

LATVIJAS UNIVERSITĀTE
ĢEOGRĀFIJAS UN ZEMES ZINĀTŅU FAKULTĀTE
ĢEOLOĢIJAS NODAĻA

**MADLIENAS NOLAIĐENUMA GLACIĀLĀS RELJEFA
FORMAS UN TO VEIDOŠANĀS APSTĀKĻI**
MAĢISTRA DARBS

Autors: Kristaps Lamsters

Stud. apl. kl05012

Darba vadītājs:

prof., Dr. ģeol. Vitālijs Zelčs

Rīga 2011

SATURS

Anotācija	3
Abstract	4
Ievads	5
1. Literatūras apskats.....	8
1.1. Pētāmās teritorijas izplatītākās glaciālās reljefa formas un to vispārīgs raksturojums	8
1.1.1. Drumlini	9
1.1.2. Gala morēnas.....	12
1.1.3. Osi un osveidīgās formas	14
1.2. Drumlinu veidošanās teorijas un to morfoloģija saistībā ar ledus plūsmas un zemledāja gultnes litoloģijas izmaiņām	15
1.3. Ledāja kustība un zemledāja gultnes deformācija	24
2. Pētāmās teritorijas ģeoloģiski ģeomorfoloģiskais raksturojums un ieskats izpētes vēsturē	30
2.1. Pētāmās teritorijas ģeoloģiski ģeomorfoloģiskais raksturojums.....	30
2.2. Pētījumu vēsture.....	37
3. Materiāli un metodes	39
3.1. Kamerālie pētījumi.....	40
3.2. Lauka pētījumi	44
4. Rezultāti un interpretācija	47
4.1. Madlienas drumlinu lauks.....	47
4.2. Brencēnu kalna drumlins	53
4.3. Pārējās glaciālās reljefa formas.....	62
5. Diskusija	66
5.1. Drumlinu morfoloģija un telpiskais sakārtojums.....	66
5.2. Ledāja plūsma	69
5.3. Procesu ledāja–gultnes mijiedarbības zonā	75
Secinājumi	83
Pateicības.....	85
Literatūra un avoti.....	86

ANOTĀCIJA

Lamsters, K. Madlienas nolaidenuma glaciālās reljefa formas un to veidošanās apstākļi. Maģistra darbs. Rīga, Latvijas Universitāte, Ģeogrāfijas un Zemes zinātņu fakultāte, 2011.

Maģistra darbā ir veikts pētījums par Madlienas nolaidenuma glaciālajām reljefa formām un to veidošanās apstākļiem. Lielākā uzmanība ir pievērsta drumlinu morfoloģijai, telpiskajam sakārtojumam un iekšējai uzbūvei, kas detāli pētīta Brencēnu kalna drumlinā. Darba rezultātā ir izveidota ģeomorfoloģiskā kartoshēma, kurā attēloti drumlini, gala morēnas, bīdes sānu morēnas, marginālās grēdas un osi. Ir noteikti drumlinu morfoloģisko parametri, veikta to ģeotelpiskā un statistiskā analīze. Lauka pētījumos apsekoti atsegumi karjeros, veikta slāņu saguluma elementu uzmērīšana, ģeoloģiskā urbšana ar rokas urbi, radilokācijas profilēšana, ledāja skrambu uzmērīšana un paraugu noņemšana OSL datējumiem.

Raksturvārdi: Madlienas nolaidenums, drumlini, gala morēnas, deformācija, ledāja plūsma.

ABSTRACT

Lamsters, K. Glacial landforms and their formation in the Madliena Tilted Plain. Maser's thesis. Riga, University of Latvia, faculty of Geography and Earth Sciences, 2011.

Master's thesis examines glacial landforms and their formation in the Madliena Tilted Plain. The detailed explanation is given on the morphology, spatial distribution and the internal structure of drumlins which internal structure was studied in details in the Brecēni drumlin.

One of the results is a geomorphological map with glacial landforms such as drumlins, end and recessional moraines, shear margin moraines and eskers. There were obtained morphological parameters of drumlins for geospatial and statistic analysis. Surveying of sand pits, measurements of bedding and structural elements, geological hand coring, radiolocation profiling, measurements of glacial striae and sampling of sediments for OSL dating were done during the field works.

Key words: Madliena Tilted Plain, drumlins, end moraines, deformation, ice flow.

IEVADS

Madlienas nolaidenums ir viena no teritorijām Latvijā, kuras glaciālo reljefa formu izpētei nav pievērsta pietiekama uzmanība. Līdzšinējie pētnieki vairāk koncentrējuši uzmanību uz Linkuvas gala morēnas veidojumiem (Āboltiņš, 1970) un Kangaru osiem (Zelčs, 1986a, 1986b), līdz ar to lielākā daļa Madlienas nolaidenuma, īpaši Madlienas drumlinu lauks, kas tiek dēvēts par izteiksmīgāko tāda tipa veidojumu Latvijā (Zelčs, 1997), ir palicis mazizpētīts.

Ledāja reljefa formu veidošanās Madlienas nolaidenumā galvenokārt notika Vēlā Vislas apledošanas vispārējās deglaciācijas gaitā. Izšķirošā nozīme bija divām fāzēm – Gulbenes un Linkuvas, kad notika Rīgas ledus lielplūsmas Zemgales ledus loba reaktivizācija. Starptautiski šīs fāzes atbilstoši ledāja malas stāvokļiem tiek dēvētas attiecīgi par Viduslietuvas (*Middle Lithuanian*) un Ziemeļlietuvas (*North Lithuanian*) fāzēm (Rinterknecht et al., 2006; Zelčs and Markots, 2004; Raukas et al., 2010).

Gulbenes fāzes laikā notika atkārtota ledāja uzvirzīšanās un izveidojās Madlienas drumlinu lauks, kura izpētei ir liela nozīme deglaciācijas gaitas un ledāja bazālo apstākļu noskaidrošanā. Lielākā daļa Latvijas drumlinu lauku (Zelčs, 1993a; Zelčs and Dreimanis, 1997,) veidojās jau pēc Gulbenes fāzes, kas norisinājās no 15 līdz 14,5 ¹⁴C tūkstošiem gadu pirms mūsdienām (Zelčs and Markots, 2004) vai pirms 13,6 ¹⁰Be gadiem (Rinterknecht et al., 2006). Jaunākā Linkuvas oscilācija norisinājās vairāk nekā 14 000 gadu pirms mūsdienām (Zelčs and Markots 2004), pēc berilija datējumiem – 13,1 tūkstošus gadu pirms mūsdienām (Rinterknecht et al., 2006). Igaunijā Linkuvas fāze tiek korelēta ar Hānjas (*Haanja*) fāzi, kas esot ilgusi 15,7 līdz 14,7 tūkstošus gadu pirms mūsdienām (Kalm, 2006). Tā laika nozīmīgākais ledāja veidojums ir Linkuvas gala morēnas.

Pētījuma aktualitāte ir saistāma ar mūsdienu glaciotektonikas pētījumu attīstību, kas īpaši vērsti uz procesiem ledāja–gultnes mijiedarbības zonā. Drumlini kā viens no zemledāja gultnes reljefa paveidiem ir viena no visplašāk pētītajām reljefa formām pasaulē, bet joprojām to veidošanās ir plašu zinātnisko diskusiju objekts, tādēļ, pielietojot jaunākās glaciotektonikas atziņas, ir nepieciešams noskaidrot šo ledāja reljefa savdabīgo formu un to telpiskā sakopojuma veidošanās īpatnības Madlienas drumlinu laukā. Ļoti aktuāli ir arī jautājumi par bīdes sānu morēnām, kas pasaulē ir nesen atklātas (Stokes and Clark, 2002b; Hindmarsh and Stokes, 2008) un pirms pavisam neilga laika arī identificētas Latvijā (Saks, 2010). Būtisks jautājums ir par gala morēnu veidošanos – tā atrisināšana var palīdzēt noskaidrot svarīgus ledāja dinamikas aspektus un rekonstruēt ledāja atkāpšanās norisi.

Pētījuma gaitā tika apsekoti Madlienas nolaidenumā un arī nedaudz ārpus tā esošie aptuveni 30 karjeri, veikti reljefa formu iekšējās uzbūves pētījumi, izveidota datubāze ar digitizētajām reljefa formām, drumlinu morfoloģiskajiem parametriem, karjeriem, lauka darbu vietām, kā arī tika apzināti agrākajos gados izdarītie pētījumi, veikta to kritiska analīze.

Darba mērķis ir noskaidrot Madlienas nolaidenuma glaciālo reljefa formu izplatību, morfoloģiju, iekšējo uzbūvi un to veidošanās apstākļus.

Lai sasniegtu darba mērķi, tika izvirzīti šādi uzdevumi:

- apzināt un analizēt aktuālāko zinātnisko literatūru par ledāja dinamiskajiem procesiem, to veidotajām reljefa formām un ar līdzšinējiem pētījumiem par Madlienas nolaidenuma reljefu, lai iegūtu teorētiskās zināšanas, kas nepieciešamas turpmāko uzdevumu veikšanai;
- izmantojot ĢIS iespējas un pieejamo kartogrāfisko materiālu, noskaidrot pētāmās teritorijas ģeoloģisko uzbūvi, veikt ledāja reljefa formu identifikāciju, vektorizāciju, iegūt un apstrādāt datus par drumlinu morfoloģiju un telpisko sakārtojumu;
- veikt lauka darbus, lai izpētītu glaciālo reljefa formu iekšējo uzbūvi, ledāja plūsmas virzienus un procesus zemledāja gultnē;
- rekonstruēt ledāja reljefa attīstības gaitu.

Maģistra darba apjoms ir 92 lappuses, tajā skaitā 30 attēli un 4 tabulas. Darbs sastāv no anotācijas latviešu un angļu valodā, ievada, 5 nodaļām, secinājumiem un pateicībām. Darba sagatavošanai izmantoti 85 publicētie, 7 npublicētie un 7 interneta avoti.

Pētījuma rezultāti ir publicēti 2 zinātniskajās publikācijās. Par rezultātiem ir ziņots 4 zinātniskās konferencēs, no kurām 2 ir LU zinātniskās konferences, viena ir Daugavpils Universitātes starptautiskā zinātniskā konference un viena – starptautiskā studentu konference (*2nd Students International Geological Conference*). Visās konferencēs autors ir sniedzis mutiskus ziņojumus, un referātu tēzes ir publicētas tēžu krājumos. Maģistra darba rezultāti tiks arī prezentēti Peribaltijas darba grupas lauka simpozijā *International Field Symposium – Late Pleistocene Glacigenic Deposits from the Central Part of the Scandinavian Ice Sheet to Younger Dryas End Moraine Zone*, kas notiks 2011. gadā no 12. līdz 17. jūnijam Somijā.

Publikācijas

Raksti:

- Lamsters, K., 2010. Madlienas nolaidenuma glaciotehtoniskās reljefa formas. *Latvijas Universitātes raksti, "Zemes un vides zinātņu sērija"*, 767, 48.–62.
- Lamsters, K., 2011. Ledāja reljefa formu izplatība un morfoloģija Viduslatvijas zemienes ziemeļaustrumu daļā. *Daugavpils Universitātes 52. starptautiskās zinātniskās konferences materiāli//Proceedings of the 52nd International Scientific Conference of*

Daugavpils University. Zuģicka I. (sast.). Daugavpils, Daugavpils Universitātes Akadēmiskais apgāds “Saule”, 109.–119.

Konferenču tēzes:

- Lamsters, K., 2010. Ledāja reljefa formu izplatība un morfoloģija Madlienā nolaidenumā un Ropažu līdzenumā. *Daugavpils Universitātes 52. starptautiskās zinātniskās konferences tēzes//Abstracts of the 52nd International Scientific Conference of Daugavpils University*. Daugavpils, Daugavpils Universitāte.
- Lamsters, K., 2010. Ledāja reljefa formu izplatība un veidošanās apstākļi Viduslatvijas zemienes ZA daļā. Krāj.: *Ģeogrāfija. Ģeoloģija. Vides zinātne. LU 68. zinātniskā konference. Referātu tēzes*. Rīga, LU Akadēmiskais apgāds, 320.–321. lpp.
- Lamsters, K., 2011. Madlienā nolaidenuma glacigēnās reljefa formas. Krāj.: *Ģeogrāfija. Ģeoloģija. Vides zinātne. LU 69. zinātniskās konferences referātu tēzes*. Rīga, Latvijas Universitāte, 324–325. lpp.
- Lamsters, K. 2011. Glacial Landforms of The Madliena Tilted Plain, Central Latvian Lowland. *2nd Students' International Geological Conference, Ratnieki, Latvia, April 28–May 01, 2011, Abstracts*. Rīga, University of Latvia, 36.

Saīsinājumi

LU ĢZZF – Latvijas Universitātes Ģeogrāfijas un Zemes zinātņu fakultāte;

LVĢMC – Latvijas Vides, ģeoloģijas un meteoroloģijas centrs;

LĢIA – Latvijas Ģeotelpiskās informācijas aģentūra;

VĢF – Valsts Ģeoloģijas fonds;

ĢIS – Ģeogrāfiskās informācijas sistēma;

GPS – Globālās pozicionēšanas sistēma;

OSL – Optiski stimulētā luminiscence.

1. LITERATŪRAS APSKATS

1.1. Pētāmās teritorijas izplatītākās glaciālās reljefa formas un to vispārīgs raksturojums

Ledāja reljefa formu klasifikāciju Latvijā un ārpus tās ir veikuši daudzi pētnieki, balstoties uz dažādiem kritērijiem. Kā ledāja makroformas jeb lielformas (Zelčs, 1993a) tiek izdalītas augstienes un zemienes. Tajās sastopamas mezoformas, kuru iedalījums var balstīties uz dažādiem kritērijiem. Visbiežāk izdala glaciģēnās, glacioakvālās (glaciofluviālās un glaciolimniskās) un glaciokarsta reljefa formas, kuras var iedalīt sīkāk pēc to veidošanā dominējošiem procesiem (piemēram, erozijas, akumulācijas, glaciotehtoniskās), novietojuma attiecībā pret ledāja kustību (radiālās, frontālās) un citiem apstākļiem.

Pētītajā teritorijā izplatītās ledāja reljefa formas (4.1.1. att.) galvenokārt pieder glaciotehtoniskajam reljefa formu ģenētiskajam tipam. Tās ir formas, kuru uzbūvē liela nozīme ir ledāja nešķīrotajiem nogulumiem – morēnai (īpaši reljefa formu augšējā daļā), kā arī ledāja šķīrotajiem nogulumiem, kas parasti veido glaciotehtonisko reljefa formu kodolus. Šīs reljefa formas var iedalīt radiālajās (drumlīni, bīdes sānu morēnas) un frontālajās (gala un recesionālās morēnas, marginālās grēdas). Madlienas nolaidenumā ir arī sastopamas glaciofluviālās un glaciolimniskās reljefa formas, no kurām nozīmīgākās attiecīgi ir osi un to deltas, glaciofluviālie līdzenumi, ledājkušanas ūdeņu noteces ielejas un ledāja sprostezeru un distālo ledājūdeņu baseinu līdzenumi.

Glaciotehtoniskās reljefa formas veido ļoti plašu reljefa formu klāstu, šo visu formu uzbūves pamatā ir glaciotehtoniskās struktūras. O. Āboltniņš (Āboltniņš, 1989) ir izstrādājis glaciotehtonisko struktūru jeb glaciostruktūru klasifikāciju, nošķīrot glaciodinamiskās struktūras (izveidojušās morēnu saturošajā ledājā vai nogulumos, kas radušies vienlaikus ar paša deformējošā ledāja darbību), gultnes glaciadislokācijas (radušās, ledājam deformējot gultni veidojošos iežus vai nogulumus, kas pastāvējuši pirms tā ledāja darbības, kas izraisa deformācijas) un glaciokarsta struktūras (veidojušās, kūstot aprimušam ledājam vai apraktiem ledus blāķiem). Reljefa formas, kuru veidošanā galvenie bijuši aktīvā ledāja glaciotehtoniskie procesi (tās būtībā ir krokojuma, uzbīdījuma vai to kompleksu formas), var arī pieskaitīt pie glaciomorfostrukturālā reljefa tipa (Āboltniņš, 1989; Āboltniņš, 1995a).

Glaciotehtoniskajām struktūrām, kā norāda O. Āboltniņš (1999, 127. lpp.), “atrodoties formveidojošo nogulumu virsējā daļā, tām lokalizējoties atsevišķu struktūrformu vai to sakopojumu veidā, lielformu virsas reljefā izpaužas mezoformas – masīvi, vaļņi, grēdas,

pacēlumi un pauguri, kurus atdala ieplakas un pazeminājumi, tas ir, mezoreljefa kompleksi, kuru izcelsme ir glaciotektoniska. Tādējādi glaciotektonisko struktūru klātbūtnei ir principiāla nozīme gan ledāja nogulumu segas uzbūvē, gan arī reljefa izveidē”. Pētītās teritorijas izplatītākās ledāja glaciotektoniskās reljefa mezoforēmas ir drumlini un gala morēnas.

1.1.1. Drumlini

Termins “drumlins” attiecināms uz noteiktām zemledāja apstākļos veidotām reljefa formām, kuru vienojošais aspekts ir tieši raksturīgās morfoloģiskās īpatnības. Protams, drumliniem ir liela morfoloģiskā dažādība, tomēr to vienkāršota forma vairāk vai mazāk līdzinās elipsei. Savukārt drumlinu iekšējā uzbūve var būt visdažādākā, sākot ar kristāliskajiem iežiem un nogulumiežiem, beidzot ar visdažādākajiem glaciālajiem nogulumiem. Turpmāk darbā tiks raksturoti klasiski, no glaciālajiem nogulumiem veidotie drumlini, jo Latvijā nav sastopami, piemēram, klintsdrumlini un tiem līdzīgas formas.

Kopumā drumlinu definīciju ir diezgan daudz, jo ir grūti aptvert visu drumlinu paveidus vienā raksturojumā. Termins *drumlins* ir cēlies no gēlu vārda *druim* ar nozīmi – ‘noapaļots pakalns’ (Benn and Evans, 1998). Viena no drumlina pamatdefinīcijām ir šāda: drumlins tipiski ir nogludināts, ovālas formas kalns vai paugurs, kas sastāv no ledāja sanesām, morfoloģiski tas atgādina otrādāk apgrieztu karoti vai uz pusēm gareniski pāršķeltu olu. Parasti drumliniem ir stāvāka, trulāka proksimālā daļa un nolaidenākā, smailāka distālā daļa (Menzies, 1979a, citēts Benn and Evans, 1998).

K.D. Klarks (Clark et al., 2009) brīvi definē drumlinu kā ovālas formas pauguru, kurš galvenokārt sastāv no ledāja nogulumiem, ir veidojies zem ledus segas un ir paralēls ledāja kustības virzienam. Nav stingri noteiktas definīcijas, kas attiektos uz drumlinu izmēriem, bet tie pārsvarā mēdz būt līdz 1 km gari un līdz 50 m augsti. Drumlini pārsvarā ir izvietoti drumlinu laukos, kas sastāv no desmitiem līdz tūkstošiem eksemplāru. To garenasīm laukā ir līdzīga orientācija un morfoloģija, tie parasti ir izvietoti 2 līdz 3 drumlinu garuma attālumā cits no cita (ibid.).

Latvijā vienu no pirmajām drumlinu definīcijām sniedza V. Zāns (1936, 82. lpp.), norādot, ka tie ir “īpatnēji pamatmorēnu veidojumi, eliptiski vai iegareni klaipu veida uzkalni, kas parasti sastopami pa vairākiem kopā un vērsti gareniskām asīm ledus kustības virzienā. Šādi uzkalni piešķir ainavai īpatnēju svītrainu raksturu (drumlinu ainava). Uzbūves ziņā tie sastāv no pamatmorēnas materiāla, zem kura nereti sastopams slāņotas smilts un grants vai pat cietu pamatiežu kodols”. V. Zāns (ibid.) jau principā raksturo drumlinu iedalījumu, kuru

vēlāk konkretizē I. Danilāns (1973) un J. Straume (1979), izdalot morēnas drumlinus, glaciofluviālos drumlinus ar plānu morēnas segu un drumlinus ar pamatiežu kodolu.

V. Zāns (1936) raksturo arī drumlinu veidošanās pamatprincipus, uzsverot, ka tie ir radušies zem kustīga ledus (subglaciāli) un, iespējams, ka to izcelšanās saistīta arī ar spēcīgākām ledus malas oscilācijām.

Drumlini ir izplatīti zemienēs uz visdažādākajiem iežiem un nogulumiem, bet tie var būt sastopami arī citā topogrāfiskajā novietojumā (Benn and Evans, 1998).

Viens no drumlinu klasifikācijas iedalījumiem balstās uz to garenasu savstarpējo sakārtojumu laukā, kas ir atkarīgs no to atrašanās dažādos zemieņu tipos. V. Zelčs (1993a) izstrādāja glaciodepresiju zemieņu morfoģenētisko klasifikāciju, izdalot trīs zemieņu tipus: diverģentā tipa, konverģentā tipa un konsekventā tipa zemienes, kas veidojušās dažādas konfigurācijas pamatiežu virsmas lielpazeminājumos, kuros attiecīgi dominēja diverģenta, konverģenta vai konsekventa ledāja plūsma. Diverģentās zemienēs drumlinu garenasis veido vādekļveidīgu sakārtojumu, paplašinoties ledāja kustības virzienā, tos var dēvēt par diverģentiem drumliniem. Ja drumlinu garenasis sakļaujas ledāja kustības virzienā, izdala konverģentos drumlinus. Konsekventās zemienēs sastopami flūtingi (ibid.).

Tomēr ne vienmēr izpaužas minētā zemieņu un drumlinu tipu sakarība. Flūtingus un citus izteikti garus lineamentus, piemēram, mēdz saistīt ar ātru ledāja plūsmu, kam ne vienmēr ir saistība ar zemledāja virsmas topogrāfiju. Arī pats flūtingu veidošanās process var būt citādāks nekā tipiski drumliniem, piemēram, flūtingi var veidoties, novājinātiem, ar ūdeni piesātinātiem nogulumiem iespiežoties zemledāja dobumos, kas izveidojušies aiz šķēršļa (Evans et al., 2010).

Konverģentie drumlini arī ne vienmēr ir sastopami tikai konverģentās zemienēs, bet arī diverģento zemieņu malās, kā tas ir arī Madlienas nolaidenuma gadījumā. Konverģentos drumlinus mēdz saīsināti dēvēt par krumliniem. Agrāk šīs reljefa formas Latvijā tika dēvētas par morēnas uvāliem vai morēnuvāliem (Straume 1979, Zelčs 1993a, b), tikai vēlāk tie tika klasificēti kā viens no glaciotektonisko drumlinu paveidiem (Zelčs 1998a, 2001).

V. Zelčs (1993a, 32. lpp.) norāda šādus krumlinu morfoloģiskos parametrus: “Krumlinu garums svārstās no 0,5–3 līdz 10 km, platums no 100–500 m līdz 1,5 km, augstums parasti nepārsniedz 10 m, maksimālais – 18 m.”

Krumlini, kā norāda V. Zelčs (1997, 13. lpp.), “radušies atkārtotas ledāja mēļu un lobu aktivizācijas laikā to 10–30 km platā aktīvā ledus malas zonā vietās, kur, ledus masām nevienmērīgi bremzējoties, tā mikroplūsmām bija saplūstošs (konverģents) raksturs, visbiežāk pārejas zonā no zemienēm uz augstienēm”. Arī uzbūve krumliniem ir citādāka nekā diverģentajiem drumliniem: “Krumlinu kodolus veido lineāras izspieduma tipa

glaciostruktūras – krokas no zemledāja gultnes materiāla (senākas morēnas, ledāja kušanas ūdeņu nogulumu un pamatieži – smilšakmeņi un citi), kas bieži izspiežas cauri pēdējā apledošanas pamatmorēnas slāņkopai” (ibid., 13. lpp.). Krumlinu nogāzes parasti klāj pamatmorēna (Zelčs 1998a, b).

Drumlinu uzbūve var būt ļoti dažāda. Dažiem ir pamatiežu kodols, ko aptver morēna, bet lielākā daļā ir veidota no nekonsolidētiem nogulumiem. Bieži ir sastopami drumlini ar šķirotu nogulumu kodolu, ko pārsedz morēna. Daži drumlinu kodoli var būt nedeformēti vai arī ar kompleksām deformācijas struktūrām, kā krokām un uzbīdījumiem. Drumlini var arī sastāvēt pilnībā no morēnas. Drumlinu morēnas linearitātei raksturīgas sistemātiskas variācijas. Virsējās morēnas materiāls parasti tiecas būt paralēls agrākajam ledāja kustības virzienam drumlina korē, sānu materiāls ir paralēls drumlina sānu kontūrām, norādot uz diverģentu plūsmu drumlina proksimālajā daļā un konverģentu plūsmu drumlina distālajā daļā. Drumlinu kodola materiāla linearitātei var nebūt nekādas saistības ar drumlina formu, tā var norādīt uz morēnas akrēciju pirms drumlinveidošanās procesa (Benn and Evans, 1998).

Drumlini ir sastopami gan zemienēs, gan augstienēs zem bijušo segledāju vai kalnu ledāju klātajām teritorijām, tie ir arī novietoti tuvu galējām morēnām, dažviet pat esot pavisam blakus, kamēr citviet drumlini ir sastopami ledusvairoga centra malā. Drumlini ir ļoti pārsteidzošas reljefa formas, daudzu gadu laikā ir iegūta tikai neliela izpratne par to iekšējo uzbūvi. Drumlini var būt veidoti no plaša spektra nogulumiem, tomēr pamatā no morēnas. Bieži drumlini ir veidoti no slāņotajiem nogulumiem, ir pat veseli drumlinu lauki, kur to iekšējā uzbūvē dominē šāds materiāls, ko reizēm pārtrauc tikai izolēti morēnas starpslāņi. Daudzu drumlinu kodolus veido pamatieži un cits ne-ledāja izcelsmes materiāls, ap kuru ir notikusi zemledāja nogulumu akrēcija vai uzkrāšanās. Dažos gadījumos drumlini vai drumlinoīdi var būt izgredti no pamatiežiem, veidojot, tā saucamos, klints drumlinus. Vairumā gadījumu drumliniem nemaz nav skaidri izteikta kodola, ap kuru būtu notikusi to “augšana”, tādējādi šādu reljefa formu veidošanās joprojām ir mīkla. Drumliniem ir tik plaša formu un iekšējās uzbūves daudzveidība, ka ir gandrīz neiespējami raksturot to, kas ir ideāls drumlins. Drumlinu forma var būt ļoti daudzveidīga. Daudziem drumlinu laukiem ir raksturīgas pakāpeniskas izmaiņas, kas ir daļa no zemledāja reljefa formu kontinuumā, kurā ietilpst arī rievotās morēnas un flūtingi (Menzies, 2002).

Kā norāda V. Zelčs un A. Dreimanis (Zelčs and Dreimanis, 1997), pamatojoties uz Burtnieka drumlinu lauka pētījumiem, drumlinu kodoli sastāv galvenokārt no glaciotektoniski deformētiem pleistocēna nogulumiem un dažās vietās arī no vāji cementētiem dislocētiem vidusdevona smilšakmeņiem. Tas viss ir sakrokots lineārās antiklinālēs, paralēlās drumlinu korēm. Šīs antiklināles satur iepriekšējo zemledāja deformāciju struktūras. Drumlinu nogāzes

ir veidotas no zvīņveida uzbīdījumiem. Drumlinu kodoli ir veidojošies, galvenokārt pastāvot spiedienam, kas sakrīt ar reģionālo ledāja kustības virzienu (noteiktos attīstības etapos var būt dominējis arī sāniskais spiediens), savukārt kodolu pārsedzošie zvīņveida uzbīdījumi veidojušies, darbojoties sāniskajam spiedienam no starpdrumlinu ieplakām. Drumlinoīdi, kas veido Burtnieku drumlinu lauka proksimālo daļu, sastāv no lineāri stieptām diapīrkrokām to kodolos. To ass plaknes ir paralēlas drumlinoīdu garenasīm.

Latvijā ir konstatēti trīs veidu drumlini atkarībā no to kodolu sastāva. Pirmkārt, morēnas drumlini, otrkārt, glaciofluviālie drumlini ar plānu morēnas segu, un, treškārt, drumlini ar pamatiežu kodolu (Danilāns, 1973 un Straume, 1979). V. Zelčs un A. Dreimanis (Zelčs and Dreimanis, 1997) ir atklājuši, ka visi drumlini Burtnieka laukā ir veidoti no glaciotehtoniskajām struktūrām to kodolos un spārnos, kas sastāv no litoloģiski un pēc vecuma atšķirīgiem nogulumiem. Vienam drumlinam var būt arī raksturelementi no visiem trijiem I. Danilāna (Danilāns, 1973) un J. Straumes (Straume, 1979) izvirzītajiem drumlinu iekšējās uzbūves tipiem.

1.1.2. Gala morēnas

Pirmo gala morēnu raksturojumu, iedalījumu un nozīmīgumu deglaciācijas gaitas rekonstrukcijā latviešu valodā piemin V. Zāns (1936, 78. lpp.): “Kad šļūdoņa kušana ir līdzsvarā ar ledus pieplūdumu, tas ir, kad šļūdoņa mēle nokūst taisni par tik daudz, cik ledus pieplūst klāt, tad šļūdoņa gals ilgāku laiku paliek uz vietas un ledus līdznestais materiāls uzkrājas šai vietā vaļņveidīgas gala morēnas veidā. Tā rodas uzbēruma gala morēnas. Otrs gala morēnu veids ir sabīdītas gala morēnas, ko šļūdonis, uz priekšu virzīdamies, sabīda sev priekšgalā. Domā, ka vairums vaļņveidīgo gala morēnu ir sabīdītas gala morēnas, tomēr sastopami arī tipiski uzbēruma gala morēnu vaļņi. Kā viens, tā otrs morēnu tips sastāv no akmeņaina morēnu māla, brīžam arī no lielāku akmeņu krāvumiem, oļiem un grants, jo šļūdoņu galā allaž darbojās spēcīgi kušanas ūdeņu strauti. Vaļņveidīgās gala morēnas arvien vērstas perpendikulāri ledus kustībai, un no tām mēs varam nolasīt atsevišķu ledus mēļu kustības un atkāpšanās gaitu.”

V. Zāns (ibid.) izdala divus galamorēnu tipus, savukārt Meirons un citi (1976) jau raksturo trīs pamattipus. Pirmo pārstāv sabīdījuma tipa formas, kas sastāv galvenokārt no glaciģēnajiem nogulumiem. Pie tiem var pieskaitīt arī Linkuvas valni. Pie otrā tipa pieskaitāmas izspieduma – uzbērtās formas, kas sastāv no glaciģēnā un ledāja kušanas ūdeņu materiāla ar ievērojamu pirmā pārsvaru. Pie trešā tipa pieder uzbēruma tipa formas, ko veido galvenokārt glaciofluviālie un glaciolimniskie nogulumi, kuru sākotnējo slāņojumu izjauc

nomati, ieliekumi, retāk ledāja izspieduma krokas. Šo slāņkopu pārtrauc atsevišķi sīki dislocētas morēnas starpslāņi. Arī O. Āboltnis (1995b) raksturo trīs galamorēnu pamattipus, tikai izspieduma – uzbērto – formu vietā viņš izšķir saspieduma formas, ko veido galvenokārt dažādu nogulumu (reizēm arī pamatiežu) krokojuma struktūras.

Meirons un citi (1976) līdzās gala morēnas vaļņiem, izšķir gala morēnas uvālus, kas ir ievērojami mazāki par pirmajiem. Kā vienu no gala morēnas uvālu zonām viņš identificē zonu, kas atrodas Viduslatvijas nolaidenuma robežās, starp Mālpili un Lielvārdi. J. Straume (1979) šo zonu nodēvē par Lielvārdes–Jūdažu joslu. Acīmredzot ar gala morēnas uvāliem ir domātas gala morēnas, kas šajā darbā ir klasificētas kā recesionālās morēnas.

Gala morēnas ir grēdas, kas sastāv no glaciālajiem nogulumiem, tās ir veidojušās nogulumu akumulācijas rezultātā ledāja malā. Pleistocēna gala morēnas tiek plaši pielietotas ledāja vēstures, bet īpaši pēdējo apledojumu ledāja malu fluktuāciju interpretācijai. Gala morēnas pārsvarā veidojas tad, kad ledājs bija aktīvs, ledāja mala bija relatīvi stabila, ar ierobežotām amplitūdām fluktuācijām, tomēr dažas gala morēnas var veidoties īsos laika intervālos. Tās gala morēnas, kuras iezīmē ledāja vistālāko uzvirzīšanos, kā arī nozīmīgākās atkārtotās uzvirzīšanās, reizēm tiek klasificētas kā galējās morēnas. Tās gala morēnas, kuras veidojušās deglaciācijas laikā ar ierobežotu atkārtotu uzvirzīšanos vai bez tās, tiek klasificētas kā recesionālās morēnas. Gala morēnām ir liela morfoloģijas un uzbūves dažādība. Daudzas gala morēnas sastāv no diamiktona un šķīrotajiem nogulumiem, kam ir virsledāja izcelsme, lai gan šādas gala morēnas var saturēt arī zemledāja izcelsmes morēnu. Slāņi parasti ir relatīvi plāni, pārtraukti un ar deformāciju struktūrām. Citās gala morēnās dominē galvenokārt zemledāja izcelsmes diamiktons, bet sastopami arī virsledāja izkusuma nogulumu (Menzies, 2002).

Glaciotektonisko deformācijas procesu rezultātā ledāja malas tuvumā veidojas grēdas, kas zināmas kā sabīdījuma (*push*) morēnas. Tās bieži veidotas no zemledāja nogulumu un pamatiežu zvīņveida uzbīdījumu masām (*thrust masses*). Daudzas morēnas sastāv galvenokārt no slāņotiem un šķīrotiem nogulumiem. Tās, kuras veidojušās sauszemes apstākļos, bieži norobežo glaciofluviālo vai sandru līdzenumu proksimālās daļas, savukārt marīnas vai limniskas vides apstākļos veidojušās gala morēnas ir ledāja kontakta deltu vai subakvatisko konusu sedimentācijas procesu rezultāts. Šajās morēnās ir sastopams diamiktons, galvenokārt to proksimālajā daļā, un pārsvarā subaeriālas vai subakvatiskas gravitācijas plūsmas nogulumu izcelsmes. Šāda tipa zināmākās morēnas ir sastopamas Kanādā un Skandināvijā, kur tās veidoja vēlā pleistocēna ledāja mala, kas robežojās ar jūru vai ezeru (Menzies, 2002). Pie šāda tipa morēnām pieskaita arī Madlienas nolaidenuma R daļas vaļņus un grēdas,

respektīvi, Linkuvas galējās morēnas, no kurām R virzienā ir sastopamas recesionālās morēnas.

1.1.3. Osi un osveidīgās formas

Arī osus latviešu valodā pirmoreiz apraksta V. Zāns (1936, 82.–83. lpp.), sakot, ka osi ir “šauras un garas kalnu muguras, kas ļoti atgādina dzelzceļu uzbērumus un sastāv visvairāk no grants, oļiem un slāņainas smilts (fluvioglaciāla materiāla – mūsdienu terminoloģijā glaciofluviāla – *autora piez.*). Akmeņainas morēnas māls, kas parasti klāj morēnu līdzenumus, šo kalnu uzbūvē sastopams samērā maz, parasti aplāj tikai nogāzes”. Osu veidošanos viņš saista ar “ledāja kušanas ūdens straumju nogulumiem ledāja jeb šļūdoņa plaisās, alās un tuneļos ledus apakšā vai arī pašā ledū” (ibid., 84. lpp.). Tiek pieminēta arī teorija, kas izskaidro osus arī kā “deltas konu virknējumus, kas rodas šļūdoņa vārtos jeb straumju mutēs, ledus malai pakāpeniski atkāpjoties. Tad katrai atkāpšanās stadijai atbilst savs osa paaugstinājums jeb kupris (t.s. osa centrs)” (ibid., 84. lpp.).

G. Eberhards (1977) attiecībā uz osu morfoloģiju norāda, ka tiem raksturīgas šauras taisnvirziena vai līkumotas vaļņveida formas ar stāvām nogāzēm, bet morfoloģiski esot sastopami ļoti atšķirīgi veidojumi, kas var stiepties garu vaļņu veidā, pauguru virknēs, var zaroties, paplašināties vai sašaurināties.

Osu morfoloģijas, uzbūves un veidošanās apstākļu detāls raksturojums ir analizēts maģistra darba autora bakalaura darbā, tādēļ šeit netiks sīkāk apskatīts.

Latvijā reljefa formas, kas morfoloģiski atgādina osus, bet atšķiras no tiem ar iekšējo uzbūvi, reizēm tiek dēvētas par tutāniem. Šādas formas visvairāk ir sastopamas augstienēs. Tutānu uzbūvē dominē smilts un grants nogulumi, bet to veidošanās tiek saistīta ar aktīvu ledāja darbību. Tutāni satur arī morēnu pārsedzošajās slāņkopās, nereti arī kodolā (Markots, 1996).

Tutāniem līdzīgas formas ir konstatētas Burtnieka drumlinu laukā, tās ir radušās, ledājam pārveidojot, saplacinot iepriekš izveidoto drumlinu struktūras; šīs formas tiek klasificētas kā drumlinoīdi, tiem raksturīgas diapīrkrokas kodolos (Zelčs and Dreimanis, 1997).

Termins *drumlinoīds* ir sastopams arī pasaules zinātniskajā literatūrā, parasti to attiecina uz drumlinam līdzīgu reljefa formu, kas visbiežāk ir atšķirīga pēc morfoloģijas. Par drumlinoīdiem parasti dēvē izteikti garus un šaurus drumlinus, tomēr to iekšējā uzbūve un veidošanās ir atšķirīga. Nereti drumlinoīdi tiek asociēti ar auna pierēm vai klints drumliniem. Arī no morēnas veidoti drumlini ir tikuši dēvēti par drumlinoīdiem (Hubbard, 1906).

Osveida formas ielejveida pazeminājumos Latvijā, kas iestiepjas ezeros vai atdala tos, ir dēvētas arī par ezerosiem. Šādi osi lielākoties veidoti no glaciofluviālajiem nogulumiem kodolā, ko pārsedz morēna, tomēr sastopamas dažas osveidīgas salas, kas, iespējams, viscaur veidotas no morēnas nogulumiem (Zāns, 1933).

Osi, kas sastāv no morēnas, ir atrasti Īslandē – teritorijā, kuru pavisam nesēn klāja ledājs. Morēnas osi ir meandrējošas grēdas, kas veidojušās, dilatantās morēnas materiālu no zemledāja deformācijas gultnes iespiežot garenā dobumā vai R tipa tunelī pēc kušanas ūdeņu noplūšanas. Šie osi, kuri iepriekš drenējuši ledāju pa R tipa tuneļiem, ir skaidri nošķirami no blakus esošajiem flūtingiem (Evans et al., 2010).

Viss iepriekšminētais liecina par to, ka reljefa formu izcelsmi, kas līdzinās osiem vai drumliniem, reizēm nevar noteikt viennozīmīgi. Pastāv vairāki varianti, kā tādas formas dēvēt, balstoties uz to morfoloģiju, tādēļ tikai reljefa formas morfoloģija nedrīkst būt par pamatu tās ģenētiskajai klasifikācijai. Reljefa formu izcelsme ir jāskata kontekstā ar apkārt esošo reljefa formu ģenēzi. Piemēram, šauras un garas reljefa formas, kuras sastopamas drumlinu laukos, visdrīzāk var dēvēt par adatveida vai cigārveida drumliniem vai arī vienkārši drumlinoīdiem. Drumlinu laukos gan ir sastopami arī osi un osveida formas, bet šādiem osiem morfoloģiski biežāk ir raksturīga lokveidīga vai meandrējoša forma, to topogrāfiskais novietojums nereti saistās ar ielejveida pazeminājumiem, tuneļielejām vai arī ar topogrāfiskiem pazeminājumiem, pa kuriem ir notikusi ledāja kušanas ūdeņu noplūde uz distālajiem sprostezieriem.

1.2. Drumlinu veidošanās teorijas un to morfoloģija saistībā ar ledus plūsmas un zemledāja gultnes litoloģijas izmaiņām

Drumlinu veidošanās ir ļoti komplicēts process, kuram raksturīgas atšķirīgas lokālās izpausmes atkarībā no zemledāja gultnes reljefa un uzbūves. Tomēr kopumā drumlinu izplatība ir neatkarīga no lokālajiem apstākļiem, tādēļ noteicošie drumlinu veidošanās faktori ir saistīti ar pašu ledāja plūsmas raksturu, kuram bija daudz kopīgu iezīmju pleistocēna ledusvairogu drenējošajās plūsmās. Drumlinu veidošanās teoriju ir ļoti daudz, tādēļ darbā tiks apskatītas tikai nozīmīgākās un jaunākās; to analīze liek domāt, ka galvenais drumlinu rašanās apstāklis ir nestabilitāte sistēmā ledājs–gultne. Nestabilitāti rada zemledāja gultnes mozaīkveida struktūra, ko veido sakabināšanās jeb sasaistes punkti (deformācijas apgabali) un bazālā slīdējuma apgabali atšķirīgā porūdēns spiediena dēļ. Tas viss izsauc gan atšķirīgus ledāja plūsmas ātrumus, gan nevienmērīgus spriegumus ledāja ķermenī. Sistēma var tikt

stabilizēta vairākos veidos vai to kombinācijās, galvenokārt novadot lieko porūdeni (tas var izraisīt augšupejošas ar ūdeni piesātinātu nogulumu plūsmas un veidot drumlinu kodolus (Pelletier, 2008)) un deformējot nogulumus, kuros ir paaugstināts porūdens spiediens.

Liela mēroga plūdlīnijas formu izcelsmes noteikšanas problēmu nosaka analogu mūsdienu dabas vides novērojumu trūkums, tādēļ pētniekiem savi argumenti jābalsta uz reljefa formu morfoloģiju, iekšējo uzbūvi un izplatību; šīs formas turklāt veidojās zem sen izzudušiem ledājiem, par to zemledus apstākļiem ir zināms diezgan maz (Benn and Evans, 1998). Tomēr pēdējā laikā ir aizvien vairāk parādījušies pētījumi, kas apskata zemledus apstākļus, procesus ledāja–gultnes mijiedarbības zonā, ledāja kustību, deformējot zemledāja gultni vai slīdot pa plānu ūdens kārtiņu. Jaunas glacioloģijas atziņas ir ļāvušas pilnveidot un pārstrādāt zināmos drumlinu veidošanās modeļus.

Par drumlinu veidošanos ir izvirzītas neskaitāmas hipotēzes, bet joprojām nepastāv vienots viedoklis. Iespējams, tas ir tādēļ, ka drumlini pārstāv ļoti daudzveidīgu formu un iekšējās uzbūves variāciju kopumu, turklāt to izplatība bieži vien ir neatkarīga no ledāja gultnes iežu sastāva. Pat ja tiktu atrasts vispārātzīts drumlinu veidošanās mehānisms, tas atšķirīgās vietās noteikti izpaustos dažādi. Pašlaik, kā norāda Dž. Menzijs (Menzies, 2002), var izdalīt trīs galvenās drumlinu veidošanās hipotēžu grupas.

Drumlini veidojas no iepriekš nogulsnētā materiāla zemledāja apstākļos ar ierobežotu zemledāja kušanas ūdeņu aktivitāti (iespējams, tad, kad aukstā gultne transformējas uz silto). Kušanas ūdeņi var ietekmēt drumlina veidošanos un deformācijas procesus, darbojoties kā plāna ūdens kārtiņa ledāja–gultnes mijiedarbības zonā vai kā nogulumos esošs porūdens, kas samazina zemledāja efektīvo spiedienu. Iepriekš nogulsnētie nogulumi bazālā ledus kontakta apstākļos tiek mobilizēti drumlinveidīgās formās tiešas deformācijas veidā procesos, kas atgādina kaut kā uztriepšanu vai skulptūru veidošanu (*smearing on or sculpting processes*).

Drumlinu veidošanās ir anizotropisku neviendabību rezultāts zemledāja nogulumos sakarā ar dilatāciju, porūdens izkliedi, lokalizētu sasalšanu, lokalizētu spirālveidīgu bazālā ledus plūsmu vai lokalizētu zemledāja nogulumu deformāciju. Kušanas ūdeņu aktivitāte šajā gadījumā ir ierobežota, turpretim porūdens tiek uzskatīts par kritisku apstākli, mobilizējot vai imobilizējot lokālos gultnes nogulumus. Nozīmīgākais parametrs, kas nosaka to, kur drumlini veidosies un kur ne, ir mainīgais sprieguma lauks, kas ietekmē zemledāja nogulumu reoloģiju.

Drumlini veidojas, bazālajiem kušanas ūdeņiem aktīvi izgraužot iedobumus zem ledāja un vēlāk tos aizpildot ar šķirotiem nogulumiem vai arī kušanas ūdeņiem, erodējot ledāja–gultnes mijiedarbības zonā esošus nogulumus. Lai drumlini varētu veidoties šādā veidā, ir jānotiek katastrofālai zemledāja kušanas ūdeņu noplūdei, turklāt ledājam kopumā ir jāpaliek glaciodynamiski stabilam.

Visās minētajās hipotēzēs drumlinu veidošanās un saglabāšanās *atslēga* ir apstākļi ledāja–gultnes mijiedarbības zonā, un to izpratne joprojām paliek fundamentāla zinātnes problēma (ibid.).

Viena no galvenajām drumlinu veidošanās teorijām ir Dž.S. Boultona (Boulton, 1987) zemlededāja gultnes deformācijas modelis, savukārt alternatīvo kušanas ūdeņu hipotēzi izvirzīja un nostiprināja Dž. Šovs (Shaw, 1983; Shaw, 2002). Vispieņemtākais drumlinu veidošanās modelis ir bāzēts uz idejām par nogulumu eroziju un pārdali deformējamās slāņos. Tas labi izskaidro to drumlinu izcelsmi, kuriem raksturīgi iežu, morēnas vai slāņotu nogulumu kodoli. Šie drumlini veidojās nogulumu akrēcijas procesā, kas norisinājās, ledājam plūstot apkārt kodolam. Saskaņā ar šo modeli apgabali ar deformējamiem slāņiem, kas ir biežāki un izturīgāki nekā vidēji, paliks statiski vai deformēsies lēnāk, kontrastā ar vājākiem apgabaliem, kuri tiks pakļauti lielākiem deformācijas ātrumiem. Šajā modelī drumlinu veidošanās attīstās gultnes neviendabības dēļ. Piemēram, sākotnējo gultni var veidot smalkgraudaini nogulumi ar grants ķermeņiem, kas ir caurlaidīgi un labi drenējas, līdz ar to tajos pastāv zems porūdens spiediens un augsta nogulumu noturība. Smalkgraudaino nogulumu apgabali drenējas sliktāk un ir attiecīgi nenoturīgāki, tādēļ pastāv gultnes reakcijas telpiskas variācijas uz ledāja spriegumu. Grants ķermeņi veido noturīgus vai lēni deformējošus kodolus, bet smalkgraudainais materiāls viscaur ir pakļauts deformācijai, veidojot tālu pārvietotus ļoti novājinātu glaciotektonītu vai deformācijas morēnas apvalkus apkārt izturīgajam kodolam. Atlikušā grants materiāla mobilizācija izraisa drumlinu plūdlīnijas formas izveidi, kas būtībā ir ekvivalentas budinām metamorfajos iežos. Laika gaitā daži kodoli var kļūt mobili, lai gan tie joprojām pārvietojas lēnāk nekā apkārt esošie vājie nogulumi. Ja kodoli ir tikuši pārvietoti no to sākotnējām pozīcijām, ir neiespējami rekonstruēt deformējamo un nedeformējamo nogulumu izplatību; šādi mobili kodoli ir stratigrāfiski ļoti deformēti (Boulton, 1987). Šādu sakarību, kas atbilst Dž.S. Boultona modelim, novēroja arī M. Rats un J.A. Piotrovskis (Rattas and Piotrowski, 2003; Rattas, 2004), kur Sādjerves drumlinu laukā Igaunijā drumlinu veidošanās tika sekmēta tajos apgabalos, kur zemledāja deformējamā gultne sastāvēja no relatīvi labi drenētas rupjgraudainas morēnas, kas vēlāk veidoja lielus drumlinus. Smalkgraudaināka morēna veido mazākus drumlinus, savukārt vissmalkgraudainākā morēna ir izplatīta starpdrumlinu ieplakās.

Pēc Dž. Šova (Shaw, 1983; Shaw, 2002) hipotēzes, drumlinu veidošanās ir attiecināma uz erozijas un sedimentācijas procesiem katastrofisku plūdu rezultātā, respektīvi, drumlini ir radušies kušanas ūdeņu erozijas dobumos, kas ir bijuši izveidojušies pašā ledājā, vēlāk šos dobumus aizpildīja nogulumi. Šis aizpildījums varēja rasties tiešas sedimentācijas rezultātā, darbojoties tai pašai plūsmai, kas izveidoja dobumus. Alternatīvs process ir tāds: kad kušanas

ūdeņu plūsma mazinājās un ledāja svars aizvien vairāk darbojās uz gultni, ar ūdeni piesātinātie nogulumu vai ieži varēja tikt iespiesti dobumos. Hipotētiski drumliniem vajadzētu sastāvēt no šķirotiem un slāņotiem nogulumiem, arī no litoloģiski dažādiem deformētiem slāņiem. Kušanas ūdeņu hipotēze arī rada noteiktu reljefa formu asociāciju: drumlini, tuneļielejas un osi. Livingstona ezera drumlinu laukā tuneļielejas nošķeļ drumlinus, savukārt osi sastopami pašās tuneļielejās. Šāda reljefa formu asociācija norāda uz kušanas ūdeņu pārvietošanās pāreju no plūsmas plānā slānī uz plūsmu plašos Naja kanālos, un noslēdzošajā etapā uz plūsmu Rētlisberga kanālos. J. Šovs (ibid.) atklāja arī drumlinus, kuru iekšējā uzbūve norāda uz to, ka tie nevis ir aizpildījuši dobumus ledājā, bet gan ir kušanas ūdeņu erozijas formas. Šķiroti nogulumu Īrijas drumlinos ir tikuši interpretēti arī kā glaciofluviālie nogulumi, kas nogulsņējušies ar ūdeni pildītos dobumos drumlinu distālajās daļās kā noslāņošanās sekvences (Hanvey, 1987).

Drumlinu veidošanās hipotēzes ir tikušas izvirzītas arī Latvijā, pamatojoties uz Burtnieka drumlinu lauka pētījumiem (Zelčs and Dreimanis, 1997). Burtnieka lauka drumlinu veidošanās bijis daudzfāzu process, kurš var tikt iedalīts trijās vai četrās fāzēs. Ir izvirzītas divas iespējamās drumlinu veidošanās hipotēzes. Pirmā ir glaciotektoniskā hipotēze, pieņemot, ka subakvālie nogulumi tika akumulēti galvenokārt apledojuma transgresīvajā fāzē. Otrā hipotēze ir glaciotektoniskās un glaciofluviālās ģenēzes kombinācija. Glaciotektoniskajā hipotēzē pirmajā fāzē veidojas rievotās morēnas, kas gan tiek ievērojami iznīcinātas, to veidojošais materiāls dislocēts un pārvietots zem ledāja. Otrajā fāzē izturīgi iežu megabloki kļūst par drumlinu kodoliem, pāri plūstošais ledājs sastumj pāri tiem deformējamu gultnes materiālu. Trešajā fāzē notiek drumlinu morfoskulpturāla apdarināšana, bazālās morēnas uzkrāšanās drumlinu nogāzēs, kas noslēdzas ar kontakta izzušanu starp ledāju un gultni. Savukārt drumlinoīdu veidošanās notika, laterālās kompresijas rezultātā pārveidojot iepriekš izveidoto drumlinu glaciotektoniskās struktūras, lokālais spiediena virziens bija no tuvumā esošās ieplakas. Noslēdzošajā drumlinoīdu veidošanās etapā tie varēja tikt daļēji erodēti, materiāls vēlāk izgulsnējās starpdrumlinoīdu ieplakās. Hipotēze, kurā ir apvienotā glaciotektoniskā un glaciofluviālā drumlinu izcelsme, arī var tikt iedalīta trīs fāzēs. Pirmā fāze sakrīt ar glaciotektoniskās hipotēzes pirmo fāzi. Savukārt tālāk otrajā fāzē ir jānotiek katastrofālai zemledāja kušanas ūdeņu noplūšanai, kas izraisa selektīvu negatīvu ledāja dobumu eroziju un secīgu grants un smilts izgulsnēšanos. Trešajā fāzē ledājs atkal sakabinās ar gultni un dobumi tiek aizpildīti ar deformējamo materiālu. Drumlinoīdi šīs teorijas ietvaros veidojas, nogulumiem aizpildot šaurus un garus dobumus ledāja bazālajā daļā. Šī alternatīvā drumlinu veidošanās teorija gan var tikt attiecināta tikai uz atsevišķām Burtnieku drumlinu lauka daļām.

Joprojām neizprotamākā ir to drumlinu izcelsme, kuri viscaur sastāv no šķīrotiem nogulumiem. Kā uzsver Dž.D. Pelletīrs (Pelletier, 2008), šādos drumlinos slāņojums bieži ir paralēls topogrāfijai, norādot uz to, ka drumlinu veidošanās norisinājās, eksistējot lokālai, augšupejošai nogulumu plūsmai. Kādi faktori darbina šo mehānismu, un kādi faktori kontrolē noteiktas drumlinu morfoloģijas izveidošanos? Uz šiem jautājumiem atbildi dod autora (ibid.) veiktā modelēšana, tā pierādot drumlinu veidošanās modeli, kas apvieno divus drumlinveidošanās teorijās ietvertākos procesus – zemledāja hidrauliskos un gultnes deformēšanās procesus. Jaunajā modelī nogulumu deformēšanos izraisa porūdēns migrācija; tā ģenerē izspiedējspēkus (*buoyancy forces*), kas ir dzinulis konverģentai, augšupejošai nogulumu matricas plūsmai. No šīs plūsmas veidojas drumlini ar raksturīgu izmēru, kuru nosaka nogulumu tekstūra un morēnas slāņa biezums. Zīmīgi, ka šajā modelī ledus segai ir tikai pasīva loma, tā rada tikai hidrostatisko, nevis bīdes spiedienu, kā tas ir R.K.A. Hindmarša (Hindmarsh, 1998) un A.K. Favlera (Fowler, 2000) modeļos. Tajos drumlini veidojas nesaspiežama, viskoza morēnas slāņa bīdes procesos.

Dž.D. Pelletīra (Pelletier, 2008) izvirzītais modelis būtībā balstās uz Dž. Menzija (Menzies, 1979b) konceptuālo modeli, kurā drumlinu veidošanās notiek porūdēns izplūšanas dēļ. Dž. Menzijs (ibid.) atklāja, ka nogulumu mikrostruktūras norāda uz to, ka drumlinus veidojošajā morēnā bija augstāka porūdēns koncentrācija nekā drumlinus neveidojošajā morēnā sablīvēšanās laikā, tātad drumlinveidošanās procesu iniciēja sprieguma izmaiņas sakarā ar porūdēns migrāciju un izplūšanu. Lai nogulsnētā morēna paliktu ledāja–gultnes mijiedarbības zonā un iniciētu drumlinu veidošanos, tai jātiek pakļautai straujām ģeotehniskām izmaiņām, kuru rezultātā morēnā esošais porūdēns izkļiedējas, tā palielinot morēnas bīdes pretestību. Ir iespējami divi porūdēns novadīšanas mehānismi. Pirmkārt, porūdēns var tikt novadīts no lokalizētiem, ledāja–gultnes mijiedarbības zonā esošiem mobila morēnas slāņa apgabalēm, tā radot augstākas bīdes pretestības morēnas kodolu, ap kuru var uzkrāties deformācijas morēna. Otrkārt, porūdēns novadīšana no plānas ūdens kārtiņas ledāja pamatnē, kas palielina ledus kušanu un līdz ar to arī morēnas izkušanu un porūdēns zudumus no nogulsnētās morēnas. Ūdens novadīšana no ledāja gultnes var notikt caur ūdenscaurlaidīgiem zemledāja nogulumiem vai pamatiežiem, vai tas var tikt zaudēts zemledāja pazeminājumos.

Drumlinu veidošanās teorijas pirms Dž. Menzija (ibid.) modeļa pārsvarā bija balstītas uz priekšnoteikumu, ka morēna, kas veidos drumlinus, ir jau iepriekš nogulsnēta nezināma iemesla dēļ, bet Dž. Menzijs atklāja, ka drumlinu veidošanās sākums ir meklējams jau pašā morēnas nogulsnēšanās procesā, ko regulē normālā efektīvā spiediena palielināšanās ledāja

pamatnē, kas izraisa porūdēns zudumu no deformējama materiāla vai ūdens kārtiņas ledāja gultnē.

Līdz šim porūdēns migrācijas process nebija kvantificēts, nebija arī zināms, kādas formas drumlini veidosies. Dž.D. Pelletīra (Pelletier, 2008) veiktie eksperimenti atklāj, kādā veidā nogulumi deformējas – tas ir galvenokārt atkarīgs no nogulumu biezuma un ledāja virsmas topogrāfijas. Deformācijas sākotnējā etapā apgabalī, kur nogulumiem raksturīga lielāka porainība, tuvu ledāja–gultnes mijiedarbības zonai izplešas, jo šajos apgabalos ir koncentrēts augšup migrējošais porūdēns; šādi tiek iniciēts deformācijas process. Tas noslēdzas, jo augstas porainības apgabali novada lieko porūdeni no ledāja–gultnes mijiedarbības zonas, līdz viss ūdens tiek izspiests no nogulumiem. Laiku, kādā drumlini izveidojas, nosaka deformējamā slāņa biezums un hidrauliskā vadītspēja, vidēji no morēnas sastāvošs drumlins var izveidoties 1000 gados, savukārt no rupjgraudainiem nogulumiem sastāvošs drumlins var izveidoties mazāk nekā gada laikā.

Dž.D. Pelletīra (Pelletier, 2008) modelis prognozē lineāru sakarību starp drumlina platumu un sākotnējo nogulumu slāņa biezumu. Šo sakarību autors ir arī pārbaudījis praktiski, salīdzinot gandrīz 9000 drumlinu platumus ar morēnas biezuma datiem. Rezultāti pierāda, ka sākotnējam morēnas biezumam ir noteicošā loma drumlinu ģeometrijas kontrolēšanā, tie arī norāda uz ierosinātā modeļa atbilstību novērojumiem dabā.

Drumliniem ir vērojamas lielas izplatības un morfoloģijas variācijas, literatūrā nav viennozīmīgas atbildes, kādi faktori nosaka šīs variācijas, iespējams, tādēļ, ka katrā gadījumā izšķirošais varbūt cits faktors vai to kombinācija. Nozīmīgākie faktori, kas ir minēti publikācijās, ir ledāja gultnes substrāta īpašību variācijas, ātras ledāja plūsmas ātruma izmaiņas telpā vai arī lēnas plūsmas fluktuācijas laikā, kā arī deformējamo nogulumu biezums. Gultnes substrāta variācijas rada deformējamu un stabilu apgabalu eksistenci, to ir pierādījuši vairāki autori, kuru pētījumi ir veikti arī zem mūsdienu ledājiem (Alley, 1993; Piotrowski and Kraus, 1997; Piotrowski et al., 2004; King et al., 2007; Stokes et al., 2007; Larter et al., 2009; Smith and Murray, 2009). Savukārt citi autori (Stokes and Clark, 2002a; Hess and Briner, 2009) ir akcentējuši drumlinu morfoloģijas tiešu saistību ar ledāja plūsmas ātruma izmaiņām.

Drumlinu saistība ar zemledāja gultnes nogulumu litoloģiju un biezumu ir vērtēta arī ļoti kritiski (Patterson and Hooke, 1995), norādot, ka nedz drumlinus veidojošo nogulumu litoloģija, kas var plaši variēt, nedz ledāja gultnes litoloģija un liela mēroga topogrāfija nav nozīmīga drumlinu attīstības veicināšanā. Reģionālai liela mēroga topogrāfijai vajadzētu būt nozīmīgam lielumam drumlinu veidošanā, jo tā ietekmē ledāja dinamiku, bet autoru apkopotie dati no literatūras un topogrāfiskajām kartēm norāda, ka drumlini ir gandrīz vienādi izplatīti

augstienēs un zemienēs. Arī nogāzes nav īpaši nozīmīgas, ja vien tās nav īpaši stāvas. Autori (ibid.) secina, ka kopumā drumlinu veidošanās nav acīmredzami saistīta ar substrāta litoloģiju. Daudzos laukos drumlinu blīvums samazinās, samazinoties glaciālo nogulumu biežumam, kā arī izteiktākie drumlini biežāk izveidojušies virs bieziem nogulumiem, tomēr citos drumlinu laukos ir irdeno nogulumu daudzumam, kas pārsedz pamatiežus, nav būtiska nozīme.

M. Kerr un N. Eilss (Kerr and Eyles, 2007) pieņēma, ka izšķirošā ietekme uz drumlinu morfoloģiju varētu būt nogulumu biežumam. Šeit gan jāpiebilst, ka drumlinu veidošanās autoru (ibid.) pētītajā teritorijā bija atšķirīga no klasiskajām teorijām. Autori (ibid.) aizstāv viedokli, ka augšējā Ņujorkas štata drumlini ir izveidojušies iepriekš eksistējošo nogulumu zemledāja erozijas rezultātā. Visu pētīto drumlinu kodoliem raksturīga vienāda trīsdaļīga stratigrāfija, kas sastāv no diviem morēnas horizontiem, kurus atdala glaciolimniskas smiltis. Autoru (ibid.) dati skaidri norāda, ka morēna tika nogulsnēta pirms drumlinu veidošanās. Drumliniem raksturīga sistemātiska pāreja no ovālām uz vārpstveida formām vai otrādi. Garākie vārpstveida drumlini ir izveidojušies apgabalos ar plānu nogulumu segu, kur ledājs ir erodējis gandrīz visus iepriekš eksistējušos nogulumus. Šāda situācija tipiski ir virs un apkārt pamatiežu pacēlumiem. Lielākie un apaļākie drumlini sastopami apgabalos ar biezu nogulumu segu, kur ledājs nespēja erodēt tik lielu nogulumu daudzumu. Drumlinu forma ir interpretēta kā funkcija no nogulumu biezuma un dziļuma līdz pamatiežiem. Drumlinu *izgrebšanu* veicināja tas, ka morēna ledāja gultnē nebija izplatīta vienmērīgi, līdz ar to mazāk izturīgie gultnes iecirkņi varēja tikt erodēti, bet izturīgākie iecirkņi saglabājās neskarti. Šis atklājums apstiprina, ka zem ledusvairogiem var notikt liela mēroga vāji šķīrotu nogulumu transports, turklāt šis process var notikt diezgan ātri dažu tūkstošu gadu laikā. Daļa no pārvietotā materiāla var tikt nogādāta līdz ledāja malai un veidot frontālo gala morēnu. Autori (ibid) noraida iespējamību, ka Ņujorkas štata drumlini varēja veidoties gigantiskos zemledāja megaplūdus, kā to pieņēma Dž. Šovs un R. Gilberts (Shaw and Gilbert, 1990, citēts Kerr and Eyles, 2007).

Pamatojoties uz Ņujorkas drumlinu lauka pētījumiem, ir aizstāvēts viedoklis, ka drumlinu morfometrija vislabāk ir izskaidrojama ar ledus plūsmas ātruma izmaiņām. Autori (Hess and Briner, 2009) pētījumā kopā analizēja trīs faktorus, kuriem varētu būt ietekme uz drumlinu morfometriju: nogulumu biezumu virs pamatiežiem, drumlinu veidošanai pieejamo laiku un ledus plūsmas ātrumu. Pētījuma rezultāti norāda uz mazu drumlinu garuma–platuma attiecības un nogulumu biezuma savstarpējo saistību, kā arī uz to, ka drumlinu morfometrijas novērojumi nevar tikt izskaidroti ar atšķirīgu veidošanās laika intervālu. Drumlinu garuma–platuma attiecība norāda uz paleoglacioloģiskajiem apstākļiem ledāja gultnē īsi pirms

deglaciācijas. Ātru ledāja plūsmu varēja iniciēt un veicināt marginālie ledāja sprostezeri, vai arī drumlinu morfometriju noteica topogrāfiski kontrolētas ledus plūsmas, kā norāda citi autoru (ibid) minētie pētījumi. Dīvos no trijiem drumlinu lauka apakšreģioniem ātru ledus plūsmu varēja izraisīt lokāla bazālās slīdēšanas palielināšanās efektīvā spiediena samazināšanās dēļ, ledāja malai beidzoties sprostezerā. Savukārt trešajā apakšreģionā novērotā drumlinu orientācija var atspoguļot topogrāfiski kontrolēta izvadledāja trajektoriju vai arī ledus plūsmu, kas izbeidzās sprostezerā.

Uz jautājumu, vai drumlinu veidošanos un to morfoloģiju nosaka noteiktas substrāta īpašības, atbildi pavisam nesen ir mēģinājuši sniegt vairāki autori (e.g. Larter et al., 2009; Greenwood and Clark, 2010).

Kā norāda S.L. Grīnvuds un K.D. Klarks (Greenwood and Clark, 2010), līdz šim veiktie pētījumi ir koncentrēti uz atsevišķiem drumlinu laukiem, tādēļ trūkst substrāta kontroles analīzes ledus segas mērogā. Autoru (ibid) pētījums atklāja, ka Īrijas ledus segas mērogā, ņemot vērā visu ledāja gultnes formu kopskaitu, nav noteiktas sakarības starp pamatiežu vai morēnas substrātu un ledāja gultnes formu sastopamību, izkārtojuma blīvumu vai izmēru. Savukārt reģionāli vai lokāli piemēri rāda dažas atbilstošas substrāta un reljefa formu izpausmes izmaiņas, kas tipiski parādās kā pēkšņas drumlinu garuma izmaiņas pie litoloģiskās robežas. Tomēr ne viss novēroto reljefa formu mainīgums var tikt saistīts ar litoloģiskām izmaiņām, jo tās var tikt pakļautas topogrāfiskajam novietojumam vai ledāja dinamikai. Ledāja gultnes formas un to izplatība tiek kontrolēta hierarhiski, stingri saistībā ar telpisko mērogu: litoloģiskās atšķirības var modulēt lokāla mēroga ledāja gultnes formas, bet to sastopamību un īpašības primāri regulē ledussegas glacioloģiskā sistēma un virzītājspēki. Tikai noteiktos apstākļos lokāla mēroga ledāja gultnes formu veidošanās process ir jutīgs pret gultnes īpašībām.

S.L. Grīnvuds un K.D. Klarks (ibid) atklāja, ka ledus segas mērogā litoloģijai ir maza vai nekāda ietekme uz drumlinu vai citu ledāja gultnes formu sastopamību, sakārtojuma blīvumu vai morfoloģiju. Šis atklājums ir kontrastā ar reģionāla mēroga situāciju, kur dažas litoloģiskas izmaiņas korelējas ar reljefa formu morfoloģiju. Lokālā mērogā ledāja gultnes lineamenti ir garāki uz kaļķakmens nekā uz smilšakmens vai kristālisko iežu substrāta. Tomēr ne visām reljefa formu izmaiņām ir litoloģisks cēlonis. Reljefa formas un to izplatību regulē hierarhiski kontrolmehānismi, kas ir cieši saistīti ar telpisko mērogu. Ledāja dinamika ir galvenais faktors, kas kontrolē ledāja gultnes formas, lokāli tās regulē substrāta litoloģija, savukārt topogrāfijai var būt dažāda ietekme. Litoloģiskā kontrole ir pakļauta glacioloģiskajai kontrolei.

S.L. Grīnvuds un K.D. Klarks (Greenwood and Clark, 2009) atklāja, ka ledāja gultnes formas galvenokārt kontrolē ledāja plūsmas ģeometrijas un zemledāja režīma izmaiņas. Var tikt argumentēts, ka substrāta litoloģijai ir daudz būtiskāka ietekme uz ledāja gultnes formām, tai regulējot ledāja dinamiku, respektīvi, litoloģija, regulējot ledāja plūsmas režīmu, netieši var noteikt reljefa formu izplatību. Piemēram, noteiktas litoloģijas substrāts var sekmēt ātrāku ledāja plūsmu un garenāku reljefa formu rašanos, tomēr litoloģiskajai kontrolei joprojām nebūs tiešas ietekmes uz reljefa formu izplatību, jo tā hierarhiski ir pakļauta glacioloģiskajam režīmam.

Kompleksa glacioloģiskā režīma ietekme uz zemledāja reljefa formu izplatību ir tikusi atklāta Antarktīdā, pētot Amundsena līča gultni (Larter et al., 2009). Tur ir noskaidrots, ka plūdlīnijas zemledāja reljefa formas definē paleoledus plūsmas konverģences zonu, kura kontrastā ar iepriekšējiem modeļiem neveido vienkāršu reljefa formu progresiju ledāja plūsmas gultnes garumā. Telpiskā reljefa formu daudzveidība norāda uz kompleksu mehānisko un hidrodinamisko režīmu ledāja gultnē. Dažādas reljefa formas, kā drumlini, lielizmēra plūdlīnijas formas, zemledāja kanāli, izskaloti pamatiežu pacēlumi, ir sastopamas līdzās vienas paleoplūsmas ietvaros, lielizmēra plūdlīnijas formas vairākas reizes pārtrauc drumlinu joslas. Šīs tuvās dažādu zemledāja reljefa formu telpiskās asociācijas padara neticamu to, ka tās varēja izveidoties nozīmīgu paleoledus plūsmas telpiskā ātruma variāciju dēļ. Reljefa formu lielā telpiskā daudzveidība norāda uz kompleksu ledus plūsmas bazālo režīmu, iespējams, ietverot dilatētas, deformējamās morēnas plankumus, ko pārtrauc stabili apgabalī, pār kuriem notiek ledāja bazālā slīdēšana, kā arī apgabalus ar zemledāja kušanas ūdeņu plūsmām kanālos. Galvenais mehānisms, kas ietekmē gultnes morfoloģijas izveidošanos, drīzāk ir bazālo procesu telpiskās variācijas un pamatiežu izturība pret eroziju, nevis plūsmas ātruma izmaiņas. Šādi kompleksi bazālie režīmi nevar būt izņēmums, jo pētījums ietver ļoti plašu teritoriju.

Būtībā R.D. Lartera un citu (Larter et al., 2009) atklātā ledāja gultnes substrāta ietekme uz bazālo plūsmas režīmu sakrīt ar S.L. Grīnvuda un K.D. Klarka (Greenwood and Clark, 2010) pieņēmumiem par substrāta sekundāro, lokālo ietekmi uz reljefa formu izplatību un morfoloģiju, jo Amundsena līča gadījumā gultnes substrāta litoloģija ietekmē ledāja plūsmas bazālo režīmu, līdz ar to tikai netieši ietekmējot reljefa formu izplatību un morfoloģiju.

Viens no būtiskākajiem faktoriem, kas var ietekmēt zemledāja reljefa formu morfoloģiju ir ledāja plūsmas ātrums, to ir plaši analizējuši K.R. Stoukss un K.D. Klarks (Stokes and Clark 2002a). Autori ziņo, ka iepriekšējos pētījumos tikuši izvirzīti trīs faktori, kas var sekmēt garenu zemledāja reljefa formu izveidošanos. Šie faktori ir ātra ledus plūsma, ilgstoša ledus plūsma ar konstantu virzienu vai ledāja gultnes nogulumu īpašību variācijas.

Tiek aizstāvēts viedoklis, ka Kanādas Dubonta ezera ledus plūsmas radītie drumlini ir ātras, īslaicīgas plūsmas rezultāts. Attiecinot šo pieņēmumu uz citām teritorijām, tiek uzsvērts, ka tad, kad garenas ledāja gultnes formas ir veidojušās konverģentas ledus plūsmas apstākļos un tām ir augsts paralelītātes līmenis, to veidošanos var attiecināt uz ātru ledus plūsmu. Tomēr ātra ledus plūsma ne vienmēr radīs garenas ledāja gultnes reljefa formas, bet, ja šādas formas ir sastopamas, tad to veidošanās vistīcamākais mehānisms ir saistīts ar ātru ledus plūsmu. Autori (ibid.) pieņem, ka ļoti garas zemledāja reljefa formas, kurām garuma–platuma attiecība ir lielāka par 10, norāda uz ātru ledus plūsmu. Pastāvot viendabīgiem ģeoloģiskajiem un topogrāfiskajiem apstākļiem, garuma–platuma attiecība ir kvalitatīvs mērs ledus plūsmas ātrumam, deformācijas ātrumam un ledāja sakabinājumam ar gultni. Zemledāja reljefa formu dimensijas gan nevar tikt lietotas, lai kvantitatīvi novērtētu ledāja plūsmas ātrumu ledāja bazālās atkabināšanās variāciju dēļ.

1.3. Ledāja kustība un zemledāja gultnes deformācija

Ledāja kustība, tās veids un laiktelpiskās variācijas ir būtiskākie faktori, kas nodrošina drumlinu un citu zemledāja reljefa formu veidošanos. Kā norāda Dž. Menzijs (Menzies, 2002), ledāja kustība var norisināties triju procesu veidā kā ledus iekšējā deformācija, bazālais slīdējums un zemledāja gultnes deformācija. No tiem zemledāja reljefa formu izveidē vislielākā nozīme ir pēdējiem diviem, īpaši, kā atklāts pēdēja laikā, bazālā slīdējuma un gultnes deformācijas mainīgumam laikā un telpā. Ir jāņem arī vērā, ka ledāja kustība vienā un tajā pašā vietā, bet atšķirīgā laikā var notikt visu minēto procesu rezultātā.

Lai notiktu ledus iekšējā deformācija, jārodas spriegumam, kas pārsniedz ledus iekšējo kristālu struktūras pretestību, tā ledus deformējas sprieguma apstākļos kā viskozi plastisks materiāls. Šo deformācijas veidu var dēvēt arī par ledus iekšējo krīpu, kas notiek, ledum izslīdot pa iekšējām nošķēlumu plaknēm (ibid.)

Bazālā slīdēšana ir process, kurā ledāja kustība notiek, tam slīdot pāri ļoti plānai ūdens kārtiņai, kušanas ūdeņu slānim vai savienotiem ūdens dobumiem ledāja–gultnes mijiedarbības zonā. Ledum esot tuvu tā spiedienkušanas punktam, bazālā ledus deformācijas rezultātā rodas nepieciešamais kušanas ūdens. Bazālā slīdēšana nav nepārtraukta kustība, bet gan lēcienveidīga parādība, kuras norisi determinē ledāja sakabināšanās ar gultni un atkabināšanās no tās (ibid.). Bazālās slīdēšanas procesu ir detāli aprakstījis D.I. Bens un D.J.A. Evans (Benn and Evans, 1998).

Ledāja kustība gultnes deformācijas rezultātā notiek, ledājam deformējot noteiktu zemledāja nogulumu slāni vai arī to daļēji izvagojot (starpstāvoklis starp bazālo slīdēšanas un gultnes deformāciju) (Menzies, 2002).

Kā norāda J.A. Piotrovskis un citi (Piotrowski et al., 2004), zem silti bāzētiem ledājiem, kuru gultni veido nekonsolidēti nogulumi, ledāja kustība galvenokārt notiek bazālās slīdēšanas un gultnes deformācijas rezultātā ar visām iespējamajām šo mehānismu kvantitatīvajām kombinācijām.

To, vai ledāja kustība notiks, deformējot gultni vai bazālās slīdēšanas veidā, lielā mērā nosaka zemledāja gultnes litoloģija, tā var kontrolēt zemledāja hidroloģisko sistēmu, rezultātā arī paša ledāja kustību (Evans et al., 2006). Lai notiktu bazālā slīdēšana, ledājam ir jāatkabinās no gultnes augsta porūdēns spiediena rezultātā. Augstāks porūdēns spiediens būs smalkgraudainākos nogulumos sakarā ar zemāku ūdens caurlaidību. Kontrastā ar mālainu morēnu smilšaina morēna drenēsies labāk, rezultātā, lai notiktu bazālā atkabināšanās, porūdēns spiedienam būtu jābūt daudz lielākam. Tātad bazālā slīdēšana un gultnes deformācija lielā mērā ir atkarīgas no ledāja gultnes granulometriskā sastāva (Boulton, 1996; Evans et al., 2006).

Bazālajam slīdējumam ir liela nozīme sablīvējuma morēnas veidošanā, tā nogulsnējas spiedienkušanas un citu mehānisko procesu rezultātā; nogulsnēties var bazālā ledus, kas ir bagāts ar atlūzu materiālu, masas vai arī atsevišķas atlūzu daļiņas. Atlūzu daļiņu nogulsnēšanās process vājās gultnēs ietver arī gultnes izvagošanas procesu, jo atlūzu daļiņa tiek iespiesta gultnē, tā veidojot šķērslī, aiz kura var nogulsnēties arī citas daļiņas. Morēnas akumulācija ledāja gultnē var notikt arī dažādu vienlaicīgu procesu rezultātā, kā sablīvēšanās, izvagošana un bīdes deformācija (Evans et al., 2006).

Lai vispār varētu notikt bazālā slīdēšana, ledājam ir jāatkabinās no gultnes. Kā nozīmīgākais faktors ledāja un gultnes atkabināšanās veicināšanā parasti tiek minēts porūdēns spiediens. Dž.-E. Lesemans un citi (Leseman et al., 2010) piedāvā modeli, kurā nogulumu sedimentācijas un deformācijas procesu kontrolē efektīvā spiediena fluktuācijas, radot ledāja–gultnes atkabināšanās un sakabināšanās epizodes. Nogulumu sedimentācija notiek kušanas ūdeņu drenāžas epizodēs, kad porūdēns spiediens pārsniedz ledāja peldspējas spiedienu (*ice-floating pressure*) un ledājs atkabinās no gultnes: bīdes spriegums tuvinās nullei, rezultātā ledājs slīd pa zem spiediena esošu zemledāja ūdens slāni. Šīm zemledāja plūsmām ir segveida ģeometrija, kas rada plakaniskus smilts un grants slāņus, ko satur zemledāja gultnes reljefa formas. Šādām plūsmām ir raksturīga nestabilitāte, tās kļūst par zemledāja kanāliem, kurus aizpilda vāji šķīrota grants. Zemledāja notecei mazinoties, efektīvais spiediens pieaug, notiek ledāja–gultnes sakabināšanās, bīdes spriegums pieaug un nogulumi tiek pakļauti krokošanās

procesam. Lokāli ledāja sakabināšanās ar gultni notiek virs gultnes nelīdzenumiem, kas tiek pakļauti lielākajai daļai ledāja sprieguma. Vēlāk ledāja gultne tiek pakļauta daudz plašāk izplatītai deformācijai, bet tā kļūst seklāka (daži centimetri). Nogulumu sedimentācija un deformācija iekļaujas zemledāja procesu kontinuumā. Katra nogulumu daļa tiek pakļauta deformācijai, kas neskar apakšā esošos nogulumus, tādēļ kopīgā deformācija izriet no deformācijas, kam tiek pakļauta katra nogulumu daļa. Nevajadzētu uzskatīt, ka visa smilts un grants sekvenca ir tikusi pakļauta vienlaicīgam deformācijas procesam.

Mūsdienu ledājos ir identificēti divi deformācijas veidi. Pirmajā gadījumā deformācijas ātrums pieaug augšup ledāja malas virzienā. Otrajā gadījumā deformācijas ātrums pieaug lejup atrāvuma virsmas (*decollement*) virzienā. Deformācijas ātrums var atspoguļot atšķirīgo ūdens spiedienu zemmorēnas ūdens nesējslāņos un izraisīt krokošanos morēnas un pagulošā slāņa kontaktzonā (Evans et al., 2006).

Zinātniskajā literatūrā ir plaši apspriests jautājums par deformācijas gultnes izplatību un biežumu. J.A. Piotrovskis (Piotrowski et al., 2001) ir apkopojis datus, kuri norāda, ka pleistocēna segledājos nebija vajadzības pastāvēt zemledāja gultnei, kas tika pakļauta dziļas un plaši sastopamas deformācijas procesiem. A.M. Smita un T. Mareja (Smith and Murray, 2009) pētījums rāda, ka zem mūsdienu ledus plūsmām šāda deformējama gultne ir ļoti iespējama. Arī Dž.S. Boultons uzsvēra, ka deformējama ledāja gultne bijusi plaši izplatīta, uz to norāda gandrīz visur esošie drumlinu lauki (Boulton et al., 2001).

J.A. Piotrovskis un A.M. Krauss (Piotrowski and Kraus, 1997) uzsver, ka daudzi pētījumi ir postulējuši deformācijas gultņu eksistenci gan zem mūsdienu, gan pleistocēna segledājiem, tomēr autori (*ibid.*) noraida šādu pieņēmumu, jo viņu apsekotajos atsegumos nogulumu struktūra parasti ir netraucēta. Lielākoties šādus nogulumus pārstāv slāņotas smiltis un grants, ko no pārsedzošās morēnas atdala ass kontakts bez redzamas pakāpeniskas pārejas, kas būtu raksturīga, ja zemmorēnas nogulumi būtu tikuši pakļauti deformācijai. Uz plaši izplatītas deformācijas trūkumu norāda arī paleoaugsnes, kas sastopamas zem Vislas apledošanas morēnas. Var pieņemt, ka zemledāja deformācijai bija pakļauta tikai morēna, kuru no apakšā esošajiem nogulumiem atdalīja reoloģiska robeža. Šāda morēna tipiski ir līdz dažiem metriem bieza, un, ja vien nav pārsegta ar glacioakvālajiem nogulumiem, tā atsedzas zemes virskārtā. Lai gan morēnas slānis neapšaubāmi varēja tikt pakļauts deformācijai, nav pierādījumu, ka tā varētu būt plaši izplatīta. Tādai deformācijai būtu jāizraisa materiāla homogenizācija, bet bieži novērotie nekonsolidētu šķirotu nogulumu neregulārie – ieapaļie – ieslēgumi morēnā norāda uz ļoti ierobežotu deformācijas apjomu. Nogulumu deformācija autoru (*ibid.*) pētāmajā teritorijā (Ziemeļvācija) bija ierobežots maza deformācijas ātruma glaciotekonisks fenomēns, kas izpaudās telpiski ierobežotos apgabalos.

Ja jau zemledāja nogulumu deformācija nebija galvenais mehānisms, kas nodrošināja ledāja kustību, tad kustībai bija jābūt koncentrētai ledāja–gultnes mijiedarbības zonā. Kā norāda autori (ibid.), ir daudz pierādījumu ledāja slīdēšanai pāri gultnei, dažādas izvagošanas zīmes un svītrojumi morēnas pamatnē un arī iekšienē, kā arī morēnā ieslēgtu iežu vai nogulumu bloku “astes” augšējā daļā, kas vērstas ledāja kustības virzienā. Ja morēna būtu pakļauta deformācijai, šādi ieslēgti bloki būtu rotējuši un neliela erozijas “aste”, kas vērsta pretējā virzienā, būtu izveidojusies arī zem bloka. Minētie fakti liecina, ka ledāja kustību galvenokārt nodrošināja bazālās slīdēšanas un substrāta izvagošanas kombinācija. Tomēr, tā kā deformācija lokāli var norisināties, ledāja gultni var iztēloties kā mozaīku no lielākoties stabiliem un izolētiem deformācijas apgabaliem.

Zemledāja apstākļu variācijas, kas rada gultnes mozaīkveida deformācijas, ir ietvertas teorijā par, tā saucamajiem, pielipšanas punktiem (Stokes et al., 2007). Kopš pirmoreiz tika izvirzīti teorētiskie pieņēmumi par šādiem punktiem (Alley, 1993), ir radusies teorija, ka ledāja gultni veido mozaīka no stabiliem un deformējamiem iecirkņiem (Piotrowski and Kraus, 1997). Vēlāk tika arī izstrādāts konceptuāls modelis par šādiem laikā un telpā mainīgiem iecirkņiem (Piotrowski et al., 2004), to apstiprina arī pētījumi mūsdienu ledājos (King et al., 2007; Smith and Murray, 2009).

E.K. Kinga un citu (King et al., 2007) pētījums par zemledāja reljefa formām Antarktīdā zem aktīvas Ratforda ledus plūsmas atklāja, ka šīs plūsmas sākuma zona ir aktīva sedimentācijas sistēma, kas iekļauj gan nogulsnešanās, gan erozijas un/vai deformācijas apgabalus. Šāda pazīmju kombinācija, kā norāda iepriekš minētie autori (ibid), ir savienojama ar klasisko Dž.S. Boultona (Boulton, 1987) gultnes deformācijas hipotēzi par drumlinu veidošanos. Apgabalu eksistenci, kuros pastāv atšķirīgi bazālie apstākļi apstiprina arī citu autoru pētījums jau minētās Ratforda ledus plūsmas ietvaros (Smith and Murray, 2009). Viņi arī (ibid.) norāda, ka šādi bazālie apstākļi atbilst sauszemes studiju izvirzītajiem modeļiem, kuros ledāja gultni veido stabili un deformējami iecirkņi, kas variē gan telpā, gan laikā.

A.M. Smits un T. Marijs (Smith and Murray, 2009) apstiprina, ka zem Ratforda ledus plūsmas, Antarktīdā, pastāv atšķirīgi bazālie apstākļi; tas ir saskaņā ar sauszemes studiju modeļiem par ledāja gultnes mozaīku, kas sastāv no stabiliem un deformējamiem apgabaliem, juri variē telpā un laikā. Ledus plūsmas zemledāja reljefu formu ģeometrija un bazālie apstākļi sakrīt ar agrāko ledus plūsmu interpretācijām par drumlinu garuma–platuma attiecību, kas palielinās ledus plūsmas virzienā. Ratforda ledus plūsmas sākumdaļā ir konstatēti deformācijas gultnes apstākļi, kas aptuveni vidusdaļā mainās uz bazālo slīdējumu. Teritorijā, kur dominē bazālā slīdēšana, turpinās vairāki deformācijas gultnes apgabali, kas reljefā izpaužas kā iegareni pauguri, no kuriem daži noteikti ir drumlini. Paugurus veido

deformējami nogulumu, un tie ir vērsti ledāja kustības virzienā. Kā norāda autori (ibid.), eksistē divi vispārīgi gultnes deformācijas procesu modeļi. Pirmajā no tiem pastāv izteikta sakabināšanās starp ledāju un viskozu nogulumu gultni, kas pakļauta plašai deformācijai vairāku metru dziļumā. Otrajā modelī deformācija notiek tikai zemledāja nogulumu slāņa pašā virsējā daļā; zems efektīvais spiediens, kad ūdens spiediens ir tuvs ledāja spiedienam, izsauc palielinātas bazālās slīdēšanas periodus. Abiem modeļiem ir pierādījumi no lauka novērojumiem. Autoru (ibid.) dati norāda, ka pastāv laikā un telpā mainīga ledāja–gultnes mozaikveida struktūra no deformējamiem un stabiliem apgabaliem, kā to ierosinājis J.A. Piotrovskis un citi (Piotrowski et al., 2004). Seismiskie dati (Smith and Murray, 2009) sakrīt ar J.A. Piotrovskā un citu (Piotrowski et al., 2004) interpretāciju par deformējamo nogulumu dziļuma un izplatības variācijām un bazālo apstākļu mainību laikā un telpā, tomēr pastāv dažas atšķirības. Seismiski dati apliecina, ka plaša deformācija var būt izplatīta vairāku metru dziļumā, līdz pat 12 m, kā arī deformējama gultne jebkurā laikā var pastāvēt daudzu kvadrātkilometru platībā.

J.A. Piotrovskis un citi (Piotrowski et al., 2004) ir postulējuši deformācijas apgabala veidošanos zemledāja gultnē. Tas rodas, kad ūdens spiediens pietuvojas ledus peldspējas punktam (*ice flotation point*). Deformācijas apgabala novietojumu zemledāja sistēmā nosaka gultnes spēja novadīt porūdeni, respektīvi, tie ir zemas caurlaidības apgabali. Labvēlīgos apstākļos deformācijas apgabals izpletīsies un ietekmēs aizvien lielāku gultnes daļu. Tas var arī sarukt, liekot iepriekš deformējamiem apgabaliem kļūt stabiliem. Atkarībā no kontrolparametru fluktuācijām deformācijas apgabals var mainīt savu ģeometriju, iesniedzoties dziļāk, bet sarūkot laterāli. Šāda deformējama un stabila apgabalu mozaika ir ļoti mainīga laikā un telpā, tādēļ viens un tas pats apgabals var tikt pakļauts daudzkārtīgām stabila un deformējama apstākļu fāzēm. Stabili apgabali visdrīzāk rodas bazālās atkabināšanās dēļ, ledājam slīdot pāri plānam ūdens slānītim. Deformāciju klātbūtni morēnā ir jāuzlūko kā kopīgu efektu, kas radies visa glaciāla cikla laikā. Zemledāja gultnei nav jābūt pakļautai dziļai un plaši izplatītai deformācijai, jo deformācija varēja notikt plānos, īslaicīgi pastāvošos apgabalos. Vienā laika posmā deformācijai bija pakļauta tikai daļiņa no gultne.

Kā norāda J.A. Piotrovskis un A.M. Krauss (Piotrowski and Kraus, 1997), tad nav labi dokumentētu mūsdienu analogu, kas pārlicinoši palīdzētu interpretēt plaši deformējamo gultņu izplatību zem senajiem pleistocēna ledājiem. Deformācijas gultnēm, kas atrastas zem mūsdienu ledājiem, raksturīgi diezgan specifiski ģeoloģiskie un glacioloģiskie apstākļi.

Zemledāja nogulumu deformācija var būt nozīmīgs glacioloģiskais process, bet tas izpaudās daudz mazākā mērogā, nekā tiek uzskatīts. Deformācija visdrīzāk ir fokusēta ne vairāk kā dažus cm biezā zonā un tikai noteiktās ledāja gultnes daļās, nevis vairāku metru

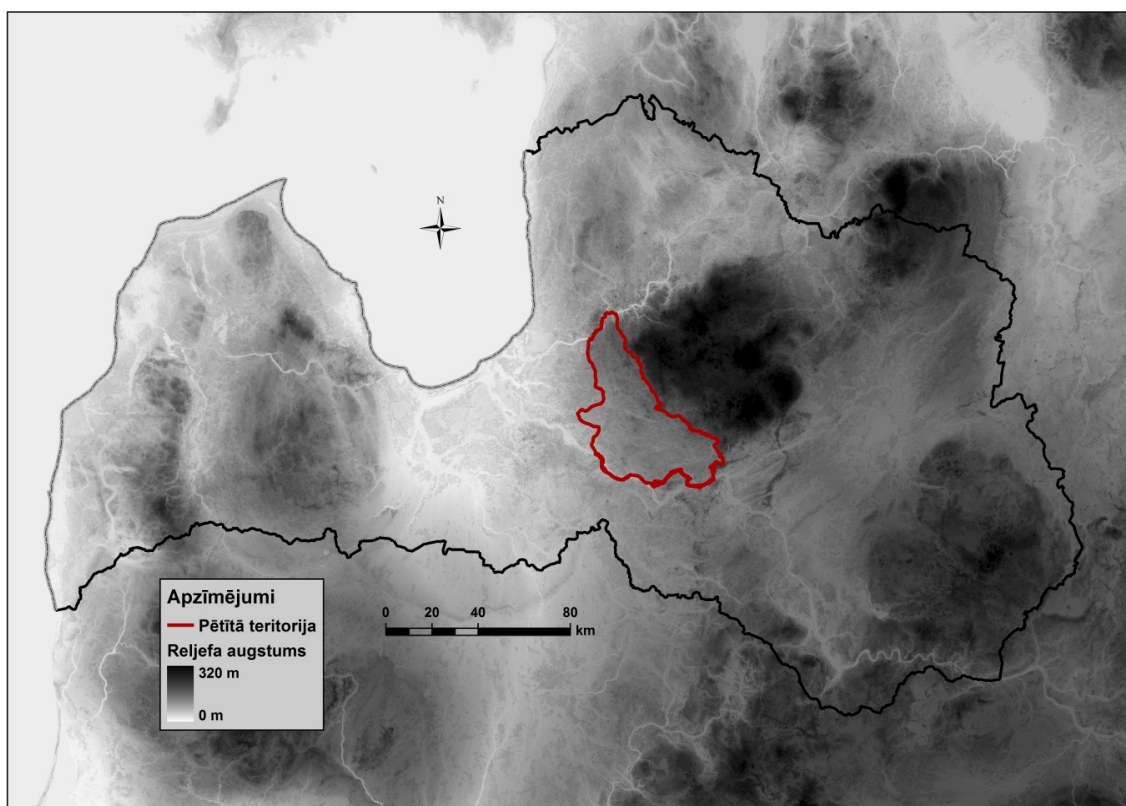
dziļā slānī plašā gultnes daļā. Šie deformācijas plankumi bija mainīgi laikā un telpā; viens gultnes apgabals varēja tikt pakļauts vairākām gultnes deformācijas un stabilitātes fāzēm. Deformējamā gultnes daļa noteiktā laikā var būt relatīvi maza, ja nogulumi norāda uz deformāciju, tas var būt arī kopējs efekts, kas izveidojies ilgākā laikā vairākās deformācijas fāzēs. Stabilos apgabalus starp deformācijas plankumiem raksturo plāna ūdens kārtiņa, kas atdala ledāju no substrāta, kad ūdens spiediens sasniedz peldspējas līmeni (Piotrowski et al., 2001)

Dž.S. Boultons un citi (Boulton et al., 2001) apgalvo, ka zemledāja sistēmas mehānisko darbību nenosaka vienkārši morēnas īpašības; to kontrolē zemledāja ūdens režīms, kuru nosaka zemledāja drenāžas raksturs. Lauka eksperimentu rezultāti rāda, ka zemledāja hidrauliskās sistēmas režīms ir vitāli svarīgs, kontrolējot ledāja un morēnas deformācijas procesu saistību.

2. PĒTĀMĀS TERITORIJAS ĢEOLOĢISKI ĢEOMORFOLOĢISKAIS RAKSTUROJUMS UN IESKATS IZPĒTES VĒSTURĒ

2.1. Pētāmās teritorijas ģeoloģiski ģeomorfoloģiskais raksturojums

Pētāmā teritorija atrodas Viduslatvijas zemienes ziemeļaustrumu daļā un ietver Madlienas nolaidenumu (2.1.1. att.), kas robežojas ar Gaujas senieleju ziemeļos un Lejasdaugavas senieleju dienvidos. Rietumos nolaidenuma robeža ar Ropažu līdzenumu sakrīt ar Silciema sprostezera maksimālās izplatības krasta līniju un aptuveni arī šī sprostezera nogulumu izplatības austrumu robežu. Ropažu līdzenumā aktīva ledāja radītie veidojumi jau ir pārveidoti vai pārsegti ar Silciema un Zemgales sprostezeru un Baltijas ledus ezera nogulumiem. Ievērojamākās reljefa formas šajā teritorijā ir Kangaru osu grēdas. To distālie gali un deltas iesniedzas arī Madlienas nolaidenumā (Lamsters, 2009). Pētītās teritorijas austrumu robeža ar Vidzemes augstieni stiepjas gar šīs augstienes periferiālās zonas orientētā ledāja malas veidojumu reljefa ledus kontakta nogāzes pakāji (Āboltiņš et al., 1975). No Austrumlatvijas zemienes Aronas paugurlīdzenuma Madlienas nolaidenumu DA šķir Pļaviņu valnis, kas ir Sēlijas paugurvaļņa turpinājums Daugavas labajā krastā (Zelčs, 1998b).



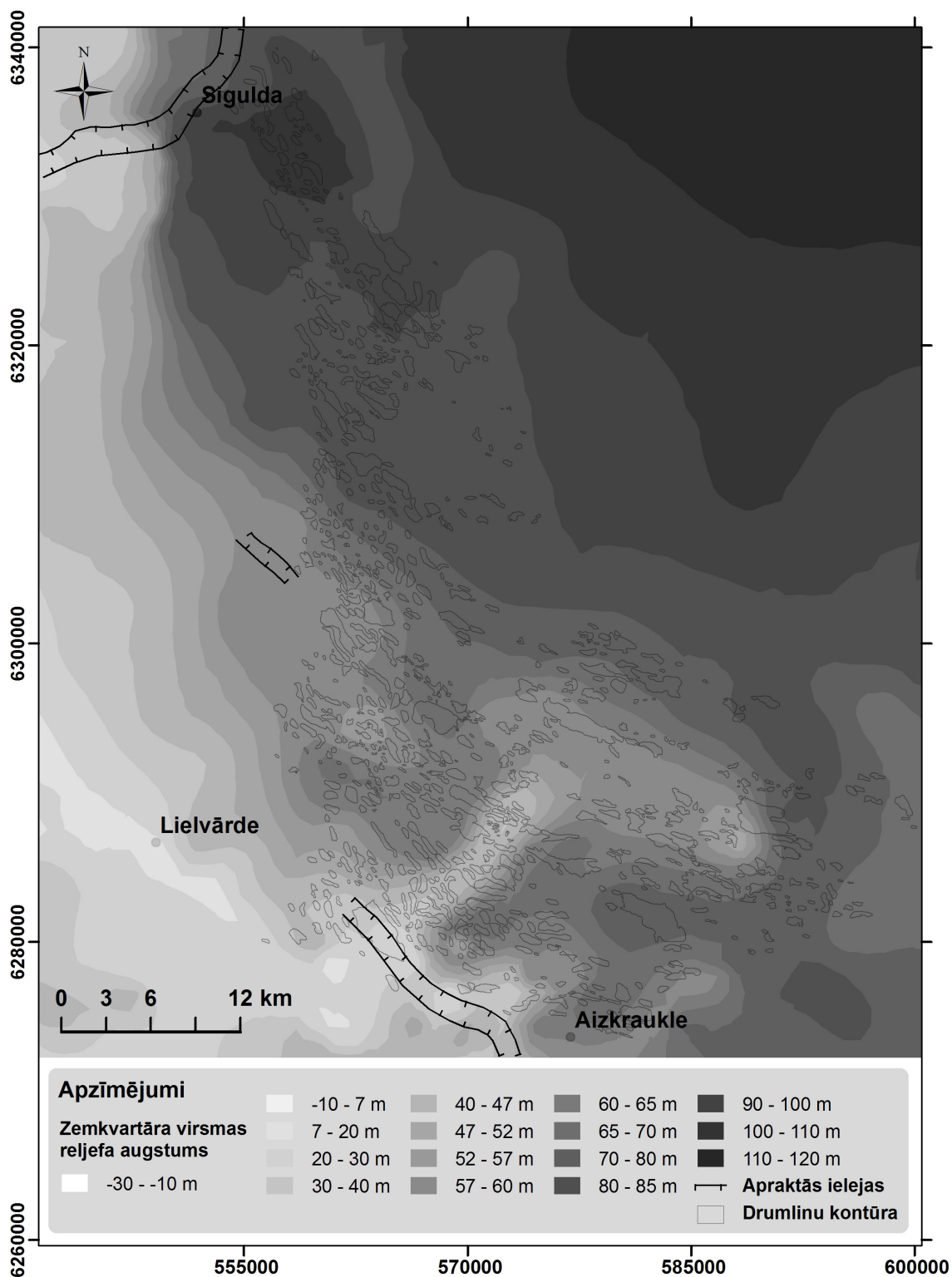
2.1.1. attēls. Pētāmās teritorijas novietojums saistībā ar mūsdienu zemes virsmas reljefu (izstrādājis autors, izmantojot SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*) digitālo augstuma modeli (pieejams <http://srtm.csi.cgiar.org/SELECTION/inputCoord.asp>))

Pamatiežu virsma pētāmajā teritorijā kopumā pazeminās no 100 līdz 0 m vjl. virzienā no ZA uz DR (2.1.2. att.). Galējā ZA stūrī pamatiežu virsā izdalās lokālais paaugstinājums ar augstāko atzīmi 112 m vjl. Madlienas nolaidenuma DA daļā – Ķeipenes, Zādzenes, Vecbebru un Rīteru apkaimē – sastopami arī citi sīkāki lokālpaaugstinājumi un palikšņi (Zelčs, 1998b). Pamatiežu virsmu saposmo arī apraktās ielejveida formas – Gaujas senieleja posmā no Līgatnes līdz Murjāņiem, Daugavas senieleja posmā augšpus Skrīveriem, neliela apraktā ieleja ir uz D no Suntažiem, kur pamatiežu virsma sasniedz zemāko hipsometrisko atzīmi – 81 m zjl. Teritorijā sastopamas arī mazākas ielejveida formas, kas sakrīt ar Ogres, Lielās Juglas, Tumšupes un Krievupes ielejām. Apvidū starp Lielvārdi un Aizkraukli vērojams iegarens pamatiežu virsmas pazeminājums ar kritumu ZA–DR virzienā, kas stiepjas perpendikulāri ielejveida formai (2.1.2. att.). Pamatiežu virsmas saistība ar drumlinu izplatību un morfoloģiju plašāk analizēta diskusijas nodaļā.

Madlienas nolaidenumā pamatiežu virsā atsedzas augšdevona Gaujas, Amatas, Katlešu un Ogres svītu terigēnie ieži, kā arī Pļaviņu, Salaspils un Daugavas svītu karbonātieži (Brangulis u.c., 1998). Šo svītu augšdaļu veido litoloģiski atšķirīgi ieži. Gaujas svītas augšdaļā ir izteikta māla, smilšakmens un aleirolīta mija. Amatas svītas virsējo daļu veido smilts, smilšakmens un aleirolīta slāņkopa. Ogres svītas augšdaļa sastāv no māla un dolomītmerģeļa ar smilšakmens starpslāņiem. Pļaviņu svītu galvenokārt veido dolomīts un dolomītmerģelis ar plānām māla starpkārtām. Salaspils svīta sastāv no māla, dolomītmerģeļa, mālaina dolomīta un ģipšakmens. Daugavas svītu veido dolomīts un dolomītmerģelis (Liepiņš, 1961; Brangulis u.c., 1998). Kā norāda M. Lavrinoviča (1961), pētāmajā teritorijā sastopamie pamatieži ir diezgan ūdens mazcaurlaidīgi. Gaujas svītas augšējā daļā aleirolīts un māls veido ūdensmazcaurlaidīgu joslu starp Gaujas un augstāk gulošo Amatas ūdens horizontu; Salaspils svītas apakšējā un augšējā daļa parasti sastāv no māla un merģeļa, kas ir ūdensmazcaurlaidīgi ieži; Ogres svītā mālainie ieži sastopami kā svītas apakšējā, tā arī augšējā daļā un izveido horizonta ūdensmazcaurlaidīgo sprostslni.

Lielākā daļa Madlienas nolaidenuma glaciotektonisko reljefa formu atrodas Ogres svītas iežu izplatības areālā. Zemā pamatiežu ūdens caurlaidība varēja sekmēt drumlinu veidošanos, jo kvartāra nogulumos tika uzturēts augsts porūdens spiediens, kas sekmēja morēnas horizontālās bīdes pretestības samazināšanos, veicinot deformāciju rašanos (Āboltiņš 1999; Rattas and Piotrowski 2003; Rattas 2004). Augsts porūdens spiediens varēja izraisīt arī glaciotektonisko formu kodolos esošo ledājkūšanas ūdeņu nogulumu deformēšanos. Pastāvot augstam porūdens spiedienam, efektīvais spiediens tuvojas nullei, nogulumi piesātinās ar ūdeni un ļoti ātri deformējas (Menzies, 2002).

Iepriekš minētais pamatiežu sastāvs gan ir vispārīgs un var neattiekties tieši uz zemkvartāra virsmā dominējošajiem iežiem, kā arī ir veikti jaunāki pētījumi, īpaši 1:200 000 mēroga kvartārģeoloģiskās kartēšanas rezultātā, kas liek apšaubīt ūdens mazcaurladīgo iežu dominanci Madlienas nolaidenumā.



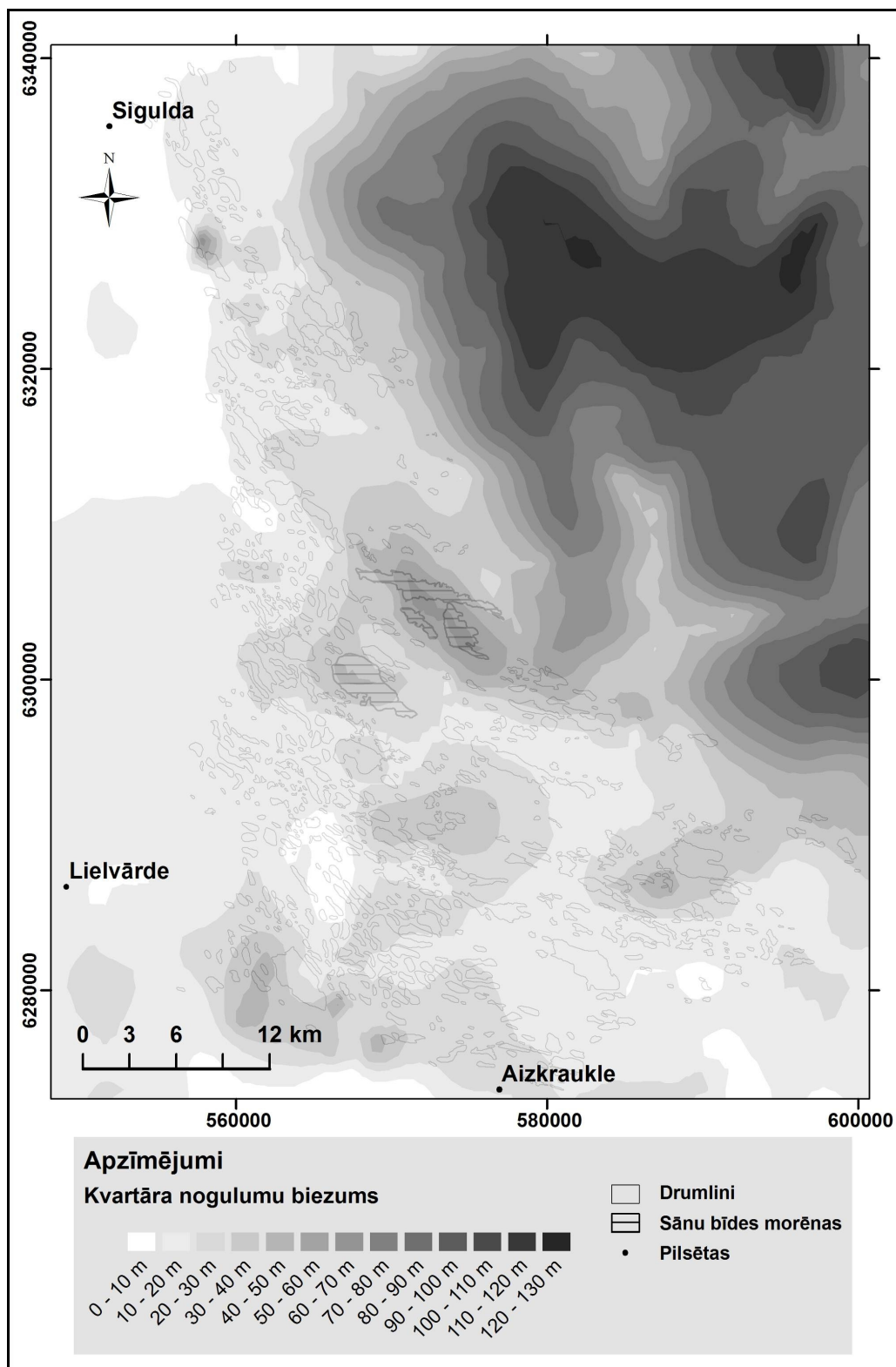
2.1.2. attēls. Madlienas nolaidenuma zemkvartāra virsmas reljefs un drumlinu izplatība (sagatavojis autors, izmantojot LU karšu servisa kartes.geo.lu.lv slāni LVGD Zemkvartara, papildinot to ar urbumu datiem no LVĢMC DB "Urbumi" un Valda Juškeviča personīgā kvartāra urbumu arhīva)

Pamatojoties uz urbumu datiem (LVGMC DB "Urbumi"; V. Juškeviča personīgais kvartāra urbumu arhīvs), Madlienas drumlinu laukā un tuvākajā apkārtnē tika noteikts zemkvartāra virsu veidojošo pamatiežu litoloģiskais sastāvs. Diemžēl urbumu izvietojums nav vienmērīgs, lielākā daļa ir koncentrēta drumlinu lauka Z un D daļā. Drumlinu lauka vidusdaļa atrodas Ogres svītas izplatības areālā, tur ir konstatēti dolomīts, mergēlis, aleirolīts, smilšakmens un māls, tādēļ nav pamata uzskatīt, ka Ogres svītas virsējā daļa Madlienas nolaidenumā sastāvētu no terīgēnajiem iežiem. Kopumā iežu litoloģiskais sastāvs pamatiežu virsmā ir visai mainīgs visas teritorijas ietvaros. Drumlinu lauka Z daļu, kur ir liela urbumu koncentrācija, lielākoties aizņem augšdevona Pļaviņu un Daugavas svītas, kurām ir raksturīgi karbonātiski ieži, bet Salaspils svītai arī sulfātieži (Brangulis u.c., 1998). Urbumu dati apstiprina dolomīta lielo īpatsvaru šajās svītās, tomēr dolomīta izplatību pamatiežu virsmā vietām nomaina māls. Tā kā dolomīts pārsvarā ir plaisains un kavernozs, tam raksturīga liela horizontālā ūdenscaurlaidība, tādēļ var pieņemt, ka pirmskvartāra ieži šajā teritorijā vismaz vietām sekmēja porūdus līmeņa samazināšanos. Pirmskvartāra nogulumu kartē (LVGD Pirmskvartāra) drumlinu lauka sākumdaļā ir iezīmēta krauja, kas varēja sekmēt nelielu ledus plūsmas ātruma samazināšanos teritorijā. Kraujas eksistenci apstiprina zemkvartāra virsma reljefa karte (2.1.2. att.), kur novērojams pacēlums reljefā ar stāvu nogāzi ZR virzienā perpendikulāri ledāja kustības ātrumam. Abi minētie apstākļi varēja sekmēt vai arī pastiprināt ledāja sakabināšanos ar gultni, jo krauja kā šķērslis bremsēja ledāja kustību (Āboltiņš, 1975), mazinot ledus bazālā slīdējuma iespējamību, kā arī mazcaurlaidīgāku iežu (Amatas, Gaujas svītu terīgēnie ieži) nomaina ar karbonātiem iežiem varēja izsaukt porūdus spiediena mazināšanos, tam drenējoties plaisainos dolomītos. Šādi apstākļi varēja iniciēt drumlinu veidošanos Madlienas nolaidenuma ziemeļdaļā. Analizējot Apriķu ledus mēles darbību, līdzīgu gadījumu apraksta T. Saks un līdzautori (Saks et al., in press).

Drumlinu lauka pašā DA daļā zemkvartāra iežu virsmu veido gandrīz tikai dolomīts, kam arī šajā teritorijā varēja būt liels porūdus spiedienu pazeminošs potenciāls. Lielāku ledāja sakabināšanos ar gultni un bremsēšanos varēja arī pastiprināt zemkvartāra virsmas slīpuma pieaugums pret ledāju. Šī Madlienas nolaidenuma daļa raksturojama ar ledāja malas tuvumu, turpmāku ledāja izplatību ierobežoja ledus masas bilance, kas nebija pietiekami liela ledus plūsmas tālākai nodrošināšanai.

Glaciotektoniskās darbības rezultātā veidotās reljefa formas kopumā ir izplatītas gan terīgēno, gan karbonātisko pamatiežu izplatības vietās. Iežu litoloģiskais sastāvs ir diezgan atšķirīgs (smilšakmens, aleirolīts, māls, domerīts, dolomīts, ģipsis, turklāt sastopami dažādi starpslāņi). Zemledāja gultnē sastopamo iežu litoloģijai kopumā nav novērojama saistība ar drumlinu izplatību un morfoloģiju, tādēļ var secināt, ka drumlinu izplatība un morfoloģiskās

variācijas Madlienas nolaidenumā nav atkarīgas no zemledāja gultnes litoloģiskā sastāva. Tomēr ļoti iespējams, iežu litoloģiskā mainība, atšķirīgā ūdenscaurlaidība noteica zemledāja gultnes deformācijas koncentrāciju noteiktos gultnes apgabalos, veidojot mozaīkveida struktūru no deformējamiem un stabiliem apgabaliem.



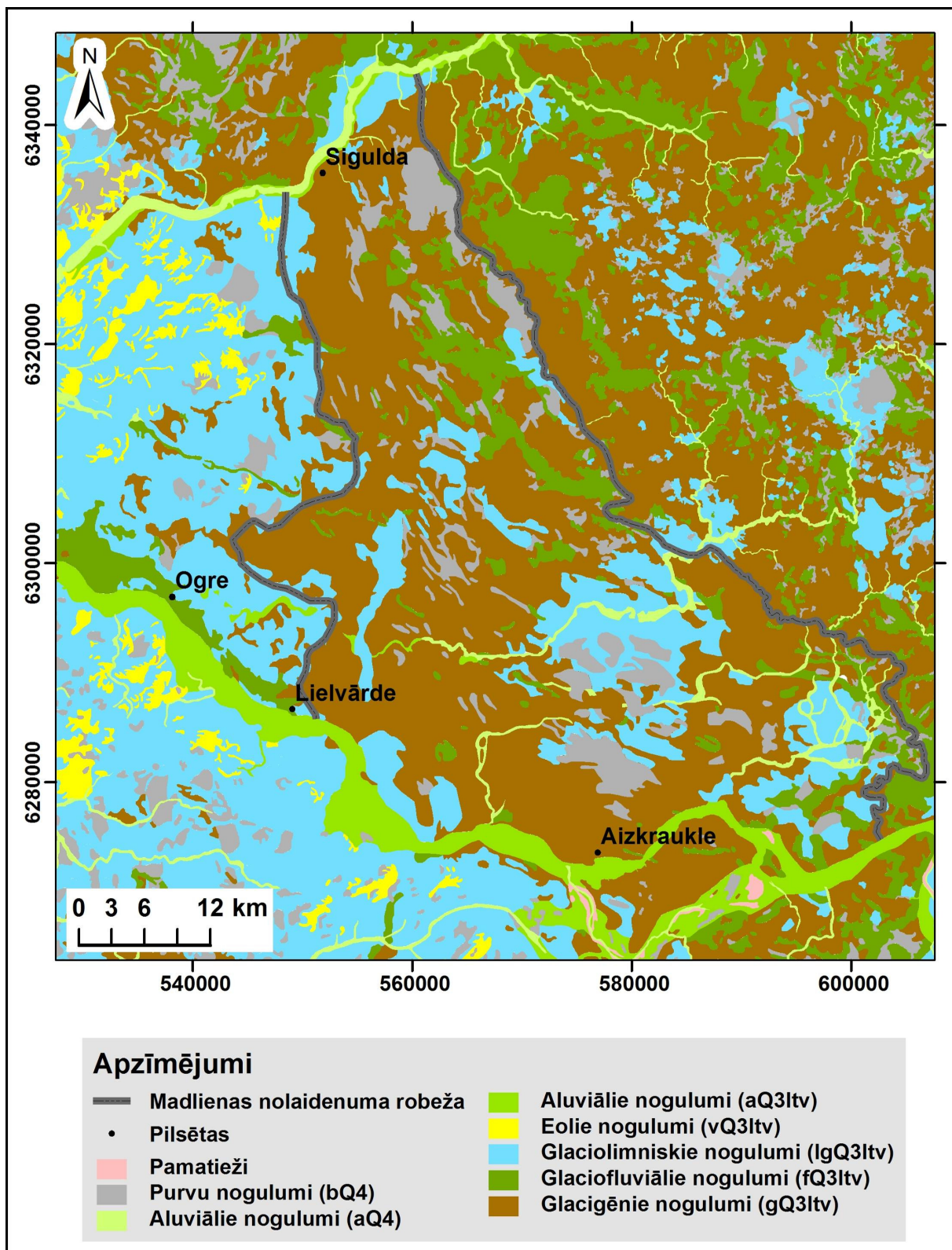
2.1.3. attēls. Madlienas nolaidenuma kvartāra nogulumu biezums (sagatavojis autors, izmantojot LU karšu servisa kartes.geo.lu.lv slāni LVGD Kvartāra biezums, papildinot to ar urbumu datiem no LVĢMC DB "Ūrbumi" un Valda Juškeviča personīgā kvartāra urbumu arhīva)

Izanalizējot pētītās teritorijas ģeoloģisko uzbūvi, var secināt, ka lielākajā daļā Madlienas drumlinu laukā kvartāra nogulumu biezums ir 10–20 m (2.1.3. att.), ar atsevišķiem apgabaliem, kur slāņkopas biezums sasniedz 30–40 m. Biezākie nogulumu koncentrēti atsevišķās reljefa formās. Vislielākais nogulumu biezums ap 70 m sastopams teritorijas ZA daļā, Vidzemes augstienes tuvumā, kur konstatētas vairākas grēdveida formas, kas varētu tikt interpretētas kā bīdes sānu morēnas.

Kvartāra nogulumus (2.1.4. att.) galvenokārt veido Vēlā Vislas leduslaikmeta morēna ar dažāda biezuma granšainas smilts, retāk aleirīta vai māla starpslāņiem un ieslēgumiem; vaļņveida formu kodolos šis materiāls ir glaciotektoniski dislocēts, veidojot lineāras izspieduma tipa krokas, vietām izspiežoties cauri pārsedzošās morēnas slāņkopai. (Zelčs 1993a; Meirons *et al.* 2002). Glaciofluviālie un glaciolimniskie nogulumu pētāmajā teritorijā veido ne tikai glaciotektonisko reljefa formu kodolus, bet leduslaikmeta deglaciācijas posma glacioakvāli enogulumu ir sastopami arī osos, to deltās, ledāja kušanas ūdeņu noteces ielejās, glaciofluviālajos līdzenumos, Silciema un Daudzevas ledāja sprostezeru, kā arī Līgatnes un Lobes distālo ledājūdeņu baseinu smilšsainajos un puteklainajos līdzenumos, kas izplatīti teritorijas R daļā, kā arī galējos Z un DA. Madlienas nolaidenumā kvartārsegas virsdaļā dominējošie morēnas nogulumu bieži vien kopā ar senākiem ledājkušanas straumju nogulumiem galvenokārt veido glaciotektoniskās reljefa formas – konverģentos drumlinus (Zelčs 1993a, b), Linkuvas gala morēnai atbilstošo Lielvārdes–Jūdažu malas veidojumu joslu un recesionālās morēnas (Āboltiņš, 1970). Daļa no tām mūsdienās gan tiek uzskatīta par rievotajām morēnām (Straume, 1979; Āboltiņš, 1989; Zelčs, 1993).

A. Savvaitovs un J. Straume (Savvaitov and Straume, 1963) ziņoja, ka posmā starp Daugavas un Gaujas lejtecēm var izdalīt divus morēnas horizontus, precīzāk, slāņkopas, kas atbilst pēdējam apledojumam. Apakšējā morēnas slāņkopa, pēc autoru (*ibid.*) domām, veidojās saistībā ar pirmo ledāja uzvirzīšanos, kas iznīcināja ne tikai iepriekšējo apledojumu nogulumus, bet arī erodēja pamatiežus.

Augšējās morēnas slāņkopas veidošanās notika vēlāk, nākamajā ledāja uzvirzīšanās stadijā, kad ledāja erodējošā darbība bija krietni mazāka. Par to liecina apakšējā morēnas slāņkopas labā saglabātība un pamatiežu ietekmes trūkums uz augšējās morēnas slāņkopas sastāvu. Apakšējai morēnas slāņkopai ir raksturīgs lielāks blīvums un mālainība salīdzinājumā ar augšējo horizontu, pārsvarā sastopams morēnas smilšmāls, lielākie morēnas biežumi pārsniedz 4,85 m urbumā “Zemzari” (*ibid.*). V. Zelčs un A. Markots (2004) norāda, ka divas minētās morēnas slāņkopas ir veidojušās attiecīgi Gulbenes un Linkuvas oscilāciju laikā, bet vēlāk zemledāja un marģinālos apstākļos glaciotektonisko procesu ietekmē ir notikusi morēnas slāņkopu fragmentācija.



2.1.4. attēls. Madlienas nolaidenuma kvartāra nogulumu izplatības karte (sagatavojis autors, izmantojot LVGD Kvartāra nogulumu karšu mozaīka vektordatu formātā, kas papildināta un labota pēc LU karšu servisa kartes.geo.lu.lv slāņa LVGD Kvartargeologija).

2.2. Pētījumu vēsture

Madlienas nolaidenums kopumā līdz šim nav ticis detāli pētīts. Lielāka uzmanība ir tikusi pievērsta atsevišķām reljefa formām – Kangaru osiem, kuri gan tikai nedaudz iekļaujas Madlienas nolaidenumā, un Linkuvas gala morēnas veidojumiem, saistībā ar to lielo nozīmi ledāja deglaciācijas gaitas rekonstrukcijā.

Teritorijas lielākajā daļā ir veikta tikai 1:200 000 mēroga kompleksā ģeoloģiskā, hidroģeoloģiskā un inženierģeoloģiskā kartēšana (Mironovs un Vācele, 1962; Gavrilova u.c., 1962). Kartēšanas rezultātā radītās kartes, atskaites utt. ir apjomīgākais materiāls par Madlienas nolaidenuma uzbūvi.

Pirmoreiz latviešu valodā pētāmās teritorijas reljefu nedaudz piemin V. Zāns (1936), īpaši tiek raksturoti Kangaru osi. V. Zāna izstrādātajā Latvijas kvartārģeoloģiskajā kartē atzīmēti Ogres, Mazie un Lielie Kangari, vairākas gala morēnas, no kvartāra nogulumiem iezīmēta pamatmorēna ar nedaudziem smiltājiem. Kā norāda V. Zāns (ibid.), Kangaru osus ir aprakstījis B. Doss jau 1895. gadā. V. Zāns (1935) arī ir apkopojis retos glaciālo skrambu mērījumus Madlienas nolaidenumā un tuvējā apkārtnē.

Turpmākie pētījumi Madlienas nolaidenumā pamazām atsākas tikai sešdesmitajos gados. A. Jaunputniņš (1961) izveido Latvijas PSR ģeomorfoloģisko karti, Madlienas nolaidenumā iezīmējot glacigēnos, fluvioglaciālos un limnoglaciālos (lietojot mūsdienā sstarptautiski izmantojamus terminus – glaciofluviālos un glaciolimniskos – *autora piez.*) līdzenumus, no ledāja reljefa formām tikai trīs Kangaru osus, ko jau identificēja iepriekšējie pētnieki. Gala morēnas, kas bija iezīmētas V. Zāna kartē, šeit nemaz neparādās.

1961. gadā iznāk I. Danilāna pārskats par kvartāra periodu Latvijā (Danilāns, 1961), kurā atsevišķi tiek pieminēti arī Madlienas nolaidenums (nereti literatūrā Madlienas nolaidenums tiek minēts arī kā Viduslatvijas nolaidenums). I. Danilāna izveidotajā Latvijas kvartāra veidojumu shēmā Madlienas nolaidenums atzīmēts kā viļņots morēnas līdzenums, ar atsevišķiem fluvioglaciālo smiltāju iecirkņiem, no kuriem plašākais ir Lobes ezera apkaimē. No morēnas līdzenuma uz R ziemeļdaļā ir fluvioglaciālais smiltājs, dienvidos – limnoglaciālie nogulumi, kā arī ir Kangaru osi. No Lobes ezera uz R ir identificēts neliels apgabals ar drumliniem, ko maģistra darba autors raksturo kā Madlienas drumlinu lauka DR daļu, kur ir raksturīgs arī lielākais drumlinu blīvums. Šo apgabalu I. Danilāns (ibid.) raksturo kā orientētu drumlinizēta rakstura reljefu ar ZR–DA virziena orientējumu. I. Danilāns nošķir šo reljefu no Mālpils apkārtnē dominējošajiem garenajiem Z–D virzienā orientētajiem lēzenajiem pauguriem.

A. Savvaitovs un J. Straume (1963) teritorijā starp Daugavas un Gaujas lejtecēm, kas daļēji ietver arī Madlienas nolaidenumu, raksturo kvartāra nogulumus, galveno uzmanību pievēršot Latvijas apledošanas divu morēnas horizontu izdalīšanai, tiek raksturoti vairāku atsegumu un urbumu griezumi, norādīti morēnas biežumi un abu horizontu horizontu (mūsdienu izpratnē slāņu – *autora piez.*) atšķirīgās īpašības.

Pirmo plašāko Madlienas nolaidenuma reljefa formu aprakstu publicē O. Āboltniņš (1970), īpašu uzmanību pievēršot marginālajiem veidojumiem. Galvenokārt tiek raksturoti Linkuvas gala morēnas veidojumi un morēnuvāli, to atšķirīgā orientācija un morfoloģija, ir izstrādāta arī līdz tam laikam detālākā Madlienas nolaidenuma ģeomorfoloģiskā shēma, kurā atzīmēts plašs klāsts ledāja reljefa formu.

Apskatot Daugavas upju baseina ģeoloģiju un ģeomorfoloģiju, G. Eberhards (1972) galvenokārt raksturo lielāko upju ieleju veidošanās aspektus un apskata arī Madlienas nolaidenumu kā Daugavas baseina sastāvdaļu, raksturojot ledāja sprostezeru attīstību, kā arī nedaudz atsevišķas reljefa formu grupas – Linkuvas gala morēnas vaļņus, morēnuvālus un osus.

I. Danilāns (1973) monogrāfijā par Latvijas kvartāra nogulumiem dod plašu atsevišķu ledāja reljefa formu aprakstu, nedaudz pieminot arī pētāmās teritorijas veidojumus.

Meirons un citi (1976) aplūko dažādus Latvijas marginālos veidojumus, tostarp Linkuvas gala morēnas vaļņus. Tiek arī raksturotas Latvijas deglaciācijas fāzes (tostarp, Gulbenes un Linkuvas), izveidota shematiska Latvijas ģeomorfoloģiskā karte, tajā attēlojot kvartāra nogulumu izplatību un reljefa formas – osus, gala morēnas vaļņus un uvālus, drumlinus un drumlinveidīgas formas, paugurgrēdu malas veidojumus, ledāja kušanas ūdeņu noteces ielejas un citas formas.

G. Eberhards (1977) raksturo atsevišķas reljefa formas, tostarp pieminot Viduslatvijas zemienes ZA daļai piederīgas formas, piemēram, drumlinus (morēnas uvālus), osus, gala morēnas vaļņus un atšķelšanās vaļņus. Pēdējie mūsdienu izpratnē var tikt dēvēti kā bīdes sānu morēnas veidojumi.

J. Straume (1979) samērā sīki apraksta Viduslatvijas zemienes reljefa formas, lielu uzmanību pievēršot arī tā ziemeļaustrumu daļas veidojumiem.

Kangaru osu veidošanās tiek apskatīta 2 V. Zelča (1986a; 1986b) publikācijās. V. Zelčs (Zelčs, 1993a) disertācijā aplūko diverģentā tipa glaciodepresiju zemieņu glaciotehtoniskās reljefa formas, īpašu uzmanību pievēršot drumlinu veidošanās problēmām, tiek arī minēta teorija par Madlienas (Viduslatvijas) konverģento drumlinu veidošanos. V. Zelčs un A. Markots (2004) raksturo Latvijas deglaciācijas vēsturi, vispārīgi norādot arī Madlienas nolaidenuma reljefa formu attīstības secīgumu Gulbenes un Linkuvas oscilāciju gaitā.

3. MATERIĀLI UN METODEDES

Maģistra darbā tika izmantoti šādi faktiskie materiāli:

- LU ĢZZF WMS ietvertās kartes;
- LVĢMC VĢF 1:200 000 mēroga kompleksās ģeoloģiskās, hidroģeoloģiskās un inženierģeoloģiskās kartēšanas materiāli (faktiskā materiāla kartes, atskaites, urbumu katalogi), karjeru ģeoloģiskās izpētes materiāli (atskaites, urbumu apraksti un griezumi), datubāze "Urbumi";
- V. Juškeviča personīgais kvartāra urbumu arhīvs;
- darba autora lauka pētījumu laikā iegūtie materiāli (skatīt apakšnodaļu lauka pētījumi).

Maģistra darba izstrādē izmantotās metodes var iedalīt divās lielās grupās – kamerālie pētījumi un lauka pētījumi. Kamerālo pētījumu laikā tika apzināta nozares svarīgākā publicētā un nepublicētā literatūra. Īpaši uzmanība tika pievērsta jaunākajām zinātniskajām publikācijām, galvenokārt izmantojot Latvijā pieejamo *ScienceDirect* publikāciju datubāzi. Tika veikta ledāja reljefa formu identificēšana un digitizēšana no topogrāfiskajām kartēm un ģeotelpiskā analīze. Tika sagatavoti dažādi oriģināli kartogrāfiskie materiāli, griezumi, radiogrammas, statistiski apstrādāti un vizualizēti ledāja skrambu, slīpslāņojuma un plaknisko struktūrelementu mērījumi. Lauka un kamerālo pētījumu gaitā iegūto datu datorizēta apstrāde tika veikta ar šādām datorprogrammām – *ArcMap 9.3* (licences Nr. EVA712742763), *StereoNet 3.06*, *Surfer 8*, *Prism 2.2*, *MicroStation PowerDraft*, *SPSS Statistics 17.0*, *Ms Excel*.

Lauka pētījumu laikā tika izmantotas šādas galvenās metodes:

- atsegumu, urbumu dokumentēšana – koordinātu noteikšana ar *Magellan eXplorist 300* GPS uztvērēju, fotodokumentācija ar *Fujifilm FinePix S25000HD* digitālo fotokameru;
- nogulumu saguluma apstākļu izpēte, struktūrelementu (slāņu kontakti un slāņojums) un glaciālo skrambu uzmērīšana, izmantojot *Silva Ranger* ģeoloģisko kompasu;
- paraugu noņemšana nogulumu vecuma noteikšanai ar OSL metodi, lietojot *Eijkelkamp* netraucētu cietās grunts paraugu noņemšanas komplektu;
- radiolokācijas profilēšana, izmantojot ģeoradaru *Zond 12e* ar 75 MHz antenu.

Veikto lauka un kamerālo pētījumu metožu izvēli un saturu noteica maģistra darba mērķis un uzdevumi.

3.1. Kamerālie pētījumi

Maģistra darba kamerālo pētījumu laikā tika identificētas un digitizētas ledāja reljefa formas pēc PSRS armijas ģenerālštāba mēroga 1:25 000 un 1:10 000 topogrāfiskajām kartēm, bet papildinformācijas iegūšanai tika izmantotas arī Valsts ģeoloģijas dienesta atjaunotās mēroga 1:200 000 kvartāra nogulumu kartes. Reljefa formu digitizēšana notika, pielietojot *ArcMap 9.3.* datorprogrammu. Digitizēšanas mērķis bija ne tikai ģeomorfoloģiskās kartoshēmas izveidošana, bet arī reljefa formu morfoloģisko parametru iegūšana, ģeotelpiskā un statistiskā analīze. Kopā tika identificēta 1461 pozitīvā reljefa forma, tajā skaitā 880 drumlini un drumlinveidīgas formas, 312 gala morēnas vaļņi, 161 oss (ieskaitot Kangaru osus), kā arī 108 pārējās reljefa formas – rievotās morēnās, recesionālā tipa veidojumi, bīdes sānu morēnas, marginālās grēdas.

Pēc reljefa formu digitizēšanas drumliniem tika noteikti morfometriskie parametri – laukums, perimetrs, garums, platums, garenass orientācijas azimuts, garuma–platuma attiecība un Čorlija (*Chorley*) parametrs – “k”; tas ir ļoti līdzīgs garuma–platuma attiecībai, kas tiek rēķināta, attiecinot reljefa formas garumu pret platumu, bet, rēķinot Čorlija parametru, tiek izmantots garums un perimetrs, līdz ar to precīzāk tiek raksturota drumlina forma (Rattas and Piotrowski 2003; Rattas 2004).

Čorlija parametrs tika izrēķināts, izmantojot formulu:

$$k = l^2\pi/4A, \text{ kur:}$$

k – Čorlija parametrs;

l – krumlina garums km;

A – krumlina perimetrs km².

Laukums un perimetrs tika iegūts automātiski, izmantojot *ArcMap 9.3.* datorprogrammas automātisko aprēķināšanas rīku *Calculate Geometry*. Drumlinu garuma un platuma iegūšana tika izmēģināta vairākos veidos. Aptuveni 550 drumliniem to garums un platums tika noteikts, izmērot manuāli *ArcMap 9.3.* programmā, tā nosakot šos parametrus maksimāli precīzi. Tomēr, tā kā šādu parametru noteikšana aizņem ilgu laiku, tika meklētas iespējas, noteikt garumu un platumu automātiski. Pirmais risinājums tika atrasts K.D. Klarka un citu (Clark *et al.* 2009) pētījumā. Autori noteica drumlinu garumu un platumu, izmantojot Eilera elipses formulu (ibid., p. 682), kur aprēķinu veikšanai tiek izmantots automātiski iegūtais drumlinu perimetrs un platība. Šie parametri ir ļoti saistīti ar drumlinu formu, kas parasti ir pietuvināta elipsei. Madlienas nolaidenumā gan ir sastopamas ļoti dažādas drumlinu formas, tomēr, kā izrādījās, formula ir pietiekami precīza, lai ar to varētu noteikt garumu un

platumu arī sarežģītākas formas drumliniem. Formula tika pielietota, ĢIS datu bāzes *.dbf failu atverot *Microsoft Office Excel* vidē, tur tika veikti nepieciešamie aprēķini.

Meklējot iespēju, kā automātiski izvilkt drumlinu garenasis, izmantojot to vektorizētos laukumus, tika atrasts speciāls brīvpieejas paplašinājums – *Longest Straight Line*, v.1.3a (http://www.jennessent.com/arcview/longest_lines.htm), ar kuru var ne tikai automātiski izzīmēt drumlinu garenasis, bet arī noteikt to garumu un orientāciju. Tā kā paplašinājumu nav iespējams darbināt jaunākajās *ArcMap* datorprogrammas versijās, tika izmantota *ArcView GIS* 3.2 versija. Garenasis tika izzīmētas (tiek izvilktā garākā iespējamā līnija laukumveida objekta iekšienē, tai neizejot ārpus objekta laukuma) un saglabātas kā jauns *šēipfails*. Paplašinājums arī automātiski izrēķina līnijas garumu un orientāciju, kas tiek attēloti atribūtu tabulā, kura tika apvienota ar drumlinu poligonu *šēipfaila* atribūtu tabulu, izmantojot *join* rīku, lai visi drumlinu morfoloģiskie parametri būtu vienkopus.

Noslēgumā tika pārbaudīta izmantoto drumlinu parametru noteikšanas metožu precizitāte, salīdzinot visus izmērītos drumlinu garumus un platumus ar pēc Eilera formulas aprēķinātajiem un automātiski noteiktajiem (tikai garumam), izmantojot minēto paplašinājumu (visiem manuāli mērītajiem drumliniem, garums un platums tika izrēķināts arī pēc formulas un garums noteikts arī ar speciālo paplašinājumu). Datu savstarpējā korelācija jeb saistība tika noteikta, izmantojot *SPSS Statistics 17.0* datorprogrammu, kur tika veikta korelācijas analīze, nosakot Pīrsona korelācijas koeficientu un Spīrmena rangu korelācijas koeficientu. Korelācijas koeficienti tika noteikti savstarpēji visiem drumlinu garumiem, kas iegūti ar trīs atšķirīgiem paņēmieniem (3.1.1. tabula). Visi korelācijas koeficienti pārsniedz 0,96, kas liecina par to, ka novērojama ļoti cieša korelācija. Tātad drumlinu garumu nav nepieciešams mērīt manuāli, to vienlīdz labi var iegūt ar Eilera formulu vai noteikt automātiski, izvelkot drumlinu garenasis (ar paplašinājumu noteiktie drumlinu garumi pavisam nedaudz labāk korelējas ar mērītajiem).

3.1.1. tabula

Pīrsona un Spīrmena rangu korelācijas koeficienti starp dažādos veidos noteikto drumlinu garumu

Drumlinu garuma noteikšanas veids	Izrēķinātie garumi	Ar paplašinājumu noteiktie garumi
Ar paplašinājumu noteiktie garumi	+0,98/+0,99	
Mērītie garumi	+0,96/+0,98	+0,97/+0,99

3.1.2. tabulas datu īss raksturojums:

Pīrsona korelācijas koeficients ir norādīts kā pirmais, aiz slīpsvītras – Spīrmena rangu korelācijas koeficients. Izrēķinātie garumi – 550 drumlinu garumi, kas tika izmērīti manuāli, izmantojot *ArcMap 9.3*. mērīšanas rīku; Izrēķinātie garumi – visu drumlinu garumi, kas tika izrēķināti, pielietojot Eilera elipses formulu; Ar paplašinājumu noteiktie garumi – visu drumlinu garumi, kas tika noteikti ar *ArcView 3.2.*, pielietojot *Longest Straight Line* paplašinājumu, kas automātiski drumlinu poligonos izvelk garāko līniju un nosaka tās garumu.

Korelācija tika veikta arī izrēķinātajiem un izmērītajiem drumlinu platumiem. Pārsona korelācijas koeficients ir +0,89, savukārt Spīrmena rangu koeficients ir +0,93. Tātad ar Eilera formulu noteiktie platumi ar mērītajiem platumiem korelējas sliktāk nekā savstarpēji drumlinu garumi. Tomēr arī šajā gadījumā ir pietiekami laba korelācija, kas ļauj droši izmantot Eilera formulu drumlinu platumu noteikšanai.

Korelācija tika veikta arī visiem pārējiem drumlinu morfometriskajiem parametriem, lai noteiktu to savstarpējo saistību. Svarīgākajiem rezultātiem tika sagatavoti korelācijas grafiki, izmantojot izkaisītās diagrammas ar datu marķieriem. Drumlinu svarīgākajiem morfometriskajiem parametriem tika arī izveidoti datu sadalījuma grafiki jeb histogrammas un noteikti svarīgākie statistiskie rādītāji.

Ar Eilera formulu *MS Excel* vidē iegūtie drumlinu morfometriskie parametri, vēlāk tika ievietoti drumlinu laukumveida objektu atribūtu tabulā (3.1.2. tabula) pie visiem pārējiem parametriem, lai varētu veikt turpmākas ģeotelpiskās analīzes.

3.1.2. tabula

Ģis datu struktūras piemērs drumlinu slāņa atribūtu tabulā

FID	Shape*	Platība	Perimetrs	Platums	Garums	L/W	Azimuths
251	Polygon	0,033	0,858	0,116	0,375	3,237	101
785	Polygon	0,518	3,265	0,475	1,283	2,701	137

3.1.2. tabulas datu īss raksturojums:

FID – ieraksts ģenerēts automātiski objekta ievadīšanas secībā; Shape* – ieraksts ģenerēts automātiski atkarībā no slāņa objektu attēlojuma formas; Platība – ar *ArcMap 9.3.* programmu izrēķināta platība km²; Perimetrs – ar *ArcMap 9.3.* programmu izrēķināts perimetrs km; Platums – ar *MS Excel* izrēķinātais platums, izmantojot Eilera formulu; Garums – ar *ArcView Gis 3.2.* datorprogrammu izrēķināts drumlina garums, izmantojot *Longest Straight Line, v. 1.3a* paplašinājumu; L/W – garuma–platuma attiecība, kas izrēķināta dalot drumlina garumu ar tā platumu; Azimuths – drumlina garenass orientācija pulksteņrādītāja virzienā no ziemeļiem.

Kamerālo pētījumu gaitā tika sagatavots dažāda veida kartogrāfiskais materiāls, izmantojot LU karšu servisā <http://kartes.geo.lu.lv> pieejamos karšu rastra formāta mozaīku slāņus. Kartes galvenokārt tika lietotas caur LU iekšējā tīklā pieejamo, *ArcMap 9.3* vidē izmantojamo LU ĢZZF WMS servisu.

Kā viens no kamerālo darbu uzdevumiem tika izvirzīts drumlinu blīvuma kartes izveidošana, nosakot drumlinu skaitu uz km². Tā kā automātiski šāda veida karti, izmantojot *ArcMap*, nav iespējams izveidot, tika izmantots speciāls paplašinājums un vairāksoļu darbības, kas ļāva nonākt līdz vēlamajam rezultātam. No sākuma tika izveidots regulārs tīkls, kur katra tīkla šūna ir 1 km² liela. Tīkls tika izveidots, izmantojot *XTools Pro 7.1* paplašinājumā integrēto rīku *Create Fishnet*. Paplašinājums ir bīvi pieejams ar *ArcMap* licenci (<http://www.xtoolspro.com/>). Ar šo rīku tika radīts regulārs poligonu tīkls kā *šaipfaila* datu tips. Lai noteiktu drumlinu skaitu uz km², būtu tikai jāskaita drumlinu laukumu skaits katrā tīkla kvadrātā, bet šo it kā vienkāršo procesu apgrūtina tas, ka viens drumlins visbiežāk

atrodas vairākos tīkla kvadrātos, un ir aktuāls jautājums, kuram kvadrātam to pieskaitīt. Tā kā nebija zināms, kā *ArcMap* datorprogramma veiktu drumlinu saskaitīšanu, katrs drumlina laukums tika sašķelts pa tīkla kvadrātiem, izmantojot laukumveida objektu slāņu ģeomerijas šķelšanu (*ArcToolbox/Analysis Tools/Overlay/Intersect*). Nākamā darbība bija saskaitīt laukumus katrā kvadrātā. Lai to izdarītu, tika apvienotas kvadrātu tīkla un sašķelto drumlinu laukumu atribūtu tabulas, izmantojot *Join* funkciju. Atribūti tika apvienoti, pielietojot apvienošanu pēc telpiskā novietojuma ar iekļautu funkciju, kas saskaita laukumveida objektu skaitu katrā tīkla kvadrātā. Rezultātā tika izveidots jauns laukumveida objektu *šēipfails*, kura atribūtu tabulas laukā *count* uzrādās laukumveida objektu skaits katrā tīkla kvadrātā. Beigās tika veikta simbolizācija pēc šiem atribūtiem un izveidota blīvuma karte, kas parāda drumlinu skaitu uz katru km². Pēc veiksmīgas kartes izveidošanas tika pārbaudīts, kā *ArcMap* veiktu drumlinu saskaitīšanu tīkla kvadrātos, ja laukumi netiktu sašķelti. Izrādījās, ka *ArcMap 9.3*, skaitot laukumveida objektus, tie tiek virtuāli sašķelti, respektīvi, ja kāds objekts atrodas vairākos tīkla kvadrātos, tad tas pieskaitīts katram kvadrātam vienu reizi, līdz ar to vismaz šajā *ArcMap* versijā var iztikt bez laukumveida objektu slāņu ģeometrijas šķelšanas. Līdzīga metode tika izmantota arī triju karšu izveidē, kur tika izmantots ledāja kustības virzienā orientēts tīkls ar daudz lielākas platības kvadrātiem, kuros tika izrēķināti dažādi drumlinu morfometrisko parametru vidējie rādītāji, tā atspoguļojot drumlinu morfologijas saistību ar novietojumu noteiktos ledāja plūsmas sektoros.

Divas kartes, kurās attēlots kvartāra nogulumu biezums un zemkvartāra virsmas reljefs, tika sagatavotas, izmantojot *kriging* interpolācijas metodi. Interpolētie dati vēlāk attēloti pildītu izolīniju veidā. Abas kartes tika izstrādātas, pamatojoties uz četriem datu avotiem: 1:200 000 mēroga kvartāra nogulumu biezuma un zemkvartāra virsmas reljefa kartēm, no kurām tika digitizētas izolīnijas un agstumpunkti, kā arī no papildinošiem urbumu datiem, no kuriem tika sagatavotas zemkvartāra virsmas augstumatzīmes un izrēķināts kvartāra nogulumu biezums. Tika pielietoti urbumu dati no LVĢMC DB "Urbumi" un V. Juškeviča personīgā kvartāra urbumu arhīva. Dati izmantoti saskaņā ar ESF aktivitātes "Cilvēkresursu piesaiste zinātnei" projekta "Starpnozaru zinātnieku grupas modeļu sistēmas izveide pazemes ūdeņu pētījumiem" projekta Nr. 2009/0212/1DP/1.1.1.2.0/09/APIA/VIAA/060, atļauju un noteikumiem.

Daži griezumi un shēmas tika sagatavoti, pielietojot datorizētās projektēšanas programmu – *Bentley MicroStation PowerDraft*, kura studentiem ir brīvi lejupielādējama (http://www.bentley.com/bentleywebsite/tools/academic_contact.aspx). Brencēnu drumlina reljefa modelis tika izveidots ar *Surfer 8.0*. datorprogrammu.

Kamerālo darbu gaitā notika arī sagatavošanās lauka pētījumiem. No sākuma tika apzināti pētāmajā teritorijā esošie karjeri, izmantojot LVĢMC Latvijas derīgo izrakteņu atradņu reģistru (<http://mapx.map.vgd.gov.lv:8082/Cadaster/logAccess.htm>). Atradnes pēc to koordinātām tika ievadītas *ArcMap* datubāzē. Vēlāk tika pārbaudīts atradņu novietojums, izmantojot jaunākās LU ĢZZF WMS servisā pieejamās ortofoto kartes. Izrādījās, ka liela daļa karjeru jau ir sen pamesti un tāpēc nemaz nav identificējami ortofoto kartēs, kā arī dabā vairs nav saglabājušies atsegumi karjeru sienās. Pārbaudot ortofoto kartes, tik konstatēti arī jauni karjeri. Beigās tika apkopots to karjeru saraksts, kuros būtu iespējams veikt lauka darbus atseguma sienās.

Lauka pētījumu gaitā tika iegūti oriģināli dati, kuri tika izmantoti kamerālajiem pētījumiem. Šo datu iegūšanas un apstrādes procedūras ir apskatītas nākamajā nodaļā.

3.2. Lauka pētījumi

Lai noskaidrotu reljefa formu uzbūvi, tika veikti lauka darbi, apsekojot aptuveni 30 karjerus. Karjeru pirmreizējai apsekošanai tika veltītas 2 dienas – 2010. gada 16. un 17. jūnijs. Abu ekspedīciju laikā tika apsekoti pēc ortofoto kartēm atlasītie karjeri, kuros, pirmkārt, tika noteikts, vai karjerā sastopami atsegumi, kuros varētu veikt detālus ģeoloģiskos pētījumus. Otrkārt, tika veikta atsegumu attīrīšana, lai varētu identificēt karjerā esošos nogulumus, to saguluma apstākļus un glaciotektonisko struktūru klātbūtni. Treškārt, nozīmīgi atsegumi tika fotodokumentēti un noteiktas to ģeogrāfiskās koordinātas. Tika izvērtēti atsegumi, kur būtu iespējams paņemt paraugus nogulumu datēšanai ar OSL metodi.

Nākamie lauku darbi tika veikti saistībā ar minēto paraugu ievākšanu OSL datējumiem. Kopā ar darba vadītāju un diviem palīgiem (Ivaru Celiņu un Artūru Putniņu) tika ievākti smilts paraugi trijos karjeros – Silgaļi, Brencēni, Zādzene. Silgaļu karjera nosaukums nebija atrodamas nevienā informācijas avotā, tādēļ tam nosaukums tika piešķirts pēc tuvākajām mājām. Paraugi tika ievākti, lietojot *Eijkelpamp* netraucētu cietās grunts paraugu noņemšanas komplektu, uzreiz ievietoti PVC caurulēs, tā lai tie netiktu apgaismoti. Virs un zem paraugošanas vietas tika ievākti papildu paraugi, lai noteiktu dabiskās radioaktivitātes fonu. Vienlaicīgi tika noteikts arī smilts parauga dabiskais *in situ* ar grunts mitruma mērītāju zondisensoru *ThetaProbe* (precizitāte $\pm 3\%$ vai 1% tilpuma ar grunts kalibrēšanas iestatījumiem). Karjeru atsegumos tika veikti arī nogulumu sagulumu apstākļu pētījumi, slīpslāņojuma un struktūrelementu mērījumi. Visu trīs paraugu ņemšanas vietu koordinātas tika fiksētas ar GPS uztvērēju un ievadītas *ArcMap 9.3.* datubāzē. Paraugu skaitu limitēja pieejamais finansējums.

Diemžēl OSL datējumu rezultāti ir aizkavējušies, tādēļ maģistra darbā tos nav iespējams ievietot.

Turpmāko lauka pētījumu gaitā tika apsekoti trīs dolomīta karjeri – *Remīne*, *Tūrkalne* un *Gaitiņi* ar mērķi atrast un uzmērīt ledāja skrambas dolomītu virsmā. Visos trijos karjeros notiek aktīva dolomīta izstrāde, tādēļ šie karjeri tika izvēlēti, jo, lai atrastu ledāja skrambas, ir jāattīra dolomīta augšējā virsma. Šāda virsma tiek attīrīta karjeros, veidojot kāpli, no kuras vēlāk tiek iegūts dolomīts. Kāples tika atrastas visos karjeros, bet *Remīnes* karjerā šī kāple bija gandrīz pilnībā jau norakta, tādēļ ledāja skrambas nebija atrodamas. *Gaitiņu* karjerā bija norakta dolomīta augšējā virsma. Ledāja skrambas tika atrastas tikai *Tūrkalnes* karjerā, kurš atrodas Rīgas–Ērgļu ceļa labajā pusē, 2 km uz DA no Vāverkroga. Glaciālās skrambas tika konstatētas karjera austrumu galā uz dolomīta virsmas. Tika izdarīti 55 skrambu mērījumi ar *Silva Ranger* ģeoloģisko kompasu. Mērījumu dati vēlāk tika statistiski apstrādāti ar programmu *StereoNet* un vizualizēti sektordiagrammas veidā. Dolomīta virsma (3.2.1. A att.) bija nesen atsegta zemes virspusē, tai bija raksturīgi nelieli pacēlumi, uz kuriem bija sastopamas nelielas, dažus mm dziļas ledāja skrambas (3.2.1.B att.). Kopējais skrambu izplatības areāls bija ļoti ierobežots, tādēļ tika veikti tikai 55 skrambu mērījumi.



3.2.1. attēls. **Ledāja radītās skrambas Tūrkalnes karjera dolomīta virsmā** (autora fotogrāfija)

Noslēdzošais lauka darbu posms tika veikts Brencēnu kalna karjerā. Tas bija vienīgais karjers, kurš tika konstatēts drumlinā. Karjerā bija izveidoti divi atsegumi. Lielākais atsegums atradās drumlina proksimālajā daļā perpendikulāri drumlina garenass orientācijai. Šajā atsegumā tika veikti plaknisko struktūrelementu mērījumi, galvenokārt morēnas un smilts kontaktzonās, kā arī atsevišķu smilts slāņu sēriju kontaktzonās. Mazākajā atsegumā, kur bija paņemti arī nogulumu paraugi OSL datējumiem, lielākoties tika veikti slīpslāņojuma

mērījumi. Visi mērījumi vēlāk tika apstrādāti datorprogrammā *StereoNet*, tos vizualizējot sektordiagrammu un izolīniju diagrammu veidā.

Brencēnu kalna drumlinā tika izmēģināta radiolokācijas profilēšanas metode, lai noskaidrotu, cik labi ir iespējams ar šo metodi izmantot drumlinu iekšējās uzbūves pētījumos. Radiolokācijas profilēšanas darbu veikšanai tika izmantots SIA “*Radar Systems*” Latvijā ražotais ģeoradars *Zond 12e*, kas ir pieejams zinātniskajiem pētījumiem ĢZZF Lietišķās ģeoloģijas katedrā. Pētījumi tika veikti maģistrantūras studiju kursa “Radiolokācija ģeoloģiskos pētījumos” ietvaros sadarbībā ar Georgiju Sičovu. Radiolokācijas profilēšana tika veikta ar 75 MHz antenu sistēmu. Uzsākot radiolokācijas profilēšanu, tika pieņemts, ka pētāmajā vide būs mitra smilts, tika ievadīts vides dialektriskās caurlaidības koeficients – 16. Zondēšanas dziļums tika noteikts aptuveni – 18 m. Ieraksts tika veikts nepārtraukti, fiksējot katru trešo impulsu un izmantojot stipru signāla filtru. Kopumā tika iegūti ieraksti no profila līnijām, kuru kopējais garums bija gandrīz 4 km. Profilu ģeogrāfiskā piesaiste notika, ierakstā fiksējot nozīmīgus objektus, kas tika šķērsoti, piemēram elektropārvades līnijas, ceļi, grāvji utt. Vēlāk atbilstoši atzīmēm ierakstos profilu līniju atrašanās vietas tika fiksētas kartogrāfiskajā materiālā, pēc PSRS Armijas Ģenerālštāba mēroga 1:10 000 topogrāfiskajām kartēm, pēc to izolīniju augstuma informācijas tika arī iestatītas topogrāfiskās izmaiņas. Ieraksti vēlāk tika apstrādāti, izmantojot datorprogrammu *Prism 2.2.*, un vizualizēti radiogrammu veidā.

Ierakstu apstrāde kopumā notika, veicot šādas darbības: profila virziena maiņa pēc vajadzības (*reverss*), horizontālo fona līniju likvidēšana (*background removal*), signāla pastiprināšana (*ormsby bandpass*), profila topogrāfiskā piesaiste, ievietojot augstumpunktus (*x interpolation, topography*). Vēlāk tika veikta radiogrammu ģeoloģiskā interpretācija, ņemot vērā arī karjera ģeoloģiskās izpētes un autora urbumu datus.

Pirms radiolokācijas darbiem tika veikta ģeoloģiskā urbšana ar rokas urbi līdz 5 m dziļumam, izmantojot rokas urbju komplektu. Urbumi bija vajadzīgi radiolokācijas profilu ģeoloģiskās piesaistes izveidei, lai precīzāk interpretētu radiogrammas. 1. urbums tika izveidots drumlina ZR daļā aiz karjera, 2. – drumlina proksimālās daļas augstākajā punktā, 3. – drumlina vidusdaļā nedaudz uz A no Kokneses–Vecbebru asfaltētā ceļa. Pārējie 5 urbumi tika izveidoti uz drumlina garenasij nosacīti perpendikulāras līnijas tā DA daļā.

Lauka pētījumos iegūtais materiāls tika apstrādāts, pielietojot 3.1. apakšnodaļā aprakstītās metodes.

4. REZULTĀTI UN INTERPRETĀCIJA

Kā pirmais darba rezultāts jāmin zinātniskās literatūras analīzes gaitā iegūtā izpratne par ledāja plūsmas dinamiku, procesiem ledāja–gultnes mijiedarbības zonā un glaciālo reljefa formu uzbūvi, morfoloģiju un veidošanās apstākļiem pleistocēna apledojumu laikā.

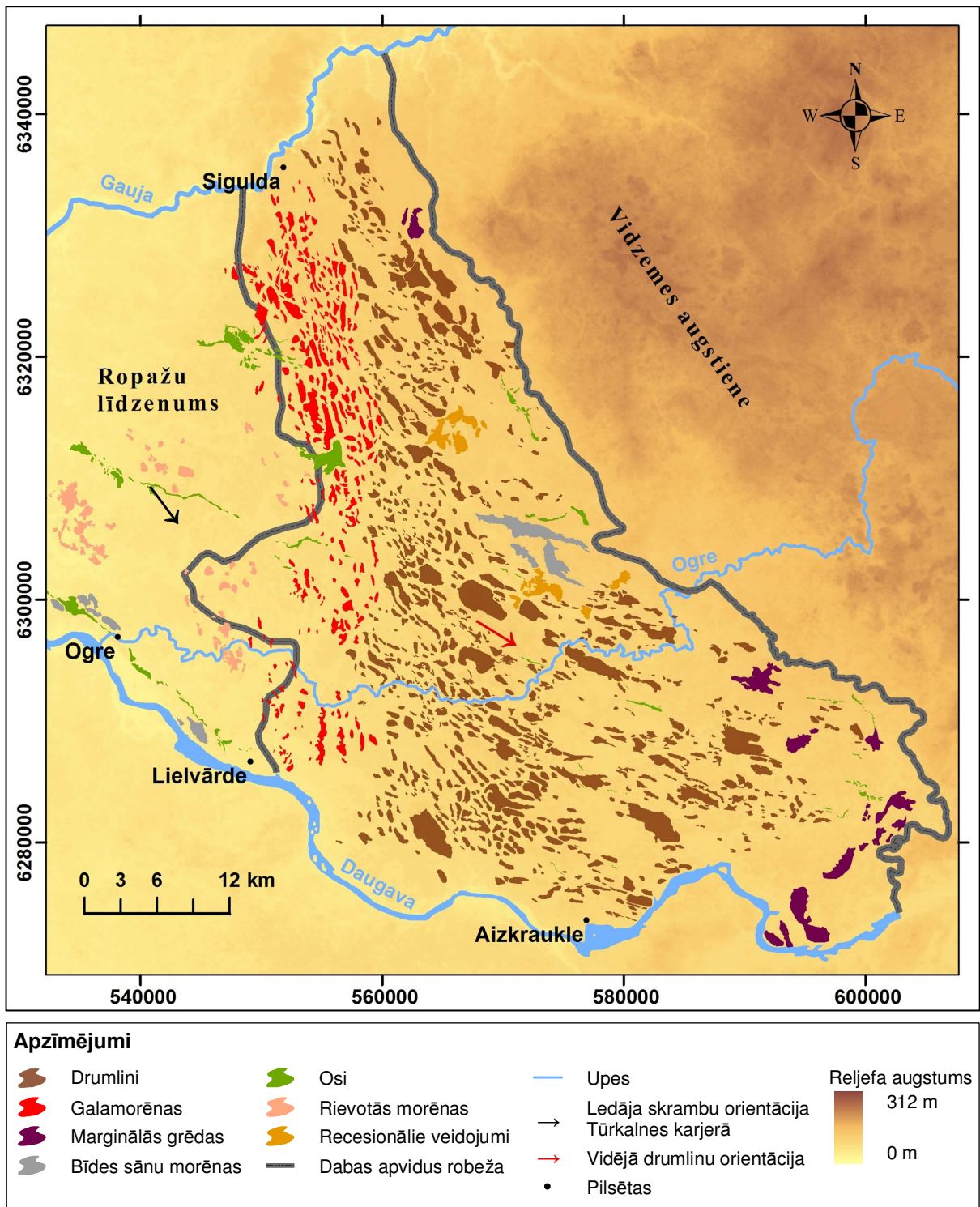
Otrais darba rezultāts ir pētījuma metožu izvēle un piemērošana Madlienas nolaidenuma reljefa formu pētniecībai, līdz ar to ir iegūtie turpmākie pētījumu rezultāti.

Svarīgākie darba rezultāti ir ledāja reljefa formu identificēšana, to telpiskās izplatības un sakārtojuma analīze saistībā ar iepējamo zemledāja gultnes uzbūvi un ledus plūsmas aspektiem. Lielākā daļa rezultātu ir iegūti par drumlinu morfoloģiskajiem parametriem, to variācijām telpā. Detāli iekšējās uzbūves pētījumi Brencēnu kalna drumlinā ir palīdzējuši noskaidrot dažus drumlina veidošanās aspektus.

4.1. Madlienas drumlinu lauks

Madlienas nolaidenumā tika identificētas un parādītas ģeomorfoloģiskajā kartoshēmā (4.1.1. att.) šādas reljefa formas: drumlini, gala morēnas, recesionālie veidojumi, marginālās grēdas, bīdes sānu morēnas, rievotās morēnas un osi. Pēdējie divi reljefa formu tipi tika attēloti arī Ropažu līdzenuma teritorijā. Tur reljefa artikulācija ir daudz mazāka, jo, pirmkārt, ir salīdzinoši līdzena zemkvartāra virsma, otrkārt, daudzas ledāja reljefa formas ir pārskalotas un pārsegtas ar Silciema un Zemgales lokālo sprostezeru un Baltijas ledus ezera smilšainajiem nogulumiem, kas veido arī plašu iekšzemes kāpu izplatības areālu (4.1.1. att. nav parādīts, jo tās nav ledāja reljefa formas). Ne visu reljefa formu identifikācija bija vienkārša, jo reizēm dažādas ģenēzes reljefa formas pēc morfoloģijas nav iespējams droši atšķirt, tādēļ atsevišķu reljefa formu identifikācijai tika pielietoti arī citi materiāli, piemēram kvartāra nogulumu kartes, urbumu dati un lauka pētījumu rezultāti). Dažādo reljefa formu analīze ir aprakstīta tālāk.

Ievērojamākais ledāja reljefa formu sakopojums pētītajā teritorijā ir Madlienas drumlinu lauks (4.1.1. att.). Tā garums ir aptuveni 70 km, platumš pieaug no 5 km ziemeļdaļā līdz 33 km nedaudz lejpus no vidusdaļas un samazinās līdz 18 km dienviddaļā. Kopā ir identificēti un digitizēti 880 drumlini, kas aizņem 228 km² lielu platību. Kopējā drumlinu lauka platība ir aptuveni 1248 km². Madlienas drumlinu garenais teritorijas pašā ziemeļu daļā orientētas ZZR–DDA virzienā, vidusdaļā ZR–DA virzienā, bet DA daļā – RZR–ADA virzienā.



4.1.1. attēls. **Ledāja reljefa formas Madlienas nolaidenumā** (sagatavojis autors, izmantojot dažādus LU karšu servisa *kartes.geo.lu.lv* slāņus)

Izmantojot *MS Excel* datorprogrammu, drumliniem tika noteikti svarīgāko morfometriskie parametru statistiskie rādītāji un apkopoti 4.1.1 tabulā. Tabulā neattēloto morfometrisko parametru vidējie aritmētiskie rādītāji ir šādi: platība – 0,285 km², perimetrs – 2,132 km, azimuts – 122°, vidējais Čorlija parametrs “k” ir 2,8, tas variē starp 1,2 un 8,9. Vidējā drumlinu garenasu orientācija ir 121,5°.

Ekscesa koeficients raksturo vērtību sadalījuma smailumu, to izkledi pa x asi. Svarīgāko drumlinu morfometrisko parametru ekscesa koeficients norāda uz izteiktu sadalījuma smailumu, tātad drumliniem ir raksturīgs noteikts lielums un forma. Tas arī norāda uz īpašiem drumlinu veidošanās apstākļiem, kuru rezultāts (drumlinu lielums un forma) lielākajā daļā gadījumu būs līdzīgs. Īpašie apstākļi attiecas uz ledāja dinamiskajiem faktoriem, kā plūsmas ātrumu un kustības veidu, ledus biezumu un citiem.

4.1.1. tabula

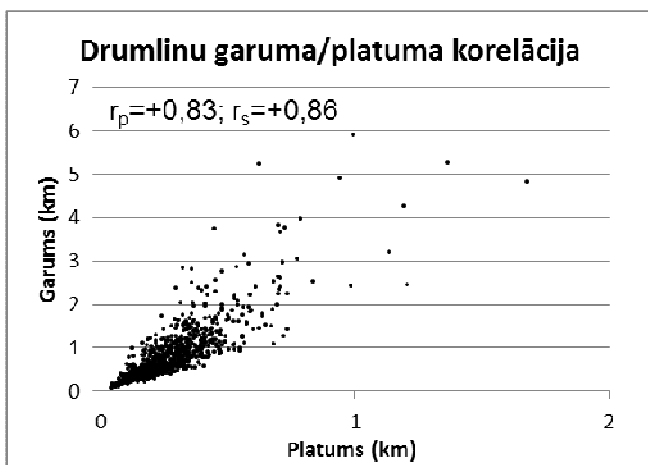
Drumlinu galveno morfometrisko parametru statistiskie rādītāji

Skaits = 880	Garums (m)	Platums (m)	Garuma/platuma attiecība
Minimālais	71	42	1,3
Maksimālais	5907	1681	8,8
Vidējais aritmētiskais	843	278	3,0
Standarta novirze	674	165	1,1
Mediānas vidējais	648	245	2,7
Asimetrijas koeficients (<i>skewness</i>)	2,9	2,4	1,6
Ekscesa koeficients (<i>kurtosis</i>)	12,7	11,4	4,0

Asimetrijas koeficients raksturo vērtību sadalījuma asimetriju. Visizteiktākā pozitīvā asimetrija ir raksturīga drumlinu platuma sadalījumam. Garuma–platuma attiecības gadījumā sadalījumam ir pozitīva asimetrija. To labi parāda drumlinu garuma–platuma attiecības sadalījuma grafiks (4.1.3. att.), kur redzams, ka visbiežākā garuma–platuma attiecība ir 2,5. Pārsvārā (aptuveni 68%) drumlinu garums ir 2 līdz 4 reizes lielāks par platumu. Šai attiecībai ir pavisam loģisks izskaidrojums, jo drumlinu elipsei pietuvinātā forma principā nosaka, ka drumlina garums visbiežāk ir vismaz divas reizes lielāks nekā platumš. Šī sakarība principā raksturo tipisku drumlina formu.

Drumlinu garumam un platumam ir cieša korelācija (4.1.2. att). Šī sakarība būtībā raksturo drumlinu elipsveida formu, kurai ir tendence saglabāties neatkarīgi no drumlinu lieluma. Uz to skaidri norāda minētais drumlinu garuma–platuma attiecības sadalījums. Visciešākā drumlinu garuma–platuma korelācija raksturīga mazākiem drumliniem, tiem kļūstot lielākiem, korelācija samazinās, bet saglabājas vidēja tendence garākiem drumliniem būt arī platākiem. Drumliniem kļūstot garākiem, to platumiem raksturīga pieaugoša platuma parametru izkliede, piemēram, aptuveni 5 km gari drumlini var būt gan 600 m, gan 1700 m plati. Būtībā minētās sakarības norāda uz to, ka drumliniem sākotnējā veidošanās fāzē rodas tiem ļoti raksturīgā forma, kas vēlāk var tikt pārveidota. Tas gan nenozīmē, ka, piemēram, mazākie drumlini Madlienas laukā ir veidojušies īsākā laika intervālā nekā lielākie, jo

drumlinu formu ietekmē ne tikai veidošanās ilgums, bet arī ledus plūsmas ātrums, ledāja gultnes deformējamo nogulumu biezums, litoloģija un citi literatūrā bieži apspriesti parametri.



4.1.2. attēls. Drumlinu garuma–platuma korelācijas grafiks

Cieša korelācija, protams, pastāv starp drumlinu platību vai perimetru un garumu vai platumu, bet tās ir ģeometriskas sakarības, kas neko neliecina par drumlinu morfometrijas īpatnībām. Ļoti laba sakarība pastāv starp garuma–platuma attiecību un Čorlija pametru “k” – Pīrsona koeficients ir 0,95, bet Spīrmena – 0,94. Šī sakarība parāda to, ka šie abi parametri ļoti līdzīgi raksturo drumlinu formu.

Drumliniem ir raksturīga noteikta garuma un garuma–platuma attiecības tendence, respektīvi, palielinoties drumlinu garumam, pieaug arī garuma–platuma attiecība. Šo sakarību var redzēt 4.1.2. tabulā, kur ir parādīta vidējā garuma–platuma attiecība drumliniem, kas garāki par noteikto garumu. No šiem rādītājiem var arī secināt, ka, sasniedzot kritisko garumu ap 2 km, drumlini platumā pieaug vismazāk. 12 drumliniem, kas ir garāki par 3 km, garuma–platuma attiecība atkal samazinās. Šiem garākajiem drumliniem ir raksturīgi, ka tiem ir arī diezgan liels platumš.

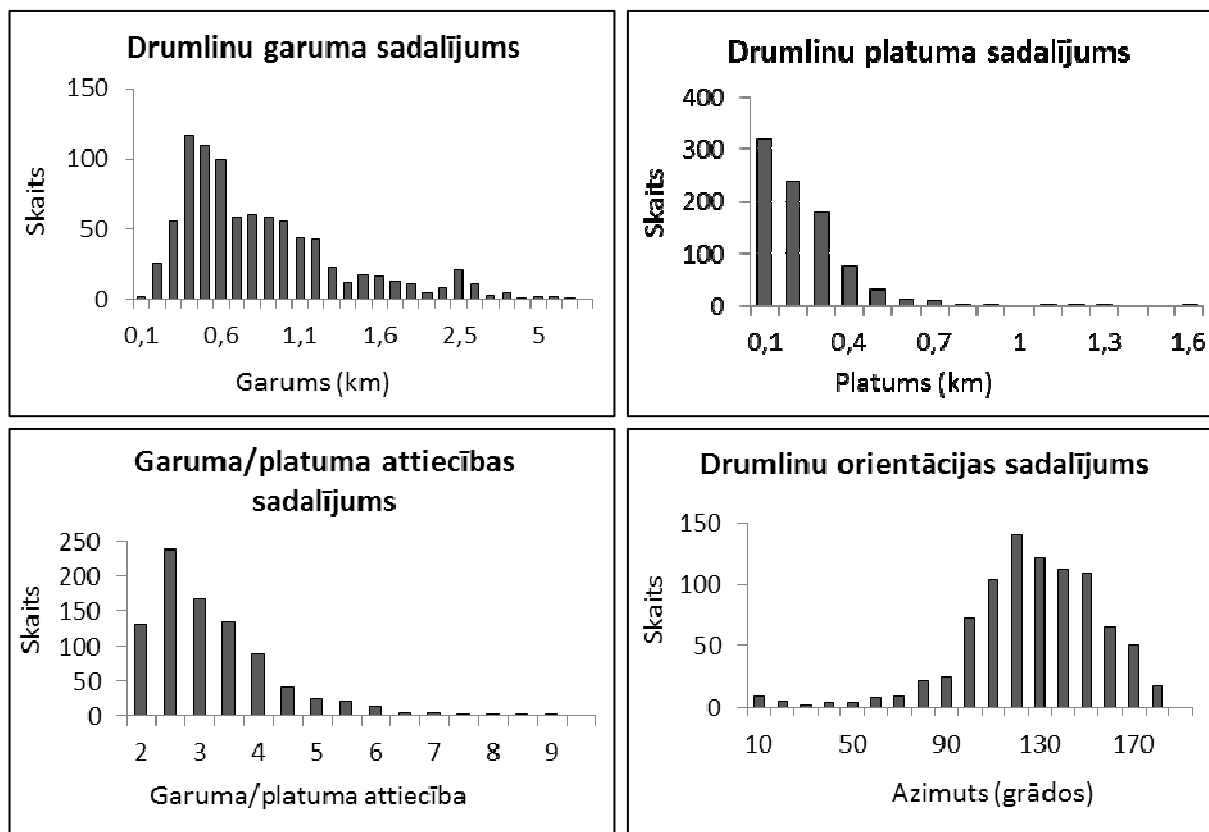
4.1.2. tabula

Vidējā garuma/platuma attiecība drumliniem, kas garāki par noteikto garumu

Drumlinu garums (km)	0,3	0,8	1,2	1,6	2	3
Vidējā garuma/platuma attiecība drumliniem – garākiem par noteikto garumu	2,7	3,1	3,6	3,8	4,1	3,8

Drumlinu svarīgākie morfometriskie parametri ir attēloti arī sadalījuma grafikos jeb histogrammās (4.1.3. att.). Visbiežāk sastopami 400 m gari, 100 m plati drumlini. Lielākajai daļai (aptuveni 68%) drumlinu garums ir 0,2 līdz 1,5 km gari un platumš 0,1 līdz 0,4 km.

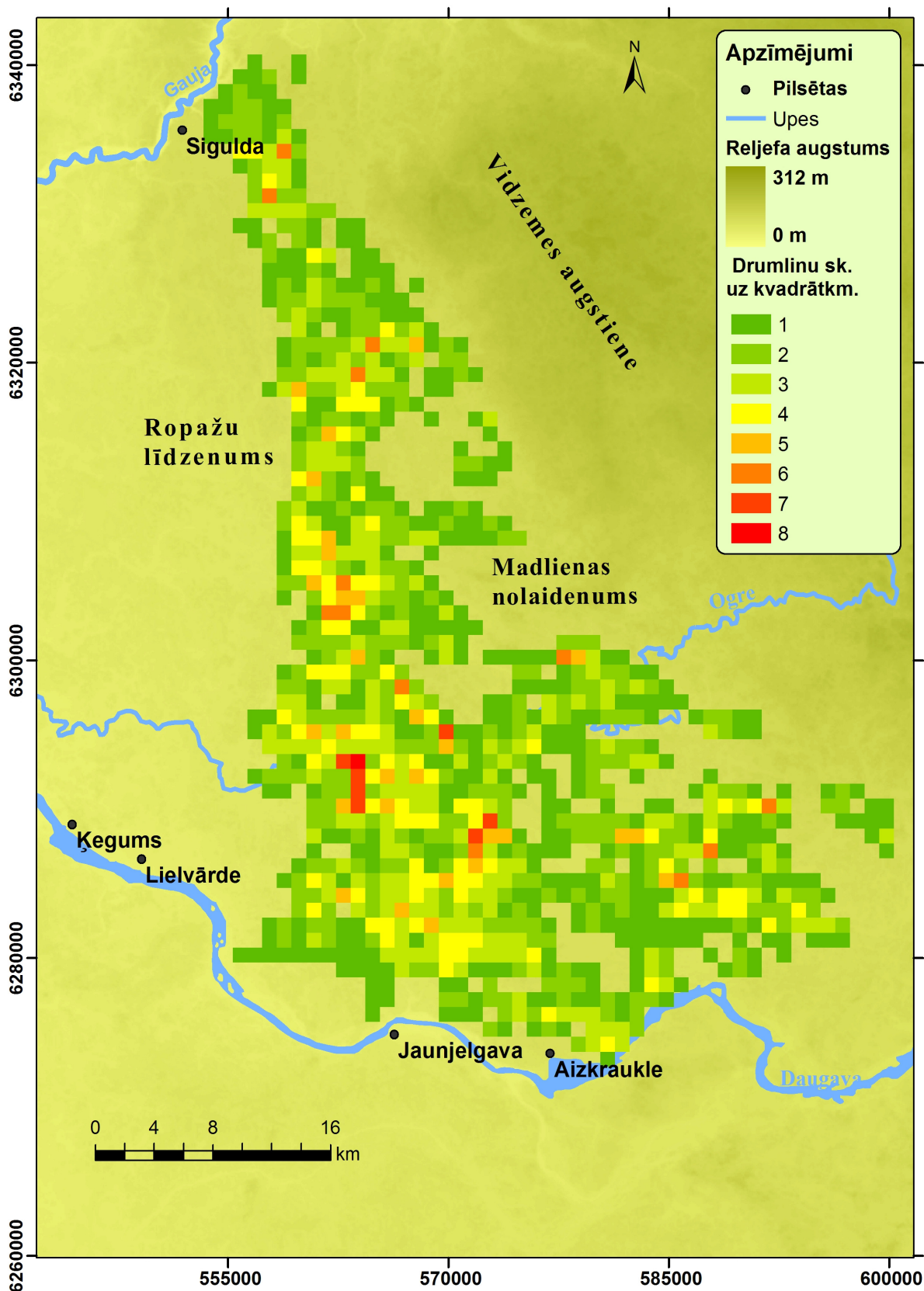
Visiem sadalījuma grafikos attēlotajiem drumlinu parametriem ir raksturīgs unimodāls sadalījums. Tas daļēji liecina par kartēto drumlinu atbilstību šim reljefa formas tipam. Multimodāla sadalījuma gadījumā varētu pieņemt, ka ir identificēti vairāki reljefa formu tipi. Drumlinu parametru ekscesa koeficienta un asimetrijas koeficienta (tabula) rādītāji neatbilst normālsadalījumam, bet norāda uz izteiktāku smailumu un pozitīvu asimetriju. Vienīgi drumlinu orientācijas sadalījumam ir negatīva asimetrija raksturīgā drumlinu garenasu azimuta dēļ, kas visbiežāk ir 100° – 160° robežās.



4.1.3. attēls. Drumlinu svarīgāko morfoloģisko parametru sadalījuma grafiki

Madlienas drumlinu laukā tika arī notiekts drumlinu blīvums (4.1.1. att.) uz 1 km^2 . Aprēķina metodika ir aprakstīta metožu nodaļā. Būtībā tika saskaitīts drumlinu laukumu skaits uz katru km^2 . Drumlini, kas atradās vairākos km^2 tīkla kvadrātos, tika pieskaitīti katrā kvadrātā vienu reizi, tādēļ, piemēram, ja vienā kvadrātā ir saskaitīti 4 drumlini, tas nenožīmē, ka visi 4 drumlini atrodas tikai tajos kvadrātos. Kopumā var teikt, ka drumlinu blīvums, izmantojot aprakstīto metodi sanāk nedaudz pārspīlēts, bet to aprēķināt citādi varētu nebūt metodiski korekti. Maksimālais drumlinu blīvums ir 8 drumlini uz km^2 , vidējais aritmētiskais ir 2 drumlini. Visbiežāk blīvums ir 1 drumlins uz km^2 , bet pārsvarā tas ir no 1 līdz

4 drumliniem. Kopumā drumlinu blīvuma rādītāji izkārtoti izklaidus, tomēr DR novērojams apgabals ar paaugstinātu blīvumu.



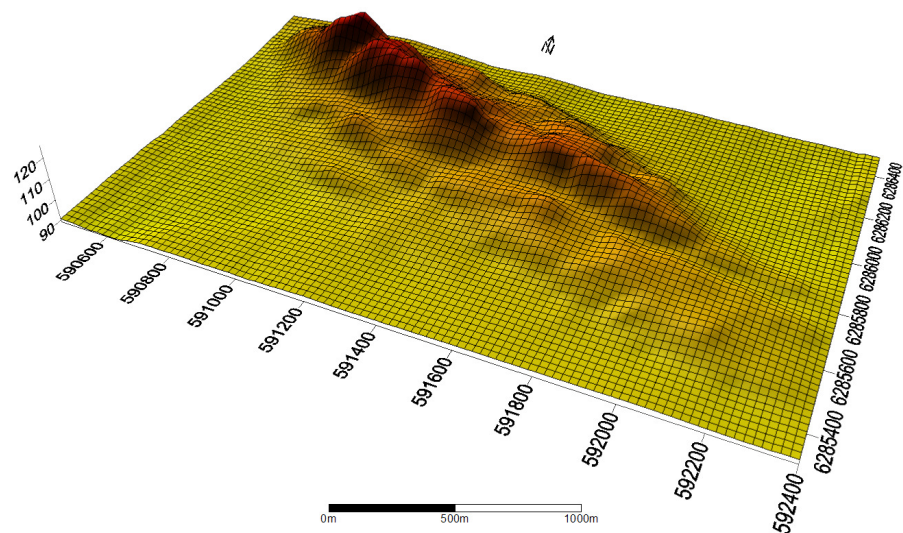
4.1.4. attēls. Madlienas nolaidenuma drumlinu blīvums (sagatavojis autors, pamatnei izmantojot SRTM digitālo augstuma modeli (pieejams <http://srtm.csi.cgiar.org/SELECTION/inputCoord.asp>))

Šis apgabals izceļas arī zemkvartāra virsmas reljefa kartē (LVGD Zemkvartara), kur novērojams reljefa iegrauzums, kurš DR virzienā pāriet apraktajā ielejveida formā. Šis iegrauzums ir orientēts aptuveni perpendikulāri Vēlās Vislas ledāja plūsmas virzienam un arī perpendikulāri drumlinu orientācijai, līdz ar to, iespējams, iegrauzums ietekmēja ledāja plūsmas un ledāja–gultnes mijiedarbības zonas procesu raksturu, sekmējot drumlinu veidošanos. Drumlinu blīvuma pieaugumu varēja veicināt plūsmas ātruma palielināšanās sakarā ar zemledāja gultnes reljefa kritumu ledāja plūsmas virzienā, tomēr konstatētais iegrauzums ir samērā šaurs, tādēļ teorētiski palielinātajam ledāja plūsmas ātrumam vajadzētu atkal samazināties, gultnes reljefa kritumam atkal esot pret ledāju. Šajā gadījumā iespējams, ka iniciētais palielinātais plūsmas ātrums nemaz tik ātri nesamazinājās. Visticamāk, ka iespējamās plūsmas ātruma izmaiņas nav vienīgais faktors, kas varēja sekmēt drumlinu blīvuma pieaugumu. Palielinātais drumlinu blīvums, visticamāk, ir vairāku faktoru rezultāts, kuru eksistencei autoram nav izdevies iegūt pierādījumus. Viens no šādiem faktoriem varētu arī būt palielināts zemledāja deformējamo nogulumu biezums virs ledāja gultnes pazeminājuma.

4.2. Brencēnu kalna drumlins

Brencēnu kalna drumlinā tika veikti detāli iekšējās uzbūves pētījumi. Drumlins atrodas Viduslatvijas zemienē, Madlienas nolaidenuma un Madlienas drumlinu lauka DA daļā. Tas ir 1,91 km garš, 0,78 km plats, garuma–platuma attiecība ir 2,45, platība – aptuveni 1 km², relatīvais augstums proksimālajā daļā sasniedz 32 m, distālajā – 21 m, absolūtais augstums ir 123 m. Brencēnu kalnam tika izveidots reljefa modelis (4.2.1. att.) pēc PSRS Armijas ģenerālštāba topogrāfiskās kartes mērogā 1:10 000. Modelī uzskatāmi var redzēt drumlina pauguroto virsu ar izteikti augstāko pret ledāju vērsto daļu.

Brencēnu kalna karjerā tika pētītas drumlina iekšējās uzbūves īpatnības, atsegumos divās karjera sienās – drumlina proksimālajā, augstākajā daļā. Karjers “Brencēni” atrodas Kokneses–Ērgļu ceļa kreisajā pusē 1,5 km uz D no Vecbebriem un 0,5 km uz R no Brencēniem. Drumlina augstāko daļu veido no ledāja gultnes izspiestais, galvenokārt, smalkas smilts materiāls ar morēnas lēcām. Nogāzē novērojami glaciokvālo nogulumu un morēnas uzbīdījumi. Vidēji 6 m stāvā atseguma sienā tika konstatēti pārsvarā smalkgraudainas smilts nogulumi ar raksturīgām bīdes deformācijas zonām un morēnas zvīņveida uzbīdījumu augšējā daļā (4.2.2. att.).

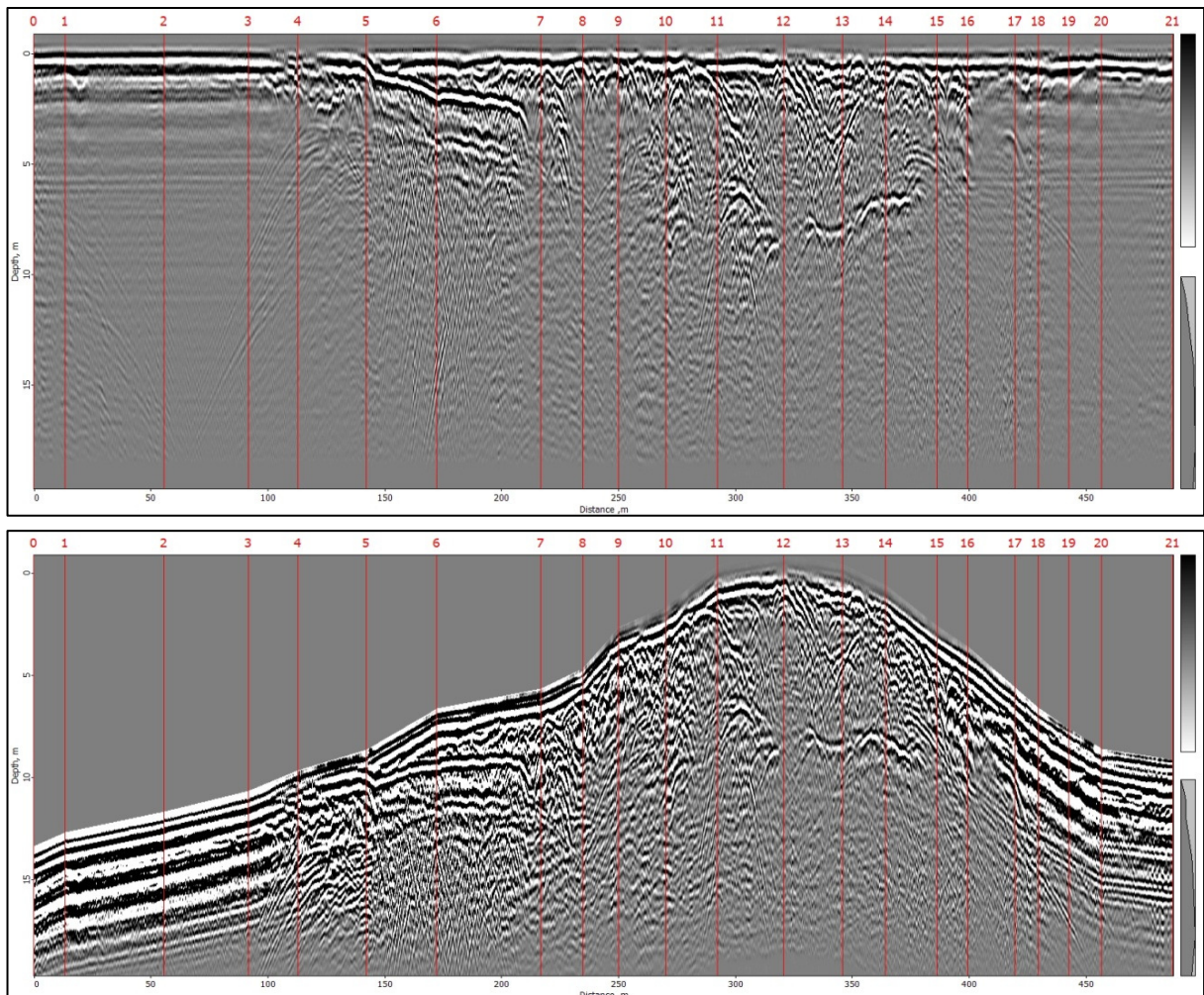


4.2.1. attēls. **Brencēnu kalna drumlina reljefa modelis** (sagatavojis autors, izmantojot LU karšu servisa kartes.geo.lu.lv slāni TOPO 10K PSRS)



4.2.2. attēls. **Radiolokācijas profilu, urbumu, parauga ņemšanas vietas OSL datējumam un detāli pētītā atseguma novietojums Brencēnu kalna drumlinā** (sagatavojis autors, izmantojot LU karšu servisa kartes.geo.lu.lv slāni ORTOFOTO 3, apakšā autora fotogrāfija).

Šajā drumlinā tika veikti radiolokācijas pētījumi. Kopumā tika izveidotas 8 profila līnijas gandrīz 4 km garumā (4.2.2. att.). 4 profila līnijas tika izvietotas šķērseniski drumlinam, savukārt 2 – gareniski. Kopumā profila līnijas tika izvietotas tā, lai iespējami precīzāk attēlotu drumlina uzbūvi, kā arī ceļu novietojuma dēļ, jo antenu lielais izmērs neļauj pārvietoties, piemēram, mežā, krūmos, lielā zālē.



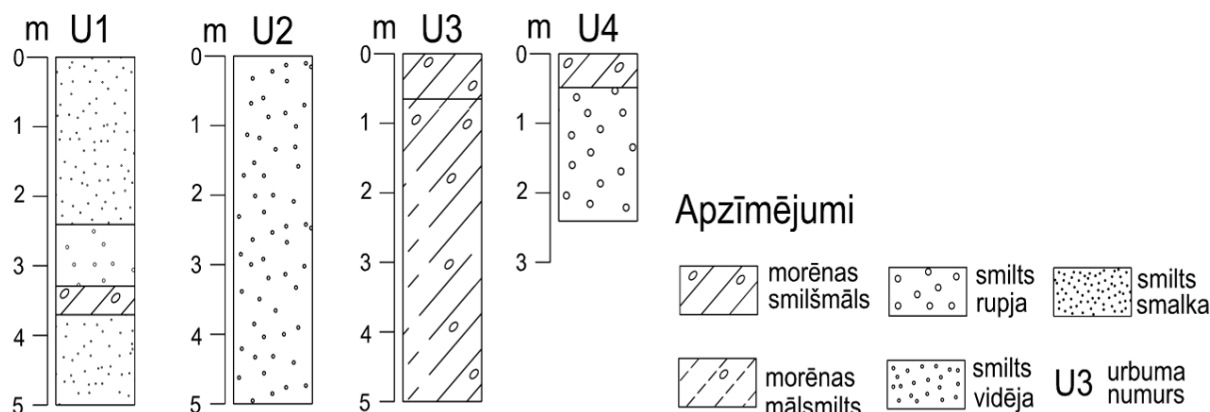
4.2.3. attēls. **1. radiolokācijas profila radiogrammas** (sagatavojis autors). Uz vertikālās ass attēlots zondēšanas dziļums ik pēc 5 m, uz horizontālās ass – attālums no profila līnijas sākuma ik pēc 50 m. Sarkanās līnijas norāda topogrāfiskās piesaistes punktus. Kopējais profila garums – 490 m.

Izmantojot datorprogrammu *Prism 2.2*, tika izgatavotas radiogrammas un veikta to interpretācija. Maģistra darbā kā piemērs pievienotas divas viena radiolokācijas profila radiogrammas (4.2.3. att). 1. radiolokācijas profils ir novietots drumlina proksimālajā daļā, aptuveni šķērseniski drumlina garenasij, profils ir izlocīts, jo ieraksts tika veikts, ejot pa ceļu. 4.2.3. attēlā ir redzamas 2 radiolokācijas profili, no kurām otrā ir topogrāfiski piesaistīta, līdz ar topogrāfiski precīzāk atspoguļojot drumlina iekšējo uzbūvi, bet tādā veidā reljefa izliekuma dēļ tiek zaudēta daļa no ieraksta informācijas. Kopumā abās radiogrammās ir labi izšķirama drumlina pamatuzbūve, ko centrālajā daļā veido smilts, kas pārstāv drumlina

kodolu. Nogāzes veido morēnas nogulumus. Radioviļņu iespiešanās dziļums morēnas nogulumos ir daudz mazāks nekā smiltī, tādēļ radiogrammā nav fiksējamas struktūras morēnā dziļāk par dažiem metriem.

Blakus 1. profilam tik veikts viens urbums (4.2.4. att., U1), kurā tika konstatēts smalkas, nedaudz arī vidējas smilts materiāls, ko aptuveni 3,5 m dziļumā pārtrauca dažus desmitus cm biezs morēnas slānis, kas ir konstatējams arī radiogrammas augšdaļā, kur izskatās, ka slānim raksturīgi pārtraukumi (4.2.3. att.). Aptuveni 8 m dziļumā ir konstatējama virsma, kas ļoti labi atstaro signālu. Virsma ar pārtraukumiem ir izsekojama līdz pat drumlina pamatnes daļai, kur tā gandrīz iznāk zemes virspusē aptuveni tajā vietā, kur drumlina nogāze kļūst lēzena un kur tika konstatēts gruntsūdens līmenis tuvu zemes virsmai. Paaugstinātā gruntsūdens līmeņa dēļ blakus drumlinam ir izveidojies purvs, tas arī liecina par mazcaurlaidīgu nogulumu klātbūtni starpdrumlinu ieplakā, lauka pētījumos vizuāli tur tika konstatēta morēna. Pamatojoties uz norādītajiem argumentiem, tiek pieņemts, ka minētā atstarojuma virsma ir no morēnas starpslāņa, pa kuru tiek arī novadīti gruntsūdeņi.

Pārējās radiogrammās, kas darbā nav pievienots, ir iespējams diezgan droši atšķirt būtiskākās nogulumu sastāva izmaiņas, respektīvi, smilts nogulumus no morēnas drumlina nogāzēs. Smilts nogulumos drumlina kodolā vairākkārt pārtrauc stipri atstarojošas virsmas, kas visdrīzāk interpretējamās kā morēnas nogulumu starpslāņi. Tie ir arī konstatēti Brencēnu smilts atradnes ģeoloģiskās izpētes sagatavotajos griezumos (Kalniņš u.c., 1991). Tomēr ne vienmēr šo virsmu interpretācija var būt tik viennozīmīga, tādēļ būtu nepieciešama detālāka radiogrammu apstrāde. Tā kā lielāka daļa profila līniju bija izvietotas pa ceļiem, radiogrammās bija dažādi traucējumi, galvenokārt no elektropārvades līnijām. Lielākoties šie traucējumi ir viegli nosākāmi, bet atsevišķos gadījumos sarežģī ģeoloģisko interpretāciju.



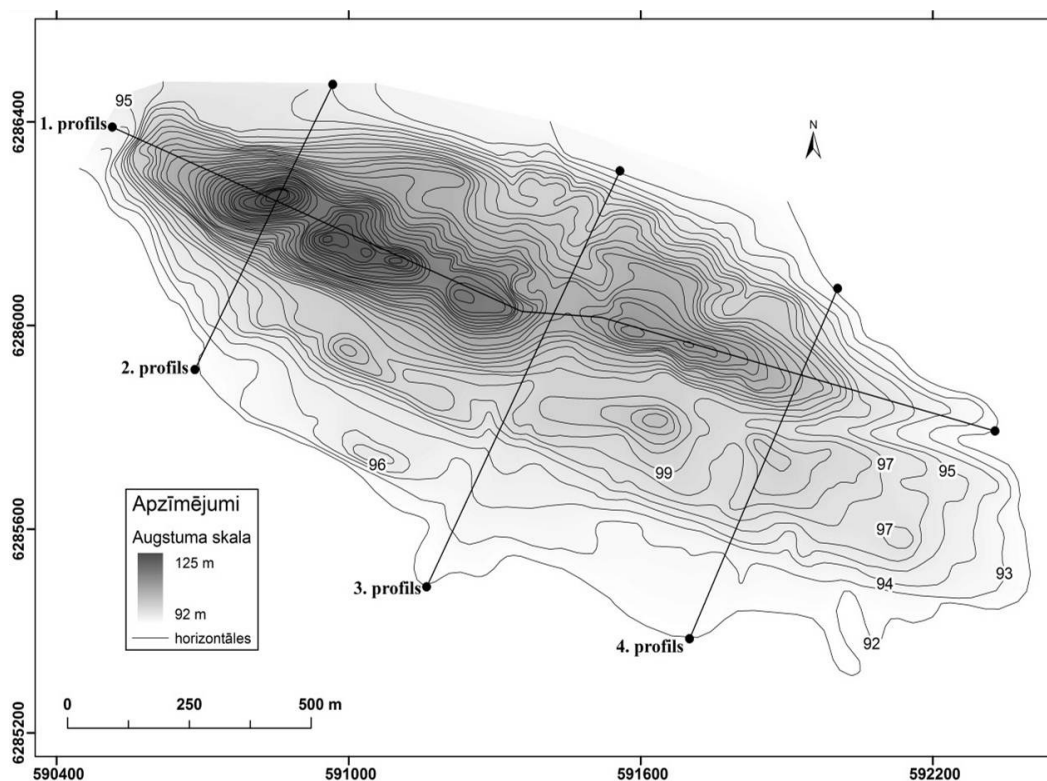
4.2.4. attēls. **Brencēnu kalna urbumu griezumā** (izstrādājis autors). Urbumu novietojumu skat. 4.2.2. att.

Pēc veiktajiem radiolokācijas pētījumiem var secināt, ka radiolokācijas profilēšanas metode var tikt sekmīgi pielietota glaciotektonisko reljefa formu iekšējās uzbūves pētījumiem. Lai veiktu precīzu ģeoloģisko interpretāciju, ir jānodrošina pietiekams profilu un to piesaistes urbumu skaits, kas ļautu detāli noteikt nogulumu slāņu, starpslāņu un lēcu telpisko izplatību. Zondēšanas izšķirtspēja dziļumā krietni samazinās tur, kur sastopami morēnas slāņi un lēcas, tādēļ, lai izdalītu dziļākos slāņus, varētu izmantot zemākas frekvences, piemēram, 38 Mhz antenu sistēmu.

Kā minēts iepriekš, Brencēnu kalna drumlinā tika veikta ģeoloģiskā urbšana radiolokācijas profilu ģeoloģiskajai piesaistei. Urbumi tika veikti līdz 5 m dziļumam. Četri dziļākie urbumi novietoti gar drumlina garenasi, savukārt 5 seklākie šķērseniski, uz 3. radiolokācijas profila līnijas (4.2.2. att). Urbšanas rezultāti ļauj secināt, ka drumlina proksimālā daļa sastāv no smilts, vienā urbuma konstatēta morēnas lēca, centrālā daļa no morēnas vismaz 5 m dziļumā, distālā daļa no smilts ar līdz 0,5 m morēnas virskārtu.

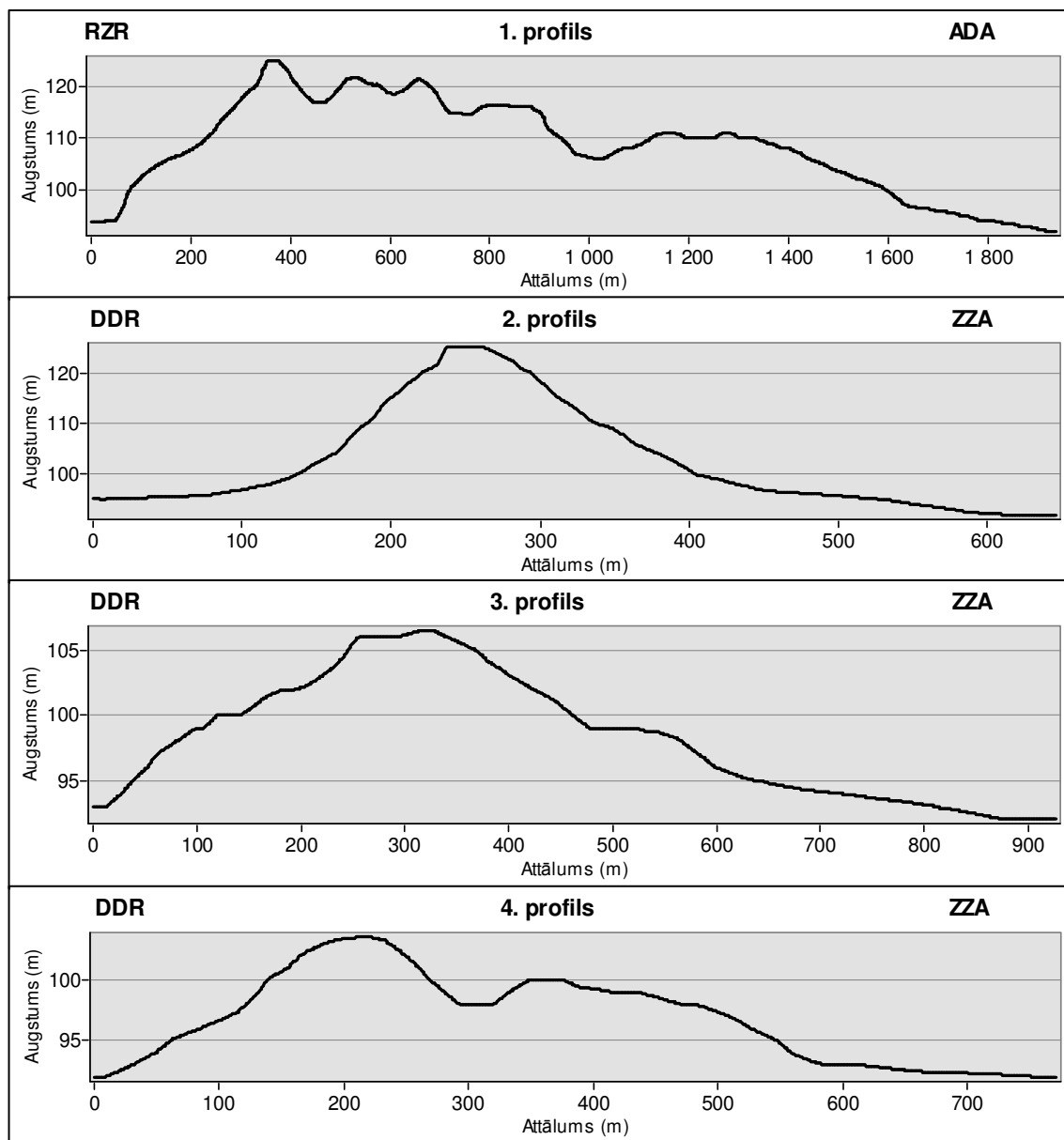
Pēc Brencēnu smilts atradnes ģeoloģiskās izpētes sagatavotajiem griezumumiem (Kalniņš u.c., 1991) var secināt, ka drumlina augstākā daļa pārsvarā sastāv no smalkas smilts nogulumiem (līdz 27 m), ko vietām pārtrauc līdz 1 m biezas morēnas lēcas, drumlina pamatni veido morēnas smilšmāls, kā virsma hipsometriski atrodas dažādos līmeņos.

Lai izvērtētu Brencēnu drumlina morfoloģiju, tika izveidoti reljefa profili – viens gareniski drumlinam un trīs – šķērseniski (4.2.5. att.).



4.2.5. attēls. Brencēnu kalna reljefa profilu novietojums (sagatavojis autors). Izolīnijas ik pēc 1 m.

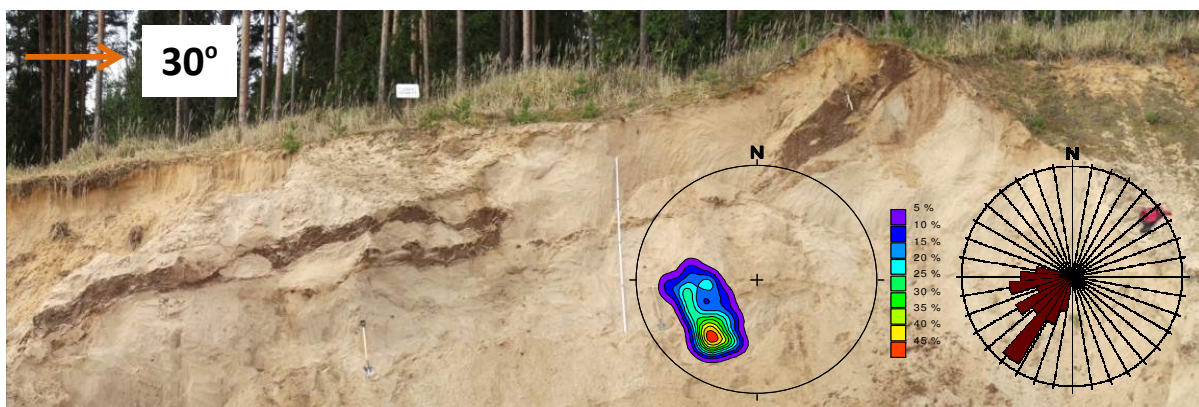
Reljefa profilos (4.2.6. att.) ir redzama Brencēnu drumlina paugurotā virsma un nogāžu asimetrija. Drumlinam ir izteikti stāvāka proksimālā daļa, tādēļ pēc morfoloģiskā iedalījuma tas atbilst klasiskam drumlinam. Virsmai ir raksturīgi vairāki izteikti paugurveida paaugstinājumi. Drumlina nogāzes ir asimetriskas, ar stāvāku DDR virzienā vērsto nogāzi.



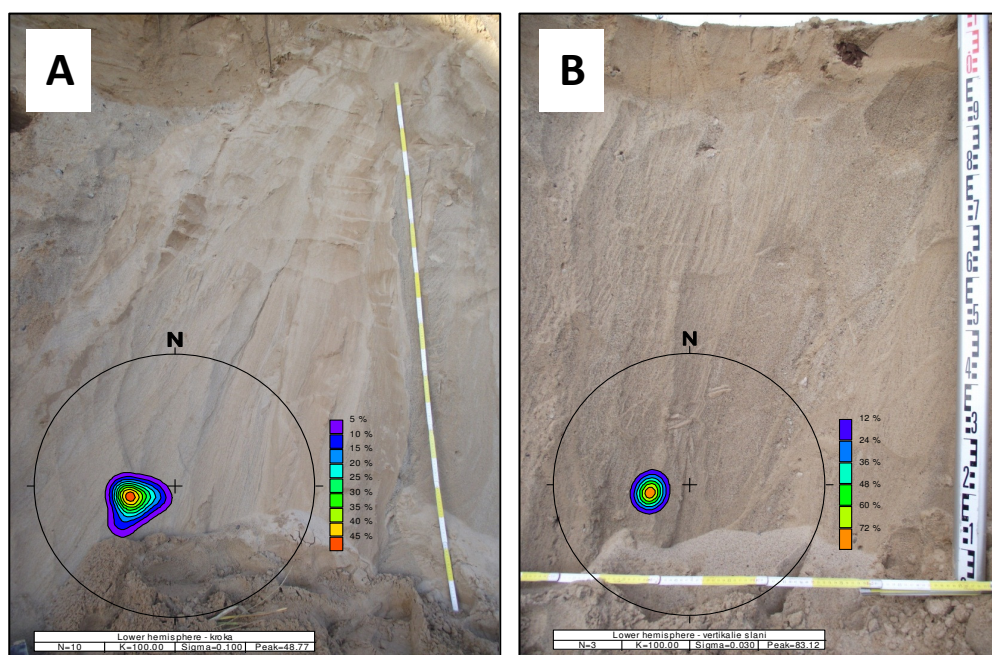
4.2.6. attēls. **Brencēnu kalna reljefa profili** (sagatavojis autors)

Šajā nogāzē ir atsegums (4.2.7. att.), kas atrodams drumlina un karjera proksimālajā daļā. Atsegumā ir redzams morēnas zvīņveida uzbīdījums. Lauka pētījumos tika uzmērīti morēnas un smilts kontaktu krituma azimuti un krituma leņķi (mērījumu skaits – 23), kas ir atspoguļoti sektordiagrammā un kontūrdiagrammā (4.2.7. att.). Rezultējošais krituma azimuts

ir 233° , maksimālais – 217° . Krituma azimuts ir aptuveni vērsts perpendikulāri drumlina garenasij, līdz ar to var secināt, ka morēnas zvīņveida uzbīdījums ir veidojies, pastāvot ledāja spriegumam, kas bijis perpendikulārs drumlina orientācijai, kā arī reģionālajam ledāja kustības virzienam. Tātad drumlinu veidošanās noslēdzošajā etapā liela nozīme bija ledāja sāniskajam spiedienam, kura dominējošais virziens Brencēnu drumlina apkārtnē bija no DR–DDR. Šis virziens arī ir perpendikulārs reģionālajam zemkvartāra virsmas kritumam, tātad drumlinu veidošanās bija lielā mērā saistīta ar ledus plūsmas sānisko bremsēšanos, ko izsauca zemkvartāra virsmas slīpums un pamatiežu pacēlums tagadējās Vidzemes augstienes pamatnē, kas ZA virzienā norobežoja ledus plūsmu. Iespējams, arī drumlina pret DDR vērstā stāvākā nogāze norāda uz dominējošo ledāja spiedienu no DDR.



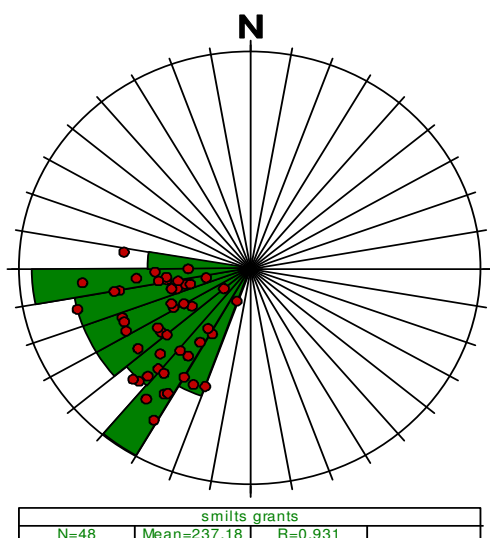
4.2.7. attēls. Morēnas un smilts kontakta mērījumi Brencēnu drumlina atsegumā (autora fotogrāfija)



4.2.8. attēls. Slāņu saguluma elementu mērījumi Brencēnu drumlina atsegumā (autora fotogrāfijas)

Līdzīgi rezultāti tika iegūti arī no mērījumiem citos slāņu saguluma elementos. Tā paša Brencēnu karjera atseguma A daļā tika veikti mērījumi smilšainā materiāla sēriju kontaktzonās, ko nereti veidoja smago minerālu graudu koncentrācijas joslas. Materiāls visdrīzāk pieder drumlina kodola fācijai, jo tam ir raksturīgi gandrīz stāvus krītoši slāņi, kas liecina par materiāla izspiešanu no zemledāja gultnes. 4.2.8.A attēlā redzami smilšaini aleirītiska materiāla nogulumi, kur veikti 10 mērījumi. Slāņu krituma leņķis ir 63° , krituma virziens – 256° . Nogulumu visdrīzāk tikuši pakļauti plastiskai deformācijai, tātad šis materiāls bija daļēji piesātināts ar ūdeni un tas ir migrējis/ticis spiests augšup no zemledāja gultnes, tādā veidā atgādinot diapīra veidošanos. 4.2.8.B attēlā redzami smilšaini granšaina materiāla nogulumi, kur veikti 3 mērījumi. Slāņu krituma leņķis ir 66° , krituma virziens – 259° . Šim materiālam atšķirībā no iepriekš minētā ir raksturīgas trauslas deformācijas struktūras, tas liecina par to, ka drumlina kodola veidošanās laikā varēja būt mainīgi zemledāja hidroloģiskā režīma apstākļi. Lokālais ledāja spiediens bijis no ADA.

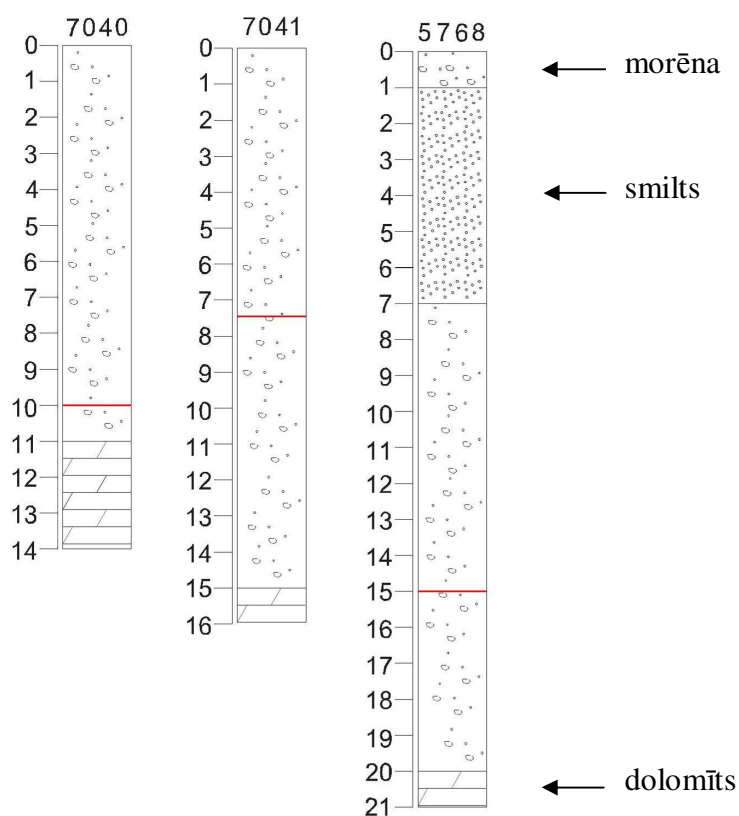
Kopā šajā Brencēnu drumlina karjera atsegumā tika veikti 48 nogulumu saguluma elementu mērījumi dažādu nogulumu slāņu kontaktzonās. Visi mērījumi parāda kopīgu tendenci, ledāja spiediena orientāciju no DR, rezultējošais azimuts ir 237° (4.2.9. att.), tātad var secināt, ka ledāja spiediens drumlina kodola un nogāžu uzbīdījumu veidošanās laikā bija orientēts virzienā, kas aptuveni perpendikulārs drumlina garenasij, respektīvi, no starpdrumlinu ieplakas.



4.2.9. attēls. Visu slāņu saguluma elementu mērījumu Brencēnu drumlina atsegumā vizualizācija sektordiagrammā. Ar sarkanajiem punktiem atzīmēti atsevišķie mērījumi (kopā 48)

Brencēnu drumlina karjerā tika veikti mērījumi arī otrajā atsegumā, kur tika ievākti paraugi OSL datējumiem. Mērīts tika slāņojums smalkgraudainā smiltī. Rezultāti norāda, ka baseinā, kurā izgulsnējies smalkgraudainas smilts materiāls, eksistējušas lokālas straumes, kuras plūdušas RZR–ADA virzienā.

Blakus Brencēnu kalna drumlinam atrodas 4 km garš, 2 km plats, 31,6 m augsts salikts drumlins, kurš distālā virzienā sazarojas divās daļās. Šī drumlina uzbūve pēc urbumu datiem (LVĢMC DB “Urbumi”) ir līdzīga Brencēnu drumlinam, vienīgi urbumu vietās morēnas slāņkopu nepārauj smilts materiāls. Triju urbumu dati (Nr. 6924, Nr. 4827, Nr. 4812) liecina, ka drumlina augšējā daļa 2,5 m līdz 7 m biežumā sastāv no morēnas smilšmāla, zemāk 4,4 m līdz 24,5 m biežumā konstatēti smilts, grants, oļu nogulumu, kas veido drumlina kodolu. Drumlina pamatne sastāv no morēnas smilšmāla 1 m līdz 15 m biežumā, kas uzguļ virs Daugavas svītas dolomīta. Trīs urbumi (LVĢMC DB “Urbumi”) liecina, ka drumlinu iekšējā uzbūvē dominē morēnas nogulumu, kodolā reizēm sastopami smilšainie nogulumu. Visbiežāk pēc urbumu datiem pamatiežus zem drumliniem veido dolomīts (4.2.10. att.). Kopumā Madlienas nolaidenumā ir droši konstatēti divu veidu drumlini – morēnas drumlini un drumlini ar glacioakvālo nogulumu kodolu, ko reizēm pārrauj morēnas segkārtā.



4.2.10. attēls. **Drumlinu urbumu griezumā.** Ar sarkano svītru atzīmēta drumlina pamatne.

Pārsvārā tikai no morēnas sastāv mazākie drumlini, lai gan pēc urbumu datiem (LVĢMC DB “Urbumi”, Nr. 5767) ir konstatēti arī par vidējiem parametriem lielāki drumlini, kas veidoti pilnībā no morēnas, piemēram, kāds 2,3 km garš, 0,7 km plats un 13 m augsts drumlins, kuram raksturīga stāva DR nogāze un lēzena ZA nogāze. Nereti drumliniem šķērsgrīzumā ir raksturīgs asimetrisks profils ar stāvāku pret DR vērsto nogāzi. Tas,

iespējams, liecina par nevienmērīgu ledāja sānisko spiedienu drumlinu veidošanās laikā ar dominējošo spiedienu no DR.

4.3. Pārējās glaciālās reljefa formas

Tipiskas Madlienas nolaidenuma frontālās reljefa formas ir Linkuvas gala morēnas vaļņi un grēdas, kas lokveidīgi stiepjas no Lielvārdes gandrīz līdz Siguldai 50 km garumā, to orientācija nedaudz svārstās no ziemeļu–dienvidu virziena, tā piekļaujoties nedaudz atšķirīgā šaurā leņķī Madlienas lauka drumliniem.

Madlienas nolaidenuma R daļā sastopamie vaļņi un grēdas veido Linkuvas gala morēnu, kas iezīmē Zemgales ledus loba maksimālo izplatību Vēlā Vislas apledošanas deglaciācijas Linkuvas reaktivizācijas fāzes laikā. Reljefa formas, kas atrodas uz rietumiem no Linkuvas gala morēnas, īpaši no tiem morfoloģiski neatšķiroties, ir radušās ledāja recesijas laikā, tāpēc tās var dēvēt par recesionālajām morēnām. Morēnas vaļņu garums ir no dažiem simtiem m līdz 5 km, platums no dažiem desmitiem metru līdz 1 km, pārsvarā vairāki simti m. Var pieņemt, ka katra nākamā recesionālās morēnas vaļņu sērija proksimālā virzienā ir veidojusies viena gada laikā, līdz ar to attālums starp recesionālās morēnas vaļņiem norāda ledāja atkāpšanās ātrumu gada laikā, kas ir vairāki simti m.

Pagaidām ir identificēti 312 gala morēnu vaļņi un grēdas, kas pretēji drumliniem lielāko blīvumu veido teritorijas ziemeļu daļā, tur radot līdz 8,5 km platu joslu. Dienvidu daļā vaļņi kļūst mazāk izteiksmīgi, jo tos daļēji pārklāj ledāja sprostezeru nogulumu.

Reljefa formas, kas atrodas uz rietumiem no Linkuvas gala morēnas vaļņiem, īpaši no tiem morfoloģiski neatšķiroties, ir radušās ledāja recesijas laikā, tāpēc tās var dēvēt par recesionālajām morēnām. Recesionālo morēnu lokveidīgā telpiskā orientācija liek domāt, ka to rašanās laikā ledāja malu veidoja vairākas mikromēles. Var pieņemt, ka katra nākamā recesionālo morēnas vaļņu sērija proksimālā virzienā ir veidojusies viena gada laikā, līdz ar to attālums starp recesionālo morēnu vaļņiem norāda ledāja atkāpšanās ātrumu gada laikā, kas varētu būt pat daži simti m.

Madlienas drumlinus lauks DA daļā noslēdzas ar vairākiem margināliem veidojumiem (grēdām), kuri orientēti aptuveni perpendikulāri ledāja kustības virzienam, atsevišķām grēdām ir mainīga orientācija. Dažas tāda tipa grēdas sastopamas arī gar lauka ZA malu, kur tie orientēti subparalēli drumliniem, vienu no tādām grēdām pēc urbuma datiem (LVĢMC DB "Urbumi", Nr. 672) veido morēnas smilšmāls augšējais 6 m, zemāk mainās morēnas un smilts materiāls. Savukārt drumlinu lauka DA malā sastopamā grēda veidota no 23 m biezas

morēnas, zem kuras atrodas smalkgraudainas smilts nogulumu (LVĢMC DB “Urbumi”, Nr. 2925).

Viena no savdabīgākajām Madlienā reljefa formām ir Zādzenes kalns, kuru varētu dēvēt par morēnas plato, – tā ir ieapaļa reljefa forma ar plakānu virsmu un samērā stāvām nogāzēm. Tā platība ir gandrīz 4 km², relatīvais augstums sasniedz 27 m. Zādzenes karjerā tika konstatēta divu ģenerāciju deformācijas morēna, ko nodalīja laukakmeņu bruģis. Augšējā daļā atrodas sīkplātņaina, bet apakšējā daļā slāniska morēna, kuru kopējais biezums ir aptuveni 2 m. Zem morēnas tika konstatēti pārsvarā nedeformēti smalkgraudainas baseina smilts nogulumu, kuros tika paņemts arī paraugs nogulumu datēšanai ar OSL metodi. Pēc urbuma datiem (LVĢMC DB “Urbumi”, Nr. 5765), Zādzenes kalna augšdaļu veido 1 m biezs māla slānis, zem tā 11 m biezi smilts nogulumu un pamatnē 27 m biezs morēnas slānis, kas uzguļ virs augšdevona Ogres svītas smilšakmeņiem. Minētais māla slānis visdrīzāk ir morēnas smilšmāls, kas tika konstatēts atsegumos karjerā.

Zādzenes kalna uzbūvē lielākoties ir pārstāvēti baseina smalkgraudainie nogulumu – smalkgraudaina līdz vidējgraudaina smilts, kas veido nepārtrauktus slāņus daudzu metru biezumā, tas liecina vai nu par ilgstošu baseina pastāvēšanu ar relatīvi nemainīgu dziļumu, smilšainā materiāla pieplūdi un virzienu, vai arī par ātru sedimentāciju.

Zem vairāku metru (virs 5 m) biežās smalkgraudainās smilts slāņa atrodas rupjāka smilts, grants materiāla slānis, kas satur oļus, retus laukakmeņus, kā arī atsevišķus apaļus morēnas veidojumus (konglomerātus) oļu lielumā, kas liecina, ka straumes ir noguldījušas pārskalotas morēnas materiālu.



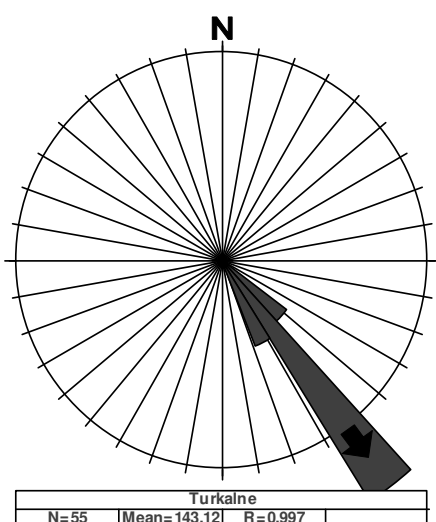
4.3.1. attēls. Atūdeņošanās un grābenveida struktūra Zādzenes karjerā (autora fotogrāfija)

Atseguma augšējā daļā novērotas struktūras, kas gan visdrīzāk ir veidojušās atšķirīgā laikā. Aleirītiskas smilts nogulumos atrastas atūdeņošanās pazīmes (4.3.1.A att.), kas liecina par ūdens atbrīvošanos no nogulumu pēdsedimentācijas laikā, respektīvi, kad nogulumu jau

bija uzkrājušies, bet baseins vēl pastāvēja. Aleirīta nogulumos tika atrasta struktūra, kas atgādina grābenu (4.3.1.B att.). Tā kā grābens atrodas atseguma augšējā daļā gandrīz uzreiz zem morēnas, tas varēja veidoties glaciotektonisko procesu rezultātā, pastāvot stiepes spriegumam. Pārējās Zādzenes kalnā konstatētās nogulumu detaļas aprakstītas diskusijas daļā saistībā ar procesiem ledāja–gultnes mijiedarbības zonā.

Blakus Zādzenes kalnam atrodas arī otrs karjers “Vilki”, kurā viscaur redzami līdzīgi baseina smilts nogulumi, virs kuriem bijusi plāna morēnas virskārta. Karjers atrodas reljefa formā, kas atgādina saliktu drumlinu (vairākas drumlinveida formas uz kopīga pamata), līdz ar to vēlreiz var secināt, ka daudzu Madlienas lauka drumlinu uzbūvi veido kodols no baseina nogulumiem, ko pārsedz plāna morēnas sega.

Lauka pētījumos izdevās veikt glaciālo skrambu mērījumus Tūrkalnes dolomīta karjera A galā uz dolomīta virsmas (3.2.1. att.). Karjers atrodas Rīgas–Ērgļu ceļa labajā pusē, 2 km uz DA no Vāverkroga, Ropažu līdzenuma A daļā. Rezultējošais vērsuma azimuts ir 143° (4.3.2. att.), tas raksturo lokālu ledus plūsmas virzienu no ZR uz DA. Šis virziens ir novirzīts aptuveni par 20° pulksteņrādītāja virzienā no Lielo Kangaru osa vaļņa orientācijas, kas atrodas 1 km uz Z no Tūrkalnes karjera. Glaciālo skrambu virziens ir līdzīgs drumlinu orientācijai, kas atrodas Madlienas nolaidenumā 20 km uz DA no Tūrkalnes karjera. Tā kā karjerā un tā apkārtnē ir ļoti plāna nogulumu sega (pat tikai līdz 1m), kuru galvenokārt veido Zemgales sprostezera smilšainie nogulumi, šis skrambu virziens varētu būt saistīts ar pēdējo aktīva ledāja uzvirzīšanos šajā teritorijā Linkuvas fāzes laikā. Tomēr skrambu virzienam ir lokāla nozīme, tās raksturo ledāja kustības virzienu noteiktā teritorijā, kas atkarīgs no sprieguma apstākļiem ledājā.



4.3.2. attēls. Tūrkalnes dolomīta karjera glaciālo skrambu mērījumu vizualizācija sektordiagrammā.

Pētītajā teritorijā ir identificēti arī osi, to virknes, grupas un sistēmas. Nozīmīgākās ir trīs osu sistēmas – Ogres Kangari, Lielie jeb Suntažu Kangari un Mazie jeb Allažu Kangari, kā arī Sidgundas Kangari, kurus veido divi paralēli osu vaļņi, kas izbeidzas ar plašu deltu. Vidējais attālums starp Kangaru osu sistēmām, kas ir novietotas savstarpēji paralēli, ir aptuveni 13 km. Tas liecina par noteiktu zemledāja noteces raksturu, uz lielo zemledāja kušanas ūdeņu daudzumu, kas pārsniedza gultnes iežu ūdenscaurlaidību, izsaucot to noteces koncentrēšanos zemledāja tuneļos, kas spēja savākt kušanas ūdeņus no plašas teritorijas. Kangaru osu iekšējās uzbūves pētījumi (Lamsters, 2009) liecina, ka noteiktos osu veidošanas etapos un vietās ir pastāvējušas ļoti spēcīgas zemledāja kušanas ūdeņu straumes, kas gan spējušas erodēt pamatiežus, gan arī transportējušas un noguldījušas rupju ledāja atlūzu materiālu, kas vietām, it īpaši osu iekšējās deltās, sastāv no oļiem un pat laukakmeņiem.

Sākotnēji osu veidošanās notika zemledāja tuneļos, kuri vēlāk varēja atvērties un pārplūst. Vietām pirms R (iegrauzti ledū) kanāliem pastāvēja N (iegrauzti ledāja gultnes iežos) kanāli, par to liecina iegrauzumi pamatiežos un vietējā pamatiežu materiāla, galvenokārt dolomīta, palielinātais saturs glaciofluviālajos nogulumos. Vēlāk veidojās R kanāli, kur uzkrājās osus veidojošais materiāls. Distālajās daļās Kangaru osi beidzas ar deltām, kas izbeidzas Linkuvas gala morēnu joslā.

Ogres Kangari ar nelieliem pārtraukumiem stiepjas 25 km garumā paralēli Daugavai starp Selēku ezeru un Lielvārdi. Lielie Kangari jeb Suntažu Kangari ar nelieliem pārtraukumiem stiepjas gandrīz 30 km garumā virzienā RZR–ADA no Birzkalnu mājām (2 km uz AZA no Zaķumuižas) līdz 3,5 km uz DA no Suntažiem. Mazie Kangari jeb Allažu Kangari ir izlocīti gandrīz nepārtraukti 10 km garumā. To proksimālā daļa sākas gar Tumšupi pie Gateru mājām 500 m uz A no Buļļu purva. Distālais gals izsekojams līdz 2,5 km uz A no Allažmuižas. Sidgundas Kangari ir visīsākie un neizteiksmīgākie starp Kangaru osiem, tos veido tikai divi osu vaļņi, kas izbeidzas ar deltu.

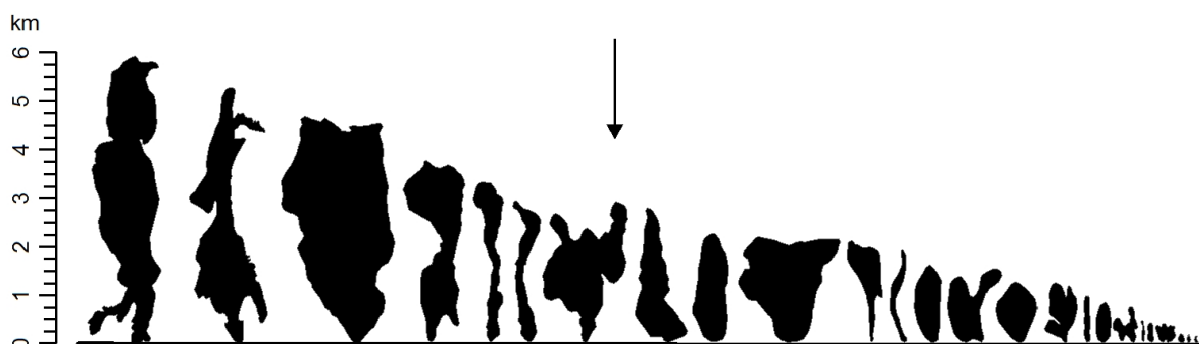
Kangaru osi pētītajā teritorijā ietilpst tikai daļēji. Šajā darbā veiktie detālās ģeomorfoloģiskās kartēšanas rezultāti apliecina, ka šo osu distālie gali izbeidzas Linkuvas recesionālo morēnu joslā. Visi šie osi ir sākuši veidoties, apņemot Zemgales loba ledus masām pēc Linkuvas reaktivizācijas fāzes, ledājam atkāpjoties no samērā stacionāra stāvokļa, kad notika intensīva tā malas joslas kušana.

Interesanti, ka gar drumlinu lauka ZA daļu sastopami vairāki osu virknējumi. To orientācija ir līdzīga drumlinu orientācijai. Tā kā izteiksmīgākie, garākie osi Madlienas nolaidenumā sastopami tieši gar drumlinu lauka ZA malu, to veidošanās, pat ja aizsākusies zemledāja tuneļos, visdrīzāk turpinājās saistībā ar plaisām ledājā.

5. DISKUSIJA

5.1. Drumlinu morfoloģija un telpiskais sakārtojums

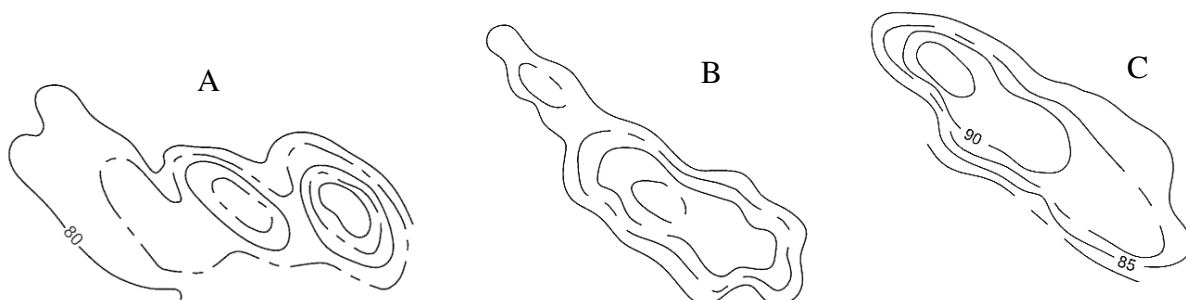
Madlienas drumlinu laukā sastopama liela drumlinu formu dažādība. Drumlinu kontūras plāna skatījumā mēdz būt gan ļoti robainas, gan arī līdzenas (5.1.1. att.). Protams, drumlini pēc to izveidošanās arī ir tikuši pakļauti dažādiem to apveida transformācijas procesiem, piemēram, ledāja kušanas ūdeņu darbībai. Arī dažādi holocēna procesi, piemēram, upju erozija, ir ietekmējuši sākotnējo drumlinu formu, tādēļ nav droši spriest par drumlinu kontūras veida saistību ar ledāja dinamiskajiem procesiem vai ledāja gultnes uzbūvi.



5.1.1. attēls. Madlienas nolaidenuma drumlinu kontūru piemēri (izstrādājis autors, izmantojot LU karšu servisa *kartes.geo.lu.lv* slāni TOPO 25K63g PSRS). Ar bultu parādīts aptuvenais ledāja kustības virziens.

Garas un šauras drumlinu formas tiek dēvētas par vāpstveida formām, savukārt platāki, bieži asimetriski drumlini – par paraboliskas formas drumliniem. Kompleksākas formas dēvē par šķērseniski asimetriskiem drumliniem, tos veido gareniskas grēdas, kas ir novietotas uz transversiem vai ieslīpiem pauguriem (Benn and Evans, 1998).

Drumlinu morfoloģiskos tipus ir diezgan sarežģīti izdalīt. Kā norāda Dž. Menzijs (Menzies, 2002), drumlini izrāda tik plašu formu un iekšējās uzbūves daudzveidību, ka ir gandrīz neiespējami raksturot to, kas ir klasisks drumlins. Arī Madlienas drumlinu laukā ir sastopamas ļoti atšķirīgas formas, kurām nav raksturīgas īpašas telpiskās izplatības likumsakarības. Tomēr ir iespējams izšķirt atsevišķus drumlinu tipus, piemēram, tipiskos, reversos un saliktos drumlinus (5.1.2. att.).



5.1.2. attēls. **Madlienas nolaidenuma drumlinu morfoloģisko tipu piemēri** (izstrādājis autors, izmantojot Latvijas Universitātes karšu servisa *kartes.geo.lu.lv* slāni TOPO 25K63g PSRS)
 A – salikts drumlins; B – reverss drumlins; C – tipisks drumlins. Attālums starp pamathorizontālēm – 5 m.

Madlienas lauka drumliniem ir noteikti dažādi morfoloģiskie parametri, kas aprakstīti rezultātu nodaļā. Šos parametrus iespējams salīdzināt ar citur pasaulē pētīto drumlinu parametriem. K.D. Klarks un citi (Clark et al., 2009) ir apkopojuši gandrīz 60 000 drumlinu morfometriskos parametrus Lielbritānijā un Īrijā, vidējais aritmētiskais drumlinu garums ir 629 m, visbiežāk tas ir robežās no 250 līdz 1000 m. Vidējais aritmētiskais platums ir 209 m, visbiežāk robežās no 120 līdz 300 m. Vidējais izstiepuma koeficients ir 2,9, visbiežāk robežās no 1,7 līdz 4,1. Ļoti līdzīgus rezultātus autori (ibid.) ir arī ieguvuši, apkopojot drumlinu parametrus visā pasaulē no 270 starptautiskajām publikācijām angļu valodā pēdējā gadsimta laikā. Izmantojot 41 svarīgāko publikācijas, tika iegūti šādi rezultāti: vidējais garums – 634 m, vidējais platums – 241 m un vidējais izstiepuma koeficients – 3,4. Autori (ibid.) ir secinājuši, ka drumliniem ir raksturīga ievērojama morfometrisko parametru līdzība, kas lielākoties ir neatkarīga no to atrašanās vietas vai pleistocēna seglledāju īpatnībām.

Salīdzinot minētā pētījuma drumlinu morfometriskos rezultātus ar šajā darbā iegūtajiem rezultātiem, var secināt, ka kopumā Madlienas lauka drumlini morfometriski ir diezgan līdzīgi drumliniem pasaulē, tādēļ darba autora iegūtie rezultāti papildina plašo dažādās pasaules vietās sastopamo drumlinu morfometrisko parametru klāstu. Šis novērojums arī ļauj secināt, ka autora iegūtos rezultātus par pētīto drumlinu morfometriju un līdz ar to arī par drumlinu uzbūves un veidošanās aspektiem ir korekti salīdzināt ar noteiktiem citu pētījumu rezultātiem, jo drumliniem neatkarīgi no to atrašanās vietas ir daudz kopīgu iezīmju.

Citur Latvijā gan ir konstatēti mazāki konverģentie drumlini. I. Strautnieks (Strautnieks, 1997) norāda, ka Vānes konverģento drumlinu laukā mazāko drumlinu garums ir 120–600 m, bet platums – 50–150 m. Lielāko drumlinu garums ir 1,5–2,4 km, bet platums no 0,2 m līdz 0,8 m, augstums nepārsniedz 6–7 m.

Latvijā lielākoties ir izplatīti diverģenti drumlinu lauki. Kā norāda V. Zelčs un A. Dreimanis (Zelčs and Dreimanis, 1997), drumliniem Burtnieka laukā ir subparalēls vai zigzagveida sakārtojums. Kopumā drumlinu muguras veido diverģējošu vādekli, kurš paplašinās reģionālās ledāja kustības virzienā. Lielākā daļa drumlinu ir 1–2 km gari, 100–600 m plati, ar relatīvo augstumu 6–12 m. Maksimālie izmēri ir 9,6 km garumā, 2,4 km platumā un 35 m augstumā. Visbiežāk ir sastopami elipsiodālas vai pilienvēda formas drumlini, daži ir adatveidīgi vai ar komplicētu formu. Adatveidīgās formas, kas ir sastopamas lauka proksimālajā daļā, ir klasificētas kā drumlinoīdi. Komplicētu formu drumlini zarojas to distālajās daļās.

Burtnieka laukā drumlinu blīvums ir lielāks virs lokāliem pamatiežu paaugstinājumiem. Drumlinu garenprofilu asimetrija ir atkarīga no to novietojuma pamatiežu paaugstinājumu proksimālajās vai distālajās nogāzēs. Drumlini ar stāvāku proksimālo daļu biežāk sastopami pret ledāju vērstajās pamatiežu pacēlumu nogāzēs, savukārt drumlini ar stāvāku distālo daļu – prom no ledāja vērstajās nogāzēs. Madlienas drumlinu laukā lielāks blīvums tiek saistīts ar ledāja plūsmas dinamiku, tās ātruma palielināšanos sakarā ar zemkvartāra virsmas reljefa slīpumu, kā arī lielāks drumlinu blīvums varēja būt saistīts ar palielinātu deformējamo nogulumu biezumu zemkvartāra virsmas pazeminājumā.

Izplatīts drumlinu formas parametrs ir garuma–platuma attiecība (*elongation ratio*), to veido garuma un platuma attiecība. Vidējā garuma–platuma attiecība drumliniem pārsvarā ir starp 2 un 3 (Menzies, 1979a, citēts Clark et al., 2009). Madlienas drumlinu laukā konstatētā vidēja aritmētiskā ir 3.

Klasiskā drumlinu forma ir raksturota, kā drumlini ar stāvāku proksimālo daļu, savukārt distālā virzienā tie sašaurinās, tomēr šīs klasiskās formas variācijas, iespējams, ir sastopamas daudz biežāk (Menzies, 2002).

Klasiskā asimetriska drumlina forma ir pat ilgstoši bijusi vispāratzīta ģeoloģiska paradigma, lai gan nav bijuši nopietni pētījumi, kas to pierādītu. Nesena publikācija (Spagnolo et al., 2010) pilnībā apgāž šo paradigmu. Pētījumā ir kartēti 44 500 drumlini Ziemeļamerikā un Ziemeļeiropā un analizēti divi parametri, no kuriem pirmais norāda uz maksimālā garuma un platuma krustpunkta relatīvo stāvokli, respektīvi, tā novietojumu uz drumlina garenass. Otrs parametrs ir definēts kā attiecība starp proksimālās drumlina puses plaknes laukumu un visu drumlinu. Rezultāti pārlicinoši norāda, ka drumlinu plaknes formai ir tendence būt gareniski simetriskai un ka ilgi atzītā paradigma ir kļūdaina. Pētījumā tika arī pierādīts, ka no ģeometriskām formām drumlini visvairāk atbilst elipsei, nevis 1959. gadā R. Čorlija (Chorley, 1959) norādītajai ģeometriskai formai – pusei no iegarenas astoņnieka cilpas (*lemniscate loop*). R. Čorlija (ibid.) pieņēmums par drumlina formu kopš tā laika bija

kļuvis ļoti populārs un plaši akceptēts. R. Čorlijs (ibid.) izveidoja parametru k , kas ir izteikts kā attiecība starp drumlina garumu un platību. Liela k vērtība, kas tiek asociēta arī ar lielāku garuma–platuma attiecību, norāda uz mazu pretestību ledāja plūsmai, līdz ar to drumlini var veidoties tur, kur bīdes spriegumi ir zemi un bazālā ledus ātrums liels.

5.2. Ledāja plūsma

Ledāja plūsmas virzienu pētāmajā teritorijā iespējams noteikt pēc šādiem plūsmas tiešajiem indikatoriem – glaciālajām skrambām un radiālajām reljefa formām (drumliniem), savukārt kā netiešos indikatorus var izmantot osu grēdu orientāciju, lokālo spriegumu rekonstrukciju – oļu linearitāti. Arī gala morēnas un recesionālās morēnas, kas vērstas perpendikulāri ledāja kustības virzienam, liecina par plūsmas virzienu. Vēsturiski dati par glaciālo skrambu mērījumiem tieši pētāmajā teritorijā raksta autoram nav zināmi, bet ir pieejami dati par glaciālajām skrambām blakus esošajā Ropažu līdzenumā V. Zāna (1935) rakstā, kur aprakstītas divas mērījumu vietas – Ogrē un Ķegumā. Ogrē, Ogres upes krastā ir konstatētas ļoti vājas ZR–DA virziena skrambas. Ķegumā, Daugavas labajā krastā uzmērītas skrambas ar azimutu no 115° līdz 120° . Ogres glaciālo skrambu aptuvenais virziens atbilst Ogres Kangaru osu orientācijai, kas caurmērā arī ir ZR–DA virzienā, savukārt Ķeguma glaciālās skrambas atspoguļo nedaudz citādāku orientāciju nekā Ogres Kangari, novirzoties līdz 20° pretēji pulksteņrādītāja virzienam. Jāpiebilst gan, ka osu orientācija nav tik precīzs ledāja kustības indikators, atsevišķu osu vaļņu, arī savstarpēji Kangaru osus sistēmu orientācija ir mainīga. Maģistra darba autora mērītajām skrambām bija raksturīgs 143° rezultējošais azimuts (4.3.2. att.), atšķiroties no tuvumā esošo Lielo Kangaru orientācijas azimuta, kas ir aptuveni 120° .

Ledus plūsma, kuras ietekmē notika pētītās teritorijas reljefa formu veidošanās, ir identificēta kā Rīgas ledus lielplūsma, kas ir sadalīta ledus lobos, no kuriem Viduslatvijas zemienē bija aktīvs Zemgales ledus lobs (Zelčs and Markots, 2004; Kalm, *in press*). Madlienas nolaidenumā ir izdalītas arī divas ledāja mēles – Augšogres un Lobes (Zelčs and Markots, 2004), kas varēja veidot Madlienas drumlinu lauka divas atšķirīgas daļas. Uz netieši varētu norādīt drumlinu orientācijas nevienmērības lauka Z un D daļā (5.2.1.A. att.), liecinot par to, ka Madlienas drumlinu lauka Z daļa varētu būt veidojusies Augšogres mēles ietekmē. Šo iespējamību teorētiski apstiprina uzskats, ka Gulbenes stadijas ledāja mala bija sadalīta daudzos mazos ledus lobos ar atšķirīgiem kustības virzieniem, norādot uz relatīvi plāna biezumu ledu, kas bija saistīts ar lokālo topogrāfiju (Kalm, *in press*).

Iespējamo divu ledus mēļu eksistenci Madlienas nolaidenumā var saistīt ar identificētajām bīdes sānu morēnām, kuras varētu būt saistītas ar robežzonu starp ledāja mēlēm. Bīdes sānu morēnas iezīmē robežu starp aktīvu un stagnantu ledu, tās var, betvar arī nesakrist ar bazālā termālā režīma izmaiņām, respektīvi, auksti un silti bāzētu ledu. Bīdes sānu morēnu veidošanās tiek saistīta ar ledāja gultnes eroziju un šī materiāla nogulsnešanu ledāja malas virzienā (Stokes and Clark, 2002b). Iespējams, sānu bīdes morēnu veidošanās Madlienas nolaidenuma ZA daļā varēja būt saistīta ar stagnantu ledu Vidzemes augstienes tuvumā, kur tas bija nobremzēts, un aktīvu ledu pretējā pusē. Kā redzams kvartāra nogulumu biezuma kartē (2.1.3. att.), bīdes sānu morēnu izplatība ir cieši saistīta ar palielinātu kvartāra nogulumu daudzumu. Tas liecina par izteiktu nogulumu akumulāciju, kas, iespējams, daļēji varēja notikt saistībā ar bīdes sānu morēnu veidošanos.

Ievērojamākā iespējamā bīdes sānu morēna pētītajā teritorijā ir Ķeipenes valnis, kas ir gandrīz 10 km garš, 0,3 km līdz 1,4 km plats, relatīvais augstums maksimāli sasniedz 42 m Ķeipenes tuvumā, valnis orientēts AZA–DDA virzienā. Interesanti, ka valnis kļūst šaurāks un pakāpeniski lēzenāks distālajā virzienā. Vaļņa distālais gals, iespējams, turpinās vēl tālāk. No Ķeipenes vaļņa arī atzarojas divi vaļņveidīgi turpinājumi, kas no sākuma orientēti DDA virzienā, bet ātri vien maina savu orientāciju atbilstoši Ķeipenes vaļņa orientācijai. Turklāt netālu DR virzienā no Ķeipenes vaļņa sastopama vēl viena forma, kuru varētu pieskaitīt pie bīdes sānu morēnu. Iespējams, šīs vairākās bīdes sānu morēnu liecina par ledāja malas laterālo migrāciju. Kopumā apvidū, kur sastopamas bīdes sānu morēnu, reljefam ir komplikēts raksturs, kas liecina par ledāja veidojumu salikto ģenēzi.

Kā norāda V. Zelčs (1995), Ķeipenes valni veido smilts un grants nogulumi, ko nogāzēs pārsedz pamatmorēna. Nogulumiem raksturīgas ledāja radītas dislokācijas.

1:200 000 mēroga ģeoloģiskās kartēšanas atskaitē (Mironovs un Vācele, 1962) ir minēts, ka pēc urbuma (Nr. 3) datiem, vaļņa cokolu veido glaciolimniskie un glaciofluviālie nogulumi – māls, dažādgraudaina smilts ar grants un oļu piejaukumu, šo materiālu pārsedz 3 līdz 4 m biezs morēnas smilšmāls.

Ledāja kušanas ūdeņu nogulumu pārsvars Ķeipenes vaļņa uzbūvē īsti neatbilst K.R. Stouksa un K.D. Klārka (Stokes and Clark, 2002b) uzskatiem par bīdes sānu morēnu uzbūvi, jo viņu identificētās formas galvenokārt ir veidotas no morēnas nogulumiem. Tomēr kā iespējama veidošanās mehānisms tiek minēts arī nogulumu transports ledāja malas virzienā ar iekšledāja un zemledāja kušanas ūdeņiem, kā rezultātā rodas morēnas, kuru sastāvā dominē glaciofluviālais materiālais. Tātad ledus plūsma sānu malu zonā var notikt nogulumu akumulācija kušanas ūdeņu transporta, zemledāja deformācijas un iekšledāja

materiāla izkušanas rezultātā (Punkari, 2007, citēts Stokes and Clark, 2002b). Iespējams, Ķeipenes valnis ir minēto procesu rezultāts.

Sānu bīdes morēnas veidojas zonā starp aktīvu un pasīvu ledāja plūsmu. Ķeipenes vaļņa gadījumā pret Vidzemes augstieni vērstajā zonā varēja būt aprimis ledus, savukārt pretējā pusē aktīva ledus plūsma. Lai veidotos sānu bīdes morēnas, kā to norāda viens no R.K.A. Hindmarša un K.R. Stouksa (Hindmarsh and Stokes, 2008) modeļiem, ledus plūsmā ir jāpastāv diferencētiem erozijas ātrumiem saistītiem ar plūsmas laterālām ātruma izmaiņām.

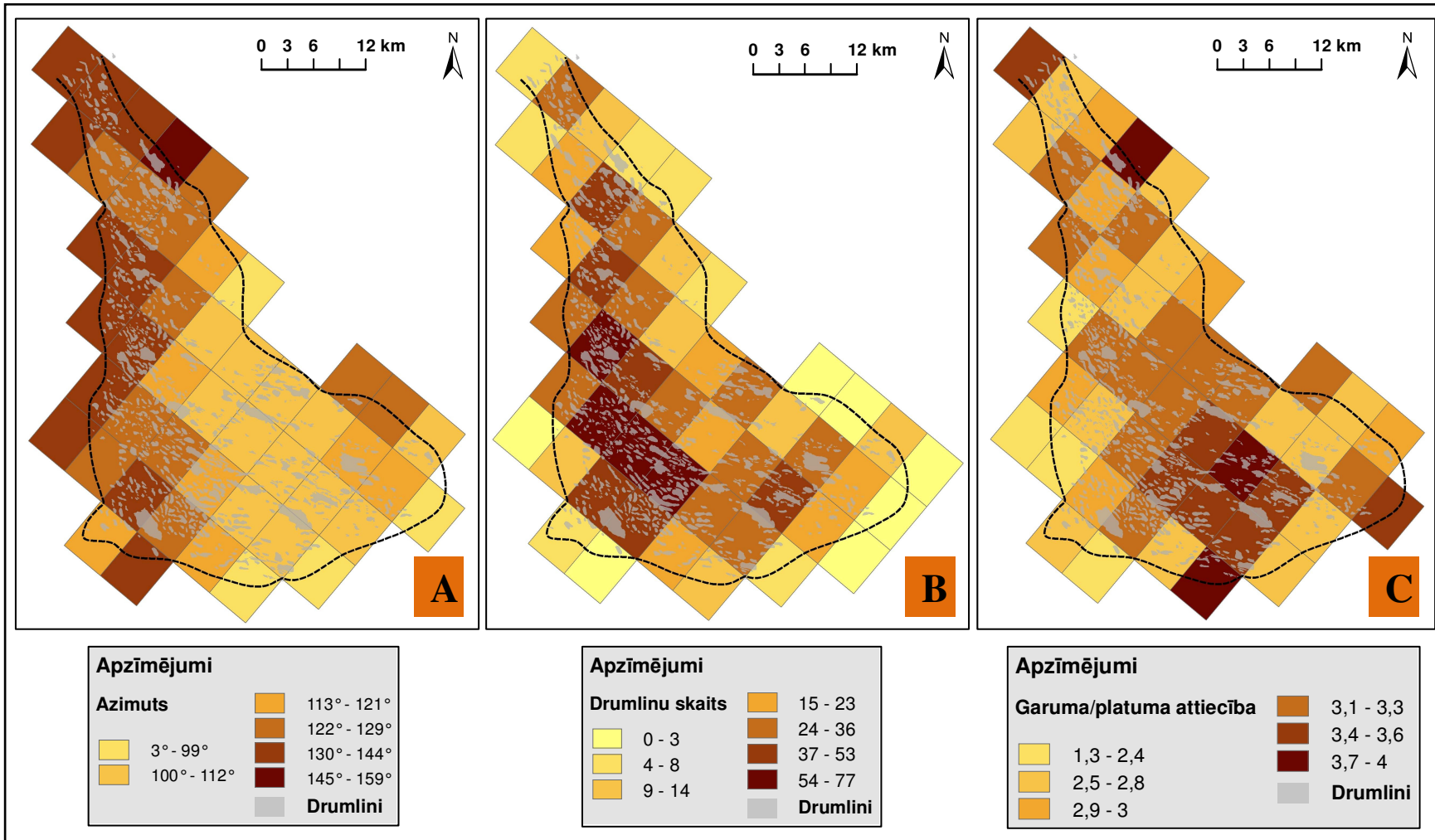
Ledus plūsmu Madlienas nolaidenumā ietekmēja zemledāja gultnes uzbūve. Kopumā var pieņemt, ka ledāja gultni tā uzvirzīšanās laikā Vēlā Vislas apledošanas Gulbenes fāzē veidoja plāna kvartāra nogulumu sega. Nekonsolidēti nogulumi bija piemēroti, lai atsevišķās vietās ledāja gultnē attīstītos deformējami apgabali un veidotos drumlini. Sakarā ar plāno kvartāra nogulumu segu, iespējams, lielāka nozīme uz zemledāja bazālo režīmu bija pamatiežiem. Diemžēl pirmskvartāra iežu izpēte, kas tika balstīta uz kartēm un atsevišķu urbumu datiem, neparāda izteiktas likumsakarības starp zemledāja gultnes iežu izplatību un drumliniem. Tiek pieņemts, ka zemledāja gultnes neviendabīgais sastāvs nodrošināja mozaīkveida gultnes deformēšanos un drumlinu attīstību. Nogulumos ar mazāku ūdens caurlaidību varēja pastāvēt augsts porūdens spiediens, kas sekmēja ledāja atkabināšanos no gultnes un pārvietošanos, slīdot pār gultni, nogulumos ar lielāku ūdens caurlaidību pastāvēja zemāks porūdens spiediens, kas izraisīja gultnes deformāciju un drumlinu veidošanos.

Ledāja plūsmai Viduslatvijas zemienē bija diverģents raksturs, bet pētāmā teritorija atrodas zemienes A daļā, kur tā robežojas ar Vidzemes augstieni, kas izsauca vairāk konverģentu plūsmas raksturu Madlienas nolaidenumā. Ledus plūsmu no A puses topogrāfiski kontrolēja Vidzemes augstiene, tādēļ ir skaidri nosakāma plūsmas A robeža. Plūsmas izplatība uz D un DA Gulbenes stadijas laikā ir nosakāma pēc marginālajām grēdām, kas norobežo Madlienas drumlinu lauka DA daļu. Grēdas lielākoties ir orientētas perpendikulāri ledāja kustības virzienam. Drumlinu lauka R robeža ir diezgan pēkšņa, tā nav saistīta ar topogrāfiskiem faktoriem, bet gan ar Linkuvas stadijas gala morēnu izplatību. Šīs morēnas, kas ir orientētas perpendikulāri ledāja kustības virzienam, transgresīvi ir uzvirzījušās drumliniem, tādēļ ledus plūsmas R robeža nav precīzi identificējama. Uz to, ka Linkuvas gala morēnas transgresīvi pārklāj Gulbenes fāzes laikā veidotā drumlinu lauka distālo daļu, norādīja jau V. Zelčs un A. Markots (Zelčs and Markots, 2004). Domājams, ka daļa drumlinu noteikti ir tikuši pārveidoti Linkuvas stadijas ledāja glaciotehtoniskās darbības rezultātā. Gala morēnu orientācija, it īpaši to izplatība Z daļā, tuvinās drumlinu orientācijai. Tas, pirmkārt, norāda uz nedaudz atšķirīgajiem ledāja kustības virzieniem Linkuvas un Gulbenes stadijās, jo Linkuvas stadijas laikā ledus plūsma netika pakļauta Vidzemes

augstienes ietekmei. Otrkārt, gala morēnas, šķiet, nav orientētas pilnīgi perpendikulāri ledāja kustības virzienam Linkuvas stadijas laikā, uz to norāda arī Kangaru osu orientācija, kas atspoguļo ledāja plūsmas virzienu. Gala morēnu orientācijai, iespējams, vajadzētu būt nedaudz noliektai vairāk uz austrumiem. Ja pieņem, ka pirms Linkuvas stadijas ledāja atkārtotās uzvirzīšanās gala morēnu vietā pastāvēja drumlini, tad ledājs, uzvirzoties un pārveidojot drumlinizēto ainavu, nespēja pilnībā izmainīt bijušo drumlinu orientāciju; tā daļēji ir saglabājusies gala morēnās.

Ja iepriekš minētie pieņēmumi ir pareizi, tad tiem vajadzētu atspoguļoties drumlinu morfometrisko parametru un telpiskās izplatības rādītājos. Zinātniskajā literatūrā, kur aprakstītas ledus plūsmas (e.g. Stokes and Clark, 2002a), bieži ir minēts, ka ledus plūsmas ātrums ir lielāks plūsmas centrālajā daļā. Gar malām plūsma parasti tiek bremsēta. Plūsmas konverģences gadījuma lielākais ātrums parasti ir tās šaurākajā vietā.

Plūsmas ātruma izmaiņas atspoguļojas arī drumlinu morfoloģijā, respektīvi, drumlini ir vairāk iztiepti jeb ar lielāku garuma–platuma attiecību. Konverģences gadījumā drumliniem raksturīgs arī lielāks blīvums. Protams, izstieptāki drumlini ne vienmēr veidosies ātras ledus plūsmas ātruma rezultātā, tā var būt arī lēna, bet ilgi pastāvoša plūsma. Drumlinu morfoloģijas variācijas var arī noteikt ledāja gultnes nogulumu un iežu izmaiņas. Lēnas ledus plūsmas gadījumā drumliniem būs raksturīgas to orientācijas izmaiņas, ko var izsaukt plūsmas virzienu fluktuācijas ilgā periodā. Drumlinu garuma–platuma attiecība gan ne vienmēr tiešā veidā ir attiecināma uz ledus plūsmas ātrumu, jo lielāku ledus plūsmas ātrumu var izraisīt arī ledāja atkabināšanos gultnes palielināta porūdens spiediena rezultātā. Tieša ledus plūsmas ātruma un pagarinātu drumlinu sakarība var tikt pieņemta tikai gadījumos, kad drumlini ir savstarpēji ļoti paralēli un ledus plūsmai ir izteikts konverģents raksturs (Stokes and Clark, 2002a). Madlienas lauka drumlinu gadījumā nav novērojama izteikti cieša paralelitāte un augsta konverģence, tādēļ drumlinu morfoloģijas un ledus plūsmas ātruma izmaiņu saistība nav izteikta. Kā redzams drumlinu orientācijas sadalījuma grafikā (4.1.3. att.), orientācijas azimuti visbiežāk variē 90° – 180° robežās, tas pierāda, ka drumliniem nav raksturīga cieša paralelitāte. Drumlinu orientācijas telpiskais sadalījuma izmaiņas ir parādītas 5.2.1.A attēlā. Cieša paralelitāte novērojama drumlinu lauka DA daļā, kas aptuveni sakrīt ar ledus plūsmas noslēdzošo daļu. Arī plūsmas sākuma zonā novērojama drumlinu savstarpēji cieša paralelitāte. Būtībā hipotētisko plūsmu var sadalīt divās daļās – sākuma un beigu, katrā no tām drumlini ir savstarpēji ciešāk paralēli. Šādas variācijas izmaiņām, iespējams, varēja noteikt drumlinu veidošanās laiks. Tomēr nav izdevies iegūt tiešus faktu, kas pierādītu, vai Madlienas lauka drumlini veidojušies vienlaikus.



5.2.1. attēls. Drumlinu orientācijas azimuta, skaita un garuma/platuma attiecības dažādās hipotētiskās ledāja plūsmas vietās.

Madlienas drumlinu laukumam tika izvilks regulārs tīkls ar šūnas izmēru 42 km². Tīkla līnijas tika sašķiebtas atbilstoši vidējam drumlinu orientācijas azimutam, lai aptuveni attēlotu ledāja plūsmas līnijas. Katrai šūnai tika aprēķinātas drumlinu orientācijas azimuta, skaita un garuma/platuma attiecības vidējās vērtības. Tā kā tīkls ir orientēts ledāja kustības virzienā, ir skaidrāk saskatāmas drumlinu parametru variācijas saistībā ar novietojumu ledāja plūsmas sektoros. Dominējošais ledāja kustības virziens ir no ZR.

Madlienas drumlinu lauka veidošanās nozīmīgākais faktors, protams, bija ledāja bilances uzlabošanās, kā rezultātā varēja izpausties aktīva glaciotektoniskā darbība. Uz to norāda V. Zelčs (1993a): “Ledāja aprīmšana blakusesošajos augstieņu rajonos uzlaboja ledus masu bilanci zemienēs. Sakarā ar ledus masu nevienmērīgu bremsēšanos pārejas zonā uz Vidzemes augstieni un Augstrozes paugurvalni, Viduslatvijas zemienes austrumu malā analogiskā glaciodynamiskā situācijā izpaudās ledus masu tecējuma sāniskais saspiedums un radās Viduslatvijas un Limbažu morēnuvālu lauki.”

Uz “nogriešanas” efektu jau norādīja O. Āboltiņš (1970) un G. Eberhards (1972), nodalot gala morēnu un morēnuvālu (kruklinu pēc mūsdienās lietotā apzīmējuma – *aut. piezīme*) kompleksus. Z. Meirons un citi (1976) šīs formas dēvē par gala morēnas uvāliem, kas no gala morēnas vaļņiem atšķiras ar mazākiem izmēriem. Linkuvas gala morēna pārklāj Gulbenes fāzes laikā veidoto kruklinu proksimālās daļas, kā to jau norādīja V. Zelčs un A. Markots (2004).

Nedrīkst pieņemt, ka drumlini viena lauka ietvaros ir veidojušies sinhroni un saistībā tikai ar pēdējo ledāja uzvirzīšanos. Drumlini var veidoties pakāpeniski ledāja atkāpšanās gaitā, kā arī atkārtotu ledāja uzvirzīšanās laikā drumlini var tikt ne tikai pilnīgi erodēti, bet arī saglabāties un, ledājam atkārtoti uzvirzoties, veidot saliktas formas (Benn and Evans, 1998).

Nav nekāda pamata pieņemt, ka tie būtu veidojušies vienlaikus. Orientācijas variācijas vairāk norāda, ka drumlinu lauka DA daļa varētu būt veidojusies atšķirīgā laikā, kurā ledus plūsmai bija nedaudz citādāks virziens. Tomēr šajā gadījumā liela nozīme varēja būt Vidzemes augstienes konfigurācijai. Augstienes robeža Madlienas nolaidenuma DA daļā strauji izliecas uz DA, līdz ar to ledāja plūsmai bija iespējams izplūst vairāk uz DA, līdz ar to mainījās drumlinu orientācija.

Drumlinu lauka DA daļai, precīzāk, D vidusdaļai, raksturīgs arī palielināta drumlinu garuma–platuma attiecība (5.2.1.C att.). Iespējams, šajā vietā ledus plūsma mainīja savu virzienu un varēja nedaudz brīvāk izplūst, to mazāk bremsēja arī Vidzemes augstiene, līdz ar to veidojās garenāki drumlini. Ja skatās šķērseniski ledus plūsmas virzienam, minētais apgabals arī iezīmē aptuveni plūsmas vidusdaļu, kur parasti arī plūsmas ātrums ir vislielākais. Plūsmas ātruma variācijas, iespējams, bija saistītas ar zemledāja virsmas reljefu (2.1.2. att.), jo lielākais drumlinu blīvums ir cieši saistīts ar izteiktu iegrauzumu pamatiežos.

Par ledus plūsmas ātrumu deglaciācijas gaitā pētāmajā teritorijā var spriest pēc recesijas morēnu novietojuma. Šis jautājums jau ir apskatīts iepriekšējā nodaļā, bet ir svarīgi pieminēt citu pētnieku konstatētos ātrumus. Līdzīgi ledāja atkāpšanās ātrumi no Linkuvas gala morēnām ir konstatēti Zemgalē, kur par to liecina attālumi starp recesijas laikā veidotajām rievotajām morēnām. Vidējie attālumi ir 125–375 m, maksimāli sasniedzot aptuveni 500 m

(Zelčs, 1999; Zelčs and Markots, 2004). Ātra ledāja atkāpšanās Linkuvas stadijas laikā ir konstatēta arī ārpus Latvijas. Uz ātru ledāja atkāpšanos laikā pirms 14,7 līdz 12,7 tūkstošiem kalendārajiem gadiem Igaunijā, norāda arī V. Kalms (Kalm, 2006), vidējo ledāja atkāpšanās ātrumu raksturojot kā 110 m gadā. Savukārt, citu autoru (Saarnisto and Saarinen, 2001) norādītais maksimālais ledāja atkāpšanās ātrums, balstoties uz varvju hronoloģiju Oņegas baseinā Karēlijā, pirms 14,2 līdz 12,7 tūkstošiem gadu sasniedzis 300 m gadā, vidēji 200 m.

Par noteiktiem procesiem ledāja atkāpšanās laikā pētāmajā teritorijā norāda osu klātbūtne. Lai gan tie nav pārlicinošs pierādījums kušanas ūdens klātbūtnei zemledāja gultnē drumlinu veidošanās laikā, tomēr tie liecina par aktīvu zemledāja drenāžu īsi pēc drumlinu izveidošanās (Patterson and Hooke, 1995). Diskusija par procesiem zemledāja gultnē aprakstīta nākamajā nodaļā.

5.3. Procesi ledāja–gultnes mijiedarbības zonā

Glaciotektonisko reljefa formu izplatība Madlienās nolaidenumā norāda uz īpašiem apstākļiem ledāja–gultnes mijiedarbības zonā, kas nodrošināja glaciotektonisko deformāciju rašanos. Glaciotektonisko deformāciju rašanos veicināja pamatiežu un kvartāra nogulumu ūdens caurlaidības variācijas, kā rezultātā zemledāja gultnē bija mainīgs porūdens spiediens. Tas sekmēja deformāciju veidošanos epizodēs, kad ledājs bija sakabinājies ar gultni, un bazālo slīdēšanu, kad ledājs atsaistījās no gultnes ļoti augsta porūdens spiediena dēļ.

Galvenie procesi zemledāja gultnē, kas ietekmē ledāja kustību un nogulumus, ir zemledāja gultnes deformācija un ledāja kustība bazālā slīdēšanas veidā. Zinātnieku viedokļi atšķiras par šo jautājumu, kas galvenokārt nosaka ledāja kustību. Vairāki autori norāda, ka (Piotrowski and Kraus, 1997; Piotrowski et al., 2001) ledāja kustība galvenokārt notika bazālās slīdēšanas dēļ, bet ir iespējami lokāli deformācijas apgabali.

J.A. Piotrovskis un citi (Piotrowski et al., 2004) apgalvo, ka ledāja gultne ir mozaīka no deformējamiem un stabiliem iecirkņiem. Ledāja gultnes mozaīkas teoriju apstiprina arī pētījumi par procesiem zem mūsdienu ledājiem (King et al., 2007; Smith and Murray, 2009). Savukārt citi mūsdienu ledāju pētījumi, kā apgalvo Dž..S. Boultons (Boulton et al., 2001), liecina, ka gultnes deformācijai ir nozīmīga vai pat svarīgākā loma ledāja kustībā, kas gan var notikt bazālās slīdēšanas un gultnes deformācijas procesu veidā, mainoties ūdens spiediena ciklu laikā. Zema ūdens spiediena cikla laikā notiek nogulumu konsolidācija un ledāja–gultnes sakabināšanās.

J.A. Piotrovska un citu (Piotrowski et al., 2004) zemledāja gultnes mozaīkveida deformācijas modelis ir pierādīts arī Rietumlatvijā, kur Vēlā Vislas apledošanas laikā Apriķu ledāja mēles dinamiku noteica porūdēns spiediena izmaiņas, kas atspoguļojās ledāja sasaistes pakāpē ar tā gultni. Apgabalos ar lielāku porūdēns spiedienu ledājs pārvietojās bazālā slīdējuma veidā, bet zemāka spiediena vietā ledājs sporādiski sasaistījās ar gultni (Saks, 2010; Saks et al., in press). Šādu modeli un porūdēns noteicošo lomu tajā ir apstiprinājuši arī citi autori (Lee and Phillips, 2008), norādot, ka deformācijai ir mozaīkveida raksturs, to telpā un laikā kontrolē porūdēns satura variācijas un morēnas biezuma pieauguma ātrums. Pavājinātās zonas ūdeni vairāk saturošajos morēnas apgabalos novietosies noteiktos deformācijas gultnes apgabalos.

Lai gan aizvien vairāk publikācijās tiek atbalstīts gultnes mozaīkveida deformācijas modelis, ir autori (van der Meer et al., 2003), kuri uzstājīgi atbalsta plaši izplatītas ledāja deformācijas gultnes eksistenci, kā pierādījumu minot to, ka lielai daļai zemledāja morēnu ir deformācijas iezīmes, savukārt nogulsnešanās iezīmes ir retas. Tiek pat ieteikts atšķirt zemledāja morēnu kā strukturālus nogulumus no izgulsnēšanās nogulumiem, lietojot pirmajā gadījumā terminu "tektomīts", norādot, ka visas zemledāja morēnas, iekļaujot makroskopiski masīvās, ir bijušās deformējamās ledāja gultnes. Tā kā visas zemledāja morēnas gultnes ir deformācijas gultnes, ir maz ticami, kas pastāv klasiskie morēnu veidi, kā sablīvējuma un zemledāja izkusuma morēnas. Tikai paša materiāla atbrīvošanos no ledāja var skatīt sablīvējuma un izkusuma procesu perspektīvā (van der Meer et al., 2003).

Citi autori (Piotrowski et al., 2001) ir mēģinājuši raksturot vairākas parādības, kas norāda uz deformācijas gultnes ierobežoto izplatību. Viena no parādībām, kas liecina par to, ka gultnes deformācija nav notikusi vai tā ir tikusi ierobežota dažus milimetrus plānā slānī, ir ass kontakts starp morēnu un apakšā esošajiem nogulumiem. Šādi asi erozijas kontakti ir sastopami daudz biežāk nekā kontakti ar nogulumu pakāpenisku pāreju. Dž.S. Boultons un citi (Boulton et al., 2001) gan norāda, ka šādi asi kontakti liecina par deformējamās morēnas kapacitāti absorbēt deformāciju, respektīvi, deformācijai tika pakļauts pats morēnas slānis, tas varēja pasargāt apakšā esošos slāņus no deformācijas.

Šī darba autors ir konstatējis asu morēnas un baseina nogulumu kontaktu esamību, kas novēroti Zādzēnes kalna karjera atsegumā (5.3.1.A, B att.). Baseina nogulumi ir saglabājuši savas sedimentācijas struktūras pat uzreiz zem morēnas. Tā kā atsegumā sastopama deformācijas morēna, šajā gadījumā zemledāja gultnes deformācijai bija pakļauta pati morēna, kas iezīmē arī bīdes zonu zem ledāja. Iespējams, deformācija arī izpaudās aptuveni vienu centimetru biezā zonā baseina nogulumos, jo morēna ir nedaudz izplūdusi tās pamatnes daļā.



5.3.1 attēls. Asi kontakti starp morēnu un baseina nogulumiem “Zādzenes” karjerā (autora fotogrāfijas)

J.A. Piotrovskis (Piotrowski et al., 2001) norāda, ja zemledāja materiāls ir ticis pakļauts deformācijai, tam ir jābūt strukturālām un teksturālām pazīmēm no deformācijas procesa. Diemžēl, tam joprojām nav vispāratzītu diagnosticējošu kritēriju. Vieglāk ir pierādīt, ka morēna nav tikusi pakļauta deformācijai. Viens no šādiem kritērijiem ir morēnas heterogenitāte, piemēram, bazālajā morēna iekļautie šķirotu nogulumu slāņi, bloki un atrauteņi. Šādu nekonsolidētu nogulumu bloku materiāls bieži ir nesajaukts, un kontakts ar morēnu ir ass. Deformējamā gultnē būtu jānotiek materiāla pakāpeniskai sajaukšanai, kas sākotnēji radītu izsmērētus kontaktus un, deformācijai turpinoties, pilnīgu materiāla homogenizāciju.

J.A. Piotrovskis un A.M. Krauss (Piotrowski and Kraus, 1997) ziņoja par bieži sastopamiem smiltis un aleirīta bloku ieslēgumiem morēnā, kas tipiski nepārsniedz 0,5 m diametrā. Šādi ieslēgumi galvenokārt sastopami morēnas apakšējā daļā. Tie tiek interpretēti kā daļa no substrāta, kas ticis iekļauts ledāja pamatnē, transportēts noteiktā attālumā un nogulsnēts kopā ar morēnu. Neskartā bloku struktūra un asie kontakti nepieļauj nozīmīgu nogulumu homogenizācijas esamību. Morēna varēja tikt pakļauta tikai ļoti lēnai deformācijai.



5.3.2. attēls. Aleirīta bloka ieslēgums morēnā Brencēnu karjerā (autora fotogrāfija)

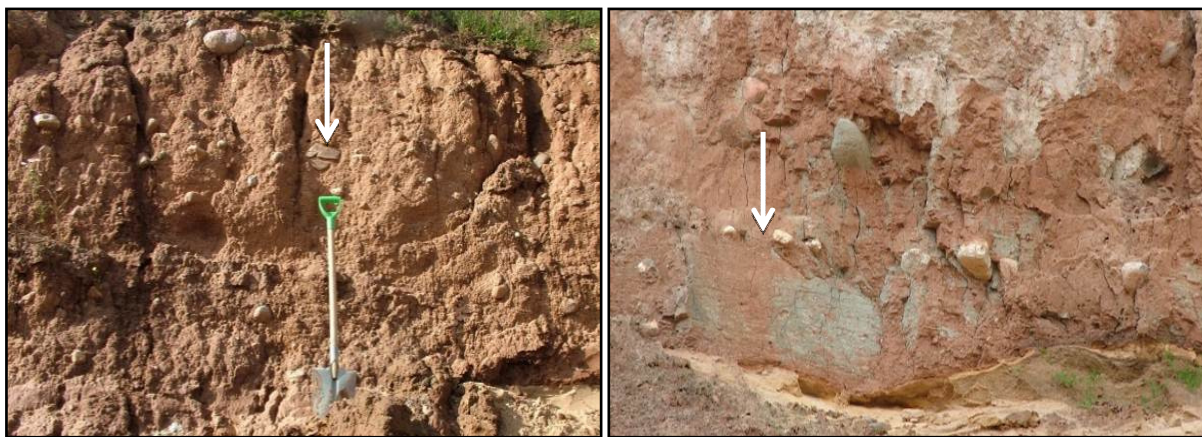
Maģistra darba autors ir konstatējis aleirīta bloka ieslēgumu morēnā Brencēnu kalna drumlina karjera atsegumā (5.3.2. att.). Aleirītam raksturīgs ļoti liels blīvums, kā arī ass

kontakts ar apkārt esošo morēnu. Šāds aleirīta bloks liecina par to, ka kopš bloka iekļaušanas morēnā tā varēja tikt pakļauta tikai niecīgai deformācijai.

Laukakmeņu bruģis morēnā

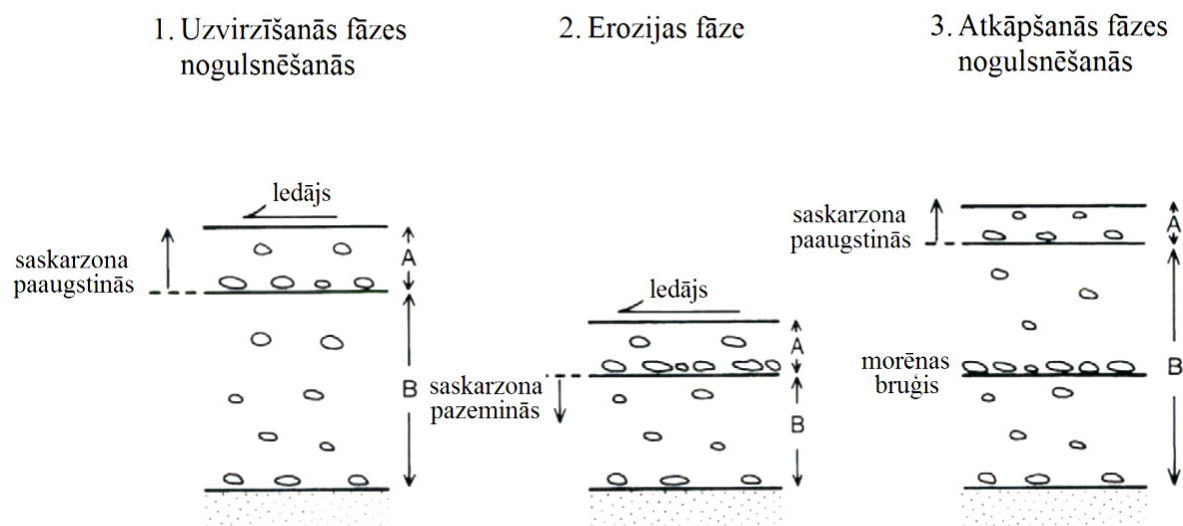
Kā pierādījums deformējamai gultnei ir minēti laukakmeņu bruģi morēnā, kur to veidošanās tikusi saistīta ar laukakmeņu grimšana dilatētā morēnā. Tomēr šāds veidošanās mehānisms ir diezgan neticams, turklāt laukakmeņu bruģiem ir iespējami dažādi izskaidrojumi, tādēļ to esamība vien nevar tikt lietota kā pierādījums deformējamai gultnei. Drīzāk laukakmeņu bruģi morēnā, kuriem ir raksturīgas ledāja radītas skrambas virsējā daļā, kuras tipiski orientētas ledāja kustības virzienā, norāda uz deformācijas trūkumu. Šādi laukakmeņu bruģi ar skrambām veidojas, tiem esot stabilā pozīcijā zemledāja gultnē, kamēr ledāja kustība notiek bazālā slīdējuma veidā, abradējot laukakmeņu virsmu (Piotrowski et al., 2001).

Laukakmeņu bruģis ir konstatēts pētītajā teritorijā, Zādzenes karjerā, kur tas atrodas starp diviem atšķirīgiem deformācijas morēnas slāņiem (5.3.3. att.). Darba autoram nav izdevies veikt detālākus laukakmeņu bruģa pētījumus, tādēļ tā veidošanās apstākļi pagaidām nav noskaidroti. Laukakmeņu bruģa veidošanās morēnā parasti tiek saistīta ar ledāja vai tā kušanas ūdeņu eroziju, pats laukakmeņu bruģis visbiežāk atspoguļojot erozijas virsmu.



5.3.3. attēls. Laukakmeņu bruģa piemēri morēnā Zādzenes karjerā (autora fotogrāfijas)

Laukakmeņu bruģa modeli izstrādāja Dž.S. Boultons (Boulton, 1996). Viņš pieņem, ka ledāja maksimālās uzvirzīšanās vai atkārtotas uzvirzīšanās malas tuvumā vajadzētu būt zonai, kurā uzvirzīšanās fāzes morēna ir tikusi daļēji erodēta, pirms to pārklāj atkāpšanās fāzes morēna. Šo erozijas zonu atspoguļo laukakmeņu bruģis morēnā.



5.3.4. attēls. Laukakmeņu bruģa veidošanās modelis morēnā (Boulton, 1996. Ar autora pārveidojumiem)

Ja laukakmeņu bruģis ir veidojies erozijas rezultātā, augšējie un apakšējie morēnas slāņi būs litoloģiski atšķirīgi. Laukakmeņu bruģa augšējā virsmā vajadzētu būt erozijas pazīmēm; ja bruģis bijis stabils, tad uz laukakmeņiem var izveidoties sistemātiskas ledāja skrambas.

Laukakmeņu bruģis pēc Dž.S. Boultona (ibid.) modeļa veidojas šādā veidā: ledāja uzvirzīšanās fāzē saskarzona starp A un B morēnas horizontiem paaugstinās (5.3.4. att.), bet laukakmeņu koncentrācija samazinās. Erozijas fāzē saskarzona pazeminās, bet laukakmeņu koncentrācija pieaug. Atkāpšanās fāzē, nogulsnējoties jaunai morēnai, saskarzona atkal paaugstinās, savukārt izveidojušais laukakmeņu bruģis attālinās no saskarzonas.

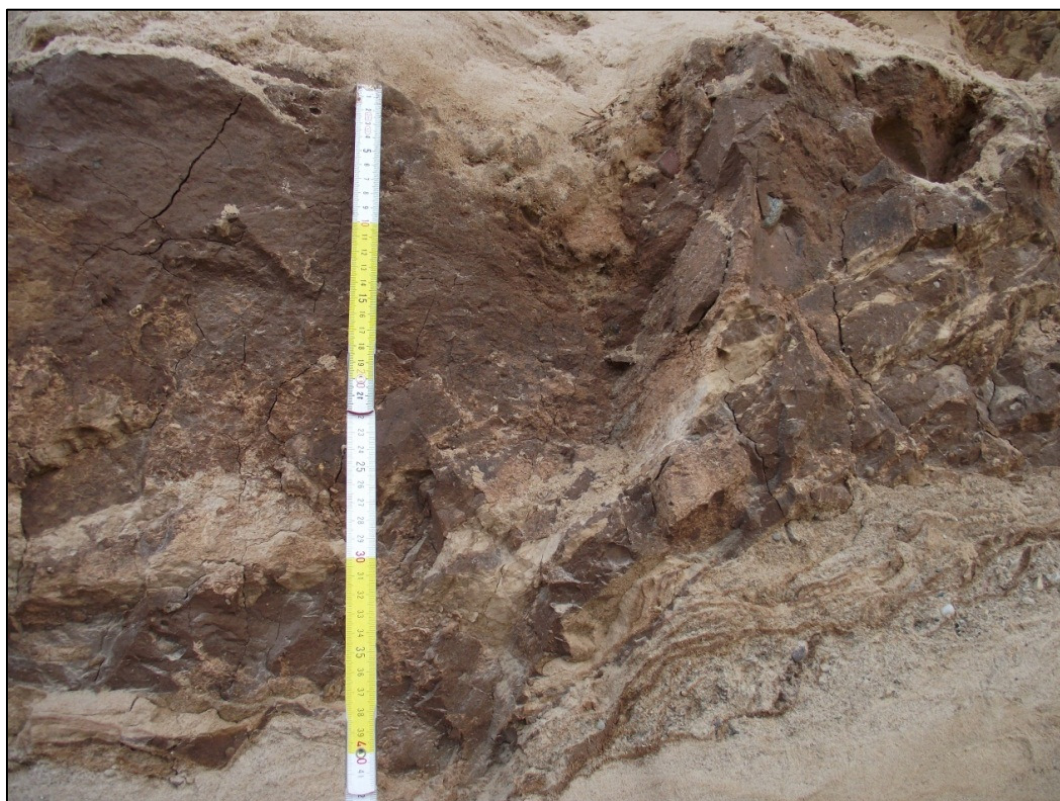
Citi autori (Leseman et al., 2010) laukakmeņu bruģa veidošanos saista nevis ar morēnas nogulumu eroziju, bet gan zemledāja fluviālo eroziju, kad vairāku ledāja–gultnes sakabināšanās un atkabināšanās epizožu laikā notiek bazālā ledus erozija. Autori (ibid.) skaidro, ka viņu pētījuma teritorijā Fīna salā, Dānijā, daļa no laukakmeņiem tika iekļauti zemledāja smilts, grants nogulumos. Lielākie laukakmeņi sastopami horizontāli slīpslāņotā grantī. Tie veidojās, zemledāja kušanas ūdeņu plūsmām erodējot ledāja pamatni, vēlāk plūsmas nogulumu, kas sastāvēja lielā mērā no grants ar laukakmeņiem, izgulsnējās.

Zemledāja bīdes zonas

Viens no raksturīgākajiem ledāja–gultnes mijiedarbības zonas apstākļiem ir saistīts ar zemledāja bīdes zonām. Tās ir sastopamas dažādās glaciālās vides pozīcijās. Ledāja apakšējā daļa var funkcionēt kā bīdes zona. Bīdes zona var attīstīties arī uzbīdījumu apakšējā slānī, kā arī drupu materiāla plūsmas vai plūsmas morēnas apakšdaļā. Vienkārša zemledāja bīde rada deformācijas morēnu. Trauslas deformācijas bīdes zonas satur tām raksturīgus lūzumus un

plaisas, kā, piemēram, Rīdeļa nošķēlumus un stiepes plaisas. Plastiskām bīdes zonām ir raksturīgas budinas, krokas un kinkbendi (Menzies, 2002).

Zemledāja bīdes zona ar raksturīgām nogulumu deformācijas struktūrām tika atklāta Brencēnu kalna drumlina nogāzē (5.3.5. att.). Bīdes zona ir pārstāvēta zvīņveida uzbīdījuma veidā. To lielākoties veido deformācijas morēna, kas atspoguļo pašu zemledāja bīdes zonu. Tai var izdalīt F.M. van der Vaterena (van der Wateren, 1987) minētās trīs vienības. Deformācijas ātrums samazinās no augšas uz leju, tādēļ bīdes zonas augšējai daļai raksturīgs homogenizēts materiāls. Zem tā morēna satur plānas smilts kārtiņas un budinas. Bīdes zonas pamatnē, kur deformācijas ātrums bija mazākais, ir sastopams diamiktons no smilts un morēnas kārtām, kas izlocītas krokās. Šajā daļā materiālam raksturīga vislielākā heterogenitāte.



5.3.5. attēls. Piemērs no zemledāja bīdes zonas Brencēnu kalna drumlina nogāzē (autora fotogrāfija)

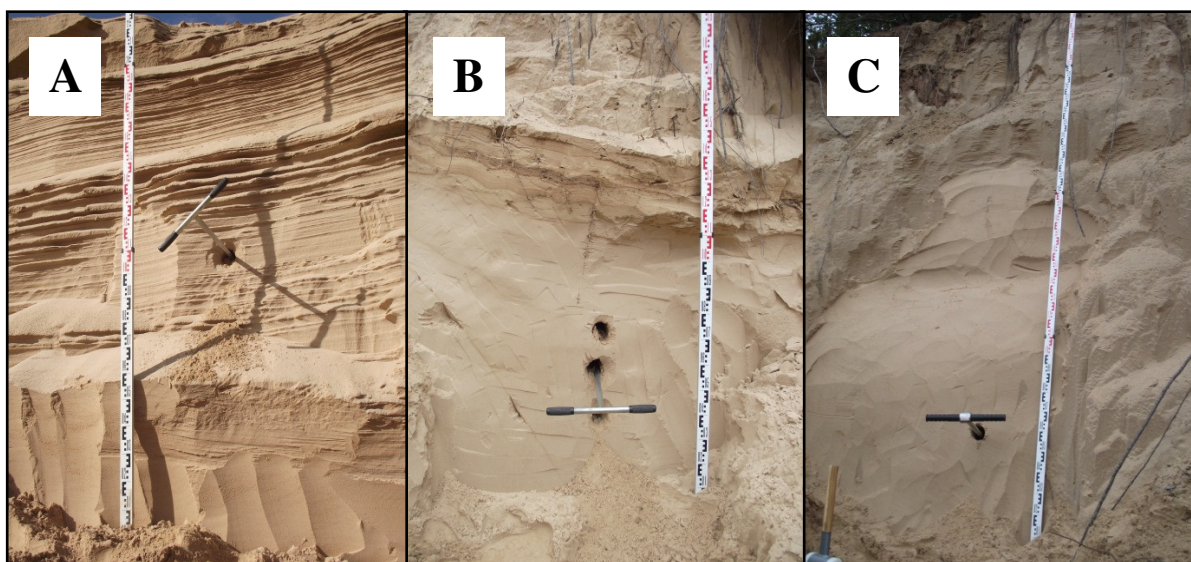
Kā norāda Dž.S. Boultons (Boulton et al., 2001), šādas smilts kārtiņas veidojas vairākos lokalizētos vai arī acumirkļīgos, nošķirtos deformācijas notikumos. Atšķirīgas litoloģijas materiāls no zemledāja gultnes tiek ievilkts morēnā; tas veido plānus slāņņšus, jo no vilkšanas krokām turpmākas deformācijas procesos attīstās budināža. Ja deformācijas notikumu ir daudz, iepriekš izveidotās struktūras tiek pārveidotas homogenizētā morēnā.

Arī Dž.S. Boultons (Boulton, 1996) minēja, ka pie vidēja deformācijas ātruma tipiska bīdes zona nekonsolidētos nogulumos satur sakrokotus un novājinātus (*attenuated*) slāņus. Lielākas deformācijas rezultātā šīs struktūras izzūd pilnīgi homogenizētā matricā. Brencēnu drumlina bīdes zonas augšējā daļā ir pilnīgi homogenizēta morēna, savukārt apakšdaļā – sakrokots diamikots ar Dž.S. Boultona (Boulton et al., 2001) minētajiem ievilkuma slānīšiem.

Zemledāja bīdes zonām ir raksturīga laiktelpiski komplicēta attīstība. Zinātniskajā literatūrā tiek minēti divi bīdes zonu izplatības modeļi. Pirmais atbalsta plaši izplatītas deformācijas eksistenci, kur visas dažādu procesu rezultātā producētās morēnas fācijas, kā izkusuma un sablīvējuma morēnas, tiek pakļautas zemledāja bīdei un ir definējamas kā deformācijas gultnes morēnas (van der Meer et al., 2003). Otrais modelis izceļ mozaikveida deformācijas izplatību (Piotrowski and Kraus, 1997; Piotrowski et al., 2004).

Nogulumu veidošanās vecums

Lai noteiktu nogulumu veidošanās vecumu, pētāmajā teritorijā tika paņemti 3 paraugi nogulumu datēšanai ar OSL metodi. Tā kā datējumu rezultāti ir aizkavējušies, tālāk ir aprakstīti daži analoģu nogulumu datējumu piemēri no Baltijas valstīm. Silgaļu karjerā paraugs tika paņemts smilts nogulumos (5.3.6.B att.), kuri, domājams, veidojušies lokālā baseinā, kurš pastāvējis Vislas leduslaikmeta beigu posmā, savukārt abi pārējie paraugi tika ņemti zemmorēnas smalkgraudainajos nogulumos Zādzenes un Brencēnu karjeros (5.3.6.A, C att.), kuru iespējamā veidošanās varētu būt saistīta ar Vidusvislas interstadiāla baseinu.



5.3.6. attēls. Paraugu ņemšanas vietas OSL datējumiem (autora fotogrāfijas)

Šī laikposma baseina eksistence ir pierādīta Rietumlatvijā, kur OSL datējumi no Kurzemes piekrastes atsegumiem liecina par baseina eksistenci laika posmā 26 līdz 52 tūkstošiem gadu pirms mūsdienām (Saks et al., *in press*). Arī Igaunijā ir pierādīti no ledus

brīvi apstākļi laika posmā no 26,8 līdz 43,2 tūkstošiem gadu pirms mūsdienām (Kalm, 2006). Lietuvas ZR divi ^{14}C datējumi liecina par baseina eksistenci pirms 33 tūkstošiem gadu pirms mūsdienām (Satkunas et al., 2009). Vidzemes augstienes D daļā zem Vēlā Vislas apledojuma morēnas esošie smilts nogulumi ir uzkrājušies Vidusvislas laikā pirms 19,6 līdz 26,8 OSL gadiem (Raukas et al., 2010), līdz ar to ir visai iespējams, ka arī autora pētītās teritorijas zemmorēnas smilšainie nogulumi varētu būt uzkrājušies Vidusvislas interstadiāla laikā.

SECINĀJUMI

Realizējot darbā izvirzītos uzdevumus, tika sasniegts darba mērķis un iegūti turpmāk minētie secinājumi.

Pēc zinātniskās literatūras analīze var secināt, ka drumliniem visā pasaulē ir līdzīgi morfoloģiskie parametri, tas liecina par drumlinu morfoloģijas neatkarību no to reģionālā novietojuma un atšķirīgiem ledāja dinamiskajiem apstākļiem. Process, kas regulē drumlinu veidošanos un morfoloģiju ir ledus plūsmas raksturs, telpā un laikā, mainoties bazālās slīdēšanas un gultnes deformācijas procesiem porūdēns spiediena variāciju dēļ, ko determinē zemledāja gultnes reljefs un litoloģija.

Madlienas nolaidenuma glaciālo reljefa formu veidošanās galvenokārt notika Vēlā Vislas apledošanas vispārējās deglaciācijas laikā Gulbenes un Linkuvas ledāja reaktivizācijas stadijās. Gulbenes stadijā izveidojās Madlienas drumlinu lauks, iespējamās sānu bīdes morēnas un atsevišķi marginālās grēdas. Linkuvas oscilācijas nozīmīgākās ledāja reljefa formas ir Linkuvas gala morēnas un ar to saistītie recesionālie veidojumi, kuru savstarpējais izvietojums norāda uz ātru ledāja atkāpšanās gaitu.

Izveidotā ģeomorfoloģiskā karte liecina par glaciotektonisko reljefa formu plašo izplatību Madlienas nolaidenumā un līdz ar to par komplikētu zemledāja dinamisko procesu mijiedarbību.

Pirmskvartāra iežu dažādašais litoloģiskais sastāvs pētītajā teritorijā veicināja telpiski mainīga porūdēns spiediena uzturēšanu, kā rezultātā izpaudās zemledāja gultnes mozaikveida deformācija. Drumlinu veidošanās tika sekmēta apgabalos, kur porūdēns spiediena samazināšanās rezultātā notika ledāja sakabināšanās ar gultni, un varēja veidoties drumlinu kodoli, ledāja gultnes materiāla izspiešanas rezultātā. Brencēnu drumlina pētījumi ļauj secināt, ka tā kodola un nogāžu morēnas zvīņveida uzbīdījumu veidošanās laikā dominējošais sprieguma virziens bija perpendikulārs tā garenasij, tātad drumlinu veidošanās bija lielā mērā saistīta ar ledus plūsmas sānisko bremsēšanos, ko izsauca zemkvartāra virsmas slīpums un pamatiežu pacēlums tagadējās Vidzemes augstienes pamatnē, kas ZA virzienā norobežoja ledus plūsmu, veicinot tās konvergenci.

Lauka pētījumi apliecina, ka ledāja kustība pētāmajā teritorijā notika gan bazālās slīdēšanas, gan gultnes deformācijas veidā. Šādi apstākļi bija mainīgi ne tikai telpā, bet arī laikā, līdz ar to arī drumlinu veidošanos un augšanu noteica porūdēns fluktuācijas. Zemledāja materiāla deformācijas notika iežiem esot gan sasalušā, gan ar ūdeni piesātinātā stāvoklī, uz to norāda plastiskās un trauklās deformācijas struktūras nogulumos.

Lauka pētījumu un urbumu dati Madlienas nolaidenumā ļauj droši izdalīt divus drumlinu veidus: drumlinus, kas veidoti pilnībā no morēnas un drumlinu ar glacioakvālo nogulumu kodolu.

Drumlinu izplatības un morfoloģijas analīze neļauj abus minētos parametrus saistīt ar zemledāja gultnes litoloģisko sastāvu. Drumlinu orientācijas variācijas un bīdes sānu morēnu klātbūtne ļauj izdarīt pieņēmumu par Madlienas drumlinu lauka veidošanos divu ledus mēļu ietekmē.

Ledāja plūsmas virzieni pētāmajā teritorijā ir noteikti pēc osu, drumlinu orientācijas, glaciālajām skrambām un netieši arī pēc gala morēnām un marginālajiem, recesionālajiem veidojumiem. Pēc ledāja reljefa formu orientācijas un ledāja skrambās noteiktie iespējamie ledāja kustības virzieni ir nedaudz atšķirīgi, kas liecina par lokāliem sprieguma un plūsmas virzieniem ledājā.

Maģistra darba izstrādē pielietoto metožu izvēle ir bijusi pamatota, bet lai iegūtu vēl detālākus rezultātus par ledāja reljefa formu iekšējo uzbūvi, būtu nepieciešams veikt papildus lauka pētījumus un iegūt OSL datējumus nogulumu uzkrāšanās laika interpretācijai.

PATEICĪBAS

Pētījums realizēts ar Eiropas Sociāla Fonda projekta “Atbalsts maģistra studiju programmu īstenošanai Latvijas Universitātē”, vienošanās Nr. 2009/1062/1DP/1.1.2.1.1/09/IPIA/VIAA/004, finansiālu atbalstu. Autors pateicas maģistra darba vadītājam prof., Dr. ģeol. Vitālijam Zelčam par atbalstu un vērtīgiem padomiem šī darba tapšanas gaitā. Pateicība SIA “Envirotech” par iespēju izmantot *ArcMap 9.3*. maģistrantūras atbalsta licenci telpisko datu analīzei ĢIS vidē. Autors izsaka pateicību Valsts sabiedrībai ar ierobežotu atbildību “Latvijas Vides, ģeoloģijas un meteoroloģijas centrs” par Ģeoloģijas Fonda materiālu pieejamību.

Paldies Armandam Bernaus un Zigmāram Rendeniekam par palīdzību lauka darbu veikšanā, kā arī Ivaram Celiņam un Artūram Putniņam par palīdzību paraugu ievākšanā nogulumu datēšanai ar OSL metodi un Georgijam Sičovam par sniegto atbalstu un padomiem radilokācijas pētījumos. Paldies Konrādam Popovam un Jānim Jātņiekam par vektorizētiem kartogrāfiskajiem materiāliem (urbumi, vektorizēta kvartāra nogulumu karte).

LITERATŪRA UN AVOTI

Publicētie avoti

- Alley, R.B. 1993. In search of ice-stream sticky spots. *Journal of Glaciology*, 39, 447–454.
- Āboltiņš, O. 1970. Marginal formations of Middle Latvian tilted plain and their correlation to Linkuva (North Lithuanian) end moraine. In: Danilāns, I. (ed.) *Problems of Quaternary geology*, V. Rīga, Zinātne, 95.–107. In Russian with English summary.
- Āboltiņš, O. 1975. Glaciodynamic peculiarities of formation of Latvian elevations. In: Danilāns, I. (ed.) *Problems of Quaternary geology*, 8, 5–23. Rīga, Zinātne. In Russian with English summary.
- Āboltiņš, O., 1989. *Glaciostruktūra i lhednikovij morfogenhez.* Rīga, Zinātne. In Russian.
- Āboltiņš, O. 1995a. Marginālais reljefs. Grām.: Kavacs, G. (red.) *Latvijas daba: enciklopēdija*. 3. sēj. Rīga, Latvijas Enciklopēdija, 188.
- Āboltiņš, O. 1995b. Galamorēnas valnis. Grām.: Kavacs, G. (red.) *Latvijas daba: enciklopēdija*. 2. sēj. Rīga, Latvijas Enciklopēdija, 85.
- Āboltiņš, O. 1999 *Struktūrģeoloģijas pamati*. Rīga, Latvijas Universitāte.
- Āboltiņš, O., Straume J., Juškevičs, V. 1975. Relief peculiarities and main stages of morphogenesis of the Central Vidzeme Elevation. In: Danilāns, I. (ed.) *Problems of Quaternary Geology*, 8. Rīga, Zinātne, 31–47. In Russian with English summary.
- Benn, D.I., Evans, D.J.A. 1998. *Glaciers and glaciation*. London, Arnold.
- Boulton, G.S. 1987. A theory of drumlin formation by subglacial sediment deformation. In: Menzies, J., Rose, J. (eds.) *Drumlin symposium*. Rotterdam, A.A. Balkema, 25–80.
- Boulton, G.S., 1996. Theory of glacial erosion, transport and deposition as a consequence of subglacial sediment deformation. *Journal of Glaciology*, 42, 43–62.
- Boulton, G.S., Dobbie, K.E., Zatsepin, S. 2001. Sediment deformation beneath glaciers and its coupling to the subglacial hydraulic system. *Quaternary International*, 86, 3–28.
- Brangulis, A.J., Kuršs, V., Misāns, J., Stinkulis, Ģ. 1998. *Latvijas ģeoloģija, 1:500 000 mēroga ģeoloģiskā karte un pirmskvartāra nogulumu apraksts*. Rīga, Valsts ģeoloģijas dienests.
- Clark, C.D., Hughes, A.L.C., Greenwood, S.L., Spagnolo, M., Feliks, S.L. 2009. Size and shape characteristics of drumlins, derived from a large sample, and associated scaling laws. *Quaternary Science Reviews*, 28, 677–692.
- Danilāns, I. 1961. *Kvartāra periods un tā nogulumi Latvijā*. Rīga. Latvijas valsts izdevniecība.
- Danilāns, I., 1973. *Quaternary deposits of Latvia*. Rīga, Zinātne. In Russian.
- Eberhards, G. 1972. *Structure and development valleys of catchment area of the River Daugava*. Rīga, Zinātne. In Russian.
- Eberhards, G. 1977. *Glaciālā geomorfoloģija*. Rīga, P.Stučkas Latvijas Valsts universitāte.
- Evans, D.J.A., Phillips, E.R., Hiemstra, J.F., Auton, C.A. 2006. Subglacial till: Formation, sedimentary characteristics and classification. *Earth-Science Reviews*, 78, 115–176.
- Evans, D.J.A, Nelson, C.D. Webb, C. 2010. An assessment of fluting and “till esker” formation on the foreland of Sandfellsjökull, Iceland. *Geomorphology*, 114, 453–465.
- Fowler, A.C., 2000. An instability mechanism for drumlin formation. In: Maltman, A. J. et al. (eds.) *Deformation of Glacial Materials*. London, Geological Society, Special Publications, 176, 307–319.
- Greenwood, S.L., Clark, C.D. 2009. Reconstructing the last Irish Ice Sheet 1: changing flow geometries and ice flow dynamics deciphered from the glacial landform record. *Quaternary Science Reviews*, 28, 3085–3100.
- Greenwood, S.L., Clark, C.D. 2010. The sensitivity of subglacial bedform size and distribution to substrate lithological control. *Sedimentary Geology*, 232, 130–144.

- Hanvey, P.M. 1987. Sedimentology of lee-side stratification sequences in late-Pleistocene drumlins, north-west Ireland. In: Menzies, J., Rose, J. (eds.) *Drumlin Symposium*. Rotterdam, Balkema, 241–253.
- Hess, D.P., Briner, J.P. 2009. Geospatial analysis of controls on subglacial bedform morphometry in the New York Drumlin Field – implications for Laurentide Ice Sheet Dynamics. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34, 1126–1135.
- Hindmarsh, R.C.A. 1998. Drumlinization and drumlin-forming instabilities. Viscous till mechanisms. *Journal of Glaciology*, 44, 293–314.
- Hindmarsh, R.C.A., Stokes, C.R. 2008. Formation mechanisms for ice–stream lateral shear margin moraines. *Earth Surface Processes and Landforms*, 33(4), 610–626.
- Hubbard, G.D. 1906. Drumlinoids of the Catatonk Folio, *Bulletin of the American Geographical Society*, 38(6), 355–365.
- Jaunputniņš, A. 1961. Reljefs. Grām.: Sprīņģis, K. (atbild. red.) *Latvijas PSR ģeoloģija*. Rīga, Latvijas PSR Zinātņu akadēmijas izdevniecība, 194.–214.
- Kalm, V. 2006. Pleistocene chronostratigraphy in Estonia, southeastern sector of Scandinavian glaciation. *Quaternary Science Reviews*, 25, 960–975.
- Kalm, V., *in press*. Ice-flow pattern and extent of the last Scandinavian Ice Sheet southeast of the Baltic Sea. *Quaternary Science Reviews*, 29, 1–9.
- Kerr, M., Eyles, N. 2007. Origin of drumlins on the floor of Lake Ontario and in upper New York State. *Sedimentary Geology*, 193, 7–20.
- King, E.C., Woodward, J., Smith, A.M. 2007. Seismic and radar observations of subglacial bed forms beneath the onset zone of Rutford Ice Stream, Antarctica. *Journal of Glaciology*, 53 (183), 665 – 672.
- Larter, R.D., Graham, A.G.C., Gohl, K., Kuhn, G., Hillenbrand, C.-D., Smith, J.A., Deen, T.J., Livermore, R.A., Schenke, H.-W. 2009. Subglacial bedforms reveal complex basal regime in a zone of paleo-ice stream convergence, Amundsen Sea embayment, West Antarctica. *Geology*, 37(5), 411–414.
- Lavrinoviča, M. 1961. Hidroģeoloģija. Grām.: Sprīņģis, K. (atbild. red.) *Latvijas PSR ģeoloģija*. Rīga, Latvijas PSR Zinātņu akadēmijas izdevniecība, 366.–382.
- Lee, J.R., Phillips, E.R. 2008. Progressive soft sediment deformation within a subglacial shear zone—a hybrid mosaic-pervasive deformation model for Middle Pleistocene glaciotectionised sediments from eastern England. *Quaternary Science Reviews*, 27, 1350–1362.
- Leseman, J.-E., Alsop, G.I., Piotrowski, J.A. 2010. Incremental subglacial meltwater sediment deposition and deformation associated with repeated ice-bed decoupling: a case study from the Island of Funen, Denmark. *Quaternary Science Reviews*, 29, 3212–3229.
- Liepiņš, P. 1961. Devona sistēma. Grām.: Sprīņģis, K. (atbild. red.) *Latvijas PSR ģeoloģija*. Rīga, Latvijas PSR Zinātņu akadēmijas izdevniecība, 122.–143.
- Markots, A. 1996. Osveidīgās reljefa formas salveida glaciostruktūru – akumulatīvajās augstienēs. *LU 55. zinātniskās konferences tēzes un programmas*. Rīga, LU, 33.
- Meirons, Z., Straume, J., Juškevičs, V. 1976. Main varieties of the marginal formations and deglaciation of the last glaciation in the territory of the Latvian SSR. In: Danilāns, I. (ed.) *Problems of Quaternary Geology*, 9. Rīga, Zinātne, 50–73. In Russian with English summary.
- Meirons, Z., Misans, J., Mūrnieks, A. 2002. *Latvijas ģeoloģiskā karte, mērogs 1: 200000*, 33. lapa – Ogre, paskaidrojuma teksts un kartes. Rīga, Valsts ģeoloģijas dienests.
- Menzies, J. 1979. A review of the literature on the formation and location of drumlins. *Earth-Science Reviews*, 14(4), 315–359.
- Menzies, J., 1979. The mechanics of drumlin formation with particular reference to the change in pore–water content of the till. *Journal of Glaciology*, 22(87), 373–384.
- Menzies, J. (ed.) 2002. *Modern and Past Glacial Environments*. Oxford [etc.], Butterworth-Heinemann.

- Patterson, C.J., Hooke, R. Le B. 1995. Physical environment of drumlin formation. *Journal of Glaciology*, 41(137), 30–38.
- Pelletier, J.D. 2008. Quantitative Modeling of Earth Surface Processes. Cambridge [etc.], Cambridge University Press, 174 – 183.
- Piotrowski, J.A., Kraus, A., 1997. Response of sediment to ice sheet loading in northwestern Germany: effective stresses and glacier bed stability. *Journal of Glaciology*, 43, 495–502.
- Piotrowski, J.A., Mickelson, D.M., Tulaczyk, S., Krzyszkowski, D., Junge, F. 2001. Were subglacial deforming beds beneath past ice sheets really widespread? *Quaternary International*, 86, 139–150.
- Piotrowski, J.A., Larsen, N.K., Junge, F.W. 2004. Reflections on soft subglacial beds as a mosaic of deforming and stable spots. *Quaternary Science Reviews*, 23, 993–1000.
- Punkari, M. 1997. Glacial and glaciofluvial deposits in the interlobate areas of the Scandinavian Ice Sheet. *Quaternary Science Reviews*, 16, 741–753.
- Rattas, M. 2004. Subglacial environments in the formation of drumlins – The case of the Saadjärve Drumlin Field, Estonia. *Dissertationes Geologicae Universitatis Tartuensis*. Tartu, Tartu University Press.
- Rattas, M., Piotrowski, J.A. 2003. Influence of bedrock permeability and till grain size on the formation of the Saadjärve drumlin field, Estonia, under an east – Baltic Weichselian ice stream. *Boreas*, 32 (1), 167–177.
- Raukas, A., Stankowski, W.T.J., Zelčs, V., Šinkunas, P. 2010. Chronology of the last deglaciation in the South-Eastern Baltic Region on the basis of Recent OSL dates. *Geochronometria*, 36, 47–54.
- 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 (5766), 1449–1452.
- Saarnisto, M., Saarinen, T., 2001. Deglaciation chronology of the Scandinavian Ice Sheet from the Lake Onega Basin to the Salpausselkä End Moraines. *Global and Planetary Change*, 31, 387–405.
- Saks, T. 2010. Middle and Late Weichselian paraglacial and subglacial environments in the coastal plains of western Latvia. *Doctoral thesis. (Dissertationes Geologicae Universitatis Latviensis No. 15)*, Rīga, University of Latvia.
- Saks, T., Kalvāns, A., Zelčs, V., *in press*. OSL dating evidence of Middle Weichselian age of shallow basin sediments in Western Latvia, Eastern Baltic. *Quaternary Science Reviews*.
- Saks, T., Kalvāns, A., Zelčs, V., *in press*. Development and persistence of the Apriķi glacier tongue, Western Latvia: ice-bed conditions and glaciomorphic consequences. *Boreas*, ID: BOR-062-2009.R1.
- Satkunas, J., Grigienė, A., Jusiene, A., Damusyte, A., Mazeika, J. 2009. Middle Weichselian paleolacustrine basin in the Venta river valley and vicinity (northwest Lithuania), exemplified by the Purviai outcrop. *Quaternary International*, 207, 14–25.
- Savvaitov, A.S., Straume, J. 1963. On the question of twin strata in the moraine of Valdai glaciation in the area between the lower reaches of the rivers Daugava and Gauja. In: Danilāns, I. (ed.) *Questions of Quaternary geology*, II. Rīga, Academy of Sciences of Latvian SSR, 71–86. In Russian with English summary.
- Shaw, J., 1983. Drumlin formation related to inverted meltwater erosional marks. *Journal of Glaciology*, 29, 461–479.
- Shaw, J. 2002. The meltwater hypothesis for subglacial bedforms. *Quaternary International*, 90, 5–22.
- Shaw, J., Gilbert, R. 1990. Evidence for large-scale subglacial meltwater flood events in southern Ontario and northern New York State. *Geology*, 18, 1169–1172.

- Smith, A.M., Murray, T. 2009. Bedform topography and basal conditions beneath a fast-flowing West Antarctic ice stream. *Quaternary Science Reviews*, 28, 584–596.
- Spagnolo, M., Clark, C.D., Hughes A.L.C., Dunlop, P., Stokes, C.R. 2010. The planar shape of drumlins. *Sedimentary Geology*, 232, 119–129.
- Stokes, C.R., Clark C.D. 2002a. Are long subglacial bedforms indicative of fast ice flow? *Boreas*, 31(3), 239–249.
- Stokes, C.R., Clark, C.D. 2002b. Ice stream shear margin moraines. *Earth Surface Processes and Landforms*, 27, 547–558.
- Stokes, C.R., Clark, C.D., Lian, O., Tulaczyk, S. 2007. Ice stream sticky spots: A review of their identification and influence beneath contemporary and palaeo-ice streams. *Earth-Science Reviews*, 81(3-4), 217–249.
- Straume, J. 1979. Geomorfologija. In: Misāns, J., Brangulis, A., Danilāns, I., Kuršs, V. (eds.) *Geologisches stroyenie i poleznye iskopayemye Latvii*. Rīga, Zinātne, 297–439. In Russian.
- Strautnieks, I. 1997. Vānes konverģento drumlinu lauks. *Latvijas Universitātes 56. Zinātniskā konference. Cilvēks. Vide. Resursi (ģeogāfijas un Zemes zinātņu sekcija)*, Rīga, Latvijas Universitāte, 96.–97.
- Van der Wateren, F.M. 1987. Structural geology and sedimentology of the Dammer Berge push moraine, FRG. In: *Tills and Glaciotectonics*. van der Meer J.J.M. (ed.). Rotterdam, A.A. Balkema, 157–182.
- Van der Meer, J.J.M., Menzies, J., Rose, J., 2003. Subglacial till: the deforming glacier bed. *Quaternary Science Reviews*, 22, 1659–1685.
- Zāns, V. 1933. Osi un citi diluviālie veidojumi Limbažu apkārtnē. *Latvijas Universitātes Ģeoloģijas institūta raksti Nr. 30*.
- Zāns, V. 1935. Glaciālās skrambas un frikcijas parādības Latvijas pamatiežos. Grām.: *Ģeogrāfiski raksti* (Folia Geographica), V. Rīga, 63.–84.
- Zāns, V. 1936. Leduslaikmets un pēleduslaikmets Latvijā (kvartārā formācija). Grām.: Malta N., Galenieks. P. (red.) *Latvijas zeme, daba un tauta*, I. Rīga, Valters un Rapa, 49.–127.
- Zelčs, V. 1986a. Osobennosti morfologiji, strojenhije i genezise Kangarskih ozovih rjad. In: Āboltiņš, O. (otv. red.) *Morfogenez relhjefa i paleogeografiya Latviji*. Riga, Latvijskij Gosudarstveniy Universitet, 69–87. In Russian.
- Zelčs, V. 1986b. Njekotorije raznovidnostji ozov coprjazhennih c dolinoobrazovanymi formami podchetverthicnoj poverhnostji na teritoriji Crednjelatvijskoj gljaciodepressionnoj njizmennostji. In: Āboltiņš, O. (otv. red.) *Morfogenez relhjefa i paleogeografiya Latviji*. Riga, Latviyskiy Gosudarstveniy Universitet, 95–121. In Russian.
- Zelčs V. 1993a. Diverģentā tipa glaciodepresiju zemieņu glaciotehtoniskās reljefa formas. *Disertācijas rakstu sērijas kopsavilkums*, Rīga, Latvijas Universitāte.
- Zelčs, V. 1993b. The Middle Latvia Uval Moraine Area. In: *Pleistocene Stratigraphy, Ice Marginal Formations and Deglaciation of the Baltic States*. Raukas, A. (ed.). Tallinn, Estonian Academy of Sciences, 44–46.
- Zelčs, V. 1995. Ņeipenes valnis. Grām.: Kavacs, G. (red.) *Latvijas daba: enciklopēdija*. 3. sēj. Rīga, Latvijas enciklopēdija, 58.
- Zelčs, V. 1997. Morēnuvāli, krumlini, Grām.: Kavacs, G. (red.) *Latvijas daba: enciklopēdija*. 4. sēj. Rīga, Preses nams, 13.
- Zelčs, V. 1998a. Glaciotectonic drumlin types in Latvia. In: *The INQUA Commission on Glaciation Peribaltic Group Field Symposium on glacial processes and Quaternary environment in Latvia. Abstracts of papers and posters*. Rīga, University of Latvia, 25–31 May, 63–65.
- Zelčs, V. 1998b. Viduslatvijas nolaidenums, Grām.: Kavacs, G. (red.) *Latvijas daba: enciklopēdija*. 6. sēj. Rīga, Preses nams, 70.–71.

- Zelčš, V. 1999. Rievotās morēnas Latvijā. Grām.: Zeme, Daba, Cilvēks, LU 57. Konferences Ģeogrāfijas un ģeoloģijas un vides zinātnes sekcija. Kļaviņš, M. (red.). Rīga, Latvijas Universitāte, 149. – 163.
- Zelčš, V. 2001. Main varieties of glaciotectionic drumlins in Latvia. *Abstracts of the 6th International Drumlin Symposium*. Toruń, Nicholas Copernicus University, June 17–23, 37–38.
- Zelčš, V., Dreimanis, A. 1997. Morphology, Internal Structure and Genesis of the Burtnieks Drumlin Field, Northern Vidzeme, Latvia. *Sedimentary Geology*, 111, pp. 73–90.
- Zelčš, V., Markots, A. 2004. Deglaciation history of Latvia. In: Ehlers, J., Gibbard, P. L. (eds.) *Extent and Chronology of Glaciations*, v.1 (Europe). The Netherlands [etc.], Elsevier B.V., 225–244.

Nepublicētie avoti

- Kalniņš, J., Venskis, A., Venteris, M., Kupruks, E. 1991. *Atskaite par ģeoloģiskās izpētes darbiem Aizkraukles rajona Vecbebru lauksaimniecības tehnikuma Brencēnu smilts atradnē*. Rīga, Projektēšanas un informācijas valsts uzņēmums “Meliorprojekts” (VĢF Inv. Nr. 11886).
- Gavrilova, A., Straume, J., Tracevskijs, G., Feldmans, L. 1962. *Geologischeskoje strojenije i hidrogeologiceskiji usloviye teritorii lista O–35–XXV. Otchot Ogrskoj kompleksnoj GSP po rabotam, 1959–60 g.g.* Tom I, Kniga I, II, Rīga.
- Mironovs, G., Vācele, V. 1962. *Geologischeskoje strojenije i hidrogeologiceskiji usloviye teritorii lista O–35–XXVI. Otchot Bidzemskej kompleksnoj GSP po rabotam, 1959–60 g.g.* Tom I, Rīga.
- Markots, A. 2005. *Madlienas pagasta derīgo izrakteņu resursi un krājumi–izpēte teritorijas plānošanas vajadzībām. Pārskats*. Rīga, Reģionālo studiju centrs.
- V. Juškeviča personīgais kvartāra urbumu arhīvs. Pieejams saskaņā ar ESF aktivitātes “Cilvēkresursu piesaiste zinātnei” projekta “Starpnozaru zinātnieku grupas modeļu sistēmas izveide pazemes ūdeņu pētījumiem,” projekta Nr. 2009/0212/1DP/1.1.1.2.0/09/APIA/VIAA/060 noteikumiem.
- LVĢMC DB “Urbumi” (Latvijas urbumu datu bāze). Pieejams saskaņā ar ESF aktivitātes “Cilvēkresursu piesaiste zinātnei” projektu “Starpnozaru zinātnieku grupas modeļu sistēmas izveide pazemes ūdeņu pētījumiem,” projekta Nr. 2009/0212/1DP/1.1.1.2.0/09/APIA/VIAA/060 noteikumiem.
- LVĢD Kvartāra nogulumu karšu mozaīka mērogā 1:200 000. Vektordatu formātā. Pieejams saskaņā ar ESF aktivitātes “Cilvēkresursu piesaiste zinātnei” projekta “Starpnozaru zinātnieku grupas modeļu sistēmas izveide pazemes ūdeņu pētījumiem,” projekta Nr. 2009/0212/1DP/1.1.1.2.0/09/APIA/VIAA/060 noteikumiem.

Interneta resursi

- TOPO 10K PSRS. *Bijušās PSRS armijas ģenerālštāba 42. un 63. gada koordinātu sistēmas topogrāfisko karšu mozaīka mērogā 1:50 000*. LU ĢZZF WMS. Sk. 15.05.2011. 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. 15.05.2011. Pieejams <http://kartes.geo.lu.lv>
- ORTOFOTO 3. LĢIA Latvijas 3. etapa ortofoto karšu mozaīka. LU ĢZZF WMS. Sk. 15.05.2011. Pieejams <http://kartes.geo.lu.lv>
- SRTM. Shuttle Radar Topography Mission, NASA, JPL. LU ĢZZF WMS. Sk. 15.05.2011. Pieejams <http://kartes.geo.lu.lv>
- LVĢD Kvartargeoloģija. *Latvijas Valsts Ģeoloģijas Dienesta Kvartāra nogulumu karšu mozaīka mērogā 1:200 000*. LU ĢZZF WMS. Sk. 15.05.2011. Pieejams <http://kartes.geo.lu.lv>

- LVGD Pirmskvartara. *Latvijas Valsts Ģeoloģijas Dienesta Pirmskvartāra nogulumu karšu mozaīka mērogā 1:200 000*. LU ĢZZF WMS. Sk. 15.05.2011. Pieejams <http://kartes.geo.lu.lv>
- LVGD Zemkvartara. *Latvijas Valsts Ģeoloģijas Dienesta Zemkvartāra virsmas reljefa karšu mozaīka mērogā 1:500 000*. LU ĢZZF WMS. Sk. 15.05.2011. Pieejams <http://kartes.geo.lu.lv>
- LVGD Dabas apvidi. *Latvijas Valsts Ģeoloģijas Dienesta Dabas apvidu karšu mozaīka mērogā 1:500 000*. LU ĢZZF WMS. Sk. 15.05.2011. Pieejams <http://kartes.geo.lu.lv>
- LVGD Kvartara biežums. *Latvijas Valsts Ģeoloģijas Dienesta Kvartāra nogulumu biežuma karšu mozaīka mērogā 1:500 000*. LU ĢZZF WMS. Sk. 15.05.2011. Pieejams <http://kartes.geo.lu.lv>

Maģistra darbs ‘‘Madlienas nolaidenuma glaciālās reljefa formas un to veidošanās apstākļi’’
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: Kristaps Lamsters

paraksts

datums

Rekomendēju darbu aizstāvēšanai

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

paraksts

datums

Recenzents: amats, zinātn. grāds Vārds Uzvārds

Darbs iesniegts Ģeoloģijas nodaļas lietvedībā 24. maijā.

Nodaļas lietvede

paraksts

datums

Noslēguma darba aizstāvēšanas rezultāti:

Maģistra darbs aizstāvēts ģeoloģijas maģistra gala pārbaudījumu komisijas sēdē

..... protokola nr. vērtējums

gads, datums, mēnesis

Sekretārs Vārds Uzvārds

paraksts

datums