021	91.0	8.1	-2.4
12									
vid.	0.836	2.391	3.888	3.991	9.781	6.013	90	8.1	-2.5
Standartnovirze	0.002	0.004	0.013	0.002	0.053	0.003	0.5	0.2	0.1
Absolūtā kļūda	0.004	0.010	0.029	0.004	0.120	0.006	1.071	0.457	0.272
Mērinstrumenta precizitāte	0.000	0.00033	0.000	0.000	0.000	0.000	1.960	0.980	0.653
$\Delta x$							2.233	1.081	0.708
Relatīvā kļūda				0.10	1.23	0.10	2.47	13.43	-28.20

Eksperiments Nr.2; 9; beta 0.95									
	Laiks 1.posmā, s	Ātrums 1.posmā, m/s	Laiks starppos mā, s	Laiks 2.posmā, s	Ātrums 2.posmā, m/s	Vid. ātr., m/s	Gaisa mitrums, %	Gaisa temp., °C	Ledus temp., °C
1	0.834	2.398	3.889	3.983	9.770	6.026	95.1	1.7	-4.0
2	0.833	2.401	3.881	3.984	9.810	6.024	95.1	1.6	-4.0
3	0.833	2.401	3.880	3.982	9.860	6.027	95.5	1.8	-4.0
4	0.833	2.401	3.879	3.981	9.860	6.029	95.3	2.2	-4.1
5	0.834	2.398	3.882	3.984	9.810	6.024	95.1	2.4	-3.9
6	0.832	2.404	3.878	3.980	9.860	6.030	95.1	2.5	-4.0
7	0.831	2.407	3.877	3.981	9.830	6.029	95.5	2.2	-4.0
8	0.831	2.407	3.877	3.980	9.830	6.030	95.3	2.4	-4.1
9	0.831	2.407	3.877	3.980	9.860	6.030	95.3	2.3	-4.0
10	0.831	2.407	3.875	3.979	9.840	6.032	95.0	2.3	-3.9
11	0.831	2.407	3.877	3.980	9.840	6.030	95.1	2.2	-4.0
12	0.832	2.403	3.879	3.981	9.834	6.028	95.2	2.1	-4.0
vid.	0.832	2.403	3.879	3.982	9.840	6.028	95	2.2	-4.0
Standartnovirze	0.001	0.004	0.004	0.002	0.030	0.003	0.2	0.3	0.1
Absolūtā kļūda	0.003	0.008	0.009	0.004	0.067	0.006	0.379	0.687	0.143
Mērinstrumenta precizitāte	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.960	0.980	0.653
$\Delta x$							1.996	1.197	0.669
Relatīvā kļūda				0.10	0.69	0.10	2.10	54.65	-16.72

Eksperiments Nr.3; 9; beta 0.95									
	Laiks 1.posmā, s	Ātrums 1.posmā, m/s	Laiks starpposm ā, s	Laiks 2.posmā, s	Ātrums 2.posmā, m/s	Vid. ātr., m/s	Gaisa mitrums, %	Gaisa temp., °C	Ledus temp., °C
1	0.833	2.401	3.882	3.986	9.830	6.021	95.5	1.8	-4.0
2	0.832	2.404	3.876	3.980	9.830	6.030	95.4	2.0	-4.1
3	0.831	2.407	3.875	3.979	9.830	6.032	95.3	2.0	-4.3
4	0.831	2.407	3.875	3.979	9.800	6.032	95.2	1.6	-4.5
5	0.832	2.404	3.877	3.980	9.860	6.030	94.8	1.5	-4.4
6	0.832	2.404	3.876	3.980	9.810	6.030	95.1	1.3	-4.3
7	0.832	2.404	3.876	3.980	9.860	6.030	95.5	1.1	-4.1
8	0.833	2.401	3.878	3.982	9.830	6.027	95.4	1.4	-4.0
9	0.833	2.401	3.879	3.983	9.820	6.026	95.3	1.5	-4.3
10	0.834	2.398	3.880	3.983	9.890	6.026	95.1	1.5	-4.1
11	0.831	2.407	3.877	3.980	9.860	6.030	95.2	1.5	-4.2
12	0.832	2.403	3.877	3.981	9.838	6.028	95.3	1.6	-4.2
vid.	0.832	2.404	3.877	3.981	9.839	6.029	95.2	1.5	-4.2
Standartnovirze	0.001	0.003	0.002	0.002	0.027	0.003	0.2	0.3	0.2
Absolūtā kļūda	0.002	0.006	0.005	0.005	0.060	0.008	0.465	0.623	0.371
Mērinstrumenta precizitāte	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.960	0.980	0.653
$\Delta x$							2.014	1.162	0.751
Relatīvā kļūda				0.13	0.61	0.13	2.12	75.42	-17.76

Eksperiments Nr.4; 9; beta 0.95									
	Laiks 1.posmā, s	Ātrums 1.posmā, m/s	Laiks starpposm ā, s	Laiks 2.posmā, s	Ātrums 2.posmā, m/s	Vid. ātr., m/s	Gaisa mitrums, %	Gaisa temp., °C	Ledus temp., °C
1	0.845	2.367	3.897	4.000	9.860	6.000	96.9	8.6	-1.0
2	0.845	2.367	3.896	3.999	9.870	6.002	96.8	8.4	-1.0
3	0.846	2.364	3.898	4.003	9.890	5.996	96.3	8.4	-1.1
4	0.847	2.361	3.898	4.003	9.880	5.996	95.7	8.1	-1.0
5	0.846	2.364	3.898	4.001	9.890	5.999	95.3	8.2	-1.0
6	0.847	2.361	3.898	4.003	9.880	5.996	95.2	8.0	-1.0
7	0.846	2.364	3.897	4.001	9.880	5.999	94.7	8.0	-1.2
8	0.845	2.367	3.896	4.001	9.880	5.999	94.0	7.9	-1.2
9	0.844	2.370	3.891	3.995	9.850	6.008	93.7	8.0	-1.1
10	0.846	2.364	3.900	4.003	9.850	5.996	93.6	7.8	-1.2
11	0.847	2.361	3.900	4.004	9.820	5.994	94.1	7.9	-1.2
12	0.846	2.365	3.897	4.001	9.868	5.998	95.1	8.1	-1.1
vid.	0.846	2.364	3.898	4.002	9.879	5.998	95	8.1	-1.1
Standartnovirze	0.001	0.003	0.002	0.003	0.015	0.004	1.2	0.2	0.1
Absolūtā kļūda	0.002	0.006	0.005	0.006	0.034	0.009	2.618	0.546	0.197
Mērinstrumenta precizitāte	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.960	0.980	0.653
$\Delta x$							3.270	1.122	0.682
Relatīvā kļūda				0.14	0.34	0.14	3.44	13.90	-62.04

Eksperiments Nr.5; 9;									
	Laiks 1.posmā, s	Ātrums 1.posmā, m/s	Laiks starpposm ā, s	Laiks 2.posmā, s	Ātrums 2.posmā, m/s	Vid. ātr., m/s	Gaisa mitrums, %	Gaisa temp., °C	Ledus temp., °C
1	0.844	2.370	3.905	4.008	9.900	5.988	94.0	10.3	-1.5
2	0.842	2.375	3.894	3.997	9.850	6.005	94.1	10.2	-1.4
3	0.843	2.372	3.892	3.995	9.890	6.008	93.0	10.2	-1.5
4	0.844	2.370	3.895	3.998	9.920	6.003	92.7	9.9	-1.4
5	0.843	2.372	3.894	3.997	9.900	6.005	91.6	10.1	-1.5
6	0.844	2.370	3.894	3.996	9.930	6.006	91.7	9.9	-1.5
7	0.843	2.372	3.893	3.995	9.950	6.008	91.6	9.9	-1.5
8	0.844	2.370	3.894	3.996	9.980	6.006	91.6	10.0	-1.6
9	0.844	2.370	3.894	3.997	9.890	6.005	91.4	10.1	-1.5
10	0.844	2.370	3.895	3.998	9.900	6.003	91.5	10.2	-1.5
11									
12									
vid.	0.844	2.371	3.894	3.997	9.915	6.005	92	10.1	-1.5
Standartnovirze	0.001	0.002	0.004	0.004	0.036	0.006	1.0	0.1	0.1
Absolūtā kļūda	0.002	0.004	0.008	0.009	0.081	0.013	2.266	0.316	0.122
Mērinstrumenta precizitāte	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.960	0.980	0.653
$\Delta x$							2.996	1.030	0.665
Relatīvā kļūda				0.21	0.82	0.21	3.25	10.24	-44.64

Eksperiments Nr.6; 9; beta 0.95									
	Laiks 1.posmā, s	Ātrums 1.posmā, m/s	Laiks starpposm ā, s	Laiks 2.posmā, s	Ātrums 2.posmā, m/s	Vid. ātr., m/s	Gaisa mitrums, %	Gaisa temp., °C	Ledus temp., °C
1	0.842	2.375	3.893	3.996	9.920	6.006	91.0	6.5	-2.0
2	0.843	2.372	3.894	3.996	9.920	6.006	90.8	6.5	-2.0
3	0.844	2.370	3.896	3.996	9.210	6.006	89.4	6.2	-2.2
4	0.843	2.372	3.900	4.003	9.870	5.996	88.6	6.1	-2.2
5	0.842	2.375	3.893	3.994	9.980	6.009	88.2	6.1	-2.0
6	0.842	2.375	3.893	3.995	9.930	6.008	87.5	6.3	-1.9
7	0.842	2.375	3.892	3.993	9.980	6.011	87.4	6.0	-2.0
8	0.843	2.372	3.893	3.996	9.920	6.006	87.6	6.2	-2.0
9	0.842	2.375	3.894	3.995	9.940	6.008	87.6	6.0	-2.0
10	0.842	2.375	3.896	3.994	9.970	6.009	87.4	6.0	-2.0
11									
12									
vid.	0.843	2.374	3.894	3.995	9.864	6.006	88	6.2	-2.0
Standartnovirze	0.001	0.002	0.002	0.003	0.232	0.004	1.3	0.2	0.1
Absolūtā kļūda	0.002	0.004	0.005	0.006	0.525	0.009	2.987	0.410	0.203
Mērinstrumenta precizitāte	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.960	0.980	0.653
$\Delta x$							3.572	1.062	0.684
Relatīvā kļūda				0.16	5.32	0.15	4.05	17.26	-33.65

Eksperiments Nr.7 ; 9; beta 0.95									
	Laiks 1.posmā, s	Ātrums 1.posmā, m/s	Laiks starpposm ā, s	Laiks 2.posmā, s	Ātrums 2.posmā, m/s	Vid. ātr., m/s	Gaisa mitrums, %	Gaisa temp., °C	Ledus temp., °C
1	0.844	2.370	3.893	3.998	9.850	6.003	93.0	9.5	-1.2
2	0.845	2.367	3.896	4.001	9.870	5.999	93.4	9.4	-1.2
3	0.846	2.364	3.902	4.004	9.890	5.994	93.4	9.4	-1.2
4	0.846	2.364	3.896	3.999	9.870	6.002	94.0	9.1	-1.2
5	0.846	2.364	3.901	4.003	9.890	5.996	94.5	9.2	-1.0
6	0.846	2.364	3.905	4.006	9.880	5.991	95.0	9.6	-1.0
7	0.846	2.364	3.903	4.003	9.880	5.996	95.7	9.7	-1.2
8	0.845	2.367	3.896	4.001	9.880	5.999	95.8	9.9	-1.1
9	0.844	2.370	3.900	4.003	9.850	5.996	95.7	9.6	-1.0
10	0.846	2.364	3.902	4.004	9.880	5.994	95.4	9.6	-1.2
11	0.846	2.364	3.910	4.008	9.850	5.988	95.7	9.5	-1.0
12	0.845	2.366	3.900	4.003	9.872	5.996	94.7	9.5	-1.1
vid.	0.846	2.365	3.900	4.003	9.877	5.996	95	9.5	-1.1
Standartnovirze	0.001	0.002	0.004	0.002	0.014	0.004	1.0	0.2	0.1
Absolūtā kļūda	0.002	0.005	0.009	0.006	0.032	0.008	2.312	0.505	0.203
Mērinstrumenta precizitāte	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.960	0.980	0.653
Δx							3.031	1.103	0.684
Relatīvā kļūda				0.14	0.33	0.14	3.20	11.61	-61.65

Eksperiments Nr.8. 9; beta 0.95									
	Laiks 1.posmā, s	Ātrums 1.posmā, m/s	Laiks starpposm ā, s	Laiks 2.posmā, s	Ātrums 2.posmā, m/s	Vid. ātr., m/s	Gaisa mitrums, %	Gaisa temp., °C	Ledus temp., °C
1	0.857	2.334	3.917	4.023	9.750	5.966	85.6	-3.2	-4.4
2	0.856	2.336	3.916	4.020	9.770	5.970	85.4	-3.1	-4.3
3	0.857	2.334	3.917	4.022	9.740	5.967	85.7	-3.2	-4.6
4	0.859	2.328	3.919	4.025	9.710	5.963	85.8	-3.1	-4.5
5	0.86	2.326	3.923	4.028	9.750	5.958	85.9	-3.1	-4.5
6	0.859	2.328	3.918	4.023	9.770	5.966	86.0	-3.0	-4.5
7	0.859	2.328	3.920	4.025	9.760	5.963	85.8	-3.1	-4.5
8	0.858	2.331	3.917	4.022	9.730	5.967	85.7	-3.2	-4.4
9	0.862	2.320	3.923	4.028	9.760	5.958	85.9	-3.0	-4.4
10	0.859	2.328	3.923	4.028	9.710	5.958	86.0	-3.0	-4.5
11	0.859	2.328	3.918	4.025	9.760	5.963	86.0	-3.0	-4.5
12	0.859	2.329	3.919	4.024	9.746	5.964	85.8	-3.1	-4.5
vid.	0.859	2.330	3.919	4.025	9.748	5.963	86	-3.1	-4.5
Standartnovirze	0.002	0.005	0.003	0.003	0.022	0.004	0.2	0.1	0.1
Absolūtā kļūda	0.004	0.010	0.006	0.006	0.050	0.010	0.402	0.175	0.181
Mērinstrumenta precizitāte	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.960	0.980	0.653
Δx							2.001	0.996	0.678
Relatīvā kļūda				0.16	0.52	0.16	2.33	-32.32	-15.17



Eksperiments Nr. 9; beta 0.95									
	Laiks 1.posmā, s	Ātrums 1.posmā, m/s	Laiks starpposm ā, s	Laiks 2.posmā, s	Ātrums 2.posmā, m/s	Vid. ātr., m/s	Gaisa mitrums, %	Gaisa temp., °C	Ledus temp., °C
1	0.846	2.364	3.900	4.005	9.700	5.993	84.6	-2.1	-2.0
2	0.845	2.367	3.897	4.001	9.770	5.999	84.4	-2.2	-2.0
3	0.846	2.364	3.901	4.005	9.730	5.993	84.6	-2.4	-2.1
4	0.847	2.361	3.902	4.007	9.730	5.990	84.0	-2.2	-2.1
5	0.848	2.358	3.905	4.010	9.760	5.985	83.8	-2.0	-2.0
6	0.848	2.358	3.903	4.009	9.740	5.987	83.6	-2.2	-1.9
7	0.847	2.361	3.900	4.003	9.720	5.996	83.8	-1.8	-2.0
8	0.848	2.358	3.902	4.006	9.740	5.991	83.8	-2.1	-2.0
9	0.848	2.358	3.900	4.003	9.730	5.996	84.0	-2.0	-2.2
10	0.847	2.361	3.901	4.005	9.740	5.993	84.2	-2.1	-2.2
11									
12									
vid.	0.847	2.361	3.901	4.005	9.740	5.992	84.0	-2.1	-2.1
Standartnovirze	0.001	0.003	0.002	0.003	0.020	0.004	0.3	0.2	0.1
Absolūtā kļūda	0.002	0.007	0.005	0.006	0.044	0.009	0.762	0.342	0.208
Mērinstrumenta precizitāte	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.960	0.980	0.653
$\Delta x$							2.103	1.038	0.686
Relatīvā kļūda				0.16	0.45	0.16	2.50	-49.17	-33.36

Eksperiments Nr.10. 9; beta 0.95									
	Laiks 1.posmā, s	Ātrums 1.posmā, m/s	Laiks starpposm ā, s	Laiks 2.posmā, s	Ātrums 2.posmā, m/s	Vid. ātr., m/s	Gaisa mitrums, %	Gaisa temp., °C	Ledus temp., °C
1	0.849	2.356	3.905	4.010	9.700	5.985	85.7	-1.9	-2.8
2	0.848	2.358	3.902	4.007	9.730	5.990	86.0	-2.0	-2.9
3	0.85	2.353	3.907	4.015	9.730	5.978	86.1	-2.0	-3.2
4	0.849	2.356	3.904	4.009	9.720	5.987	85.7	-2.2	-3.3
5	0.846	2.364	3.901	4.002	9.760	5.997	85.2	-2.0	-2.9
6	0.850	2.353	3.906	4.011	9.720	5.984	84.6	-2.0	-3.1
7	0.847	2.361	3.901	4.005	9.770	5.993	84.2	-2.1	-3.2
8	0.850	2.353	3.904	4.009	9.770	5.987	84.4	-2.1	-2.8
9	0.850	2.354	3.907	4.011	9.730	5.984	85.0	-2.0	-2.8
10	0.848	2.358	3.903	4.006	9.740	5.991	85.2	-2.2	-2.8
11	0.849	2.357	3.904	4.009	9.737	5.987	85.2	-2.0	-3.0
12									
vid.	0.849	2.356	3.904	4.009	9.741	5.987	85	-2.1	-3.0
Standartnovirze	0.001	0.004	0.002	0.004	0.023	0.005	0.6	0.1	0.2
Absolūtā kļūda	0.003	0.009	0.005	0.008	0.052	0.012	1.427	0.208	0.426
Mērinstrumenta precizitāte	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.960	0.980	0.653
$\Delta x$							2.425	1.002	0.780
Relatīvā kļūda				0.21	0.54	0.21	2.85	-48.56	-26.01

Eksperiments Nr.11; 9; beta 0.95									
	Laiks 1.posmā, s	Ātrums 1.posmā, m/s	Laiks starpposm ā, s	Laiks 2.posmā, s	Ātrums 2.posmā, m/s	Vid. ātr., m/s	Gaisa mitrums, %	Gaisa temp., °C	Ledus temp., °C
1	0.875	2.286	3.929	4.033	9.760	5.951	57.0	-3.7	-5.2
2	0.874	2.288	3.936	4.041	9.710	5.939	57.2	-3.6	-5.3
3	0.874	2.288	3.935	4.040	9.730	5.941	57.5	-3.5	-5.1
4	0.873	2.291	3.932	4.036	9.750	5.946	57.4	-3.5	-5.2
5	0.872	2.294	3.930	4.035	9.790	5.948	56.6	-3.7	-5.0
6	0.873	2.291	3.934	4.038	9.770	5.944	55.8	-3.8	-4.9
7	0.872	2.294	3.933	4.038	9.730	5.944	54.5	-3.3	-4.7
8	0.873	2.291	3.938	4.042	9.730	5.938	53.6	-3.4	-4.8
9	0.872	2.294	3.936	4.041	9.760	5.939	54.0	-3.4	-4.6
10	0.875	2.286	3.918	4.032	9.760	5.952	54.0	-3.4	-4.7
11	0.872	2.294	3.932	4.037	9.749	5.946	55.8	-3.5	-5.0
12									
vid.	0.871	2.291	3.933	4.038	9.749	5.944	56	-3.5	-4.9
Standartnovirze	0.001	0.003	0.006	0.004	0.024	0.005	1.5	0.2	0.2
Absolūtā kļūda	0.003	0.007	0.013	0.008	0.054	0.012	3.389	0.351	0.528
Mērinstrumenta precizitāte	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.960	0.980	0.653
$\Delta x$							3.915	1.041	0.840
Relatīvā kļūda				0.20	0.55	0.20	7.02	-29.63	-17.05

Eksperiments Nr.12; 9; beta 0.95									
	Laiks 1.posmā, s	Ātrums 1.posmā, m/s	Laiks starpposm ā, s	Laiks 2.posmā, s	Ātrums 2.posmā, m/s	Vid. ātr., m/s	Gaisa mitrums, %	Gaisa temp., °C	Ledus temp., °C
1	0.869	2.301	3.936	4.041	9.710	5.939	61.0	-3.6	-6.2
2	0.868	2.304	3.933	4.037	9.720	5.945	61.2	-3.6	-6.3
3	0.869	2.301	3.935	4.040	9.730	5.941	60.8	-3.5	-6.2
4	0.872	2.294	3.938	4.043	9.700	5.936	60.8	-3.6	-6.1
5	0.871	2.296	3.935	4.040	9.740	5.941	61.0	-3.7	-5.8
6	0.872	2.294	3.939	4.044	9.740	5.935	61.2	-3.8	-5.9
7	0.872	2.294	3.938	4.043	9.740	5.936	62.0	-3.5	-6.0
8	0.875	2.286	3.943	4.048	9.690	5.929	62.5	-3.4	-6.0
9	0.873	2.291	3.943	4.047	9.760	5.930	63.0	-3.2	-6.1
10	0.871	2.296	3.939	4.044	9.720	5.935	62.8	-3.4	-6.0
11	0.871	2.296	3.938	4.043	9.725	5.937	61.5	-3.5	-6.1
12									
vid.	0.872	2.296	3.938	4.043	9.725	5.937	62	-3.5	-6.0
Standartnovirze	0.002	0.006	0.003	0.003	0.021	0.005	0.8	0.2	0.1
Absolūtā kļūda	0.005	0.012	0.007	0.008	0.048	0.011	1.847	0.365	0.323
Mērinstrumenta precizitāte	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.960	0.980	0.653
$\Delta x$							2.693	1.046	0.729
Relatīvā kļūda				0.19	0.49	0.19	4.37	-29.67	-12.05

Eksperiments Nr.13; 9; beta 0.95									
	Laiks 1.posmā, s	Ātrums 1.posmā, m/s	Laiks starppos mā, s	Laiks 2.posmā, s	Ātrums 2.posmā, m/s	Vid. ātr., m/s	Gaisa mitrums, %	Gaisa temp., °C	Ledus temp., °C
1	0.868	2.304	3.920	4.028	9.730	5.958	77.4	-1.0	-5.0
2	0.866	2.309	3.918	4.026	9.720	5.961	77.0	-1.2	-5.1
3	0.872	2.294	3.927	4.030	9.460	5.955	76.7	-1.4	-5.2
4	0.871	2.296	3.925	4.034	9.450	5.949	77.4	-1.2	-5.3
5	0.864	2.315	3.916	4.021	9.680	5.969	77.8	-1.0	-5.2
6	0.860	2.326	3.915	4.026	9.790	5.961	77.8	-1.2	-5.1
7	0.866	2.309	3.922	4.026	9.750	5.961	79.0	-0.8	-5.0
8	0.864	2.315	3.918	4.020	9.800	5.970	78.7	-1.0	-4.9
9	0.866	2.309	3.920	4.025	9.780	5.963	78.6	-1.1	-5.0
10	0.866	2.309	3.919	4.024	9.740	5.964	78.0	-1.1	-5.0
11	0.866	2.309	3.920	4.026	9.690	5.962	77.8	-1.1	-5.1
12									
vid.	0.866	2.309	3.920	4.026	9.686	5.962	77.9	-1.1	-5.1
Standartnovirze	0.003	0.009	0.004	0.004	0.129	0.006	0.7	0.2	0.1
Absolūtā kļūda	0.008	0.021	0.009	0.009	0.291	0.014	1.611	0.350	0.264
Mērinstrumenta precizitāte	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.960	0.980	0.653
$\Delta x$							2.537	1.041	0.704
Relatīvā kļūda				0.23	3.01	0.33	3.26	-93.75	-13.85

Eksperiments Nr.14; 9; beta 0.95									
	Laiks 1.posmā, s	Ātrums 1.posmā, m/s	Laiks starpposm ā, s	Laiks 2.posmā, s	Ātrums 2.posmā, m/s	Vid. ātr., m/s	Gaisa mitrums, %	Gaisa temp., °C	Ledus temp., °C
1	0.871	2.296	3.938	4.043	9.740	5.936	70.8	-1.0	-4.4
2	0.866	2.309	3.929	4.033	9.740	5.951	70.9	-1.2	-4.6
3	0.869	2.301	3.931	4.036	9.760	5.946	70.7	-1.5	-4.2
4	0.869	2.301	3.931	4.035	9.760	5.948	70.4	-1.2	-3.7
5	0.867	2.307	3.929	4.034	9.750	5.949	70.5	-1.0	-4.0
6	0.867	2.307	3.929	4.033	9.740	5.951	69.5	-0.8	-3.6
7	0.868	2.304	3.929	4.034	9.740	5.949	69.2	-0.6	-3.8
8	0.865	2.312	3.924	4.038	9.730	5.944	69.1	-1.0	-4.0
9	0.866	2.309	3.928	4.032	9.790	5.952	69.2	-0.8	-4.1
10	0.871	2.296	3.941	4.035	9.750	5.948	69.4	-1.0	-4.2
11	0.868	2.304	3.931	4.035	9.750	5.948	70.0	-1.0	-4.1
12									
vid.	0.868	2.304	3.931	4.035	9.753	5.948	70	-1.0	-4.1
Standartnovirze	0.002	0.006	0.005	0.003	0.017	0.005	0.7	0.2	0.3
Absolūtā kļūda	0.005	0.012	0.011	0.007	0.038	0.011	1.605	0.539	0.664
Mērinstrumenta precizitāte	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.960	0.980	0.653
$\Delta x$							2.533	1.118	0.932
Relatīvā kļūda				0.18	0.39	0.18	3.62	-110.63	-22.95

## 3D zonu karšu rezultāti

RH 60 %		Gaisa temperatūra, °C							
Ledus temperatūra, °C		-4	-2	0	2	4	6	8	10
	-1	4,012	4,016	4,020	4,024	4,027	4,030	4,032	4,034
	-2	4,026	4,027	4,027	4,026	4,025	4,023	4,021	4,019
	-3	4,038	4,034	4,029	4,024	4,019	4,013	4,007	4,000
	-4	4,045	4,037	4,028	4,019	4,010	4,000	3,989	3,978
	-5	4,049	4,037	4,024	4,011	3,997	3,982	3,968	3,952
	-6	4,050	4,033	4,016	3,998	3,980	3,962	3,943	3,923

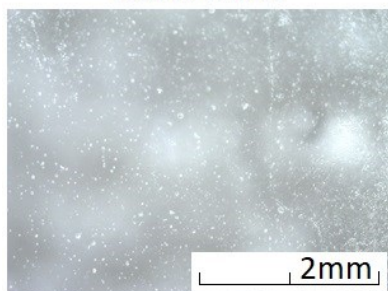
RH 70 %		Gaisa temperatūra, °C							
Ledus temperatūra, °C		-4	-2	0	2	4	6	8	10
	-1	4,003	4,007	4,011	4,015	4,018	4,021	4,023	4,025
	-2	4,017	4,018	4,018	4,017	4,016	4,014	4,012	4,010
	-3	4,029	4,025	4,020	4,015	4,010	4,004	3,998	3,991
	-4	4,036	4,028	4,019	4,010	4,001	3,991	3,980	3,969
	-5	4,040	4,028	4,015	4,002	3,988	3,973	3,959	3,944
	-6	4,041	4,024	4,007	3,989	3,971	3,953	3,934	3,914

RH 80 %		Gaisa temperatūra, °C							
Ledus temperatūra, °C		-4	-2	0	2	4	6	8	10
	-1	3,995	3,998	4,002	4,006	4,009	4,012	4,014	4,016
	-2	4,008	4,009	4,009	4,008	4,007	4,005	4,003	4,001
	-3	4,018	4,016	4,011	4,006	4,001	3,995	3,989	3,982
	-4	4,027	4,019	4,010	4,001	3,992	3,981	3,971	3,960
	-5	4,031	4,019	4,006	3,993	3,979	3,964	3,950	3,934
	-6	4,032	4,015	3,998	3,980	3,962	3,944	3,925	3,905

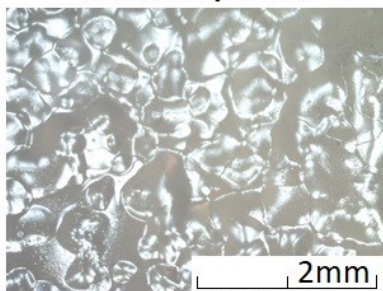
RH 90 %		Gaisa temperatūra, °C							
Ledus temperatūra, °C		-4	-2	0	2	4	6	8	10
	-1	3,985	3,989	3,993	3,997	4,000	4,002	4,005	4,007
	-2	3,999	4,000	4,000	3,999	3,998	3,996	3,994	3,992
	-3	4,011	4,007	4,002	3,997	3,992	3,986	3,980	3,973
	-4	4,018	4,010	4,001	3,992	3,983	3,973	3,962	3,951
	-5	4,022	4,010	3,997	3,984	3,970	3,955	3,941	3,926
	-6	4,023	4,006	3,989	3,971	3,953	3,935	3,916	3,896

## Ledus tekstūras eksperimentu dati

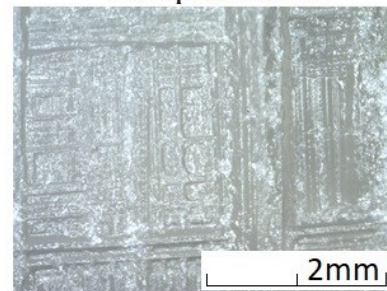
Gluds ledus



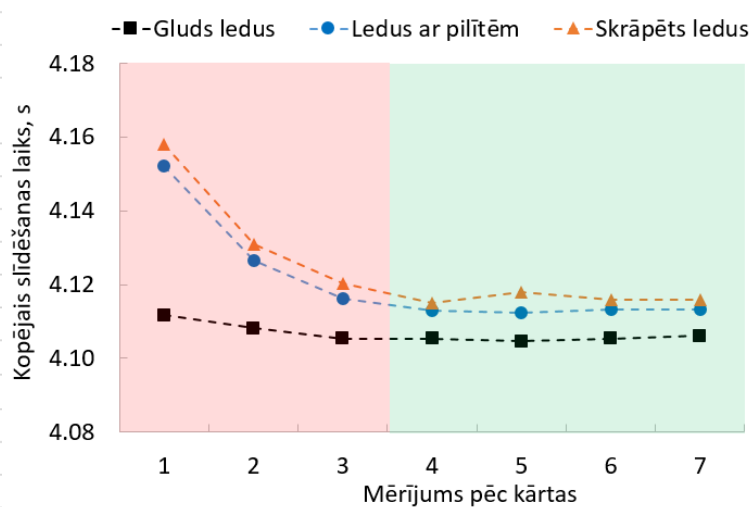
Ledus ar pilītēm



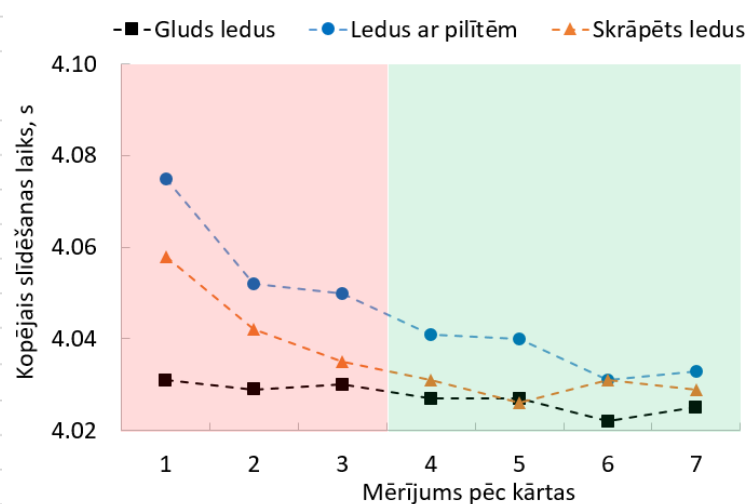
Skrāpēts ledus



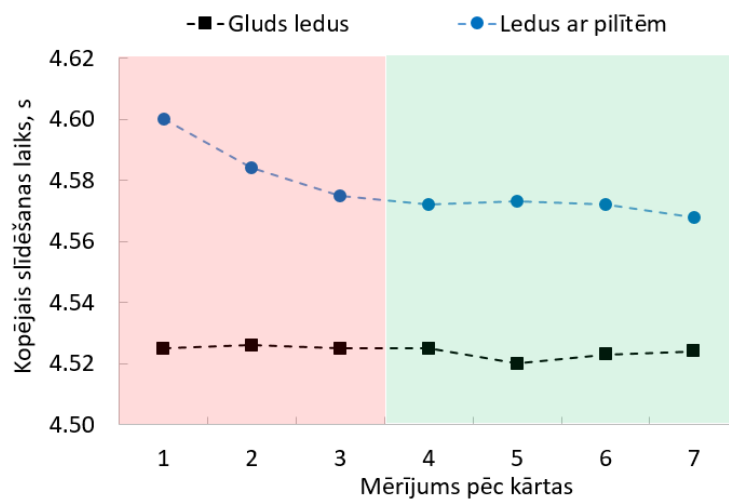
1. eksperiments; 69%; -7; -8			
Nr.p.k.	Vidējais slīdēšanas laiks, s		
	Gluds ledus	Ledus ar pilītēm	Skrāpēts ledus
1	4,112	4,158	4,158
2	4,108	4,137	4,131
3	4,105	4,126	4,120
4	4,105	4,113	4,115
5	4,105	4,112	4,118
6	4,105	4,113	4,116
7	4,106	4,113	4,116
AVG 4-7	4,105	4,113	4,116
1	0,15%	1,08%	1,00%
2	0,07%	0,58%	0,35%
3	0,00%	0,32%	0,10%



2. eksperiments; 72%; -3,5; -4,5			
Nr.p.k.	Vidējais slīdēšanas laiks, s		
	Gluds ledus	Ledus ar pilītēm	Skrāpēts ledus
1	4,031	4,075	4,058
2	4,029	4,052	4,042
3	4,030	4,050	4,035
4	4,027	4,041	4,031
5	4,027	4,040	4,026
6	4,022	4,031	4,031
7	4,025	4,033	4,029
AVG 4-7	4,025	4,036	4,029
1	0,14%	0,95%	0,71%
2	0,09%	0,39%	0,32%
3	0,12%	0,34%	0,14%



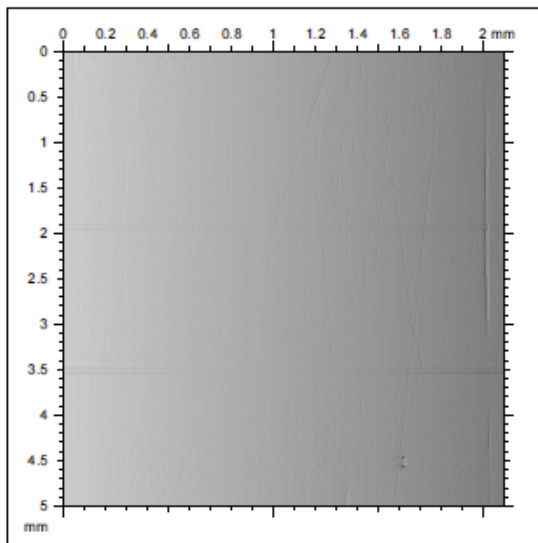
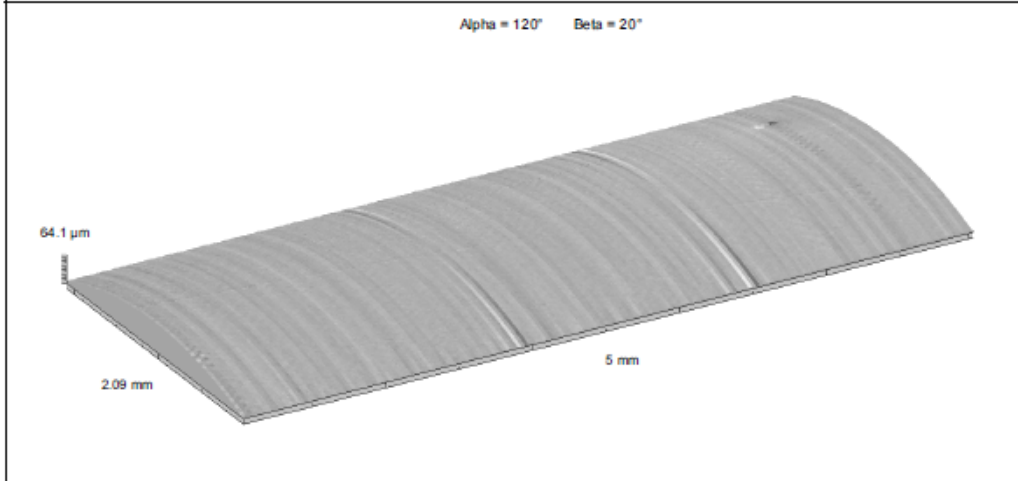
3. eksperiments; 70%; 3; -4			
Nr.p.k.	Vidējais slīdēšanas laiks, s		
	Gluds ledus	Ledus ar pilītēm	Skrāpēts ledus
1	4,525	4,600	
2	4,526	4,584	
3	4,525	4,575	
4	4,525	4,572	
5	4,520	4,573	
6	4,523	4,572	
7	4,524	4,568	
<b>AVG 4-7</b>	<b>4,523</b>	<b>4,571</b>	
1	0,04%	0,63%	
2	0,07%	0,28%	
3	0,04%	0,08%	



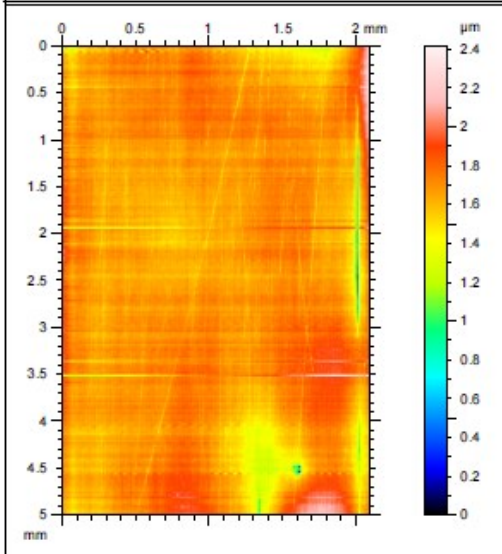
Raupjuma mērijumu protokolu piemēri pulētai un skrāpētai skeletona sliecei

**Pulēta skeletona sliece**

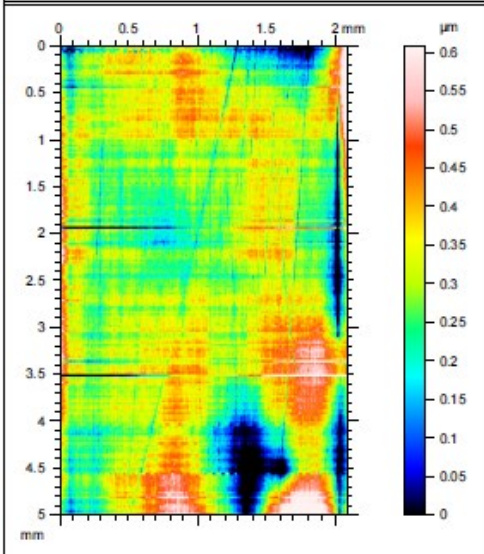
**Fotosimulācija**



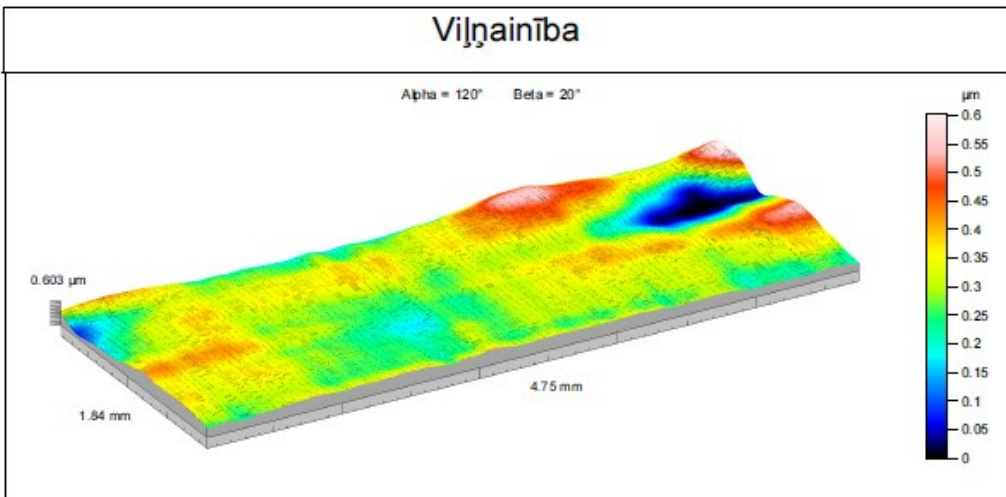
### Virsmas pēc formas atdalīšanas



### Virsmas pēc formas atdalīšanas un kļūdu atņemšanas

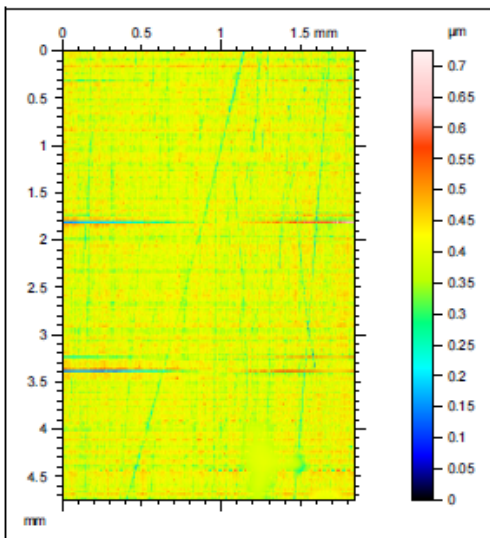
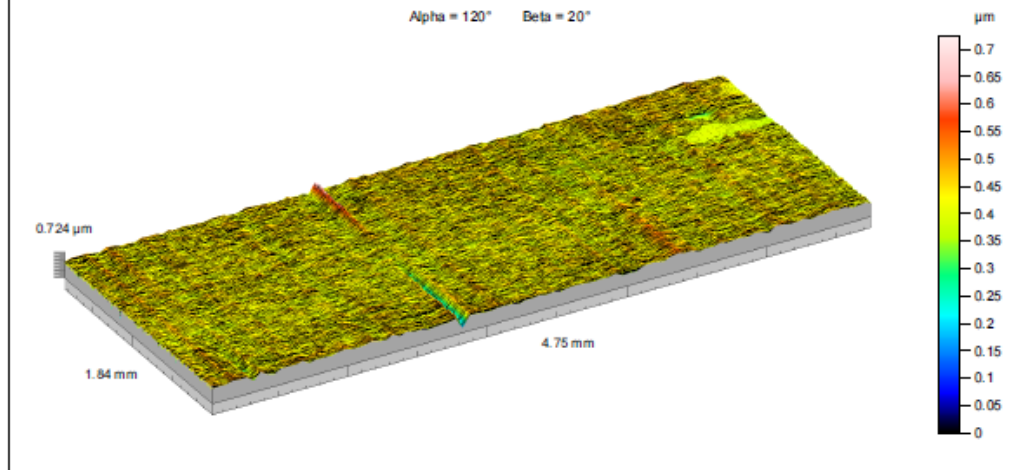


### Viļņainība





# Raupjums

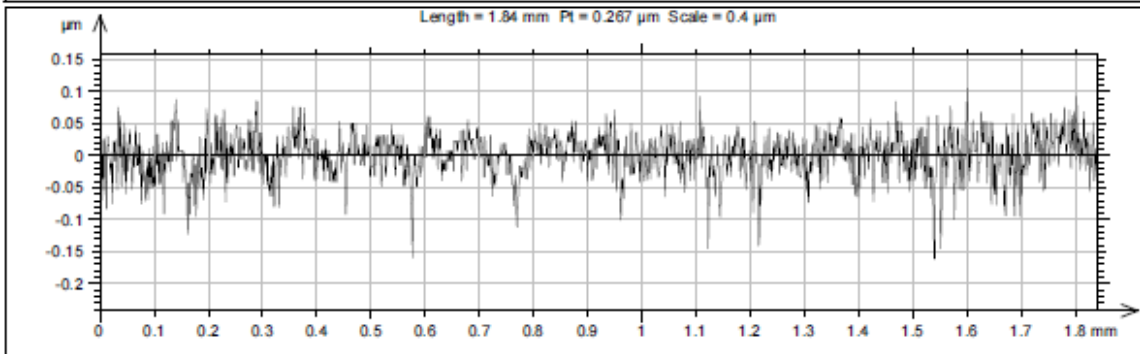
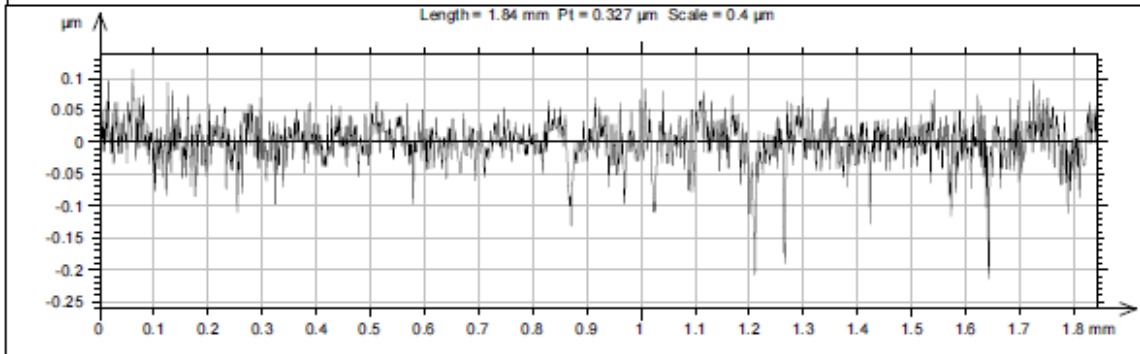


## 3D raupjuma parametri

```

Sa = 0.0321  $\mu\text{m}$ 
Sq = 0.0429  $\mu\text{m}$ 
Sp = 0.323  $\mu\text{m}$ 
Sv = 0.4  $\mu\text{m}$ 
St = 0.724  $\mu\text{m}$ 
Ssk = -0.656
Sku = 6.75
Sz = 0.679  $\mu\text{m}$ 
Smr = ***** (1  $\mu\text{m}$  under the highest peak)
Sdc = 0.0638  $\mu\text{m}$ 
Smnr = 0.0004 mm3/mm2
Smvr = 0.000323 mm3/mm2
STp = ***** (1  $\mu\text{m}$  under the highest peak)
SFTp = 0.0638  $\mu\text{m}$  (20%-80%)
SFC = 0 pks/mm2 (1  $\mu\text{m}$  ; 10  $\mu\text{m}$ )
Sds = 3079 pks/mm2
Str = 0.0564
Sal = 0.000609 mm
Std = 88 °
Sfd = 2.61
Sdg = 0.03  $\mu\text{m}/\mu\text{m}$ 
Sac = 0.0263 1/ $\mu\text{m}$ 
Sdr = 0.0451 %
Sk = 0.0893  $\mu\text{m}$ 
Spk = 0.0336  $\mu\text{m}$ 
Svk = 0.052  $\mu\text{m}$ 
Sr1 = 8.92 %
Sr2 = 88.5 %
Sbi = 0.165
Sci = 1.37
Svi = 0.138
Vv = 0.000196 mm3/mm2 (0.01 %)
Vm = 0.0004 mm3/mm2 (0.01 %)
Vmp = 4.65e-005 mm3/mm2
Vmc = 0.000285 mm3/mm2
Vvc = 4.59e-005 mm3/mm2
Vvv = 5.92e-006 mm3/mm2
    
```

## 2D raupjuma profili perpendikulāri slīdēšanas virzienam



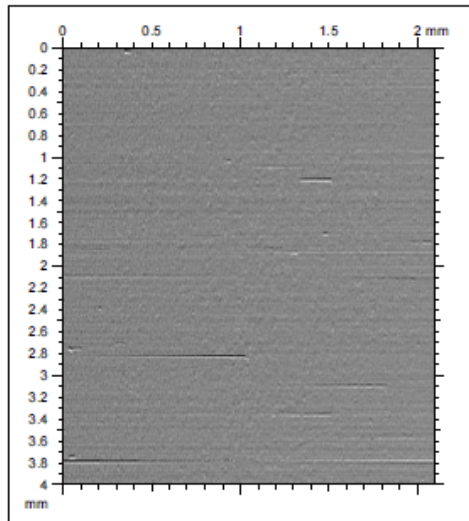
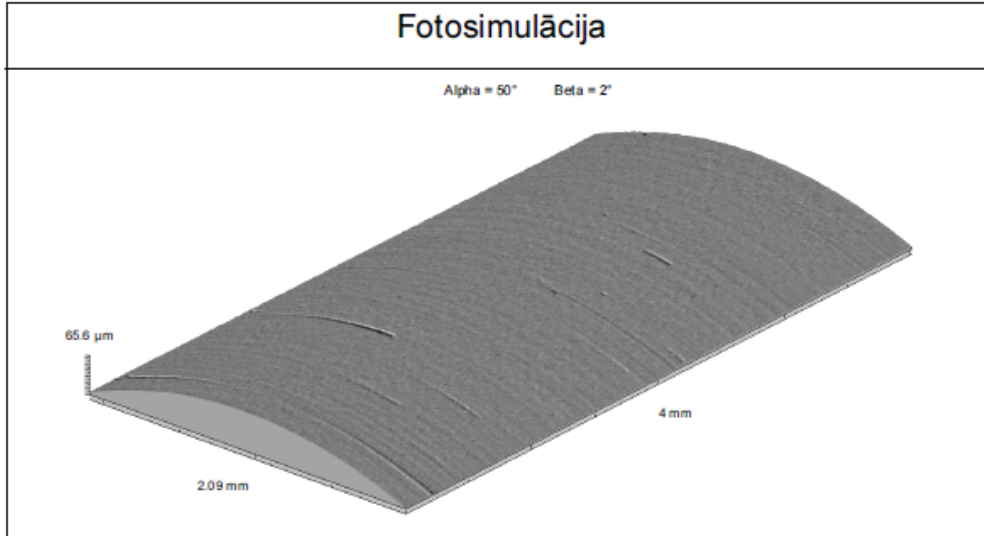
## 2D raupjuma profilu parametri

Pa = 0.0256  $\mu\text{m}$   
 Pq = 0.0346  $\mu\text{m}$   
 Pp = 0.114  $\mu\text{m}$   
 Pv = 0.214  $\mu\text{m}$   
 Pt = 0.327  $\mu\text{m}$   
 Psk = -0.979  
 Pku = 6.63  
 Pz = 0.327  $\mu\text{m}$   
 Pmr = \*\*\*\*\* (1  $\mu\text{m}$  under the highest peak)  
 Pdc = 0.0496  $\mu\text{m}$  (20%-80%)  
 PSm = 0.00762 mm  
 PDq = 1.75  $^\circ$   
 Ppc = 0 pks/mm (+/- 0.5  $\mu\text{m}$ )  
 Pc = 0.072  $\mu\text{m}$   
 Ptp = \*\*\*\*\* (1  $\mu\text{m}$  under the highest peak)  
 PHTp = 0.0496  $\mu\text{m}$  (20%-80%)  
 Prms = 0.0346  $\mu\text{m}$

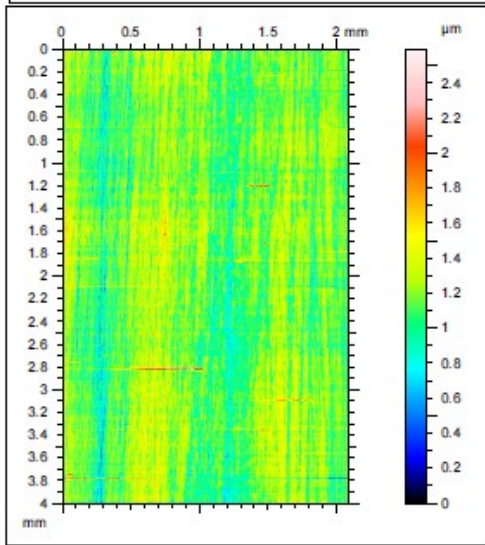
Pa = 0.0261  $\mu\text{m}$   
 Pq = 0.0339  $\mu\text{m}$   
 Pp = 0.105  $\mu\text{m}$   
 Pv = 0.161  $\mu\text{m}$   
 Pt = 0.267  $\mu\text{m}$   
 Psk = -0.622  
 Pku = 4.45  
 Pz = 0.267  $\mu\text{m}$   
 Pmr = \*\*\*\*\* (1  $\mu\text{m}$  under the highest peak)  
 Pdc = 0.0528  $\mu\text{m}$  (20%-80%)  
 PSm = 0.00852 mm  
 PDq = 1.73  $^\circ$   
 Ppc = 0 pks/mm (+/- 0.5  $\mu\text{m}$ )  
 Pc = 0.0753  $\mu\text{m}$   
 Ptp = \*\*\*\*\* (1  $\mu\text{m}$  under the highest peak)  
 PHTp = 0.0528  $\mu\text{m}$  (20%-80%)  
 Prms = 0.0339  $\mu\text{m}$

# Skrāpēta sliece ar 600 3M smilspapīru

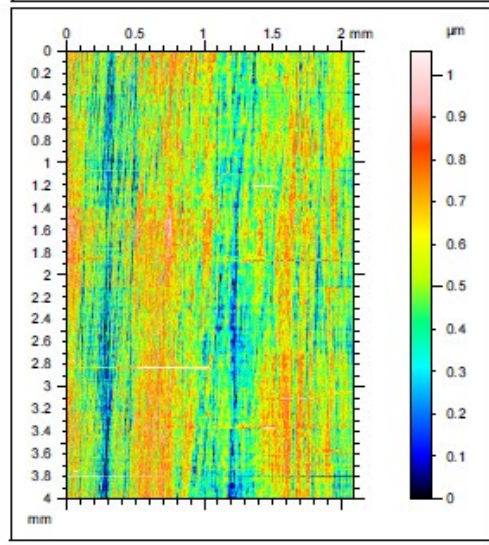
## Fotosimulācija



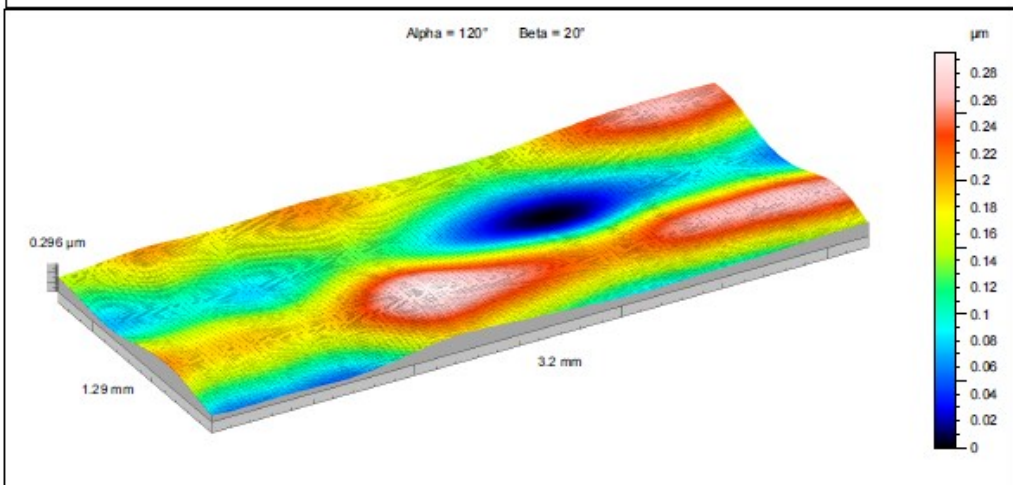
### Virsmas pēc formas atdalīšanas



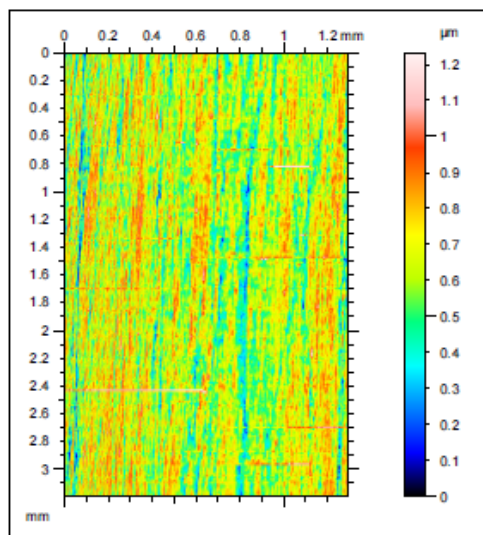
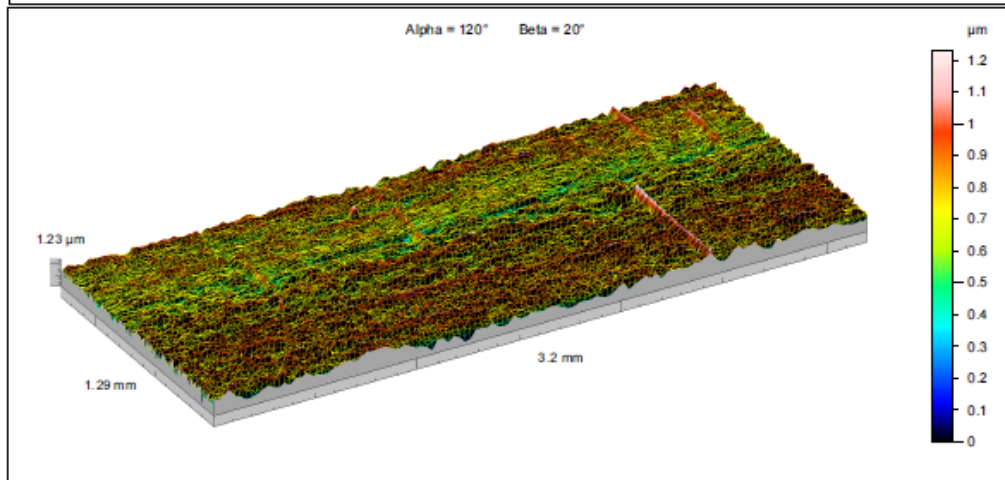
### Virsmas pēc formas atdalīšanas un kļūdu atņemšanas



### Viļņainība



# Raupjums

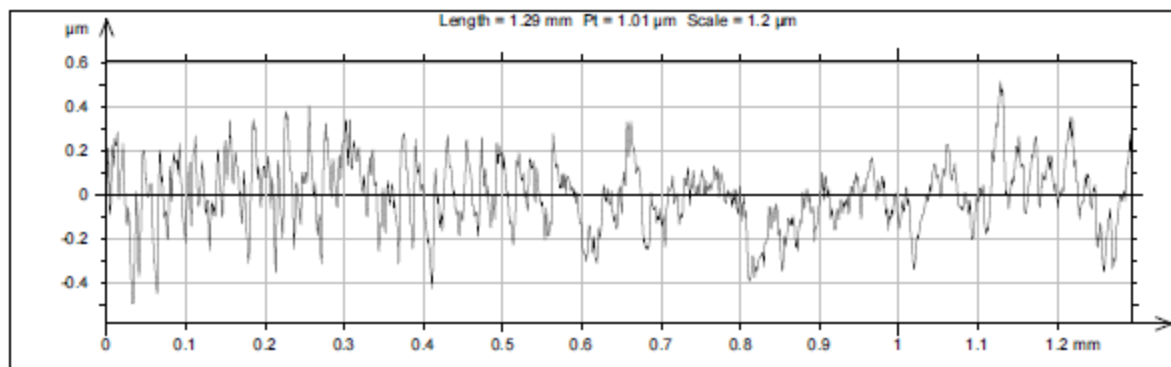
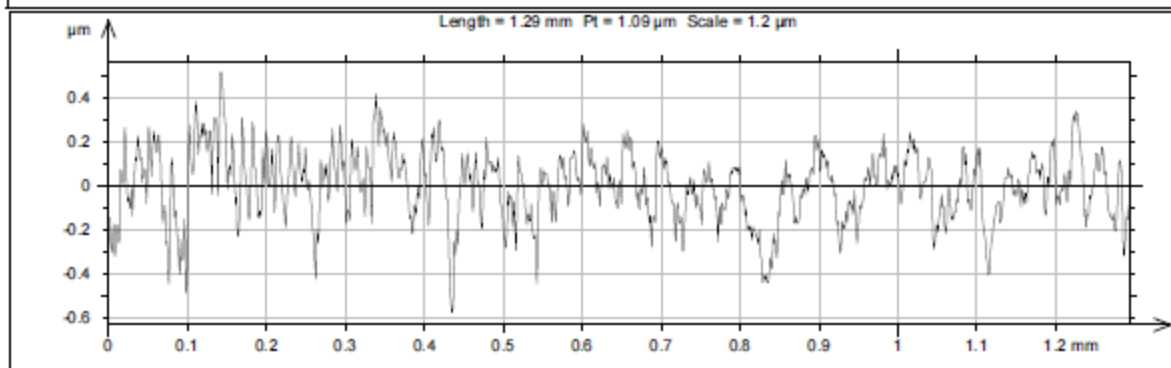


## 3D raupjuma parametri

```

Sa = 0.123  $\mu\text{m}$ 
Sq = 0.156  $\mu\text{m}$ 
Sp = 0.586  $\mu\text{m}$ 
Sv = 0.646  $\mu\text{m}$ 
St = 1.23  $\mu\text{m}$ 
Ssk = -0.113
Sku = 3.26
Sz = 1.21  $\mu\text{m}$ 
Smr = 99.3 % (1  $\mu\text{m}$  under the highest peak)
Sdc = 0.255  $\mu\text{m}$ 
Smnr = 0.000646 mm3/mm2
Smvr = 0.000586 mm3/mm2
STp = 99.3 % (1  $\mu\text{m}$  under the highest peak)
SFTp = 0.255  $\mu\text{m}$  (20%-80%)
Sfc = 0 pks/mm2 (1  $\mu\text{m}$  ; 10  $\mu\text{m}$ )
Sds = 4112 pks/mm2
Str = 0.0204
Sal = 0.000669 mm
Std = -88.5 °
Sfd = 2.56
Sdq = 0.0639  $\mu\text{m}/\mu\text{m}$ 
Sec = 0.0483 1/ $\mu\text{m}$ 
Sdr = 0.203 %
Sk = 0.383  $\mu\text{m}$ 
Spk = 0.15  $\mu\text{m}$ 
Svk = 0.152  $\mu\text{m}$ 
Sr1 = 9.27 %
Sr2 = 89.8 %
Sbi = 0.459
Sci = 1.49
Svi = 0.122
Vv = 0.000543 mm3/mm2 (0.01 %)
Vm = 0.000645 mm3/mm2 (0.01 %)
Vmp = 9.09e-005 mm3/mm2
Vmc = 0.000469 mm3/mm2
Vvc = 0.000182 mm3/mm2
Vvv = 1.9e-005 mm3/mm2
    
```

## 2D raupjuma profili perpendikulāri slīdēšanas virzienam



## 2D raupjuma profilu parametri

Pa = 0.127  $\mu\text{m}$   
 Pq = 0.16  $\mu\text{m}$   
 Pp = 0.515  $\mu\text{m}$   
 Pv = 0.577  $\mu\text{m}$   
 Pt = 1.09  $\mu\text{m}$   
 Psk = -0.334  
 Pku = 3.37  
 Pz = 1.09  $\mu\text{m}$   
 Pmr = 99.6 % (1  $\mu\text{m}$  under the highest peak)  
 Pdc = 0.266  $\mu\text{m}$  (20%-80%)  
 PSm = 0.0228 mm  
 PDq = 3.74  $^{\circ}$   
 PFC = 0.773 pks/mm (+/- 0.5  $\mu\text{m}$ )  
 Pc = 0.372  $\mu\text{m}$   
 PTP = 99.6 % (1  $\mu\text{m}$  under the highest peak)  
 PHTP = 0.266  $\mu\text{m}$  (20%-80%)  
 Prms = 0.16  $\mu\text{m}$

Pa = 0.12  $\mu\text{m}$   
 Pq = 0.153  $\mu\text{m}$   
 Pp = 0.518  $\mu\text{m}$   
 Pv = 0.493  $\mu\text{m}$   
 Pt = 1.01  $\mu\text{m}$   
 Psk = -0.0962  
 Pku = 3.22  
 Pz = 1.01  $\mu\text{m}$   
 Pmr = 99.8 % (1  $\mu\text{m}$  under the highest peak)  
 Pdc = 0.243  $\mu\text{m}$  (20%-80%)  
 PSm = 0.0201 mm  
 PDq = 3.71  $^{\circ}$   
 PFC = 0 pks/mm (+/- 0.5  $\mu\text{m}$ )  
 Pc = 0.34  $\mu\text{m}$   
 PTP = 99.8 % (1  $\mu\text{m}$  under the highest peak)  
 PHTP = 0.243  $\mu\text{m}$  (20%-80%)  
 Prms = 0.153  $\mu\text{m}$

## Prognozēšanas modeļa regresijas analīze Microsoft Excel 2017 datorprogrammā

## Matrica

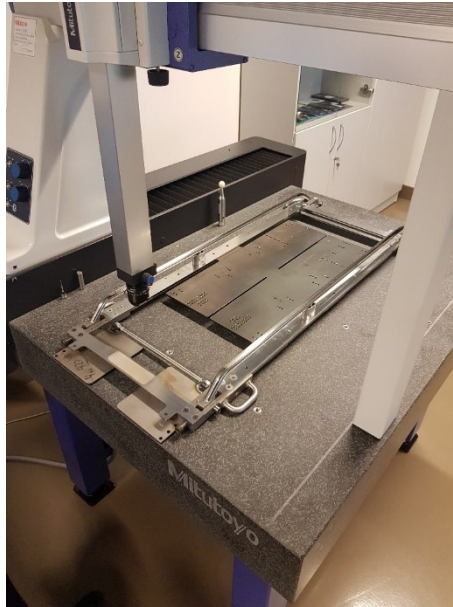
Nr. p. k.	Gaisa mitrums, %	Gaisa temperatūra, °C	Gaisa temperatūra <sup>2</sup>	Ledus temperatūra, °C	Ledus temperatūra <sup>2</sup>	Gaisa temperatūra * Ledus temperatūra	Izmēritais slīdēšanas laiks, s	Aprēķinātais slīdēšanas laiks, s
1	90.0	8.0	64.0	-2.5	6.3	-20.0	3.991	3.988
2	95.0	2.0	4.0	-4.0	16.0	-8.0	3.982	3.988
3	95.0	1.5	2.3	-4.0	16.0	-6.0	3.981	3.990
4	95.0	8.0	64.0	-1.0	1.0	-8.0	4.002	4.001
5	92.0	10.0	100.0	-1.5	2.3	-15.0	3.997	3.998
6	88.0	6.0	36.0	-2.0	4.0	-12.0	3.995	3.998
7	95.0	9.5	90.3	-1.0	1.0	-9.5	4.003	4.002
8	86.0	-3.0	9.0	-4.5	20.3	13.5	4.025	4.019
9	84.0	-2.0	4.0	-2.0	4.0	4.0	4.005	4.005
10	85.0	-2.0	4.0	-3.0	9.0	6.0	4.009	4.011
11	56.0	-3.5	12.3	-5.0	25.0	17.5	4.038	4.050
12	62.0	-3.5	12.3	-6.0	36.0	21.0	4.043	4.044
13	78.0	-1.0	1.0	-5.0	25.0	5.0	4.026	4.014
14	70.0	-1.0	1.0	-4.0	16.0	4.0	4.035	4.024

## Regresijas analīzes raksturlielumi

SUMMARY OUTPUT								
<i>Regression Statistics</i>								
Multiple R	0.944							
R Square	0.891							
Adjusted R Square	0.798							
Standard Error	0.009							
Observations	14							
<i>ANOVA</i>								
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>			
Regression	6	0.005	0.001	9.542	0.004			
Residual	7	0.001	0.000					
Total	13	0.005						
	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>	<i>Lower 95,0%</i>	<i>Upper 95,0%</i>
b0	4.064	0.046	88.960	0.000	3.956	4.172	3.956	4.172
Gaisa mitrums, %	-0.001	0.000	-2.476	0.042	-0.002	0.000	-0.002	0.000
Gaisa temperatūra, °C	0.004	0.005	0.860	0.418	-0.007	0.015	-0.007	0.015
Gaisa temperatūra <sup>2</sup>	0.000	0.000	-0.178	0.864	-0.001	0.001	-0.001	0.001
Ledus temperatūra, °C	-0.012	0.018	-0.645	0.539	-0.055	0.031	-0.055	0.031
Ledus temperatūra <sup>2</sup>	-0.002	0.003	-0.680	0.519	-0.008	0.004	-0.008	0.004
Gaisa temperatūra * Ledus temperatūra	0.002	0.001	1.552	0.165	-0.001	0.005	-0.001	0.005

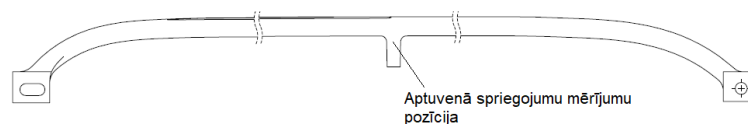
## Slieču izliekuma rādus mērījumu protokols

Skeletoņa slieces tika mērītas ar manuālo Mitutoyo CRYSTA-PLUS M500 koordinātu mērīšanas iekārtu RTU metroloģijas laboratorijā. Skeletoņa novietojums uz iekārtas redzams 1.att.



1.att. Skeletoņš uz CMM galda pirms mērījumu veikšanas

Sākotnēji tika izmērīts izliekuma rādus katrai sliecei, to spriegojot attiecīgi 9, 11, 13, 15, 17 mm, mērot no “nulles” spriegojuma. Mērījumi tika veikti ar dziļuma mērīšanas bīdmēru, mērot pret plāksni, kas veido skeletoņa rāmi. Aptuvenā mērījumu pozīcija attiecībā pret slieci, norādīta 2.att.



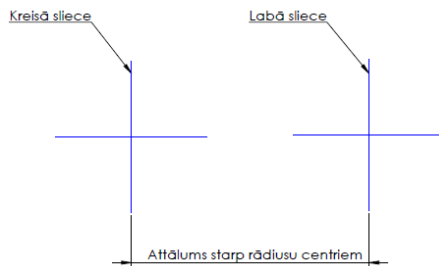
2.att. Spriegojuma mērījuma pozīcija

Nospriegojot slieci, tā tika skenēta ar CMM mērīšanas taustu pa slieces virsotni. Iegūtie slieču rādus mērījumu rezultāti apkopoti 1. tabulā.

Tā kā slieces izliekuma rādus, ir iespējams mērīt, ņemot vērā noteiktu punktu skaitu, tad tabulā attiecīgi ir norādītas iegūtās vērtības, ņemot vērā punktus pa visu slieci un, ņemot vērā punktus, kas vairāk koncentrējas slieces vidus daļā.

Starp labās un kreisās slieces rādus centriem, tika izmērīts attālums pa Y asi (skat. 3.att. un 4. att.).





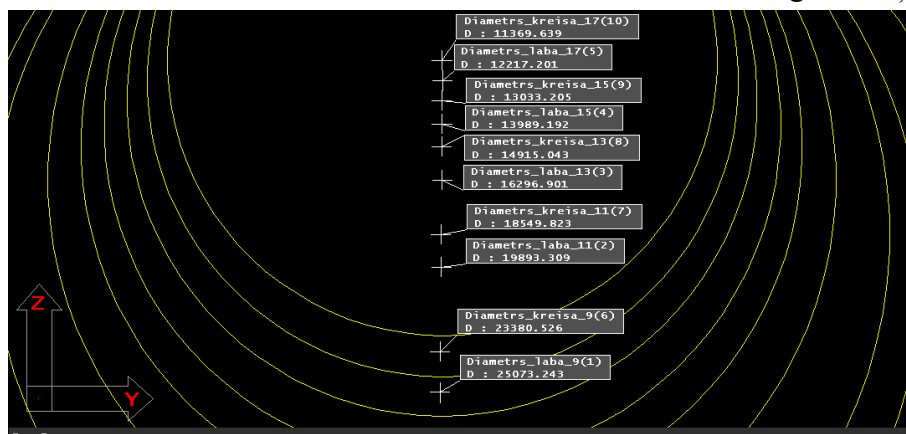
3. att. Attālums starp rādiusu centriem

1. tabula

Rādiusa mērījumi (ņemot vērā punktus pa visu slieci), mm							
Spriegojums	9 mm	11 mm	13 mm	15 mm	17 mm	Vid.	STDEV
Labā sliece	<b>12536</b>	<b>9946</b>	<b>8148</b>	<b>6994</b>	<b>6108</b>		
Kreisā sliece	<b>11690</b>	<b>9275</b>	<b>7457</b>	<b>6516</b>	<b>5684</b>		
Attālums, starp slieču rādiusu centriem	-6,075	-7,851	-5,693	-6,786	-6,891	<b>-6,659</b>	0,744
Rādiusa mērījumi (ņemot vērā mazāku punktu skaitu, slieces vidū), mm							
Spriegojums	9 mm	11 mm	13 mm	15 mm	17 mm	Vid.	STDEV
Labā sliece	<b>11850</b>	<b>9851</b>	<b>7640</b>	<b>7396</b>	<b>5706</b>		
Kreisā sliece	<b>11337</b>	<b>8867</b>	<b>7354</b>	<b>6371</b>	<b>5661</b>		
Attālums, starp slieču rādiusu centriem	-8,624	<b>-0,436</b>	-5,575	-3,352	-6,535	<b>-4,904</b>	2,804

Pēc iegūtajiem datiem, var secināt, ka lielāku izliekuma rādiusu veido labā sliece pie visiem spriegojumiem. CMM rādiusu mērījums 3.att (ņemot vērā punktus pa visu slieci un norādīts ir diametrs nevis rādiuss).

Iegūtie attālumi starp slieču rādiusu centriem ir ~ 6,7 mm, ja tiek ņemti vērā mērījumi pa visu slieci un ~4,9 mm, ja tiek ņemti vērā mērījumu punkti, kas atrodas tuvāk slieces centram. Negatīva zīme, norāda, ka kreisās slieces centrs ir tuvāk skeletona aizmugures daļai.



4. att. Izmērītie diametri, ņemot vērā punktus pa visu slieci

## IBSF Pasaules kausa skeletoņa sacensību rezultātu protokoli



## BMW IBSF World Cup Bob &amp; Skeleton 2019/20 Sigulda (LAT)

presented by



## OFFICIAL RESULTS Women's Skeleton

Results subject to IBSF sled inspection and doping control

Result after 2nd Run of 2

16.02.2020


START TIME: 10:04

End of Competition: 12:18

Rk	Nat	Name	Interm. - Times				Finish	km/h	Total		
1	7	RUS	NIKITINA Elena	4.90 (1)	17.84 (1)	26.33 (1)	38.16 (1)	46.50 (1)	<b>51.85 (1)</b>	113.83	<b>1:43.87</b>
				4.85 (1)	17.73 (1)	26.35 (1)	38.31 (1)	46.70 (3)	<b>52.02 (3)</b>	112.77	
2	6	SUI	GILARDONI Marina	5.10 (7)	18.20 (4)	26.73 (4)	38.62 (3)	47.01 (3)	<b>52.36 (4)</b>	113.01	<b>1:44.21</b>
				5.05 (5)	18.09 (5)	26.58 (4)	38.35 (2)	46.58 (1)	<b>51.85 (1)</b>	115.00	
3	5	AUT	FLOCK Janine	5.27 (18)	18.48 (15)	27.04 (13)	38.73 (5)	46.97 (2)	<b>52.29 (2)</b>	115.75	<b>1:44.31</b>
				5.20 (13)	18.32 (12)	26.93 (14)	38.68 (10)	46.87 (5)	<b>52.02 (3)</b>	114.97	
4	3	RUS	KANAKINA Yulia	5.02 (3)	18.06 (2)	26.68 (3)	38.71 (4)	47.11 (5)	<b>52.45 (5)</b>	112.55	<b>1:44.41</b>
				4.93 (2)	17.88 (2)	26.46 (2)	38.36 (3)	46.66 (2)	<b>51.96 (2)</b>	114.15	
5	10	BEL	MEYLEMANS Kim	5.19 (13)	18.44 (13)	27.12 (16)	39.03 (13)	47.35 (9)	<b>52.65 (8)</b>	113.81	<b>1:44.72</b>
				5.06 (6)	18.11 (6)	26.70 (5)	38.54 (5)	46.80 (4)	<b>52.07 (5)</b>	114.63	
6	18	RUS	KHUZINA Renata	5.17 (12)	18.33 (9)	26.91 (8)	38.86 (7)	47.21 (7)	<b>52.50 (6)</b>	113.37	<b>1:44.82</b>
				5.18 (12)	18.31 (11)	26.86 (12)	38.76 (12)	47.06 (7)	<b>52.32 (7)</b>	113.86	
7	14	GER	GRIEBEL Sophia	5.22 (15)	18.44 (13)	27.01 (11)	38.89 (9)	47.28 (8)	<b>52.61 (7)</b>	112.58	<b>1:45.14</b>
				5.16 (11)	18.28 (10)	26.82 (9)	38.66 (9)	47.13 (9)	<b>52.53 (10)</b>	112.37	
8	12	GER	LOELLING Jacqueline	5.36 (21)	18.61 (21)	27.18 (20)	39.02 (12)	47.40 (11)	<b>52.71 (9)</b>	113.00	<b>1:45.16</b>
				5.27 (16)	18.45 (16)	27.05 (16)	38.88 (15)	47.17 (12)	<b>52.45 (8)</b>	114.11	
9	21	NED	BOS Kimberley	5.27 (18)	18.55 (20)	27.16 (19)	39.11 (19)	47.60 (20)	<b>53.07 (18)</b>	112.47	<b>1:45.36</b>
				5.24 (15)	18.36 (15)	26.85 (11)	38.62 (6)	46.97 (6)	<b>52.29 (6)</b>	114.55	
10	1	GBR	MURRAY Kimberley	5.15 (10)	18.38 (12)	27.01 (11)	39.04 (14)	47.49 (15)	<b>52.92 (16)</b>	112.17	<b>1:45.37</b>
				5.11 (9)	18.23 (9)	26.80 (8)	38.68 (10)	47.06 (7)	<b>52.45 (8)</b>	113.44	
11	20	FRA	BESSARD Agathe	5.44 (24)	18.75 (23)	27.28 (23)	39.19 (20)	47.49 (15)	<b>52.76 (10)</b>	113.60	<b>1:45.55</b>
				5.41 (19)	18.62 (18)	27.10 (17)	39.00 (16)	47.41 (16)	<b>52.79 (15)</b>	112.37	
12	9	CZE	FERNSTAEDTOVA Anna	5.48 (25)	18.75 (23)	27.34 (24)	39.23 (22)	47.57 (19)	<b>52.82 (12)</b>	113.00	<b>1:45.59</b>
				5.46 (20)	18.71 (20)	27.31 (20)	39.19 (20)	47.51 (17)	<b>52.77 (13)</b>	113.40	
13	16	GBR	DEAS Laura	5.08 (5)	18.22 (6)	26.79 (5)	38.83 (6)	47.39 (10)	<b>52.87 (14)</b>	110.80	<b>1:45.61</b>
				5.08 (7)	18.20 (7)	26.78 (7)	38.78 (13)	47.33 (15)	<b>52.74 (12)</b>	110.29	
14	2	ITA	MARGAGLIO Valentina	5.06 (4)	18.21 (5)	26.87 (6)	38.94 (10)	47.48 (14)	<b>52.98 (17)</b>	110.97	<b>1:45.62</b>
				5.00 (4)	18.05 (4)	26.70 (5)	38.65 (8)	47.14 (10)	<b>52.64 (11)</b>	112.86	
15	4	GER	HERMANN Tina	5.21 (14)	18.48 (15)	27.08 (15)	38.86 (7)	47.09 (4)	<b>52.32 (3)</b>	115.13	<b>1:45.67</b>
				5.20 (13)	18.34 (14)	26.88 (13)	38.62 (6)	47.15 (11)	<b>53.35 (19)</b>	114.74	
16	15	CAN	CHANNELL Jane	5.01 (2)	18.06 (2)	26.65 (2)	38.59 (2)	47.18 (6)	<b>52.76 (10)</b>	112.28	<b>1:45.78</b>
				4.99 (3)	17.98 (3)	26.51 (3)	38.46 (4)	47.26 (13)	<b>53.02 (17)</b>	109.52	
17	8	USA	HENRY Megan	5.15 (10)	18.37 (11)	27.04 (13)	39.10 (18)	47.64 (21)	<b>53.07 (18)</b>	110.79	<b>1:45.84</b>
				5.09 (8)	18.20 (7)	26.84 (10)	38.85 (14)	47.30 (14)	<b>52.77 (13)</b>	112.61	



## BMW IBSF World Cup Bob & Skeleton 2020/21 Sigulda (LAT) #1

presented by 


### OFFICIAL RESULTS Women's Skeleton

Results subject to IBSF sled inspection and doping control

Result after heat 2 of 2      20.11.2020    START TIME: 10:04      End of Competition: 12:14

Rk	Start No.	Nat	Name	Start Time	Int. 1	Int. 2	Int. 3	Int. 4	Finish Time	Time Behind	Top Speed (km/h)
1	5	AUT	FLOCK Janine	5.19 (10)	18.31 (7)	26.76 (3)	38.34 (1)	46.42 (1)	<b>51.49 (1)</b>	+0.00	116.83
				5.17 (9)	18.38 (7)	26.92 (4)	38.73 (1)	47.05 (1)	<b>52.36 (1)</b>	+0.00	112.92
				<b>Total: 1:43.85</b>							
2	14	NED	BOS Kimberley	5.10 (7)	18.20 (3)	26.73 (1)	38.55 (2)	46.83 (2)	<b>52.04 (2)</b>	+0.55	113.89
				5.08 (5)	18.27 (4)	26.90 (3)	38.85 (3)	47.24 (2)	<b>52.64 (2)</b>	+0.28	113.00
				<b>Total: 1:44.68</b>							
3	1	LAT	TERAUDA Endija	5.24 (12)	18.41 (8)	26.88 (7)	38.72 (3)	47.11 (3)	<b>52.41 (3)</b>	+0.92	112.46
				5.23 (12)	18.58 (14)	27.15 (10)	39.05 (7)	47.45 (8)	<b>52.84 (7)</b>	+0.48	112.56
				<b>Total: 1:45.25</b>							
4	10	CZE	FERNSTAEDT Anna	5.42 (17)	18.72 (15)	27.32 (14)	39.12 (11)	47.36 (7)	<b>52.54 (6)</b>	+1.05	114.26
				5.41 (17)	18.78 (16)	27.43 (17)	39.28 (12)	47.50 (9)	<b>52.72 (4)</b>	+0.36	114.45
				<b>Total: 1:45.26</b>							
5	6	BEL	MEYLEMANS Kim	5.09 (6)	18.25 (6)	26.94 (8)	38.84 (5)	47.19 (5)	<b>52.60 (7)</b>	+1.11	113.86
				5.06 (4)	18.38 (7)	27.07 (8)	39.02 (6)	47.37 (4)	<b>52.75 (5)</b>	+0.39	113.20
				<b>Total: 1:45.35</b>							
6	8	GBR	DEAS Laura	5.08 (5)	18.23 (5)	26.85 (5)	38.82 (4)	47.16 (4)	<b>52.43 (4)</b>	+0.94	112.75
				5.09 (7)	18.40 (9)	27.17 (11)	39.23 (11)	47.68 (12)	<b>53.09 (12)</b>	+0.73	111.87
				<b>Total: 1:45.52</b>							
7	9	GER	HERMANN Tina	5.26 (13)	18.61 (12)	27.35 (16)	39.28 (14)	47.61 (12)	<b>52.85 (10)</b>	+1.36	113.51
				5.21 (11)	18.51 (12)	27.23 (12)	39.14 (10)	47.40 (5)	<b>52.69 (3)</b>	+0.33	114.42
				<b>Total: 1:45.54</b>							
8	11	GER	LOELLING Jacqueline	5.34 (15)	18.62 (14)	27.16 (11)	39.03 (9)	47.47 (10)	<b>52.80 (8)</b>	+1.31	112.12
				5.40 (15)	18.75 (15)	27.38 (15)	39.28 (12)	47.59 (11)	<b>52.85 (8)</b>	+0.49	113.60
				<b>Total: 1:45.65</b>							
9	13	RUS	NIKITINA Elena	4.99 (2)	18.17 (2)	26.85 (5)	38.97 (8)	47.59 (11)	<b>53.11 (12)</b>	+1.62	110.60
				5.01 (3)	18.27 (4)	26.96 (6)	38.87 (4)	47.35 (3)	<b>52.83 (6)</b>	+0.47	111.96
				<b>Total: 1:45.94</b>							
10	7	ITA	MARGAGLIO Valentina	4.93 (1)	18.04 (1)	26.73 (1)	38.86 (6)	47.40 (8)	<b>53.07 (11)</b>	+1.58	111.10
				4.93 (1)	18.01 (1)	26.72 (1)	38.84 (2)	47.44 (7)	<b>52.96 (11)</b>	+0.60	110.00
				<b>Total: 1:46.03</b>							
11	12	RUS	KANAKINA Yulia	5.04 (3)	18.22 (4)	26.81 (4)	38.93 (7)	47.44 (9)	<b>52.84 (9)</b>	+1.35	111.14
				4.99 (2)	18.15 (2)	26.79 (2)	39.05 (7)	47.68 (12)	<b>53.20 (13)</b>	+0.84	109.53
				<b>Total: 1:46.04</b>							

## BMW IBSF World Cup Bob & Skeleton 2020/21 Sigulda (LAT) #2

presented by 

**OFFICIAL RESULTS Women's Skeleton**  
Results subject to IBSF sled inspection and doping control

Result after heat 2 of 2      27.11.2020    START TIME: 10:04      End of Competition: 12:13

Rk	Start No.	Nat	Name	Start Time	Int. 1	Int. 2	Int. 3	Int. 4	Finish Time	Time Behind	Top Speed (km/h)
1	6	AUT	FLOCK Janine	5.18 (10)	18.17 (5)	26.67 (4)	38.35 (3)	46.42 (1)	<b>51.47 (1)</b>	+0.00	116.75
				5.14 (7)	18.19 (7)	26.76 (6)	38.40 (2)	46.43 (1)	<b>51.46 (1)</b>	+0.00	117.39
				<b>Total: 1:42.93</b>							
2	8	RUS	NIKITINA Elena	4.95 (2)	17.90 (2)	26.39 (1)	38.08 (1)	46.45 (2)	<b>51.78 (2)</b>	+0.31	114.56
				4.91 (1)	17.94 (1)	26.55 (1)	38.36 (1)	46.60 (2)	<b>51.80 (3)</b>	+0.34	114.59
				<b>Total: 1:43.58</b>							
3	5	NED	BOS Kimberley	5.11 (5)	18.19 (7)	26.76 (7)	38.50 (4)	46.68 (3)	<b>51.88 (3)</b>	+0.41	116.24
				5.13 (6)	18.16 (4)	26.70 (4)	38.48 (4)	46.69 (3)	<b>51.85 (4)</b>	+0.39	115.21
				<b>Total: 1:43.73</b>							
3	12	GER	HERMANN Tina	5.23 (11)	18.38 (11)	27.04 (15)	38.74 (11)	46.87 (8)	<b>51.98 (4)</b>	+0.51	116.27
				5.23 (10)	18.37 (11)	27.00 (13)	38.67 (8)	46.72 (4)	<b>51.75 (2)</b>	+0.29	116.95
				<b>Total: 1:43.73</b>							
5	4	GBR	DEAS Laura	5.12 (6)	18.17 (5)	26.76 (7)	38.66 (9)	46.92 (9)	<b>52.11 (7)</b>	+0.64	114.27
				5.08 (5)	18.17 (6)	26.75 (5)	38.57 (5)	46.75 (5)	<b>51.89 (5)</b>	+0.43	115.16
				<b>Total: 1:44.00</b>							
6	9	BEL	MEYLEMANS Kim	5.03 (4)	18.05 (4)	26.67 (4)	38.52 (5)	46.78 (6)	<b>52.00 (5)</b>	+0.53	114.37
				5.02 (4)	18.16 (4)	26.83 (7)	38.66 (7)	46.90 (7)	<b>52.08 (7)</b>	+0.62	114.51
				<b>Total: 1:44.08</b>							
7	11	GER	LOELLING Jacqueline	5.31 (15)	18.42 (13)	26.92 (12)	38.63 (8)	46.85 (7)	<b>52.05 (6)</b>	+0.58	115.10
				5.27 (12)	18.34 (10)	26.83 (7)	38.63 (6)	46.94 (8)	<b>52.18 (10)</b>	+0.72	113.93
				<b>Total: 1:44.23</b>							
8	2	GBR	PITTAWAY Ashleigh Fay	5.15 (9)	18.19 (7)	26.72 (6)	38.53 (6)	46.76 (4)	<b>52.18 (8)</b>	+0.71	114.85
				5.16 (9)	18.28 (8)	26.84 (10)	38.67 (8)	46.94 (8)	<b>52.17 (9)</b>	+0.71	114.40
				<b>Total: 1:44.35</b>							
9	14	RUS	KANAKINA Yulia	4.99 (3)	17.96 (3)	26.57 (3)	38.56 (7)	46.98 (10)	<b>52.38 (14)</b>	+0.91	113.03
				5.01 (3)	17.97 (2)	26.56 (2)	38.46 (3)	46.79 (6)	<b>52.07 (6)</b>	+0.61	113.66
				<b>Total: 1:44.45</b>							
10	10	CZE	FERNSTAEDT Anna	5.44 (18)	18.65 (18)	27.18 (18)	38.94 (15)	47.16 (14)	<b>52.32 (12)</b>	+0.85	114.89
				5.47 (18)	18.67 (18)	27.23 (18)	38.91 (13)	47.04 (10)	<b>52.16 (8)</b>	+0.70	116.47
				<b>Total: 1:44.48</b>							
11	7	LAT	TERAUDA Endija	5.25 (13)	18.39 (12)	26.90 (11)	38.72 (10)	47.01 (11)	<b>52.27 (10)</b>	+0.80	113.80
				5.28 (14)	18.41 (13)	26.87 (11)	38.69 (10)	47.04 (10)	<b>52.27 (11)</b>	+0.81	112.78
				<b>Total: 1:44.54</b>							



# BMW IBSF World Cup Bob & Skeleton 2019/20 Sigulda (LAT)

presented by SIGULDA

## OFFICIAL RESULTS Men's Skeleton

Results subject to IBSF sled inspection and doping control

Result after 2nd Run of 2      15.02.2020      START TIME: 12:04      End of Competition: 14:32

Rk	Nat	Name	Interm. - Times					Finish	km/h	Total	
1	10	LAT	DUKURS Martins	4.56 (4)	17.15 (2)	25.52 (2)	37.10 (1)	45.13 (1)	<b>50.15 (1)</b>	117.24	<b>1:40.09</b>
				4.52 (2)	17.02 (1)	25.32 (1)	36.86 (1)	44.90 (1)	<b>49.94 (1)</b>	117.13	
2	13	LAT	DUKURS Tomass	4.67 (13)	17.30 (10)	25.62 (6)	37.25 (4)	45.39 (3)	<b>50.54 (3)</b>	115.80	<b>1:40.90</b>
				4.66 (10)	17.29 (8)	25.62 (6)	37.20 (2)	45.29 (2)	<b>50.36 (2)</b>	116.63	
3	6	KOR	YUN Sungbin	4.56 (4)	17.18 (5)	25.51 (1)	37.10 (1)	45.21 (2)	<b>50.36 (2)</b>	116.52	<b>1:41.15</b>
				4.54 (4)	17.11 (2)	25.45 (2)	37.21 (3)	45.52 (4)	<b>50.79 (5)</b>	113.70	
4	9	GER	KEISINGER Felix	4.57 (6)	17.15 (2)	25.60 (5)	37.38 (8)	45.62 (9)	<b>50.80 (10)</b>	114.34	<b>1:41.38</b>
				4.56 (5)	17.14 (5)	25.55 (4)	37.27 (4)	45.45 (3)	<b>50.58 (3)</b>	115.54	
5	7	RUS	TRETIKOV Alexander	4.53 (2)	17.16 (4)	25.64 (8)	37.29 (6)	45.43 (5)	<b>50.55 (4)</b>	116.19	<b>1:41.44</b>
				4.53 (3)	17.12 (4)	25.53 (3)	37.30 (5)	45.62 (6)	<b>50.89 (7)</b>	113.85	
6	4	GER	GASSNER Alexander	4.66 (11)	17.28 (9)	25.62 (6)	37.31 (7)	45.50 (7)	<b>50.62 (6)</b>	115.16	<b>1:41.55</b>
				4.69 (11)	17.37 (9)	25.80 (9)	37.55 (10)	45.74 (10)	<b>50.93 (8)</b>	115.45	
7	11	RUS	TREGUBOV Nikita	4.71 (15)	17.49 (18)	25.92 (16)	37.58 (13)	45.70 (11)	<b>50.83 (11)</b>	116.28	<b>1:41.59</b>
				4.69 (11)	17.43 (11)	25.85 (10)	37.52 (9)	45.64 (8)	<b>50.76 (4)</b>	116.08	
8	8	GBR	WYATT Marcus	4.59 (7)	17.24 (8)	25.72 (9)	37.45 (9)	45.57 (8)	<b>50.70 (7)</b>	116.22	<b>1:41.69</b>
				4.56 (5)	17.17 (6)	25.58 (5)	37.34 (6)	45.60 (5)	<b>50.99 (9)</b>	115.33	
9	3	CHN	YIN Zheng	4.49 (1)	17.10 (1)	25.52 (2)	37.28 (5)	45.48 (6)	<b>50.71 (8)</b>	115.12	<b>1:41.75</b>
				4.47 (1)	17.11 (2)	25.64 (7)	37.38 (7)	45.62 (6)	<b>51.04 (10)</b>	115.69	
10	14	RUS	RUKOSUEV Evgeniy	4.72 (16)	17.43 (14)	25.89 (13)	37.54 (11)	45.64 (10)	<b>50.73 (9)</b>	116.65	<b>1:41.83</b>
				4.75 (15)	17.50 (13)	25.92 (13)	37.69 (12)	45.92 (11)	<b>51.10 (11)</b>	114.61	
11	12	KOR	JUNG Seunggi	4.59 (7)	17.21 (6)	25.56 (4)	37.23 (3)	45.40 (4)	<b>50.61 (5)</b>	115.69	<b>1:42.08</b>
				4.58 (7)	17.54 (16)	25.98 (15)	37.75 (14)	46.10 (16)	<b>51.47 (17)</b>	113.47	
12	19	GBR	RICE Jerry	4.65 (10)	17.41 (13)	25.89 (13)	37.81 (16)	46.19 (18)	<b>51.47 (17)</b>	112.62	<b>1:42.32</b>
				4.61 (8)	17.27 (7)	25.68 (8)	37.42 (8)	45.65 (9)	<b>50.85 (6)</b>	114.61	
13	17	AUT	MAIER Samuel	4.87 (27)	17.71 (26)	26.13 (23)	37.83 (17)	46.01 (15)	<b>51.13 (13)</b>	115.38	<b>1:42.40</b>
				4.82 (19)	17.57 (17)	25.98 (15)	37.65 (11)	45.93 (12)	<b>51.27 (15)</b>	115.62	
14	15	UKR	HERASKEVYCH Vladyslav	4.76 (20)	17.52 (19)	25.88 (12)	37.56 (12)	45.90 (13)	<b>51.23 (14)</b>	114.41	<b>1:42.49</b>
				4.76 (16)	17.57 (17)	26.06 (18)	37.80 (16)	46.02 (14)	<b>51.26 (13)</b>	115.37	
15	21	AUT	AUER Florian	4.77 (23)	17.63 (24)	26.14 (24)	37.92 (20)	46.16 (17)	<b>51.37 (16)</b>	114.61	<b>1:42.55</b>
				4.78 (18)	17.53 (15)	25.99 (17)	37.72 (13)	45.96 (13)	<b>51.18 (12)</b>	114.97	
16	22	ITA	GASPARI Mattia	4.84 (26)	17.70 (25)	26.17 (25)	37.98 (25)	46.23 (19)	<b>51.49 (18)</b>	114.50	<b>1:42.75</b>
				4.86 (20)	17.71 (20)	26.17 (20)	37.89 (19)	46.07 (15)	<b>51.26 (13)</b>	115.65	
17	27	CHN	ASAIERHAZI Hayisaer	4.66 (11)	17.35 (11)	25.78 (10)	37.51 (10)	45.76 (12)	<b>51.08 (12)</b>	115.01	<b>1:42.94</b>
				4.69 (11)	17.46 (12)	25.86 (11)	37.75 (14)	46.35 (20)	<b>51.86 (20)</b>	110.09	



## BMW IBSF World Cup Bob & Skeleton 2020/21 Sigulda (LAT) #1

presented by


### OFFICIAL RESULTS Men's Skeleton

Results subject to IBSF sled inspection and doping control

Result after heat 2 of 2      20.11.2020    START TIME: 15:04      End of Competition: 17:28

Rk	Start No.	Nat	Name	Start Time	Int. 1	Int. 2	Int. 3	Int. 4	Finish Time	Time Behind	Top Speed (km/h)
1	8	LAT	DUKURS Martins	4.56 (3)	17.13 (2)	25.45 (1)	37.07 (1)	45.16 (1)	<b>50.21 (1)</b>	+0.00	116.30
				4.56 (3)	17.14 (3)	25.43 (1)	37.04 (1)	45.14 (1)	<b>50.23 (1)</b>	+0.00	116.49
<b>Total: 1:40.44</b>											
2	5	GER	KEISINGER Felix	4.53 (1)	17.11 (1)	25.52 (2)	37.28 (2)	45.52 (4)	<b>50.68 (3)</b>	+0.47	114.31
				4.48 (1)	17.08 (1)	25.47 (2)	37.19 (2)	45.36 (3)	<b>50.55 (3)</b>	+0.32	115.31
<b>Total: 1:41.23</b>											
2	10	GER	GASSNER Alexander	4.65 (8)	17.37 (7)	25.90 (9)	37.62 (9)	45.75 (9)	<b>50.87 (8)</b>	+0.66	116.30
				4.67 (9)	17.34 (8)	25.72 (5)	37.31 (3)	45.33 (2)	<b>50.36 (2)</b>	+0.13	117.58
<b>Total: 1:41.23</b>											
4	6	LAT	DUKURS Tomass	4.69 (11)	17.40 (9)	25.77 (7)	37.37 (5)	45.50 (2)	<b>50.66 (2)</b>	+0.45	116.56
				4.69 (10)	17.39 (9)	25.74 (6)	37.40 (5)	45.54 (4)	<b>50.71 (4)</b>	+0.48	116.04
<b>Total: 1:41.37</b>											
5	16	GBR	WESTON Matt	4.58 (6)	17.25 (5)	25.72 (5)	37.45 (6)	45.56 (6)	<b>50.73 (5)</b>	+0.52	116.16
				4.59 (7)	17.27 (7)	25.75 (8)	37.50 (7)	45.62 (7)	<b>50.71 (4)</b>	+0.48	116.12
<b>Total: 1:41.44</b>											
6	7	GBR	THOMPSON Craig	4.53 (1)	17.15 (3)	25.63 (3)	37.33 (3)	45.51 (3)	<b>50.73 (5)</b>	+0.52	115.76
				4.49 (2)	17.08 (1)	25.60 (3)	37.40 (5)	45.59 (6)	<b>50.81 (7)</b>	+0.58	115.20
<b>Total: 1:41.54</b>											
7	11	RUS	TREGUBOV Nikita	4.68 (9)	17.41 (10)	25.83 (8)	37.50 (7)	45.62 (7)	<b>50.76 (7)</b>	+0.55	116.20
				4.66 (8)	17.41 (10)	25.81 (10)	37.53 (8)	45.70 (8)	<b>50.89 (9)</b>	+0.66	115.63
<b>Total: 1:41.65</b>											
8	13	GBR	WYATT Marcus	4.57 (4)	17.29 (6)	25.75 (6)	37.53 (8)	45.74 (8)	<b>50.90 (9)</b>	+0.69	114.63
				4.56 (3)	17.25 (4)	25.68 (4)	37.37 (4)	45.56 (5)	<b>50.76 (6)</b>	+0.53	115.70
<b>Total: 1:41.66</b>											
9	12	RUS	TRETIKOV Alexander	4.57 (4)	17.24 (4)	25.68 (4)	37.36 (4)	45.54 (5)	<b>50.72 (4)</b>	+0.51	115.61
				4.57 (5)	17.25 (4)	25.74 (6)	37.55 (9)	45.89 (11)	<b>51.15 (13)</b>	+0.92	113.05
<b>Total: 1:41.87</b>											
10	2	ITA	GASPARI Mattia	4.71 (13)	17.52 (12)	25.99 (11)	37.72 (11)	45.94 (11)	<b>51.13 (11)</b>	+0.92	114.84
				4.74 (14)	17.53 (13)	25.94 (12)	37.60 (10)	45.73 (9)	<b>50.87 (8)</b>	+0.64	116.19
<b>Total: 1:42.00</b>											
11	4	GER	GROTHER Christopher	4.68 (9)	17.43 (11)	25.91 (10)	37.64 (10)	45.79 (10)	<b>50.93 (10)</b>	+0.72	115.68
				4.69 (10)	17.46 (11)	25.90 (11)	37.70 (13)	45.94 (13)	<b>51.13 (12)</b>	+0.90	114.47
<b>Total: 1:42.06</b>											

## BMW IBSF World Cup Bob & Skeleton 2020/21 Sigulda (LAT) #2

presented by 

### OFFICIAL RESULTS Men's Skeleton

Results subject to IBSF sled inspection and doping control

Result after heat 2 of 2      27.11.2020    START TIME: 15:04      End of Competition: 17:28

Rk	Start No.	Nat	Name	Start Time	Int. 1	Int. 2	Int. 3	Int. 4	Finish Time	Time Behind	Top Speed (km/h)
1	10	LAT	DUKURS Martins	4.54 (3)	16.93 (1)	25.18 (1)	36.61 (1)	44.53 (1)	<b>49.46 (1)</b>	+0.00	118.88
				4.53 (4)	16.93 (3)	25.19 (2)	36.62 (1)	44.53 (1)	<b>49.45 (1)</b>	+0.00	118.95
				<b>Total: 1:38.91</b>							
2	5	LAT	DUKURS Tomass	4.66 (10)	17.17 (9)	25.41 (6)	36.78 (3)	44.67 (2)	<b>49.55 (2)</b>	+0.09	119.39
				4.65 (9)	17.13 (8)	25.36 (5)	36.71 (4)	44.62 (2)	<b>49.55 (2)</b>	+0.10	119.12
				<b>Total: 1:39.10</b>							
3	11	GBR	WYATT Marcus	4.53 (2)	17.02 (5)	25.38 (5)	36.98 (7)	45.01 (6)	<b>50.03 (6)</b>	+0.57	117.36
				4.51 (2)	17.00 (4)	25.35 (4)	36.84 (5)	44.81 (6)	<b>49.82 (3)</b>	+0.37	118.58
				<b>Total: 1:39.85</b>							
4	4	RUS	TREGUBOV Nikita	4.65 (9)	17.25 (11)	25.58 (11)	37.05 (8)	45.00 (5)	<b>49.98 (5)</b>	+0.52	118.50
				4.65 (9)	17.22 (11)	25.52 (9)	36.97 (8)	44.92 (7)	<b>49.94 (6)</b>	+0.49	118.87
				<b>Total: 1:39.92</b>							
5	12	GER	GASSNER Alexander	4.66 (10)	17.20 (10)	25.55 (10)	37.09 (9)	45.06 (7)	<b>50.03 (6)</b>	+0.57	118.49
				4.65 (9)	17.16 (9)	25.46 (7)	36.87 (6)	44.79 (5)	<b>49.95 (7)</b>	+0.50	119.79
				<b>Total: 1:39.98</b>							
6	8	GER	KEISINGER Felix	4.51 (1)	16.96 (2)	25.27 (2)	36.91 (4)	45.10 (9)	<b>50.22 (8)</b>	+0.76	114.60
				4.50 (1)	16.91 (2)	25.17 (1)	36.70 (3)	44.77 (4)	<b>49.83 (4)</b>	+0.38	116.61
				<b>Total: 1:40.05</b>							
7	1	GER	GROTHER Christopher	4.62 (8)	17.12 (6)	25.45 (7)	36.91 (4)	44.82 (4)	<b>49.79 (3)</b>	+0.33	118.99
				4.62 (8)	17.16 (9)	25.54 (10)	37.04 (9)	45.11 (9)	<b>50.30 (9)</b>	+0.85	117.41
				<b>Total: 1:40.09</b>							
7	6	GBR	THOMPSON Craig	4.54 (3)	16.98 (3)	25.31 (3)	36.94 (6)	45.07 (8)	<b>50.22 (8)</b>	+0.76	115.75
				4.51 (2)	16.90 (1)	25.20 (3)	36.65 (2)	44.72 (3)	<b>49.87 (5)</b>	+0.42	117.75
				<b>Total: 1:40.09</b>							
9	3	UKR	HERASKEVICH Vladyslav	4.72 (15)	17.35 (13)	25.68 (12)	37.30 (11)	45.37 (10)	<b>50.40 (10)</b>	+0.94	116.56
				4.75 (16)	17.45 (17)	25.76 (14)	37.28 (12)	45.35 (12)	<b>50.39 (10)</b>	+0.94	116.78
				<b>Total: 1:40.79</b>							
10	9	RUS	TRETIKOV Alexander	4.56 (5)	17.01 (4)	25.31 (3)	36.77 (2)	44.75 (3)	<b>49.80 (4)</b>	+0.34	118.50
				4.55 (5)	17.06 (5)	25.38 (6)	36.91 (7)	45.21 (10)	<b>51.10 (17)</b>	+1.65	117.51
				<b>Total: 1:40.90</b>							
11	15	AUT	AUER Florian	4.75 (17)	17.38 (14)	25.81 (15)	37.41 (15)	45.46 (11)	<b>50.56 (11)</b>	+1.10	117.79
				4.75 (16)	17.38 (16)	25.78 (16)	37.36 (15)	45.40 (14)	<b>50.43 (12)</b>	+0.98	117.03
				<b>Total: 1:40.99</b>							

Reālu apstākļu iekārtas patenta pieteikuma atbilstība formālajām prasībām un fragments no patenta pieteikuma



Latvijas Republikas Patentu valde

Citadeles iela 7/70, Rīga, LV-1010, tālr. 67099600, fakss 67099650, e-pasts lietvediba@lrpv.gov.lv, www.lrpv.gov.lv

Adresāts:

Irīna BOIKO  
RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE  
Kaļķu iela 1, 214.kab.  
Rīga, LV-1658  
patenti@rtu.lv

**PAZIŅOJUMS**

Par patenta pieteikuma atbilstību Patentu likuma 34. pantam

Jūsu sifrs	Patenta pieteikuma numurs	Datums
	LVP2020000098	04.03.2021.

Patentu valde paziņo, ka Jūsu iesniegtais patenta pieteikums

(21) Patenta pieteikuma Nr.	LVP2020000098
(22) Pieteikuma datums	28.12.2020
(51) Starptautiskās patentu klasifikācijas indekss	G01N 19/02; G01L 5/00
(71) Pieteicēji	RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE, Kaļķu iela 1, Rīga, LV-1658, LV
(72) Izgudrotāji	Ernests JANSONS, Zemeņu iela 4, Dreilīpi, Stopiņu nov., LV-2130, LV Jānis LUNGEVIČS, 'Liepnieki', Kalsnavas pag., Madonas nov., LV-4860, LV
(54) Izgudrojuma nosaukums	Irīna BOIKO, Slimnīcas iela 6-45, Rīga, LV-1016, LV PĀRNĒSĀJAMA SLĪDĒŠANAS ĪPAŠĪBU NOTEIKŠANAS IEKĀRTA UN PAŅĒMIENS

atbilst Patentu likuma 34. panta pirmās daļas nosacījumiem.

Saskaņā ar Patentu likuma 35. panta pirmo daļu patenta pieteikums tiks publicēts 20.07.2022.

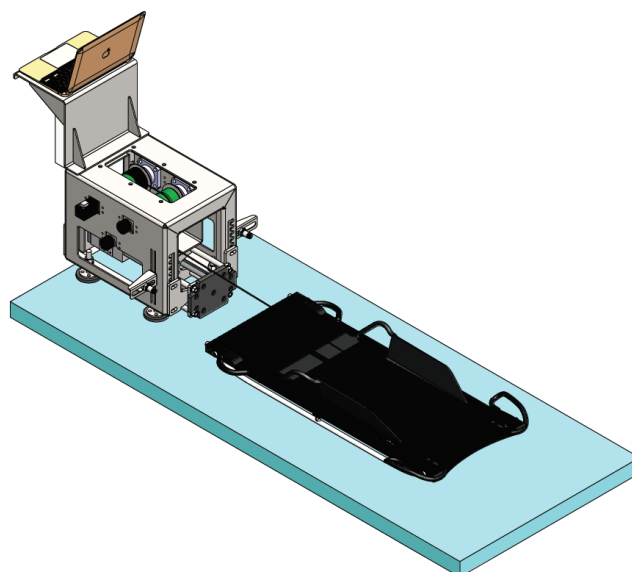
Informējam, ka, iesniedzot patenta pieteikumu Latvijā, Jums ir prioritātes tiesības attiecībā uz šo pašu izgudrojumu 12 mēnešu laikā no pieteikuma datuma iesniegt attiecīgo patenta pieteikumu jebkurā Parīzes savienības dalībvalstī, Pasaules tirdzniecības organizācijas dalībvalstī vai jebkurā citā valstī vai savienībā, ar kuru Latvija ir noslēgusi vienošanos par prioritātes tiesību atzīšanu.

Ja minētais 12 mēnešu termiņš tiek nokavēts, patenta pieteikumu uz šo pašu izgudrojumu citā valstī vairs iesniegt nevar.

Izgudrojumu ekspertīzes departamenta  
vadošā eksperte

Karīna Akimova  
67099629  
[karina.akimova@lrpv.gov.lv](mailto:karina.akimova@lrpv.gov.lv)





**PĀRNĒSĀJAMA SLĪDĒŠANAS ĪPAŠĪBU NOTEIKŠANAS IEKĀRTA UN PAŅĒMIENS, KAS IZMANTOJAMS REĀLU APSTĀKĻU EKSPERIMENTOS**

[001] Izgudrojums attiecās uz mašīnu un aparātu būves nozari, pastarpināti – uz metroloģijas un triboloģijas nozarēm. Primāri tas ir paredzēts dažādu materiālu berzes īpašību noteikšanai paraugam slīdot pa ledus virsmu, bet tas var tikt izmantots arī citu berzes pāru izpētē, piemēram, paraugam slīdot pa asfaltu, plastmasu, gumiju, koku, zālāju, u.c.

Slīdēšanu raksturojošu parametru prognozēšanas modeļa aprobācijas apliecinājums

**Apliecinājums par Ernesta Jansona doktora disertācijas ietvaros izstrādātā nerūsējošā tērauda slīdēšanas pa ledu prognozēšanas modeļa aprobāciju**

Es, Dainis Dukurs, Latvijas skeletoņa izlases treneris, apliecinu, ka esmu saņēmis un iepazīs ar Ernesta Jansona promocijas darba "Berzes pāra nerūsējošais tērauds-ledus slīdēšanu raksturojošu parametru mērīšanas metodika un prognozēšana" ietvaros izstrādāto berzes pāra nerūsējošais tērauds-ledus slīdēšanu raksturojošu parametru prognozēšanas modeli atkarībā no vides apstākļiem (gaisa mitrums, gaisa temperatūra, ledus temperatūra), kā arī citiem praktiskiem novērojumiem.

Izstrādātais nerūsējošā tērauda pa ledu slīdēšanu raksturojošu parametru prognozēšanas modelis 2020.-2021. g. tika izmantots, lai prognozētu skeletoņa slīdēšanu (*ātrāks ledus/ lēnāks ledus*) pie dažādiem vides apstākļiem. Rezultāta, treniņu režīmā, tika piemeklētas skeletoņa slieces un regulēts to spriegojums atkarībā no prognozētā slīdēšanas laika parametra. Zinot potenciālo vides apstākļu ietekmi uz slīdēšanas apstākļiem, ir iespējams pilnvērtīgāk sagatavoties arī sacensību režīmā, izvēloties attiecīgu inventāru.

Praktiskie novērojumi, t.i. slieču virsmas tekstūras nebūtiskā ietekme uz slīdēšanas laiku, vibrāciju analīze, kā arī ledus virskārtas pētījumi deva papildus zināšanas ledus berzes jomā.

Uzskatu, ka sasniegtie pētījuma rezultāti ir ar augstu praktisko vērtību un aicinu promocijas darba autoru, Ernestu Jansonu, turpināt izpēti, piemēram, skeletoņa slieču makroģeometrijas ietekmes uz slīdēšanu pa ledu virzienā.

Latvijas skeletoņa izlases treneris

Dainis Dukurs



2021. gada 30. augusts

**RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE**  
Mašīnzinību, transporta un aeronautikas fakultāte  
Mehānikas un mašīnbūves institūts

**BERZES PĀRA NERŪSĒJOŠAIS TĒRAUDS-LEDUS  
SLĪDĒŠANU RAKSTUROJOŠU PARAMETRU MĒRĪŠANAS  
UN PROGNOZĒŠANAS METODIKA REĀLU APSTĀKĻU  
EKSPERIMENTU REŽĪMĀ**

Izstrādāja: Mg. sc. ing. Ernests Jansons

Rīga 2022

Mērīšanas un prognozēšanas metodika paredzēta eksperimentālā parauga slīdēšanas pa ledu raksturojoša parametra – slīdēšanas laiks, s, kā arī vides apstākļu – relatīvais gaisa mitrums, %, gaisa temperatūra, °C, ledus temperatūra, °C, mērīšanai, un prognozēšanas modeļa, kas prognozē slīdēšanas laiku atkarībā no vides apstākļiem, izstrādei un novērtēšanai, reālu apstākļu eksperimentu režīmā.

Šis dokuments nosaka mērīšanas procedūras vadlīnijas šādā vides apstākļu diapazonā: relatīvais gaisa mitrums no 50 līdz 95 %, gaisa temperatūra no -4 līdz +10 °C, ledus temperatūra no -6 līdz -1 °C.

## 1. VISPĀRĪGIE NOTEIKUMI

1.1. Mērīšanas un prognozēšanas metodika reglamentē izmantotās mērījumu metodes, prasības mērinstrumentiem, palīģierīcēm, materiāliem, prasības operatoru kvalifikācijai un drošības prasības, prasības mērījumu apstākļiem un mērījumu veikšanas kārtību, mērījumu rezultātu apstrādi un precizitātes kontroli, prasības mērījumu precizitātei.

1.2. Dokuments ir veidots, ņemot vērā standartu GOST R 8.563:2009, ISO 5725-1:1994, ISO 5725-4:2020, ISO 9000:2005, ISO guide 99:2007 vadlīnijas.

## 2. MĒRĪJUMU METODES

Izstrādātā metodika nosaka šādas mērījumu metodes:

- 2.1. Eksperimentālo datu ievākšanai, izmanto kvantitatīvo mērīšanas metodi.
- 2.2. Datu apstrādē, izmantota statistikas metodes: aprakstošā/ deskriptīvā statistika.
- 2.3. Prognozēšanas modeļa izstrādē, izmantoto sakarību noteikšanas secinošo statistikas metodi – daudzfaktoru regresijas analīzi un korelācijas analīzi.

## 3. PRASĪBAS MĒRINSTRUMENTIEM, PALĪģIERĪCĒM, MATERIĀLIEM

3.1. Infrastruktūra eksperimentu veikšanai (norādīta ieteicamā, var tikt izmantotas līdzvērtīgas alternatīvas):

- Ledus trase, kas izveidota leņķī pret zemes līmeni.

Rekomendējams ~25 m garš ledus trases posms izveidots 14 ° leņķī pret zemes līmeni. Leņķis nodrošina eksperimentālā parauga kustības uzsākšanu no miera stāvokļa, neatkarīgi no vides apstākļu izmaiņām. Ir jāparedz arī parauga apturēšana, līdz ar to kopējam trases garumam ir jābūt lielākam. Trases minimālais platums ~ 1,5 m ērtai eksperimentu veikšanai.

- Ledus saldēšanas sistēma.

Ledus trase jānodrošina ar iestrādātu ledus saldēšanas sistēmu. Tai ir rekomendējams spēt nodrošināt maināmu ledus temperatūru diapazonā no ~ -20 °C līdz -1 °C.

- Ledus apstrādei nepieciešamie instrumenti.

Pēc saldēšanas, ledus virsmu ir jānoēvelē un ar ūdens palīdzību jāizlīdzina. Ar pielāgotu ēveli (Ø20 mm) izveidot gropi paralēli slīdēšanas virzienam, kas nodrošina eksperimentālā parauga taisnvirziena kustību lejup pa ledus trasi. Var tikt brīvi izvēlēti instrumenti ledus apstrādes nodrošināšanai.

- Ledus trase aprīkota ar sensoriem slīdēšanas laika fiksēšanai.

Ledus trase aprīkota ar vismaz 2 optisko sensoru pāriem. Pirmais pāris izvietots startā (rekomendējamais attālums starp sensoriem 2 m), otrais pāris trases beigu daļā (rekomendējamais attālums starp sensoriem 2m). Eksperimentālajam paraugam šķērsojot sensoru starus, tiek fiksēts slīdēšanas laiks.

- Konstanta eksperimentālā parauga starta pozīcija.

Eksperimentālajam paraugam jānodrošina konstanta sākuma pozīcija. Paraugam ir jāatrodas nelielā attālumā no pirmā sensoru pāra (~ 0,5 m) un trases daļā, kas ir leņķī. Tādējādi tiek nodrošināts, ka tas, neatkarīgi no vides apstākļiem, uzsāk kustību lejup pa ledus trasi. Konstanta eksperimentālā parauga starta pozīcija var tikt nodrošināta atkarībā no pieejamās infrastruktūras, materiāliem un citiem aspektiem.

3.2. Eksperimentālais paraugs (norādīts ieteicamais, var tikt izmantotas alternatīvas):

- Rāmis un slieces.

Skeletoņa rāmis un slieces, kas izgatavotas atbilstoši *IBSF* noteiktajam standartam. Skeletonu un tā slieces nedrīkst mainīt, ja ir nepieciešams salīdzināt rezultātus dažādās eksperimentu sesijās.

- Papildus masa.

Lai simulētu cilvēka svaru, uz slīdošā parauga jāpievieno papildus masa (rekomendējams 65 kg). Papildus masa var tikt nodrošināta pēc ieskatiem, būtiski, lai tā nemainās gan masas, gan ģeometrijas ziņā, nekustās eksperimentu laikā.

- Slieču pulēšanai paredzēti smilšpapīri.

Var izmantot 400, 600, 1500, 3000 *3M* smilšpapīrus uz auduma bāzes vai alternatīvus.

3.3. Mērījumu veikšanai nepieciešamie mēraparāti (apkopot 1. tabulā):

- Slieču virsmas tekstūras mērījumi.

Lai nodrošināt slieču virsmas tekstūras kontroli, ir jāveic virsmas raupjuma mērīšana (Jānodrošina vismaz parametra *Ra* mērīšana). Rekomendējams izmantot 3D raupjuma mērīšanas iekārtu, piemēram, *Taylor Hobson Form Talysurf Intra 50 (Taylor Hobson, Lielbritānija)* profilometru, taču var izmantot alternatīvas 2D raupjuma mērīšanas iekārtas.

- Dziļuma mērīšanas bīdmērs.

Lai kontrolētu slieču izliekumu, nepieciešams bīdmērs ar nolāsīšanas precizitāti vismaz 0,05 mm.

- Vides apstākļu mērījumi.

Vides apstākļu mērījumi var tikt veikti ar 1. tabulā apkopotajiem mēraparātiem, taču var tikt izmantoti līdzvērtīgi vai ar mazāku mēraparāta pamatklūdu alternatīvi mēraparāti.

- Slīdēšanas laika mērījumi.

Slīdēšanas laika mērījumi var tikt veikti ar *ALGE PR1a (ALGE Timing GmbH, Vācija)* vai līdzvērtīgiem alternatīviem optiskajiem sensoriem.

## Nepieciešamo mēraparātu uzskaitījums

Mērījumi	Mēraparāts	Mēraparāta pamatklūda	Piezīmes
Ledus temperatūra, °C	Termopāris TP-122-100-MT-K (Czaki, Polija) savienots ar Proscan 520 (Dostmann, Vācija)	±1 °C	Tiek pieļauts analogs
Gaisa temperatūra, °C	P330 Temp (Dostmann, Vācija)	±0.5 °C	Tiek pieļauts analogs
Relatīvais gaisa mitrums, %	P330 Temp (Dostmann, Vācija)	±3 %	Tiek pieļauts analogs
Slieču temperatūra, °C	Termokamera Testo 871 (Testo, Vācija)	±2 °C	Tiek pieļauts analogs
Slieču virsmas tekstūras mērījumi	Taylor Hobson Form Talysurf Intra 50 (Taylor Hobson, Lielbritānija)	16 nm	Tiek pieļauts analogs
Slieču izliekuma mērījumi	Mitutoyo dziļuma mērīšanas bīdmērs 527-201	0,05 mm	Tiek pieļauts analogs
Slīdēšanas laika mērījumi	ALGE PR1a (ALGE Timing GmbH, Vācija)	±0.0005 s	Tiek pieļauts analogs

## 4. PRASĪBAS OPERATORU KVALIFIKĀCIJAI UN DROŠĪBAS PRASĪBAS

## 4.1. Nepieciešami vismaz 3 operatori.

Operatoriem nav noteiktu kvalifikāciju prasību. Tā kā eksperimenti tiek veikti reālu apstākļu režīmā ar 100 kg smagu eksperimentālo paraugu, operatoriem ir jābūt labā fiziskā formā. Būtiski ir nodrošināt nemainīgu eksperimentālā parauga starta pozīciju, kvalitatīvu ledus virsmu un mērījumu fiksēšanu.

Ieteicamais operatoru pienākumu sadalījums eksperimentu veikšanas laikā:

Pirmais operators nodrošina eksperimentālā parauga novietošanu un palaišanu no miera stāvokļa. Otrais operators eksperimentālo paraugu sagaida un nobremzē trases beigu daļā un nodrošina, ka tas neizslīd no iestrādātas gropes. Tālāk eksperimentālo paraugu iestumj atpakaļ uz, pētījumos izmantojamo, trases daļu, kur to pārtver pirmais un trešais operators, un nogādā uz starta pozīciju. Trešais operators nodrošina arī vides apstākļu manuālu pierakstīšanu.

## 4.2. Drošības prasības.

Drošības prasības var atšķirties atkarībā no izmantotās ledus trases specifikas. Ņemot vērā, ka eksperimenti tiek veikti uz ledus virsmas un aukstos apstākļos, operatoriem jānodrošina tam paredzēti apavi un cits papildaprīkojums.

## 5. SAGATAVOŠANĀS MĒRĪJUMIEM UN MĒRĪJUMU VEIKŠANAS KĀRTĪBA

Sagatavošanās mērījumiem un mērījumu veikšanas algoritms norādīts 1. attēlā.

## 5.1. Ledus virsmas sagatavošana.

Tiek pieņemts, ka ledus virsma ar iestrādātu gropi, kas paredzēta eksperimentālā parauga kustības vadīšanai, ir sasaldēta un sagatavota iepriekš.

5.1.1. Ledus virsmas sagatavošana eksperimentu veikšanai pa soļiem ir sekojoša:

- Gropes un ledus virsmas tīrīšana. Ledus virsma pa kuru tiks veikts eksperiments, notīra ar birsti, grope skeletoņa vadīšanai iztīra ar gropes diametram pielāgotu ēveli ( $\varnothing 20$  mm).
- Negludumu un plaisu novēršana. Ledus virsmas, pa kurām slīdēs slieces, nolej ar karstu ūdeni ( $\sim 65$  °C) plānā kārtiņā, lai tiktu aizpildītas plaisas, nolīdzināti izciļņi vai kādi citi defekti uz ledus virsmas.
- Vizuālā novērtēšana. Vizuāli novērtē ledus virsmu, lai tā būtu ar pēc iespējas mazāk defektiem, kas var ietekmēt slīdēšanas mērījumu precizitāti.

5.1.2. Ja pēc vizuālās novērtēšanas, tiek konstatēti iespējamo mērījumu precizitāti ietekmējoši defekti uz ledus virsmas, ledus virsmas sagatavošana tiek atkārtota pa iepriekš aprakstītajiem soļiem.

5.2. Eksperimentālā parauga un slieču sagatavošana.

Procedūras izstrādē tiek pieņemts, ka ir izvēlēts viens eksperimentālais skeletoņš un tiek izmantots viens slieču pāris, kas atbilst *IBSF* standarta prasībām. Tie, veicot eksperimentus dažādās dienās/ sesijās netiek mainīti.

Eksperimentālā parauga un slieču sagatavošana pa soļiem ir sekojoša:

5.2.1. Veic slieču virsmas apstrādi, iegūstot virsmas raupjuma parametru *Sa* robežās no 0,02 līdz 0,15  $\mu\text{m}$  (mērot pēc standarta EN ISO 25178). Ieteicamie mērīšanas uzstādījumi 2. tabulā. Ir pieļaujami cita mērījumu procedūra *Ra* vai *Sa* atbilstoši EN ISO 25178.

2. tabula

Virsmas raupjuma mērīšanas uzstādījumi

Mērīšanas adata	<i>Standard Stylus Arm</i> <i>112/2009, tip radius 2 <math>\mu\text{m}</math></i>	Tiek pieļauts analogs
Punktu skaits (X;Y)	300 x 2500	Tiek pieļauts lielāks punktu skaits
Mērījuma zona (X;Y)	2 x 5 mm	Tiek pieļauta lielāka mērījumu zona
Mērīšanas ātrums Bāzes garums	0,5 mm/s Atbilstoši EN ISO 4288	Tiek pieļauts lēnāks mērīšanas ātrums

Iegūtos mērījumu datus apstrādā sekojoši:

- Iegūto virsmu izlīmeņo un noņem formas kļūdu, lai kompensētu pozicionēšanas kļūdas;
- Izmantojot Gausa filtru, atdala viļņainības un raupjuma komponentes pēc EN ISO 25178;
- No filtrētās raupjuma virsmas, aprēķina 3D virsmas tekstūras parametrus.

5.2.2. Slieces nostiprina skeletoņa rāmī un ar slieču izliekuma regulēšanas skrūvi abām sliecēm iestata interesējošo slieču izliekumu. Ieteicams 9 mm no “nulles” spriegojuma, jeb izliekuma rādiuss  $\sim 11500$  m. Spriegojumu kontrolēt pirms katras eksperimentu sesijas. Pieļaujams cits spriegojums un izliekuma rādiuss, taču tas ir jā saglabā nemainīgs.

5.2.3. Paraugam pievieno papildus masu tā centrā. Ieteicams 65 kg, kas atbilst sieviešu un vieglāku vīriešu sportistu masai, sasniedzot kopējo eksperimentālā parauga masu – 95 kg. Pieļaujams cita papildus masa, taču tā ir jā saglabā nemainīga. Papildus masa jā nostiprina parauga masas centrā un nav pieļaujama tās kustība.

5.2.4. Eksperimentālo skeletonu ar sliecēm novieto uz ledus virsmas, līdz slieču temperatūra ir nostabilizējusies un nav vērojama slieču temperatūras atdzišana noteiktā laika periodā (~2 min.). Pie aukstākiem vides apstākļiem, slieču temperatūra sasniedz ledus temperatūru. Ja vides apstākļi ir silti (gaisa temperatūra no +1 °C), slieču temperatūra ledus temperatūru nesasniedz. Kopējais skeletona slieču atdzišanas laiks svārstās no 5 – 15 min. un var tikt kontrolēts ar termokameru *Thermal imager Testo 871 (Testo, Vācija)* vai alternatīvu. Ja nav iespējama slieču temperatūras kontrole, skeletona slieču atdzišanu ieteicams veikt ilgākā laika periodā (vismaz 20 min.).

### 5.3. Eksperimentu veikšanas kārtība.

Eksperimenti var tikt veikti, ja ir izpildīti iepriekš aprakstītie eksperimentu procedūras punkti.

Vides apstākļu ietekmes uz slīdēšanu raksturojošu parametru izpētes gadījumā, eksperimentu veikšanas algoritms pa punktiem ir sekojošs:

5.3.1. Uzstāda ledus temperatūras, gaisa temperatūras un gaisa mitruma mērīšanas ierīces. Ledus temperatūru mēra, izmantojot kontakta tipa termopāri savienotu ar termometru. Pirms termopāra nostiprināšanas, ledū izurbj 1 – 3 mm dziļu un atbilstoši termopāra jūtīgā elementa diametram, lielu urbumu, kurā tas tiek nostiprināts. Gaisa temperatūras un mitruma mērījumi var tikt veikti ar *P330 Temp (Dostmann electronic, Vācija)* vai līdzvērtīgu termometru, kas novietots blakus ledus trasei. Pozīciju vēlam izvēlēties tādu, kas nav tuvā saskarsmē ar operatoru. Nogaida 5 – 10 min., lai mēraparātu vērtības nostabilizējās.

5.3.2. Veic papildus aprīkojuma sagatavošanu un uzstādīšanu. Atkarībā no ledus trases infrastruktūras, jānodrošina nemainīga eksperimentālā parauga palaišana no miera stāvokļa. Var tikt izmantota neelasīga konkrēta garuma ķēde, kas piestiprināta nemainīgā vietā pie trases konstrukcijas. Cits ķēdes posms tiek piestiprināts pie eksperimentālā parauga un tās tiek spriegotas ar tapas palīdzību. Tapu izraujot, paraugs uzsāk kustību. Ir pieļaujams cits spriegošanas mehānisms, taču jānodrošina nemainīga parauga starta pozīcija.

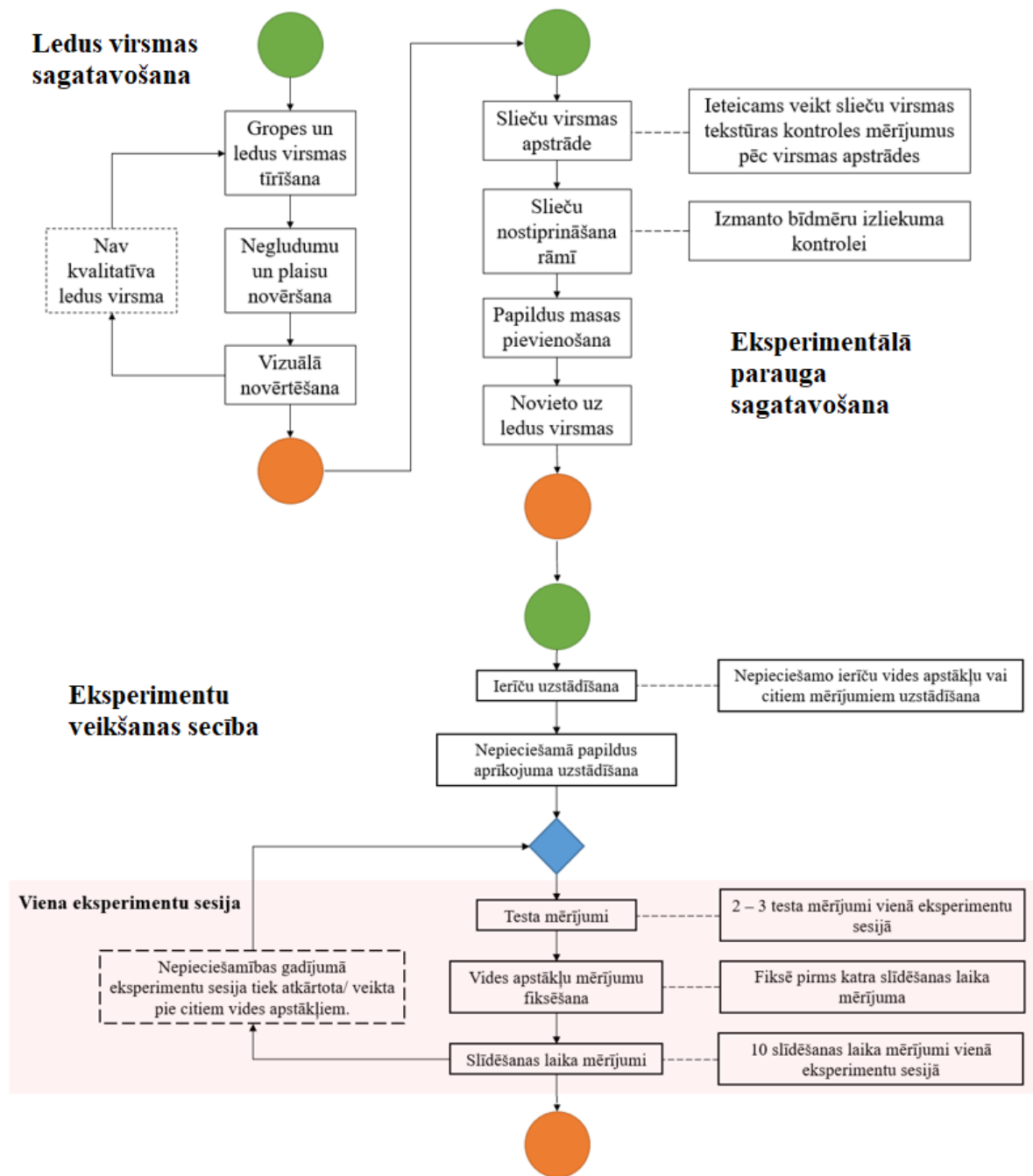
5.3.3. Veic 2 – 3 testa mērījumus. Šo mērījumu laikā, iespējamie negludumi, sarma vai citi traucējoši apstākļi uz ledus virsmas, tiek nogludināti. Paralēli tiek pārbaudīts, vai optisko sensoru laika mērīšanas sistēma strādā bez problēmām.

5.3.4. Nolasa vides apstākļu mērījumus. Vides apstākļu mērījumus vēlam fiksēt pirms katra slīdēšanas laika mērījuma.

5.3.5. Veic slīdēšanas laika mērījumus. Atkarībā no mērīšanas sensoru sistēmas, ledus trases vai citiem aspektiem, var tikt mērīti dažādi parametri, piemēram, slīdēšanas ātrums, kopējais slīdēšanas laiks, momentānais ātrums konkrētā posmā u.c. Ieteicams mērīt kopējo slīdēšanas laiku izmantotās ledus trases garumā. Veic vismaz 10 slīdēšanas laika mērījumus. Kopējais patērētais laiks vienai eksperimentu sesijai ~20 minūtes.

5.4. Lai varētu tikt izstrādāts slīdēšanas laika atkarībā no vides apstākļiem prognozēšanas modelis, minimālais eksperimentu sesiju skaits ir 10 pie dažādiem vides apstākļiem.





1.att. Sagatavošanās mērījumiem un mērījumu veikšanas algoritms.

## 6. MĒRĪJUMU REZULTĀTU APSTRĀDE UN PRECIZITĀTES KONTROLE

6.1. Empīriski iegūtie tiešie mērījumu rezultāti (slīdēšanas laiks, gaisa, ledus temperatūra un gaisa mitrums) tiek apstrādāti sekojoši:

6.1.1. No visiem veiktajiem  $n$  mērījumiem, aprēķina vidējo aritmētisko vērtību:

$$\bar{x} = \frac{m_1 + m_2 \dots + m_n}{n}, \quad (1.1.)$$

kur,  $m_1, m_2 \dots m_n$  – mērījumi;  
 $n$  – veikto mērījumu skaits.

6.1.2. Aprēķina mērījumu standartnovirzi:

$$\sigma = \sqrt{\frac{(m_1 - \bar{x})^2 + (m_2 - \bar{x})^2 + \dots + (m_n - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (1.2.)$$

6.1.3. Aprēķina lielāko iespējamo mērījumu kļūdu robežas:

$$\Delta_{lim} = \pm 3\sigma. \quad (1.3.)$$

Mērījumi, kas pārsniedz kļūdu robežas, var tikt uzskatīti kā mērījumi ar rupju kļūdu un tiek izslēgti.

6.1.4. Izvēlas ticamības varbūtības  $\beta$  vērtību – 0,95 un pēc 3. tabulas atrod Stjudenta koeficienta vērtību  $t_\beta(n)$ . Var izmantot Stjudenta koeficienta vērtību tabulas.

3. tabula

Stjudenta koeficientu tabulas fragments  $t_\beta(n)$

$\beta$ n	0,70	0,95	0,99
5	1,16	2,57	4,03
6	1,13	2,45	3,71
7	1,12	2,36	3,50
8	1,11	2,31	3,36
9	1,10	2,26	3,25
10	1,09	2,23	3,17
$\infty$	1,04	1,96	2,58

6.1.5. Attiecīgi aprēķina mērījuma absolūto kļūdu:

$$\Delta x_s = \sigma t_\beta(n), \quad (1.4.)$$

kur,  $t_\beta(n)$  – Stjudenta koeficienta vērtība, kas atkarīga no veikto mērījumu skaita.

6.1.6. Aprēķina sistemātiskās kļūdas daļu, kas nosaka mērinstrumenta precizitāti:

$$\Delta x_\delta = \frac{\delta x}{3} t_\beta(\infty), \quad (1.5.)$$

kur,  $\delta x$  – mērinstrumenta pamatkļūda lieluma  $x$  mērījumam;

$t_\beta(\infty)$  – Stjudenta koeficienta vērtība, kas atbilst bezgalīgam mērījumu skaitam.

6.1.7. Galīgā absolūtā kļūda  $\Delta x$  tiek pieņemta lielākā vērtība no gadījuma (1.4.) un sistemātiskās kļūdas (1.5.) vērtībām. Ja  $\Delta x_s$  un  $\Delta x_\delta$  atšķirās mazāk kā trīs reizes, tad galīgo absolūto kļūdu  $\Delta x$  aprēķina pēc sekojošas formulas:

$$\Delta x = \sqrt{(\Delta x_s)^2 + (\Delta x_\delta)^2}. \quad (1.6.)$$

6.1.8. Aprēķina relatīvo kļūdu  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = \frac{\Delta x}{x_{vid}} 100\%; \quad (1.7.)$$

Relatīvās kļūdas vērtība jānovērtē ar piesardzību, ņemot vērā, ka to būtiski ietekmē mērījumu skaitliskās vērtības. Jo mazāka kļūda, jo precīzāk veikti mērījumi.

6.2. Izmēritie un apstrādātie mērījumi, tiek izmantoti slīdēšanas laika prognozēšanas modeļa regresijas vienādojuma izstrādē un tā novērtēšanā. Prognozēšanas modeļa izstrādes un novērtēšanas algoritms 3. attēlā.

6.2.1. Prognozēšanas modelis tiek veidots, izmantojot daudzfaktoru regresijas analīzi pēc (1.8.) formulas. Ņemot vērā, ka (1.8.) regresijas koeficientu aprēķināšana pēc savas būtības ir laikietilpīga un pietiekami sarežģīta, lai aprēķinātu regresijas koeficientus -  $b_0; b_1; b_2; b_3; b_4; b_5; b_6$ , tiek izmantots *Microsoft Excel Data Solver*. Var izmantot alternatīvas statistikas programmas, piemēram, *MatLab*, *MiniTab*, u.c. 2. attēlā norādīta ieejas matrica regresijas koeficientu aprēķināšanai *Microsoft Excel Data Solver*. 2. attēlā norādīta ieejas datu matrica (3.6.) regresijas vienādojumam.

$$T_{ks} = b_0 + b_1 T_{gais} + b_2 T_{ledus} + b_3 T_{gais} T_{ledus} + b_4 T_{gais}^2 + b_5 T_{ledus}^2 + b_6 RH; \quad (1.8.)$$

kur,  $b_0, b_1 \dots b_n$  – regresijas koeficienti;

$RH$  – izmērītais relatīvais gaisa mitrums, %.

$T_{gais}$  – izmērītā gaisa temperatūra, °C.

$T_{ledus}$  – izmērītā ledus temperatūra, °C.

Nr. p. k.	Gaisa mitrums, %	Gaisa temperatūra, °C	Gaisa temperatūra <sup>2</sup>	Ledus temperatūra, °C	Ledus temperatūra <sup>2</sup>	Gaisa temperatūra * Ledus temperatūra	Izmērītais slīdēšanas laiks, s	Aprēķinātais slīdēšanas laiks, s
1								
n								

2. att. Ieejas datu matricas piemērs

6.2.2. Veic regresijas modeļa novērtēšanu.

Aprēķina vidējo absolūto procentuālo kļūdu:

$$\overline{A_\varepsilon} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_{izm.} - y_{apr.}}{y_{izm.}} \right| \cdot 100, \%; \quad (1.9.)$$

kur,  $y_{izm.}$  – eksperimentāli izmērītās slīdēšanas laika vērtības;

$y_{apr.}$  – aprēķinātās slīdēšanas laika vērtības, izmantojot regresijas analīzi;

Ja vidējā absolūtā procentuālā kļūda ir mazāka par 5 %, matemātiskā precizitāte tiek novērtēta kā apmierinoša.

6.2.3. Pīrsona korelācijas koeficients  $r$  (robežās no -1 līdz 1), tiek aprēķināts:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (y_{izm.} - \overline{y_{izm.}}) \cdot (y_{apr.} - \overline{y_{apr.}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_{izm.} - \overline{y_{izm.}})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_{apr.} - \overline{y_{apr.}})^2}}; \quad (1.10.)$$

kur,  $\overline{y_{izm.}}$  – vidējā eksperimentāli izmērītā slīdēšanas laika vērtība;

$\overline{y_{apr.}}$  – vidējā aprēķinātā slīdēšanas laika vērtība, izmantojot regresijas analīzi;

6.2.4. Iegūto korelācijas koeficientu salīdzina ar kritisko vērtību  $r_{\alpha;n}$  (nolasa no normālā sadalījuma tabulām, nosakot korelācijas koeficienta kritisko vērtību, atkarībā no gadījumu skaita (skat. 4. tabulu). Korelācija ir ticama, ja  $r_{\alpha;n} < r$ . Ja sakarība neizpildās, veic papildus eksperimentālos mērījumus.

4. tabula

Korelācijas koeficientu kritisko vērtību tabulas fragments

n	$r_{\alpha;n}$
6	0,811
7	0,754
8	0,707
9	0,666
10	0,632
11	0,602
12	0,576

6.2.5. Prognozēšanas modelim novērtē statistisko nozīmīgumu ar dispersijas analīzes metodi (*ANOVA (Analysis of Variance)*). Ja regresijas vienādojumam pēc Fišera kritērija  $F$  testa,  $p$ -vērtība nesasniedz 0,05, tad izstrādātais regresijas modelis ir statistiski nozīmīgs, jeb dati ir uzticami.

6.2.6. Aprēķina koriģēto determinācijas koeficientu

$$\bar{R}^2 = 1 - (1 - R^2) \frac{n - 1}{n - p - 1}, \quad (1.11.)$$

kur,  $p$  – neatkarīgo mainīgo skaits;

$R^2$  – determinācijas koeficients.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_{izm.} - \bar{y}_{izm.})^2 - \sum_{i=1}^n (y_{izm.} - y_{apr.})^2}{\sum_{i=1}^n (y_{izm.} - \bar{y}_{izm.})^2}. \quad (1.12.)$$

Determinācijas koeficienta (robežās no 0 līdz 1) pieļaujamā vērtība, kas norāda uz, konkrētā gadījumā, ciešu sakarību zināmajā literatūrā nav stingri definēta, līdz ar to pieļaujamā robeža var tikt brīvi izvēlēta.

6.2.7. Aprēķina prognozēšanas modeļa standartnovirzi:

$$\sigma_{reg} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_{apr.} - y_{izm.})^2}{n - p - 1}; \quad (1.13.)$$

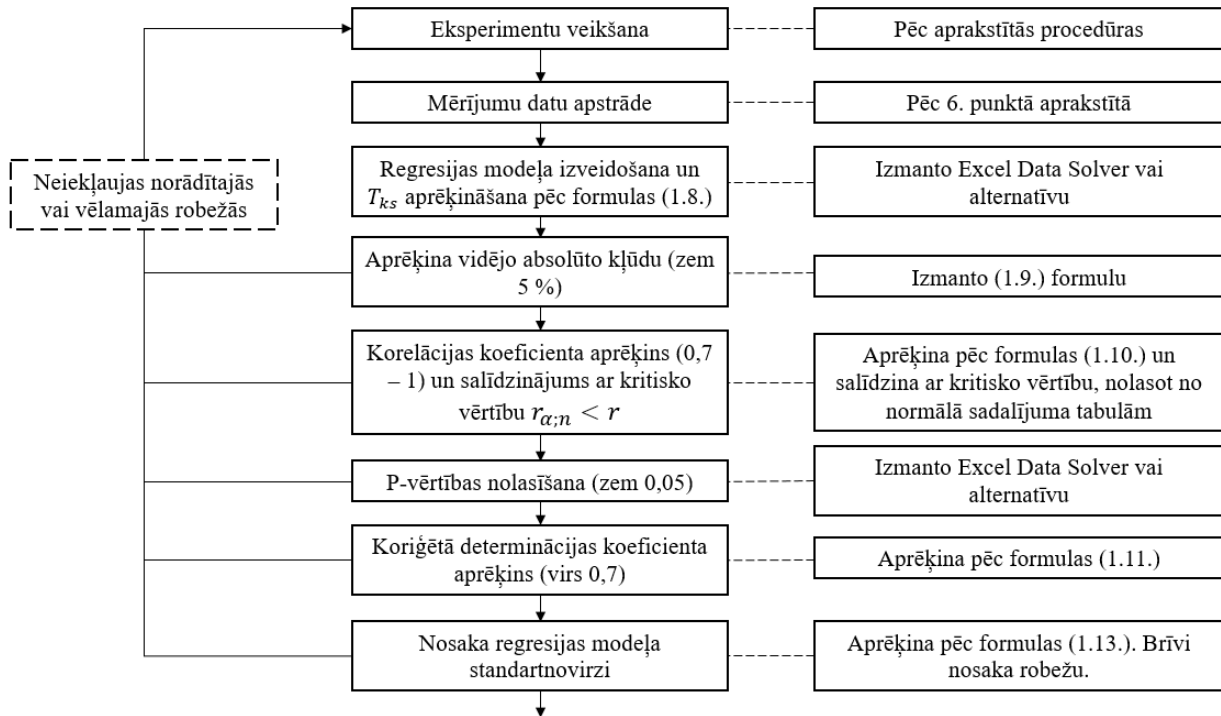
Regresijas modeļa standartnovirze ir absolūts parametrs, kas parāda vidējo attālumu, kādā datu punkti atrodas no regresijas līnijas. Pieņemamu vērtību definē pēc saviem ieskatiem.

6.2.8. Lai noteiktu, vai kāds no modelī izmantotajiem neatkarīgajiem mainīgajiem nav nozīmīgs, var veikt regresijas koeficientu standartizāciju:

$$\frac{x_1 - \bar{x}_1}{\sigma_1}; \frac{x_2 - \bar{x}_2}{\sigma_2}; \dots \frac{x_k - \bar{x}_k}{\sigma_k}; \quad (1.14.)$$

kur,  $x_1, x_2 \dots x_n$  – neatkarīgie saistītie mainīgie.

Pēc regresijas koeficientu standartizācijas, neatkarīgos mainīgos var salīdzināt savā starpā, jo mazāks koeficients, jo mazāk nozīmīgs ir attiecīgais mainīgais.



3. att. Prognozēšanas modeļa izstrādes un novērtēšanas algoritms.

## 7. PRASĪBAS MĒRĪJUMU PRECIZITĀTEI

7.1. Pieļaujamās eksperimentālo mērījumu kļūdu robežas pie ticamības varbūtības  $\beta$  vērtības – 0,95 ir šādas:

- Slieču virsmas tekstūras raupjuma raksturojošais parametrs  $Sa$  robežās no 0,02 līdz 0,15  $\mu\text{m}$  (mērot pēc standarta EN ISO 25178);
- Vides apstākļu mērījumu vienas eksperimentu sesijas rekomendējamā absolūtā kļūda relatīvajam gaisam mitrumam  $\pm 5 \%$ , gaisa temperatūrai  $\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ , ledus temperatūrai  $\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$  (aprēķinot pēc 1.6. formulas);
- Vienas sesijas kopējā slīdēšanas laika absolūtā kļūda rekomendējama ne lielāka par  $\pm 0,01 \text{ s}$  (aprēķinot pēc 1.6. formulas);

7.2. Pieļaujamās prognozēšanas modeļa novērtēšanas raksturojošu kritēriju robežas ir šādas:

- Vidējā absolūtā procentuālā kļūda rekomendējama mazāka par 5 % (aprēķinot pēc 1.9. formulas);
- Korelācijas koeficients lielāks par korelācijas koeficienta kritisko vērtību  $r_{\alpha;n} < r$  (punkti 6.2.3 un 6.2.4.);

- Regresijas modeļa statistiskā nozīmīguma raksturojošā p-vērtība mazāka par 0,05;
- Koriģētā determinācijas koeficienta vērtība virs 0,5. Rekomendējams virs 0,7 (aprēķinot pēc 1.11. formulas);
- Prognozēšanas modeļa standartnovirze (aprēķinot pēc 1.13. formulas) var tikt brīvi izvēlēta.

## 8. APRĒĶINA PIEMĒRS

### Dots:

1. Sākuma slīdēšanas laika mērījumi (kopā 12), izmantojot slīdēšanas raksturojošu parametra noteikšanas mēriekārtu reālu apstākļu eksperimentu režīmā (sakārtoti 5. tabulā). Katrā eksperimenta sesijā veikti 12 slīdēšanas laika mērījumi, ievērojot izstrādāto metodiku.

2. Slieču virsmas tekstūras raupjuma raksturojošais parametrs *Sa* robežās no 0,02 līdz 0,15 μm (mērot pēc standarta EN ISO 25178).

### Noteikt:

1. Eksperimentālo mērījumu absolūto kļūdu robežas pie ticamības varbūtības β vērtības – 0,95;
2. Izstrādāt regresijas vienādojumu pēc formulas (1.8.) un ieejas datu matricas (skat. 2. att.);
3. Veikt regresijas modeļa atbilstības pārbaudi, iekļaujot metodikā aprakstītos punktus 6.2.2. līdz 6.2.7.

### Aprēķins

1. Eksperimentālo mērījumu absolūto kļūdu robežas pie ticamības varbūtības β vērtības – 0,95.

Piemērā tiek aprēķināta slīdēšanas laika absolūtā kļūda 1. eksperimentam (pārējiem parametriem aprēķins līdzvērtīgs).

- Aprēķina vidējo aritmētisko vērtību no visiem mērījumiem:

$$\bar{x} = \frac{0,840 + 0,836 \dots + 0,836}{10} = 0,836;$$

- Aprēķina mērījumu standartnovirzi:

$$\sigma = \sqrt{\frac{(0,840 - 0,836)^2 + (0,836 - 0,836)^2 + \dots + (0,836 - 0,836)^2}{10 - 1}} = 0,002;$$

- Aprēķina lielāko iespējamo mērījumu kļūdu robežas:

$$\Delta_{lim} = \pm 3 \cdot 0,002 = \pm 0,006;$$

- Aprēķina mērījuma absolūto kļūdu:

$$\Delta x_s = 0,002 \cdot 2,26 = 0,004;$$

- Aprēķina sistemātiskās kļūdas daļu, kas nosaka mērinstrumenta precizitāti:

$$\Delta x_\delta = \frac{0,0005}{3} \cdot 1,96 = 0,0003;$$

Tā kā  $\Delta x_s$  ir vismaz 3 reizes lielāka par  $\Delta x_\delta$ , tad absolūtā kļūda  $\Delta x$  tiek pieņemta līdzvērtīga  $\Delta x_s$ , jeb 0,004 s.

Mērījumu rezultātu pieraksta attiecīgi  $0,836 \pm 0,004$  s. Iegūtie mērījumu rezultāti apkopoti 5. tabulā.

5. tabula

Gaisa mitruma, gaisa temperatūras, ledus temperatūras un sākuma slīdēšanas laika mērījumi

Eksperiments	Relatīvais gaisa mitrums, %	Gaisa temperatūra, °C	Ledus temperatūra, °C	Slīdēšanas laiks, s
1	90 ±2,2	8 ±1,1	-2,5 ±0,7	0,836 ±0,004
2	95 ±2,0	2 ±1,2	-4 ±0,7	0,832 ±0,003
3	95 ±2,0	1,5 ±1,1	-4 ±0,8	0,832 ±0,003
4	95 ±3,3	8 ±1,1	-1 ±0,7	0,846 ±0,002
5	92 ±3,0	10 ±1,0	-1,5 ±0,7	0,844 ±0,002
6	88 ±3,6	6 ±1,0	-2 ±0,7	0,843 ±0,002
7	86 ±2,0	-3 ±1,0	-4,5 ±0,7	0,859 ±0,004
8	85 ±2,4	-2 ±1,0	-3 ±0,8	0,849 ±0,003
9	56 ±3,9	-3,5 ±1,0	-5 ±0,8	0,871 ±0,003
10	62 ±2,7	-3,5 ±1,0	-6 ±0,7	0,872 ±0,003
11	78 ±2,5	-1 ±1,0	-5 ±0,7	0,866 ±0,008
12	70 ±2,5	-1 ±1,1	-4 ±0,9	0,868 ±0,005

2. Izstrādāt regresijas vienādojumu pēc formulas (1.8.) un ieejas datu matricas (skat. 2. att.). Pēc 5. tabulas mērījumu datiem, izstrādā regresijas modeļa ieejas matrica (skat. 6. tabulu) un, izmantojot, *Microsoft Excel Data Solver*, aprēķina regresijas koeficientus.

Rezultātā iegūst regresijas vienādojumu:

$$T_{ks} = 0,866 + 4,7 \cdot 10^{-3} \cdot T_{gaiiss} - 1,1 \cdot 10^{-2} \cdot T_{ledus} + 1,8 \cdot 10^{-3} \cdot T_{gaiiss} \cdot T_{ledus} - 1,5 \cdot 10^{-4} \cdot T_{gaiiss}^2 - 1,6 \cdot 10^{-3} \cdot T_{ledus}^2 - 6,7 \cdot 10^{-4} \cdot RH;$$

Pēc izstrādātā regresijas vienādojuma, aprēķina teorētisko slīdēšanas laiku (aprēķinātais slīdēšanas laiks 6. tabulā).

## Ieejas matrica regresijas vienādojuma izstrādāšanai

Nr. p. k.	Gaisa mitrums, %	Gaisa temperatūra, °C	Gaisa temperatūra <sup>2</sup>	Ledus temperatūra, °C	Ledus temperatūra <sup>2</sup>	Gaisa temperatūra * Ledus temperatūra	Izmērītais slīdēšanas laiks, s	Aprēķinātais slīdēšanas laiks, s
1	90	8	64	-2.5	6.25	-20	0.836	0.836
2	95	2	4	-4	16	-8	0.832	0.836
3	95	1.5	2.25	-4	16	-6	0.832	0.838
4	95	8	64	-1	1	-8	0.846	0.846
5	92	10	100	-1.5	2.25	-15	0.844	0.843
6	88	6	36	-2	4	-12	0.843	0.845
7	86	-3	9	-4.5	20.25	13.5	0.859	0.856
8	85	-2	4	-3	9	6	0.849	0.850
9	56	-3.5	12.25	-5	25	17.5	0.871	0.879
10	62	-3.5	12.25	-6	36	21	0.872	0.874
11	78	-1	1	-5	25	5	0.866	0.855
12	70	-1	1	-4	16	4	0.868	0.861

## 3. Regresijas modeļa atbilstības pārbaude.

- Aprēķina vidējo absolūto procentuālo kļūdu:

$$\bar{A}_\varepsilon = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^n \left| \frac{0,836 - 0,836}{0,836} + \frac{0,832 - 0,836}{0,832} + \dots + \frac{0,868 - 0,861}{0,868} \right| \cdot 100 = 0,44 \%$$

- Pīrsona korelācijas koeficients  $r$  (robežās no -1 līdz 1), tiek aprēķināts:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (y_{izm.} - \bar{y}_{izm.}) \cdot (y_{apr.} - \bar{y}_{apr.})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_{izm.} - \bar{y}_{izm.})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_{apr.} - \bar{y}_{apr.})^2}} = 0,94.$$

$$r_{\alpha;n} < r = 0,576 < 0,94.$$

- Tiek nolasīta p-vērtība – 0,03:

$$0,03 < 0,05.$$

- Aprēķina determinācijas koeficientu:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_{izm.} - \bar{y}_{izm.})^2 - \sum_{i=1}^n (y_{izm.} - y_{apr.})^2}{\sum_{i=1}^n (y_{izm.} - \bar{y}_{izm.})^2} = 0,88.$$

- Aprēķina koriģēto determinācijas koeficientu:

$$\bar{R}^2 = 1 - (1 - R^2) \frac{n - 1}{n - p - 1} = 1 - (1 - 0,88) \frac{12 - 1}{12 - 6 - 1} = 0,73.$$

- Aprēķina prognozēšanas modeļa standartnovirzi:

$$\sigma_{reg} = \frac{\sum_{i=1}^n (0,836 - 0,836)^2 + (0,832 - 0,836)^2 + \dots + (0,861 - 0,868)^2}{12 - 6 - 1} = 0,008.$$

Iegūtie prognozēšanas modeļa atbilstības pārbaudes kritēriji, to rekomendējamās vērtības un aprēķinātās vērtības 7. tabulā.



Aprēķināto prognozēšanas modeļa atbilstības pārbaudes kritēriju salīdzinājums ar metodikā rekomendējamajiem

Parametrs	Rekomendējamais	Aprēķinātais
$A_\varepsilon$	Zem 5 %	0,44 %
$r$	Virs 0,576	0,94
p – vērtība	Zem 0,05	0,03
$\bar{R}^2$	Virs 0,7	0,73
$\sigma_{reg}$	Brīvi izvēlās	0,008