

LATVIJAS UNIVERSITĀTE
ĢEOGRĀFIJAS UN ZEMES ZINĀTŅU FAKULTĀTE
ĢEOLOĢIJAS NODAĻA

**IEKŠZEMES KĀPU MORFOLOĢIJA, IEKŠĒJĀ UZBŪVE UN
ATTĪSTĪBA ZIEMEĻVIDZEMĒ**

MAĢISTRA DARBS

Autors: **Ivars Celiņš**
Stud. apl. ic06007

Darba vadītājs: Vitālijs Zelčs
Dr. ģeol., profesors

RĪGA 2012

Anotācija

Celiņš, I. 2011. Iekšzemes kāpu morfoloģija, iekšējā uzbūve un attīstība Ziemeļvidzemē. Maģistra darbs. Latvijas Universitāte, Rīga. 83 lpp.

Maģistra darbā ir veikts pētījums par Ziemeļvidzemē esošo kāpu izplatību, morfoloģiju, iekšējo uzbūvi un vecumu. Izmantojot ģeogrāfiskās informācijas sistēmas, radiolokācijas profilēšanu un optiski stimulētās luminiscences datēšanu, pētījuma laikā tika iegūts jauns un apjomīgs datu kopums. Rezultāti liecina, ka parabolisko kāpu izplatība ir cieši saistīta ar smilšaino nogulumu izplatības areālu. Kāpu veidošanās laikā posmā ir dominējusi aktīva kāpu migrācija, bet to stabilizācija notikusi valdošo rietumu, rietumu dienvidrietumu un dienvidrietumu vēja virzienu ietekmē. Augstas precizitātes optiski stimulētās luminiscences datējumu rezultāti norāda uz kāpu stabilizāciju vēlā driasas, preboreāla un boreāla laikā.

Raksturvārdi: Ziemeļvidzeme, iekšzemes kāpas, paleovēju virzieni, ģeoradars, OSL datēšana

Annotation

Celiņš I. 2012. The morphology, internal structure and development of inland dunes at North Vidzeme, Master thesis, University of Latvia, Riga, 83 p.

The Master's thesis deals with problems of distribution, morphology, internal structure and development of inland dunes at North Vidzeme. Various study methods including geographic information systems, ground penetrating radar and optically stimulated luminescence dating were used. Large amount of new data set was collected and analysed due to this study. The results suggest that distribution of parabolic dunes is in close association with distribution of sandy glaciofluvial and glaciolacustrine sediments. The main wind directions from SW, WSW and W resemble the phase of dune stabilization, but the end of dune activity can be related to the Younger Dryas, Preboreal and Boreal time.

Keywords: North Vidzeme, inland dunes, wind palaeodirections, GPR sounding, OSL dating.

SATURS

Ievads	6
1. Iekšzemes kāpas un to izplatība Vislas apledojuuma klātajā un tam pieguļošajā teritorijā	8
2. Pētījumu teritorijas raksturojums	14
2.1. Teritorijas ģeoloģiskā uzbūve un ģeomorfoloģisks raksturojums	16
2.1.1. Burtnieka līdzenums	16
2.1.2. Sedas līdzenums	18
2.1.3. Trapenes līdzenums	19
2.2. Teritorijas ģeoloģiskā attīstība Vislas apledojuuma beigu posmā un Holocēna sākumā	21
3. Materiāli un metodes	24
3.1. Izmantotie materiāli	25
3.2. ĢIS datu bāze un kāpu morfometriskie mērījumi	27
3.2.1. Datu bāzes izveide	27
3.2.2. Datu apstrāde un interpretācija	29
3.3. Iekšējās uzbūves pētījumi	30
3.3.1. Slīpslāņojuma mērījumi un rezultātu apstrāde	30
3.3.2. Radiolokācijas metode	31
3.4. Optiski stimulētās luminescences datēšanas metode	33
3.4.1. Paraugošana un paraugu apstrāde	35
3.4.2. Dabiskās radiācijas mērījumi	37
3.4.3. Paraugu datēšana, izmantojot SAR protokolu	38
4. Rezultāti un interpretācija	42
4.1. Iekšzemes kāpu izplatība un morfoloģija	42
4.1.1. Burtnieka līdzenums	43
4.1.2. Sedas līdzenums	45
4.1.3. Trapenes līdzenums	47
4.2. Kāpu iekšējā uzbūve	50
4.2.1. Burtnieka līdzenums	50
4.2.2. Sedas līdzenums	52
4.2.3. Trapenes līdzenums	56
4.3. Optiski stimulētās luminescences datēšana	59
4.3.1. Analizēto paraugu luminescences īpašības	59
4.3.2. Optiski stimulētās luminescences datēšanas rezultāti	62
5. Diskusija	65
Secinājumi	70
Pateicības	71
Literatūras Saraksts	72
Pielikumi	80

DARBĀ LIETOTIE SAĪSINĀJUMI

ESF – Eiropas Sociālais fons

GPS – globālās pozicionēšanas sistēma

GIS – ģeogrāfiskās informācijas sistēmas

GZZF – Ģeogrāfijas un Zemes zinātņu fakultāte

H₂O₂ – ūdeņraža peroksīds

HCL – hlorūdeņražskābe jeb sālsskābe

HF – fluorūdeņražskābe

IR – infrasarkanā gaisma

IRSL – ar infrasarkanu gaismu stimulētā luminiscence

LatPos – Latvijas GPS bāzes staciju sistēma

LĢIA – Latvijas Ģeotelpiskās informācijas aģentūra

LU – Latvijas Universitāte

LZP – Latvijas Zinātnes padome

NLL – Ziemeļu Luminiscences datēšanas laboratorija

OSL – optiski stimulētā luminiscence

PVC – polivinilhlorīds

SAR – viena subparauga reģenerēšana

TL – termoluminiscence

WMS – web map service

Nogulumu saguluma apstākļu un atsegumu vērsumu apzīmēšanā pielietoti tradicionālie debespušu saīsinājumi.

IEVADS

Iekšzemes kāpas ir nozīmīgs reljefa vidējformu kopums, kas veido plašu un garu joslu gar pēdējā apledošanas un tā deglaciācijas fāzes malas veidojumiem. Šī josla sākas Jitlandes pussalā un ar pārtraukumiem ir labi izsekojama līdz pat Urālu kalniem, tostarp arī Baltijas valstu teritorijā (Koster, 1988; Jungerius and Riksen, 2010). Neskatoties uz to, iekšzemes kāpas gan Latvijā, gan abu tuvāko kaimiņvalstu – Igaunijas un Lietuvas - teritorijā ir nepietiekami pētītas reljefa formas. Iekšzemes kāpas Ziemeļvidzemē ir vispārīgi pieminētas atsevišķos pētījumos (Nomals, 1943; Аболтыньш, 1971; Eberhards, 2006; Līcis, 2006). Detalizētāku zināšanu kopumu par iekšzemes kāpu izplatību, to morfoloģiju un vecumu ir sniedzis Nartišs ar līdzautoriem (Nartišs et al., 2009) un Celiņš un Nartišs (2011) savos pētījumos par iekšzemes kāpām Sedas līdzenumā.

Kāpu sistēmas ir ļoti jūtīgas pret klimata izmaiņām un eolajam transportam nepieciešamo nogulumu pieejamību (Wilkins and Ford, 2006). Tādēļ izpratne par iekšzemes kāpu morfoloģiju, iekšējo uzbūvi un vecumu var sniegt vērtīgu informācijas kopumu par kāpu aktivitātes ilgumu un klimata izmaiņām pēdējā apledošanas beigu posmā un pēcdeduslaikmetā.

Maģistra darba izstrādes laikā pielietotas daudzveidīgas un aktuālas pētījumu metodes. Pēc kartogrāfiskā materiāla izveidotā datu bāze sniedz vērtīgu informāciju par kāpu izplatību un morfoloģiju reģionālā mērogā. Savukārt radiolokācijas metode apvienojumā ar optiski stimulētās luminescences (turpmāk tekstā OSL) datēšanu, ir efektīvs metožu kopums individuālu kāpu dinamikas vēstures izpētē (Bristow et al., 2007).

Izvirzītā darba hipotēze ir, ka pētījumā teritorijā esošās iekšzemes kāpas veidojušās un aktīvi migrējušās drīz pēc piededāja ezeru drenāžas, pārpušot smilšainos glaciolimniskos un glaciofluviālos nogulumus, veģetācijas ekspansijas apstākļos, kāpu aktivitātei pakāpeniski aprimstot holocēna sākumā.

Maģistra darba mērķis ir veikt detalizētus iekšzemes kāpu pētījumus Ziemeļvidzemē, lai iegūtu jaunus un precīzus datus par to morfoloģiju, iekšējo uzbūvi un attīstības gaitu.

Mērķa sasniegšanai tika izvirzīti sekojoši darba uzdevumi:

1. apzināt un veikt pieejamās zinātniskās literatūras studijas par kāpu reljefa veidošanos, iekšējo uzbūvi, morfoloģiju, aktuālajām pētījumu metodēm un līdzīgiem pētījumiem citviet pasaulē;
2. izmantojot kartogrāfisko materiālu, ĢIS vidē noteikt kāpu izplatību un veikt to morfoloģisko parametru mērījumus, iegūtos datus saglabājot ĢIS datubāzēs;
3. veikt kāpu smilts nogulumu slāņojuma veidojošo elementu mērījumus, veikt to statistisko apstrādi;

4. veikt kāpu iekšējās uzbūves pētījumus, izmantojot radiolokācijas metodi, veikt iegūto datu;
5. veikt neapgaismotu smilts paraugu ievākšanu un to sagatavošanu datēšanai ar optiski stimulētās luminiscences metodi;
6. noteikt ievāktajiem smilts paraugiem vecumu, izmantojot OSL datēšanas metodi;
7. veikt iegūto rezultātu apstrādi un interpretāciju.

Maģistra darba izstrādes gaitā veiktie pētījumi un iegūtie rezultāti sniedz informācijas kopumu par eolās akumulācijas reljefa vidējformām jeb eolajām kāpām Ziemeļvidzemes teritorijā. Darbs strukturēts piecās nodaļās. Pirmajā nodaļā ir sniegts literatūras studiju kopsavilkums par iekšzemes kāpu izplatību un attīstības gaitu Vislas apledojuma klātajā un tam pieguļošajā teritorijā. Otrajā nodaļā ir sniegts ieskats par pētījumu teritorijas ģeoloģisko uzbūvi un attīstību pēdējā apledojuma beigu posmā un holocēna sākumā. Trešajā nodaļā – pētījumā izmantotie materiāli un detalizēts metožu apraksts. Ceturtajā nodaļā ir apskatīts rezultātu apkopojums, ilustrējot raksturīgākos pētījuma rezultātus. Darba piektajā nodaļā ir sniegta rezultātu interpretācija un diskusija par pielietoto metožu precizitāti, iekšzemes kāpu izplatību, morfoloģiju un attīstības gaitu.

Maģistra darbs ietver 83 lappuses, 5 nodaļas, 38 attēlus un 3 pielikumus. Tas satur atsaucis uz 92 izziņas avotu.

Pētījuma izstrādes laikā veiktie lauka darbi, smilšu paraugu datēšana ar OSL metodi un šīs metodes apgūšana tika finansēta no ESF projekta “*Atbalsts maģistra studiju programmu īstenošanai Latvijas Universitātē*”, LU pētniecības projekta Nr. 2007/ZP-87 „*Skandināvijas ledusvairoga dienvidu malas iekšējās zonas vēlā Vislas posma deglaciācijas notikumu hronoloģijas pilnveidošana*” un LZP projekta Nr. 09.1568 „*Ģeogrāfisko un ģeoloģisko procesu un faktoru ietekme uz Latvijas dabas apstākļiem un sabiedrību*” līdzekļiem.

Maģistra darba izstrādes laikā iegūtie rezultāti ir prezentēti 2. Starptautiskajā ģeoloģijas studentu konferencē (Celiņš and Nartišs, 2011), Latvijas Universitātes 69. un 70. zinātniskajā konferencē (Celiņš un Karušs, 2011a; Celiņš u.c., 2012) un Daugavpils Universitātes 70. Starptautiskajā zinātniskajā konferencē (Celiņš un Karušs, 2011b), kā arī izmantoti divu zinātnisko rakstu sagatavošanā (Celiņš un Nartišs, 2011; Celiņš un Karušs, 2011c) un INQUA Peribaltijas darba grupas lauka simpozija „*Extent and timing of Weichselian glaciation southeast of the Baltic Sea*” lauka zinātniskās ekskursijas maršrutā (Nartišs et al. 2009).

1. IEKŠZEMES KĀPAS UN TO IZPLATĪBA VISLAS APLEDOJUMA KLĀTAJĀ UN TAM PIEGUĻOŠAJĀ TERITORIJĀ

Iekšzemes kāpas un citi nozīmīgi eolie veidojumi Eiropā ir plaši sastopami gar pēdējā apledojuma maksimālās izplatības robežu un tā atkāpšanās gaitas malas veidojumiem (skat. 1.1. att.). Skarbaiss klimats ledāja malas zonā un patstāvīga smilšaino nogulumu piense no ledāja kalpoja kā ideāls apstākļu kopums vēja ģeoloģiskajai darbībai. Ledājam atkāpjoties, atsedzās milzīgas sauszemes platības, kas tika pakļautas vēja iedarbībai un ar to saistītajiem ģeoloģiskajiem procesiem (Koster, 1988; Kasse, 2002).



1.1. attēls. Eiropas smilšu joslas izplatība saistībā ar ledāja izplatības robežām (Zeeberg, 1998, ar autora papildinājumiem)

Auksta klimata apstākļos kāpas var veidoties no eolos procesos pārstrāda dažādas cilmes materiāla: (a) aluviāliem nogulumiem uz upju terasēm vai sausajās ielejās; (b) fluviāliem vai glaciofluviāliem deltu un palieņu nogulumiem; (c) pieledāja baseina nogulumiem pēc to drenāžas; (d) pieledāju baseinu vai kādreizējo jūru stadiju piekrastes nogulumiem (Kasse, 2002).

Pirmā eolās aktivitātes fāze Eiropā ir saistīta ar Vislas apledojuma maksimālās izplatības laiku pirms 25-15 tūkstošiem ^{14}C gadu (Kasse, 2002) vai 30-18,5 tūkstoši kalendāro gadu, balstoties uz *INtCal09* ^{14}C kalibrācijas līkni. Šajā laikā eolie procesi attīstījās skarbos pieledāja apstākļos. Vidējā gada gaisa temperatūra bija zem -8°C , un ledāja malas zonā valdīja mūžīgais sasalums, par ko liecina Belģijā atrastie ledus ķīļu veidojumi, kuru vecums ir 21 tūkstoši kalendāro gadu (Buylaert et al., 2009). Visticamāk, tieši mūžīgā sasaluma dēļ,

vēja erodējošā un transportējošā darbība bija salīdzinoši limitēta, un eolo nogulumu biezums pieauga lēni, tomēr ilgākā laika posmā spēja veidoties līdz 10 m biezs, horizontāli slāņots eolo nogulumu kopums (Zeeberg, 1998). Ievērojamas eolo kāpu formas šajā fāzē praktiski nav sastopamas. Kāpas šajā laikā, visticamāk, neveidojās dēļ lielā vēja stipruma un transportam pieejamā materiāla attiecības, kā arī savu ietekmi varēja radīt sezonāli mainīgs vējš (Zeeberg, 1998). Šajā laikā eolo nogulumu izejmateriāls nereti ir saistīts ar fluviālajiem nogulumiem, veidojot fluviālo un eolos procesos pārstrādātu nogulumu sērijas. Fluviālo nogulumu daudzuma samazināšanās attiecībā pret eolo nogulumu daudzumu vertikālā griezumā liecina, ka klimats, pateicoties virs ledāja dominējošajiem anticiklonālajiem apstākļiem, šajā laikā pakāpeniski kļūst sausāks. Okeāna līmenis ievērojami kritās, atsedzot lielas jūras gultnes platības ZR Eiropā, kas arī kalpoja par papildus smilts pieneses avotu (Zeeberg, 1998).

Vislas apledošanas beigu posmā (15-11,9 tūkstoši ^{14}C gadi vai 18,5-13,7 tūkstoši kalendāro gadu pēc *INtCal09*) norisinājās eolās aktivitātes otrā fāze. Ledājs šajā periodā atkāpās un vēja darbībai pavērās plaši glaciofluviālie un glaciolimniskie līdzenumi un citi ledāja veidotie smilšainie nogulumi (Zeeberg, 1998). Klimats vairs nebija tik ļoti auksts kā pirmajā fāzē, un arī mūžīgais sasalums strauji izzuda. Jaunāko ledus ķīļu atstāto nospiedumu vecums Beļģijas ziemeļu daļā sasniedz $13,9 \pm 1$ tūkstošus kalendāro gadu (Buylaert et al., 2009), liecinot, ka skarbi apstākļi pastāvējuši arī tālu no ledāja malas. Gruntsūdens līmenis pakāpeniski pazeminājās dēļ glacioizostātiskās zemes virsmas pacelšanās un grunts ilggadējā sasaluma degradācijas ietekmē. Islandes minimuma (ciklona) nostiprināšanās sekmēja stipri izteiktu viena virziena vēju dominanci cauru gadu, kas radīja ļoti labvēlīgus apstākļus vēja ģeoloģiskajai darbībai un kāpu attīstībai (Zeeberg, 1998).

Šī laika eolajiem nogulumiem ir raksturīgs horizontāls slāņojums ar smalkākas un rupjākas smilts slāņu mijām, tāpat sastopamas zemas kāpas. Šie nogulumi veido samērā biezu nogulumu slāni un ir plaši izplatīti viscaur Eiropas smilts joslai un tiek dēvēti arī par segsmiltīm (no angļu *coversand*), jo pilnībā vai daļēji pārsedz vecākas reljefa formas un nogulumus. Tieši šie eolie nogulumi visbiežāk tiek pārstrādāti vēlākajos eolajos procesos holocēnā. Segsmiltis veido viļņotu līdzena virsmu, bet Nīderlandē un Polijā ir sastopamas arī ar segsmiltīm saistītas zemas kāpas. To relatīvais augstums ir līdz 3,5 m. Fāzes beigu posmā, galvenokārt Eiropas austrumdaļā veidojās arī augstas kāpas ar aizvēja nogāzei raksturīgu slāņu sagulumu (Kasse, 2002).

Lai arī klimats šajā periodā bija kļuvis ievērojami siltāks, veģetācijas sega Eiropas smilts joslā attīstījās ļoti lēni. Smilšainais materiāls bija ļoti neauglīgs un sauss, bet aktīvi eolie procesi varēja iznīcināt un aprakt pat salīdzinoši attīstītu veģetācijas segu. Daudzās vietās vāja veģetācijas sega izveidojās tikai bēlinga klimatiskā optimuma laikā pirms 12,5 -

12,0 tūkstošiem ^{14}C gadu vai 14,8 - 13,8 tūkstoši kalendāro gadu pēc *INtCal09*. Tieši veģetācijas attīstība šajā fāzē ir nozīmīga, lai eolo nogulumu uzkrāšanās no segsmiltīm mainītos uz eolajām kāpām. Bet tikmēr mālaināki un horizontāli slāņoti bēlinga vecuma nogulumi Nīderlandē varētu būt skaidrojami, ar smilts daudzuma samazināšanos dēļ veģetācijas attīstības. Tāpēc tur eolajos nogulumos lielāku lomu spēlēja smalkāks un tālāk transportēts materiāls (Kasse, 2002).

Dažādi pētījumi liecina, ka dominējošais paleovēju virziens šajā laika posmā ir bijis no rietumiem vai ziemeļrietumiem, savukārt tuvāk ledāja malai liela loma ir bijusi arī no ledāja virsmas plūstošajiem katabātiskajiem vējiem (Kasse, 2002).

Tiek pieņemts, ka šīs eolās aktivitātes fāze beidzās allerēda sākumā (11,9 tūkstoši ^{14}C gadu vai 13,7 tūkstoši kalendāro gadu pēc *INtCal09*), kad praktiski visā Eiropā kāpu veidošanās bija apstājusies pateicoties šim klimata optimumam, kas sekmēja bagātīgākas veģetācijas attīstību. Tieši allerēda interstadiāla laikā veidojušās augsnes daudzviet tiek izmantotas kā robežslānis starp otro un trešo eolās aktivitātes ciklu (Zeeberg, 1998).

Vēlā driasā laikā eolā procesi reaktivizējas praktiski visā Eiropas smilts joslā. Uz šo periodu var attiecināt trešo eolās aktivitātes fāzi, kas turpinājās līdz preboreālam (11 - 9 tūkstoši ^{14}C gadi vai 12,8 - 10,2 tūkstoši kalendāro gadu pēc *INtCal09*). Vietas pētījumi Oud-Luttenā (Kasse, 1999) parāda, ka allerēda vecuma kūdra ir pārklāta ar eolajām smiltīm veidojot ļoti asu robežu. Veģetācijas sega, kas stabilizēja iepriekšējās fāzes eolos nogulumus daudzviet iznīka. Tomēr eolā aktivitāte nav tik plaša, kā tas bija otrajā eolo procesu aktivizācijas fāzē. Polijā trešajā fāzē veidojušās kāpas nedaudz vēlāk tika reaktivizētas un piedzīvoja salīdzinoši nelielu pārvietošanu un izmaiņas (Kasse, 2002). Līdzīga situācija novērojama arī citviet Eiropā. Jauni kāpu lauki pārsvarā veidojas tikai tālāk Eiropas ziemeļaustrumu virzienā (Käyhkö et al., 1999; Molodkov and Bitinas, 2006; Nartišs et al., 2009).

Pētījumi liecina, ka vēlā driasā pirmā puse ir bijusi aukstāka par otro, tomēr, par spīti aukstumam, eolā aktivitāte bija ierobežota dēļ mitrā klimata, kamēr vēlā driasā otra puse, lai arī nedaudz siltāka, bija daudz arīdāka un eoliem procesiem pateicīgāka (Kasse 2002). Lai arī drīz pēc vēlā driasā klimats strauji uzlabojās, eolā aktivitāte vietām turpinājās līdz preboreālam, liecinot, ka veģetācijas attīstība eolajos smiltajos notika ļoti lēni dēļ zemā mitruma, augstās grunts mobilizācijas un zemās auglības dēļ (Drenova et al., 1997; Zeeberg, 1998; Käyhkö et al., 1999; Kasse, 2002; Molodkov and Bitinas, 2006; Nartišs et al., 2009).

Kāpu morfoloģijas pētījumi dažādās Eiropas vietās liecina par R un DR vēju dominanci šīs fāzes laikā (Zeeberg, 1998).

Holocēnā klimats strauji uzlabojās, Zemes orbitālās izmaiņas sekmēja lielākus sezonālos gradientus ziemeļu puslodē, sasniedzot savu maksimumu pirms 9,0 tūkstošiem kalendāro gadu, kad arī izbeidzās eolā aktivitāte lielā Eiropas daļā (Zeeberg, 1998). Lai arī pēc trešās fāzes eolie nogulumi tika stabilizēti praktiski visā Eiropas teritorijā. Holocēnā norisinājās īslaicīgas klimata izmaiņas, kas kombinācijā ar cilvēka saimnieciskās darbību, daudzviet Eiropā izraisīja īslaicīgas, reģionāla rakstura eolo procesu reaktivizācijas (Káyhkő et al., 1999; Drenova, 2006; Jungerius and Riksen, 2010).

Līdzīga situācija ir notikusi Jitlandes pussalā Dānijā, kur sākoties cilvēku saimnieciskajai aktivitātei pirms 6,0 tūkstošiem kalendāro gadu, aktivizējās un vietām pat līdz mūsdienām ir saglabājušās aktīvi ceļojošu kāpu masīvi (Clemmensen et al., 2009). Pētījumi Anglijas austrumos liecina par eolo procesu reaktivizāciju vismaz piecas reizes pēdējo 7,0 tūkstošus kalendāro gadu laikā (Bateman, 2004).

Mūsdienās lielākoties Eiropas eolās ainavas ir klātas ar priežu mežiem vai viršu laukiem. Atsevišķas aktīvas kāpas un smilšu lauki ir sastopami Dānijas ziemeļos (*Råberg Mile*, skat. 1.2. att.) un ziemeļrietumu piekrastē, Somijas Lapzemē un Nīderlandes ziemeļrietumos (Jungerius and Riksen, 2010). Kopumā Eiropas ziemeļrietumos aktīvi smilšu lauki un kāpas aizņem aptuveni 4000 km² (Koster, 2009). Lielākoties šo aktīvo smilšu lauku un kāpu reaktivizācija notika 10. un 12. gadsimtā un savu maksimumu sasniedza 18. gadsimta beigās. 19. gadsimta sākumā, daudzviet Eiropā, tostarp arī Latvijā (Bušs 1960), tika veikti plaši apmežošanas darbi, lai ierobežotu kāpu migrāciju. Šobrīd Eiropā un it sevišķi Nīderlandē tiek veikti speciāli darbi, lai veicinātu eoli aktīvo teritoriju saglabāšanu, jo to platība klimata izmaiņa un cilvēka saimnieciskās darbības rezultātā strauji sarūk (Koster, 2009; Jungerius and Riksen, 2010).

Kā iepriekš tika noskaidrots, eolās aktivitātes cikli veido labi saskatāmu sistēmu Eiropas centrālajā un ziemeļrietumu daļā, tomēr klimatisko apstākļu un arī ģeoloģiskās attīstības ziņā, dienvidaustrumu Baltijas reģionā un Ziemeļeiropā ir novērojamas būtiskas atšķirības. Pirmās eolās aktivitātes cikla laikā šo teritoriju klāja Vislas apledojums. Savukārt otrs eolās aktivitātes cikls nereti ir grūti atšķirams no trešā eolā cikla.

Lietuvas iekšzemes kāpu masīvi ir sākuši veidoties uzreiz pēc pieledāja baseinu drenāžas un turpinājās līdz preboreālam (Zeeberg, 1998) vai vietām pat līdz atlantiskajam laikam (Molodkov and Bitinas, 2006). Tāpat pētījumu rezultāti liecina par nelielu eolo reaktivizāciju pirms 6,0 tūkstošiem kalendāro gadu (Jungerius and Riksen, 2010) un Mazā leduslaikmeta laikā (Molodkov and Bitinas, 2006).



1.2. attēls. Mūsdienās aktīva paraboliskās kāpas *Råberg Mile* uzvēja nogāze, Dānijas ziemeļi (autora foto)

Pētījumi par iekšzemes kāpu masīviem Latvijā liecina par kāpu stabilizāciju vēlā driasa laikā pirms 12,3 – 11,3 tūkstošiem kalendāro gadu Viduslatvijas zemienē (Znudova, 2011a,b) un pirms 11,9 – 6,4 tūkstošiem kalendāro gadu Sedas līdzenumā (Nartišs et al., 2009). Daugavpils apkārtnē veiktie pētījumi norāda uz eolo aktivitāti jau agrā driasa laikā, pirms $14,5 \pm 2,2$ tūkstošiem kalendāro gadu (Soms u.c., 2012).

Līdzīga attīstība gaita novērojama Igaunijā, kur pēc piededāja baseinu drenāžas un sekojošās gruntsūdens līmeņa pazemināšanās, eolā aktivitāte aizsākās vairākās Igaunijas vietās, it sevišķi, ZA daļā. Preboreāla sākumā pazeminoties līmenim Peipusa ezerā, vēja ģeoloģiskajai darbībai pavērās vēl plašākas teritorijas. Atsevišķās vietās kāpas ir piedzīvojušas reaktivizāciju pirms 7,1 – 4,7 tūkstošiem kalendāro gadu. Igaunijas gadījumā ir novērots, ka kāpu veidošanās šajā laikā tiek novērota saistībā arī ar osu deltām un glaciolimniskiem kēmiem (Raukas, 2011).

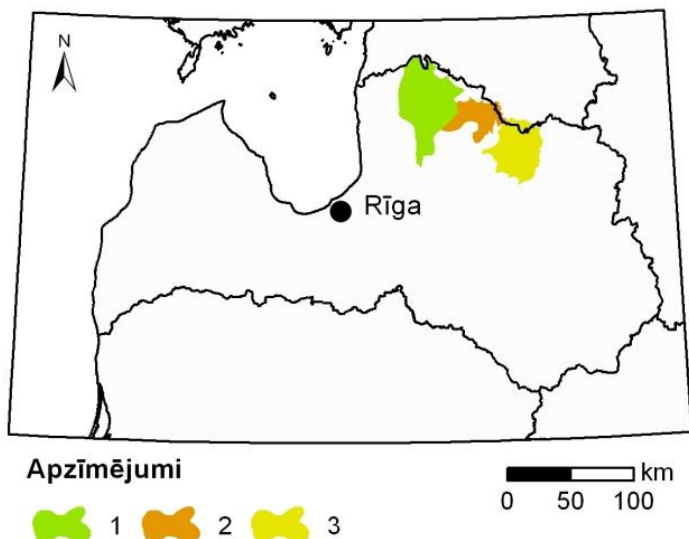
Krievijas rietumu daļā pirmās liecības par kāpu veidošanos ir sākot ar agrā driasa klimatisko laika posmu (Drenova et al., 1997; Zeeberg, 1998). Eolā aktivitāte ar pārtraukumiem allerēda un bēlinga laikos turpinās līdz vēlajam driasam, preboreālam, kad kāpu aktivitāte pakāpeniski samazinājās. Lielāko kāpu masīvu veidošanās šajā teritorijā ir saistāma ar vēlo driasu. (Drenova et al., 1997). Arheoloģiskie pētījumu liecina par kāpu

reaktivizāciju cilvēka saimnieciskās darbības ietekmē pirms 5,5 – 3,5 tūkstošiem kalendāro gadu (Drenova, 2006).

Pirmās liecības par eolo aktivitāti Ziemeļsomiņā ir atrodamas pirms $10,7 \pm 1,2$ tūkstošiem kalendāro gadu (Käyhkö et al., 1999). Eolie procesi tur piedzīvo vairākas reaktivizācijas fāzes. Pirmais reaktivizācijas cikls sākās pirms 8,2 tūkstošiem kalendāro gadu un turpinājās aptuveni 400 kalendāros gadus (Kotilainen, 2004). Šis notikums sakrīt ar pirms 8,2 tūkstošiem kalendāro gadu notikušo klimata pavēsināšanos. Gandrīz visi kāpu masīvi stabilizējās pirms 7,0 tūkstošiem kalendāro gadu, atsevišķas lielākas kāpas un daži kāpu lauki kļuva stabili tikai pirms 4,3 tūkstošiem kalendāro gadu, kad teritorijā ir konstatēta gruntsūdens līmeņa paaugstināšanās (Käyhkö et al., 1999). Pēdējais eolās aktivitātes cikls Fenoskandijā novērots Mazā ledus laikmeta laikā un, kā to norāda J. A. Kajko ar līdzautoriem (Käyhkö et al., 1999), tiek uzskatīts, ka to izraisīja apstākļu kopums, kas ietvēra gan klimata izmaiņas, gan cilvēka saimniecisko darbību.

2. PĒTĪJUMU TERITORIJAS RAKSTUROJUMS

Pētījumi tika veikti Ziemeļvidzemē esošajos Burtnieka, Sedas, Trapenes līdzenumos (Zelčs un Šteins, 1989) un tiem pieguļošajā Igaunijas teritorijā (skat. 2.1. att.). Pētījumu teritorija robežojas ar Viduslatvijas zemienes Metsopoles līdzenumu, Idumejas augstienes



2.1. attēls. Pētījumu teritorijas novietojums

1 – Burtnieka līdzenums; 2 – Sedas līdzenums;
3 – Trapenes līdzenums.

Augstrozes paugurvalni un Gaujas senleju, Vidzemes augstienes Mežoles pauguraini un Aumeistaru paugurvalni, Tālavas zemienes Trikātas pacēlumu, Alūksnes augstienes Gulbenes paugurvalni, Malienas pauguraini, Vaidavas pazeminājumu un Veclaicenes pazeminājumu, Sakalas augstienes Ērgemes pauguraini, bet Igaunijas pieguļošajā daļā pētījumu teritorija robežojas ar Karulas augstieni, Mustajegi upi un Vaidavu.

Aumeistaru paugurvalnis veido dabisku robežu starp Trapenes un Sedas līdzenumiem, tos savieno Vidusgaujas ielejveida pazeminājums (Zelčs un Šteins, 1989).

Virsmas hipsometriskais augstums pētījumu teritorijā lēzeni pieaug no 39 m Burtnieka līdzenuma rietumu daļā līdz 136 m Trapenes līdzenuma dienvidu daļā. Virsmas kritums vērsts ziemeļu ziemeļrietumu virzienā Trapenes līdzenumā un rietumu ziemeļrietumu virzienā Sedas un Burtnieku līdzenumiem.

Nozīmīgāko virsmas saposmojumu Trapenes un Sedas līdzenumos veido upju ielejas un kāpu masīvi, kur relatīvais augstums sasniedz pat 23 m (Zelčs, 1998a,b). Savukārt Burtnieka līdzenumā nozīmīgu virsmas saposmojumu veido Burtnieka drumlinu lauks, kur vietām relatīvais augstums sasniedz pat 35 m. Vidējais reljefa saposmojums līdzenumā ir 6-12 m (Zelčs and Dreimanis, 1994).

Lielākā daļa upju pieder Gaujas sateces baseinam, bet Sedas līdzenuma ziemeļdaļā un Burtnieka līdzenumā esošās upes pieder Salacas sateces baseinam. Kopumā upju tīkls ir biezs, izņemot Sedas līdzenumu, un to tecēšanas virziens atbilst vispārējam virsmas kritumam, Burtnieka līdzenumā upju tecēšanas virzienu būtiski ietekmējis drumlinu reljefs. Lielākajām upēm ir izteikta meandrēšana, savukārt mazākām upēm ir kanjonveida ieleju forma un taisns

tecējums. Lielākā upe Gauja šķērso Trapenes līdzenumu ziemeļu ziemeļrietumu virzienā, bet, sasniedzot Sedas līdzenumu, maina savu tecējumu rietumu dienvidrietumu virzienā. Burtnieka līdzenumā Salaca novada lielus ūdens daudzumus no pētījuma teritorijas lielākā ezera Burtnieka, kur savu tecējumu beidz Rūjas, Sedas un Briedes upes. Pētāmajā teritorijā ir salīdzinoši maz ezeru, kas, visticamāk, saistīts ar teritorijas vienmērīgo virsmas kritumu, kas nodrošina caurmērā labu drenāžu. Mazi ezeri sastopami Trapenes austrumu daļā un Sedas līdzenuma austrumu daļā (Zelčs, 1998a,b).

Nelielā virsmas krituma dēļ, teritorijā ir salīdzinoši daudz dažāda izmēra mitrāju, kuri galvenokārt ir pārejas un augstā tipa purvi. Lielākais purvu daudzums ir Burtnieka apkārtnē, Trapenes līdzenuma austrumu daļā un Sedas līdzenumā, kur izvietojies arī Sedas purvs, kas ir lielākais pētījumu teritorijā (Zelčs 1994; Zelčs, 1998a,b).

Kāpu izplatības areālā izplatītas ir tipiskā podzola augsnes uz smilšainiem cilmiežiem. Vietās, kur ir mālsmilts un smilšmāla cilmieži, ir sastopamas velēnu podzolaugšnes, pseidoglejotās un velēnpodzolētās glejaugšnes. Ieplakās sastopamas kūdrainās podzolētās glejaugšnes, upju palienēs aluviālās augsnes, bet purvos sastopamas purvu kūdraugšnes (Zelčs, 1998a,b).

Pētījumu teritorijā, it sevišķi Sedas līdzenumā un Lejasciema apkārtnē plaši sastopami vienlaidus priežu meži, kāpu masīvos arī dižsili. Zemākās vietās un upju tuvumā dominē priežu – egļu meži un priežu – sīklapju meži. Purvainākās vietās izplatīti ir slapjie un purvainie mežu tipi, kuri īpaši raksturīgi Trapenes un Burtnieka līdzenuma ziemeļu daļām. Upju palienēs un pazeminājos veidojas arī zemā tipa purvi un mitras pļavas ar krūmājiem. Burtnieka līdzenumā drumlina muguras un Trapenes līdzenumā morēnas nolaidenumus plaši izmanto kā lauksaimniecības zemes (Zelčs, 1998b)., bet Sedas līdzenumā lauksaimniecībai piemērotu zemju praktiski nav.

Klimata apstākļus lielā mērā ietekmē atrašanās pazeminājumā starp augstienēm un to oriģrāfiskajā ēnā, kas aiztur daļu no rietumiem, ziemeļrietumiem un dienvidrietumiem nākošo nokrišņu. Atrašanās starp augstienēm, it īpaši Trapenes līdzenumā, sekmē aukstā gaisa uzkrāšanos ziemā. Šo iemeslu dēļ, klimats pētījumu teritorija ir kontinentālāks, kā citviet Latvijā. Gada vidējais nokrišņu daudzums svārstās no 600 mm zemienes vidienē līdz 700 mm rietumu daļā. V. Zelčs (1994; 1998a,b) norāda, ka vidējā gaisa temperatūra līdzenuma teritorijā ir aptuveni 5,5°C, jūlija mēnesī vidējā gaisa temperatūra sasniedz +17°C, bet janvāra mēnesī zemāka par -6°C. Vidējais bezsala periods ilgst 130 dienas.

2.1. Teritorijas ģeoloģiskā uzbūve un ģeomorfoloģisks raksturojums

Pētījumu teritorija atrodas Ziemeļvidzemes zemienes Burtnieka un Sedas līdzenuma, un Vidusgaujas zemienes Trapenes līdzenuma ģeomorfoloģiskajos apvidos (Āboltiņš un Zelčs, 1995).

2.1.1. Burtnieka līdzenums

Zemkvartāra virsmu līdzenumā veido vidusdevona Burtnieka svītas smilšakmens un aleirolīts un Gaujas svītas smilšakmens (Brangulis u.c., 2000).

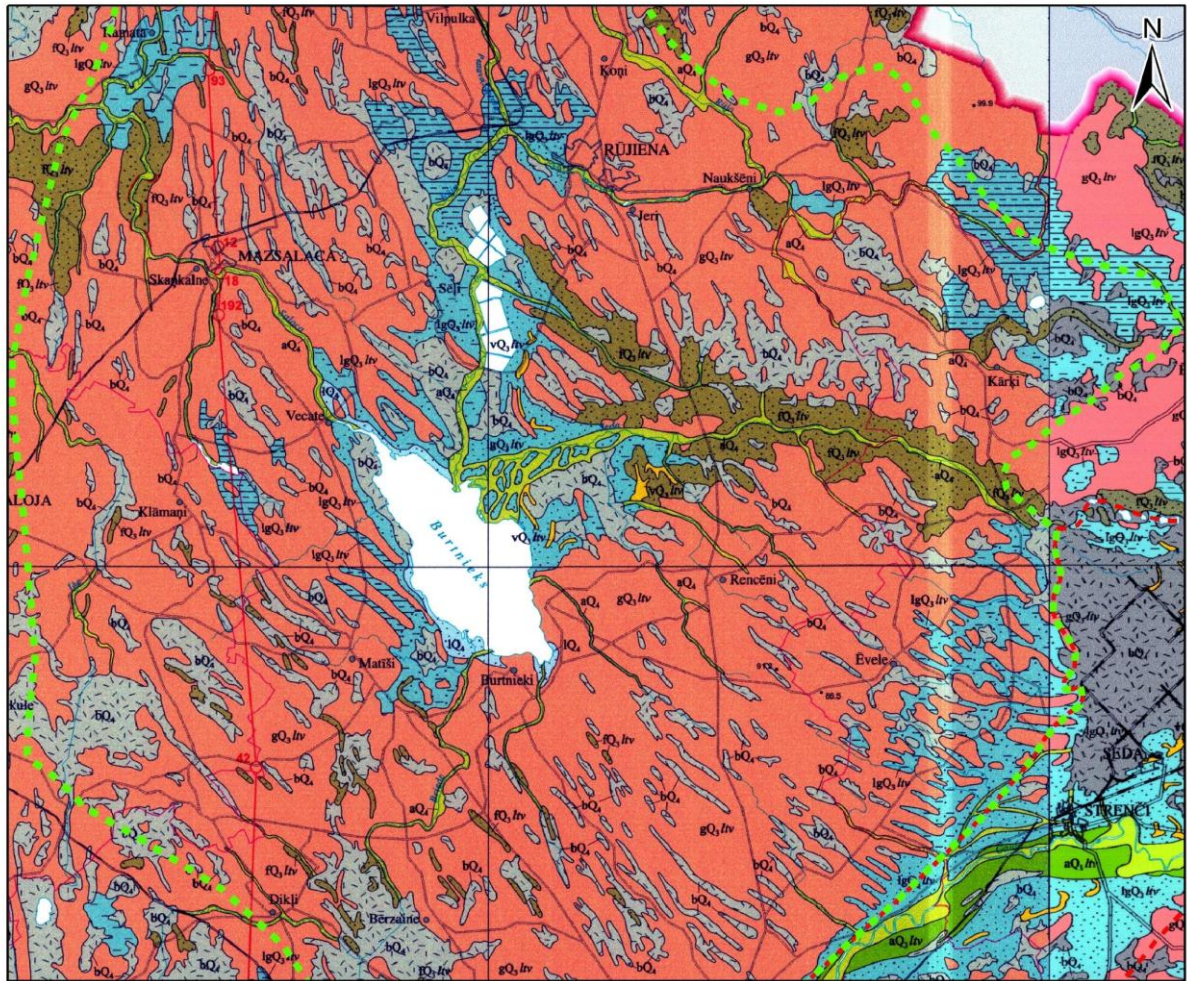
Zemkvartāra virsma lēzeni krīt Burtnieka ezera virzienā, bet līdzenuma galējos ziemeļos uz ziemeļu ziemeļrietumiem. Tās absolūtais augstums mainās no 61 m vjl. līdzenuma dienviddaļā līdz 25 m vjl. Salacas ielejā. Līdzenuma austrumu daļā sastopami arī lokāli, lēzeni pamatiežu virsmas pacēlumi, kas orientēti ledāja pārvietošanās virzienā. Savukārt līdzenuma dienvidu daļā atrodami pat 120 m dziļi ielejveida padziļinājumi (Brangulis u.c., 2000).

Pamatiežus līdzenumā klāj 10-20 m bieža kvartāra noguluma sega, augstākajos drumlinos un apraktajās ielejās nogulumu biezums var sasniegt 40 m (Zelčs and Dreimanis, 1997).

Burtnieka līdzenuma kvartāra nogulumu segu, galvenokārt, veido ledāja nogulumi – grants, smilts, morēnas smilšmāls un morēnas mālsmilts (Zelčs and Dreimanis, 1997). Vietām sastopami pamatiežu atrauteņi. Glaciolimniskie nogulumi sastopami līdzenuma centrālajā daļā (Brangulis u.c., 2000), kur Burtnieka paleoezera klātajā teritorijā uzkrājas smalkas smilts un mālaini glaciolimniskie nogulumi (skat. 2.2. att.).






















Puteklaini un mālaini nogulumi nelielos apjomos uzkrājušies arī citviet Burtnieka līdzenumā, it īpaši, ziemeļu daļā, bet līdzenuma austrumu daļā, starpdrumlinu ieplakās uzkrājušies glaciolimniskie Strenču lokālā sprostezera smalkas smilts nogulumi. Sedas upes ielejā uzkrājušies deltu un aluviālie nogulumi, veidojot plašu joslu pie ietekas Burtnieka ezerā (skat. 2.2. att.).

Sedas un Rūjas upes lejteču apkārtnē sastopami eolie nogulumi, kas pārsedz vecākus nogulumus un reljefa formas, vietām veidojot arī zemas kāpas.



Apzīmējumi

0 5 10 km

 Purva nogulumu, bQ ₄	 Kūdra	 Burtnieka līdzenums
 Aluviālie nogulumu, aQ ₄	 Smilts	 Sedas līdzenums
 Aluviālie nogulumu, aQ ₃	 Smilts ar granti	 Trapenes līdzenums
 Eolie nogulumu, vQ ₃	 Aleirīts	 Ezeri
 Glaciolimniskie, lgQ ₃	 Smilts aleirītiska	 Dzelzceļš
 Glaciofluviālie nogulumu, fQ ₃	 Māls aleirītisks	 Upes
 Glacigēnie nogulumu, gQ ₃	 Māls	 Autoceļi

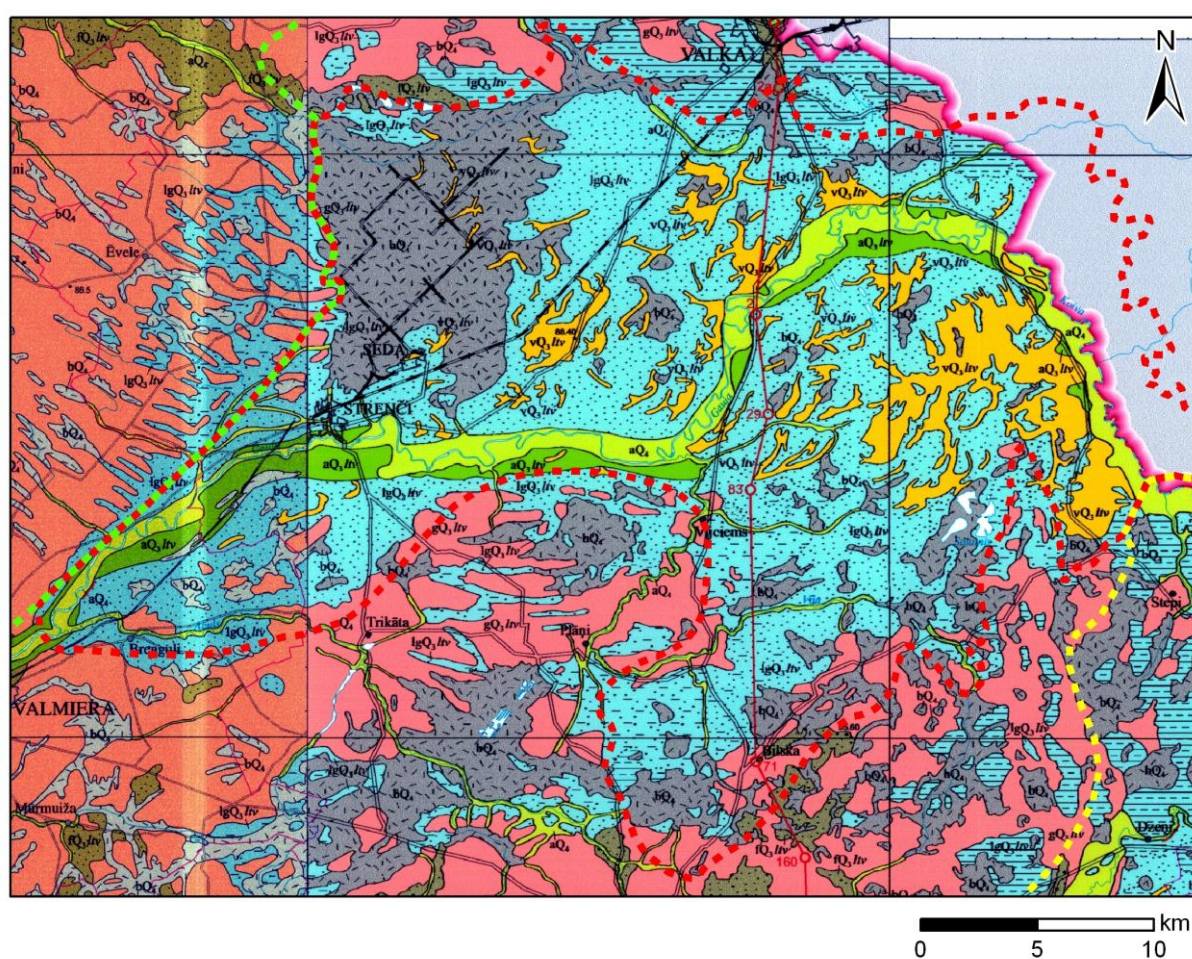
2.2. attēls. Burtnieka līdzenuma kvartāra virsas nogulumu karte (Brangulis u.c., 2000; Juškevičs u.c., 2002, ar autora papildinājumiem) Teritorijas novietojums attēlots 2.1. attēlā.

Līdzenuma rietumu malā, starpdrumlinu ieplakās un Burtnieka paleoezera klātajā teritorijā uzkrājas holocēna vecuma purva nogulumu (Brangulis u.c., 2000). Daudzos purvos uzkrāties biezs kūdras slānis, Vilzēnu purvā sasniedzot pat 8,8 m biezumu. Kā min Brangulis u.c. (2000) vietām, starpdrumlinu ieplakās ir sastopami saldūdens kaļķieži.

2.1.2. Sedas līdzenums

Sedas līdzenums ir plakans un lēzeni viļņots glaciolimniskais līdzenums, būtiskāko reljefa saposmējumu veido dažāda lieluma kāpu masīvi un atsevišķas kāpas, kā arī upju ielejas (Zelčs, 1998a).

Zemkvartāra virsmu līdzenumā veido vidusdevona Burtnieka svītas smilšakmens, aleirolīts un māls teritorijas ziemeļrietumu daļā. Valkas ielejā, zemkvartāra virsmā, atsedzas arī Arikulas svītas smilšakmens, bet Sedas līdzenuma dienvidaustrumu daļā izplatīts augšdevona Gaujas svītas smilšakmens, aleirolīts un māls (Brangulis u.c., 2000; Juškevičs u.c., 2002).



2.3.attēls. Sedas līdzenuma kvartāra virsas nogulumu karte (Brangulis u.c., 2000; Juškevičs u.c., 2002, ar autora papildinājumiem) Apzīmējumus skatīt 2.2. attēlā. Teritorijas novietojums attēlots 2.1. attēlā.

Zemkvartārās virsmas reljefs ir salīdzinoši līdzens ar dažiem līdz 15 m augstiem pacēlumiem un aptuveni 15 m dziļu ielejveida pazeminājumu teritorijas austrumu daļā. Zemkvartāra virsmas absolūtais augstums svārstās no 63 m vjl. teritorijas dienvidu daļā, līdz 30 m vjl. teritorijas vidusdaļā un tālāk samazinās Gaujas ielejas virzienā līdz pat 20 m vjl, bet

ziemeļrietumu virzienā zemkvartārās virsmas augstums atkal pieaug līdz 50 m vjl. (Brangulis u.c., 2000; Juškevičs u.c., 2002).

Pamatiežus līdzenumā sedz vidēji 10 līdz 20 m bieza kvartāra nogulumu sega. Oliņu apkārtnē pie Gaujas kvartāra nogulumu segas biezums ir līdz 10 m, bet nogulumu segas lielākais biezums ir Valkas apraktajā ielejā, kur tas sasniedz 84 m (Zelčs, 1998a).

Sedas līdzenuma kvartāra nogulumu segu galvenokārt veido glaciolimniskie Smiltenes un Strenču lokālā sprostezera smalkas smilts nogulumu (skat. 2.3. att.), līdzenuma perifērajā daļā arī puteļaini un mālaini baseina nogulumu (Brangulis u.c., 2000; Juškevičs u.c., 2002). Vietām Sedas līdzenuma virspusē atsedzas arī pēdējā apledošanas akmeņaini pamatmorēnas mālsmilts nogulumu un glaciotehtoniski deformēti starpmorēnu ledāja kušanas ūdeņu nogulumu salas (Zelčs, 1998a). Gaujas upes krastos izplatīti dažāda vecuma aluviālie grants un smilts nogulumu (Brangulis u.c., 2000; Juškevičs u.c., 2002). Praktiski visā pētāmajā teritorijā, izņemot līdzenuma dienvidu daļā, ir izplatīti eolie nogulumu. Nereti tie pārsedz vecākos limnoglaciālos, morēnas un pat aluviālos nogulumus. Plašajos reljefa pazeminājumos ir uzkrājušies bagātīgi holocēna vecuma purva nogulumu. V. Zelčs (1998a) norāda, ka kūdras biezums Sedas līdzenuma purvos sasniedz pat 7,5 metrus.

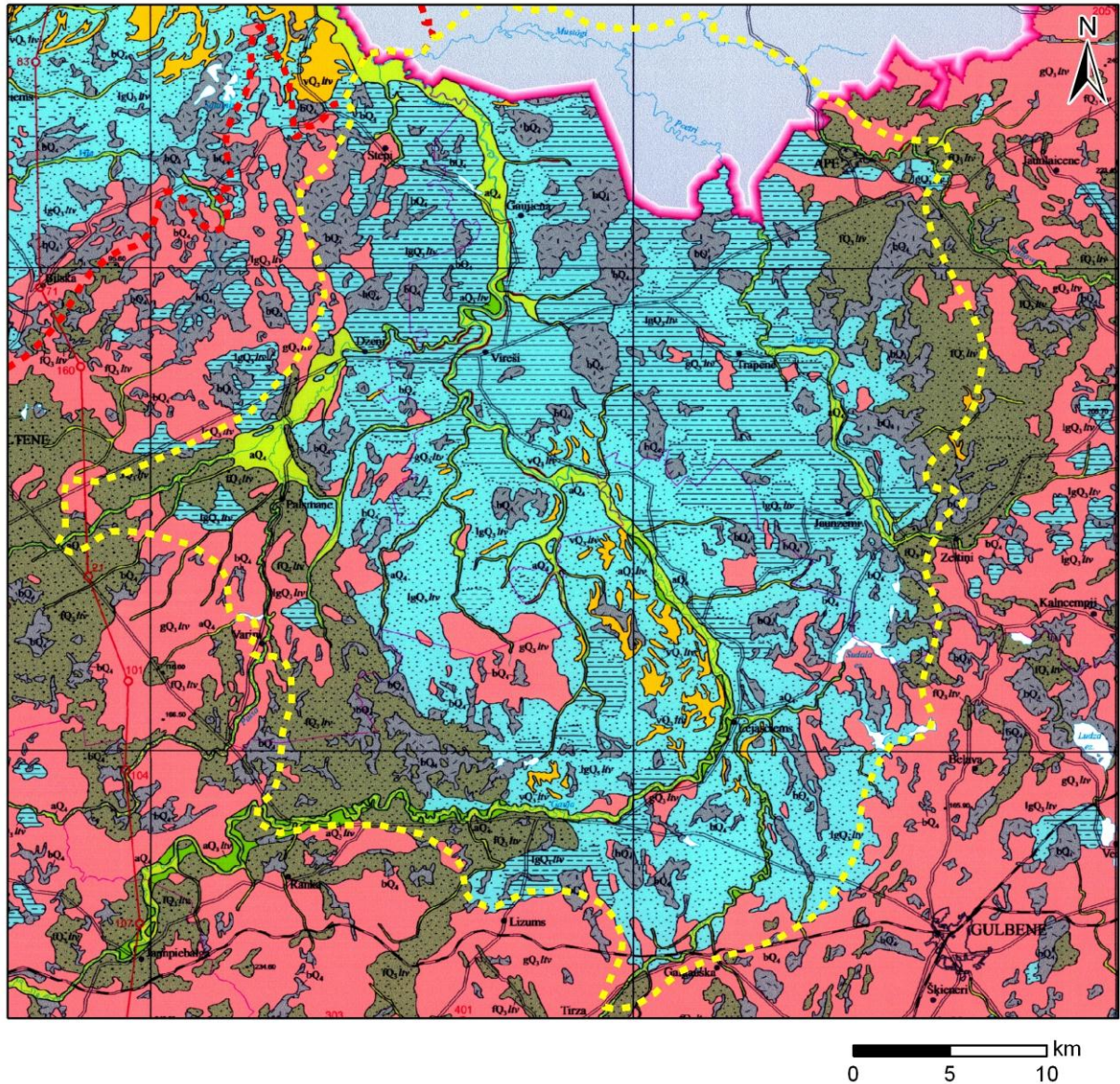
2.1.3. Trapenes līdzenums

Trapenes līdzenums ir plakans un lēzeni viļņots glaciolimniskais līdzenums, būtisku reljefa saposmju veido upju ielejas, kāpu masīvi un paugurmasīvi līdzenuma malas zonā (Zelčs, 1998b).

Līdzenuma ziemeļu daļā pamatiežu virsmu veido Gaujas svītas smilšakmens, aleirolīts, māls un Amatas svītas smilšakmens, aleirolīts un konglomerāts. Virzienā uz dienvidiem tos secīgi nomaina Pļaviņu un Salaspils svītas dolomīts un dolomītmerģelis, Katlešu svītas aleirolīts, māls, dolomītmerģelis un Ogres svītas smilšakmens (Juškevičs u.c., 2002).

Pamatiežu virsma ir lēzena un krīt līdzenuma vidus – Gaujas ielejas virzienā, līdzenuma ziemeļu daļā virsmas kritums pavēršas ZR virzienā. Pamatiežu virsmas absolūtais augstums mainās no 106 m vjl. līdzenuma dienvidu daļā līdz 39 m vjl. Gaujienas un Virešu apkārtnē. Stepu apkārtnē atrodami pat 52 m dziļi ielejveida iegrauzumi. Sastopami arī atsevišķi lokāli pamatiežu paaugstinājumi pie Trapenes un Gaujienas (Juškevičs u.c., 2002).

Līdzīgi kā Sedas līdzenumā, pamatiežus klāj 10-20 m bieza kvartāra nogulumu sega. Plānākā nogulumu sega ir līdzenuma ziemeļu daļā, kur pamatiežus klāj vien daži centimetri. Kvartāra nogulumu segas biezums pieaug ledāja viedotā reljefa pacēlumos un zemkvartāra virsmas pazeminājumos, sasniedzot līdz 30 līdz 50 m biezumu (Zelčs, 1998b).



2.4. attēls. **Trapenes līdzenuma kvartāra virsas nogulumu karte** (Juškevics u.c., 2002, ar autora papildinājumiem) Apzīmējumus skatīt 2.2. attēlā. Teritorijas novietojums attēlots 2.1. attēlā.

Kvartāra nogulumu segu galvenokārt veido akmeņainas pamatmorēnas smilšmāls, kas atsedzas reljefa paaugstinājumos, lielākajā līdzenuma daļā to sedz ledājkūšanas udeņu veidotie nogulumi (skat. 2.4. att.). Līdzenuma austrumu malā un dienvidrietumu daļā uzkrājušies glaciofluviāli smilts un grants nogulumi. Līdzenuma dienvidu daļā uzkrājušies smilšaini ledāja sprostezera nogulumi, kurus virzienā uz ziemeļiem nomaina putekļaini un mālaini glaciolimniski nogulumi (Juškevics u.c., 2002), vietām sastopami arī slāņoti māli līdz deviņu m biezumam (Kuršs un Stinkule, 1972; Nartišs and Zelčs, 2011).

Eolie nogulumi izplatīti Lejasciema apkārtnē, kur tie veido līdz 4 km plašu joslu Gaujas kreisajā krastā un pakāpeniski izzūd virzienā uz Virešiem (skat. 2.4. att.). Eolie nogulumi

sastopami arī līdzenuma austrumu malā, uz ziemeļiem no Zeltiņiem, kā arī līdzenumam pieguļošajā Igaunijas daļā – Gaujas un Mustjegi starpupē (Juškevičs u.c., 2002).

Upju ielejās sastopami dažāda vecuma aluviālie nogulumu, savukārt reljefa pazeminājumos viedojas plaši purvi, it sevišķi, līdzenuma ziemeļu daļā (Juškevičs u.c., 2002). V. Zelčs (1998b) norāda, ka Kalnpurvā kūdras biezums sasniedz 8,5 m.

2.2. Teritorijas ģeoloģiskā attīstība Vislas apledošanas beigumu posmā un Holocēna sākumā.

Teritorijas attīstību Vislas apledošanas laikā būtiski ietekmēja Vidusgaujas un Burtņieka loba uzvirzīšanās un vēlākā deglaciācija (Zelčs and Markots, 2004).

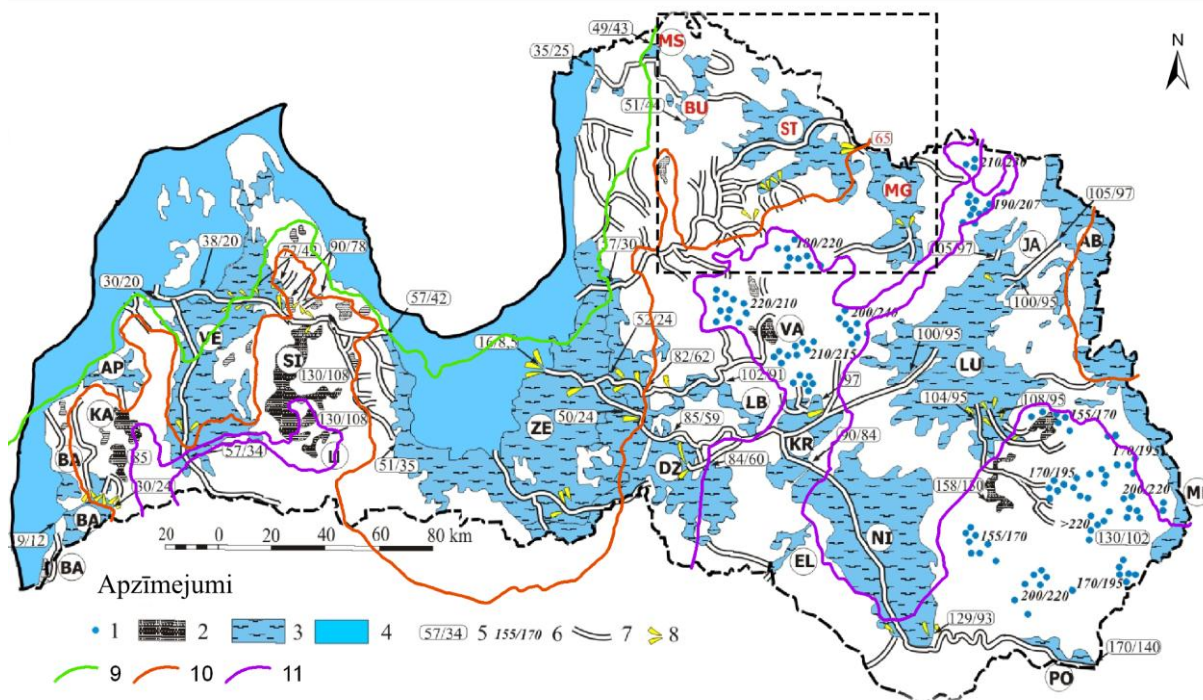
Pieledāju baseinu attīstība pētījumu teritorijā aizsākās ar Vidusgaujas loba atkāpšanos no Gulbenes fāzes pirms $13,6 \pm 0,3$ tūkstošiem ^{10}Be gadu (Rinterknecht et al., 2006). V. Zelča un līdzautoru (Zelčs u.c., 2011) precizētie aprēķini Latvijas teritorijai norāda par Gulbenes fāzes vecumu $13,8 \pm 0,6$ tūkstoši ^{10}Be gadu. Vidusgaujas baseina maksimālie līmeņi varēja sasniegt pat 130 m vjl., baseina nogulumu izplatības īpatnības liecina, ka baseina hipsometriski zemāko daļu varēja aizņemt neaktīvi kūstoša ledus masīvi vai aprakta ledus blāķi. Pieledāja baseina zemākie līmeņi saistāmi ar 115 m vjl. (Nartišs and Zelčs, 2011). Ledājam atkāpjoties no Linkuvas fāzes pirms $13,4 \pm 0,6$ tūkstošiem ^{10}Be gadu (Zelčs u.c., 2011), daļa Vidusgauja baseina ūdeņu pa Gaujas un Mustjegi ielejām pakāpeniski pārplūda uz jauno Smiltenes pieledāja baseinu, veidojot deltu tagadējās Gaujas un Mustajegi sateces vietā un atsedzot plašas sauszemes teritorijas Trapenes līdzenumā.

Smiltenes pieledāja baseina attīstība saistāma ar Burtņieka ledus loba deglaciāciju no Linkuvas fāzes līdz Valdemārpils fāzei (skat. 2.5. att.). Baseina līmeņi, balstoties uz deltu līmeņiem, izsekojami pie 75, 70 un 65 m vjl. (Nartišs and Zelčs, 2011).

Kūstot apraktajam ledum, Smiltenes baseina ūdeņi sāka noplūst rietumu virzienā, veidojot Gaujas ieleju (Аболтыньш, 1971). Smiltenes baseina līmenim pazeminoties līdz 60 m, veidojās Strenču pieledāja baseins (Nartišs and Zelčs, 2011). Šajā laikā teritorija ir pilnībā brīva no ledus. Strenču pieledāja baseinam bija aktīva notece uz Burtņieka paleoezeru pa Sedas upes ieleju. Ūdens līmenim krītoties līdz 48 m vjl., nelieli paliku ezeri aizņēma Sedas līdzenuma zemāko daļu (Nartišs and Zelčs, 2011), vēlāk šeit attīstās Sedas un citi mazāki purvi.

Burtņieka paleoezera attīstība sākās līdz ar ledāja atkāpšanos uz Valdemārpils fāzes malas veidojumiem (skat. 2.5. att.), kad ezera ieplaku aizņēma vairākus desmitus metrus biezi apraktā ledus masīvi. Aprimušajiem ledus masīviem turpinot kust, 55 - 58 m vjl. uz drumlinu

mugurām nogulsņējās 2 - 5 m biezi smalkas smilts nogulumi. ¹⁰Be datējumi laukakmeņiem Burtnieka ezera apkārtnē liecina, ka teritorija bija brīva no ledus vismaz pirms aptuveni 13,1±1,1 tūkstošiem ¹⁰Be gadu (Rinterknecht et al., 2006). Attīstoties Salacas ielejai un izkūstot apraktajam ledum, izveidojās Burtnieka paleoezers, par ko liecina smalkas smilts uzkrāšanās 50 m vjl. (Eberhards, 2006).



2.5. attēls. Ledāja kušanas ūdeņu sprostezeru izvietojums un glaciolimnisko nogulumu uzkrāšanās vietas Latvijā saistībā ar pēdējā leduslaikmeta beigu posma deglaciācijas fāzēm (Zelčs and Markots, 2004, ar autora papildinājumiem)

Apzīmējumi: 1 – Glaciolimnisko nogulumu uzkrāšanās vietas pauguru virsotnēs; 2 – Ledāja kušanas ūdeņi virsotnēs. Sprostezeri augstienēs: KA = Kalvenes, SI = Saldus-Imulas, LI = Lielaucis, VA = Valoles, BI = Bižu; 3 – Ledāja kušanas ūdeņu baseini zemienēs: BA = Bārtas, AP = Apriķu, VE = Ventas, ZE = Zemgales, DZ = Daudzevas, LB = Lobes, EL = Elkšņu, KR = Krustpils, NI = Nīcgales, PO = Polackas, ME = Mērdzenes, LU = Lubāna, JA = Jaunannas, AB = Abrenes (Žīguru), MG = Vidusgaujas, ST = Strenču, BU = Burtnieka, MS = Vidussalacas; 4 – Baltijas ledusezers; 5 = Ledāja kušanas ūdeņu sprostezeru maksimālā/minimālā līmeņa augstuma zīmes (m vjl.); 6 – Platovirsas pauguru virsmas maksimālās/minimālās augstuma zīmes (m vjl); 7 – Ledājkušanas ūdeņu noteces ielejas; 8 – Senās deltas; 9 – Valdemārpils fāze; 10 – Linkuvas fāze; 11 – Gulbenes fāze; ar melnu rāmi norādīta pētījuma teritorija.

Vēlā driasa laikā paleoezera līmenis nokritās zem 40 m vjl., par ko liecina Sedas upes deltas nogulumi ar līmeni 37 m vjl., kuri veidojās, noplūstot Strenču pieledāja baseina ūdeņiem. Šāds ūdens līmenis, iespējams, saglabājies līdz pat preboreālam, kad līdzīgi relatīvi zemi ūdens līmeņi bija daudziem ezeriem Igaunijā un Skandināvijā (Eberhards, 2006). Pie šāda zema ūdens līmeņa, visticamāk, ir notikusi lielākā eolo nogulumu uzkrāšanās un kāpu veidošanās Burtnieka paleoezera apkārtnē, jo sākot ar preboreālu, klimatam paliekot siltākam un mitrākam, notika pakāpeniska ezera līmeņa celšanās un kūdras uzkrāšanās. Ūdens līmenim

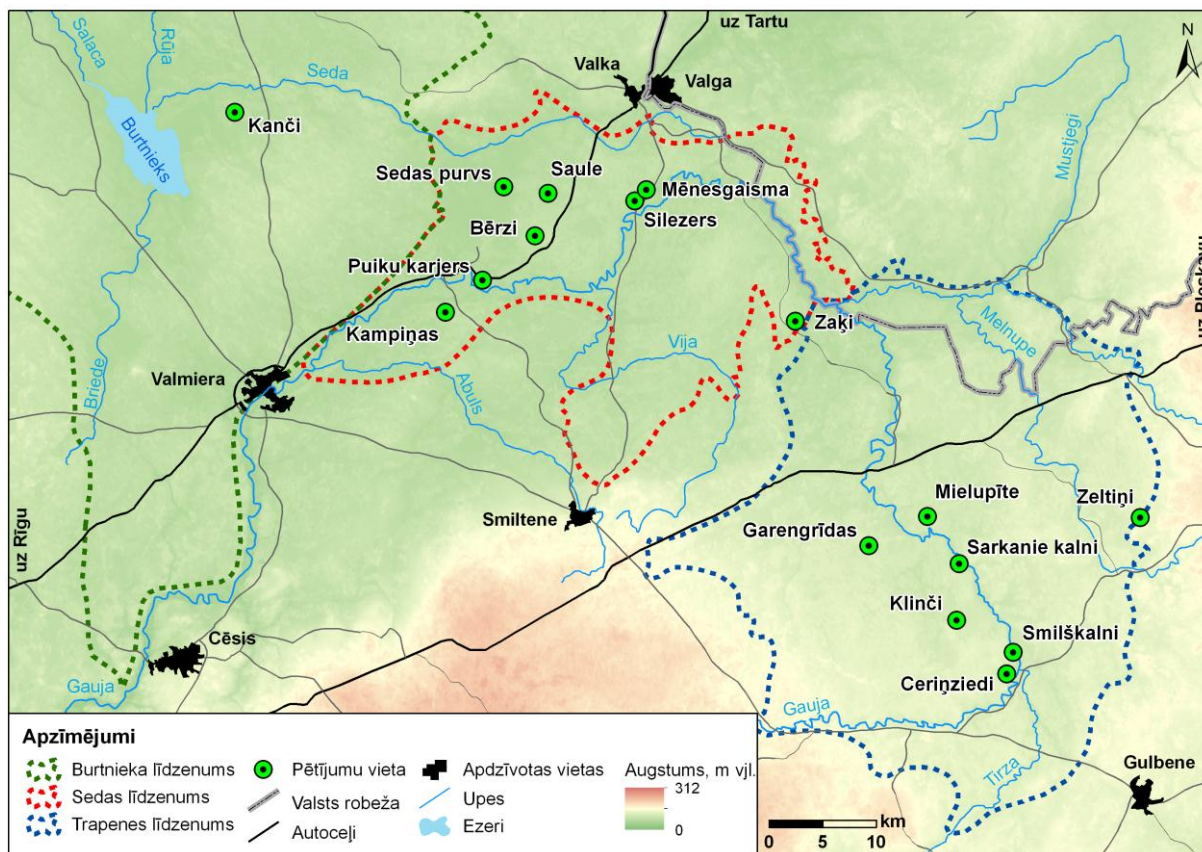
sasniedzot 44,7 m vjl. (4 - 5 m virs mūsdienu ezera ūdens līmeņa), līmeņa celšanās tika pārtraukta, jo atjaunojās Salacas upes izteka (Eberhards, 2006). Sākot ar holocēna klimatisko optimuma laiku līdz mūsdienām, notiek aktīva kūdras uzkrāšanās un pakāpeniska ezera līmeņa pazemināšanās, mūsdienu līmeni 39,9 m vjl. sasniedzot 1929. gadā, kad notika mākslīga Salacas iztekas padziļināšana (Eberhards, 2006).

Iekšzemes kāpu pētījumi Sedas līdzenumā liecina, ka kāpu veidošanās aizsākusies vēlā driasā laikā un, atsevišķās līdzenuma vietās, turpinājusies līdz pat atlantiskajam laikam. Kāpas, kuru vecums ir $11,9 \pm 2,7$ un $11,8 \pm 2,4$ tūkstoši gadu, novietojušās 54 un 57 m vjl., liecinot, ka eolie procesi aizsākušies drīz pēc Strenču pieledāja baseina noplūšanas. Jaunākas kāpas novietojušās hipsometriski augstākās līdzenuma vietās (Nartišs et al., 2009; Celiņš, 2010).

Burtnieka līdzenumā veiktie pētījumi (Eberhards, 2006) norāda par kāpu veidošanos boreāla laikā. Zem nelielas kāpu grēdas datēts kūdras slānis norāda uz 8770 ± 160 ^{14}C gadu (vai 9,7 tūkstoši kalendāro gadu pēc *INtCal09*), G. Eberhards (2006) norāda, ka šajā laikā Burtnieka paleozera ūdens līmenis piedzīvo būtiskas svārstības, kas varēja veicināt eolo procesu aktivizēšanos.

3. MATERIĀLI UN METODES

Lai sasniegtu pētījuma sākumā izvirzīto mērķi un izpildītu visus darba uzdevumus, autors apzināja un izmantoja dažādus zinātniskās literatūras avotus un kartogrāfisko materiālu, gan arī pielietoja daudzveidīgas lauka un laboratorijas pētījumu metodes.



3.1. attēls. Lauka pētījumu vietu pārskata karte (izstrādājis autors, izmantojot Envirotech, 2004)

Pētījuma ietvaros veikti apjomīgi lauka darbi, kuri tika organizēti vairākās ekspedīcijās. Lauka pētījumu vietas ir attēlotas 3.1. attēlā, bet detalizētāks pētījumu metožu apraksts, darbu organizācija un to zinātniskā aktualitāte ir sniegta 3.3. un 3.4. apakšnodaļās.

Kamerālie darbi sevī ietvēra ne tikai lauka pētījumos ievāktu materiālu apstrādi un datu interpretāciju, bet arī apjomīgas ĢIS datu bāzes izstrādi par iekšzemes kāpu izplatību un to raksturojošajiem morfometriskajiem lielumiem (skat. 3.2. nodaļā), kā arī smilts paraugu analīzi laboratorijā. Papildus, šajā nodaļā aprakstīta pielietoto pētījumu metožu aktualitāte un izvēles pamatojums.

3.1. Izmantotie materiāli

Visa pētījuma izstrādes laikā, patstāvīgi tika apkopotas pieejamās publikācijas par kāpu veidošanos, uzbūvi, izplatību un saistību ar klimatiskajiem apstākļiem pasaulē, kā arī par līdzšinējiem pētījumiem Latvijā. Liela uzmanība pievērsta jaunākajai zinātniskajai literatūrai par dažādu pētījumu metožu pielietošanu kāpu pētījumos.

Visa nepieciešamā zinātniskā literatūra iegūta Latvijas Universitātes Zemes un vides zinātņu, Orhūsas Universitātes Ģeoloģijas departamenta, Dānijas Tehniskās Universitātes bibliotēkās un šo bibliotēku interneta zinātniskās literatūras datu bāzēs.

Pētījuma izstrādes laikā apkopoti un analizēti dažādi zinātniskie raksti par kāpu veidošanos mērena klimata un periglaciālos apstākļos, to morfoloģiju, izplatību, to iekšējo uzbūvi un veidošanās laiku. Ļoti liela autora uzmanība veltīta tieši informācijai par aktuālākajām pētījumu metodēm.

Literatūra par kāpu pētījumiem Latvijā ir salīdzinoši mazskaitlīga. Nozīmīgu informāciju par piekrastes kāpu izplatību, attīstību, morfoloģiju un dinamiku ir sniedzis G. Eberhards (2003). Lielupes un Daugavas upstarpes iekšzemes kāpas ir pētījusi B. Saltupe (Салтупе, 1980). Pēdējos gados ir novērojama kāpu pētījumu aktualizēšanās Latvijā. Nozīmīgi pētījumi par iekšzemes kāpu vecumu, izplatību un morfoloģiju veikti Viduslatvijas zemienē (Znudova, 2011a,b), Sedas līdzenumā (Nartišs et al., 2009; Celiņš un Nartišs, 2010; Celiņš and Nartišs, 2011; Celiņš u.c., 2012), Jersikas līdzenuma dienviddaļā (Strode un Soms, 2012) un Daugavpils apkārtnē (Soms u.c., 2012).

Agrākā informācija par kāpām pētījumu teritorijā ir ļoti ierobežota. Iekšzemes kāpas pirmo reizi pieminētas 1943. gadā, veicot kūdras izpētes darbus Sedas purvā (Nomals, 1943). Netieši iekšzemes kāpas ir pieminētas O. Āboltiņa darbā par Gaujas ielejas attīstību (Аболтыньш, 1971), A. Līča (2006) bakalaura darbā par Strenču pieledāja baseina paleoģeogrāfisko attīstību un Eberharda (2006) rakstā par Burtnieka paleozera attīstību. Jau daudz detalizētākus pētījumus ir veicis J. Zēbergs (Zeeberg, 1998) savā pētījumā par kāpām Eiropas smilšu joslas austrumu daļā. Jaunāki pētījumi veikti Sedas līdzenumā, nosakot iekšzemes kāpu vecumu, iekšējo uzbūvi, izplatību un morfoloģiju (Nartišs u.c., 2009; Nartišs et al., 2009; Celiņš un Nartišs, 2010; Celiņš and Nartišs, 2011; Celiņš un Karušs, 2011a,b,c; Celiņš u.c., 2012).

Maģistra darba teorētiskā bāze par iekšzemes kāpu veidošanās fizikālajiem principiem, morfoloģiju un izplatību pasaulē, galvenokārt, balstīta uz tādu enciklopēdiska rakstura literatūru kā *The Encyclopedia of Geomorphology* (Fairbridge, 1968), *Fundamentals of geomorphology* (Huggett, 2003), *The Periglacial Environment* (French, 2007) un citiem. Ļoti

nozīmīgu zināšanu kopumu sniedza dažādas vietu studijas, piemēram, J. Zēberga (Zeeberg, 1998) pētījums par kāpu orientāciju un izplatību Eiropas smilšainās joslas austrumu daļā, Jungeriusa un Riksena (Jungerius and Riksen, 2010) pētījums par Holocēna kāpu aktivitāti Eiropā, K. Munjikva u.c. (Munykwa et al., 2011) pētījums par kāpu attīstību pēdējā apledojuma beigu posmā Kanādas rietumos un daudzi citi.

Pēdējos gados iekšzemes kāpu pētījumi ir kļuvuši aktuāli arī kaimiņvalstīs, tāpēc šī pētījuma gaitā tika uzmanīgi sekots šo pētījumu rezultātiem. Kā nozīmīgākie kaimiņvalstu pētījumi jāmin A. N. Drenovas un līdzautoru (Drenova et al., 1997) pētījums par pēdējā apledojuma beigu posma iekšzemes kāpām Krievijas Eiropas daļā, A. Raukas (Raukas, 2011) pētījums par iekšzemes kāpu attīstību Igaunijas ziemeļaustrumu daļā un A. Molodkova un A. Bitinas (Molodkov and Bitinas, 2006) pētījumi par iekšzemes kāpu hronoloģiju Lietuvā.

Šajā darbā pieminētie ^{14}C datēšanas rezultāti, vieglākai vecumu uztveramībai, tika kalibrēti, izmantojot *INtCal09* ^{14}C kalibrācijas līkni (Heaton et al., 2009).

Teorētiskās zināšanas par radiolokācijas metodi un iegūto rezultātu analīzi ir iegūta no M. I. Finkelšteina un līdzautoru (Финкельштейн и др., 1994) monogrāfijas par radiolokācijas metodes pielietošanu neliela dziļuma grunts pētījumos.

OSL datēšanas tehnika un rūfīnas procedūras apgūtas balstoties uz šo metožu izstrādātāju zinātniskajiem rakstiem (Murray and Roberts, 1998; Murray and Wintle, 2000; Wintle and Murray, 2006; Bøtter-Jensen et al., 2003)

Dažāda veida kartogrāfiskā informācija iegūta, izmantojot LU ĢZZF WMS un Igaunijas Zemes dienesta WMS karšu serverus. No LU ĢZZF WMS servera izmantotas kvartārģeoloģiskās kartes mērogā 1:200 000 (LVGD Kvartargeologija), zemkvartāra virsmas kartes mērogā 1:500 000 (LVGD Zemkvartara), pirmskvartāra nogulumu kartes mērogā 1:200 000 (LVGD Pirmskvartara), PSRS Armijas ģenerālštāba topogrāfiskās kartes mērogā 1:10 000 (TOPO 10K PSRS) un 1:25 000 (TOPO 25K63g PSRS). Savukārt, no Igaunijas Zemes dienesta WMS karšu servera izmantotas PSRS Armijas ģenerālštāba topogrāfiskās kartes mērogā 1:10 000 (Estonian Land Board, 2012).

Jaunu karšu veidošanai izmantoti *Envirotech* sastādītās *GIS Latvija 9.2* datu bāzē pieejamie vektordatu slāņi: *autoceli_line*, *pilsētas_point*, *robezas_line*, *ūdensteces_line*, *ūdenstilpnes_poly* un *apbuve_poly*. Tāpat autors izmantoja, pēc Latvijas kvartāra nogulumu kartes (LVGD Kvartargeologija; Brangulis u.c., 2000; Juškevics u.c., 2002), veidotus purvu un baseinu nogulumu vektordatu slāņus un pēc Latvijas dabas apvidu kartes (LVGD Dabas apvidi) veidotus Burtnieka, Trapenes un Sedas līdzenuma laukumveida vektordatu slāņus.

Pētījumā izmantotie vietvārdi balstīti uz Valsts zemes dienesta M 1:50 000 Latvijas satelītkartē lietotajiem toponīmiem (TOPO 50K Satelītkarte).

3.2. ĢIS datu bāze un kāpu morfometriskie mērījumi

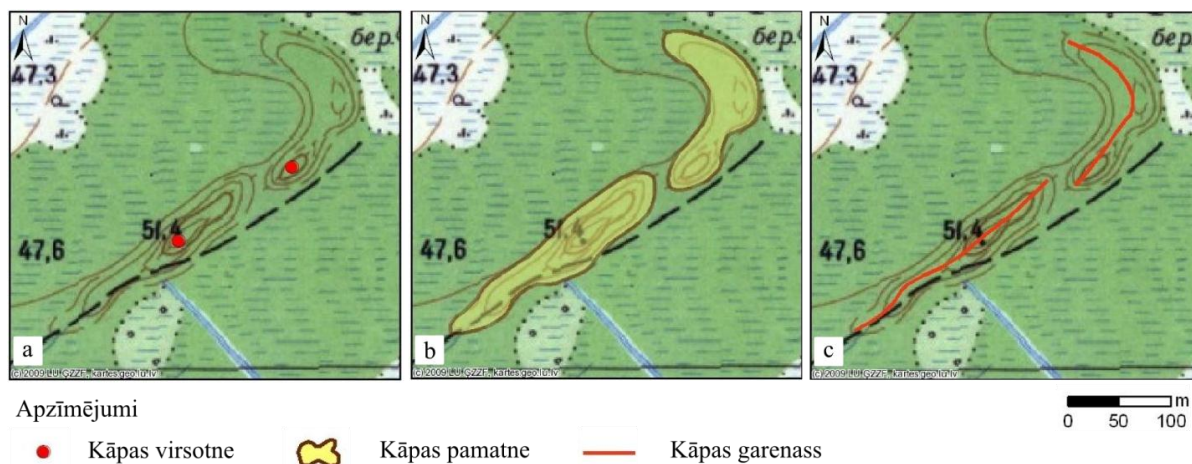
Sākot ar 20. gadsimta 70. gadiem, tālzipētes dati devuši ļoti nozīmīgu informācijas kopumu par kāpu lauku izplatību un morfoloģiskajām īpašībām uz Zemes, Marsa, Venēras un pat Titāna. Aizvien pieejamāki tālzipētes materiāli ir ļāvuši mūsdienu pētniekiem pārslēgties no atsevišķu kāpu izpētes, kas bija populāra 80. un 90. gados, uz lielu kāpu sistēmu pētījumiem, iegūstot datus par kāpu sakārtojuma mozaīku, hierarhiju un reģionālas attīstības īpatnībām (Hugenholtz, 2012). Sākotnēji, tālzipētes dati tika izmantoti, galvenokārt kāpu kartēšanai un klasifikācijai. Kā viens no nozīmīgākajiem kāpu klasifikācijas pētījumiem ir jāmin E. Makī (McKee, 1979) globālais kāpu sistēmu pētījums. Šī kāpu klasifikācija ir saistīta ar svarīgākajiem kāpu kontrolējošajiem lielumiem – vēja transportam pieejamās smilts daudzums, veģetācijas sega un vēja virzienu dažādība – mūsdienās tā tiek pielietota vairumā kāpu pētījumu. Šajā pētījumā autors balstās uz šo kāpu klasifikāciju, vadoties pēc kāpu formas plāna skatījumā. Parabolisko kāpu sīkāks iedalījums tika veikts balstoties G. Eberharda (2003) piedāvāto parabolisko kāpu klasifikāciju.

Pētījumu teritorijā nav pieejami digitālie tālzipētes dati, kas būtu izmantojami detaļu kāpu sakārtojuma mozaīkas un izplatības pētījumiem, tāpēc autors izmantoja pieejamos augstas precizitātes, mēroga 1:10 000 (TOPO 10K PSRS; Estonian Land Board, 2012) un mēroga 1:25 000 (TOPO 25K PSRS) topogrāfiskās kartes. Šis materiāls ir vairāk kā pusgadsimtu vecs, tomēr, ņemot vērā, ka Latvijas teritorijā kāpu aktivitāte tika apturēta 20. gadsimta sākumā (Bušs, 1960) un tās mūsdienās ir klātas ar patstāvīgu veģetāciju, autors pieņēma, ka kāpu forma un izplatība, kopš kartogrāfiskā materiāla veidošanas brīža, nav mainījusies.

3. 2. 1. Datu bāzes izveide

Līdzīgi kā kāpu pētījumos lielākajos pasaules tuksnešos (Hugenholtz, 2012), pētot jau aprimušas, ar veģetāciju klātas kāpas, to svarīgākie morfometriskie parametri ir kāpās pamatnes laukums, garenass orientācija un virsotnes augstums. Veidojot datu bāzi, autors tajā iekļāva šos trīs kāpu raksturojošos parametrus (skat. 3.2. att.). Kāpas pamatnes laukums sniedz informāciju par kāpu rakstu plāna skatījumā, izplatību un telpisko blīvumu. Kāpas garenass sniedz informāciju par kāpas garumu, orientāciju pret ziemeļiem un iespējamajiem paleovēju virzieniem, savukārt, kāpas virsotnes augstums ļauj novērtēt kāpas relatīvo un absolūto augstumu.

Kāpu telpiskās izplatības noteikšana un morfometriskie mērījumi veikti, izmantojot *ESRI ArcGIS 9.2.* un *Quantum GIS* programmas un PSRS Armijas ģenerālštāba mēroga 1:10 000 topogrāfiskās kartes (TOPO 10K PSRS; Estonian Land Board, 2012), bet teritorijās, kur nebija pieejamas šo karšu lapas, tika izmantotas PSRS Armijas ģenerālštāba mēroga 1:25 000 topogrāfiskās kartes (TOPO 25K63g PSRS).



3.2. attēls. **Vektordatu slāņu veidošanas shēma** (Celiņš un Nartišs, 2011, ar autora papildinājumiem)
Paskaidrojumi: a – kāpas virsotne; b – kāpas pamatne; c – kāpas garenass.

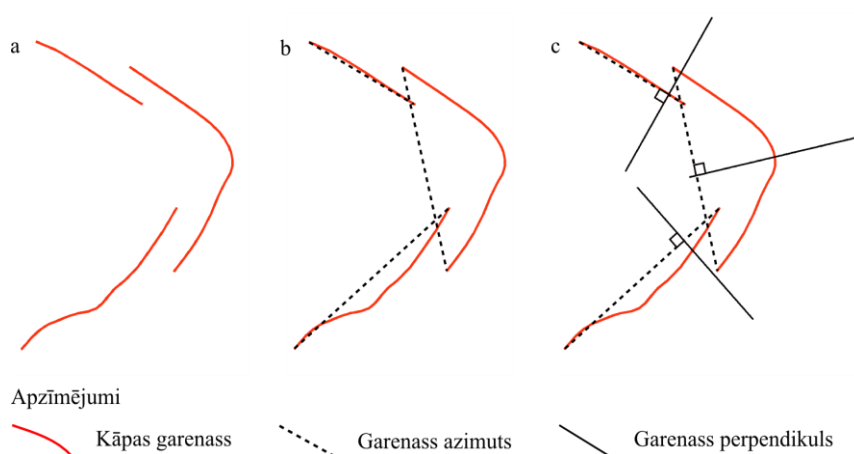
Eolo nogulumu izplatības un atsevišķu sarežģītu reljefa formu ģenēzes noteikšanai, izmantoja mēroga 1:200 000 Latvijas kvartārģeoloģiskās kartes (Brangulis u.c. 2000; Juškevičs u.c., 2002), kuras rastra formātā ir pieejamas LU ĢZZF WMS serverī (LVGD Kvartargeologija). Atsevišķos gadījumos, lauku darbu laikā tika veikta pārbaudes zondēšana, izmantojot grunts zondi.

Kāpas tika identificētas, un tās pamatne digitizēta kā laukumveida objekts, ņemot vērā izolīniju savstarpējo izvietojumu, apvienotas kāpas atdalīja kā atsevišķus objektus, cenšoties pieļaut pēc iespējas mazāku subjektivitātes līmeni. Kopumā šajā slānī apkopota informācija par 2784 reljefa formām, no kurām 2056 tika iegūtas autora bakalaura darba izstrādes laikā (Celiņš, 2010).

Kāpu garenasis izvilktas vadoties pēc kāpu muguras augstākajiem punktiem, maksimāli reprezentējot, kāpas izliekumus un garumu. Informācija par izvilkto līniju garumiem un orientāciju pret ziemeļiem tika aprēķināta automātiski un saglabāta datu bāzē (Celiņš un Nartišs, 2011). Kopumā šajā slānī saglabāta informācija par 2094 garenasīm, no kurām 1529 iegūtas bakalaura izstrādes laikā (Celiņš, 2010). Garenasis tika izzīmētās tādām kāpām, kuru garuma un platuma attiecība bija vismaz 3:1, tādējādi, samazinot iespējamo kļūdu nosakot orientāciju paugurveida kāpām.

Kāpu relatīvais augstums noteikts vadoties pēc izolīniju skaita starp kāpas virsotni un pamatni, savukārt, absolūtas augstums noteikts pēc augstuma atzīmēm topogrāfiskajās kartes, bet, ja šādu atzīmju nebija, izmantojot līdzīgu metodi kā nosakot relatīvo augstumu, balstoties pēc tuvāk esošās augstuma atzīmes (Celiņš un Nartišs, 2011). Datu bāzē saglabāto augstumu atzīmju skaits ir vienāds ar kāpu pamatņu skaitu.

3.2.2. Datu apstrāde un interpretācija



3.3. attēls. Kāpu garenass perpendikula noteikšanas shēma

Paskaidrojumi: a – kāpas garenass; b – kāpas garenass azimuts;
 c – noteiktais kāpas garenass perpendikuls.

Ņemot vērā to, ka kāpu forma un tās orientācija tiek radīta vēja virziena ietekmē (Lancaster, 2004), informācija par kāpu garenasīm var tikt izmantota paleovēju virzienu rekonstrukcijā. Šim nolūkam atlasīja garenasis, kas ir garākas par 200 m, jo īsākām

kāpām pētāmajā teritorijā bieži nav izteikta paraboliskā izliekuma. Kāpas garenass azimutu noteica automātiski, izmantojot *ESRI ArcGIS 9.2.* piedāvātos analīzes rīkus. Garenass azimutu programma izsaka kā taisnu līniju, kas savieno garenass līnijas abus galus (skat. 3.3. b att.). Velkot perpendikulu pret šo azimuta līniju (skat. 3.3. c att.) tiek iegūts kāpas garenass perpendikuls, kas turpmāk var tikt izmantots paleovēju virzienu noteikšanai (Celiņš un Nartišs, 2011).

Kopā iegūti 1212 perpendikulu virzieni, kuri statistiski analizēti, izmantojot *StereoNet 3.1* programmu. Iegūtie rezultāti vizualizēti, izmantojot sektordiagrammas un bidirekcionālu virzienu. Programmas uzstādījumi aprakstīti 3.3.1. apakšnodaļā.

3.3. Iekšējās uzbūves pētījumi

Kāpu iekšējā uzbūve sniedz vērtīgu informācijas kopumu par kāpu aktivitātes cikliem, eolās sedimentācijas apstākļu izmaiņām, kā arī par sanesu transportēšanas virzieniem un tā izmaiņām. Pilnīga priekšstata iegūšanai par kāpu iekšējo uzbūvi, autors veica slāņu saguluma veidojošo elementu mērījumus un pētījumus ar radiolokācijas metodi. Abas šīs pētījuma metodes pielietotas paralēli, tādējādi neatsverami papildinot viena otru, gan pētījuma vietu izvēlē, gan vēlāk datu apstrādes un interpretācijas procesā.

3.3.1. Slīpslāņojuma mērījumi un rezultātu apstrāde

Lai noteiktu smilšu slīpslāņojuma krituma leņķi un krituma azimutu, 19 pētījumu vietās kopumā veikti 222 slāņu saguluma veidojošo elementu mērījumi. No tiem 10 mērījumi veikti Burtnieka līdzenumā, 58 mērījumi Trapenes līdzenumā, bet Sedas līdzenumā veikti 154 mērījumi, no kuriem 66 tika veikti autora bakalaura darba izstrādes ietvaros (Celiņš, 2010).

Mērījumu veikšanas vietas novietojuma izvēli noteica pētījuma teritorijā esošo karjeru daudzums un to ģeogrāfiskais novietojums, līdz ar to, slāņu saguluma veidojošo elementu mērījumi veikti visos pētījuma teritorijā apzinātajos slēgtajos, nelegālajos un šobrīd darbojošos oficiālajos karjeros. Karjeru atrašanās vietas tika noteiktas, izmantojot LU ĢZZF WMS serverī pieejamās dažādu etapu ortofoto kartes (ORTOFOTO 3; ORTOFOTO 2).

Mērījumu daudzums un to izvietojums katra karjera ietvaros ir dažāds, ko ietekmēja galvenokārt karjera lielums un tā novietojums kāpā. Ja, piemēram, karjers atsedz tikai vienu no kāpas nogāzēm, tad individuālo mērījumu skaits ir minimāls, savukārt, ja karjers atsedz pilnu kāpas šķērsriezumu, tad tika izmantota iespēja veikt mērījumus kāpas uzvēja nogāzē, augstākajā daļā, kā arī kāpas aizvēja nogāzē, tādējādi iegūtie dati var aptvert pat pilnu kāpas attīstības ciklu.

Atseguma ietvaros slīpslāņojuma krituma leņķa un krituma azimuta mērījumi tika veikti katrā slāņkopā. Mērījumiem izvēlēti vizuāli labi saredzami slāņojumi, lai varētu precīzi ievietot metāla plāksnīti uz slāņa robežvirsmas un mazinātu iespēju kļūdīties. Ja atsegumā nevarēja izšķirt atšķirīgas slāņkopas, tad mērījumi tika veikti ar aptuvenu intervālu 10-30 cm.

Pirms slāņa saguluma veidojošo elementu mērījumiem, katrs atsegums tika rūpīgi attīrīts, pierakstos dokumentētas novērotās kontaktvirsmas un citi nozīmīgi novērojumi. Slīpslāņojuma mērījumus veica, izmantojot ģeoloģisko busoli *SILVA Ranger15* (azimuta un slīpuma skalas precizitāte 2°) un metāla plāksnīti. Atseguma augstuma un mērījumu dziļuma noteikšanai izmantoja teleskopisko latu ar maksimālo garumu 5 m (skalas precizitāte 1 cm).

Slīpslāņojumu mērījumu rezultātu apstrāde un analīzi veica, izmantojot datorprogrammu *StereoNet 3.1*. Ar tās palīdzību, izveidoja izolīniju un apvienotas sektordiagrammas un punktveida diagrammas.

Veidojot diagrammas, tika izmantots logaritmiskais mērogs, riņķi iedalīja 36 sektoros, lai varētu uzskatāmi parādīt vienu no 16 debespusēm un vienlaicīgi saglabāt arī pietiekami detaļu rezultātu attēlošanu, riņķa mēroga vērtība tika noteikta kā 50. Katru sektordiagrammu apvienoja ar punktveida diagrammu, lai uzskatāmi parādītu slīpslāņojuma krituma leņķi, to azimutu un atkārtosšanās biežumu (Celiņš, 2010). Lai apkopotu visus slīpslāņojuma mērījuma datus un tos vizuāli ilustrētu, tika izmantota izolīniju diagrama, attēlojot slāņu krituma leņķi, to azimutu un atkārtosšanās biežumu.

Analizējot slīpslāņojuma mērījumu datus, ir ļoti svarīgi izšķirt slīpslāņoto sēriju piederību uzvēja vai aizvēja nogāzei. Šim nolūkam tika izmantota Feirbridža (Fairbridge, 1968) aprakstītā metodika, kurā ir noteikts, ka slīpslāņotās sērijas ar slīpumu līdz 12° veidojas uzvēja nogāzes apstākļos, bet ar slīpumu lielāku par 12° aizvēja nogāzes apstākļos.

Visām slīpslāņojumu mērījumu vietām noteica koordinātas ar augstas precizitātes GPS iekārtu *ProMark3 Thales*. Izmantojot *MobileMapper Oficce* programmatūru, GPS datu pēcapstrādes procesā tika veikta koordināšu izlīdzināšanu LĢIA uzturētajā *LatPos* tīklā.

3.3.2. Radiolokācijas metode

Kāpu iekšējās uzbūves pētījumi ar radiolokācijas metodi tika veikti 2010. gada oktobrī, 2011. gada martā un 2012. gada februārī. Pētījuma gaitā kopumā iegūti 93 radiolokācijas profili ar kopējo garumu vismaz 2,5 km.

Lauka pētījumu laikā ir svarīgi pareizi novietot radiolokācijas profilus, lai datu apstrādes laikā varētu veikt pēc iespējas precīzāku interpretāciju. Radiolokācijas profili tika novietoti, pēc iespējas, perpendikulāri kāpas garenasij, bet šķērseniskos profilus izvietoja perpendikulāri pirmajam profilam. Pie šāda profilu novietojuma ir ļoti ērti veikt precīzu slāņu saguluma interpretāciju. Profilu līnijas tika iezīmētas ar piketu palīdzību, kuras uzmērīja ar augstas precizitātes GPS iekārtu *ProMark3 Thales* un GPS ar datu pēcapstrādi LĢIA uzturētajā *LatPos* tīklā. Pētījuma vietā *Silezers*, veikta arī reljefa topogrāfiskā uzmērīšana, izmantojot totālo staciju *Nikon NPL 33N*. Iegūtie dati par reljefu tika pielietoti, lai radiolokācijas profiliem piešķirtu augstuma vērtības.

Pētījumā izmantots Latvijā ražotais *SIA Radar Systems* ģeoradars *Zond-12e* (skat. 3.4. att.). Radiolokācijas profilēšana veikta ar 300 un 500 Mhz antenu sistēmām, jo sākotnēji tika izvirzīts mērķis iegūt informāciju par kāpas iekšējo uzbūvi visā griezumā ar pēc iespējas

augstāku detalitāti. 500 MHz antenu sistēmu izmantoja, lai novērtētu vai kāpā ir izteiktas struktūras, kuras nav iespējams izšķirt ar 300 MHz antenu sistēmu.



3.4. attēls. Radiolokācijas pētījumu veikšana *Kampiņu apkārtnē*, izmantojot ģeoradaru *Zond-12e* un 500 Mhz antenu sistēmu. (J. Karuša foto).

Ģeoradara darbības parametrus iestatīja atbilstoši veicamajam uzdevumam. Tika pieņemts, ka pētāmā vide ir sausa smilts, un atbilstošais vides dielektriskās caurlaidības koeficients ir vienāds ar 5. Izmantojot 300 MHz antenu sistēmu, ierakstu veica līdz 300 ns laika aizturi, kas, pieņemot, ka pētāmā vide ir sausa smilts, atbilst, aptuveni, 20 m dziļam ierakstam. Laika aizture tika izvēlēta, balstoties uz testa signālu, uzstādot tādu maksimālo laika aizturi, līdz kurai varēja uztvert kvalitatīvu signālu. Izmantojot 500 MHz antenu, tika iestatīta 200 ns laika aizture, kas, pieņemot, ka pētāmā vide ir sausa smilts, atbilst, aptuveni, 14 m dziļam ierakstam (Celiņš un Karušs, 2011b).

Saņemto signālu pastiprināja proporcionāli dziļumam, vadoties pēc testa signāla. Ieraksts tika veikts nepārtraukti, fiksējot katru impulsu un izmantojot stipru signāla filtru (Celiņš un Karušs, 2011b).

Lai profilu pēcapstrādes procesā būtu iespējams diagnosticēt tajā redzamās robežas, katrā profilēšanas vietā tika veikti kontrolurbumi un apsekoti atsegumi, iegūto informāciju piefiksējot lauka grāmatiņā.

Profilu apstrādei izmantoja *Prism 2,5* datorprogrammu. Apstrādājot profilus, tika konstatēts, ka ieraksts ir ar ļoti augstu kvalitāti un tiem ir nepieciešama minimāla pēcstrāde. Būtiskākos traucējumus radīja augstsprieguma elektropārvades līnija, kas atradās tieši virs pētījuma vietas Silezers. 2011. gada martā veiktajiem profiliem būtiskus traucējumus radīja mitrā sniega sega, savukārt, 2012. gadā veiktajiem profiliem ir novērojami tehniska rakstura traucējumi, kuri, iespējams, radušies pielietojot ģeoradaru un antenes lielā, līdz -35°C , salā. Elektropārvades līnija radīja spēcīgu signālu, ko izdevās veiksmīgi izdalīt no derīgā signāla, izmantojot frekvenču filtru (*Ormsbija* filtrs), papildus visiem radiolokācijas profiliem tika izmantots filtrs fona traucējumu atdalīšanai (*Background removal*) un signāla korekcija balstoties uz attālumu starp antenām (*Moveout correction*). Jāņem vērā, ka nereti atbrīvojoties no traucējumiem tiek dzēsti arī derīgi signāli. Tāpēc fona trokšņu dzēšana netika veikta pilnībā, lai informatīvo signālu zudums būtu pēc iespējas mazāks.

Turpmākā iegūto radiolokācijas profilu analīze sastāvēja no subhorizontālo signālu identificēšanas un lokālo signālu identificēšanas, lai būtu iespējams labāk saskatīt un izdalīt signālus, kā arī, lai kompensētu signāla proporcionālo pavājināšanos atkarībā no laika, pēc kura tas tiek saņemts, signāli tika nelineāri pastiprināti. Signālu identificēšana veikta, izmantojot atsegumu un veikto kontrolurbumu informāciju.

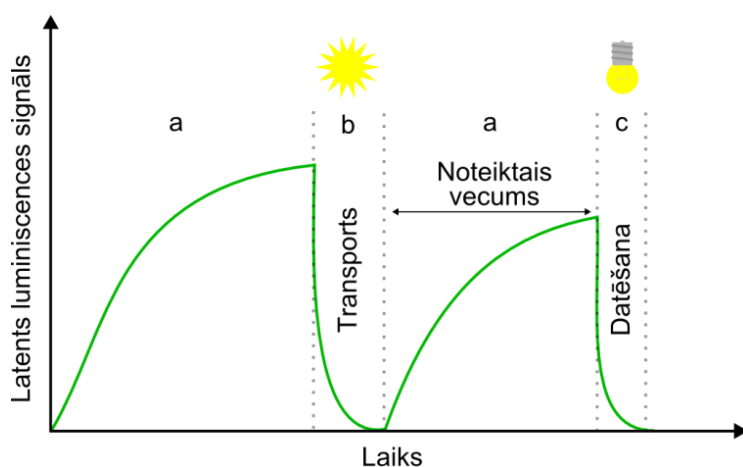
3.4. Optiski stimulētās luminescences datēšanas metode

Luminescences datēšanas tehnika mūsdienās tiek pielietota dažādos ar kvartāra nogulumiem un arheoloģiju saistītos pētījumos. Viens no pirmajiem pētījumiem par luminescences signāla izmantošanu zinātniskos nolūkos bija F. Daniela (Daniels et al., 1953) pētījums par luminescences signāla iegūšanu no kvarca minerāliem, izmantojot karsēšanu. Vēlāk, 60. un 70. gadu sākumā, termoluminiscenci (turpmāk TL) galvenokārt attīstīja un pielietoja, lai noteiktu vecumu seniem keramikas priekšmetiem (Aitken et al., 1964; Zimmerman, 1971) Kopš A. K. Singvi ar līdzautoriem (Singhvi et al. 1982) pielietoja TL metodi eolo nogulumu datēšanai Indijā, TL datēšanas metode tiek plaši pielietotas eolo smilšu un citu smilšaino nogulumu veidu vecuma noteikšanai. 1985. gadā D. J. Hantlijs ar līdzautoriem (Huntley et al. 1985) atklāja, ka luminescences signālu no nogulsnētiem kvarca graudiem ir iespējams iegūt, tos stimulējot ar gaismu. Šai metodei autori uzsvēra vairākas būtiskas priekšrocības, salīdzinot ar termoluminiscenci, un optiski stimulētās luminescences (OSL) metode strauji attīstījās un pakāpeniski aizstāja TL metodi. Tā ir kļuvusi īpaši populāra tieši pēdējā gadu desmitā, pēc tam kad A. S. Marejs un A. G. Vintls (Murray and Wintle,

2000) 2000. gadā prezentēja viena subparauga reģenerācijas metodi (SAR), kas būtiski atviegloja un paātrināja mērījumu veikšanu.

OSL datēšana vēl aizvien ir ļoti jauna metode un joprojām tiek būtiski pilnveidota. Neskatoties uz to, metodoloģiskais progress pēdējo gadu laikā un augstā rezultātu precizitāte un atbilstība neatkarīgām vecuma noteikšanas metodēm, ir padarījusi šo datēšanas metodi kā vienu no vadošajām arheoloģijas un kvartārģeoloģijas pētījumu jomās (Vanderberg et.al. 2004).

Luminiscences datēšanas metode pieder pie tā dēvētajām dozimetriskajām datēšanas metodēm, kuras balstās uz to, ka laika gaitā, apkārtesošās radiācijas ietekmē, minerālos rodas radiācijas izsaukti bojājumi un uzkrāts noteikts enerģijas daudzums. Termālā vai solārā



3.5. attēls. Luminiscences signāla uzkrāšanās un atbrīvošanās principa shematisks attēlojums (izveidots pēc Vandenberg et. al., 2004) Paskaidrojumi: a – kvarca graudi atrodas aprakti nogulumos un, apkārtesošās dabīgās radiācijas iespaidā, tiek uzkrāts luminiscences signāls; b – erodējot nogulumus, kvarca graudi tiek transportēti un izgaismoti saules gaismā, atbrīvojot uzkrāto luminiscences signālu; c – pēc nogulumu paraugošanas un apstrādes, kvarca graudi tiek stimulēti ar mākslīgu gaismas avotu, atbrīvojot luminiscences signālu un nosakot laika posmu kopš pēdējā signāla atbrīvošanas notikuma (b).

stimulācija atbrīvoto uzkrāto enerģiju luminiscences veidā. Luminiscences datēšanas tehnikas izmantošana ļauj noteikt laika posmu, kas ir pagājis, kopš minerāla grauds ir kristalizējies, pēdējo reizi ticis izgaismots saules gaismā vai karsēts augstās temperatūrās (skat. 3.5. att.).

Datēšanas nolūkiem izmanto izstaroto luminiscences signālu. Šo enerģijas daudzumu sauc par paleodozu jeb ekvivalento devu (D_e), kas noteikta, salīdzinot parauga dabīgo luminiscences signālu ar reģenerēto, apstarojot paraugu ar

dažādām radiācijas devām. Ekvivalento devu izsaka grejos ($1 \text{ Gy} = 1 \text{ J kg}^{-1}$). Lai noteiktu precīzu laika posmu, kopš pēdējās signāla atbrīvošanas, ekvivalentā deva tiek dalīta ar devas koeficientu (skat. vienādojumu nr. 1), kas reprezentē enerģijas daudzumu, ko saņēmis minerāla grauds vienā gadā, esot pakļauts dabiskajai radiācijas ietekmei pēc pēdējā signāla dzēšanas notikuma. Devas koeficientu izsaka grejos vienā gadā.

Eolie procesi nodrošina ideālu apstākļu kopumu, lai smilts graudiņi tiktu labi izgaismoti saules gaismā un tādejādi atbrīvotu luminiscences signālu pirms nogulsnešanās. Tāpēc tiek uzskatīts, ka eolie nogulumi ir vispiemērotākie datēšanai ar luminiscences metodi, jo

salīdzinot arī ūdens vidē izgulsnētiem nogulumiem, eolajiem nogulumiem parasti nav problēmu ar nepilnīgi atbrīvotu luminiscences signālu nogulumu transportēšanas laikā un tādējādi neprecīzu vecuma noteikšanu.

$$Vecums = \frac{Ekvivalentā\ deva\ (Gy)}{Devas\ koeficients\ (Gy\ gadā)} \quad (1)$$

Turpmākajās apakšnodaļās izklāstīta laboratorijas rutīna pie paraugu apstrādāšanas, dabīgās radiācijas mērījumu metodika, datēšanas metodika kvarca minerāliem, kā arī nepieciešamo testu kopums, kas ļauj uzlabot datēšanas metodiku un novērtēt iegūto rezultātu atkārtojamību un kvalitāti.

3.4.1. Paraugošana un paraugu apstrāde

Kāpu vecuma noteikšanai ar OSL datēšanas metodi 2009. un 2012. gadā tika ievākti 8 smilts paraugi atšķirīgās pētījumu teritorijas vietās.

Smilts paraugu ievākšanu veica, izmantojot plastmasas caurules ar 56 mm diametru un 315 mm garumu. PVC caurule ar speciāla bezatsitiena āmura palīdzību tika iedzīta izvēlētajā smilts slānī (skat. 3.6. att.), caurules abi gali tiek aiztaisīti ar tam paredzētām plastmasas uzmašām un nostiprinātas ar necaurspīdīgu līmlenti. Jāpiemin, ka iepriekš caurulē ievietoto saburzīta papīra gabalu, kas parauga ņemšanas laikā mazina iespējamo smilts samaisīšanos un saules gaismas nonākšanu caurules iekšienē. Uz caurules korpusa tika norādīta parauga iekšpuse un ārpuse attiecībā pret atseguma sienu, paraugošanas vietas nosaukums un datums, papildus tika norādīta informācija par paraugojamo nogulumu veidu, reljefa formu, parauga ņemšanas dziļumu un iespējamo vecumu. Šāda vienkāršota paraugošanas metodika ir vispāratzīta pasaulē un tiek rekomendēta no vadošajām OSL datēšanas laboratorijām, kā vienkārša un salīdzinoši droša paraugošanas metode.

2009. gadā ievāktie paraugi tika apstrādāti un datēti Somijas Dabas vēstures muzeja Datēšanas laboratorijā. Savukārt, 2012. gadā ievāktos paraugus autors apstrādāja un sagatavoja datēšanai Ziemeļu Luminiscences datēšanas laboratorijā, Dānijā, pēc standartizētas un vispārpieņemtas metodikas (Vandenberg et. al., 2004).



**3.6. attēls. OSL parauga ņemšanas procedūra
nērtījumu vietā Zeltini (M. Nartiša foto)**

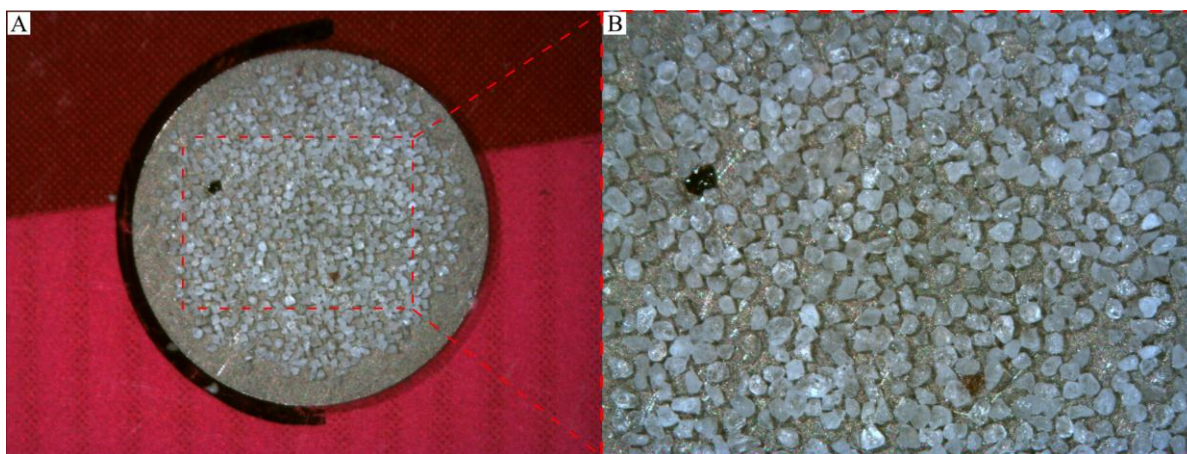
stundu ar 33% H_2O_2 , lai noņemtu organiskos piemaisījumus. Smilts graudiņu virsmu notīrīšanai, 40 minūtes pielietoja 10% HF skābi, pēc tam izmantojot 10% HCL, novāca fluora kristālu veidojumus, kas var veidoties paraugā pēc HF lietošanas. Fluora kristāliem ir luminiscējošas īpašības, kas var radīt nevēlamus traucējumus OSL mērījumos.

Pielietojot šķidrumu ar blīvumu $2,62\text{ g/cm}^3$, atdalīja kvarca graudiņus no laukšpata graudiņiem. Iegūto kvarca frakciju 1 stundu apstrādāja ar 40% HF skābi, lai tiktu vaļā pilnīgi no visiem laukšpata minerālu graudiņiem un nokorodētu arī paša kvarca virsmu, tādējādi to pilnībā notīrot. Pēc tam atkal pielietoja 10% HCL, lai noņemtu fluora kristālus. Pēdējos divus soļus, pēc nepieciešamības, var atkārtot vairākas reizes, līdz iegūst pilnīgi tīrus kvarca graudiņus, tomēr, kā liecina autora pieredze, pēc trešās procedūras atkārtotās reizes, ir novērojama arī ļoti būtiska kvarca graudiņu izmēra samazināšanās, kas mazina datēšanai derīgā parauga apjomu. Pēc ķīmiskās apstrādes, paraugus pārsijāja, lai atbrīvotos no kvarca graudiem, kuri pēc ķīmiskās apstrādes kļuvuši mazāki par $180\text{ }\mu\text{m}$.

Paraugu atpakošana un turpmāk aprakstītā apstrāde notika pie zemas intensitātes sarkanās gaismas. Saules gaismas, vai normāla apgaismoja piekļūšana paraugam viennozīmīgi to neatgriezeniski sabojā.

Paraugošanas caurules ārējā, saules gaismas ietekmētā, parauga daļa, tika rūpīgi izņemta un izmantota, lai noteiktu dabīgā ūdens saturu, maksimāli iespējamo ūdens saturu un dabīgās radiācijas mērījumiem (skat. 3.4.2. nodaļu).

Aptuveni 150 gramus smilts parauga sijāja, lai iegūtu smilts frakciju $180\text{-}250\text{ }\mu\text{m}$. Iegūto frakciju apstrādāja vienu stundu ar 30% HCL, lai noņemtu karbonātiskos piemaisījumus un vienu



3.7. attēls. Mērījumiem sagatavots un uz nerūsējošā tērauda diska novietots subparaugs

A – subparauga kopskats; B – pietuvināts subparaugs, kas sastāv no 180-250 μm frakcijas kvarca un pret ķīmisko apstrādi noturīgiem smagajiem minerāliem.

Neizmantotā parauga daļa un smilts frakcijas tika iepakotas gaismu necaurlaidīgos PVC maisos un novietotas drošā noliktavā, lai tos vēlāk izmantotu citos pētījumos vai pēc neparedzētiem gadījumiem, kad apstrādātie paraugi tiek pazaudēti vai sabojāti.

Datēšanai sagatavotie paraugi, ar silikona saistvielas palīdzību, tika novietoti uz 0,5 mm bieziem nerūsējošā tērauda diskiem diametrā 9,7 mm (skat. 3.7. att.). Katram datējamajam paraugam tika sagatavoti 18 – 26 šādi subparaugi.

3.4.2. Dabiskās radiācijas mērījumi

Dabīgās radiācijas mērījumus veikšanai, 250 gramu izžāvēta un samalta parauga 24 stundas tika karsēta 450°C temperatūrā, lai nodedzinātu visu organiskos piemaisījumus. Pēc tam, pievienojot 100 gramus izkausēta vaska, parauga un vaska maisījumu ievietoja alumīnija formās un atdzesēja, lai iegūtu krūzes formas parauga monolītus, kurus vēlāk izmanto gamma spektrometrijas mērījumiem.

Dabiskās radiācijas mērījumiem izmantoja *Canberra n-type* augstas izšķirtspējas gamma starojuma spektrometru ar germānija minerāla diodi. Gamma spektrometrijas mērījumi veikti pēc A. S. Mareja un līdzautoru (Murray et al., 1987) aprakstītās metodikas. Mērījumu gaitā tika noteikta ^{238}U , ^{230}Th , ^{226}Ra , ^{222}Ra , ^{210}Pb , ^{228}Ra , ^{220}Rn , ^{40}K un ^{137}Cs izotopu radioaktivitāte katrā paraugā un izteikta kā bekereli uz vienu kilogramu (Bq kg^{-1}).

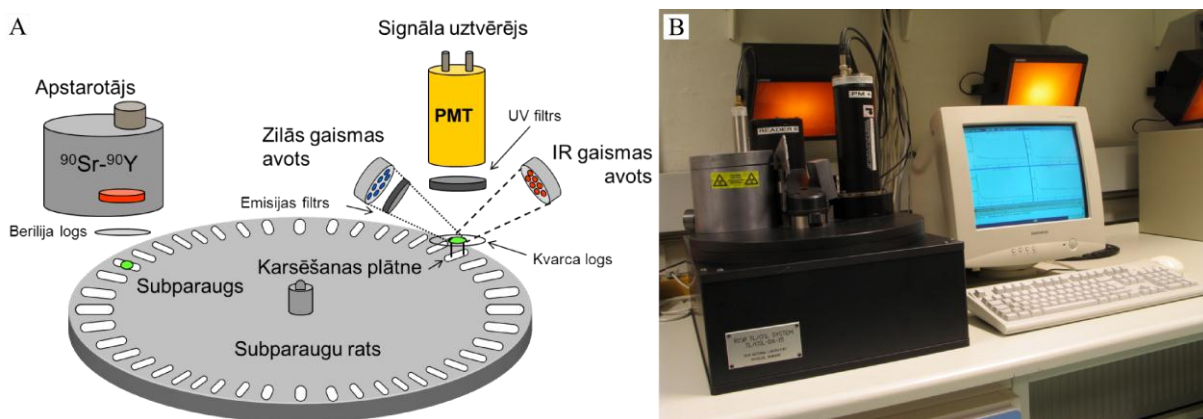
Dabiskās radiācijas devas lielumu paraugos aprēķina, izmantojot vispārpieņemtus aprēķinus (Mejdahl, 1979) un izsaka kā absorbētās devas koeficientu (Gy gads^{-1}). Kvarca iekšējās beta starojuma radiācijas devas lielumu 180-250 μm graudiņu izmēram pieņem kā nebūtisku rezultātu ietekmējošu faktoru, balstoties uz kvarca minerālu iekšējās radiācijas

pētījumiem Skandināvijas reģionā (Mejdahl, 1979), savukārt, alfa radiācijas skartais graudiņu ārējais slānis tika nokorodēts, izmantojot 40% HF skābi, paraugu apstrādes laikā (skat 3.4.1. punktu). Kosmiskās radiācijas devas lielumu noteica, ņemot vērā paraugošanas vietas ģeogrāfisko novietojumu, augstumu virs jūras līmeņa un paraugošanas dziļumu, vadoties pēc J. R. Prescott un J. T. Hutton (Prescott and Hutton, 1988; 1994) ieteiktajām aprēķinu metodēm.

Paraugiem, kuri tika ņemti kāpas virsējā daļā, pieņēma, ka ūdens saturs laika posmā, kopš nogulumu veidošanās brīža, ir bijis līdzīgs nomērītajam dabīgajam ūdens saturam paraugošanas brīdī. Tika pieņemts, ka iespējamā noteiktā ūdens satura kļūda paraugā ir 4 % robežās.

3.4.3. Paraugu datēšana, izmantojot SAR protokolu

OSL mērījumus veica, izmantojot *Risø TL/OSL DA15* lasītāju, kas aprīkots ar zilās (viļņa garums – 470 ± 30 nm; enerģijas daudzums ~ 50 mWcm⁻²) un infrasarkanās (viļņa garums – 880 ± 80 nm; enerģijas daudzums ~ 135 mWcm⁻²) gaismas avotiem. Izstaroto luminiscenci uztvēra caur ultravioleto stikla filtru *Hoya U340*. Reģenerētā radiācijas deva paraugiem tika piešķirta, izmantojot ⁹⁰Sr-⁹⁰Y beta radiācijas avotu. Sīkāks iekārtas tehniskais raksturojums ir pieejams Bētera-Jensena un līdzautoru rakstā (Bøtter-Jensen et al., 2003).



3.8. attēls. *Risø TL/OSL DA15* lasītājs (NLL reprezentācijas materiāls, ar autora papildinājumiem) Lasītāja galveno elementu shematiskais attēlojums (A) un iekārta mērījumu laikā (B).

Ekvivalentās devas mērījumi veikti, izmantojot SAR (viena parauga reģeneratīvās dozas procedūra) protokolu, ko ir aprakstījis A. S. Marejs un A. G. Wintls (Murray and Wintle, 2000; Wintle and Murray, 2006).

Šajā pētījumā standarta SAR mērījumu protokols tika nedaudz pārveidots, iekļaujot tajā IR gaismas stimulācijas soli, lai atbrīvotos no nevēlama luminescences signāla, kas veidojas no laukšpata minerāla ieslēgumiem kvarca graudos (Wintle and Murray, 2006). Šāda SAR protokola pārveidošana ir sevi attaisnojusi vairākos pētījumos, kur autori saskārās ar problemātiskām paraugu luminescences īpašībām, dēļ laukšpata minerālu piemaisījumiem (Walinga et al., 2002; Roberts, 2007).

Lai noteiktu piemērotāko karsēšanas temperatūru, tika veikts karsēšanas plaknes tests. Šis tests palīdz noskaidrot, kādās karsēšanas temperatūrās luminescences signāls kļūst stabils (Wintle and Murray, 2006). Testu veica vienam paraugam, pielietojot karsēšanas temperatūras diapazonā no 160 līdz 300°C.

Atkārtoti veicot subparauga karsēšanu pie augstām temperatūrām, mainās tā jūtība. Lai to novērstu, dabiskos un reģenerētos luminescences signālus (L_n ; T_n) normalizēja, izmantojot testa luminescences signālus (T_n ; T_i , skat. 3.1. tabulā). Testa luminescences signālu ieguva, apstarojot subparaugu ar zināmu radiācijas devu (skat. 3.1. tab., 5. solis) un pēc tam nomērot attiecīgo luminescences signālu (skat. 3.1. tab., 8. solis).

3.1. tabula

Pētījumā izmantotais SAR protokols

Solis	Darbība		Saņemtais signāls
1	Dabīgā radiācijas deva, D_n	Reģenerētā radiācijas deva, D_i	
2	Karsēšana 260°C, 60 s		↑
3	IR stimulācija 125°C, 100 s		
4	Zilās gaismas stimulācija 125°C, 60 s		
5	Testa radiācijas deva, D_t		L_n, L_i
6	Karsēšana 240°C, 40 s		↑
7	IR stimulācija 125°C, 100 s		
8	Zilās gaismas stimulācija 125°C, 60 s		
9	Zilās gaismas stimulācija 280°C, 40 s		T_n, T_i
10	Atgriešanās pie 1. soļa		

Ņemot vērā paraugu luminescences īpašības, standarta SAR protokolā tika veikta būtiskas izmaiņas (skat. 3.1. tab.). Lai nolasītu dabiskos un reģenerētos luminescences signālus, visi subparaugi tika karsēti 60 sekundes 260°C temperatūrā. IR gaismas stimulācija tika veikta 100 sekundes 125°C temperatūras, bet zilās gaismas stimulācija 60 sekundes 125°C temperatūras. Testa luminescences signāla (T_n ; T_i) iegūšanai visi subparaugi tika karsēti 40 sekundes 240°C temperatūrā, kas ierasti ir par 20°C zemāka kā pirmā karsēšanas

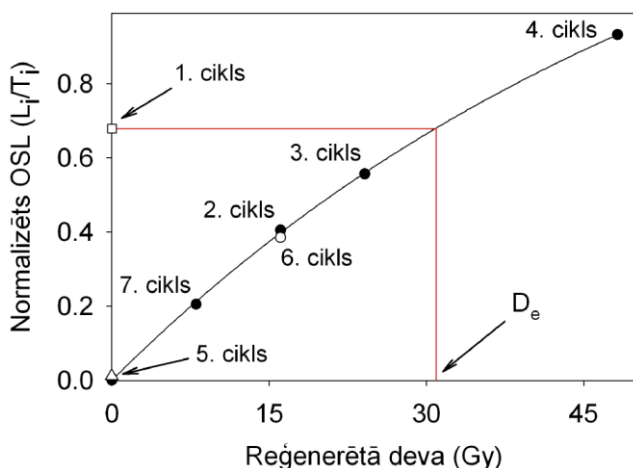
temperatūra (Wintle and Murray, 2006). IR un zilās gaismas stimulācija testa signālam notika tāpat kā aprakstīts augstāk. Pirms pāriešanas uz katru nākamo ciklu, subparaugi tika karsēti 280°C temperatūrā un 40 s stimulēti ar zilo gaismu, lai pilnībā dzēstu luminiscences signālu un nenotiktu mantota luminiscences signāla pārnese uz nākamajiem mērījumu cikliem.

Maksimālais reģenerētās radiācijas devas (D_i) daudzums tika noteikts divas reizes lielāks par parauga aptuveno ekvivalento devu (D_e), kopumā pielietojot sešus reģenerācijas ciklus. Testa radiācijas deva (D_i) tika izvēlēta līdzīga aptuvenajai parauga ekvivalentajai devai.

Ekvivalentā devu noteica, izmantojot programmu *Risø Analyst*, atliekot mākslīgi reģenerētos luminiscences signālus grafikā un nolaset normalizētā dabiskā luminiscences signāla vērtību (L_n/T_n) uz y ass (skat. 3.9. att.). Ekvivalentās devas noteikšanai izmantoja luminiscences signālu no 0,8 sekundes līdz 0,96 sekundei, bet par mērījumu fonu tika pieņemts signāls no 1,12 sekundes līdz 2,08 sekundei (skat. 4.23. A att.).

Lai novērtētu mērījumu precizitāti un SAR protokola piemērotību konkrētajam datēšanas uzdevumam, tika pielietoti četri testi, kurus iesaka A. S. Marejs un A. G. Vintls (Murray and Wintle, 2000; Wintle and Murray, 2006).

Lai novērtētu mērījumu precizitāti četriem paraugiem, tika veikts devas atjaunošanas tests. Šis tests pārbauda, vai pēc noteiktas radiācijas devas saņemšanas, subparaugs izstaro



3.9. attēls. Shematisks piemērs reģenerācijas ciklu attēlošanai grafikā un ekvivalentās devas (D_e) noteikšanai

saņemtajai devai atbilstošu luminiscences signālu. Testa ietvaros subparaugus novietoja saules gaismas simulatorā uz 4 stundām, lai pilnībā dzēstu paraugā esošo luminiscences signālu. Uzsākot mērījumus, katrs subparaugs tika apstarots ar noteiktu radiācijas devu, kas ir maksimāli tuva attiecīgā parauga ekvivalentai devai. Turpmākā mērījuma gaita ir identiska iepriekš aprakstītajam SAR protokolam. Noteiktajai ekvivalentajai devai jāiekļaujas 10%

klūdas robežās, salīdzinot ar radiācijas devu ar kuru apstaroja subparaugu. Ja testa rezultāti pārsniedz pieļaujamo kļūdu, ir nepieciešams veikt korekcijas izmantotajā SAR protokolā vai pieņemt, ka paraugu, izmantojot šo metodi, nav iespējams precīzi datēt.

Laukšpata minerālu izraisītās luminescences klātbūtne un tā ietekme uz rezultātu tika novērtēta, salīdzinot luminescences signāla lielumu pēc infrasarkanās gaismas stimulācijas un zilās gaismas stimulācijas.

Rekuperācijas testu pielietoja, lai noskaidrotu, vai paraugos esošais luminescences signāls tiek pilnībā dzēsts pēc 9. soļa (skat. 3.1. tab.), un starp mērījumu cikliem netiek pārņests mantots luminescences signāls. Šis tests ir iekļauts katrā mērījumu sesijā. Testa ietvaros, 5. cikla 1. solī (skat. 3.9 att. un 3.1. tab.) subparaugi netiek apstaroti ar reģenerēto radiācijas deva un attiecīgi nomērītajam luminescences signālam arī jābūt tuvu nullei. Pieļaujamā maksimālā kļūda ir 5%.

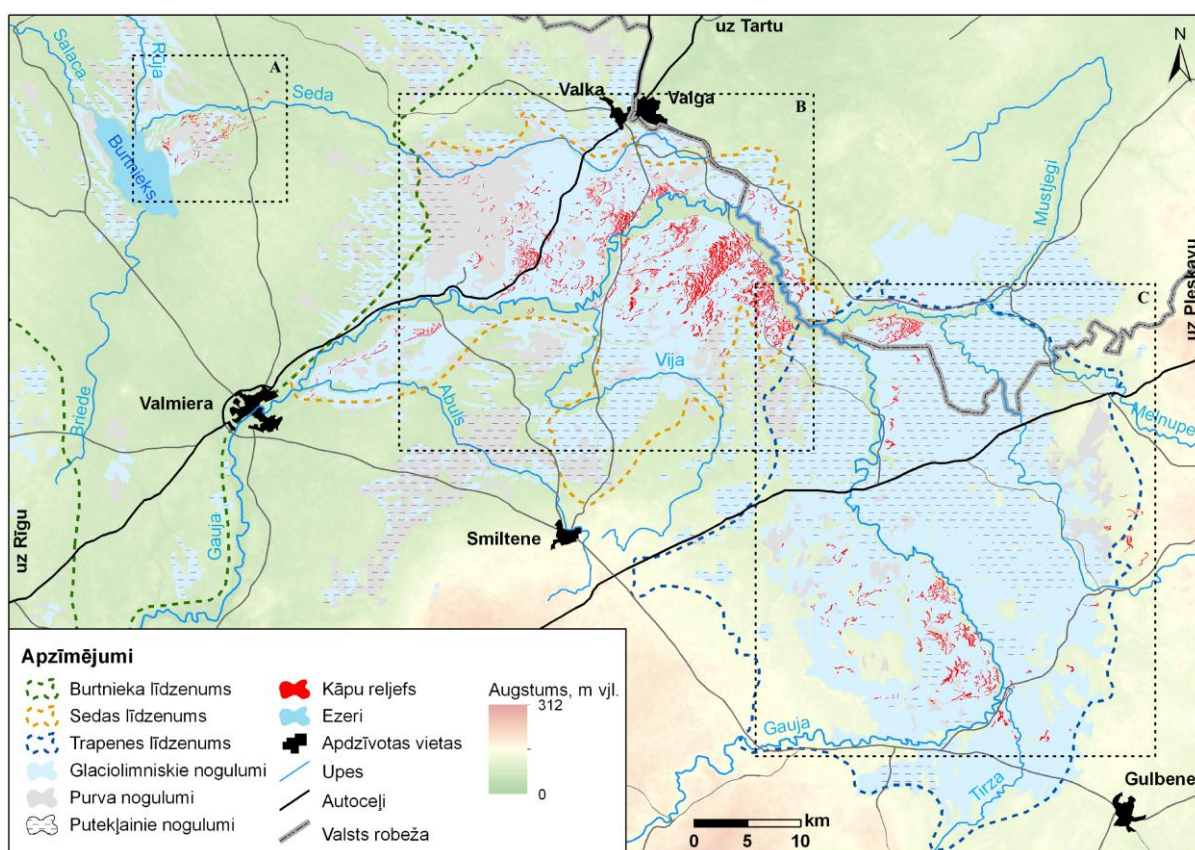
Atkārtojamības testu pielieto, lai novērtētu mērījumu atkārtojamību un jūtības izmaiņas starp mērījumu cikliem. Šis tests tika iekļauts katrā mērījumu sesijā. Testa būtība izpaužas tajā, ka mērījumu sesijas ietvaros, 2. un 6. cikla 1. solī (skat. 3.9 att. un 3.1. tab.) subparaugi tiek apstaroti ar vienādu reģenerētās radiācijas devu, un attiecīgi nomērītajiem luminescences signāliem abos ciklos ir jābūt vienādiem. A. G. Vintls un A. S. Marejs (Wintle and Murray, 2006) norāda, ka šī testa rezultātiem ir jāiekļaujas 10% kļūdas robežās.

4. REZULTĀTI UN INTERPRETĀCIJA

Pētījuma gaitā tika iegūti jauni dati par iekšzemes kāpu izplatību, morfoloģiju, savstarpējām sakarībām un iekšējo uzbūvi. Savukārt autora veiktie OSL datējumi, sniedz līdz šim nebijušu iespēju novērtēt precīzu kāpu veidošanās laiku un eolās aktivitātes ilgumu Ziemeļvidzemē. Šajā nodaļā apskatīti būtiskākie šī pētījuma rezultāti un sniegta to interpretācija, vizualizācijai izvēlēti raksturīgākie rezultāti. Apakšnodaļu ietvaros, labākai rezultātu pārskatāmībai, tie apskatīti atsevišķi Burtņieka, Sedas un Trapenes līdzenumiem.

4.1. Iekšzemes kāpu izplatība un morfoloģija

Iekšzemes kāpu izplatība Ziemeļvidzemē ir saistāma ar teritorijām – Burtņieka, Sedas un Trapenes līdzenumiem, kuras pēdējā apledošanas deglaciācijas beigu posmā klāja piedēja baseini, un notika liela apjoma smilšainā materiāla akumulācija (skat. 4.1. att.).



4.1. attēls. Iekšzemes kāpu izplatība un izplatības saistība ar glaciolimniskajiem un purva nogulumiem Ziemeļvidzemē (izstrādājis autors, izmantojot Envirotech, 2004; Brangulis u.c., 2000; Juškevičs u.c., 2002) Ar melniem kvadrātiem norādīti attēlu pietuvinājumi: A – 4.2. att.; B – 4.4. att.; C – 4.7. att..

Starp minētājiem līdzenumiem kāpu izplatības īpatnības un morfoloģija ir atšķirīga. Spriežot pēc kāpu formas plāna skatījumā, pētījuma teritorijā galvenokārt ir izplatītas dažādas konfigurācijas paraboliskās kāpas. To veidošanos un attīstību ietekmējušas gan katra līdzenuma topogrāfijas un nogulumu īpašību īpatnības, gan liela mēroga klimatiskās izmaiņas un dominējošo paleovēju virzienu izmaiņas.

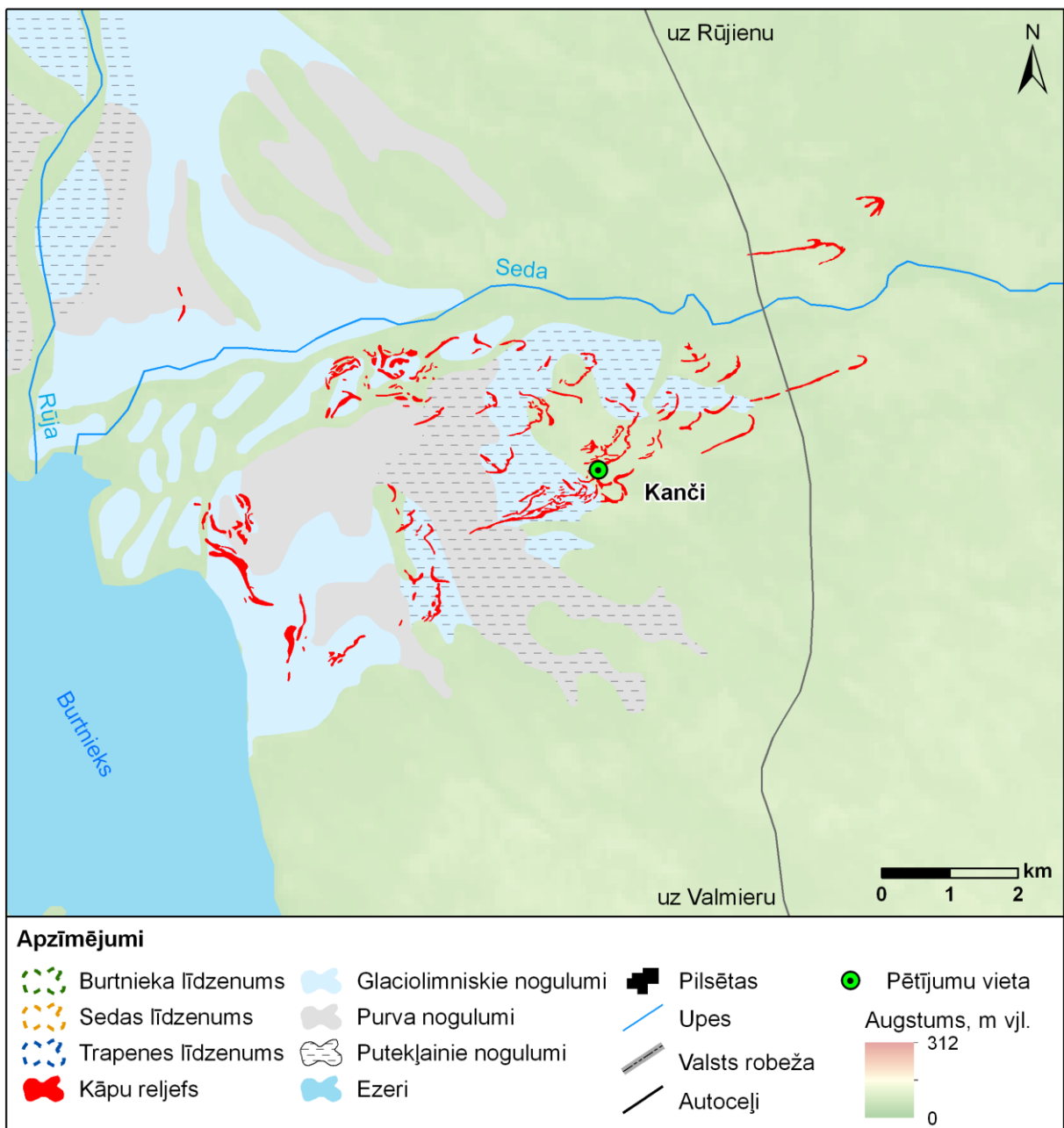
4.1.1. Burtnieka līdzenums

Iekšzemes kāpas Burtnieka līdzenumā izvietojušās nelielā joslā gar Sedas upes lejteces posmu (skat. 4.2. att.). To veidošanos var saistīt ar Burtnieka paleoezera gultnē un Sedas deltā nogulsneto smilšaino glaciolimnisko un glaciofluviālo nogulumu pārstrādāšanu eolajos procesos (Brangulis u.c., 2000).

Eolie nogulumi plānas segsmilts veidā sastopami arī citviet Burtnieka paleoezera klātajā teritorijā, kur tās pārklāj vecākas reljefa formas. Kāpu ierobežoto izplatību var skaidrot arī ar smilšaino nogulumu nelielo izplatības areālu Burtnieka paleoezera klātajā teritorijā (Brangulis u.c., 2000).

Kāpu pamatņu augstumi mainās no 40 m vjl. Burtnieka ezera tuvumā līdz 62 m vjl. Kanču apkārtnē un tālāk samazinās austrumu virzienā. Kāpu relatīvais augstums atsevišķām kāpām sasniedz 6,6 m, bet vidēji tas ir nedaudz zem 2 m. Kāpu relatīvais augstums palielinās Kanču apkārtnē, kur ir arī lielākā kāpu koncentrācija. Kopumā kāpu skaits līdzenumā ir salīdzinoši neliels. Pētījuma gaitā tika identificētas 149 individuālas kāpu formas.

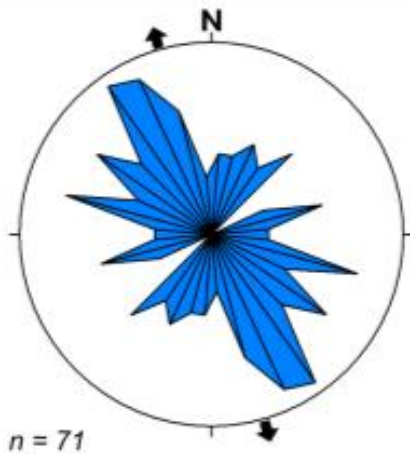
Lai arī kāpu skaits ir neliels, balstoties uz kāpu formu plāna skatījumā var izdalīt četras dažādas kāpu grupas (skat. 4.2. att.). Lielākā kāpu grupa novietota Kanču apkārtnē. Kāpas šeit atbilst āķveida parabolisko kāpu tipam. Āķveida kāpu garās astes veidojas kāpas centrālajai daļai lēnām virzoties uz priekšu pa vējam, kamēr zemāko un vēja iedarbībai mazāk pakļauto astes daļu pārņem veģetācija un aizsargā no pārpūšanas (Easterbrook, 1999). Ņemot to vērā, Burtnieka līdzenumā esošās āķveida kāpu garās astes liecina par vairākus kilometru garu kāpu migrāciju austrumu ziemeļaustrumu virzienā, kuras laikā tās ir uzgūlušas citām, vecākām reljefa formām. Vietumis šīs āķveida paraboliskās kāpas ir arī migrējušas lejup pa drumlinu nogāzēm. Āķveida formas apveids pastiprinās virzienā uz austrumu dienvidaustrumiem, liecinot, šajā virzienā samazinājās vēja transportam pieejamo nogulumu daudzums.



4.2. attēls. Iekšzemes kāpas Burtņieka līdzenumā (izstrādājis autors, izmantojot Envirotech, 2004; Brangulis u.c., 2000) Teritorijas novietojumu var redzēt 4.1. A attēlā.

Kāpu grupai Sedas upes ielejā ir raksturīga haotiska kāpu forma, kas, iespējams, ir mainīta vēlāku fluviālo procesu ietekmē. Par ko liecina, tas, ka kāpas šeit ir izvietojušās uz zemes virsmas pacēlumiem starp Sedas upes attekām. Šo kāpu attīstību, iespējams, var saistīt ar Sedas deltas veidošanās procesiem un ezera līmeņa izmaiņām. Atsevišķas garenas kāpas ar vāji izteiktām izpūšanas pazīmēm sastopamas 3 km uz rietumiem no Kančiem.

Bet ceturrtā kāpu grupa novietojusies netālu no tagadējās Burtņieka ezera krasta līnijas, un ,iespējams, veidojušās kādā no senākām Burtņieka ezera stadijām kā piekrastes valnis.



4.3. attēls. Burtnieka līdzenuma iekšzemes kāpu garenasu perpendikuli

Melna bulta norāda rezultējošos virzienus. Burts *n* norāda mērījumu skaitu.

Tomēr, jāatzīst, ka šo reljefa formu piederību kāpām ir nepieciešams pārbaudīt laukā, lai varētu izdarīt pārlicinošus secinājumus.

Kāpu garenasu perpendikulu mērījumi tika veikti 71 kāpai. Mērījumu rezultējošais virziens norāda uz iespējamo paleovēju virzienu no ZZR vai DDA (skat. 4.3. att.). Pēc rozēs diagrammas formas ir iespējams izšķirt arī citus sekundārus paleovēju virzienus, kas, iespējams, atspoguļo lokālās vēja plūsmas īpatnības gaisa piezemes slānī. Iegūtie kāpu garenasu perpendikulu mērījumu rezultāti nesakrīt ar Kanču apkārtnē esošo āķveida parabolisko kāpu pārpūšanas virzienu. Šādu nesakrītību var skaidrot ar kāpu garenasu perpendikulu noteikšanas īpatnībām

paraboliskajām un citām nesimetriskām formām. (skat 5. nodaļu un Celiņš un Nartišs, 2011) un nelielo mērījumu skaitu.

4.1.2. Sedas līdzenums

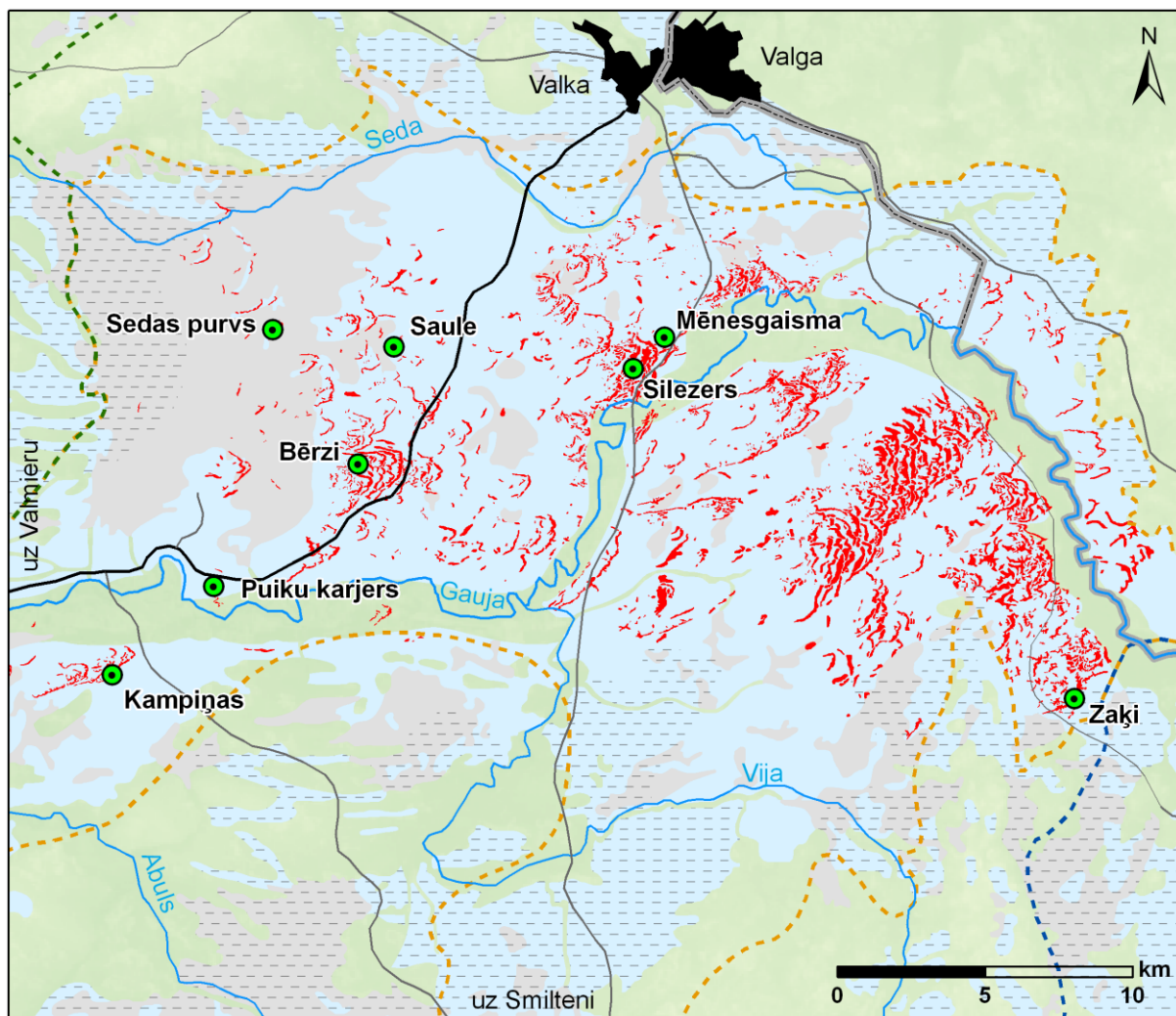
Iekšzemes kāpas Sedas līdzenumā ir novietojušās salīdzinoši vienmērīgi un sastopamas praktiski visā līdzenuma teritorijā, izņemot perifēro dienvidu daļu. Kāpu izplatība sakrīt ar smilšaino glaciolimnisko nogulumu izplatības areālu, kas parādīts Latvijas kvartāra virsas nogulumu kartē (Brangulis u.c. 2002). Atsevišķu nelielu kāpu veidošanos var saistīt arī ar Gaujas ielejas attīstību un smilšaino aluviālo nogulumu pārpūšanu. Par to liecinu pētījumu vietā *Puiku karjers*, zem plānas eolo nogulumu segas esošie granšainie aluviālie nogulumi, savukārt *Bērzu* apkārtnē, starpkāpu ielejās atsedzas vidēja lieluma laukakmeņi.

Kāpu koncentrācija palielinās līdzenuma vidienē un virzienā uz austrumiem, kur tās grupējas lielās grupās (skat. 4.4. att.). Kā nozīmīgs šķērslis kāpu izplatībai jāmin Gaujas ieleja. Par to liecina vairāku kāpu masīvu novietošanās Gaujas ielejas malā, savukārt, uz austrumiem no Gaujas ielejas, kāpu skaits būtiski samazinās.

Kāpu pamatņu augstums mainās no 44 m vjl. līdzenuma rietumu daļā līdz 85 m vjl. līdzenuma austrumu daļā. Vidējais kāpu relatīvais augstums ir aptuveni 4 m, individuālām kāpām tas parasti nepārsniedz 5 m, bet kāpu relatīvais augstums pieaug kāpu grupās, kur tas var sasniegt pat 23 m. Sedas līdzenumā kopumā ir novērojama sakarība, ka kāpu relatīvie augstumi pieaug virzienā no rietumiem uz austrumiem.

Kāpu skaits Sedas līdzenumā ir ievērojams – pētījumu gaitā tika identificētas 2099 individuālas kāpu formas.

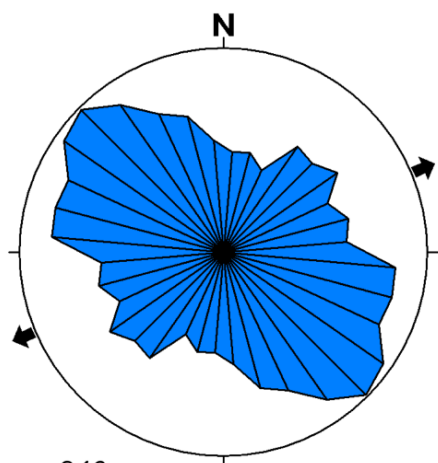
Balstoties uz šo kāpu formu plāna skatījumā, Sedas līdzenumā var izdalīt vairākus parabolisko kāpu tipus – klasiska parabola, āķveida parabola un ķemmes veida parabola.



4.4. attēls. Iekšzemes kāpas Sedas līdzenumā (izstrādājis autors, izmantojot Brangulis u.c., 2000; Juškevičs u.c., 2002)
Apzīmējumus skatīt 4.2. attēlā. Teritorijas novietojumu var redzēt 4.1. B attēlā.

Klasiskas, vienkāršas parabolveida kāpas sastopamas līdzenuma hipsometriski zemākajās vietās un līdzenuma vidienē, kur tās neveido lielas kāpu grupas un ir novietojušās izklaidus. Šādas klasiskas paraboliskās kāpas liecina par salīdzinoši vienkāršu kāpu veidošanās procesu, nelielu migrācijas attālumu un apīmšanu veģetācijas ietekmē.

Āķveida paraboliskās kāpas sastopamas līdzenuma rietumu daļā – Kampiņu apkārtnē un līdzenuma vidus daļā uz dienvidrietumiem no Silezera (skat. 4.4. att.). Šo kāpu relatīvie augstumi ir salīdzinoši zemi un parasti nepārsniedz 10 m. Kāpu astes ir līdz 10 km garas un vērstas DR-ZA virzienā, liecinot par tālu kāpu migrāciju ZA virzienā. Āķveida paraboliskās kāpas liecina par attīstītu veģetāciju un nabadzīgiem smilts pienses apstākļiem to veidošanās laikā, ko, iespējams, veicināja atrašanās „aizvējā” aiz Gaujas ielejas.



$n = 846$

4.5. attēls. Sedas līdzenuma iekšzemes kāpu garenasu perpendikuli

Melna bulta norāda rezultējošos virzienus. Burts n norāda mērījumu skaitu.

Līdzenuma austrumu daļā sastopamas ļoti augstas kāpu grēdas ar maz izteiktu parabolas formu. Tās raksturīgas ar vairāku parabolisko kāpu saplūšanas pēdām, veidojot garas parabolisko kāpu virknes. Šīm kāpām raksturīgi arī lieli relatīvie augstumi. Kāpu saplūšana un lieli relatīvie augstumi liecina, ka ir notikusi ļoti aktīva kāpu migrācija un liels vēja transportam pieejamais smilts materiāla daudzums, savukārt, neizteiktā paraboliskā forma liecina par salīdzinoši nelielu veģetācijas ietekmi kāpu migrācijas laikā vai ļoti nelielu migrācijas attālumu. Iespējams, ka šīs kāpas savas attīstības sākumstadijā ir bijušas šķērskāpas un tikai kāpu stabilizācijas laikā sākušas ieņemt parabolisku formu.

Izklaudus pētāmajā teritorijā, it īpaši tā perifērajā daļā, sastopamas arī nelielas paugurveida kāpas ar haotisku, nereti nenosakāmu orientāciju.

Kāpu garenasu perpendikulu mērījumi veikti 846 kāpām. Rezultējošais mērījumu virziens vērsts uz RDR-AZA (skat. 4.5. att.), kas, ņemot vērā pētījumu teritorijā novietoto parabolisko kāpu formu un vērsumu, liecina par paleovēju virzienu no RDR.

4.1.3. Trapenes līdzenums

Iekšzemes kāpu izplatība Trapenes līdzenumā ir nevienmērīga, kāpas koncentrējas atsevišķās līdzenuma vietās. Kāpu izplatība ir tieši saistāma ar smilšaino glaciolimnisko un glaciofluviālo nogulumu izplatību (skat. 4.7. att.), savukārt līdzenuma daļā, kur kvartāra nogulumu segu veido putekļaini glaciolimniskie nogulumu (Juškevics u.c., 2002), kāpu reljefs praktiski nav sastopams un vecākus nogulumus mēdz klāt līdz pat 1 m biezs segsmilts slānis (skat. 4.6. att.).



4.6. attēls. Segsmilts pētījumu vietā *Mielupīte*

Kāpu koncentrācija palielinās Gaujas labajā krastā starp Virešiem un Lejasciemu, Gaujas un Mustjegi upstarpē un uz Z no Zeltiņiem, kur tās grupējas lielākās kāpu grupās. Individuālas kāpas sastopamas līdzenuma rietumu daļā un Gaujienas apkārtnē.

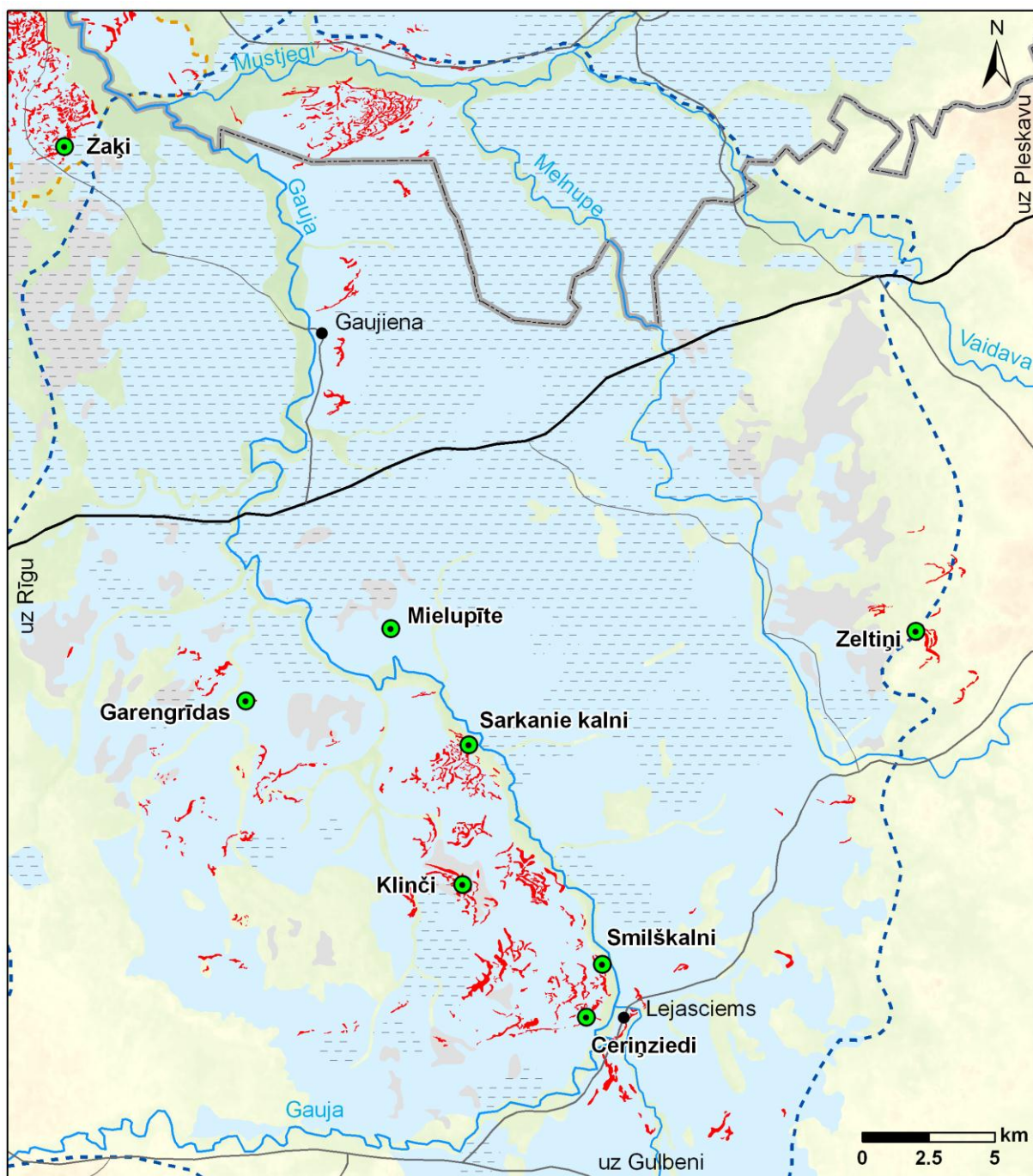
Kāpu pamatnes augstumi mainās no 65 m vjl. līdzenuma Igaunijas daļā, un pakāpeniski pieaug virzienā uz dienvidiem, sasniedzot 110 m augstumu Lejasciema apkārtnē. Visaugstāk kāpas ir novietotas Zeltiņu apkārtnē, kur to pamatņu augstumi ir pat 125 m vjl. Vidējais kāpu relatīvais augstums Trapenes līdzenumā ir 4,1 m, bet lielākajos kāpu masīvos relatīvie augstumi mēdz sasniegt pat 10 un vairāk metrus, savukārt maksimālie kāpu augstumi ir kāpu

masīvā pie Zeltiņiem, kur tās sasniedz 16,6 m augstumu. Pētījuma laikā Trapenes līdzenumā tika identificētas 536 individuālas kāpu formas.

Balstoties uz šo kāpu formu plāna skatījumā, Trapenes līdzenumā esošās kāpas, līdzīgi kā Sedas līdzenumā, ir pieskaitāmas pie parabolisko kāpu tipa.

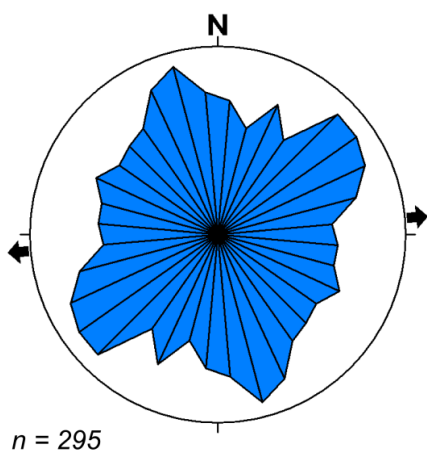
Izteikts āķveida parabolisko kāpu masīvs izvietojies Gaujas un Mustjegi upstarpē (skat. 4.7 att.). Kāpām šajā masīvā ir raksturīga āķveida paraboliskā forma un tās pārvietošanās procesā ir apvienojušās ar citām kāpām. Šis āķveida parabolisko kāpu masīvs būtiski atšķiras no citiem pētījumu teritorijā. Tam ir lielāks kāpu relatīvais augstums un kāpu astes veido masīva dienvidu un ziemeļu daļu, kuras sašaurinās austrumu virzienā aptuveni 40 grādu leņķī, līdz pilnībā izķīlējās.

Kāpu masīviem, kuri novietojušies starp Sarkanajiem kalniem un Lejasciemu (skat. 4.7. att.), ir raksturīgas ļoti garas kāpu grēdas, kuras veidojušās apvienojoties vairākām paraboliskām kāpām. Garākās kāpu grēdas novietojušās Gaujas ielejas malā, sasniedzot pat 3 km garumu. Ievērojamo kāpu grēdu garumu, visticamāk, veicināja kāpas novietošanās Gaujas ielejas malā, kas kalpoja kā nozīmīgs šķērslis turpmākai kāpu migrācijai austrumu virzienā. Šo hipotēzi apstiprina arī līdz 25° stāvas aizvēja nogāzes, kuras vērstas pret Gaujas upi un varētu liecināt par kāpas pamatnes noskalošanu fluviālos procesos.



4.7. attēls. Iekšzemes kāpas Sedas līdzenumā (izstrādājis autors, izmantojot Brangulis u.c., 2000; Juškevičs u.c., 2002)
 Apzīmējumus skatīt 4.2. attēlā. Teritorijas novietojumu var redzēt 4.1. C attēlā.

Zeltiņu apkārtnē esošajām kāpām ir labi izteikta paraboliskā forma un atsevišķas kāpas sasniedz ievērojamu relatīvo augstumu, liecinot par lielu vēja transportam pieejām materiāla daudzumu. Kāpām šeit raksturīga grupēšanās nelielās kāpu grupās, kur tās nereti ir daļēji savienājušās. Svarīgi, ka Zeltiņu apkārtnē kvartāra virsmu veido glaciofluviālie nogulumu un visticamāk tie arī kalpojuši par izejmateriālu kāpu veidošanā.



4.8. attēls. Trapenes līdzenuma iekšzemes kāpu garenasu perpendikuli

Melna bulta norāda rezultējošos virzienus. Burts *n* norāda mērījumu skaitu.

Līdzenuma rietumu daļā esošās individuālās kāpas atšķiras no pārējā līdzenumā esošajām kāpām. Šīs kāpas negrupējas kāpu masīvos un ir salīdzinoši zemas, parasti nepārsniedzot 5 m relatīvo augstumu. Arī kāpu novietojums ir vairāk haotisks kā citviet līdzenumā. Kāpu forma liecina par diviem iespējamajiem paleovēju virzieniem šo kāpu stabilizācijas laikā – no R uz A un no ZR uz DA – liecinot par iespējamu veidošanos dažādos laika periodos.

Kāpu garenasu perpendikulu mērījumi tika veikti 295 kāpām. Iegūtie rezultāti norāda uz diviem garenasu perpendikulu virzieniem. Viens ir vērsts ZZR – DDA

un otrs DZ – ZR virzienā. Rezultējošais perpendikulu virziens ir vērsts R – A virzienā (skat. 4.8. att.). Kas, ņemot vērā arī kāpu izliekuma virzienu, ļauj izdarīt secinājumu par kāpu veidošanās laikā valdošo paleovēju virzienu no RDR.

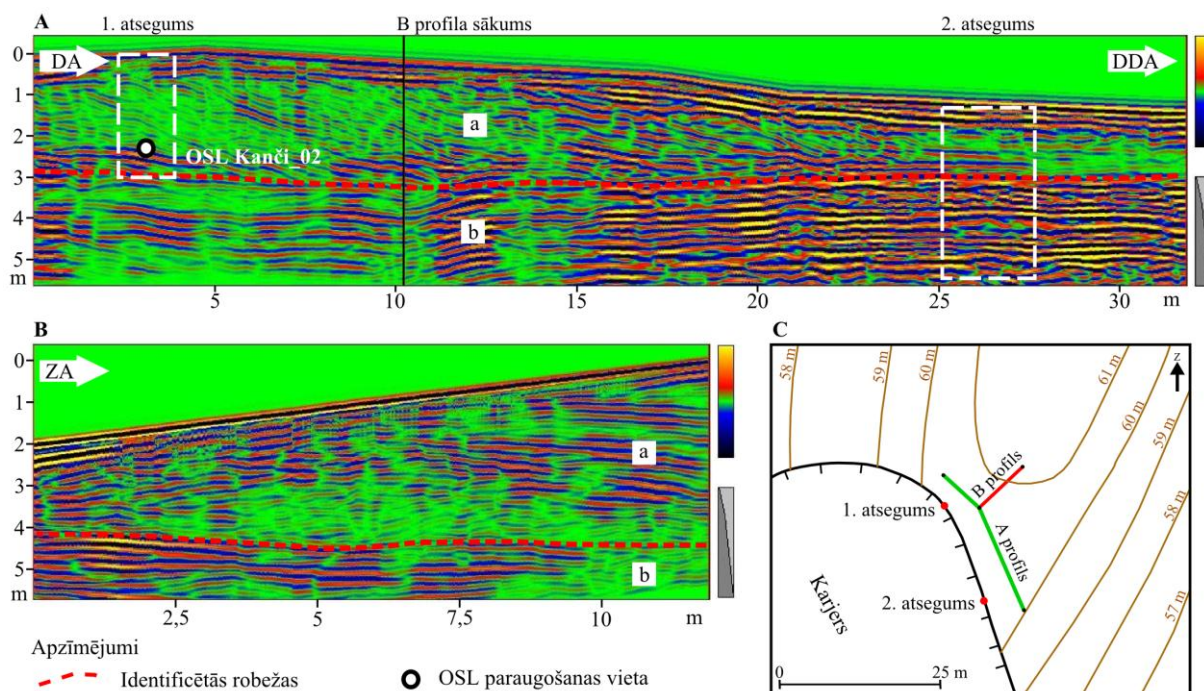
4.2. Kāpu iekšējā uzbūve

Pētījuma gaitā izmantotās pētījumu metodes deva daudzskaitlīgus un detalizētus datus par pētījuma teritorijā esošo kāpu iekšējo uzbūvi. Turpmākajās apakšnodalās apskatīti katrā līdzenumā veiktie slāņu saguluma veidojošo elementu mērījumu rezultāti, raksturojošākie radiolokācijas profili un iekšējās uzbūves elementi.

4.2.1. Burtnieka līdzenums

Burtnieka līdzenumā radiolokācijas profilēšana veikta pētījumu vietā Kanči. Radiolokācijas profili tika ierakstīti paralēli karjera atseguma sienai un perpendikulāri pirmajam profilam (skat. 4.9. C att.).

Izmantojot 500 Mhz antenu sistēmu, izdevās iegūt informāciju par kāpas iekšējo uzbūvi līdz 5 m dziļumam. Iegūto signālu identificēšanai un slīpslāņojumu mērījumu veikšanai tika izveidoti divi atsegumi (skat. 4.9. A, C att. un 1. pielikumu). Veicot iegūto signālu identificēšanu, tika atpazītas vairākas ģeoloģiskās robežas. Radiolokācijas profilos tika identificēta kāpas pamatne *b*, kāpas augšējā daļa *a* un robeža starp šīm divām slāņkopām. (skat. 4.9. A, B att. un 1. pielikumu).



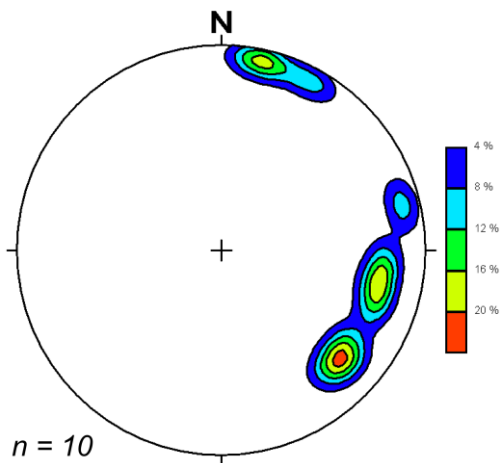
4.9. attēls. Kāpas iekšējā uzbūve pētījumu vietā Kančī

A un B – iegūtie radiolokācijas profili, izmantojot 500 Mhz antenu sistēmu. Ar baltu raustītu līniju norādīts 1. un 2. atseguma novietojums (skat. 1. pielikumu). Burti *a* un *b* norāda identificētos signālus. C – profilu novietojumu shēma (izstrādājis autors, izmantojot TOPO10K). Brūnā krāsā norādītas izolīnijas, melnās krāsas līnija norāda karjera sieni. Sarkanie punkti norāda atsegumu novietojumu (skat. 1. pielikumu).

Slāņkopa *b* raksturojas ar subhorizontālu slāņu sagulumu abos iegūtajos profilos. Atsegumos iegūtā informācija liecina ka šos slāņu veido smalki smilts nogulumi ar grūti izšķiramu slāņojumu, kas virzienā uz leju kļūst grūtāk izšķirams. Svarīgi, ka kāpas apakšējā daļā esošie slāņi ir ļoti bagāti ar vizlu, kas norāda uz to iespējamo veidošanos sekla baseina apstākļos.

Robeža starp *a* un *b* slāņkopām ir ļoti izteikta un ir izšķirama gan radiolokācijas profilos(skat. 4.9. A, B att.), gan izveidotajos atsegumos (skat. 1. pielikums). Satiekoties *a* un *b* slāņkopām veidojas leņķiskā diskordance.

Profila augšējā daļā identificēto slāņkopu *a* veido stāvs eolajiem nogulumiem raksturīgs slīpslāņojums. Balstoties uz šo slāņu krituma leņķi, var izdarīt secinājumus, ka tie ir veidojušies kāpas aizvēja nogāzes apstākļos. Šo slāņu krituma virziens, ņemot vērā abu profilu informāciju, ir vērsts DA virzienā. Balstoties uz šo informāciju, var spriest, ka šo slāņu veidošanās laikā kāpa ir pārvietojusies DA virzienā.



4.10. attēls. Burtnieka līdzenumā veikto slīpslāņojumu mērījumu rezultāti. Burts *n* norāda mērījumu skaitu.

Slāņu sagulumu veidojošo elementu mērījumi tika veikti *a* slāņkopā un *b* slāņkopas augšējā daļā. Mērījumu rezultāti slīpi slāņotajā slāņkopā norāda uz vidēji 22° kritumu un 117° azimutu, kas apstiprina ar radiolokācijas metodi iegūto slāņu krituma DA virzienā. Kāpas pamatnes augšējā daļā veiktie mērījumi liecina par 8° kritumu un 32° azimutu. Pamatnes apakšējā daļā mērījumi netika veikti, jo nebija iespējams izšķirt slāņojumu.

Apvienojot rezultātus izolīniju diagrammā, var redzēt, ka slīpslāņojuma mērījumu rezultāti ir salīdzinoši viendabīgi un krīt DA, ADA virzienā

(skat. 4.10. att.). Liecinot par paleovēju virzienu no ZR, RZR. Kopumā nogulumu veidojošo elementu mērījumu rezultāti apstiprina ar radiolokāciju iegūtos rezultātus par eolo nogulumu slāņu kritumu DA virzienā.

4.2.2. Sedas līdzenums

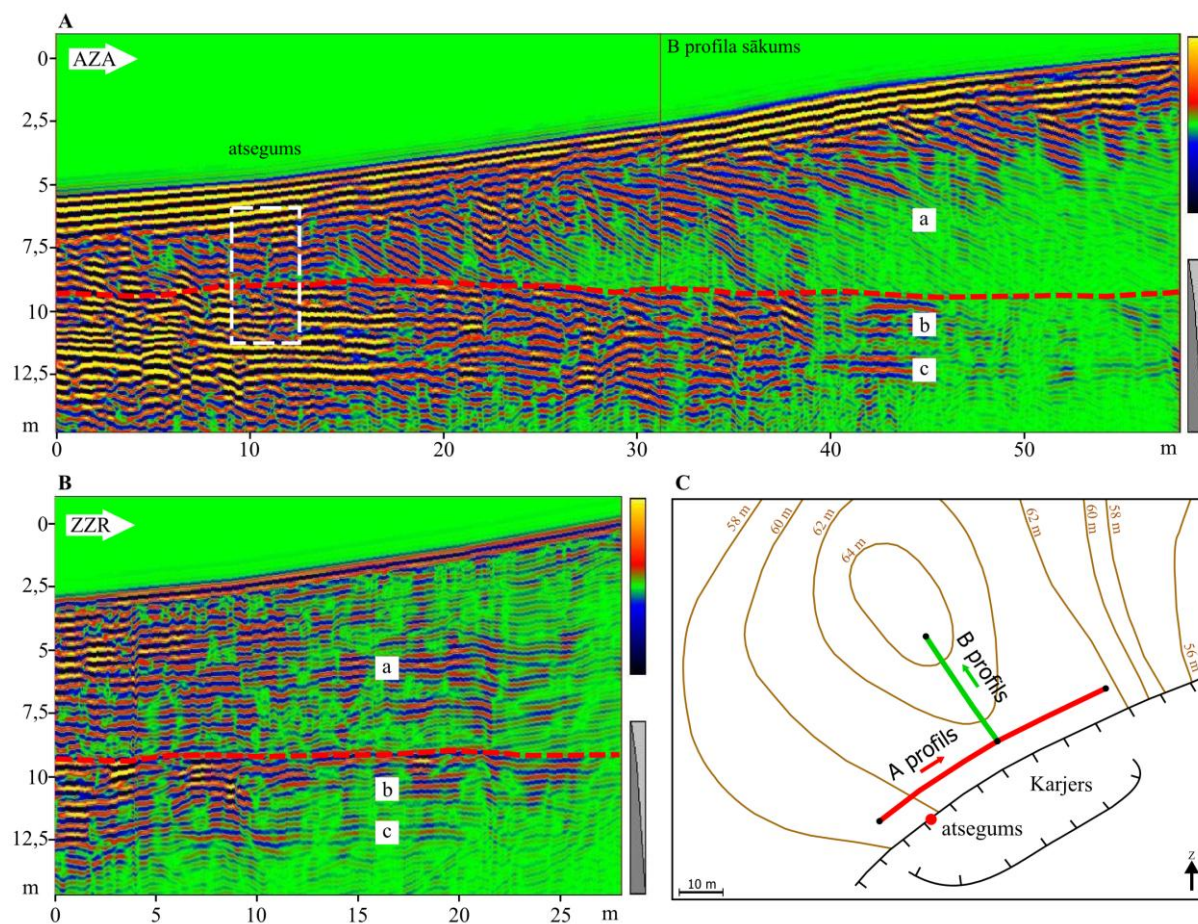
Sedas līdzenumā iekšējās uzbūves pētījumi tika veikti vairākās pētījumu vietās (skat. 3.1. att.). Apjomīgi radiolokācijas profilēšanas dati iegūti pētījumu vietās *Kampinas*, *Bērzi*, *Saule*, *Sedas purvs*, *Silezers* un *Zaķi*. Šajā apakšnodaļā tiks attēloti pētījumu teritoriju raksturojošākie radiolokācijas profili no pētījumu vietām *Silezers* un *Saule*.

Pētījumu vietā *Silezers*, izmantojot 300 Mhz antenu sistēmu, tika iegūti 2 radiolokācijas profili. Viens no radiolokācijas profiliem tika novietots paralēli karjera atseguma sienai, bet otrs paralēli kāpas garenasij un perpendikulāri pirmajam radiolokācijas profilam (skat. 4.11. C att.). Iegūtajos radiolokācijas profilos, izmantojot atsegumu informāciju (skat. 2. A pielikums) tika veikta signālu identificēšana. Balstoties uz identificētajiem signāliem, *Silezerā* iegūtajos radiolokācijas profilos ir iespējams izdalīt kāpas pamatni *b*, gruntsūdens līmeni *c* un eolajiem nogulumiem raksturīgo slīpslāņojumu *a*, kā arī ļoti izteiksmīgu robežu starp *a* un *b* slāņkopām (skat 4.11. A, B att.).

Eolo slīpslāņojumu veido aizvēja nogāzei raksturīgs slāņu kritums. Ņemot vērā, ka perpendikulāri iegūtajos radiolokācijas profilos šī slāņkopa attēlojas šķietami horizontāli, var secināt, ka slāņi krīt AZA virzienā un veidojušies RDR paleovēju virziena ietekmē. Eolo

slāņu sagulumā var novērot nelielas krituma leņķa izmaiņas, bet būtiskas sedimentācijas vides izmaiņas nav novērojamas.

Kāpas pamatni *b* ir iespējams identificēt visos *Silezerā* iegūtajos radiolokācijas profilos. Tā atsedzas zemes virspusē starpkāpu ieplakās un veido horizontālu virsmu zem kāpās ķermeņa ar ļoti izteiktu pāreju no subhorizontāla slāņojuma uz eolo slīpslāņojumu (2. A pielikumā). Kāpas pamatnes biezums ir vismaz 5 m, dziļāk esošos signālus nebija iespējams identificēt dēļ gruntsūdens līmeņa *c*.



4.11. attēls. Kāpas iekšējā uzbūve pētījumu vietā *Silezers*

A un B – iegūtie radiolokācijas profili, izmantojot 300 Mhz antenu sistēmu. Ar baltu raustītu līniju norādīts atseguma novietojums (skat. 2. A pielikumu). Burti *a*, *b* un *c* norāda identificētos signālus.

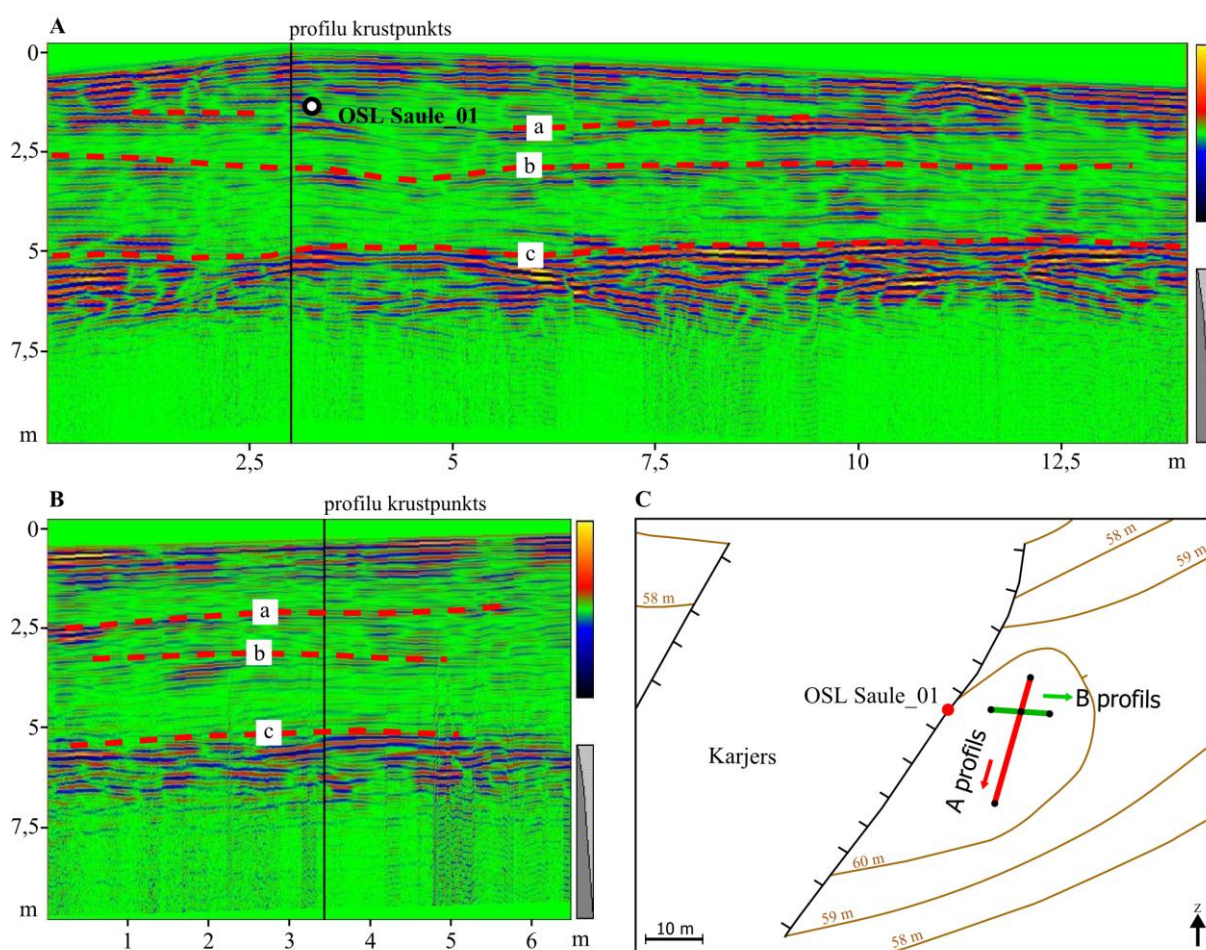
C – profilu novietojumu shēma (izstrādājis autors, izmantojot TOPO10K). Sarkanais punkts norāda atseguma novietojumu (skat. 2. A pielikumu).

Citus apzīmējumus skatīt 4.9. attēlā.

Karjera sienā veiktie slāņu saguluma veidojošo elementu mērījumi apstiprina ar radiolokācijas metodi iegūtos rezultātus. Kāpas pamatnē veiktie slāņu saguluma veidojošo elementu mērījumi norāda uz nelielu slāņu kritumu, kas nepārsniedz 2°-5°. Slāņu krituma virzieni ir dažādi, bet ir iespējams novērot tendenci ZA virzienā (skat. 4.13. A att.). Kāpas ķermenī veiktie mērījumi galvenokārt norāda uz slāņu krituma leņķi no 18° līdz 30°, retos

gadījumos sasniedzot pat 36° . Vidēji slāņu krituma azimuti vērsti AZA virzienā norādot par paleovēju virzienu no RDR kāpas stabilizācijas laikā (skat. 4.13. B att.). Lielais slāņu krituma leņķis liecina par ātriem sedimentācijas apstākļiem aizvēja nogāzē un eroziju uzvēja nogāzē.

Līdzīgi eolo nogulumu saguluma apstākļi, kā *Silezerā*, tika novēroti arī pētījuma vietās *Bērzi*, *Mēnesgaisma* un *Zaķi* (novietojumu skat. 3.1. un 4.4 attēlos) – šīs kāpas raksturojas ar lielu relatīvo augstumu un labi izteiktu kāpas profilu - lēzenu uzvēja nogāzi un stāvu aizvēja nogāzi. Kāpām ar nelielu relatīvo augstumu - *Kampiņu*, *Sedas purva* un *Saules* pētījumu vietās, eolo slāņu saguluma kritums ir lēzens un nepārsniedz 10° .



4.12. attēls. Kāpas iekšējā uzbūve pētījumu vietā Saule

A un B – iegūtie radiolokācijas profili, izmantojot 300 Mhz antenu sistēmu. Burti *a*, *b* un *c* norāda identificētos signālus.

C – profilu novietojumu shēma (izstrādājis autors, izmantojot TOPO10K). Sarkanais punkts norāda OSL parauga ņemšanas vietu (rezultātus skat. 4.1. tabulu).

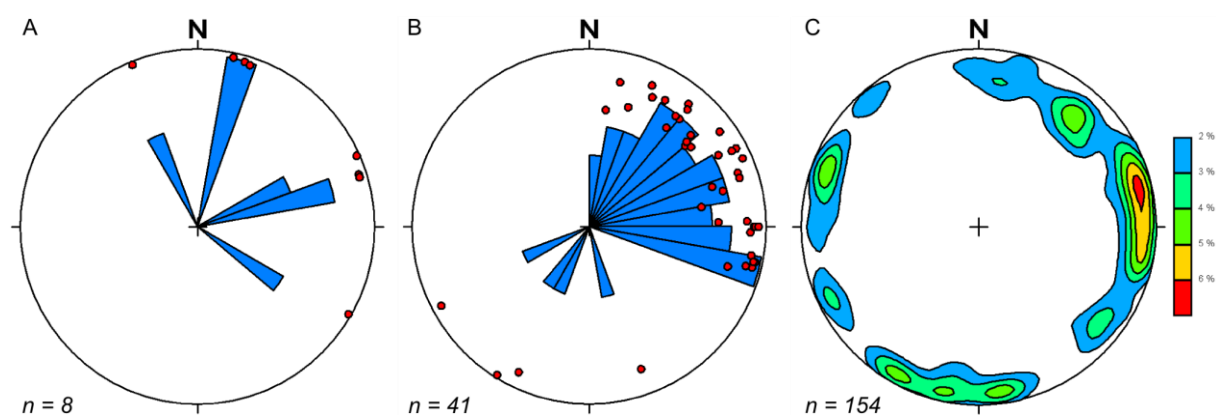
Citus apzīmējumus skatīt 4.9. attēlā.

Pētījumu vietā *Saule* tika ierakstīti divi savstarpēji perpendikulāri radiolokācijas profili (skat. 4.12. C att.). Identificējot iegūtos signālus tika atpazīts ļoti lēzens eolais slīpslāņojums ar atsevišķiem putekļainākiem smilts slāņiem (*a* un *b*), kuri ļoti labi atpazīstami radiolokācijas

profilos. Aptuveni 5 m dziļumā no kāpas virsotnes tika konstatēts gruntsūdens līmenis *c*, kas profilos iezīmē ļoti izteiktu robežu (skat. 4.12. A, B att.).

Slāņu saguluma mērījumi atsegumā B profila sākumā liecina par lēzenu slāņu kritumu (vidēji 8°) un krituma azimutu DR, DA un RDR virzienā, daļēji apstiprinot ar radiolokācijas metodi iegūtos rezultātus.

Daudzviet Sedas līdzenumā ir novērojama eolo nogulumu uzkrāšanās apstākļu maiņa. Pētījuma vietā *Silezers* šāda apstākļu maiņa novērojama kāpas pamatnē, kur no horizontāla slāņojuma slāņu sagulums mainās uz aizvēja nogāzei raksturīgu slāņojumu (skat. 2. A pielikumu). Iespējams tās raksturo arī divus atšķirīgus eolo nogulumu uzkrāšanās laika posmus. Aptuveni 300 m uz DR no *Silezera*, kāpas augšējā daļā var novērot, ka aizvēja nogāzei raksturīgais slāņu krituma leņķis mainās uz lēzeni paralēlu slāņojumu, kāpas virsmai paralēlu slāņojumu, iezīmējot izteiktu erozijas virsmu starp šīm eolajām slāņkopām (skat. 2. B pielikumu). Tas liecina par būtiskām izmaiņām kāpas attīstības gaitā, kad aktīva kāpu migrācija un eolo nogulumu erozija kāpu uzvēja nogāzē tiek nomainīta uz eolo nogulumu akumulāciju.



4.13. attēls. Sedas līdzenumā veikto slīpslāņojumu mērījumu rezultāti

A – *Silezera* kāpas pamatne (skat. 4.12. A, B att. un 2. A pielikumu).

B – *Silezera* kāpa (skat. 4. 12. A, B un 2. A pielikumu).

C – Visu Sedas līdzenumā veikto slīpslāņojumu mērījumu rezultātu izolīnu diagramma (mērījumu vietu novietojumu skat. 3.1., 4.4. attēlos un Celiņš, 2010)

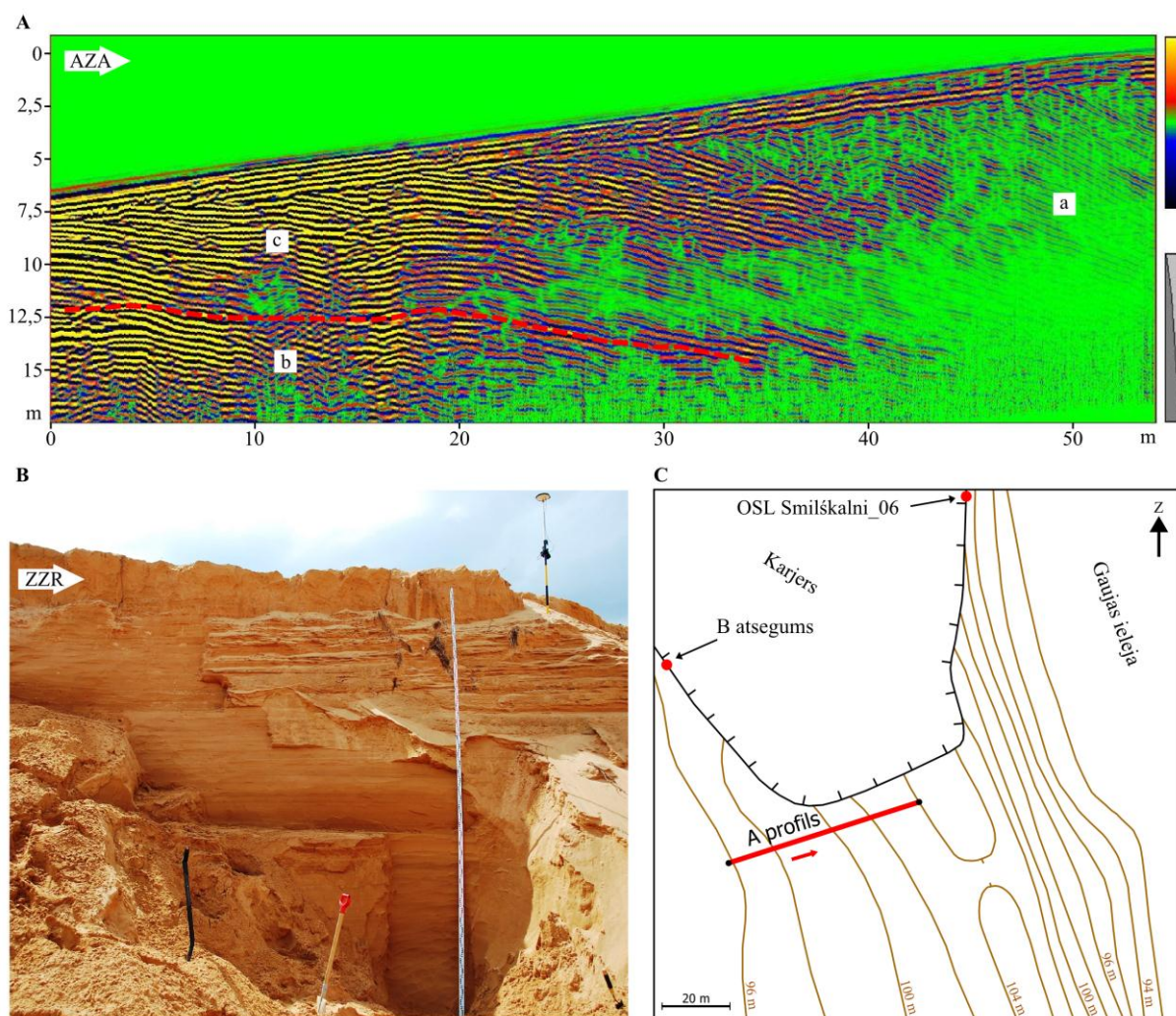
Burts *n* norāda mērījumu skaitu.

Apkopojot visus Sedas līdzenumā veiktos slāņu sagulumu veidojošo elementu mērījumus, redzams izteikts A virziens, tāpat ir iespējams novērot arī sekundārus, mazāk izteiktus, virzienus ZA, D un RZR virzienā (skat. 4.13. C att.). Iegūtie rezultāti liecina par dominējošo paleovēja virzienu no R un RDR.

4.2.3. Trapenes līdzenums

Trapenes līdzenumā radiolokācijas pētījumi tika veikti pētījumu vietās *Smilškalni*, *Garengrīdas* un *Zeltiņi* (novietojumu skat. 3.1. un 4.7. att.).

Pētījuma vietā *Smilškalni* radiolokācijas profils tika ierakstīts perpendikulāri kāpas garenasij. Balstoties uz atseguma informāciju tika veikta iegūto signālu identifikācija.



4.14. attēls. Kāpas iekšējā uzbūve pētījumu vietā *Smilškalni*

A – iegūtais radiolokācijas profils, izmantojot 300 Mhz antenu sistēmu. Burti *a*, *b* un *c* norāda identificētos signālus.

B – atseguma siena, izveidota perpendikulāri radiolokācijas profilam. Novietojumu skat. C.

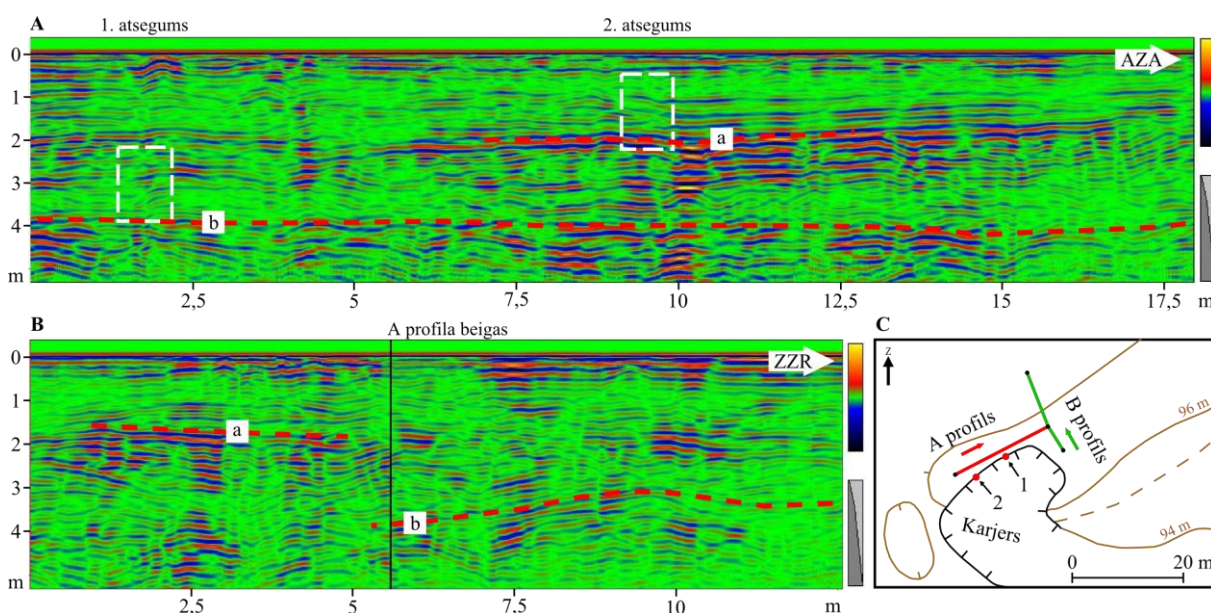
C – profilu novietojumu shēma (izstrādājis autors, izmantojot TOPO10K). Sarkanais punkts norāda atseguma novietojumu (skat. B). vai OSL parauga ņemšanas vietu (skat. 4.1. tabulu).

Citus apzīmējumus skatīt 4.9. attēlā.

Iegūtā radiolokācijas profilā augšdaļā izdevās identificēt eolo nogulumu saguluma īpatnības *a* un *c* (4.14. A). Slāņu krituma leņķis pārsniedz 12° , liecinot par to veidošanos aizvēja nogāzē. Slāņu krituma leņķis ir mainīgs un pakāpeniski pieaug no 15° līdz 25° ZA

virzienā, liecinot, ka līdz ar kāpas migrāciju ir notikusi arī kāpas augstuma palielināšanās. Kāpas pamatne ir grūti izšķirama kāpas DR daļā, aptuveni 7 m dziļumā un nav izšķirama ZA daļā, iespējams, identificētā kāpas pamatne ir gruntsūdens līmenis, jo nav iespējams noteikt izteiktu pāreju starp kāpas pamatni un eolo slīpslāņojumu, kā tas ir redzams pētījumu vietās Kanči un Silezers. Profilam perpendikulāri izveidotajā atseguma sienā (skat. 4.14. A att.) tiek novērots šķietami horizontāls slāņojums. Atsegumā veiktie slāņu saguluma veidojošo elementu mērījumu rezultāti ir ar nelielu izkliedi (skat. 4.16. A att.). Vidējais slāņu krituma leņķis ir 15° bet slāņu krituma azimuts vērsts ZA virzienā atbalstot ar radiolokācijas metodi iegūtos rezultātus par slāņu krituma virzienu.

Pētījumu vietā Garengrīdas tika veikti divi, viens otram perpendikulāri radiolokācijas profili. Signālu identificēšana notika, izmantojot informāciju no diviem karjera sienā izveidotiem atsegumiem.



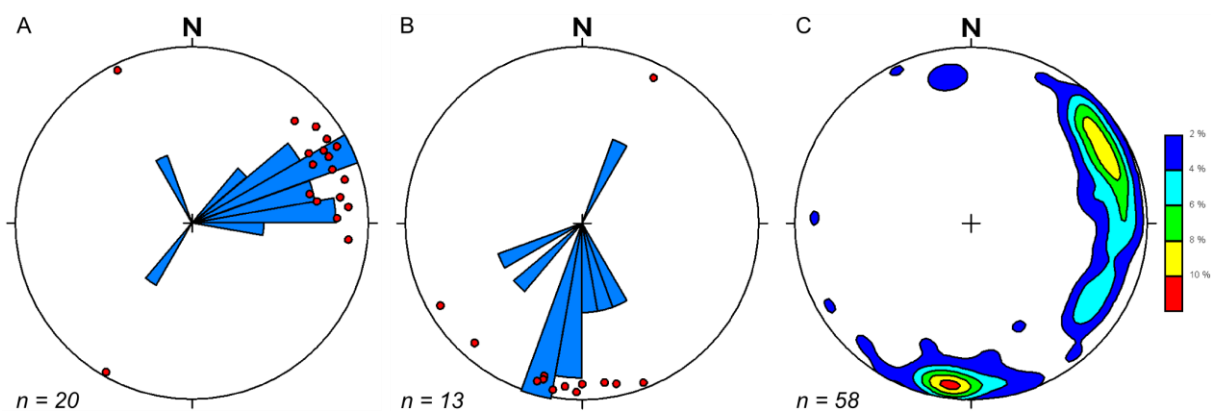
4.15. attēls. Kāpas iekšējā uzbūve pētījumu vietā Garengrīdas

A un B – iegūtie radiolokācijas profili, izmantojot 500 Mhz antenu sistēmu. Ar baltu raustītu līniju norādīts 1. un 2. atseguma novietojums (skat. 3. pielikumu). Burti *a* un *b* norāda identificētos signālus. C – profilu novietojumu shēma (izstrādājis autors, izmantojot TOPO10K). Sarkanie punkti norāda atsegumu novietojumu (skat. 3 pielikumu.).

Citus apzīmējumus skatīt 4.9. attēlā.

Pētījumu vietā Garengrīda iegūtajos radiolokācijas profilos tika identificēts subhorizontālu slāņu sagulums un gruntsūdens līmenis *b* aptuveni 4 m dziļumā (skat. 4.15. A, B att.). Kāpām raksturīgu slīpslāņotu sagulumu nav iespējams identificēt (skat. 3. pielikumu). Izteikta robeža *a*, kas identificēta 2 m dziļumā, balstoties uz atsegumu informāciju netika atpazīta, iespējams, tur uzkrājies mitrums virs kāda mālaināka slāņa. Atsegumos (skat. 3. Pielikumu) veiktie slāņu saguluma veidojošo elementu mērījumu rezultāti

norāda uz slāņu krituma leņķi vidēji 8° , bet slāņu krituma azimuts ir vērsts dienvidu virzienā (skat. 4.16. B att.). Pētījumu vietā *Zeltiņi* iegūtie radiolokācijas profilēšanas rezultāti ir līdzīgi tiem, kas iegūti pētījumu vietā *Garengrīdas*.



4.16. attēls. **Trapenes līdzenumā veikto slīpslāņojumu mērījumu rezultāti**

A – *Smilškalnu* kāpa (skat. 4.14. att.).

B – *Garengrīdas* kāpa (skat. 4.15. att.).

C – Visu Trapenes līdzenumā veikto slīpslāņojumu mērījumu rezultātu izolīniju diagramma (mērījumu vietu novietojumu skat. 3.1., 4.6. att.)

Burts *n* norāda mērījumu skaitu.

Apkopojot visus Trapenes līdzenumā veiktos slāņu saguluma veidojošo elementu mērījumu rezultātus, redzami divi atšķirīgi dominējoši krituma azimuta virzieni – ZR un D virzienā (skat. 4.16. C att.). Ņemot vērā šo mērījumu krituma leņķu vērtības piederību uzvēja vai aizvēja nogāzei, var pieņemt, ka paleovēja virziens ir bijis no R, DR, D.

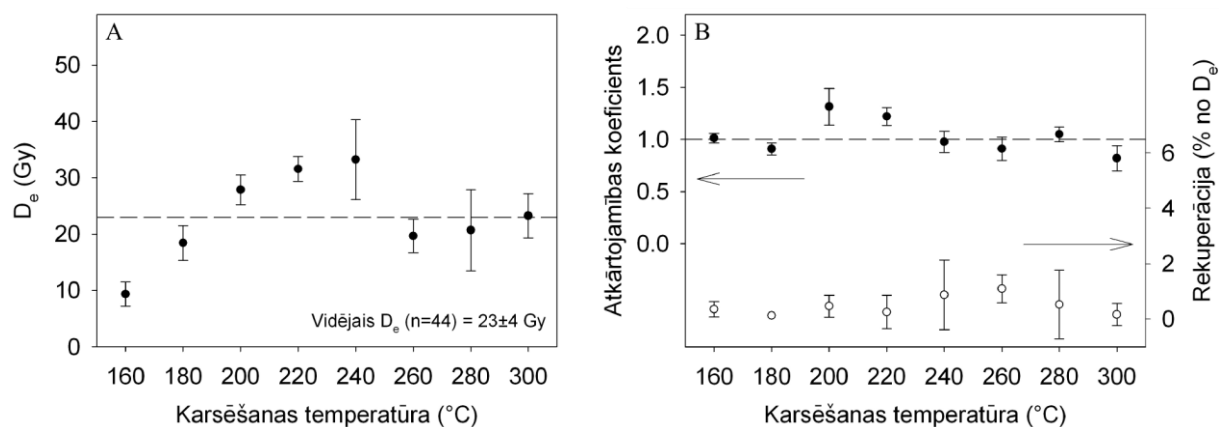
4.3. Optiski stimulētās luminescences datēšana

Smilts paraugu datēšana veikta, izmantojot OSL metodi un SAR protokolu, kas tika pielāgots balstoties uz analizēto paraugu luminescences īpašībām. Turpmākajās divās apakšnodaļās tiks apskatīti luminescences īpašību testu rezultāti un to ietekme uz ekvivalentās devas lieluma noteikšanu Ziemeļvidzemē ievāktajiem smilts paraugiem, kā arī noteiktie paraugu OSL vecumi.

4.3.1. Analizēto paraugu luminescences īpašības

Veikto testu laikā netika novērotas būtiskas luminescences īpašību atšķirības starp paraugiem no dažādām pētījuma teritorijas vietām.

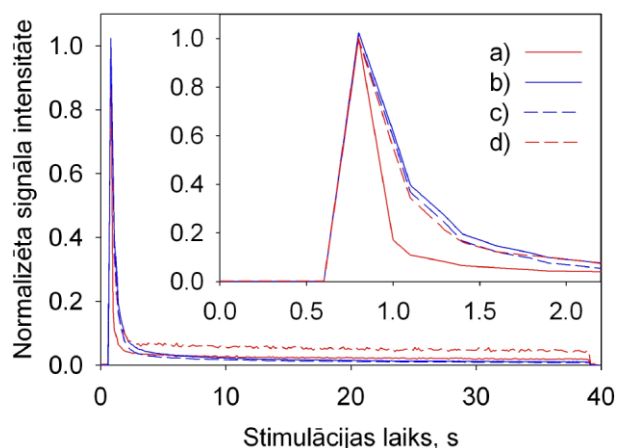
Karsēšanas testa rezultāti liecina, ka ekvivalentās devas lielums ir atkarīgs no parauga karsēšanas temperatūras. Ekvivalentās devas lielums pieaug līdz ar temperatūras palielināšanu līdz 240°C un piedzīvo strauju kritumu un stabilizāciju jeb karsēšanas plakni pie augstākām temperatūrām (skat. 4.17. A att.).



4.17. attēls. Karsēšanas plaknes tests

Ekvivalentās devas lielums atkarībā no karsēšanas temperatūras *Smilškalni_06* paraugam (A), attiecīgo mērījumu atkārtojamības koeficienti un rekuperācija pie dažādām karsēšanas temperatūrām (B).

Karsēšanas plaknes testa laikā iegūtie mērījumu atkārtojamības testa rezultāti ir pieļaujamo 10% robežās, karsējot paraugu 160 - 180°C un 260 - 300°C temperatūrās (skat. 4.17. B att.). Savukārt rekuperācijas rādītāji iekļaujas pieļaujamo 5% robežās pie visām pārbaudītajām karsēšanas temperatūrām. Balstoties uz šiem rezultātiem, var secināt, ka 260°C ir piemērotākā karsēšanas temperatūra Ziemeļvidzemē ievāktajiem paraugiem.



4.18. attēls. Luminiscences signāla samazināšanās kinētikas salīdzinājums starp paraugu *Smilškalni_06* un kalibrācijas kvarcu

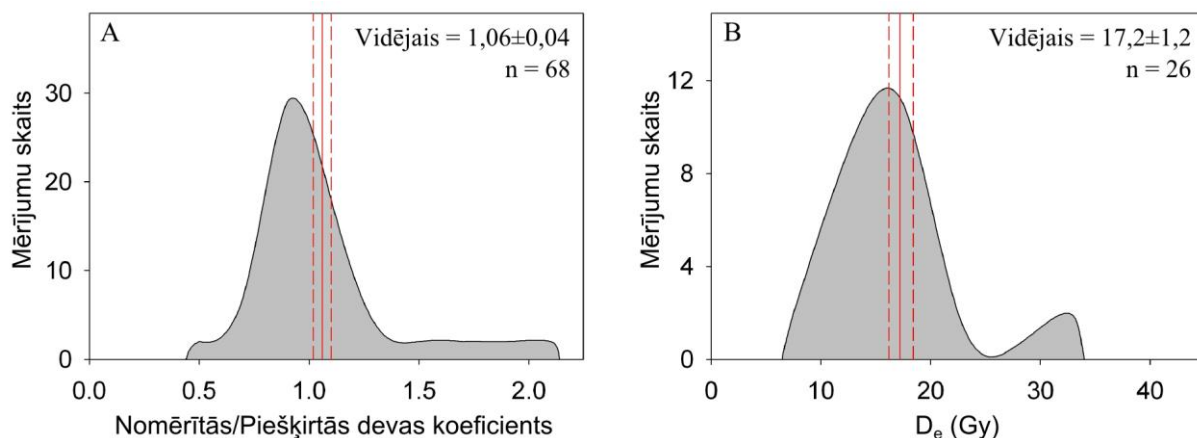
Paskaidrojumi: a) *Smilškalni_06* paraugs karsēts 160°C temperatūrā; b) kalibrācijas kvarcs karsēts 160°C; c) kalibrācijas kvarcs karsēts 260°C un d) *Smilškalni_06* paraugs karsēts 260°C.

Salīdzinot Ziemeļvidzemē ievāktu paraugu luminiscences signāla līkni ar kalibrācijas kvarca (ievākts no eolās kāpas Skāgenā, Dānijā) luminiscences signāla līkni, ir novērojams, ka pie zemākām karsēšanas temperatūrām Ziemeļvidzemē ievāktu paraugu luminiscences signāls ļoti strauji krītas līdz ar laiku (skat. 4.18. att.). Šāda ļoti ātra signāla samazināšanās tiek uzskatīta par nevēlamu (Jain et al., 2008), un tā veidojas, strauji atbrīvojoties nestabilam luminiscences signālam. Karsējot paraugu augstākā temperatūrā, signāla īpašības uzlabojas un sakrīt ar kalibrācijas kvarca īpašībām. Šie rezultāti

apstiprina karsēšanas plato testa rezultātus, ka luminiscences signāls kļūst stabils pie augstākām karsēšanas temperatūrām.

Ziemeļvidzemē ievāktajiem paraugiem pielāgotais SAR protokols tika pārbaudīts izmantojot devas atgūšanas testu. Tā rezultāti norāda uz zināmu mērījumu rezultātu izkliedi. Lai arī daļa mērījumu neiekļaujas pieļaujamo kļūdu robežās, vidējā mērījumu vērtība visiem testētajiem paraugiem ir pieļaujamo 10% kļūdas robežās (skat. 4.19. A att.). Ņemot vērā vidējo devas atgūšanas testa rezultātā, var secināt, ka Ziemeļvidzemes smilts paraugiem devu ir iespējams atgūt ar kļūdu 4%, kas ir pieļaujams un liecina, ka izmantotais SAR protokols ir piemērots attiecīgo paraugu datēšanai (Wintle and Murray, 2006).

Luminiscences signāla īpašības Ziemeļvidzemes paraugiem, pielietojot 3.4.3. apakšnodaļā aprakstīto SAR protokolu, raksturojas ar salīdzinoši zemu signāla intensitāti un ātru signāla intensitātes krituma komponenti signāla sākumposmā (skat. 4.19. A att.). Signāla ātrā komponente tika izmantota ekvivalentās devas noteikšanai. Signālam ir raksturīga arī lēnā komponente, kura nav derīga ekvivalentās devas noteikšanai, tāpēc tika noteikta kā fona traucējums turpmākajos aprēķinos (skat. 4.19. A att.).



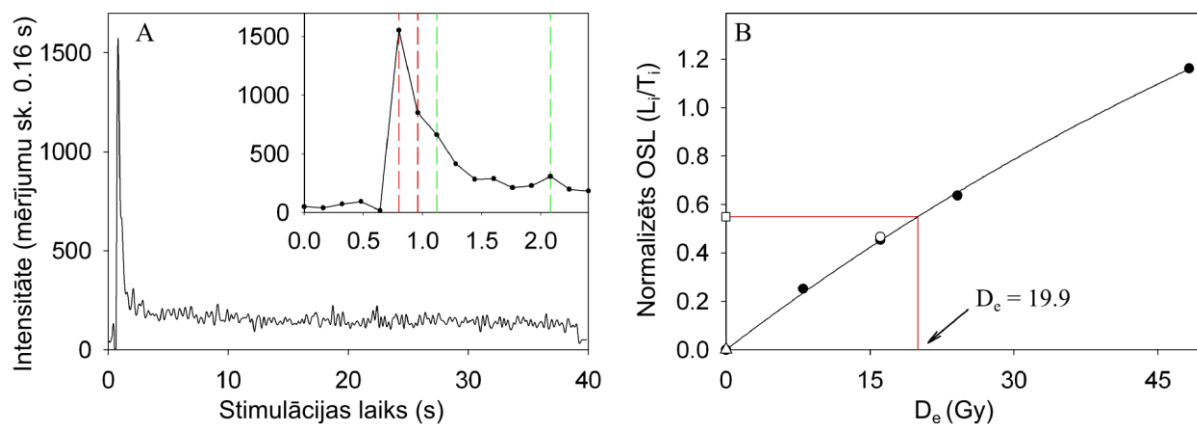
4.19. attēls. Devas atgūšanas testa un ekvivalentās devas (D_e) histogrammas

A – Devas atgūšanas testa histogramma. Tests veikts paraugiem *Smilškalni_06*, *Zaķi_02* un *Kanči_02*.

B – Parauga *Smilškalni_06* iegūto D_e histogramma.

Ar burtu n norādīts kopējais mērījumu skaits.

Reģenerēto devu punktus vairumā gadījumu bija iespējams interpolēt ar eksponenciālu līkni (skat. 4.20. att.). Vidēji visiem paraugiem noteiktā ekvivalentā deva svārstījās 15 līdz 30 Gy robežās un ļoti labi iekļāvās reģenerēto devu robežās. Rekuperācijas tests visos mērījumos iekļāvās 5% kļūdas robežās. Mērījumu atkārtojamības tests būtiski variē starp mērījumiem, daudzos gadījumos būtiski pārsniedzot pieļaujamo 10% robežu (skat. 4.21. A att.).



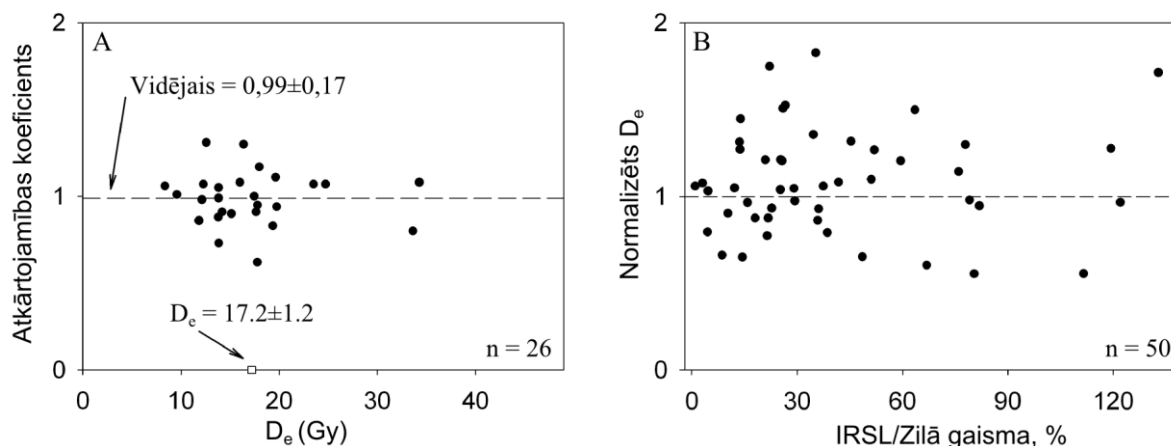
4.20. attēls. Optiski stimulētās luminiscences signāla raksturs un ekvivalentās devas noteikšana vienam no *Smilškalni_06* subparaugiem

A – OSL signāla samazināšanās kinētika. Ar sarkanām raustītām līnijām norādīta ātra signāla komponente, kas izmantota ekvivalentās devas aprēķināšanai, bet ar zaļām raustītām līnijām norādīta signāla lēnā komponente, kas tika pieņemta par fonu.

B – OSL augšanas līkne un attiecīgi noteiktais D_e .

Salīdzinot mērījumu atkārtojamības testu rezultātus viena parauga ietvaros, var novērot, ka vidējais atkārtojamības koeficients ir aptuveni 1. Salīdzinot atkārtojamības koeficientus ar attiecīgi nomērītajām ekvivalentajām devām, ir iespējams novērot lielu izkliedi, bet noteiktas likumsakarības starp mērījumu kvalitāti un nomērīto ekvivalento devu nav iespējams novērot

un var secināt, ka mērījumu atkārtojamības koeficienta vērtībām ir gadījuma raksturs (skat. 4.21. A att.) Ņemot vērā iepriekš minēto, tika pieņemts lēmums ekvivalentās devas noteikšanai izmantot arī tos mērījumus, kuriem atkārtojamības tests neiekļāvās pieļaujamajos 10%.



4.21. attēls. Mērījumu kvalitātes novērtēšana

A – Mērījumu atkārtojamības koeficients pret attiecīgo ekvivalento devu *Smilškalni_06* paraugam.

B – IRSL signāla lieluma ietekme uz D_e lielumu. Uz x ass atlikta IR un Zilās gaismas stimulēto luminiscences signālu attiecība, izteikta %, bet uz y ass pēc lielākās vērtības normalizēta, attiecīgi iegūtā, D_e . Ar burtu n norādīts kopējais mērījumu skaits.

Infrasarkanās gaismas stimulācijas laikā iegūtā luminiscences signāla (IRSL) attiecība pret zilās gaismas stimulācijas laikā iegūto vairumā gadījumu nepārsniedz 50%, tomēr atsevišķos gadījumos tas ir pat lielāks. Salīdzinot IRSL signāla daudzumu ar iegūto ekvivalento devu, nav iespējams novērot, ka ekvivalentās devas lielums būtu atkarīgs no IRSL signāla lieluma mērījumu laikā. Ņemot to vērā, var apgalvot, ka IRSL signāla ietekme uz rezultātu ir nebūtiska vai tās nav vispār.

Ekvivalentās devas izkliede analizētajiem paraugiem ir salīdzinoši liela, tomēr nav novērojami izteikti ārpus stāvoši mērījumu rezultāti. Parauga *Smilškalni_06* ekvivalentās devas izkliedi var novērtēt 4.19. B attēlā. Var redzēt, ka vidējā ekvivalentās devas vērtība, atbilst dominējošā pīķa virsotnei.

4.3.2. Optiski stimulētās luminiscences datēšanas rezultāti

Pētījuma laikā tika datēti 8 smilts paraugi. Burtnieka līdzenumā tika nodatēts viens smilts paraugs no aptuveni 6,5 m augstas āķveida paraboliskās kāpas pētījumu vietā *Kanči*. Paraugs tika paņemts dažus cm virs kāpas pamatnes (skat. 4.9. A, C att. un 1. Pielikumu). Datēšanas rezultāti liecina par šīs kāpas apakšējās daļas veidošanos pirms $10,9 \pm 0,8$ (paraugs *Kanči_02*; NLL-129138) tūkstošiem kalendāro gadu.

Sedas līdzenumā datēti divi smilts paraugi no pētījumu vietām *Saule* un *Zaķi*. Pētījumu vietā *Saule*, smilts paraugs tika paņemts 2,6 m dziļumā no 3,5 m augstas paraboliskās kāpas centrālās daļas (skat. 4.12 A, C att.). Datēšanas rezultāti norāda uz šīs kāpu stabilizāciju pirms $11,5 \pm 0,9$ (*Saule_01*; NLL-129101). Pētījumu vietā *Zaķi* (skat. 3.1. att.), smilts paraugs tika paņemts 2,7 m dziļumā no 11 m augstas paraboliskās kāpas augstākās daļas. Datēšanas rezultāti norāda uz šīs kāpu stabilizāciju pirms $9,3 \pm 0,7$ (*Zaķi_02*; NLL-129121) tūkstošiem kalendāro gadu.

4.1. tabula

Optiski stimulētās luminiscences datēšanas un dabiskās radiācijas mērījumu rezultāti

Paraugs	Lab. kods	Dziļums, m	²³⁸ U (Bq kg ⁻¹)	²²⁶ Ra (Bq kg ⁻¹)	²³² Th (Bq kg ⁻¹)	⁴⁰ K (Bq kg ⁻¹)	Devas koeficients (Gv gadā)	Ūdens saturs (%)	D _e (Gy)	Atkārtojamības koeficients	n	OSL vecums (tūkst. g.)
Burtnieka līdzenums												
<i>Kanči_02</i>	NLL-129138	2,3	6,0 ± 5,2	13,6 ± 0,4	13,7 ± 0,5	519 ± 11	2,07 ± 0,09	10 ± 4	22,6 ± 1,3	1,02 ± 0,4	28	10,9 ± 0,8
Sedas līdzenums												
<i>Saule_01</i>	NLL-129101	2,6	8,0 ± 4,2	10,3 ± 0,4	12,0 ± 0,4	428 ± 11	1,88 ± 0,09	3 ± 4	21,5 ± 1,3	1,15 ± 0,17	26	11,5 ± 0,9
<i>Zaķi_02</i>	NLL-129121	2,7	48,3 ± 7	41,0 ± 0,8	48,7 ± 0,8	573 ± 15	1,98 ± 0,09	7 ± 4	18,5 ± 0,9	1,01 ± 0,15	18	9,3 ± 0,7
Trapenes līdzenums												
<i>Smilškalni_06</i>	NLL-129119	2,2	44,6 ± 8	39,5 ± 0,8	48,4 ± 0,9	624 ± 14	1,53 ± 0,07	6 ± 4	17,2 ± 1,2	0,99 ± 0,17	26	11,2 ± 1
<i>Zeltiņi_02</i>	NLL-129124	1,5	39,2 ± 6,4	37,5 ± 0,6	49,2 ± 0,7	555 ± 12	1,78 ± 0,08	5 ± 4	18,1 ± 1	0,98 ± 0,07	24	10,2 ± 0,8
<i>Sarkanie kalni_01*</i>	Hel-TL04163	1,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12,2 ± 2,3
<i>Klinči_01*</i>	Hel-TL04157	1,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10,7 ± 1,9
<i>Ceriņziedi_01*</i>	Hel-TL04152	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5,5 - 14,5

* Paraugi datēti Somijas dabas vēstures muzeja datēšanas laboratorijā

Trapenes līdzenumā tika nodatēti pieci smilts paraugi no atšķirīgām līdzenuma vietām. Četri no tiem paņemti Lejasciema apkārtnē esošajos kāpu masīvos (skat. 4.7. att.) Pētījumu vietas *Smilškalni* un *Sarkanie kalni* novietojas Gaujas ielejas kreisajā malā, un to aizvēja nogāzes veido arī Gaujas ielejas krasta augstāko daļu. Pētījumu vieta *Smilškalni* ir 12 m augsta ķemmes veida kāpa, paraugs tika paņemts 2,2 m dziļumā no kāpas aizvēja nogāzes vidusdaļas. *Sarkanie kalni* ir 15 m augsta paraboliskā kāpa, paraugs tika paņemts 1,9 m dziļumā kāpas augstākajā daļā. Datēšanas rezultāti paraugiem no šīm kāpām norāda uz līdzīgu kāpu stabilizācijas laiku. Parauga *Smilškalni_06* vecums ir $11,2 \pm 1$ (NLL-129119), bet parauga *Sarkanie kalni_01* vecums ir $12,2 \pm 2,3$ tūkstoši kalendāro gadu (Hel-TL04163). Lejasciema kāpu masīva austrumu daļā, paņemtais smilts paraugs 1,9 m dziļumā no 10 m augstas paraboliskās kāpas augšējās daļas, liecina par šīs kāpas stabilizācijas laiku pirms $10,7 \pm 1,9$ (*Klinči_01*; Hel-TL04157) kalendāro gadu. Pētījumu vieta *Ceriņziedi* novietojas Lejasciema tuvumā, 2 km uz DR no pētījumu vietas *Smilškalni*. Šī paraboliskā kāpa ir 8 m augsta, un smilts paraugs tika paņemts kāpas dienvidu galā, 5 m dziļumā. Smilts paraugam no šīs kāpas, datēšanas procesa laikā, novēroja lielu ekvivalentās devas izkliedi, tāpēc bija

iespējams noteikt tikai iespējamo vecuma diapazonu 5,5-14,5 (Ceriņziedi_01; Hel-TL04152) tūkstoši kalendāro gadu. Trapenes līdzenumā austrumu malā, kāpu masīvā uz ziemeļiem no Zeltiņiem, smilts paraugs tika paņemts no 4 m augstas paraboliskās kāpas ziemeļu daļas, 1,5 m dziļumā. Noteiktais smilts parauga vecums ir $10,2 \pm 0,8$ (Zeltiņi_02; NLL-129124) tūkstoši kalendāro gadu.

Noteiktie smilts paraugu vecumi liecina, ka kāpu stabilizācija pētījumu teritorijā ir norisinājusies aptuveni vienā laikā un nav novērojama tendence, ka kādā no līdzenumiem kāpas būtu jaunākas vai vecākas. Iegūtie rezultāti liecina par kāpu stabilizāciju vēlā driasā, preboreāla un boreāla laikā. Visi Trapenes līdzenumā datētie smilts paraugi, kļūdas robežās, ir attiecināmi uz preboreālu laiku, norādot, ka kāpu aktivitātes laiks līdzenuma teritorijā esošajām kāpām ir bijis aptuveni līdzīgs.

5. DISKUSIJA

Izmantoto metožu novērtējums

Kāpu izplatību un morfoloģiskos parametrus šajā pētījumā noteica, izmantojot kartogrāfisko materiālu (skat. 3.2.1. nodaļu). Šāda metode ir plaši pielietota pasaulē, kad nav pieejami precīzāki tālizpētes materiāli (Anthonsen et al., 1996). Dažādu reljefa formu pētījumos ir jāreķinās ar noteiktu subjektivitātes līmeni pie datu digitizēšanas jeb vektorizēšanas (Hugenholtz, 2012). Šāda problēma pavisam noteikti ir aktuāla arī šajā pētījumā, un tā jāņem vērā, novērtējot rezultātu ticamības pakāpi. Pirmkārt, paša kartogrāfiskā materiāla izveidošanā var tikt novērota zināma subjektivitāte un neprecizitātes, salīdzinot ar dabā esošo situāciju, jo bieži vien tā laika lielmēroga kartogrāfiskais materiāla reljefs ir iegūts, izmantojot aerofoto stereopārus un nav pārbaudīts laukā. Otrkārt, vektorizējot reljefa formas no kartogrāfiskā vai jebkāda cita tālizpētes materiāla, subjektivitāte tiek pieļauta, nosakot reljefa formu robežas - to sākumu un beigas (Hugenholtz, 2012). Subjektivitātes līmenis var būt zems, vektorizējot vienkāršas, atsevišķas kāpas, bet gadījumos, kad vairākas kāpas ir apvienojušās vai uzguldītas citām reljefa formām, subjektivitātes līmenis datu iegūšanas procesā var būt ļoti augsts. Šādos gadījumos ļoti būtiska ir autora pieredze, kas uzkrāta līdzīgos pētījumos, izpratnē par kāpu veidošanās procesiem, un īpaši svarīga pieredze, kas iegūta apsekojot kāpas attiecīgajā pētījuma teritorijā.

Kāpu garenasu perpendikulu metode ir piemērota, nosakot paleovēja virzienus kāpām, kuras veidojas viena dominējošā vēja virziena ietekmē – šķērskāpām, barhāniem un paraboliskajām kāpām (Lancaster, 2004). Tomēr šajā pētījumā izmantotajai metodikai ir atsevišķas nepilnības, kuras jāņem vērā, analizējot iegūtos rezultātus. Pirmkārt, noteiktais garenass perpendikuls reprezentē perpendikulu līnijai, kas novilkta starp garenass sākuma un beigu punktiem. Šāda nepilnība ir būtiska, ja tiek veikti pētījumi garām paraboliskajām kāpām ar mainīgu un nevienozīmīgu izliekumu. Tomēr, šajā pētījumu teritorijā šādu kāpu ir maz, tāpēc nepilnības ietekme uz rezultātu vērtējama kā niecīga. Otrkārt, sarežģījumi noteikt precīzu paleovēju virzienu rodas āķveida un pārpušanas procesā parautām paraboliskajām kāpām. Šīm kāpām to migrācijas laikā tiek veidoti gari kāpu vaļņi jeb astes, kuras orientētas šķērseniski valdošajam vēja virzienam. Šādu kāpu pētījuma teritorijā ir salīdzinoši daudz, un metodes nepilnība noteikti atstāj zināmu ietekmi uz iegūto rezultātu precizitāti. Īpaši izteikti metodes nepilnības var novērot Burtņieka līdzenumā, kur ir neliels mērījumu skaits un lielākajai daļai kāpu ir izteikta āķveida forma un garas, atdalītas astes.

M. I. Finkelšteins ar līdzautoriem (Финкельштейн и др., 1994) norāda, ka analizējot radiolokācijas profilēšanas datus un diagnosticējot atšķirīgus signālus, nozīmīga loma ir nevis nogulumu granulometriskajām sastāvam un tā izmaiņām starp slāņiem, bet gan nogulumu mitruma izmaiņām. D. K. Tods un L. W. Mejs (Todd and Mays, 2005) uzsver, ka mitruma daudzuma izmaiņas nogulumos ir cieši saistīts ar granulometriskā sastāva izmaiņām. No tā izriet, ka, veicot radiolokācijas profilu analīzi un izšķirot atšķirīgas ģeoloģiskās robežas, var izdarīt secinājumus arī par granulometriskā sastāva mainību starp nogulumu slāņkopām.

Smilts paraugu datēšana tika veikta divās atšķirīgas laboratorijās (skat. 3.4.1. nodaļu). Iegūto rezultātu pareizību ir sarežģīti novērtēt, jo nav pieejami neatkarīgi datēšanas rezultāti, izmantojot citas datēšanas metodes. Salīdzinot datēšanas rezultātus no Somijas Dabas Vēstures muzeja Datēšanas laboratorijas ar autora veiktajiem, var novērot, ka iegūtie rezultāti kļūdu robežās norāda uz līdzīgu smilts paraugu vecumu, bet autora veiktie datējumi ir ar aptuveni divas reizes mazāku kļūdu. Detalizēts Somijas Dabas vēstures muzeja Datēšanas laboratorijā izmantotā SAR protokola izklāsts nav pieejams, tāpēc ir grūti novērtēt šo atšķirību cēloni. Visticamāk, ka Somijā datētajiem paraugiem ir liela rezultātu izkliede un nepietiekošs mērījumu skaits. Ziemeļu Luminiscences datēšanas laboratorijā datētajiem smilts paraugiem tika novērotas sarežģītas luminiscences īpašības un problēmas ar mērījumu atkārtojamības testu. Veicot šo problēmu monitoringu daudzu mērījumu laikā un, izmantojot vairākus lasītājus, tika novērots, ka šīm neprecizitātēm ir gadījuma raksturs un nav saskatāma saistība starp *sliktu* mērījumu un ekvivalentās devas lielumu izmaiņām.

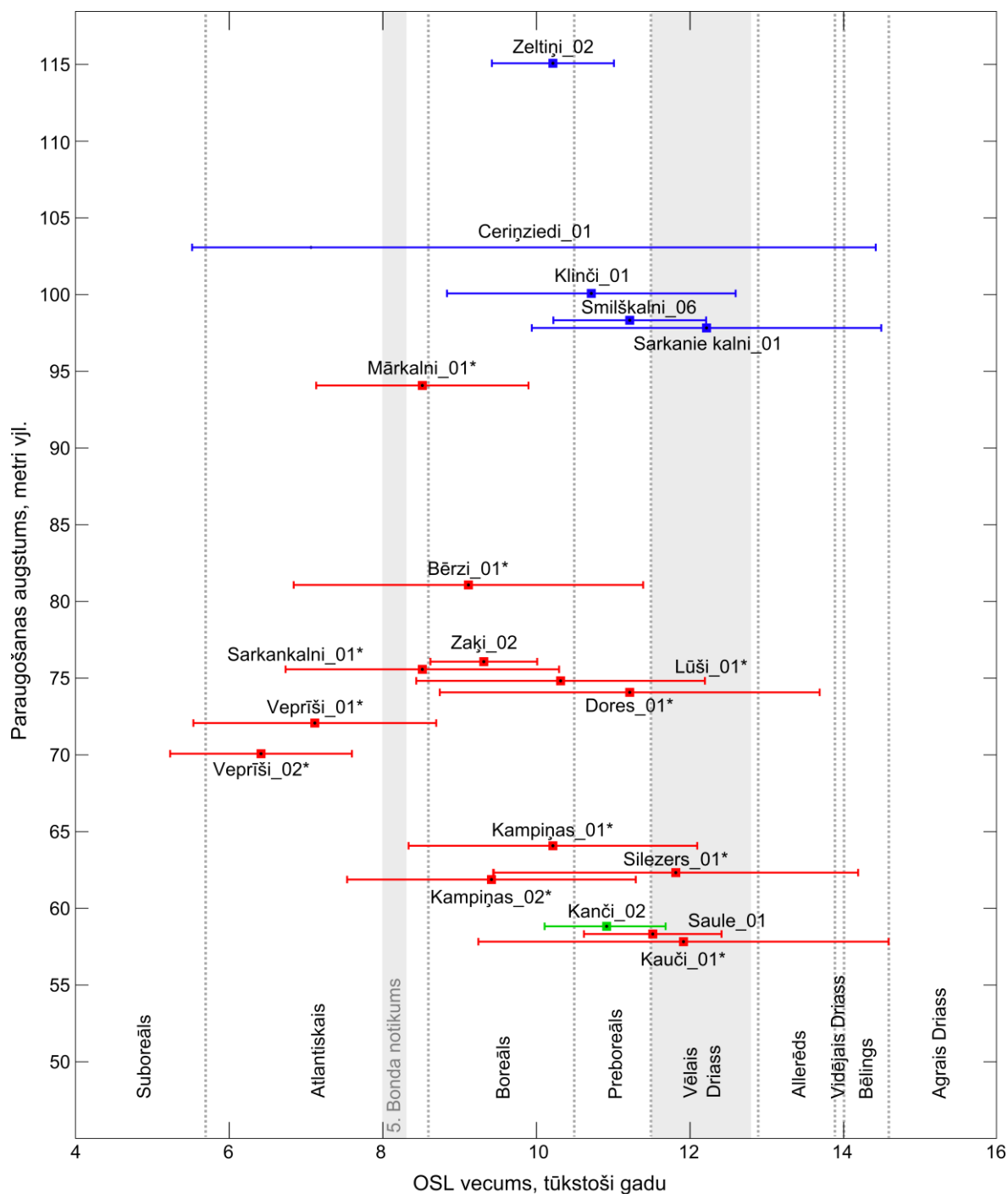
Kāpu laiktelpiskā attīstība

Līdzīgi, kā citviet mērena un auksta klimata apstākļos (Koster, 1988), arī Ziemeļvidzemē galvenokārt attīstījās paraboliskās kāpās. Lielākajos kāpu masīvos, it sevišķi Sedas līdzenuma austrumu daļā, daudzām kāpām ir ļoti slikti izteikta parabolas forma un to morfoloģiskie parametri daļēji atbilst arī šķērseniskajām kāpām, kuras ir raksturīgas silta klimata tuksnešiem (McKee, 1979). E. A. Koster (Koster, 1988) norāda, ka auksta klimata tuksnešos var veidoties barhāni un šķērseniskās kāpas, bet tās ātri apvienojas ar citām kāpām, vai tiek noenkurotas veģetācijas ietekmē un pārtop par paraboliskajām kāpām. Kā liecina ceļojošās kāpas *Råberg Mile* pētījumi Dānijas ziemeļos (Anthonsen et al., 1996), šķērskāpu veids var attīstīties arī mērena klimata apstākļos, ja ir pietiekams vēja transportam pieejamā materiāla daudzums un plaši veģetācijas segas zaudējumi. *Råberg Mile* gadījumā, kāpas formas maiņa no šķērskāpas uz parabolisko kāpu notika aptuveni 40 gadu laikā, kad norisinājās strauja veģetācijas attīstība. Līdzīgu procesu un to ilgumu novēroja arī J. M. Nielda un A. C. Bāss (Nield and Baas, 2008), modelējot kāpu lauku attīstības gaitu

ekspansējošas veģetācijas apstākļos. Šādi procesi norisinās ļoti ātri, un, visticamāk, līdzīga rakstura kāpu formu un veidu maiņa ir norisinājusies arī Ziemeļvidzemes gadījumā. Iespējams, ka kāpu veidošanās sākumstadijā, kad klimats vēl bija nelabvēlīgs plašai veģetācijas attīstībai, un pēc pieledāju baseinu drenāžas pieejamais smilts daudzums bija pietiekams, pētījumu teritorijā attīstījās barhāni un šķērseniskās kāpas, bet uzlabojoties klimatam un attīstoties veģetācijai, šo kāpu migrācija tika bremsēta, un varēja sākt attīstīties parabolisko kāpu tips.

Vislas apledojuuma beigu posmā Eiropas klimats piedzīvo ievērojamas pārmaiņas. Ledāja atkāpšanās veicināja arī atmosfēras gaisa cirkulācijas elementu pārgrupēšanos un līdz ar to arī vēja režīma izmaiņas (Kasse, 2002). H. Rensens ar līdzautoriem (Renssen et al., 2006) savā pētījumā salīdzināja dažādus pēdējā apledojuuma beigu posma paleovēju modeļus. Rezultāti dienvidaustrumu Baltijas reģionam liecina, ka visi pētījumā apskatītie modeļi norāda uz piezemes paleovēju virzienu no rietumiem un dienvidrietumiem. Šie rezultāti sakrīt ar iegūtajiem paleovēju virzieniem, kas Sedas un Trapenes līdzenumos ir vērsti no rietumu dienvidrietumiem un dienvidrietumiem. J. Zēbergs (Zeeberg, 1998) norāda, ka paleovēju virziens dienvidaustrumu Baltijas reģionam kāpu stabilizācijas laikā ir bijis no rietumu ziemeļrietumiem un ziemeļrietumiem, atbalstot Burtnieka līdzenumā iegūtos paleovēju virzienus no ziemeļrietumiem un ziemeļu ziemeļrietumiem. Līdzīgus rezultātus ir ieguvusi arī L. Znudova (2011a,b) Viduslatvijas zemienes Ropažu līdzenumā, kur iekšzemes kāpu morfoloģija un iekšējā uzbūve liecina par paleovēju virzienu no rietumiem un ziemeļrietumiem.

Pētījumā iegūtie kāpu vecumi atbalsta iepriekšējos pētījumos iegūtos rezultātus (Nartišs et al. 2009; Celiņš, 2010). Iekšzemes kāpu stabilizācija Ziemeļvidzemē ir sākusies vēlā driasas laikā un turpinājusies līdz boreālam, vai pat atlantiskajam laikam Sedas līdzenuma gadījumā. Datējumu rezultātos ir saskatāma sakarība, ka, katra līdzenuma ietvaros, kāpu vecums samazinās līdz ar tās augstumu virs jūras līmeņa, liecinot par eolajiem procesiem labvēlīgākiem apstākļiem hipsometriski augstākās teritorijās. Tomēr, neskatoties uz to, ka pieledāju baseinu drenāža ir notikusi pakāpeniski un Trapenes līdzenums bija atsegts vēja ģeoloģiskajai darbībai daudz agrāk nekā Sedas un Burtnieka līdzenumi, OSL datējumi uz šādu sakarību nenorāda. Viduslatvijas zemienes Ropažu līdzenumā kāpu aktivitātes sākuma laiks ir līdzīgs. L. Znudovas (2011b) veiktie OSL datējumi norāda uz iekšzemes kāpu aktivitāti vēlā driasas un preboreāla laikā.



5.1. attēls. Iekšzemes kāpu vecums saistībā ar paraugšanas augstumu un klimatiskajiem laika posmiem

Ar sarkanu krāsu norādīti kāpu vecumi Sedas līdzenumā, ar zaļo Burtnieka līdzenumā, ar zilo Trāpenes līdzenumā.

Ar * norādīti datējumi, kuri iegūti iepriekšējos pētījumos – Nartišs et al., 2009; Celiņš 2010.

Burtnieka līdzenumā datētais eolās smilts paraugs no 58 m vjl. norāda uz kāpas stabilizāciju preboreāla laikā pirms $10,9 \pm 0,8$ tūkstošiem kalendāro gadu (paraugs Kanči_02; NLL-129138). G. Eberhards (2006) norāda uz 2-3 m augstu eolo kāpu ar pamatni 45 m vjl., kas pārsedz kūdras slāni Silzemnieku māju apkārtnē (3 km uz rietumiem no pētījumu vietas Kanči). Kūdras slānis tika datēts un norāda uz tā veidošanos boreāla laikā pirms 8770 ± 160

^{14}C gadu (vai 9,7 tūkstoši kalendāro gadu pēc *INtCal09*) liecinot, ka pārsedzošā kāpas veidošanās laiks ir saistāms ar vismaz ar boreāla laiku. G. Eberhards (2006) norāda, ka boreāla laikā Burtņieka paleo ezerā notikusi ievērojama ūdens līmeņa krišana, pazeminoties līdz 41 m vjl. atlantiskajā laikā. Šie fakti liecina, ka Burtņieka līdzenumā kāpu veidošanās un attīstība ir bijusi tieši saistīta ar Burtņieka paleo ezera līmeņa izmaiņām.

Sedas līdzenuma kāpā Veprīši tika nodatēti divi smilts paraugi un tie abi norāda uz kāpas stabilizāciju atlantiskajā laikā (Nartišs et al., 2009; Celiņš, 2010). Iespējams, ka šīs kāpas ir tikušas reaktivizētas pirms 8200 kalendārajiem gadiem, kad ziemeļu puslodē notika ievērojama klimatiskā pavēsināšanās un vairāku kāpu masīvu reaktivizācija (Bond et al., 1997).

SECINĀJUMI

Balstoties uz jauniegūtajiem, augstas precizitātes datiem par Ziemeļvidzemē esošo iekšzemes kāpu morfoloģiju, iekšējo uzbūvi un vecumu, var apgalvot, ka pētījuma sākumā izvirzītā hipotēze ir apstiprināta.

Maģistra darba „Iekšzemes kāpu morfoloģija, iekšējā uzbūve un attīstība Ziemeļvidzemē” mērķis, izpildot visus izvirzītos uzdevumus, ir sasniegts.

Darbā veiktie pētījumi un pētījumu rezultātu analīze ļauj secināt, ka:

- Ziemeļvidzemē galvenokārt sastopamas paraboliskā tipa iekšzemes kāpas, kuru izplatību, lielā mērā, nosaka smilšaino glaciolimnisko un glaciofluviālo nogulumu izplatības areāli;
- iekšzemes kāpu formas izveide un iekšējās uzbūves veidošanās to stabilizācijas laikā notikusi valdošo dienvidrietumu, rietumu un ziemeļrietumu paleovēju ietekmē;
- kāpu aktivitātes laikā ir notikusi to migrācija, līdz tās tika strauji apstādinātas klimata uzlabošanās un veģetācijas attīstības ietekmē;
- ar vēlā driasas klimata paaugstināšanos ir saistāma kāpu aktivitātes sākums, kas ilga līdz preboreālam, boreālam, bet atsevišķos gadījumos pat līdz atlantiskajam laikam;
- Burtnieka līdzenumā iekšzemes kāpu attīstība ir labi korelējama ar Burtnieka paleoezera ūdens līmeņa pazemināšanos un liecina par kāpu veidošanos preboreāla un boreāla laikā.

PATEICĪBAS

Autors izsaka īpašu pateicību maģistra darba vadītājam prof., Dr. ģeol. Vitālijam Zelčam par neatsveramu atbalstu un diskusijām pētījuma realizēšanas gaitā.

Ļoti lielu pienesumu pētījuma realizācijā ir devis lekt. Māris Nartišs, sniedzot palīdzību daudzos lauka darbos, jaunu ĢIS metožu apgūšanā un pielietošanā, kā arī kritiskā pētījuma rezultātu caurskatīšanā.

Ar radiolokācijas metodes apgūšanu un pielietošanu lauka pētījumos palīdzēja Jānis Karušs un Juris Vībāns. Topogrāfiskās uzmērīšanas darbus un datu apstrādi veica Aleksandrs Vlads.

Autors izsaka pateicību Ziemeļu Luminiscences datēšanas laboratorijas personālam un tās vadītājam A. S. Marejam par laipno uzņemšanu un sniegto iespēju pilnvērtīgi izmantot laboratorijas aprīkojumu. OSL datēšanas metodes apgūšanas procesā ļoti palīdzēja Jans-Pīters Bulearts un Kristīne Thīla.

Autors pateicas Līgai Šūpulniecei, par izrādīto sapratni pētījuma izstrādes laikā un sniegto palīdzību darba valodas pilnveidošanā.

Pētījuma izstrāde tika finansēta no ESF projekta *“Atbalsts maģistra studiju programmu īstenošanai Latvijas Universitātē”*, LU pētniecības projekta Nr. 2007/ZP-87 *„Skandināvijas ledusvairoga dienvidu malas iekšējās zonas vēlā Vislas posma deglaciācijas notikumu hronoloģijas pilnveidošana”* un LZP projekta Nr. 09.1568 *„Ģeogrāfisko un ģeoloģisko procesu un faktoru ietekme uz Latvijas dabas apstākļiem un sabiedrību”* līdzekļiem.

LITERATŪRAS SARAKSTS

Publicētā literatūra

- Āboltiņš, O., Zelčs, V. 1995. Glaciomorfoloģiskā rajonēšana. Latvijas Dabas Enciklopēdija, 2. sēj. Rīga, Latvijas Enciklopēdija, 140.-141.
- Aitken, M.J., Tite, M.S. and Reid, J. 1964. Thermoluminescent dating of ancient ceramics. *Nature*. 202, 1032-1033.
- Anthonsen, K.L., Clemmensen, L.B., Jensen, J.H. 1996. Evolution of a dune from crescentic to parabolic form in response to short-term climatic changes: Råbjerg Mile, Skagen Odde, Denmark. *Geomorphology*. 17, 63-77
- Bateman, M., Godby, S. 2004. Late – Holocene inland dune activity in the UK: A case study from Breckland East Anglia. *The Holocene*. 14, 579-588.
- Bond, G., William Showers, W., Cheseby, M., Lotti, R., Almasi, P., deMenocal, P., Priore, P., Cullen, H., Hajdas, I., Bonani, G. 1997. A Pervasive Millennial-Scale Cycle in North Atlantic Holocene and Glacial Climates. *Science*. 14, 1257-1266.
- BØTTER-Jensen, L., Andersen, C.E., Duller, G.A.T., Murray, A.S. 2003. Developments in radiation, stimulation and observation facilities in luminescence measurements. *Radiation Measurements*. 37, 535-541.
- Brangulis, A.J., Juškevičs V., Kondratjeva, S., Gavēna, I., Pomeranceva, R. 2000. *Latvijas ģeoloģiskā karte. Mērogs 1:2000 000. 43. lapa- Rīga, 53. lapa – Ainaži. Paskaidrojuma teksts un kartes*. Rīga, Valsts ģeoloģijas dienests, 68
- Bristow, C.S., Duller, G.A.T. and Lancaster, N. 2007. Age and dynamics of linear dunes in the Namib Desert. *Geology*. 35, 555-558.
- Bušs, M. 1960. *Latvijas kāpu smiltāji un to apmežošana*. Rīga, Latvijas Valsts izdevniecība.
- Buylaert, J.P., Ghysels, G., Murray, A.S., Thomsen, K.J., Vandenberghe, D., De Corte, F., Heyse, I., Van den haute, P. 2009. Optical dating of relict sand wedges and composite-wedge pseudomorphs in Flanders, Belgium. *Boreas*. 38, 160-175.
- Celiņš, I., Karušs, J. 2011a. Radiolokācijas metodes pielietošana eolo nogulumu pētījumos. Krāj.: *Ģeogrāfija. Ģeoloģija. Vides zinātne. Latvijas Universitātes 69. zinātniskā konference. Referātu tēzes*. Latvijas Universitāte, Rīga, 58.-59.
- Celiņš, I., Karušs, J. 2011b. Eolo kāpu iekšējās uzbūves pētījumi, izmantojot radiolokācijas metodi. Krāj.: *Daugavpils Universitātes 53. Starptautiskās zinātniskās konferences tēzes*. Saule, Daugavpils, 40.

- Celiņš, I., Karušs, J. 2011c. Eolo kāpu iekšējās uzbūves pētījumi, izmantojot radiolokācijas metodi. Krāj.: *Daugavpils Universitātes 53. Starptautiskās zinātniskās konferences materiāli*. Daugavpils (Pieņemts publicēšanai).
- Celiņš, I., Nartišs, M. 2011. Iekšzemes kāpas Sedas līdzenumā. *Latvijas Universitātes raksti, Zemes un Vides zinātņu sērija*, nr. 767, 6.-16.
- Celiņš, I., Nartišs, M. 2011. Inland dunes at Seda plain. In: *2nd Students' International Geological Conference: Abstracts*. LU Akadēmiskais Apgāds, Rīga, 32.
- Celiņš, I., Nartišs, M., Zelčs, V. 2012. Iekšzemes kāpu morfoloģija un attīstība Ziemeļlatvijā. Krāj.: *Ģeogrāfija. Ģeoloģija. Vides zinātne. Latvijas Universitātes 70. zinātniskā konference. Referātu tēzes*. Latvijas Universitāte, Rīga, 153.-155.
- Clemmensen, L.B., Murray, A., Heinemeier, J., Jong, R. 2009. The evolution of Holocene coastal dunefields, Jutland, Denmark: A record of climate change over the past 5000 years. *Geomorphology*. 105, 303-313.
- Daniels, F., Boyd, C.A., Saunders, D.F. 1953. Thermoluminescence as a research tool. *Science*. 117, 343-349.
- Drenova, A. N. 2006. Activation of fixed dune massifs: Cause and probability of renewal. *Quaternary International*. 152, 175-180.
- Drenova, A. N., Timireva, S. N., Chikolini, N.I. 1997. Late Glacial dune-building in the Russian Plain. *Quaternary international*. 42, 59-66.
- Easterbrook, J.D. 1999. *Surface processes and landforms, second edition*. Prentice Hall, New Jersey. 479-485.
- Eberhards, G. 2003. *Latvijas jūru krasti*. Latvijas Universitāte, Rīga, 79.-112.
- Eberhards, G. 2006. Geology and development of the paleolake Burtnieks during the Late Glacial and Holocene. In *Back to the Origin. New Research in the Mesolithic. Neolithic Zvejnieki Cemetery and Environment, Northern Latvia* (Larsson, L. & Zagorska, I., eds), Acta Arheologica Lundensia Series. 8, 115-132.
- Fairbridge, R.W. (eds.) 1968. *The Encyclopedia of Geomorphology*. Reinhold Book Corporation, New York, 974-978.
- French, M.H. 2007. *The Periglacial Environment*, third edition, Wiley, Chichester, 264-272.
- Heaton, T.J., Blackwell, P.G., Buck, C.E. 2009. A Bayesian approach to the estimation of radiocarbon calibration curves: the IntCal09 methodology. *Radiocarbon*. 51, 51-64.

- Hugenholtz, C.H., Levin, N., Barchyn, T.E., Baddock, M.C. 2012. Remote sensing and spatial analysis of aeolian sand dunes: A review and outlook. *Earth-Science Reviews*. 111, 319-334.
- Huggett, J.R. 2003. *Fundamentals of geomorphology*. Routledge, London. 254-275.
- Huntley, D.J., Godfrey-Smith, D.I., Thewalt, M.L.W. 1985. Optical dating of sediments. *Nature*. 313, 105-107.
- Jain, M., Choi, J.H., Thomas, P.J. 2008. The ultrafast OSL component in quartz: Origins and implications. *Radiation Measurements*. 43, 709-714.
- Jungerius, P.D., Riksen, M.J.P.M. 2010. A contribution of laser altimetry images to the geomorphology of the Late Holocene inland drift sands of the European Sand Belt. *Baltica*. 23, 59-70.
- Juškevics, V., Misans, J., Murnieks, A. 2002. *Latvijas geoloģiskā karte. Mērogs 1:2000 000. 44. lapa- Aluksne, 54. Lapa – Valka. Paskaidrojuma teksts un kartes*. Rīga, Valsts geoloģijas dienests, 64
- Kaase, C. 1999. Late Pleniglacial and Lateglacial aeolian phases in The Netherlands. In: *Dunes and fossil soils* (Schirmer, W., eds). *GeoArchaeoRhein*. 3, 61-82.
- Kasse, C. 2002. Sandy aeolian deposits and environments and their relation to climate during the Last Glacial Maximum and Lateglacial in northwest and central Europe. *Progress in Physical Geography*. 26, 507-532.
- Käyhkö, J.A., Worsley, P., Pye, K., Clarke, M.L. 1999. A revised chronology for aeolian activity in subarctic Fennoscandia during the Holocene. *The Holocene*. 9, 195-205.
- Koster, E.A., 1988. Ancient and modern cold-climate aeolian sand deposition. *Journal of Quaternary Science*. 3, 69-83.
- Koster, E.A., 2009. The “European Aeolian Sand Belt”: Geoconservation of drift sand landscapes. *Geoheritage*. 1, 93-110.
- Kotilainen, M.M. 2004. Dune stratigraphy as an indicator of Holocene climatic change and human impact in northern Lapland, Finland. *Annales Academiae Scientiarum Fennicae, Geologica-Geographica*. 166, 154
- Kuršs, V. Stinkule, V. 1972. *Māli Latvijas zemes dzīlēs un rūpniecībā*. Rīga, izd."Liesma", 48.-76.
- Lancaster, N. 2004. Dune, aeolian. In: Goudie, A. S., (eds.) *Encyclopedia of Geomorphology, Vol.1*. Routledge, London, 285- 291.

- McKee, E.D. 1979. Introduction to a study of global sand seas. In: McKee, E.D. (Eds), *A Study of Global Sand Seas*. United States Geological Survey, Professional Paper. 1052, 3-19.
- Mejdahl, V. 1979. Thermoluminescence dating: Beta-dose attenuation in quartz grains. *Archaeometry*. 21, 61-72.
- Molodkov, A., Bitinas, A. 2006. Sedimentary record and luminescence chronology of the Lateglacial and Holocene aeolian sediments in Lithuania. *Boreas*. 35, 244-254.
- Munyikwa, K., Feathers, J.K., Rittenour, T.M., Shrimpton, H. K. 2011. Constraining the Late Wisconsinan retreat of the Laurentide ice sheet from western Canada using luminescence ages from postglacial aeolian dunes. *Quaternary Geochronology*. 6, 407-422
- Murray, A.S., Marten, R., Johnston, A., Martin, P. 1987. Analysis for naturally occurring radionuclides at environmental concentrations by gamma spectrometry. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 115, 263-288.
- Murray, A.S., Roberts, R.G. 1998. Measurement of the equivalent dose in quartz using a regenerative-dose single-aliquot protocol. *Radiation Measurements* 29, 503-515.
- Murray, A.S., Wintle, A.G. 2000. Luminescence dating of quartz using an improved single aliquot regenerative-dose protocol. *Radiation Measurements*. 32, 57-73.
- Nartišs, M., Celiņš, I., Zelčs, V., Dauškans, M. 2009. Stop 8: History of the development and palaeogeography of ice-dammed lakes and inland dunes at Seda sandy plain, north western Vidzeme, Latvia. In: Kalm V., Laumets L., Hang T. (eds.), *Extent and timing of Weichselian glaciation southeast of the Baltic Sea: Abstracts and Guidebook. The INQUA Peribaltic Working Group Field Symposium in southern Estonia and northern Latvia*, September 13-17, 2009. Tartu Ülikooli Kirjastus, Tartu. 79-81.
- Nartišs, M., Zelčs, V. 2011. A succession of Lateglacial ice-dammed lakes in north Vidzeme, Latvia. In: Johansson P., Lunkka J. P., Sarala P. (eds.), *Late Pleistocene Glacigenic Deposits from the Central Part of the Scandinavian Ice Sheet to Younger Dryas End Moraine Zone: Abstracts and Guidebook. The INQUA Peribaltic Working Group Meeting and Excursion, Northern Finland*, June 12-17, 2011. Geological Survey of Finland, Rovaniemi, 122.
- Nield, J. M., Baas, A. C.W. 2008. The influence of different environmental and climatic conditions on vegetated aeolian dune landscape development and response. *Global and Planetary Change*. 64, 76-92
- Nomals, P. 1943. Zemes bagātību pētīšanas institūta raksti. Rīga: Zemes bagātību pētīšanas institūts, 12. lpp.

- Prescott, J.R., Hutton, J.T. 1988. Cosmic ray and gamma ray dosimetry for TL and ESR. *Nuclear Tracks and Radiation Measurements*. 14, 223-227.
- Prescott, J.R., Hutton, J.T. 1994. Cosmic ray contributions to dose rates for luminescence and ESR dating: large depths and long-term variations. *Radiation Measurements*. 23, 497-500.
- Raukas, A. 2011. Evolution of Aeolian Landscapes in North-East Estonia Under the Influence of Climate Changes. *Geographia Polonica*. 84, 117-126.
- Renssen, H., Kasse, C., Vandenberghe, J., Lorenz, S.J. 2006. Weichselian Late Pleniglacial surface winds over northwest and central Europe: a model–data comparison. *Journal of Quaternary Science*. 22, 281-293.
- Rinterknecht, V.R., Clark, P.U., Raisbeck, G.M., Yiou, F., Bitinas, A., Brook, E.J., Marks, L., Zelčs, V., Lunkka, J.-P., Pavlovskaya, I.E., Piotrowski, J.A., Raukas, A. 2006. The last deglaciation of the southeastern sector of the Scandinavian Ice Sheet. *Science*. 311, 1449-1452.
- Roberts, H.M. 2007. Assessing the effectiveness of the double-SAR protocol in isolating a luminescence signal dominated by quartz. *Radiation Measurements*. 42, 1627-1636.
- Singhvi, A.K., Sharma, Y.P., Agrawal, D.P. 1982. Thermo-Luminescence dating of sand dunes in Rajasthan, India. *Nature*. 295, 313-315.
- Soms, J., Strode, S., Zelčs, V. 2012. Kvartāra paleoģeogrāfiskās vides izmaiņu liecības nogulumu atsegumos karjerā “Kāpas”, Jersikas līdzenuma dienvidos . Krāj.: *Ģeogrāfija. Ģeoloģija. Vides zinātne. Latvijas Universitātes 70. zinātniskā konference. Referātu tēzes. Latvijas Universitāte, Rīga, 229-232.*
- Strode, S., Soms, J. 2012. Eolās reljefa formas Jersikas līdzenuma dienvidu daļā. Krāj.: *Ģeogrāfija. Ģeoloģija. Vides zinātne. Latvijas Universitātes 70. zinātniskā konference. Referātu tēzes. Latvijas Universitāte, Rīga, 226-228.*
- Todd, D.K., Mays L.W. 2005. *Groundwater Hydrology, third edition*. John Wiley & Sons, Inc., 37-39.
- Vandenberghe, D., Kasse, C., Hossain, S.M., De Corte, F., Van Den Haute, P., Fuchs, M., Murray, A.S. 2004: Exploring the method of optical dating and comparison of optical and C-14 ages of Late Weichselian coversands in the southern Netherlands. *Journal of Quaternary Science*. 19, 73-86.
- Wallinga, J., Murray, A.S., Bøtter-Jensen, L. 2002. Measurement of the dose in quartz in the presence of feldspar contamination. *Radiation Protection Dosimetry*. 101, 367-370.

- Wilkins, E.D., Ford, L.R. 2006. Nearest neighbor methods applied to dune field organization: The Coral Pink Sand Dunes, Kane County, Utah, USA. *Geomorfology*. 83, 48-57.
- Wintle, A.G., Murray, A.S. 2006. A review of quartz optically stimulated luminescence characteristics and their relevance in single-aliquot regeneration dating protocols. *Radiation Measurements*, 41, 369-391.
- Zeeberg, J. 1998. The European sand belt in eastern Europe – and comparison of Late Glacial dune orientation with GCM simulation results. *Boreas*. 27, 127-139.
- Zelčš, V. 1994. Burtnieka līdzenums. Grām. G. Kavacs (red.). *Latvijas daba: enciklopēdija*. 1. sēj. Rīga, Latvijas enciklopēdija, 174.-177.
- Zelčš, V. 1998a. Sedas līdzenums. Grām. G. Kavacs (red.). *Latvijas dabas enciklopēdija*. 5. sēj. Rīga, Latvijas enciklopēdija, 66.-68.
- Zelčš, V. 1998b. Trapenes līdzenums. Grām. G. Kavacs (red.). *Latvijas daba: enciklopēdija*. 5. sēj. Rīga, Latvijas enciklopēdija, 226.-227.
- Zelčš, V., Dreimanis, A. 1997. Morphology, Internal Structure and Genesis of the Burtnieks Drumlin Field, Northern Vidzeme, Latvia. *Journal of Sedimentary Geology*. 111, 73-90.
- Zelčš, V., Markots, A. 2004. Deglaciation history of Latvia // *Quaternary Glaciations- Extent and Chronology*. Elsevier, Rotterdam, 225-243.
- Zelčš, V., Rinterknecht, V.R., Clark, P.U., Raisbeck, G.M., Yiou, F., Brook, E.J. 2011. Pēdējā apledojuma deglaciācijas ¹⁰Be hronoloģija Latvijā. Krāj.: *Latvijas Universitātes 69. zinātniskā konference. Ģeogrāfija. Ģeoloģija Vides zinātne. Referātu tēzes*. Rīga, Latvijas Universitāte, 399.-400.
- Zelčš, V., Šteins, V. 1989. Latvijas daba un fiziogēogrāfiskie rajoni. *Zinātne un Tehnika*, Nr. 7, 22.-24.
- Zimmerman, D.W. 1971. Thermoluminescence dating using fine grains from pottery. *Archaeometry*. 13, 29-52.
- Znudova, L. 2011a. Inland dunes in eastern part of the Central Latvian Lowland. *2'nd Students' International Geological Conference: Abstracts*. Rīga, LU Akadēmiskais Apgāds, 38.
- Znudova, L. 2011b. Senās iekšzemes kāpas Viduslatvijas zemienes Ropažu līdzenumā. *Latvijas Universitātes Raksti. Zemes un vides zinātne*. 762, 114.-130.
- Аболтыныш, О. П. 1971. Развитие долины реки Гауя. *Зинатне, Рига*, 16-19.

- Салтупе, Б.М. 1980. Формирование материковых дюн на междуречье Даугавы и Лиелупе В: Эберхардс, Г. Я. (ред.) *Морфогенез рельефа и палеогеография Латвии*. Рига, Латвийский государственный университет им. П. Стучки, 48-60.
- Финкельштейн, М.И., Карпухин, В.И., Кутев, В.А. и Метелкин, В.Н. 1994. *Подповерхностная радиолокация*. Москва, Радио и связь.

Nepublicētā literatūra

- Celiņš, I. 2010. Iekšzemes kāpas Sedas līdzenumā. Bakalaura darbs. Latvijas Universitāte, Rīga, 62
- Līcis, A. 2006. Strenču pieledāja baseina paleoģeogrāfiskā attīstība. Bakalaura darbs. Latvijas Universitāte, Rīga, 47

Interneta resursi

- Envirotech, SIA. 2004. *GIS Latvija*. Sk. 10.04.2012. Pieejams: http://www.envirotech.lv/index.php?v=1&s1_id=396
- Estonian Land Board, 2012. Historical maps. Estonian Land Board WMS. Sk. 10.04.2012. Pieejams: <http://kaart.maaamet.ee/wms/ajalooline>
- LVGD Dabas apvidi. *Valsts Ģeoloģijas Dienesta Dabas apvidu karšu mozaīka mērogā 1:500 000*. LU ĢZZF WMS. Sk. 09.04.2012. Pieejams <http://kartes.geo.lu.lv>
- LVGD Kvartargeoloģija. *Valsts Ģeoloģijas Dienesta Kvartāra nogulumu karšu mozaīka mērogā 1:200 000*. LU ĢZZF WMS. Sk. 09.04.2012. Pieejams <http://kartes.geo.lu.lv>
- LVGD Pirmskvartāra. *Valsts Ģeoloģijas Dienesta Pirmskvartāra nogulumu karšu mozaīka mērogā 1:200 000*. LU ĢZZF WMS. Sk. 09.04.2012. Pieejams <http://kartes.geo.lu.lv>
- LVGD Zemkvartāra. *Valsts Ģeoloģijas Dienesta Zemkvartāra virsmas reljefa karšu mozaīka mērogā 1:500 000*. LU ĢZZF WMS. Sk. 09.04.2012. Pieejams <http://kartes.geo.lu.lv>
- ORTOFOTO 2. *LĢIA Latvijas 2. etapa ortofoto karšu mozaīka*. LU ĢZZF WMS. Sk. 14.08.2011. Pieejams <http://kartes.geo.lu.lv>
- ORTOFOTO 3. *LĢIA Latvijas 3. etapa ortofoto karšu mozaīka*. LU ĢZZF WMS. Sk. 24.08.2011. Pieejams <http://kartes.geo.lu.lv>
- TOPO 10K PSRS. *Bijušās PSRS armijas ģenerālštāba 63. un 42. gada sistēmas kartes topogrāfisko karšu mozaīka mērogā 1:10 000*. LU ĢZZF WMS. Sk. 10.04.2012. Pieejams <http://kartes.geo.lu.lv>

TOPO 25K63g PSRS. *Bijušās PSRS armijas ģenerālštāba 63. gada sistēmas topogrāfisko karšu mozaīka mērogā 1:25 000.* LU ĢZZF WMS. Sk. 10.04.2012. Pieejams <http://kartes.geo.lu.lv>

TOPO 50K Satelītkarte. *VZD Satelītkaršu mozaīka mērogā 1:50 000.* LU ĢZZF WMS. Sk. 10.04.2010. Pieejams <http://kartes.geo.lu.lv>

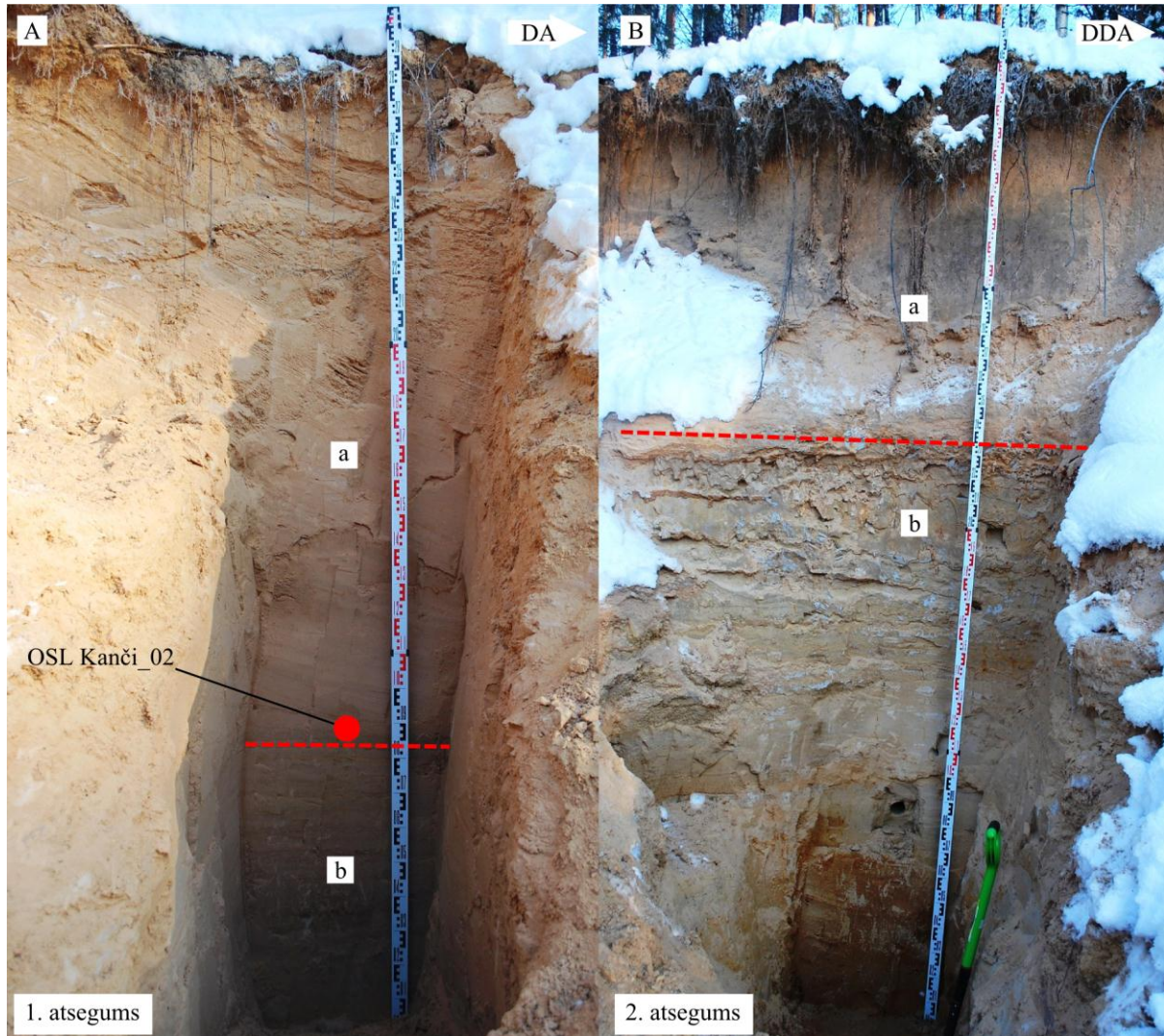
PIELIKUMI

1. Pielikums

Atsegumi pētījumu vietā Kanči

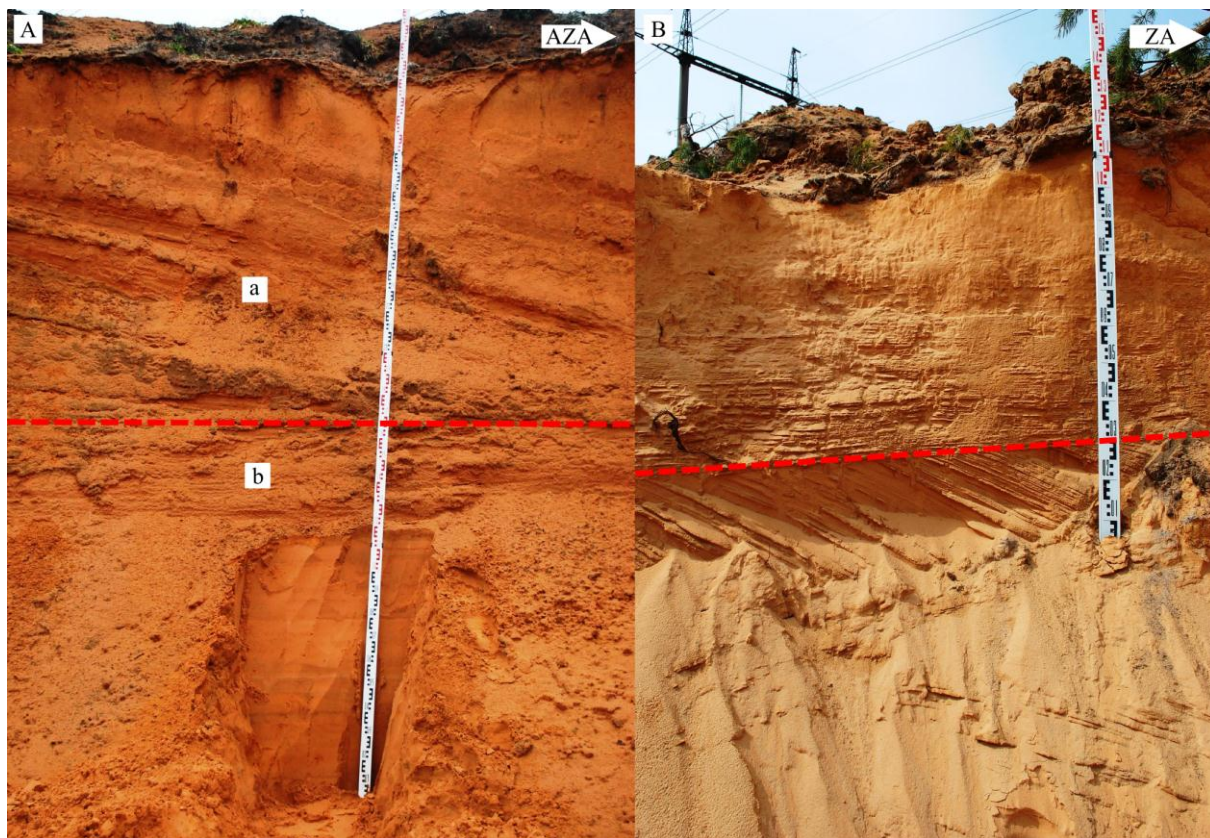
A – 1. atsegums, novietojumu skatīt 4.9. A, C attēlā.

B – 2. atsegums, novietojumu skatīt 4.9. A, C attēlā.



Atsegumi pētījumu vietā Silezers

A – 1. atsegums, novietojumu skatīt 4.11. A, C attēlā.
B – 2. atsegums, novietots 500 m uz RDR no 1. atseguma.

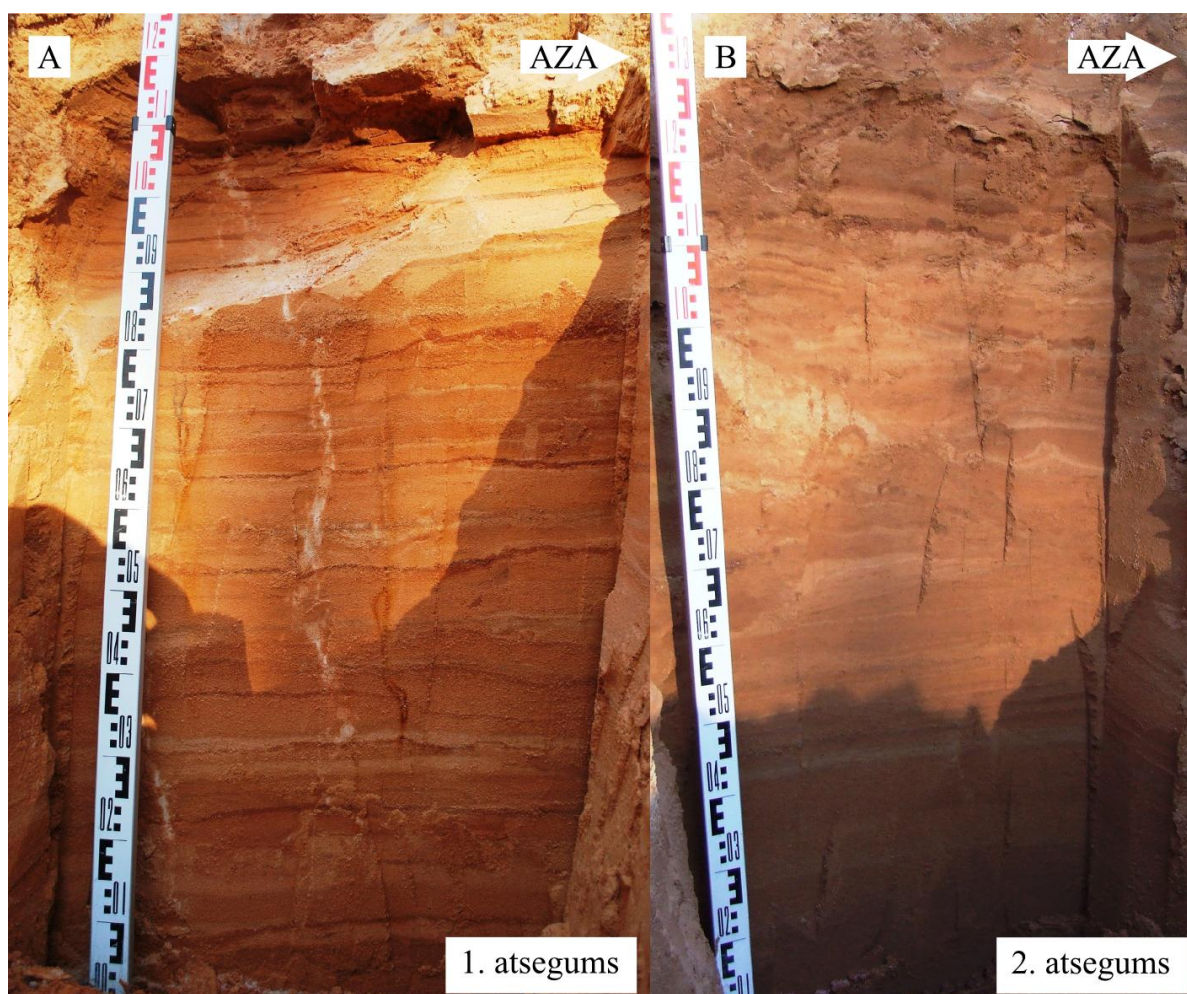


3. pielikums.

Atsegumi pētījumu vietā Garengrīdas

A – 1. atsegums, novietojumu skatīt 4.15. A, C attēlā.

B – 2. atsegums, novietojumu skatīt 4.15. A, C attēlā.



Maģistra darbs „Iekšzemes kāpu morfoloģija, iekšej uzbūve un attīstība Ziemeļvidzemē” izstrādāts LU Ģeogrāfijas un Zemes zinātņu fakultātē.

Ar savu parakstu apliecinu, ka pētījums veikts patstāvīgi, izmantoti tikai tajā norādītie informācijas avoti un iesniegtā darba elektroniskā kopija atbilst izdrukai.

Autors: Ivars Celiņš

paraksts

datums

Rekomendēju darbu aizstāvēšanai

Zinātniskais vadītājs: prof., Dr. ģeol., Vitālijs Zelčs

paraksts

datums

Recenzents:

Darbs iesniegts Ģeoloģijas nodaļas lietvedībā

Nodaļas lietvede

paraksts

datums

Noslēguma darba aizstāvēšanas rezultāti:

Maģistra darbs aizstāvēts ģeoloģijas maģistra gala pārbaudījumu komisijas sēdē

..... protokola nr.
gads, datums, mēnesis

vērtējums

Sekretārs

paraksts

datums