



**LATVIJAS
UNIVERSITĀTE**

**Promocijas darba
kopsavilkums**

**Summary
of Doctoral Thesis**

Edgars Danefelds

**PLĀVIŅU REĢIONĀLĀ
STĀVA KARBONĀTIEŽU FĀCIJU
ANALĪZE BALTIJAS DEVONA
PALEOBASEINA CENTRĀLAJAI
DAĻAI**

**CARBONATE SEDIMENTARY
ENVIRONMENTS OF THE LATE DEVONIAN
PLĀVIŅAS TIME IN THE CENTRAL PART OF
BALTIC PALAEOBASIN**

Rīga 2024



LATVIJAS UNIVERSITĀTE

EKSAKTO ZINĀTŅU UN TEHNOLOĢIJU FAKULTĀTE

Edgars Danefelds

PĻAVIŅU REĢIONĀLĀ STĀVA KARBONĀTIEŽU FĀCIJU ĀNALĪZE BALTIJAS DEVONA PALEOBASEINA CENTRĀLAJAI DAĻAI

PROMOCIJAS DARBA KOPSAVILKUMS

Zinātnes doktora grāda (PhD) iegūšanai dabas zinātnēs

Zinātnes nozare: Zemes zinātnes, fiziskā
ģeogrāfija un vides zinātnes

Apakšnozare: pamatiežu ģeoloģija

Rīga 2024

Promocijas darbs izstrādāts Latvijas Universitātes Ģeogrāfijas un Zemes zinātņu fakultātē, Pamatiežu ģeoloģijas katedrā laika posmā no 2015. gada līdz 2024. gadam.

NACIONĀLAIS
ATTĪSTĪBAS
PLĀNS 2020



EIROPAS SAVIENĪBA
Eiropas Sociālais
fonds



LATVIJAS
UNIVERSITĀTE

I E G U L D Ī J U M S T A V Ā N Ā K O T N Ē

Promocijas darbs realizēts ar Eiropas Sociālā fonda projekta “LU doktorantūras kapacitātes stiprināšana jaunā doktorantūras modeļa ietvarā”, Nr.8.2.2.0/20/I/006, LU reģistrācijas numurs Nr.ESS2021/434 atbalstu.

Darbs sastāv no ievada, 6 nodaļām, secinājumiem, literatūras saraksta, 2 pielikumiem.

Darba forma: disertācija fiziskās ģeogrāfijas un vides zinātnes nozarē, pamatiežu ģeoloģijas apakšnozarē.

Darba zinātniskais vadītājs: asociētais profesors *Dr. geol. Ģirts Stinkulis*.

Recenzenti:

- 1) **Māris Krievāns**, *Dr. geol.*, Asoc. Prof., Latvijas Universitāte;
- 2) **Maciej Bojanowski**, *Dr. geol.*, Ao. Prof., *Institute of Geological Sciences, Polish Academy of Sciences* (Ģeoloģijas institūts, Polijas Zinātņu akadēmija);
- 3) **Leho Ainsaar**, *Dr. geol.*, Prof., *University of Tartu* (Tartu Universitāte).

Promocijas darba aizstāvēšana notiks 2024. gada 20. septembrī Latvijas Universitātes Zemes zinātņu, fiziskās ģeogrāfijas un vides zinātņu nozares (kvartārģeoloģijā un ģeomorfoloģijā, lietišķajā ģeoloģijā un pamatiežu ģeoloģijā) promocijas padomes atklātā sēdē 10:00, LU Dabas mājā, 702. auditorijā, Jelgavas ielā 1, Rīgā.

Ar promocijas darbu un tā kopsavilkumu var iepazīties Latvijas Universitātes Bibliotēkā Rīgā, Raiņa bulvārī 19.

LU Zemes zinātņu, fiziskās ģeogrāfijas
un vides zinātņu nozares

promocijas padomes priekšsēdētājs _____ / Normunds Stivriņš /
(paraksta vieta)

promocijas padomes sekretārs _____ / Māris Krievāns /
(paraksta vieta)

© Edgars Danefelds, 2024

© Latvijas Universitāte, 2024

ISBN 978-9934-36-256-9

ISBN 978-9934-36-257-6 (PDF)

SATURA RĀDĪTĀJS

REZULTĀTU APROBĀCIJA	4
SAĪSINĀJUMI	6
1. IEVADS	7
1.1. Ieskats devona karbonātiežu pētījumu vēsturē Latvijā	8
1.2. Latvijā sastopamo Pļaviņu svītas karbonātiežu līdzšinējo sedimentoloģisko pētījumu rezultāti	9
2. MATERIĀLI UN METODES	13
2.1. Paraugu sagatavošana XRD, XRF, Biomarker, TOC analizēm un oglekļa un skābekļa stabilo izotopu analizēm	14
2.2. Rentgendifraktometriskā (XRD) analīze	15
2.3. Rentgenfluorescences (XRF) analīze	15
2.4. TOC analīze	16
2.5. <i>Biomarker</i> lipīdu analīze	16
2.6. Oglekļa un skābekļa stabilo izotopu analīze	16
3. REZULTĀTI	18
3.1. Rentgendifraktometriskās analīzes (XRD) rezultāti un to interpretācija	24
3.2. Rentgenfluorescences spektroskopijas (XRF) analīžu rezultāti un to interpretācija	25
3.3. Skābekļa un oglekļa stabilo izotopu analīžu rezultāti un to interpretācija	26
3.4. TOC analīžu rezultāti un to interpretācija	28
3.5. Fosilijas un ihnofosilijas pētītajos karbonātiežos	28
4. DISKUSIJA	31
5. SECINĀJUMI	40
PATEICĪBAS	42
LITERATŪRAS SARAKSTS	85

REZULTĀTU APROBĀCIJA

Pētījuma gaitā izdarītie secinājumi un atziņas prezentētas kopumā 6 starptautiskās konferencēs un 3 vietēja mēroga konferencēs. Pētījuma rezultāti ir publicēti 2 ISBN izdevumos, viens no tiem ir recenzēts pēc konferences ziņojums un otra ir recenzēta kolektīvā monogrāfija. Viena (1) publikācija pieņemta publicēšanai zinātniskajā žurnālā *Estonian Journal of Earth Sciences*, kas ir indeksēta *Web of Science* un *SCOPUS* datu bāzēs.

Zinātniskie raksti, kolektīvās monogrāfijas un publikācijas

Klievēns, E., Stinkulis, Ģ. 2016. Devona Pļaviņu svītas karbonātiēži un to veidošanās apstākļi Ziemeļlatvijā un Igaunijas dienvidos. *Lietišķi ģeoloģiskie pētījumi, jaunas tehnoloģijas, materiāli un produkti*. Galvenais red. Valdis Segliņš. Latvijas Universitāte, Rīga. ISBN 978-9934-556-07-4. 25–36. DOI: 10.22364/lgpjtmp

Danefelds, E., Mešķis, S. 2024. Carbonate sedimentary environments in the epicontinental Baltic Devonian basin: Pļaviņas Formation, Lower Frasnian. *Estonian Journal of Earth Sciences*, Vol. 73, Issue 2 (pieņemta publicēšanai 2024. gada 1. aprīlī).

Zinātnisko konferenču tēzes

Klievēns, E., Mešķis, S. 2016. *Carbonate rocks of the Devonian Pļaviņas Formation, their sedimentary environments and ichnofossil complexes in North Latvia and South Estonia*. 9th Geosymposium of Young Researchers "Silesia 2016".

Klievēns, E., Stinkulis, Ģ. 2016. Devona Pļaviņu svītas dolomītu slāņkopas uzbūve un veidošanās apstākļi Igaunijas dienvidaustrumu un Latvijas ziemeļaustrumu daļā. LU 74. zinātniskā konference.

Klievēns, E. 2017. *Sedimentary environments of carbonate deposits of the Upper Devonian Pļaviņas Formation in the Riežupe cliffs and Īvande falls exposures*. 10th Baltic Stratigraphic Conference.

Klievēns, E., Stinkulis, Ģ. 2017. *Sedimentācijas vides un paleoklimata ietekme uz Pļaviņu svītas nogulumu sastāvu un uzbūvi Latvijā*. LU 75. zinātniskā konference.

Klievēns, E., Mešķis, S. 2018. *Devonian Pļaviņu formation carbonate rock sedimentary environment and fossil complex differences in territory of central part of Baltic Palaeobasin: Riežupe outcrop and Randāti cliff example*. 5th International Palaeontological Congress.

Klievēns, E., Mešķis, S. 2018. *Influence of dolomitisation in the Pļaviņas regional stage on trace fossils assemblages*. 5th International Palaeontological Congress.

Klievēns, E. 2018. *Devona Pļaviņu svītas nogulumiežu veidošanās apstākļu atšķirības paleobeseina teritorijā: Riežupes atsegumu un Randātu klinšu piemērs*. LU 76. zinātniskā konference.

Klievēns, E., Stinkulis, Ģ., Mešķis, S. 2019. *Carbonate sedimentary environments in the epicontinental Baltic Devonian basin: Pļaviņas Formation, Lower Frasnian*. 34th International Meeting of Sedimentology 2019. Roma, Italia.

Danefelds, E., Stinkulis, Ģ., Mešķis, S., Wagreich, M. 2023. *Carbonate sedimentary environments in the epicontinental Baltic Devonian basin: Pļaviņas Formation, Lower Frasnian – new results*. 17th Bathurst Meeting, 2023. International Meeting of Carbonate Sedimentologists.

SAĪSINĀJUMI

RS – reģionālais stāvs

GDL – Galvenais devona lauks

XRD – rentgendifraktometriskā analīze

TOC – kopējā oglekļa satura analīze

XRF – rentgenfluorescences analīze

F – fācija

FA – fāciju asociācija

1. IEVADS

Augšējā devona Pļaviņu reģionālā stāva nogulumieži ir plaši izplatīti Latvijas teritorijā un pieejami pētījumiem vairākos desmitos dabīgu atsegumu un karjeru sienu. Tie ir aprakstīti iepriekš veiktos plašos sedimentoloģiskos, paleontoloģiskos un mineraloģiskos darbos (Gravītis, 1967; Liepin'sh, 1963, Sorokin, 1978, Stinkulis, 1998, u.c.). Vienlaikus ar Daugavas reģionālo stāvu, Pļaviņu reģionālais stāvs ir tipisks ar to, ka tajā izsekojamas K. Grevinga (1861) nodalītās zonas (tolaik, fācijas): Veļikajas zona austrumos ar dominējošiem kaļķakmeņiem, Daugavas zona Latvijas centrālajā daļā ar dolomītu dominanci un Kurzemes zona rietumos ar mālainiem dolomītiem, dolomītmerģeļiem un māliem (Stinkule, Stinkulis, 2017). Šīs nogulumiežu izplatības likumsakarības, kā arī organismu atlieku skaita un daudzveidības samazināšanās no austrumiem uz rietumiem norāda, ka sedimentācijas baseins bija savienots ar atklātu baseinu austrumu virzienā (Brangulis *et al.*, 1998). Pļaviņu reģionālais stāvs arī atbilst pirmajam karbonātu sedimentācijas laikposmam Baltijas devona baseinā kopš ilgstošās dominējošās siliciklastisko nogulu veidošanās agrajā devonā līdz vēlā devona sākumam (Lukševičs, Stinkulis, 2018). Pļaviņu reģionālā stāva nogulumiežu detalizēti sedimentoloģiski pētījumi ir būtiski kopējai izpratnei par karbonātisko nogulu veidošanās likumsakarībām Baltijas devona baseinā. Promocijas darbā veicamo pētījumu aktualitāti nosaka arī tas, ka iepriekšējie Franas stāva karbonātiestu sedimentoloģiskie pētījumi (Gravītis, 1967; Liepin'sh, 1963, Sorokin, 1978, 1981, u.c.) ir veikti pirms 40–60 gadiem. Tie bija detalizēti un plaši, taču balstījās uz ciklostatiogrāfijas principiem, neizmantojot mūsdienās aktuālo fāciju analīzi. Šo seklūdens epikontinentālā baseinā (Lukševičs *et al.*, 2012) veidojušos nogulumu pētījumos būtu svarīgi izmantot arī šādiem baseiniem izmantojamo fāciju zonu iedalījumu (James, Jones, 2016), kas atšķiras no tradicionāla iedalījuma, ko pielieto karbonātu nogāzēm un karbonātu platformām. Karbonātiestu fāciju un fāciju asociāciju nodalīšana ir būtiska, lai turpmākos pētījumos izveidotu Pļaviņu svītas nogulumu datormodeli, līdzīgi literatūrā atrodamiem epikontinentālu baseinu nogulumiežu piemēriem (Warnecke, Aigner, 2019).

Karbonātisko nogulumu veidošanās apstākļu interpretācija mūsdienās ir apgrūtināta bez stabilo izotopu ģeokīmijas un citu analītisko metožu pielietojuma, kas Latvijas devona karbonātiestiem līdz šim izmantotas ļoti ierobežotā apmērā.

Pētījuma rezultāti ir izmantojami karbonātu sedimentoloģiem arī citur pasaulē saistībā ar Pļaviņu svītas karbonātiestu dokumentāciju samērā plašā teritorijā, kas var palīdzēt citu seklūdens epikontinentālo karbonātu baseinu fāciju analīzē.

Pētāmie Pļaviņu reģionālā stāva ieži ir gandrīz pilnībā dolomitizēti. To sākotnējo veidošanās apstākļu noskaidrošana ir aktuāls jautājums un vienlaikus

zināms izaicinājums, jo dolomitizācija senā Baltijas paleobaseina ietvaros palielinās virzienā uz dienvidrietumiem (Lukševičs *et al.*, 2012). Baltijas valstu teritorijā praktiski visi Franas stāva karbonātiēži ir dolomīti, kuros saglabājas tikai neliela daļa iežu sākotnējo tekstūru, t. sk. organogēno, kuras ļauj interpretēt sedimentācijas apstākļus.

Promocijas darba mērķis ir noskaidrot karbonātisko nogulu uzkrāšanās apstākļus Franas laikmetā devona Baltijas paleobaseinā, Pļaviņu reģionālā stāva nogulumiežu veidošanās laikposmā, pamatojoties uz detalizētu fāciju analīzi un laboratorijas pētījumu metožu kompleksu.

Promocijas darba mērķa sasniegšanai tika izvirzīti šādi darba uzdevumi:

- 1) veikt iepriekšējo pētījumu analīzi par sedimentācijas apstākļiem devona Franas laikmetā, Baltijas devona paleobaseinā;
- 2) veikt mūsdienu literatūras avotu analīzi par karbonātu sedimentoloģiju un karbonātisko nogulu uzkrāšanos seklās epikontinentālās jūrās;
- 3) analizēt karbonātiēžu tekstūras un veikt to paleontoloģisku raksturojumu;
- 4) veikt ģeoloģisko griezum dokumentāciju un analīzi karjeros un atsegumos Baltijas valstu teritorijā, konkrēti Latvijā un Igaunijas dienvidaustrumos;
- 5) izdarīt pētīto ģeoloģisko griezumu savstarpēju korelāciju un nodalīt šīs svītas ridas tajos;
- 6) veikt atlasītu karbonātiēžu paraugu analīzi ar XRD, XRF, TOC, *Biomarker*, oglekļa un skābekļa stabilo izotopu metodēm;
- 7) nodalīt fācijas un to asociācijas, kā arī veikt sedimentācijas vides interpretāciju, gan laikā, gan pētījumu teritorijā;
- 8) izvērtēt sedimentācijas apstākļus ietekmējošos faktorus un to izmaiņas;
- 9) nodalīt Baltijas Franas laikmeta karbonātu sedimentācijas baseina mūsdienu un senos analogus.

1.1. Ieskats devona karbonātiēžu pētījumu vēsturē Latvijā

Jau pirms 150 gadiem bija iegūti vispārēji priekšstati par faciālām izmaiņām augšējā devona karbonātiēžos Latvijā un tuvākajos kaimiņreģionos. Pirmie pētījumi datējami ar 1861. gadu – tos veicis K. Grevings (*K. Grewingk*). Tālākie apjomīgie dati par šo karbonātisko iežu un organismu kompleksu ir iegūti un pētījumi veikti laika posmā no 1920. līdz 1940. gadam. Tos veicis N. Delle, E. Krauss (*E. Kraus*), H. Bilenšteins (*H. Bielenstein*) u.c. Šie pētījumi lielākoties ir par šīs karbonātisko iežu slāņkopas stratigrāfisko iedalījumu un tā precizējumiem.

Tajā pašā laika periodā augšējā devona karbonātiēžus Latvijā pētījuši arī A. Matulis, N. Delle un I. Mamantovs (*I. Mamantov*). Šie pētījumi tika veikti, lai noskaidrotu dažādu veidu dolomītu izplatību, kā arī praktiskās ieguves iespējas un potenciālo izmantošanu būvmateriālu ražošanai.

Latvijas augšējā devona nogulumiežu sastāvam, stratigrāfiskajam iedalījumam un fāciju zonalitātei plaša mēroga darbi tika veikti 1960. gados. Tos veica

tādi pētnieki kā P. Liepiņš, J. Ābolkalns, V. Grāvītis, V. Sorokins, L. Savvaitova u.c. Šo pētījumu ietvaros tika sastādītas vairāku svītu litoloģiski faciālās kartes, kā arī ģeoloģiskie griezumumi.

Vēlākos pētījumos (Stinkulis, 1998) netika atrasts pamatojums dolomītu sedimentogēnai izcelsmei un izdarīts pieņēmums, ka Latvijas devona dolomīti ir veidojušies agrīnos un vēlinos nogulu un iežu izmaiņu procesos.

V. Sorokins vairākos savos pētījumos (Sorokin, 1978, 1981, u.c.) plaši un detalizēti analizējis Franas stāva un dažādu tās daļu sastāvu, izplatību un veidošanos Austrumeiropas platformas ziemeļrietumu daļā. Viņš secinājis, ka Latvijas devona karbonātiēžos sastopami divi dolomīta veidi – viens ir sedimentogēni – diaģenētisks, savukārt otrs, pēcsedimentācijas dolomīts, kas veidojies, magnija savienojumiem migrējot ar ūdeņiem caur zemāk iegulošiem vai arī pārsedzošiem dolomītiem.

V. Sorokina publikācijām pievienotas arī detalizētas litoloģiski paleoģeogrāfiskās kartes dažādiem Franas laikmeta posmiem, kā arī ģeoloģiskie griezumumi, ieskaitot savstarpēji korelētus kopgriezumus. Pētījumos kombinētas sedimentoloģiskās un paleontoloģiskās pētījumu metodes, kā arī liela vērība pievērsta ciklostratigrāfijai. V. Sorokins savā 1978. gada monogrāfijā (Sorokin, 1978) pauž viedokli, ka Pļaviņu svītā kopumā izsekojami 14 ritmi. Tos viņš nodalīja kā X pakāpes ritmus un tie visticamāk salīdzināmi ar mūsdienās nodalītajiem “metru biežuma cikliem” – 5. pakāpes cikliskumam (Catuneanu, 2006).

Plaši un ilgstoši pētījumi par devona Franas stāva karbonātiēžu sastāvu, uzbūvi un veidošanās apstākļiem ir veikti arī Igaunijas un Lietuvas teritorijā. Daudzus no tiem veica tie paši autori, kas atzīmēti jau iepriekš. Vienā no pēdējiem plašajiem apkopojumiem par Igaunijas ģeoloģiju atzīmēts, ka pašreizējā Igaunijas teritorijā – Galvenā devona lauka ziemeļrietumu daļā – Franas laikmeta sākumā no austrumiem (Maskavas sineklīzes virzienā) pakāpeniski sākās jūras transgresija (Teedumae *et al.*, 2006).

Pēdējā desmitgadē tiek pausti viedokļi, ka ir problemātiski noteikt Pļaviņu un Daugavas laikposmu baseinu savienojuma virzienu ar pasaules okeānu. Iepriekš minētās norādes par norobežota baseina pāreju uz atklātu jūru (Sorokin 1978; Brangulis, 1998) virzienā no rietumiem uz austrumiem neatbilst virzienam, kur okeāns atrodas vistuvāk šim baseinam – uz dienvidrietumiem, tagadējā Polijas virzienā (Lukševičs *et al.*, 2012). Salīdzinot Franas stāva nogulumiežu sastāvu ar datiem par devona klimata izmaiņu likumsakarībām ir izteikts arī viedoklis par klimata aridizācijas un humidizācijas ietekmi uz nogulu sastāvu Baltijas devona baseinā (Lukševičs *et al.*, 2012).

1.2. Latvijā sastopamo Pļaviņu svītas karbonātiēžu līdzšinējo sedimentoloģisko pētījumu rezultāti

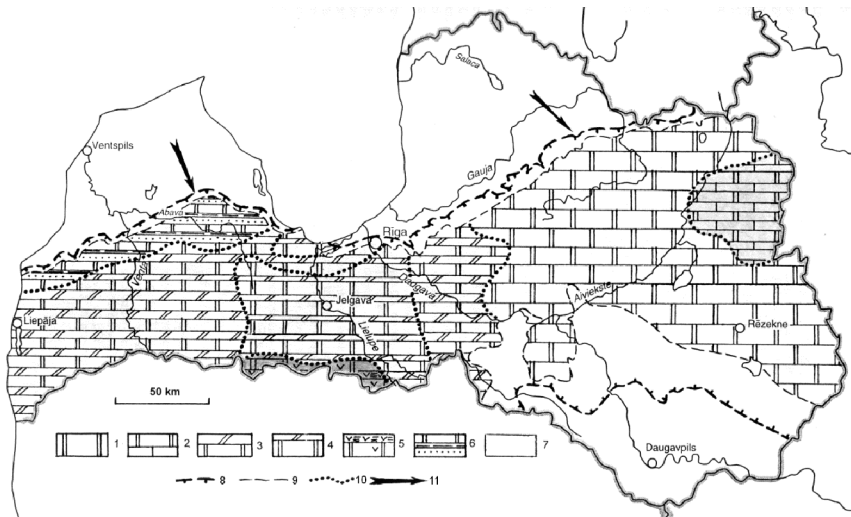
Augšējā devona Franas stāva Pļaviņu svīta ir izplatīta gandrīz lielākajā Latvijas teritorijas daļā. Pļaviņu svītā sastopami galvenokārt dolomīti ar merģeļu,

smilšakmeņu, aleirolitu, kaļķakmeņu un māla starpkārtām, nereti sastopamas arī plānas ģipša starpkārtiņas. Pļaviņu svītas karbonātiem uzguļ Amatas svītas iežiem saskanīgi, konkordanti, tomēr vietām konstatēti sedimentācijas pātraukumi (Brangulis *et al.*, 1998).

Augšējā devona nogulumieži ir daļa no Baltijas devona baseina karbonātiu slāņkopas, kam kopumā ir liels biezums un ievērojama laterālā izplatība.

Pļaviņu reģionālā stāva nogulumieži ir plaši izplatīti ne tikai Latvijā, bet arī visā Austrumreiropas platformā, vienlaikus Galvenajā devona laukā (GDL) – to ietekmēja Pļaviņu laikposma transgresija (Sorokin, 1978). Pļaviņu svītai un tās ridām Igaunijā un Krievijas ziemeļaustrumos ir analogi – Sņetnaja Goras, Pleskavas un Čudovas svītas, vai vismaz to daļas. Virzienā uz austrumiem pieaug kaļķakmeņu un merģeļu īpatsvars. Kopumā V. Sorokins norāda, ka virzienā uz austrumiem bijuši normāla sāļuma jūras apstākļi, kas ir labvēlīgi organismu eksistencei (Sorokin, 1978).

Iepriekš sedimentācijas apstākļu izmaiņas Baltijas devona baseinā nav tikušas analizētas un interpretētas no klimata izmaiņu un temperatūras fluktuāciju viedokļa. Iespējams, pārāk liela nozīme piešķirta vietēja mēroga lokāliem un arī globāliem tektoniskajiem procesiem.



1. attēls. Pļaviņu svītas litoloģiski faciālā shēma (modificēta pēc: T. Arharovas un L. Birgeres, 1979, shematiska)

Apzīmējumi: *Litoloģiski faciālie kompleksi*: 1 – dolomīti (80–95%); 2 – dolomīti (40–75%) un kaļķakmeņi (20–45%); 3 – dolomīti (50–75%) un dolomītmerģeļi (20–35%); 4 – dolomīti (75–85%) un dolomītmerģeļi (līdz 15%); 5 – dolomīti (līdz 65%) un māli (10–30%) ar ģipša piejaukumu; 6 – dolomīti (50–60%), dolomītmerģeļi (līdz 20%), smilšakmeņi un māli (līdz 30%). 8 – Pļaviņu svītas mūsdienu izplatības laukuma robeža; 9 – robeža laukumam, kura ietvaros Pļaviņu svīta ir izplatīta pilnā apjomā; 10 – litoloģiski faciālo kompleksu robeža; 11 – dominējošais sanešu plūsmas virziens.

Atsegumi, kuros pārstāvēta Pļaviņu svīta, ir sastopami Abavas, Daugavas, Dubnas, Gaujas, Palsas, Riežupes, Radžupītes un Ventas krastos. Visvairāk Pļaviņu svītas atsegumu ir Daugavas upes krastos no Rīgas līdz Līvāniem. Pļaviņu svītas raksturīgākie atsegumi ir Pļaviņās, Daugavas labajā krastā. Jāatzīmē gan, ka pēc Pļaviņu HES celtniecības lielākā daļa no šiem atsegumiem ir applūdināti. Latvijas sedlienes daļā Pļaviņu svītas maksimālais biežums sasniedz 50 metrus (pie Rīgas – Pleskavas kāples). Virzienā uz ziemeļrietumiem un rietumiem biežums samazinās līdz 20 metriem. Vismazākais biežums ir Latvijas – Lietuvas ieliecē – ap 11 līdz 15 metriem ziemeļu daļā un maksimums 27,4 metri dienvidaustrumu daļā, netālu no Skaistkalnes (Brangulis *et al.*, 1998).

Pēc karbonātiežu sastāva, cikliskās uzbūves pētījumiem un organismu kompleksa atšķirībām Pļaviņu svīta tiek iedalīta četrās ridās. Pļaviņu svīta iesākas ar Kokneses ridu, kas sastāv no dolomītmerģeļiem, māliem, mālainiem dolomītiem un dolomītiem, kā arī smilšakmeņiem. Tai seko Sēlijas, Atzeles un Apes ridas – tajās lielākoties dominē metasomatiskie dolomīti. Metasomatiskie dolomīti tiek saukti arī par aizvietošanās dolomītiem. Atzeles ridas karbonātieži ir atbilstoši maksimālajai jūras transgresijai vēlā devona epochā (Brangulis *et al.*, 1998).

Pļaviņu svītas dolomīti satur stromatoporu, brahiopodu, gliemežu, galvkāju, jūras liliju, aļģu un koraļļu fosilijas, onkolītus un stromatolītus. Nereti ir vērojamas arī zivju fosilijas, bet retākos gadījumos ir iespējams atrast pārogļotas augu atliekas (Lukševičs, Stinkulis, 2018a). Šie organismi ir mituši normāla sāļuma jūrā, nereti bijuši arī nosacīti saldūdens apstākļi (neliela tā pieplūde).

Pļaviņu svītā, netālu no Apes, sastopami rupjkristāliski dolomīti, tie ir pārkrystalizēti un tos mēdz saukt par “apītiem”, jo tie konstatēti tikai Apes ridas ietvaros un pirmoreiz tieši Apes ciema apkārtnē. Tie veido lēcveida ķermeņus, kuru izplatības laukuma platums ir 30 km, garums – 80 km, bet biežums vietām sasniedz pat 5,0 līdz 5,5 metrus. Pētnieki pieļauj, ka “apīti” ir veidojušies Pļaviņu laikposmā, maza mēroga regresiju epizodēs. “Apīti” vairs neveidojušies, kad sākušās jaunas transgresijas (Brangulis *et al.*, 1998).

Pļaviņu laikposmā Baltijas devona baseina teritorijā izveidojās epikontinentāla jūra, kas bija samērā sekla. Tajā krasi samazinājās drupu materiāla, kā arī saldūdens pieplūdums no Baltijas vairoga puses. Laika gaitā šajā baseinā izveidojās īpaša fāciju zonalitāte – no austrumiem uz rietumiem, kā iepriekš aprakstīts, mainījās nogulumu sastāvs un fosiliju daudzums, un sugu skaits. Šī fāciju zonalitāte atšķirās no iepriekšējo devona laikposmu baseinu fācijām. Iepriekšējie pētījumi uzrāda, ka virzienā uz Latvijas galējiem austrumiem palielinās normālam jūras sāļumam atbilstošas izcelsmes bezmugurkaulnieku daudzveidība – atrodamas brahiopodu, gliemeņu, gliemežu, jūras liliju un stromatoporu atliekas (Stinkulis, 1998). Pēc V. Sorokina viedokļa, šis fakts apstiprina to, ka epikontinentālais un sekla baseins bija ūdenstilpne, kas bija savienota ar atklātu jūru, kura atradās austrumos (Sorokin, 1978 un 1981).

Tiek pieļauts, ka virzienā uz rietumiem baseins būtiski sašaurinājās un epizodiski, nedaudz pieauga ūdens sāļums. Šajā baseina daļā dominē dolomīti.

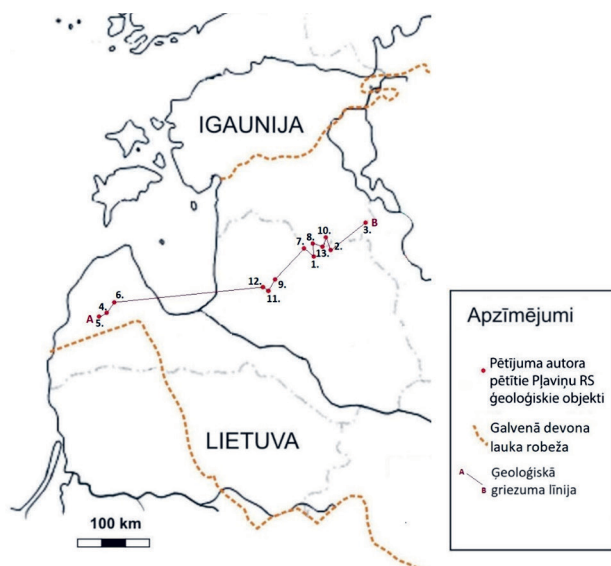
Domājams, ka Latvijas rietumu daļā eksistēja lagūna vai sekls, vienmērīga dziļuma jūras līcis. Šeit atklātas jūras ietekme ir praktiski jau nemanāma un veidojās māli ar dolomīta starpkārtām, dolomīti un dolomītmerģeļi. Arī organismu atliekas to apstiprina – sastopamas aļģes, augu atliekas, brahiopodu un zivju atliekas (Sorokin, 1981; Stinkulis, 1998).

Pļaviņu laikposmā jūra, kurā bija normāls ūdens sāļums, uzvirzījās plašiem Austrumeiropas platformas reģioniem. Par to liecina kaļķakmeņi ar daudzveidīgām bezmugurkaulnieku atliekām, kas raksturīgas jūrām. Pļaviņu svītas Atzeles ridas apakšējā daļa (ridas transgresīvā daļa) atbilst maksimālai vēlā devona jūras transgresijai (Sorokin, 1978, 1981; Stinkulis, 1998). Atzeles ridā visā Latvijas teritorijā ir dolomīti ar daudzveidīgām organismu atliekām, kas norāda uz normāla sāļuma baseina veidošanos praktiski visā Latvijas teritorijā (Lukševičs, Stinkulis, 2018b).

2. MATERIĀLI UN METODES

Kopumā tika pētīti 14 ģeoloģiskie objekti – Latvijā un Igaunijas dienvidaustrumu daļā (2. attēls). Papildus paša autora pētītajiem ģeoloģiskajiem objektiem tika izmantoti arī dati par pieslīpņiem no Kristapa Seiļa bakalaura darba par Vizūļu iezi.

Kā liecina promocijas pētījuma izstrādes gaitā gūtā pieredze, liela izmēra slāņu virsmas un iekšienes tekstūras saglabājas labāk nekā mikrotekstūras un sākotnējās struktūras. Šo iemeslu dēļ galvenā uzmanība tika pievērsta tieši slāņkopu dokumentēšanai ģeoloģiskajos griezumos un zāgētu, pulētu makroparaugu (pieslīpņu) pētījumiem. Lauka darbu laikā tika izstrādāti arī ģeoloģiskie griezumumi pētītajiem intervāliem, veiktas to savstarpējas korelācijas, kā arī detalizēti pētīti un aprakstīti nogulumiežu saguluma apstākļi, un aprakstītas, kā arī analizētas tekstūras tajos.



2. attēls. Galvenā devona lauka (GDL) shēma (modificēta pēc: Mešķis, 2013) ar pētījuma objektu izvietojumu Baltijas valstu teritorijā.

Apzīmējumi: Autora pētītie Pļaviņu RS ģeoloģiskie objekti: 1. Randātu klintis ($57^{\circ}26'54.1''\text{N}$ $26^{\circ}20'47.7''\text{E}$); 2. Grūbes dolomīta atsegums ($57^{\circ}31'35.0''\text{N}$ $26^{\circ}46'44.3''\text{E}$); 3. Marinovas karjera atsegums ($57^{\circ}44'26.0''\text{N}$ $27^{\circ}31'21.6''\text{E}$); 4. Riežupes atsegumi ($56^{\circ}59'16.7''\text{N}$ $22^{\circ}02'40.7''\text{E}$); 5. Ventas rumbas atsegums ($56^{\circ}58'04.7''\text{N}$ $21^{\circ}58'40.2''\text{E}$); 6. Īvandes ūdenskritumu atsegumi ($57^{\circ}04'05.0''\text{N}$ $22^{\circ}17'43.0''\text{E}$); 7. Dārziema dolomīta atradne ($57^{\circ}29'32.9''\text{N}$ $26^{\circ}25'7.0''\text{E}$); 8. Apes pamestā dolomīta atradne ($57^{\circ}31'52.6''\text{N}$ $26^{\circ}41'21.9''\text{E}$); 9. Lauciņu (Cēsu) bijusī dolomīta atradne ($57^{\circ}19'4.6''\text{N}$ $25^{\circ}19'0.3''\text{E}$); 10. Kalkahju (Peetri) atsegums ($57^{\circ}32'48.9''\text{N}$ $26^{\circ}34'49.7''\text{E}$). Aizgūtie Pļaviņu RS ģeoloģiskie objekti: 11. Īļaku iezis ($57^{\circ}13'28.2''\text{N}$ $25^{\circ}13'32.8''\text{E}$); 12. Vizūļu iezis ($57^{\circ}13'31.9''\text{N}$ $25^{\circ}13'25.3''\text{E}$); 13. Kalamecu un Markuzu gravas atsegumi ($57^{\circ}32'30.6''\text{N}$ $26^{\circ}26'40.1''\text{E}$).

No daļas noņemto karbonātiežu paraugu tika izgatavoti pieslīpņi (mezo-paraugi) ar galveno mērķi noteikt tekstūras, lai interpretētu šo nogulumiežu sākotnējos sedimentācijas apstākļus.

Pēc pētījumiem lauka apstākļos, ģeoloģisko griezumu analīzes un pieslīpējumu pētījumiem tika izvēlētas trīs etalonslāņkopas (Randātu klintis un Riežupes atsegumi, kā arī Iļaku ieža), kuriem pēc autora domām būtu nepieciešami detalizētāki sedimentācijas apstākļu pētījumi ar analītiskām laboratorijas pētījumu metodēm. Karbonātiežiem no diviem (Randātu klintis un Riežupes atsegumi) iepriekš minētajiem atsegumiem, pamatojoties uz morfoloģiskām un citām pazīmēm, tika veikta izvēlēto karbonātiežu paraugu tālāka analīze mikromērogā.

Detalizēti pētījumi ar XRD, XRF, *Biomarker* un TOC metodēm tika veikti diviem ģeoloģiskajiem objektiem vienas stratigrāfiskās vienības ietvaros, bet dažādās vietās Latvijā, lai varētu noteikt Baltijas devona paleobaseina centrālās daļas sedimentācijas apstākļu īpatnības un atšķirības.

Oglekļa un skābekļa stabilo izotopu analīzes tika veiktas 46 paraugiem no 7 atsegumu griezumiem. Paraugi šīm analīzēm tika ievākti no Dārziema dolomīta atradnes atseguma, Marinovas dolomīta atradnes atseguma, Īvandes ūdenskritumu klintīm, Kalkahju (Peetri) atseguma, Randātu klintīm un Apes pamestās dolomīta atradnes atseguma. Paraugu ievākšanas intervāli bija no 0,1 metra (Apes pamestajā dolomīta atradnē) līdz 1,0 metriem (Dārziema dolomīta atradnē).

2.1. Paraugu sagatavošana XRD, XRF, Biomarker, TOC analīzēm un oglekļa un skābekļa stabilo izotopu analīzēm

Paraugu sagatavošana XRD, XRF, *Biomarker*, TOC un oglekļa un skābekļa stabilo izotopu analīzēm tika veikta Vīnes Universitātes Zemes zinātņu, ģeogrāfijas un astronomijas fakultātē, Ģeodinamikas un sedimentoloģijas centrā, sadarbībā ar prof. Dr. geol. Mihaelu Vāgraihu (*Michael Wagreich*) un asoc. prof. Dr. geol. Suzannu Gīru (*Susanne Gier*).

Iesākumā, no katra lielā parauga LU Dabaszinātņu akadēmiskā centra Iežu pētījumu laboratorijā tika atzāģēti izmēros mazāki karbonātiežu paraugi.

Vispirms katrs paraugs tika sasmalcināts (pulverizēts) smalkā, nestrukturētā pulverī (kristalīti ir haotiski izkārtoti) ar graudu izmēru 10 līdz 20 mikroni (μm). Pulverizēšana tika veikta Vīnes Universitātē, Ģeodinamikas un sedimentoloģijas centrā, izmantojot planetāro dzirnavu iekārtu *Retsch RS 200*, kā arī *Fritsch Vibrating Cup Mill Pulverisette 9* planetāro dzirnavu iekārtu.

Paraugu pulverizēšanai iekārtas vadības panelī tika izvēlēti sekojoši parametri: apgriezīnu skaits minūtē – 1000 rpm; programmas laiks – 3 minūtes. Šie parametri bija visoptimālākie un pilnībā pietiekami katra karbonātiežu parauga pulverizēšanai līdz nepieciešamajai pulvera frakcijai.

2.2. Rentgendifraktometriskā (XRD) analīze

XRD analīzes metode promocijas pētījuma darbā tika izmantota, lai, pamatojoties uz rentgendifrakcijas ainām, varētu identificēt karbonātiēžos esošos minerālus un varētu precizēt šo nogulumu sedimentācijas apstākļus.

XRD analīzes tika veiktas paraugiem no trim pētījuma autora izvēlētiem geoloģiskiem etalongriezumiem – Randātu klintīm, Īļaku ieža un Riežupes atsegumiem. Kopumā ar XRD analīzes veidu tika analizēti 23 karbonātiēju paraugi. Pa vienam paraugam tika noņemts no katra identificētā, nodalītā atseguma slāņa.

Visi paraugi sākotnēji tika sagatavoti strukturēti, pulverizētā veidā. Paraugi XRD analīzei tika sagatavoti Vīnes Universitātes, Ģeodinamikas un sedimentoloģijas centrā, izmantojot *Halten* 5 cm diametra turētāju 2–70° ar padziļinājuma diametru 16 mm.

Lauka pētījumos noņemto Pļaviņu reģionālā stāva (Riežupes atsegumi, Īļaku iezis un Randātu klintis) karbonātiēju paraugu XRD analīzes tika veiktas Vīnes Universitātes, Ģeodinamikas un sedimentoloģijas centrā, izmantojot rentgenstaru difraktometru *Panalytical X'pert Pro*.

Rentgenstaru difrakcijas ainas tika uzņemtas ar CuK α radiāciju, 2–70° 40 posmā ar ekspozīcijas laiku 5 sekundes un soļa garumu 0,0167°. Uzsākot skenēšanu, programmā *X'Pert Data Collection* tika izvēlēts arī spriegums 40 kV un strāvas stiprums 40 mA. Rentgenstaru difraktometrs aprīkots ar augstas izšķirtspējas goniometru un daudzkanālu *PIXcel* staru detektoru.

Rentgenstaru difraktogrammu apstrāde un minerālo fāžu kvantitatīvā, un kvalitatīvā analīze tika veikta, izmantojot datorprogrammu *X'Pert High Score Plus*, kā arī balstoties uz Ritvelda (no angļu val. – *Rietveld refinement method*) metodi.

2.3. Rentgenfluorescences (XRF) analīze

XRF analīzes metode promocijas pētījumā tika izmantota, lai, pamatojoties uz tās rezultātiem, varētu identificēt karbonātiēju sastāvā esošos mikroelementus un galveno elementu oksīdu koncentrācijas (Azami *et al.*, 2021).

XRF analīzes tika veiktas 7 izvēlētajiem paraugiem no Īļaku ieža. Tika noteikta Ca, Mg, Si, Al, Mn, Ti, Zr u.c. mikroelementu koncentrācija *ppm* izteiksmē. Kopumā jāņem vērā, ka iekārtas kļūda var būt aptuveni 1–3% robežās. Tika veikta arī karbonātiēju sastāvā esošo galveno elementu oksīdu koncentrāciju noteikšana – MgO, Al₂O₃, SiO₂, P₂O₅, K₂O, CaO, TiO₂, MnO un Fe₂O₃.

XRF analīzes tika veiktas ar *Bruker Tracer IV* rokas tipa iekārtu.

2.4. TOC analīze

TOC, jeb kopējā organiskas izcelsmes oglekļa (t.i., organiskā oglekļa) analīze (no angļu val. – *total organic carbon*) ir metode atlikušās organiskās vielas koncentrāciju noteikšanai nogulumiežos. TOC analīzes tika veiktas 5 karbonātiestu paraugiem, kuros organoleptiski, pēc krāsojuma pazīmēm tika novērots vislielākais organiskās vielas saturs. 3 paraugi bija no Randātu klintīm, bet 2 paraugi no Riežupes atsegumiem. TOC analīzes pētījuma autors veica Vīnes Universitātes Vides ģeozinātņu departamentā, Zemes zinātņu centrā. Tika izmantota iekārta *Multiphase Carbon Determinator RC-612*. Paraugu apstrādes temperatūra ir 550 °C.

2.5. Biomarker lipīdu analīze

Biomarker lipīdu analīzes karbonātiestu paraugiem tika veiktas Vīnes Universitātes Ģeodinamikas un sedimentoloģijas centrā. Ar šo metodi tika analizēti tie paši 5 paraugi, kas tika analizēti ar TOC metodi. *Biomarker* lipīdu metode tika izmantota, lai no karbonātiestu paraugiem ekstrahētu viegli šķīstošās organiskās vielas (t.s. bitumenu) (El-Shafiey *et al.*, 2014). Mērījumiem tika izmantota gāzes hromatogrāfijas – masu spektrometrijas iekārta (no angļu val. – *GC-MS*) un gāzu hromatogrāfijas iekārta ar liesmu jonizācijas detektoru (no angļu val. – *GC-FID*).

Pirms ekstrakcijas procesa, pulverizētajam karbonātiesta paraugam tika pievienoti 40 ml dihlormetāna:metanola (attiecībā 3:1). Ekstrakcija tika veikta ar mikroviļņu tipa iekārtu *CEM MARS X*. Karsēšanas laiks bija 15 minūtes pie 80 °C temperatūras un 600 W jaudas. Sakarā ar to, ka organiskās vielas saturs ir ļoti mazs, šīs metodes rezultāti neuzrādīja nozīmīgas vērtības (tās bija ļoti zemas), kas līdz ar to nav izmantojamas pētījumā (Aderoju, Bend, 2018) un tālākā interpretācijā.

2.6. Oglekļa un skābekļa stabilo izotopu analīze

Latvijas Universitātes Iežu pētījumu laboratorijā (LU DAC, Jelgavas iela 1, Rīga) sākotnēji tika veikta pulverveida paraugu nodalīšana no katra izvēlētā karbonātiesta parauga.

Oglekļa un skābekļa stabilo izotopu analīzes tika veiktas Tallinas Tehnoloģiju universitātes Ģeoloģijas institūtā, Igaunijā, sadarbībā ar Dr. geol. Tonu Martmā (*Tõnu Martma*). Oglekļa un skābekļa stabilo izotopu analīzes paraugiem tika veiktas no septiņiem pilniem griezumiem – no Apes pamestās dolomīta atradnes atseguma un Lauciņu (Cēsu) dolomīta atradnes, Marinovas dolomīta atradnes atseguma, Īvandes ūdenskritumu klintīm, Kalkahju (Peetri) atseguma, Randātu klintīm un Apes pamestās dolomīta atradnes atseguma. Noņemto un analizēto karbonātiestu paraugu noņemšanas intervāli bija no 0,1 metra līdz 1,0 metriem.

Kopumā autors sagatavoja stabilo izotopu analīzei sagatavoja 46 karbonātiežu paraugus. Izotopu analīzes tika veiktas ar iekārtu *GasBench II Preperation Line*. Šī iekārta savienota ar masu spektrometra iekārtu *Thermo Scientific Delta V Advantage*. Iegūtie stabilo izotopu rezultāti ir sniegti pieņemtā δ izteiksmē, kā novirze promilēs no VPDB vērtību standarta (no angļu val. – *Vienna Peedee Belemnite*).

3. REZULTĀTI

Pamatojoties uz atsegumu dokumentāciju un pieslīpņu pētījumiem, Pļaviņu svītas karbonātaisajos un mālainajos nogulumiežos ir nodalītas 12 fācijas un 3 fāciju asociācijas.

1. tabula. Nodalītas karbonātiežu fācijas un to asociācijas

Fācijas	Izmēri un sastāvs	Tekstūras	Slāņu robežas	Fosīlijas un iħnofosīlijas	Baseina dziļums, orientējošs	Interpretācija	Fāciju asociācijas
F1 Karbonātieži ar vilpŃotu kārtojumu un vilpu ripsno- ĵumu	0,3 līdz 1,5 m biezi slāņi, mālaini dolo- mīti un dolomīt- merģeļi	VilpŃots kārtojums un vilpu ripsno- ĵūšanas plaisas	Vien- mērigas, subhori- zontālas	Nav kon- statētas	Sekls līdz vidēja dziļuma ūdens	Seklā līdz vidēji dziļā ūdens- tilpē, vilpŃošanās ietekmē. Ĵūšanas plaisas norāda uz subaerālu atģeģanos, savukārt kārtojums liecina par lagūnas vai plūdmainu lģdzenuma apģakļiem (Ļlaku iezģ) (Masse <i>et al.</i> , 2003). Laminģti ar kārtojumu norāda arī uz sedimentāciju augģģģ plūdmainu zona (Flģgel, 2004).	FA1
F2 Karbo- nātieži ar regulāru un nere- gulāru kārtojumu	0,2 līdz 2,3 m biezi slāņi, dolomģti un kaļķ- akmeņi	Regu- lārs un neregulārs kārtojums	Vien- mērigas, subhori- zontālas	Nav kon- statētas	Sekls ūdens	Kārtaini dolomģti (laminģti) ir rakģturģģ augģģģģai plūd- mainu zonai.	FA1, FA2
F3 Karbo- nātieži ar traucģtu kārtojumu	0,3 līdz 0,7 m biezi slāņi, dolomģti	Traucģts kārtojums	Traucģtas	Bioturbāci- ĵas pazģmes (nav nosakāma pģderģģba)	Sekla jūra	Traucģts kārtojums ar bioturbāciju norāda uz sedimentāciju plūdmainu lģdzenuma apģakļos vai plūdmainu kanālos (Meģģģis, 2013).	FA1, FA2
F4 Karbo- nātieži ar organismu detritu	0,5 līdz 1,0 m biezi slāņi, dolomģti	Vienmģ- rģģģ slāņo- ĵums	Vien- mērigas, subhori- zontālas	Ģliemežu un bra- ģhiopodu atliekas	Sekls	Organģsmu detritģ norāda uz aktģvu vģdi un seklu ūdeni.	FA2

1. tabulas turpinājums

Fācijas	Izmēri un sastāvs	Tekstūras	Slāņu robežas	Fosilijas un inhofozilijas	Baseina dziļums, orientējošs	Interpretācija	Fāciju asociācijas
F5 Stromatoporu karbonātieži	0,15 līdz 1,5 m biezi slāņi, dolomīti un dolomītmergēji	Pārskalotas stromatoporu atliekas	Nevienmērīgas, robotas	Stromatoporu atliekas	Seklas jūras apstākļi	Bijuši normāla sāļuma, sekla ūdens apstākļi (Garland, 1997).	FA2
F6 Karbonātieži ar dažādām organismu atliekam un bioturbāciju	0,1 līdz 1,5 m biezi slāņi, mālaini dolomīti un dolomīti, dolomītmergēji	Bioturbācija, vienmērīgs slāņojums	Vienmērīgas, subhorizontālas	Mugurkaulnieku fosilijas, gliemežu, brahiopodu u.c. organismu atliekas, bioturbācijas pazīmes (Plagnolites, Lockeia un Thalassinoides)	Seklas jūras apstākļi	Bijuši sekla ūdens apstākļi, plūdmaiņu ietekme (Meškis, 2013). Konkrētas inhofozilijas norāda uz sedimentāciju plūdmaiņu līdzenumos vai plūdmaiņu kanālos. Savukārt, organismu atlieku izkārtojums "ķēdītēs" apstiprina apgalvojumu par sedimentāciju aktīvā hidroinamiskajā režīmā (Shen <i>et al.</i> , 2008).	FA2
F7 Ooīdu karbonātieži	0,1 līdz 0,2 m biezi slāņi, dolomīti	Haotisks ooīdu izkārtojums	Nevienmērīgas	Ooīdi un poras izšķīdušu ooīdu vietās	Seklas jūras apstākļi	Sekla ūdens apstākļi, normāla sāļuma ūdens, aktīvi hidroinamiskie apstākļi (Li <i>et al.</i> , 2019).	FA2
F8 Karbonātieži ar klasiskā materiāla un dolomīta miju	0,2 m biezs slānis, dolomīts un dolomītsmilš-akmens	Klasiskā materiāla un dolomīta mija	Vienmērīgas, subhorizontālas	Nav konstatētas	Seklas jūras apstākļi	Notikusi periodiska klasiskā materiāla pieplūde	FA3

1. tabulas turpinājums

Fācijas	Izmēri un sastāvs	Tekstūras	Slāņu robežas	Fosilijas un ihnofosilijas	Bāscina dziļums, orientējoss	Interpretācija	Fāciju asociācijas
F9 Karbonātieži ar dažāda izmēra, noapaļotības litoklastiem	0,3 līdz 0,6 m bieži slāņi, dolomīts un karbonātais konglomerāts	Dažāda izmēra litoklasti (izmēros no 1 mm līdz 1,8 cm) vienmērīgā pamatmasā. Vietām normālais gradācijas slāņojums, ko nosaka litoklastu sadalījums pēc izmēriem	Nevienmēri- gas, robotas	Nav konstatētas	Vilņu darbības zona, sekas jūras apstākļos	Šāda tipa karbonātieži veidojušies vētru ietekmē. Uz minimālu litoklastu transportu norāda to vāja noapaļotības pakāpe (Immenhauser, 2009).	FA3
F10 Brekčijoti karbonātieži	0,3 līdz 0,6 m bieži slāņi, dolomīts un dolomītmerģelis	Brekčijoti karbonātieži	Nevienmēri- gas, robotas	Nav konstatētas	Seklas jūras apstākļi	Brekčijoti karbonātieži norāda uz paleokarsta procesiem subaerālas atsegšanās rezultātā (Immenhauser, 2009).	FA1
F11 Karbonātieži ar mālainu nogulumu starpkārtām	0,05 līdz 1,6 m bieži slāņi, māli, mālaini dolomīti, dolomīti	Mālainu un karbonātisku nogulumu mija, konstatētas nelielas mālaina materiāla starpkārtas (plūdmaiņu kopas)	Vienmērīgas, subhorizontālas	Nav konstatētas	Seklas jūras apstākļi	Sedimentācija norisinājusies seklas jūras apstākļos, konkrēti plūdmaiņu līdzekumos (Nichols, 2007).	FA1, FA2

1. tabulas turpinājums

Fācijas	Izmēri un sastāvs	Tekstūras	Slāņu robežas	Fosilijas un ihnofosilijas	Bāseina dziļums, orientējošs	Interpretācija	Fāciju asociācijas
F12 Mālaini karbonātieži	0,1 līdz 0,7 m bieži slāņi, mālaini dolomīti un dolomītmerģeļi	Regulārs slāņojums	Vienmērīgas, subhorizontālas	Nav konstatētas	Sekls ūdens	Salīdzinoši mierīgi sedimentācijas apstākļi par ko liecina regulārais slāņojums (Messadi <i>et al.</i> , 2016).	FA1, FA2

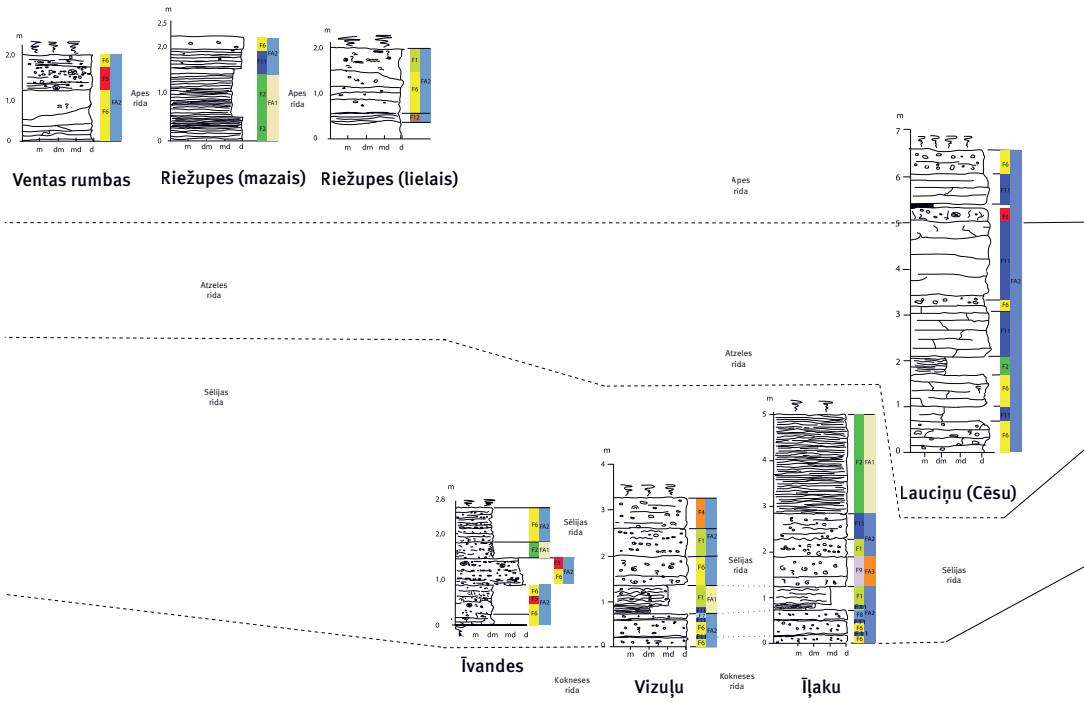
Nodalītās fāciju asociācijas:

FA1 – vidējā līdz augšējā plūdmaiņu zona;

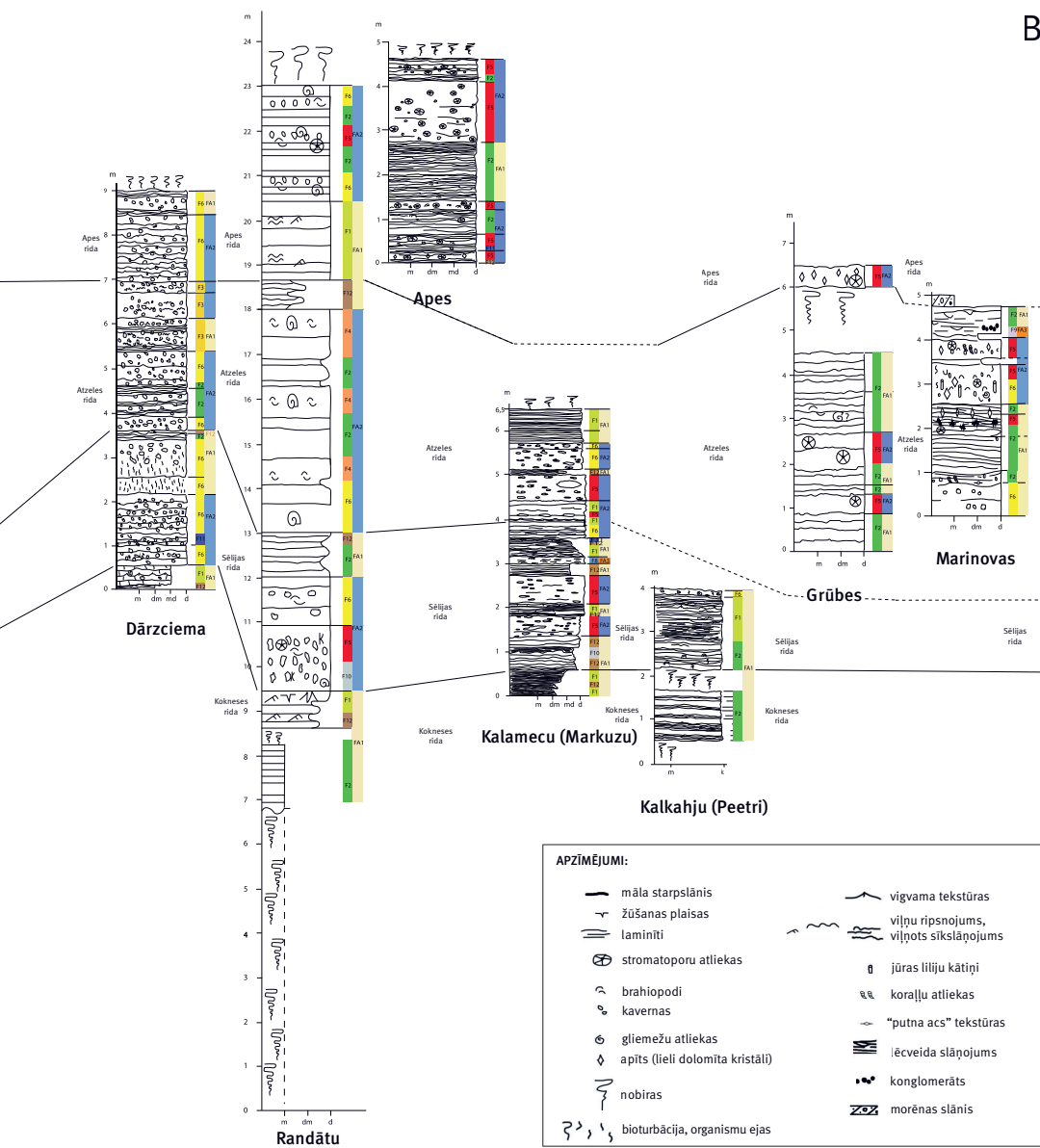
FA2 – sekla, normāla sāļuma jūra;

FA3 – vētru vai citu aktīvu notikumu ietekmēti karbonātieži.

A



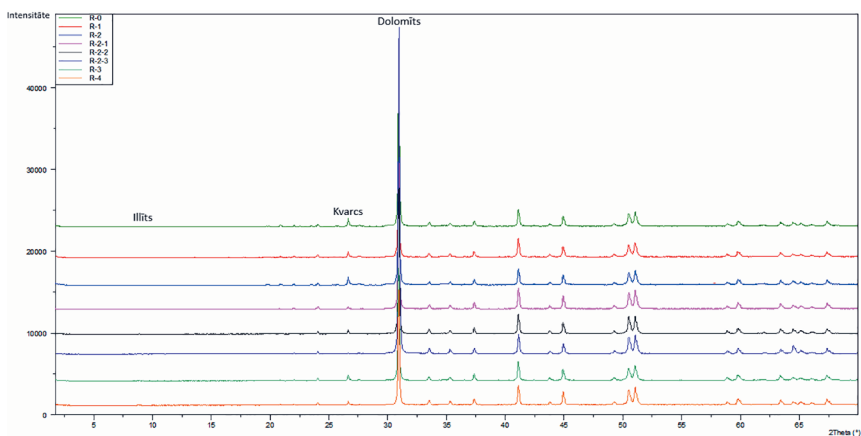
3. attēls. Pētīto ģeoloģisko griezumņu savstarpējā korelācija pēc F, FA un ridām,



virzienā no rietumiem (A) uz austrumiem (B); novietojumu skatīt 2. attēlā

3.1. Rentgendifraktometriskās analīzes (XRD) rezultāti un to interpretācija

Rentgendifraktometriskās analīzes rezultāti dolomītiem no Riežupes atsegumiem (4. attēls) liecina, ka, kā jau sagaidāms, dominē minerāls dolomīts ar nelielu kvarca un māla minerāla illīta piejaukumu. Kvarcs visticamāk pārstāv silīciklastisko materiālu – smilti vai aleirītu –, ko makroskopiski neizdevās konstatēt. Māla piejaukums, savukārt, tika novērots arī atsegumos. Vērojams arī, ka visi 8 analizētie paraugi no Riežupes abiem atsegumiem uzrāda ļoti līdzīgas kvantitatīvās līknes un nav vērojamas praktiski nekādas minerālu koncentrāciju izmaiņas.

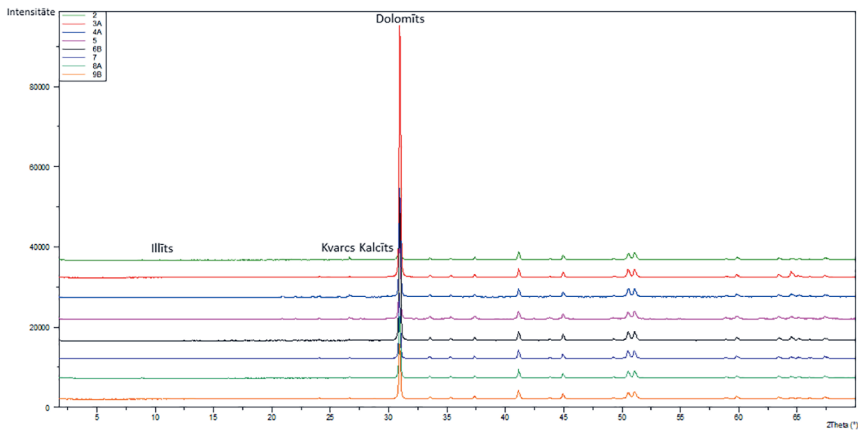


4. attēls. Rentgendifraktometrijas (XRD) analīžu apvienotais grafiks paraugiem no Riežupes atsegumiem. Minerālu nosaukumi pievienoti to galvenajiem (intensīvākajiem) atstarojumiem

Karbonātiežu paraugu rentgendifraktometrijas analīžu rezultāti no Randātu klinšu atsegumiem (5. attēls) arī apliecina pieņēmumu, ka izteikti dominē dolomīts ar nelielu kvarca un kalcīta, kā arī nelielu māla minerāla (illīta) piejaukumu.

Kvarcs visticamāk ir saistīts ar silīciklastisko piejaukumu – smilti vai aleirītu. Illīts pārstāv māla piejaukumu, ko izdevās konstatēt arī makroskopiski atsegumā. Kalcīts visticamāk ir sekundārs, jo Randātu klintis neatrodas dolomitizēto kaļķakmeņu izplatības apgabalā (Brangulis u.c., 1998, Stinkulis, 1998).

Visi 8 analizētie karbonātiežu paraugi no Randātu klintīm uzrāda ļoti līdzīgas kvantitatīvās līknes un arī šajos paraugos, tāpat kā paraugos no Riežupes atsegumiem, nav novērojamas praktiski nekādas minerālu koncentrāciju izmaiņas.



5. attēls. Rentgenifraktometrijas (XRD) analīžu apvienotais grafiks paraugiem no Randātu klinšu atseguma

Augstais dolomīta saturs rentgenifraktometrijas ainā sakrīt ar pētīto atsegumu un piesliņņu pētījumu datiem par izteikti dominējošu dolomītu pētīto karbonātiežu slāņkopās. Kvarca piejaukums norāda uz siliciklastiskā materiāla klātbūtni, bet kalcīts apliecina sekundārās kalcitizācijas nelielu ietekmi uz pētītajiem karbonātiežiem (Azami *et al.*, 2021).

3.2. Rentgenfluorescences spektroskopijas (XRF) analīžu rezultāti un to interpretācija

Pēc iegūtajiem rentgenfluorescences spektroskopijas (XRF) analīžu datiem, secināms, ka pētītie dolomītu paraugi ir bagāti ar CaO (50,21–59,17 masas %), MgO (17,36–28,28 masas %) un SiO₂ (7,52–21,26 masas %). Savukārt pretēji tam, dolomītu paraugos ir zems saturs Al₂O₃ (3,69–7,92 masas %), Fe₂O₃ (1,25–2,42 masas %), K₂O (1,38–4,07 masas %), TiO₂ (0,16–0,45 masas %), P₂O₅ (0–0,16 masas %), MnO (0,09–0,12 masas %).

Kalcija un magnija oksīdi ir saistīti ar dolomītu kā izeji un minerālu, silīcija un alumīnija oksīdi raksturo smilts-aleirīta un māla piejaukumu. Samērā liels dzelzs oksīda daudzums visticamāk ir saistīts ar piejaukumiem starp kristāliem, kā arī porās un kavernās. Kā redzams atsegumos un makroparaugos, dolomīti bieži ir sārti un iedzelteni, kas atbilst dzelzs savienojumu noteiktajai krāsai. Līdzīgi var izskaidrot arī mangāna oksīda izcelsmi un izplatību – vietām dolomītos var novērot melnus mangāna oksīdu un hidroksīdu uzsūbējumus. Kālija, titāna un fosfora uzkrāšanās iežos var notikt gan sedimentācijas, gan agrīnos un vēlinos pēdsedimentācijas procesos.

Dolomīta paraugos tādu elementu, kā Zr (14–45 ppm), Cu (21–30 ppm), Zn (18–28 ppm), Ni (4–9 ppm), Cr (6–32 ppm) un Mo (0–5 ppm) daudzums ir mazs. Arī Sr (61–121 ppm) koncentrācija ir mazāka nekā parasti izteikts marīniem karbonātiem – 80–900 ppm (Vincent *et al.* 2006; Li *et al.*, 2015). Dolomīti parasti satur mazāk Sr, salīdzinot ar kaļķakmeņiem, jo dolomīta kristālrežģī var ietilpt mazāks šī elementa daudzums. Neskatoties uz to, dolomīti, kuri ir veidojušies normāla sāļuma baseinos, satur Sr 470–550 ppm daudzumā, bet evaporītu baseinu dolomīti – 500–700 ppm daudzumā (Qing, Mountjoy, 1989; Veizer 1983; Land 1991 – citēts: Li *et al.* 2015). Pļaviņu svītas dolomītos esošās Sr samazinātās vērtības, domājams, var skaidrot līdzīgi kā to darījuši Li *et al.* (2015) – dolomīti ir attīrījušies no mazāk izplatītiem elementiem pār-kristalizēšanās rezultātā – pēcsedimentācijas procesos.

Procentuālās vērtības (no masas %) trīs pārstāvētākajiem oksīdiem (CaO, MgO un SiO₂) tika korelētas ar retāk sastopamo elementu koncentrācijām: CaO (50,21–59,17 masas %), MgO (17,36–28,28 masas %) un SiO₂ (7,52–21,26 masas %). Pētījuma gaitā netika novērotas korelācijas šo elementu daudzumiem.

Tomēr secināts, ka Īļaku griezuma karbonātiem paraugos paaugstinātas MnO/CaO un Fe₂O₃/CaO attiecību vērtību atšķirības norāda uz pēcsedimentācijas izmaiņām (De Winter, Claeys, 2016), līdzīgi kā samazinātais stroncija daudzums. Savukārt paaugstinātas MnO un Fe₂O₃ koncentrācijas apvienojumā ar pavisam nelielām Sr/CaO koncentrācijām, varētu liecināt par palielinātu paleovides aktivitāti (Richardson *et al.*, 2004).

3.3. Skābekļa un oglekļa stabilo izotopu analīžu rezultāti un to interpretācija

Oglekļa un skābekļa stabilo izotopu analīzes kopumā ir veiktas 46 dolomīta paraugiem.

$\delta^{13}\text{C}$ vērtības pētītajiem dolomītiem variē no $-4,82\text{‰}$ līdz $0,73\text{‰}$, savukārt $\delta^{18}\text{O}$ vērtības pētītajiem dolomītiem variē no $-8,57\text{‰}$ līdz $-3,09\text{‰}$.

Karbonātu platformu dolomītiem dominē šādas C un O stabilo izotopu vērtības: $\delta^{13}\text{C}$ -3 – $+3\text{‰}$; bet $\delta^{18}\text{O}$ -10 – $+3$ (Land 1980). Vidējās $\delta^{13}\text{C}$ vērtības fanerozoja marīnajiem karbonātiem ir -1‰ – 4‰ , devonā ap, vidēji 2% (Mackensen, Schmiedl 2019). Šie dati kopumā sakrīt ar promocijas darbā iegūtajiem rezultātiem, apliecinot nogulumiežumarīnu izcelsmi.

Pētītajos objektos, ieskaitot Getliņu un Gaujienas urbumus, oglekļa izotopu vērtības ir līdzīgas, taču tās ir zemākas (pārsvarā -2 – -4‰) Īvandes, Riežupes un Getliņu objektos (pētījumu teritorijas centrālā daļa – rietumi), bet augstākas, ap 1% Apē (pētījumu teritorijas ziemeļaustrumu daļa). Iespējams, šo parādību var izskaidrot ar zināmu saldūdens pieplūdi baseina rietumu daļā (Amthor *et al.*, 1993), taču tas ir jāpārbauda turpmākos pētījumos ar plašāku datu kopu. Saldūdens pieplūde marīnos baseinos samazina $\delta^{13}\text{C}$ vērtības (Colombie *et al.*, 2010).

Promocijas darba pētījumā iegūtās dolomītu skābekļa izotopu vērtības ir zemākas nekā parasti konstatētas marīnas izcelsmes nogulumiem (Land, 1980). To var izskaidrot ar atmosfēras ūdeņu ietekmi pēcsedimentācijas procesu gaitā. Skābekļa izotopu vērtības pēcsedimentācijas procesos mainās daudz ātrāk nekā oglekļa izotopu vērtības, jo skābekļa izotopu vērtību izmaiņām ir nepieciešama ievērojami mazāka ūdens/ieža attiecība nekā oglekļa izotopu vērtību izmaiņām (Sharp, 2017). Samērā ievērojama ir $\delta^{18}\text{O}$ vidējo vērtību samazināšanās no aptuveni -4 līdz -6% virzienā no rietumiem uz austrumiem, kas, domājams, saistāma ar pēcsedimentācijas procesu atšķirībām – lielāku atmosfēras ūdeņu ietekmi pētījumu apgabalā austrumu daļā. Tas gan, domājams, neattiecas uz notikumiem Pļaviņu laikposmā, bet vēlākos laika posmos.

Visticamāk pētītie nogulumi kopumā nav veidojušies baseinā ar palielinātu ūdens sāļumu, t. sk. evaporītu baseinā, jo tajos ir pazeminātas $\delta^{13}\text{C}$ vērtības (Warren, 2018).

Iegūtie oglekļa un skābekļa stabilo izotopu attiecību rezultāti apstiprina to, ka Pļaviņu svītas karbonāti (šajā gadījumā, dolomīti) ir ievērojami mainījušies pēcsedimentācijas procesos.

Visticamāk, $\delta^{13}\text{C}$ vērtību amplitūdas dolomītos no Marinovas, varētu norādīt arī uz nelielu saldūdens ietekmes palielināšanos laika gaitā.

Relatīvi liela starpība starp $\delta^{18}\text{O}$ vērtībām varētu liecināt arī par vēlinu dolomīta kristalizāciju. $\delta^{13}\text{C}$ nedaudz mainīgie lielumi – nelielas negatīvas un pozitīvas vērtības – var norādīt uz vāji izteiktu jūras ūdeņu un atmosfēras (nokrišņu) ūdeņu sajaukšanos (Immenhauser *et al.*, 2003 un Wendte, Uyeno, 2005).

Dārziema dolomīta atradnes dolomītos oglekļa un skābekļa stabilo izotopu vērtības mainās minimāli, kas norāda uz nosacīti stabiliem sedimentācijas apstākļiem. Pārsvārā bijuši normāla sāļuma jūras apstākļi (Colombie *et al.*, 2010).

Oglekļa stabilo izotopu $\delta^{13}\text{C}$ vērtības Īvandes ūdenskritumu atsegumā samazinās no $-2,07$ atseguma apakšdaļā līdz $-4,82\%$ virzienā uz atseguma augšdaļu. Pašā atseguma augšdaļā (paraugs Ī-5), oglekļa stabilo izotopu vērtības krasi pieaug, līdz $-0,23\%$. Kopumā oglekļa stabilo izotopu vērtību samazināšanās laika gaitā, liecina par pakāpenisku saldūdens pieplūdi marīnā baseinā. Savukārt, novērotais krasais oglekļa vērtību palielinājums pēdējā atseguma slānī, norāda uz dolomīta veidošanos vidē, kur strauji ir palielinājies ūdens sāļums baseinā, jeb bijusi mazāka saldūdens pieplūde no kontinenta vai atmosfēras ūdeņiem (Kleesment *et al.*, 2013).

Kaļķakmeņos no Kalkahju (Peetri) atseguma, oglekļa stabilo izotopu vērtības, līdzīgi kā Īvandes ūdenskritumu atseguma paraugos, ir zemākas atseguma apakšdaļā, bet virzienā uz augšu tās pieaug līdz $-0,68$ un $-1,39\%$. Šie rezultāti liecina par evaporītu baseina attīstību laika gaitā – ūdens sāļums ūdenī ir palielinājies un bijusi mazāka atmosfēras ūdeņu ietekme uz tiem (Kleesment *et al.*, 2013).

Randātu klintīs stabilo oglekļa analīžu vērtības pētītajos dolomītos mainās ļoti minimāli, un ir tuvu nullei (pārsvārā, nedaudz negatīvas vērtības). Šādi

rezultāti norāda uz maz mainīgiem marīnajiem apstākļiem. Dažbrīd konstatētās pozitīvās vērtības (attiecīgi, 0,09, 0,01 un 0,73‰) liecina par nedaudz palielinātu ūdens sāļumu baseinā šajos konkrētajos laika posmos, kad norisinājusies karbonātisko nogulu sedimentācija (Warren, 2018).

Izteikti mainīgas oglekļa stabilo izotopu $\delta^{13}\text{C}$ vērtības (Riežupes abos atsegumos tās variē no $-3,82$ līdz $1,85\%$) norāda uz dolomīta veidošanos vidē, kur marīnie jūras ūdeņi periodiski sajaukušies ar atmosfēras ūdeņiem (nokrišņi) (Kleesment *et al.*, 2013). Bijis mainīgs ūdens sāļums. Līdzīgi sedimentācijas apstākļi bijuši arī dolomītos no Īvandes ūdenskritumu atseguma, daļēji, arī Kalkahju (Peetri) atseguma karbonātiestu paraugos.

3.4. TOC analīžu rezultāti un to interpretācija

Kopējā organiskā izcelsmes oglekļa daudzuma (TOC, no angļu val. – *total organic carbon*) analīzes uzrāda nozīmīgus datus sākotnējā organiskā materiāla apjoma novērtēšanai pētītajos karbonātiestu paraugos.

Divos paraugos ar vizuāli novērtēto augstāko organiskās vielas saturu no Randātu klintīm, organiskās izcelsmes oglekļa daudzums variē no 0,524% 5. paraugā līdz 0,419% 9b paraugā.

Savukārt trīs paraugos ar vizuāli novērtēto augstāko organiskās vielas saturu no Riežupes atseguma, organiskās izcelsmes oglekļa daudzums paraugā R-0 ir 0,449%, paraugā R-2 ir 0,388%, bet paraugā R-3 ir 0,409%.

Iegūtie analīžu rezultāti veiktajiem karbonātiestu paraugiem no Randātu klintīm un Riežupes atsegumiem uzrāda, ka sedimentācijas gaitā nav bijuši anoksiski apstākļi (Da Silva, Boulvain, 2004). Tas liek domāt, ka sedimentācijas gaitā un pēdsedimentācijas procesos organiskās vielas ir oksidētas vai izskalotas. Tomēr tas iezīmē arī sākotnējo organiskās vielas daudzuma apmēru, tas ir, ka organiskās vielas sākotnēji šajos slāņos bijis vairāk kā citos. Tādēļ secināms, ka sedimentācijas vide ir bijusi oksiska – bijuši oksiski seklas jūras gultnes apstākļi un vidēja organiskā aktivitāte, jeb oligotrofi apstākļi (Da Silva, Boulvain, 2004).

3.5. Fosīlijas un ihnofosīlijas pētītajos karbonātiestos

Fosīlijas Baltijas devona paleobaseina centrālajā daļā galvenokārt ir vāji līdz slikti saglabātas, līdz ar to precīzi organismu atliekas nav bijis iespējams noteikt. Pētījumu gaitā darba autors ievēroja, ka objektos Latvijas rietumu daļā gan fosīlijas, gan iežu tekstūras ir vāji saglabājušās dolomitizācijas, iespējams, dolomīta pārkristalizēšanās rezultātā.

Savukārt virzienā uz Latvijas ziemeļaustrumiem un Igaunijas dienvidaustrumu daļā bija iespējams vērot vairāk sākotnējās tekstūras, organismu atliekas un dažviet arī ihnofosīlijas, kuras nebija nosakāmas līdz ģintij, tomēr bija iespēja noteikt piederību tipam, klasei vai apakšklasei.

Kā būtisks sedimentācijas vidi reksturojošs elements ir jāatzīmē Pļaviņu svītas karbonātiežos sastopamās stromatoporu atliekas.

Stromatoporu diametrs pētījumu objektos variē no 2 cm līdz pat 30 cm. Pārsvārā atliekas vai to šķīšanas vietā esošās kavernas ir sfēriskas formas. Lielākajai daļai (gadījumos, kad varēja noteikt formu) pētīto stromatoporu ir raksturīga sīpolveida, jeb ieapaļa (no angļu val. – *bulbous*; skatīt 6. attēlu) forma (Garland, 1997), taču ieapaļo formu var izskaidrot arī ar neatrašanos dzīves pozīcijā un pārskalošanu. Gandrīz visos gadījumos konstatēts, ka stromatoporas ir pārvietotas, dažbrīd pat apveltas uz sāniem, jeb apgāztas. Stromatoporu karbonātieži (F5) nav konstatēti Kokneses ridas karbonātiežos, jo pēc autora ieskatiem, šajā laikposmā īslaicīgi bijis arīds klimats un bieži arī subaerāli sedimentācijas apstākļi, līdz ar to, nelabvēlīgi dzīves apstākļi šiem organismiem, ar palielinātu ūdens sāļumu. Sēlijas ridas karbonātiežos stromatoporas (to fosilijas, biežāk kavernas izšķīdušu stromatoporu vietās) sastopamas 15% Īvandes ūdenskritumu atsegumā (ieapaļas formas kavernas šķīdušu stromatoporu vietās, līdz 6 cm diametrā, izkārtotas ķēdītēs), 22% Randātu klintīs (nenosakāmas formas un izmēri), kā arī 31% apmērā Kalamecu un Markuzu gravas atsegumā (kavernas šķīdušu stromatoporu vietās, līdz pat 10 cm diametrā, ieapaļas formas). Atzeles ridas karbonātiežos stromatoporu slāņi, kas iedalīti kā fācija F5, konstatēti tikai pētījumu teritorijas galējos ziemeļaustrumos: 27% Kalamecu un Markuzu gravas atsegumā (kavernas šķīdušu stromatoporu vietās, maza līdz pat liela izmēra – ap 20 cm diametrā, ieapaļas formas), 25% Grūbes dolomīta atsegumā (ieapaļas formas, līdz 30 cm diametrā, haotiski izkārtotas) un 23% Marinovas dolomīta atradnes atsegumā (nenosakāmas formas un izmēra). Apes ridas karbonātiežos fācija F5 sastopama 25% Ventas rumbas atsegumā (maza izmēra, ieapaļas formas kavernas, izkārtotas ķēdītēs), 13% Laučiņu (Cēsu) dolomīta atradnes atsegumā (konstatētas tikai atseguma 7. slānī – līdz 15 cm diametrā, sfēriskas, ieapaļas formas), 14% Randātu klintīs (nenosakāmas formas un izmēri), 51% apjomā Apes pamestās dolomīta atradnes atsegumā (izmēros no 1 cm diametrā (1. slānis) līdz 7 cm diametrā, ieapaļas formas; 7. slānī stromatoporu atliekas izkārtotas ķēdītēs) un 100% apmērā Grūbes dolomīta atsegumā (konstatēts blīvs ieapaļu stromatoporu sakopojums, līdz 5 cm diametrā, izkārtotas haotiski).

Gandrīz visos pētījumu objektos stromatoporas sastopamas kopā ar citām organismu atliekām, tādām kā – gliemeži, brahiopodi, aļģes u.c.. Jāatzīmē Ventas rumbas, Cēsu (Laučiņu) atradnes un Īvandes ūdenskritumu atsegums, kur visā griezumā, dažādos tā intervālos, tika konstatētas tikai un vienīgi stromatoporu atliekas. Piemēram, Grūbes atsegumā, stromatoporu atliekas konstatētas kopā ar citām organismu atliekām, izņemot atseguma 7. slāni, kur pētītas tikai stromatoporu atliekas. Apes pamestās dolomīta atradnes atsegumā, gandrīz visos griezumā slāņos, sastopamas tikai stromatoporu atliekas, izņemot 3. slāni, kur konstatētas arī brahiopodu fosilijas. Arī konstatētās brahiopodu atliekas visos gadījumos ir vai nu izkārtotas ķēdītēs, vai haotiski, kas norāda uz pārskalošanu un varbūtēju viļņu darbības ietekmi.



6. attēls. Stromatoporu fosiliju forma devona Pļaviņu svītas karbonātiežos: (A) ieapaļas formas, (B) lamināras formas (modificēta pēc: Kershaw, Motus, 2016)

Arī brahiopodu un gliemežu atliekas galvenokārt bijušas pārskalotas, bieži sastopams šo organismu atlieku detrits. Lielā daļā pētījumu objektu organismu atliekas izkārtotas “ķēdītēs”. Izmēri verīē no 0,5 cm līdz aptuveni 4–5 cm. Vienā gadījumā (Marinovas atradnes atseguma 5. slānī) konstatēts arī jūras liliju kātiņu sakopojums, kura uzbūve arī liecina par šo dzīvnieku atlieku pārskalošanu. Vienā no Dārzciema dolomīta atradnes atseguma slāņiem (4. slānis) konstatētas arī *Chaetocladus* aļģu atliekas. Šīs pašas ģints aļģu atliekas atklātas arī Vizulu ieža 4. slānī.

Bioturbācijas pazīmes (pēdu fosilijas) konstatētas Dārzciema dolomīta atradnes atsegumā, gandrīz visos tā slāņos – ejas 1 līdz 2 mm platumā, tās ir pārsvarā vertikālas, neviendabīgas uzbūves, nelielas un ļoti traucētas, konkrētu piederību nav izdevies noteikt. Līdzīga rakstura (gan tāds pats eju platumš, gan uzbūve) bioturbācijas pazīmes konstatētas arī Īļaku ieža 1. slānī, Vizulu ieža divos slāņos (5. slānis un 7. slānis), Kalemecu un Markuzu gravas atseguma augšdaļā (9. slānis, 13. slānis un 14. slānis), arī Īvandes ūdenskritumu atseguma 1. slānī, 2. slānī, 2. slānī un 5. slānī. Visos iepriekš minētajos pētījuma objektu slāņos nav izdevies noteikt ihnofosiliju piederību. Bioturbācija konstatēta arī Kalkahju (Peetri) atseguma 12. slānī (šajā gadījumā tika noteiktas *Chondrites* pēdu fosilijas) un Dārzciema dolomīta atradnes vairākos slāņos – 1. slānī, 3. slānī, 4. slānī, 5. slānī, 6. slānī un 9. slānī (visos gadījumos noteiktas *Planolites* pēdu fosilijas). *Planolites* pēdas noteiktas arī Kalamecu un Markuzu gravas atseguma 1. slānī. *Chondrites* pēdas veidojušās blīvās karbonātiskās nogulās, kopumā bijusi mierīga sedimentācijas vide (zema viļņu enerģija), sekls jūras baseins un nereti arī šo vidi ietekmējušas plūdmaiņas (Meškis, 2013). Arī *Planolites* ir tārpveidīgie organismi, kas dzīvojuši un veidojuši ejas seklos ūdeņos un nereti arī plūdmaiņu darbības zonā (Meškis, 2013).

4. DISKUSIJA

Šī promocijas pētījuma rezultāti apstiprina iepriekšējo pētījumu (Gravitis, 1967; Sorokin, 1978; Stinkulis, 1998; Pontén, Plink-Björklund, 2009; un citi) datus par to, ka devona Pļaviņu laikposmā bijuši mainīgi, pārsvarā sekla jūras apstākļi, taču ūdens dziļums vairākkārt ir mainījies, bijušas pat subaerālās atsegšanās epizodes.

Pļaviņu laikposma sedimentācijas baseins, šajā gadījumā, Baltijas paleo-baseina centrālā daļa, iepriekšējos pētījumos ticis interpretēts kā sekla jūra (Gravitis, 1967; Sorokin, 1978).

Promocijas darba pētījumā iegūtie dati apliecina, ka Latvijas rietumu un ziemeļaustrumu un Igaunijas dienvidaustrumu daļai atbilstošā Pļaviņu laikposma baseina teritorija, pēc mūsdienu zinātniskajā literatūrā norādītās karbonātiežu platformu klasifikācijas, visticamāk atbilst epikontinentālai karbonātu platformai, mazāka iespējamība, ka tā ir bijusi epikontinentāla karbonātu nogāze (James, Jones, 2016).

Gan epikontinentālai karbonātu nogāzei, gan epikontinentālai karbonātu platformai ir raksturīgas divas pat simtiem kilometru platas zonas, kurās ir mierīgs hidrodinamiskais režīms: 1) pāreja starp sauszemi un baseinu, norobežotos apstākļos; 2) pāreja starp baseinu un atklātu okeānu. Šo zonu starpā ir desmitiem kilometru plaša zona, kurā ir aktīvs hidrodinamiskais režīms, ko galvenokārt nosaka plūdmaiņu un arī viļņu darbība (James, Jones, 2016).

Pētījumi, kas veikti par Bahamu salu arhipelāgu un Floridas pussalas piekrastes mūsdienu karbonātu sedimentācijas areālu iekšējām daļām, kas ir uzskatāmi par seno epikontinentālo karbonātu sedimentācijas baseinu analogiem, apliecina, ka karbonātisko nogulu uzkrāšanās vide kopumā ir bijusi mierīga un viļņu, kā arī plūdmaiņu ietekme uz karbonātisko nogulu sedimentācijas procesiem ir pavisam minimāla. Šajos areālos sedimentācijas procesus galvenokārt ietekmē tikai samērā retas vētru epizodes (Tucker, Wright, 1990).

Tomēr viedokļi par iespējamo plūdmaiņu ietekmi senajās un plašajās epikontinentālajās platformās atšķiras – Irvins savos pētījumos apliecina, ka to ietekme ir niecīga (Irwin, 1965), savukārt citi pētnieki uzskata, ka tā ir bijusi liela un pat plaši jūtama (Pratt, James, 1986). Domājams, tas atkarīgs no baseina atrašanās vietas un savienojuma ar pasaules okeānu.

Vairākos disertācijas pētījuma gaitā dokumentētajos ģeoloģiskajos griezumos karbonātiežus ar vāji saglabātām organismu atliekām, cikliski nomaina laminīti un/vai mālaini nogulumieži, kur vairākos pētījumu objektos ir atklātas plūdmaiņu pazīmes.

Plūdmaiņu ritmīti konstatēti Īļaku iezī, Visuļu iezī un, arī Kalkahju (Peetri) atsegumā, Dārzciema dolomīta atradnes atsegumā, kā arī Kalamecu un Markuzu gravu atsegumā. Pētījuma gaitā izdevies gūt liecības par plūdmaiņu ritmītiem arī Randātu klinšu atsevišķos intervālos (2. slānis, 5. slānis, 7. slānis un 8. slānis).

Arī Marinovas atradnes atseguma 2. slānī pētīti karbonātieži, kur konstatētas “putna acs” tekstūras, jeb fenestras, kas ir tipiskas vidējās plūdmaiņu zonas pazīme (Tucker, Wright, 1990).

Dažas no izplatītākajām un autora novērotajām plūdmaiņu ritmītu pazīmēm Pļaviņu svītas nogulumiežos ir:

- mikrīta un māla minerālu josliņas vai slānīši uz kārtainajiem karbonātiežiem;
- plūdmaiņu kopas (no angļu val. – *tidal bundles*), kas norāda uz periodiskām ilgtermiņa izmaiņām (sezonālas) un nedēļas ilguma izmaiņām, kas saistītas ar mēness un saules gravitācijas ietekmi;
- reaktivācijas virsmas, divvirzienu slīpslāņojums, kāpjošais ripsnojums, kas slāņojumā uzrāda dažādus straumju virzienus;
- karbonātiskā un klastiskā materiāla mija, veidojot viļņotu slāņojumu (Guangquan, Lidong, 2021) – Īļaku ieža 1. slānī;
- plūdmaiņu ritmīti mālainajās slāņkopās u.c.

Baltijas vēlā devona klastiskās sedimentācijas baseinos daudzos pētījumos ir plaši atzīmēta plūdmaiņu ietekme (Pontén, PlinkBjörklund, 2009; Lukševičs *et al.*, 2011; Vasiļkova *et al.*, 2012).

Disertācijas pētījuma gaitā izteiktākie vētru slāņi tika atklāti un aprakstīti Atzeles ridā Marinovas atradnes atseguma augšdaļā, Igaunijā. Tomēr nav izslēgts, ka krietni vājākas un mazas vētras, to izraisīta vidēja un stipra viļņošana, ietekmēja stromatoporu, brahiopodu, jūras liliju kātiņu un gliemežu pārskalošanu, fragmentāciju, organismu atlieku detrita pārskalošanos, kā arī haotiskas uzbūves slāņveida koncentrāciju veidošanos, kāda tika plaši novērota daudzos no 14 pētījumu objektiem, konkrēti Sēlijas un Atzeles ridās, it īpaši tajos objektos, kas atrodas pētījumu teritorijas centrālajā un ziemeļaustrumu daļās, kur pēc autora uzskatiem bijusi karbonātu platformas Z un Y zonas.

Visos disertācijas pētījuma objektos ir izdevies izveidot piesaisti konkrētām Pļaviņu svītas ridām, konstatēta gan Kokneses rida, gan arī Sēlijas, Atzeles un Apes rida. Vispilnākie griezumī, kas aptver visas četras ridas pētīti Dārziema dolomīta atradnes atsegumā un Randātu klintīs. Vairākos no pētījuma objektiem konstatēta tikai pati augšējā Pļaviņu svītas rida – Apes rida (Ventas rumbas atsegumā, abos Riežupes atsegumos un Apes pamestās dolomīta atradnes atsegumā)

Autora dažviet konstatētie “metru biezuma cikli” ir raksturīgi karbonātu platformām (Tucker, Wright, 1990), kā arī par to veidošanās iemesliem citos pētījumos uzskata plūdmaiņu līdzenumu progradāciju (Pratt, James, 1986), eistatiskās ūdens līmeņa svārstības un pat reģionālus tektoniskos procesus (Tucker, Garland, 2010).

Izteikts cikliskums vērojams Kalamecu un Markuzu gravas atsegumā, kā arī Dārziema dolomīta karjera atseguma griezumā. Vājāk izsekojami cikli konstatēti arī Kalkahju (Peetri) atsegumā. Katrs cikls iesākas ar dolomītiem (ar fosilijām, ooidiem, bez subaerālās atsegšanās pazīmēm), kas veidojušies atklāta tipa baseinā, savukārt beidzas ar laminītu veida kārtainiem dolomītiem un bieži

vien ar subaerālās atsegšanās pazīmēm – žūšanas plaisām u.c. tekstūrām. Ciklu biežumi variē no 0,5–0,8 m Dārziema dolomīta atradnē, savukārt Kalamecu un Markuzu gravas atsegumā to biežumi mainās no 0,5 līdz pat 1,5 m biežumam. Arī Kalkahju (Peetri) atsegumā Igaunijā, konstatēti cikli, kas ir vēl plānāki – aptuveni 0,2–0,4 metru biežumā. Ja nav mainījies ūdens līmenis, cikla biežums ir tuvs ūdens dziļumam (Immenhauser, 2009). Tas liek domāt, ka baseins bijis izteikti seklāks virzienā uz ziemeļiem, nosacīti arī ziemeļaustrumiem.

Pētījuma gaitā atklāts, ka gandrīz visos pētījumu objektos atrodamas stromatoporu atliekas vai kavernas stromatoporu atlieku šķīšanas vietās. Stromatoporas norāda uz seklu, siltu ūdeni un aktīvu hidrodinamisko režīmu (Tosolini *et al.*, 2012), bet brahiopodi un gliemeži arī ir seklūdens jūru iemītnieki. Vietām vērojami slāniski izkārtotie fosiliju un to detrita sakopojumi liecina par organismu atlieku un to drupu materiāla pārskalošanu, tādēļ, domājams, norāda uz nogāzi, kas vērsta pret padziļinājumu baseinā (Shen *et al.*, 2008; Flügel, 2004; Machel, Hunter, 1994). Šo nogāzi gan nevar interpretēt kā visas karbonātu platformas nogāzi virzienā uz atklāto jūru, jo pētītie nogulumi ir veidojušies seklas epikontinentālas jūras iekšējā daļā (Brangulis *et al.*, 1998). Iespējams, ka organismu atlieku pārskalošana ir notikusi vētru ietekmē (Gutteridge, 1989). Pārskalotas augu un dzīvnieku atliekas un to detrits gan var būt sastopams arī plūdmaiņu līdzenumos (Laya, Tucker, 2012), tomēr tas nav viennozīmīgs rādītājs sedimentācijas vides raksturošanā.

Svētā krusta kalnos Polijā (Luczynski, 1998), vairākos apkārtnes karjeros, devona stromatoporas galvenokārt ir konstatētas dzīves pozīcijā, nevis pārskalotas, kā Baltijas devona paleobaseinā, kas liecina, ka tagadējās Polijas dienvidu daļā bijuši nosacīti seklas jūras apstākļi, tomēr mierīgi un bez izteiktām strauēm, plūdmaiņu un viļņu darbības ietekmes, kas liecina par rifa aizmugures (no angļu val. – *back-reef setting*) apstākļiem. Tikai vienā atsevišķā gadījumā konstatēts, ka stromatoporas bijušas pārskalotas – t.i., vētru ietekmētas.

Stromatoporas autora pētītajos objektos gandrīz visos gadījumos ir apgāztas, apveltas vai pārvietotas un nav dzīves pozīcijā (kad to var identificēt). Gandrīz vienmēr tās izkārtotas “ķēdītēs”, krietni retāk tās ir izkārtotas haotiski (Garland, 1997 un Tucker, Wright, 1990). Vatkins savā pētījumā (Watkins, 1975) par silūra brahiopodiem un stromatoporām Visbijas salā (Baltijas jūras reģions, Zviedrija), norādījis, ka bieži vien brahiopodu atliekas un to detrits ir izvietots starp citām organismu atliekām, haotiski, bet ne starp stromatoporām. Tas apstiprina autora ideju par viļņu darbības ietekmētu sedimentāciju. Kā norāda poļu paleontologs Gžegošs Rackis (Racki, 1993), brahiopodu kopas galvenokārt mīt seklas jūras, tai skaitā, lagūnu apstākļos, savukārt stromatoporas nedaudz dziļākā baseina daļā, bet arī seklā jūrā. Šajā gadījumā Racka secinājumi izdarīti par stromatoporām dzīves pozīcijā, kas ir pretēji autora pētītajam Pļaviņu svītas karbonātiežos, kur tās nav sastopamas dzīves pozīcijā. Promocijas pētījuma gaitā konstatēts, ka bieži vien stromatoporas ir ļoti maza izmēra – vietām tikai 1 cm līdz 7 cm diametrā. Sēlijas ridas karbonātiežos Īvandes ūdenskrituma atsegumā tās ir

mazas, līdz 6 cm diametrā un izkārtotas ķēdītēs; Atzeles ridas karbonātiežos Ventas rumbas atsegumā tās ir mazas, līdz 2–3 cm diametrā, izkārtotas ķēdītēs; Apes ridas karbonātiežos Apes pamestās dolomīta atradnes atsegumā tās ir 1 līdz 7 cm diametrā, izkārtotas ķēdītēs un Grūbes dolomīta atsegumā tās ir līdz 5 cm diametrā, izkārtotas haotiski. Kā norāda Rackis, nelieli stromatoporu izmēri liecina par augstu mirstību jaunu organismu vidū, konkrēti tiek norādīta dzīve augsta stresa apstākļos, ko var izraisīt – cikliskas vides apstākļu izmaiņas (piemēram, baseina dziļuma izmaiņas un ūdens sāļuma izmaiņas) (Rackis, 1993), kā rezultātā nav bijusi iespēja tām augt lielākām un attīstīties. Pamatojoties uz šo, autors var izdarīt pieņēmumu, ka izmēros mazās stromatoporu atliekas (līdz aptuveni 7 cm diametrā), domājams mitušas lagūnas apstākļos, kur periodiski samazinājies ūdens līmenis, kā rezultātā palielinājies jūras ūdens sāļums. Šī zona atbilst Z zonai pēc Irvina klasifikācijas (Irwin, 1965) un pret krastu vērstai rifa nogāzei, kas atbilst pārejai uz Y zonu. Savukārt lielāka izmēra stromatoporas (no 8 cm līdz pat 30 cm diametrā), mitušas rifa nogāzē, kas vēsta pret atklātu baseinu (Y zona). Visos gadījumos, neatkarīgi, no iedalījuma zonās, bijušas periodiskas vētru vai stipras viļņošanās epizodes, kā rezultātā ieapaļas formas (no angļu val. – *bulbous*) stromatoporas ir apgāztas, nereti arī pārvietotas. To dažkārt apstiprina arī kārtotie karbonātiežu slāņi, kas norāda uz sekla baseina apstākļiem – gadījumos, kad konstatētas mazā izmēra stromatoporu atliekas. Tomēr šajā gadījumā nav bijusi izteikta plūdmaiņu ietekme uz sedimentāciju – bijusi bimodāla jūras-krasta virzienā vēsta viļņu darbība, ūdens straumes (Luczynski, 2008). Iespējams, ka stromatoporas autora pētītajos karbonātiežos ir izkārtotas zemākās vietās starp karbonātisko nogulu sēkļiem, kas bijuši paralēli vai subparalēli krasta līnijai.

Garlande (Garland, 1997) norāda, ka sīpolveida (ieapaļie) stromatoporāti ir raksturīgi lagūnu (t.s., aizrifa) apstākļiem, bet rifa, jeb Y zonas apstākļos parasti ir tabulāri vai kupolveida stromatoporāti (Garland, 1997). Disertācijas pētījuma objektos no augšējā devonā konstatēts, ka izmēros lielākās sīpolveida stromatoporu atliekas izkārtotas arī rifa nogāzē, kas vēsta pret atklātu jūru (arī Y zona, pēc: Irwin, 1965).

Izvērtējot visus pētījuma gaitā iegūtos rezultātus secināms, ka teritoriālā mainība pētījuma objektos ir diezgan maza, kas apstiprina to, ka Baltijas paleo-baseina centrālajā daļā Pļaviņu laikposmā bijusi epikontinentāla platforma.

Interpretējot iegūtos oglekļa un skābekļa stabilo izotopu rezultātus dolomītiem no Pļaviņu reģionālā stāva, un salīdzinot tos ar citiem pētījumiem, gan Baltijā, gan citviet (Kleesment *et al.*, 2013; Amthor *et al.*, 1993; Colombie *et al.*, 2010; Wendte, Uyeno, 2005 u.c.), secināts, ka, visticamāk, oglekļa izotopu ($\delta^{13}\text{C}$) vērtības galvenokārt pētījumu teritorijā ietekmējusi periodiska saldūdens un marīno ūdeņu sajaukšanās, domājams, nokrišņu rezultātā (atmosfēras ūdeņi). Jāatzīmē arī iespējamā saldūdens pieplūde no dienvidrietumu, dienvidu virziena, ko apstiprina stabilo izotopu rezultāti. Izvērtējot datus par skābekļa izotopu vērtībām ($\delta^{18}\text{O}$), konstatēts, ka tās bieži vien ir paaugstinātas – tas varētu norādīt

uz palielinātu atmosfēras ūdeņu ietekmi pēcsedimentācijas procesos. Kā norāda Šārps (Sharp, 2017), oglekļa izotopu avots galvenokārt ir tikai paši karbonātieži, organiskās vielas un CO₂, savukārt skābekļa izotopu avots ir gan karbonāta jons, gan ūdens (H₂O). Līdz ar to, pietiek ar daudz mazāku ūdens un ieža savstarpējo attiecību, lai mainītos skābekļa izotopu vērtības, salīdzinot ar oglekļa izotopu vērtībām. Lai varētu spriest par šo faktoru ietekmi plašākos mērogos, nepieciešams veikt turpmākus pētījumus, izmantojot apjomīgāku datu kopu.

Arī rentgenfluorescences spektrometrijas analīzes (XRF) rezultāti liek secināt, ka Pļaviņu svītas dolomītos samazinātās Sr vērtības varētu norādīt uz to, ka pētītie dolomīti ir attīrījušies no mazāk izplatītiem ķīmiskajiem elementiem pēcsedimentācijas procesu gaitā (Li *et al.*, 2015), tomēr jebkurā gadījumā, Sr klātbūtne norāda uz marīniem apstākļiem. Visi pētījuma objekti, kas atrodas tālākajā pētījumu areāla ziemeļaustrumu daļā (Dārzciema dolomīta karjers (Sēlijas un Azeles ridas), Apes pamestā dolomīta atradne (Apes rida), Kalamecu un Markuzu grava (Kokneses, Sēlijas un Atzeles ridas), Kalkahju (Peetri) atsegums (Kokneses un Sēlijas ridas) u.c.), izceļas ar izteikti lielu laminītu daudzumu (fācijas F1, F2 un F3), kas liek domāt, ka šajā virzienā, tas ir, uz tagadējās Latvijas teritorijas ziemeļaustrumiem, bijusi epikontinentālās platformas Z zona (atbilstoši James, Jones, 2016 un Irwin, 1965), kas ir lagūnas un plūdmaiņu līdzenuma apstākļu analogs šelfa jūru karbonātu platformās. Jāsecina, ka vislielākais laminītu daudzums konstatēts pētījumu teritorijas ziemeļaustrumu daļas atsegumu Sēlijas un Atzeles ridu karbonātiežos.

Arī Vija Hodireva savā promocijas darbā (Hodireva, 1997) norāda, ka Apes un Dārzciema atradnēs ir liels kārtaino (sīkslāņoto) dolomītu daudzums, pie tam šo iežu slāņi griezumā cikliski atkārtojas. Šie dolomīti atbilst autora pētītajiem laminītiem. Kopumā epikontinentālas platformas Z zona apliecina izvirzīto hipotēzi par plūdmaiņu līdzenuma tipa sedimentāciju.

No vēlā karbona līdz agrajam permam mūsdienu Ķīnas ziemeļos veidojās plaša epikontinentāla jūra (Ordos baseins) ar platību aptuveni 280 000 km², kur uzkrājās karbonātiskās nogulas, mijoties ar klastisko materiālu. Tur ir atklātas plūdmaiņu pazīmes (Guangquan, Lidong, 2021). liels. Īpaši izceļama tieši karbonātiskās pamatmasas un klastiskā materiāla savstarpēja mija ar viļņotu slāņojumu, kāda promocijas darba pētījumā tika konstatēta Pļaviņu svītas Sēlijas ridā – Īļaku ieža 1. slānī.

Citviet pasaulē, piemēram, Ķīnas dienvidos, Maojingas provincē, devona Franas stāva slāņkopas apakšdaļa sastāv pāsvarā tikai no rifu veidojošajiem organismiem – tie ir tīri organogēni karbonātieži. Tikai virzienā uz augšu pieaug tīru karbonātiežu, ar retām organismu un augu atliekām, īpatsvars (Shen *et al.*, 2017).

Arī Āfrikas kontinentā, Libijā, Sirtes (*SIRT*) baseinā, paleogēnā veidojušās visai plašas seklas jūras karbonātu platformas, vietām sasniedzot pat 300 km² platību. Sirtes karbonātu baseina izmēri kopumā sasniedz gandrīz 230 000 km². Izgulsnējušās biezas karbonātiežu slāņkopas, jo sedimentācijas gaitā notikuši arī

transgresijas procesi. Jāpiebilst, ka šī baseina izplešanās (gan vertikāli, gan laterāli) notikusi tektonisku procesu iespaidā, laika posmā no krīta līdz pat eocēna epochai. Šeit galvenokārt sastopami kaļķakmeņi un karbonātiskas izcelsmes slānekļi. Šajā pētījumā, papildus mūsdienu standarta karbonātiežu pētījumu metodēm, pielietota arī seismiskā izpēte, ar mērķi nodalīt seismiskās fācijas (Abdalla *et al.*, 2023). Laikā, kad notikusi karbonātisko nogulu sedimentācija šajā baseinā (paleocēns līdz vidējais eocēns), bijuši saunas (no angļu val. – *hot-house*) tipa klimatiskie apstākļi, līdzīgi, kā devona Pļaviņu laikposmā. Tomēr svarīgi minēt, ka Sirtes baseinā, sedimentācijas gaitā notikusi gan transgresija, gan arī pakāpeniska karbonātu platformas grimšana tektonisku procesu ietekmē (Abdalla *et al.*, 2023). Līdz ar to jāsecina, ka šie sedimentācijas apstākļi nav analogi devona Pļaviņu laikposmam.

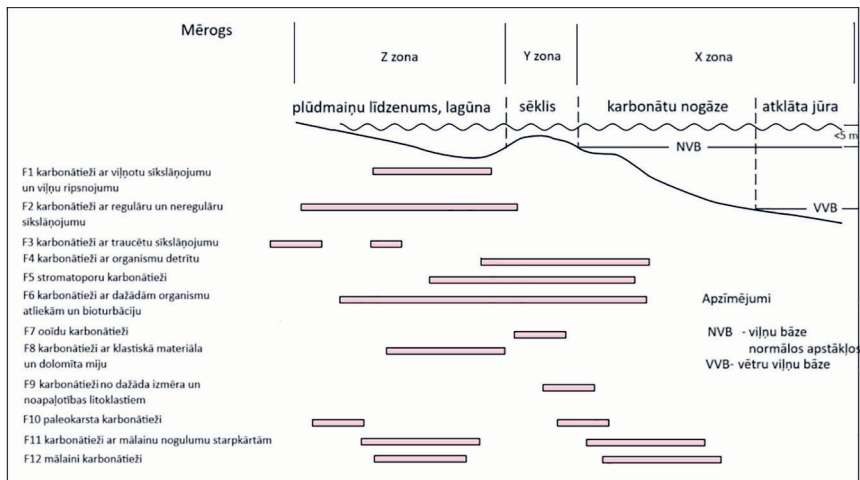
Arī vidējā krīta periodā, Irānas dienvidu daļā, pētīta (Xu *et al.*, 2023) plaša karbonātu platforma. Šī, Kenomenas (no angļu val. – *Cenomanian*) karbonātu platforma atrodas Zagrosas kalnu masīvā un ir veidota no rifu organismiem – hermatipiskajiem koraļļiem, līdzīgi, kā mūsdienu karbonātu platformas Bahamās, Lielajā Barjerrifā u.c. Vidējā krīta laikposmā, Kenomenas karbonātu platforma, veidojusies karbonātiskajām nogulām uzkrājoties, galvenokārt, seklā jūrā un lagūnas tipa sēkļos (Xu *et al.*, 2023), kas ir līdzīgi apstākļi Pļaviņu laikposmam Baltijas devona paleobaseina centrālajai daļai. Tomēr konstēta būtiska atšķirība, kas neļauj to salīdzināt ar Pļaviņu laikposma baseinu – Pļaviņu laikposma epikontinentālā baseina karbonātiežos disertācijas autors nav novērojis izteiktas pazīmes tik plašiem rifu veidojumiem, konkrēti, barjerrifiem. Konstatēti tikai reti organogēni slāņi, kurus iespējams klasificēt, kā rifu veidojumus – Marinovas atradnes atsegumā (Atzeles ridas augšdaļā), kā arī Apes pamestās atradnes atseguma augšdaļā, tā 6. slānī (Apes ridā).

Kā viens nozīmīgs un tuvs analogs Baltijas devona paleobaseinam epikontinentālajai platformai ir jāmin Euklas (no angļu val. – *Eucla basin*) epikontinentālā platforma Austrālijas dienvidu daļā (O'Connell, *et al.* 2012), kur izplatīti samērā līdzīgi karbonātieži un to fācijas (gan laminītiski, gan arī bagāti ar organismu atliekām u.c.), kādi pētīti Pļaviņu svītā. Svarīgi pieminēt, ka Euklas baseina epikontinentālā platforma (platība 120 000 km²) pēc izmēriem ir līdzīga mūsdienu Lielajam barjerrifam un ievērojami lielāka nekā mūsdienu Bahamu baseins (78 000 km²). Euklas karbonātu platformas nogulumiežos sastopami galvenokārt subtropiskos apstākļos veidojušies kaļķakmeņi, kas ir maz pārveidoti vai nav vispār pārveidoti dolomitizācijas procesos, kas atvieglo sedimentācijas procesu interpretāciju, kas ir pretēji autora pētītajiem Pļaviņu laikposma karbonātiežiem.

Šī disertācijas pētījuma rezultāti nav tieši attiecināmi uz citiem karbonātu sedimentācijas baseiniem pasaulē, jo, lai gan devona periodā vairākus kontinentus klāja epikontinentālas jūras, tomēr ir zināmi arī visai atšķirīgi piemēri. Tā, piemēram, Apalaču baseinā (no angļu val. – *Appalachian Basin*), devona perioda Franas laikmetā bijuši galvenokārt dziļūdens apstākļi ar reti izņēmumiem

baseina austrumu daļā, kur bijusi seklāka jūra un vērojama arī neliela izmēra masu izmiršanas epizode (Bush *et al.*, 2015).

Pētījuma gaitā, apskatot citu karbonātiežu sedimentoloģisko pētījumu datus, kā arī izvērtējot iegūtos rezultātus, autoram izdevies izveidot Pļaviņu laikposma (Baltijas paleobaseina centrālā daļa) karbonātiežu sedimentācijas modeli ar nodalīto fāciju izvietojumu plaknē (7. attēls), kā arī sadalījumu pēc aptuveniem karbonātisko nogulu sedimentācijas dziļumiem seklas epikontinentālas jūras baseinā.



7. attēls. Karbonātiežu sedimentācijas divdimensionāls modelis ar nodalīto fāciju novietojumu Pļaviņu laikposma epikontinentālajam baseinam (Danefelds, Meškis, 2024: izdevniecībā)

Promocijas darba gaitā veiktajos pētījumos ir noskaidrots, ka visvairāk kārtaino dolomītu un laminītu, kā arī lokālas plūdmaiņu pazīmes un vīļņu darbības pazīmes, ir sastopamas pētījuma teritorijas ziemeļu un ziemeļaustrumu daļā Sēlijas un Atzeles rīdā, savukārt dolomītu ar organismu atliekām un viendabīgo dolomītu ir salīdzinoši vairāk pētījumu teritorijas rietumu daļā.

Kokneses ridas karbonātieži pētījumu teritorijā konstatēti tikai ziemeļaustrumos, Dārziema dolomīta atradnes atseguma apakšdaļā, Randātu klinšu apakšdaļā, Kalamecu un Markuzu gravas atseguma apakšdaļā un Kalkahju (Peetri) atseguma apakšdaļā. Galvenokārt konstatēti mālaini karbonātieži, nereti arī ar halīta pseidomorfozēm, kas norāda uz arīda klimata apstākļiem. Kokneses ridas karbonātieži klasificējami, kā Z zonas tipa (pēc Irwin, 1965).

Sēlijas laikposmā iesākusies baseina transgresija, līdz ar to, pakāpeniski palielinās karbonātiežu slāņkopu biezumi (gan ciklu, gan atsevišķu slāņu), kā arī organismu daudzveidība baseinā. Jāmin, ka kārtaini dolomīti un

laminīti (bez organismu atliekām, vai to minimālu daudzumu un daudzveidību) biežāk sastopami pētījumu teritorijas ziemeļaustrumu daļā, savukārt biežāki slāņi, rietumu virzienā, kur arī pieaug organismu daudzveidība un daudzums. Sēlijas laikposma karbonātiežos vietām (piemēram, Kalamecu un Markuzu gravas atsegumā, Sēlijas ridā, un citviet) manāms cikliskums, kas iezīmē pakāpenisku, periodisku plūdmaiņu procesu ietekmi uz sedimentāciju. Sēlijas laikposma karbonātiežos nodalīta Z zona (ziemeļaustrumu virziens) un X zona (rietumu virziens). Cikliskums un plūdmaiņu ietekme (t.sk. plūdmaiņu ritmīti) uz karbonātu sedimentāciju, novērota tieši pētījumu teritorijas ziemeļaustrumu daļā). Par to, ka savienojums ar atklāto okeānu atradies ziemeļaustrumos un norobežots baseins rietumu virzienā liecina laminīti (Irwin, 1965).

Konstatēts, ka karbonātieži ar organismu atlieku detritu ir biežāk izplatīti virzienā uz dienvidrietumiem un pētījumu teritorijas centrālajā daļā – Vizūļu iezī (Sēlijas ridā), cikliski arī Randātu klintīs (Atzeles ridā). Šīs teritorijas atbilst lokālai Y zonai (Irwin, 1965). Pārskalotais materiāls liecina par rifa nogāzi, kas vērsta pret atklātu jūru, kas atradies rietumu virzienā. Savukārt izteikti vētru slāņi, tādi kā konglomerāti vai brekčijas, konstatēti pētījumu teritorijas ziemeļaustrumu daļā, kā arī vienā gadījumā, rietumu daļā, tas ir, Marinovas atradnes atseguma augšdaļā (atbilst Atzeles laikposma noslēgumam) un Īļaku ieža vidusdaļā (atbilst Sēlijas laikposma vidum). Kopsakarības starp Vizūļu iezī konstatēto organismu detritu un Īļaku iezī sastopamo vētru slāni (brekčiju), norāda uz to, ka Sēlijas laikposmā šajā apvidū bijusi Y zona (Irwin, 1965), kas vērsta pret atklātu jūru. Tas gan neliecina par rifu, jo nav konstatētas rifa raksturojošas pazīmes – izteikti organogēni karbonātieži. Visticamāk, šo lokālo pacēlumu var klasificēt kā karbonātisku nogulu sēkli, tā nogāzi, kas vērsta pret atklātu jūru. Interpretējot Marinovas atradnes augšdaļā pētīto konglomerātu, var secināt, ka Atzeles laikposma noslēgumā, šajā apvidū bijis lokāls, neliels rifs, kas klāts ar karbonātiskām nogulām (organogēnie karbonātieži ir bagāti ar stromatoporu, gliemežu, barhiopodu, koraļļu, jūras liliju u.c. organismu atliekām). To pierāda tas, ka konglomerāts ir veidots no noapaļotiem kaļķakmens atlūzu fragmentiem. Ir novērojams arī gradācijas slāņojums, kur litoklastu izmēri pieaug virzienā uz leju (jāatzīmē arī tas, ka litoklasti uzguļ uz iepriekšējā slāņa virsmas). Marinovas atradnes atseguma augšdaļā pētītie konglomerāti norāda uz izteiktu Y zonas tipa sedimentāciju – bijusi rifa nogāze ar augstu hidrodinamisko režīmu.

Vietām Atzeles ridas apakšdaļā (pētījumu teritorijas ziemeļaustrumos) sastopami biežāki, masīva dolomīta slāņi, kuros ir mazāk organismu atlieku, kas sakrīt ar senāku pētījumu secinājumiem par to, ka Atzeles laikposma sākumā bijusi vēlā devona maksimālā transgresijas epizode (Sorokin, 1978; Sorokin, 1981), kas acīmredzami izpaudusies ar lokālu raksturu. Kā izņēmums, autora ieskatā, jāmin Marinovas apkārtnē, kur bijis jau iepriekš darbā minētais lokāla tipa rifs.

Domājams, ka Īļaku ieža un Vizūļu ieža apkārtņē Sēlijas laikposmā epizodiski ir attīstījušies ooīdu sēkli (Li *et al.*, 2019), par ko liecina vietām atrodami

bagātīgi ooiĀdu sakopojumi. Œajā pat laikposmā (Sēlijas rida), Kalamecu un Markuzu gravas atsegumā konstatētas brekčijas, kas liek domāt par iespējamu paleokarsta izplatību Œajā apvidū – Œie procesi norisinās vietās, kas ir pakļautas straujākām ūdens līmeņa izmaiņām baseinā – ūdens līmenis krities (domājams, arī bijuši ooiĀdu sēkļi vai plūdmaiņu lidzenumi). Atzeles laikposma karbonātiežos arī nodalīta Z zona un X zona, Œo zonu iedalījums daļēji sakrīt ar Sēlijas laikposma karbonātiežu zonējumu, atbilstoši Irvina klasifikācijai (Irwin, 1965).

Apes laikposmā sedimentācijas apstākļi bijuši mierīgi (nav konstatēts nedz organismu atlieku detrits, nedz vētru slāņi u.c. aktīvu hidrodinamisko vidi raksturojošas tekstūras), bet laika gaitā baseinā ir mainījies ūdens dziļums, uz ko norāda kārtaino karbonātiežu izplatība dažviet, gan pētījumu teritorijas galējos ziemeļaustrumos (Apes pamestās dolomīta atradnes atsegums), gan arī rietumos (Riežupes klinšu mazajā atsegumā).

Kā norādīts vēl salīdzinoši nesenos literatūras datos par devona nogulumiežiem Latvijā (Lukševičs, Stinkulis, 2018b; Pontén, Plink-Björklund, 2007), tobrīd vēl nebija skaidras ūdens apmaiņas īpatnības starp Baltijas devona epikontinentālo baseinu un pārējo pasaules okeānu.

Promocijas darbā secināts, ka kārtainie dolomīti un tiem līdzīgie nogulumi (FA1) atbilst Z zonai (pēc Irwin 1965), kas ir vērsta iekšzemes virzienā no aktīva hidrodinamiskā režīma zonas (Y zonas, pēc Irwin 1965). Organismiem bagātīgo (galvenokārt, FA2) karbonātiežu izplatība kopumā pieaug virzienā uz rietumiem un dienvidrietumiem, kas klasificējuma, kā karbonātu platformas X zona. Līdz ar to, pretēji, kā to savos pētījumos pagājušajā gadsimtā minējis Sorokins un Brangulis (Sorokin, 1978 un 1981; Brangulis, 1998), ir secināms, ka baseina savienojuma aktlātā daļa ar pasaules okeānu Pļaviņu laikposma Sēlijas un Atzeles periodos ir atradies pētījumu teritorijas dienvidrietumu virzienā. Jau 2012. gadā Prof. Dr. Ervīns Lukševičs ar kolēģiem (Lukševičs *et al.*, 2012) norādījis uz iezīmēm, kas liecina par savienojuma ar pasaules okeānu atrašanos dienvidrietumu un dienvidu virzienā (tagadējā Polijas teritorija). Promocijas darba pētījuma autora iegūtie rezultāti un izdarītā datu interpretācija to apstiprina.

5. SECINĀJUMI

Apkopojot promocijas darba pētījumā iegūtos rezultātus par sedimentācijas apstākļiem un to īpatnībām Pļaviņu laikposmā Baltijas paleobaseina centrālajā daļā, pētījuma laikā iegūtie dati un rezultāti ļauj izdarīt sekojošus secinājumus:

- Organismu asociācijas, ihnofosilijas, kā arī oglekļa un skābekļa stabilo izotopu dati norāda, ka Pļaviņu svītas karbonāti Latvijā un Igaunijas dienvidaustrumu daļā ir veidojušies marīnos apstākļos.
- Pētītie Kokneses ridas un Sēlijas ridas apakšdaļas nogulumieži ir veidojušies vidējā un augšējā plūdmaiņu zonā. Šajā laikā baseinā pieplūda liels mālainā materiāla daudzums un vismaz Kokneses laikposma iesākumā bijis arīds klimats, par ko liecina halīta pseidomorfozes.
- Sēlijas ridas augšējās un vidējās daļās, un Atzeles ridas nogulumu veidošanās laikā sedimentācijas apstākļi bijuši mainīgi, taču dominēja apakšējās plūdmaiņu zonas apstākļi. Tas norāda, ka Sēlijas laikposmā sākās un Atzeles laikposma sākumā turpinājās neliela ūdens līmeņa celšanās baseinā, ko uzrāda ciklu biezuma palielināšanās Kalamecu un Markuzu gravas atseguma ģeoloģiskajā griezumā, kā arī Dārziema dolomīta atradnes griezumā.
- Apes ridas nogulumiežu veidošanās laikā sedimentācijas apstākļi bijuši mierīgi, bijuši galvenokārt atklātas jūras apstākļi, domājams, ka attīstījusies periodiska rakstura baseina transgresija, kas iesākās jau Sēlijas laikposmā un turpinājās Atzeles laikposmā, bet tā bijusi mazāka apmēra, jo maksimālā transgresijas epizode norisinājās tieši Atzeles laikposma sākumā.
- Sedimentācijas procesus Pļaviņu laikposmā pētījumu teritorijā periodiski ietekmēja vētru darbība, tomēr bijuši galvenokārt mierīgi līdz samērā aktīvi sedimentācijas apstākļi. Izteiktākais vētru slānis konstatēts Marinovas atradnes atseguma augšdaļā, kur veidojies konglomerātisks vētru slānis (tempestīts) – šī lokālā teritorija atbilst Y zonai atbilstoši Irvina (Irwin, 1965) klasifikācijai.
- Sedimentācijas procesus Pļaviņu laikposmā ietekmējušas arī īsas subaerālās atsegšanās epizodes, kad veidojušās žūšanas plaisas u.c. tekstūras, kas to apstiprina.
- Pētījumu teritorijas ziemeļaustrumu daļā novērotais nogulumu cikliskums Pļaviņu laikposmā liecina par ūdens dziļumu līdz apuveni 1,6 m. Cikli visticamāk ir veidojušies karbonātu platformas daļu progradācijas rezultātā, jo pārējā baseina daļā nav pazīmju par cikliskuma saistību ar ūdens līmeņa svārstībām.
- Pētītajos karbonātiēžos konstatētās ieapaļās stromatoporu fosilijas, to izmērs, novietojums, norāda uz sedimentāciju lagūnas, jeb aizrifa apstākļos (mazākā izmēra stromatoporu atliekas), vai rifa nogāzes, kas

vērsta pret atklātu jūru apstākļos; abos gadījumos tās ir apgāztas vai apveltas un izvietotas ķēdītēs, citviet arī haotiski, kas liecina par viļņu (nereti, arī vētru epizožu) darbības ietekmi uz sedimentāciju.

- Dolomitizācijas procesi un dolomīta pārkristalizēšanās ir būtiski ietekmējuši pētīto karbonātiežu sākotnējās tekstūras, struktūras, ķīmisko un minerālo sastāvu, ko apstiprina ne tikai lauka pētījumu gaitā novērotais, bet arī XRD, XRF un oglekļa un skābekļa stabilo izotopu analīžu rezultāti.
- Sedimentācijas procesa gaitā Pļaviņu laikposma baseinā ir bijuši oksiski seklas jūras gultnes apstākļi un vidēja organiskā aktivitāte (oligotrofi apstākļi). Pētītā Randātu klinšu vidusdaļas un augšdaļas dolomīta slāņos, kā arī Riežupes lielā atseguma visa ģeoloģiskā griezuma dolomīta slāņos sākotnēji, bijis augstāks organisko vielu saturs, bet tas samazinājies oksidācijas rezultātā.
- Sēlijas un Atzeles laikposmā virzienā uz ziemeļaustrumiem ir atradusies norobežota baseina daļa, bet tas neizslēdz to, ka norobežota daļa baseinam varēja būt arī dienvidrietumu virzienā. Tomēr virzienā uz dienvidiem un dienvidrietumiem izteikti pieaug atklāta baseina pazīmju daudzums (dolomīti ar organismu atliekām u.c.).
- Nogulumiežu sastāvs, tekstūras un tajos sastopamie organismu kompleksi kopumā maz mainās to izplatības laukumā, kas liecina par to, ka Baltijas paleobaseina centrālajā daļā Pļaviņu laikposmā bijusi epikontinentāla platforma.
- Sēlijas, Atzeles un Apes ridas nogulumu veidošanās apstākļus ir būtiski ietekmējuši plūdmaiņu procesi.

PATEICĪBAS

Pētījums ir veikts ar Eiropas Sociālā fonda projekta “LU doktorantūras kapacitātes stiprināšana jaunā doktorantūras modeļa ietvarā”, Nr.8.2.2.0/20/I/006, LU reģistrācijas numurs Nr.ESS2021/434. finansiālu atbalstu.

Izsaku vislielāko pateicību disertācijas zinātniskajam vadītājam asoc. prof. Dr. geol. Ģirtam Stinkulim par padomiem, veselīgu kritiku un nesavtīgu palīdzību visa pētījuma tapšanas gaitā. Paldies arī prof. Dr. geol. Ervīnam Lukševicam par padomiem organismu atlieku noteikšanā pētījuma sākuma fāzē. Paldies Dr. geol. Sandijam Mešķim par sadarbību vairāku ziņojumu sagatavošanā un palīdzību pēdu fosiliju noteikšanā interesējošajos pētījumu objektos. Izsaku pateicību arī Vīnes Universitātes Ģeodinamikas un sedimentoloģijas centra (Austrija) vadītājam Prof. Dr. geol. Mihaelam Vāgraiham (*Michael Wagreich*) un Ao. Prof. Dr. geol. Suzannai Ģirai (*Susanne Gier*) par uzņemšanu, padomiem un iespēju izmantot laboratoriju XRD, XRF, *Biomarker* un TOC analīzēm.

Paldies arī Dr. geol. Tonu Martmā (*Tõnu Martma*) no Tallinas Tehnoloģiju universitātes (Igaunija) par palīdzību skābekļa un oglekļa stabilo izotopu analīzēs.

Vislielākais paldies pienākas arī ģimenei, tai skaitā sievai Lindai Danefeldei, par pacietību, sapratni un atbalstu.



**UNIVERSITY
OF LATVIA**

FACULTY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

Edgars Danefelds

**CARBONATE SEDIMENTARY ENVIRONMENTS
OF THE LATE DEVONIAN PĻAVIŅAS TIME IN
THE CENTRAL PART OF BALTIC PALAEOBASIN**

SUMMARY OF THE DOCTORAL THESIS

Submitted for the degree of Doctor (PhD) of Natural Sciences

Field of Earth Sciences, Physical Geography
and Environmental Sciences

Subfield of Bedrock Geology

Riga 2024

The doctoral thesis was carried out at the Chair of Bedrock Geology, Faculty of Science and Technology, University of Latvia, from 2015 to 2024.

NATIONAL
DEVELOPMENT
PLAN 2020



EUROPEAN UNION
European Social
Fund



UNIVERSITY
OF LATVIA

INVESTING IN YOUR FUTURE

This doctoral thesis was funded by the University of Latvia grant No. 8.2.2.0/20/I/006, “Strengthening of the capacity of doctoral studies at the University of Latvia within the framework of the new doctoral model” reg.no. ESS2021/434.

This thesis contains an introduction, six chapters, conclusions, a reference list, and two appendices.

Form of the thesis: dissertation in Earth sciences, physical geography and environmental science, subfield of Bedrock geology.

Supervisor: Dr. geol. Ao. Prof. **Ģirts Stinkulis**.

Reviewers:

- 1) **Māris Krievāns**, Dr. geol., Asoc. Prof., University of Latvia;
- 2) **Maciej Bojanowski**, Dr. geol., Ao. Prof., Institute of Geological Sciences, Polish Academy of Sciences;
- 3) **Leho Ainsaar**, Dr. geol., Prof., University of Tartu.

The thesis will be defended at the public session of the Doctoral Committee of Earth Sciences, Physical Geography and Environmental Sciences (Quaternary Geology and Geomorphology, Applied Geology and Bedrock Geology), University of Latvia, at 10 AM on September 20th, 2024, Jelgavas Street 1, Riga, Auditorium 702.

This thesis is available at the Library of the University of Latvia, Kalpaka blvd. 4.

Chairman of the Doctoral Committee _____ / Normunds Stivriņš /
(place of signature)

Secretary of the Doctoral Committee _____ / Māris Krievāns /
(place of signature)

© Edgars Danefelds, 2024
© University of Latvia, 2024

ISBN 978-9934-36-256-9
ISBN 978-9934-36-257-6 (PDF)

TABLE OF CONTENTS

APPROBATION OF RESULTS	46
ABBREVIATIONS	48
1. INTRODUCTION	49
1.1. An insight into the history of Devonian carbonate rock research in Latvia	50
1.2. Results of sedimentological studies of carbonate rocks of the Pļavinas Formation in Latvia	52
2. MATERIALS AND METHODS	55
2.1. Sample preparation for XRD, XRF, Biomarker, TOC analysis and carbon and oxygen stable isotope analysis	56
2.2. X-ray diffractometric (XRD) analysis	57
2.3. X-ray fluorescence (XRF) analysis	57
2.4. TOC analysis	58
2.5. Biomarker lipid analysis	58
2.6. Carbon and oxygen stable isotope analysis	58
3. RESULTS	60
3.1. X-ray diffractometric (XRD) analysis results and interpretation	66
3.2. X-ray fluorescence spectroscopy (XRF) analysis results and interpretation	67
3.3. Results of stable isotope analyses of oxygen and carbon and their interpretation	68
3.4. TOC analysis results and interpretation	70
3.5. Fossils and ichnofossils in carbonate rocks studied	70
4. DISCUSSION	73
5. CONCLUSIONS	82
ACKNOWLEDGEMENTS	84
LIST OF REFERENCES	85

APPROBATION OF RESULTS

The findings and conclusions of this study were presented at six international and three local conferences. The results of this study have been published in two ISBN publications: a peer-reviewed post-conference report and a peer-reviewed collective monograph. One (1) publication was accepted for publication in the *Estonian Journal of Earth Sciences* and indexed in the *Web of Science* and *SCOPUS* databases.

Scientific articles, collective monographs and publications

Klievēns, E., Stinkulis, Ģ. 2016. Devona Pļaviņu svītas karbonātiēži un to veidošanās apstākļi Ziemeļlatvijā un Igaunijas dienvidos. *Lietišķi ģeoloģiskie pētījumi, jaunas tehnoloģijas, materiāli un produkti*. Galvenais red. Valdis Segliņš. Latvijas Universitāte, Rīga. ISBN 978-9934-556-07-4. 25–36. DOI: 10.22364/lgpjtmp

Danefelds, E., Mešķis, S. 2024. Carbonate sedimentary environments in the epicontinental Baltic Devonian basin: Pļaviņas Formation, Lower Frasnian. *Estonian Journal of Earth Sciences*. Vol. 73. Issue 2 (accepted for publication on 1st of April, 2024).

Abstracts of scientific conferences

Klievēns, E., Mešķis, S. 2016. *Carbonate rocks of the Devonian Pļaviņas Formation, their sedimentary environments and ichnofossil complexes in North Latvia and South Estonia*. 9th Geosymposium of Young Researchers “Silesia 2016.”

Klievēns, E., Stinkulis, Ģ. 2016. Devona Pļaviņu svītas dolomītu slāņkopas uzbūve un veidošanās apstākļi Igaunijas dienvidaustrumu un Latvijas ziemeļaustrumu daļā. LU 74. zinātniskā konference.

Klievēns, E. 2017. *Sedimentary environments of carbonate deposits of the Upper Devonian Pļaviņas Formation in the Riežupe cliffs and Īvande falls exposures*. 10th Baltic Stratigraphic Conference.

Klievēns, E., Stinkulis, Ģ. 2017. *Sedimentācijas vides un paleoklimata ietekme uz Pļaviņu svītas nogulumu sastāvu un uzbūvi Latvijā*. LU 75. zinātniskā konference.

Klievēns, E., Mešķis, S. 2018. *Devonian Pļaviņu formation carbonate rock sedimentary environment and fossil complex differences in territory of central part of Baltic Palaeobasin: Riežupe outcrop and Randāti cliff example*. 5th International Paleontological Congress.

Klievēns, E., Mešķis, S. 2018. *Influence of dolomitisation in the Pļaviņas regional stage on trace fossils assemblages*. 5th International Paleontological Congress.

Klievēns, E. 2018. *Devona Pļaviņu svītas nogulumiežu veidošanās apstākļu atšķirības paleobeseina teritorijā: Riežupes atsegumu un Randātu klinšu piemērs*. LU 76. zinātniskā konference.

Klievēns, E., Stinkulis, Ģ., Mešķis, S. 2019. *Carbonate sedimentary environments in the epicontinental Baltic Devonian basin: Pļaviņas Formation, Lower Frasnian*. 34th International Meeting of Sedimentology 2019. Roma, Italia.

Danefelds, E., Stinkulis, Ģ., Mešķis, S., Wagreich, M. 2023. *Carbonate sedimentary environments in the epicontinental Baltic Devonian basin: Pļaviņas Formation, Lower Frasnian – new results*. 17th Bathurst Meeting, 2023. International Meeting of Carbonate Sedimentologists.

ABBREVIATIONS

RS – Regional stage

MDF – Main Devonian Field

XRD – X-ray diffractometric analysis

TOC – Total Carbon Content analysis

XRF – X-ray fluorescence analysis

F – facies

FA – facies associations

1. INTRODUCTION

Sedimentary rocks of the Upper Devonian Pļaviņas Regional Stage are widespread in Latvia and are available for study in dozens of natural exposures and quarry walls across the state. They have been described in extensive sedimentological, paleontological, and mineralogical studies (Gravītis, 1967; Liepiņš, 1963; Sorokin, 1978; Stinkulis, 1998, etc.). In parallel with the Daugavas Regional Stage, the Pļaviņas Regional Stage is typical in that it traces the zones (at that time, namely facies) distinguished by K. Greving (1861): the Velikaja zone in the east with dominant limestones, the Daugava zone in central Latvia with dolomite dominance, and the Kurzeme zone in the west with clayey dolomites, dolomitic marls, and clays (Stinkule, Stinkulis, 2017). These patterns of sediment distribution, as well as the decrease in the number and diversity of remains from east to west, indicate that the sedimentary basin was connected to an open basin to the east (Brangulis *et al.*, 1998). The Pļaviņas Regional Stage also corresponds to the first period of carbonate sedimentation in the Baltic Devonian basin since the continued dominance of siliciclastic sediments in the early Devonian to early Late Devonian (Lukševičs, Stinkulis, 2018). Detailed sedimentological studies of the Pļaviņas Regional Stage sediments are essential for the overall understanding of the patterns of carbonate sedimentary environments in the Baltic Devonian basin. The relevance of the research to be carried out in this thesis is also determined by the fact that previous sedimentological studies of the Frasnian Stage carbonate rocks (Gravītis, 1967; Liepiņš, 1963; Sorokin, 1978, 1981, etc.) were carried out almost 40 to 60 years ago. They were detailed and extensive, but based on the principles of cyclo-stratigraphy, without the use of facies analysis currently available. In the study of sediments formed in these shallow-water continental basins (Lukševičs *et al.*, 2012), it would also be important to use the facies zonation for such basins (James and Jones, 2016), which is different from the traditional zonation used for carbonate slopes and carbonate platforms. To create a computer model of the sediments from the Pļaviņas Formation that is comparable to examples of sediments from epicontinental basins found in the literature, future research must separate the carbonate facies and facies associations (Warnecke, Aigner, 2019).

Interpreting the formation conditions of carbonate sediments is difficult without the use of stable isotope geochemistry and other analytical methods that have been applied to the Latvian Devonian carbonate rocks to a very limited extent.

The results of the study are useful for carbonate sedimentologists elsewhere in the world in the documentation of carbonate rocks of the Pļaviņas Formation over a relatively wide area, which may help in the facies analysis of other shallow water epicontinental carbonate basins.

The rocks of the Pļaviņas Regional Stage are almost completely dolomitized. The determination of their original sedimentary conditions is a topical issue

and, at the same time, a certain challenge, as dolomitization within the ancient Baltic palaeobasin increases towards the southwest (Lukševičs *et al.*, 2012). In the Baltic area, all Frasnian carbonate rocks are dolomitic, preserving only a small part of the original rock structures, including organogenic ones, which allows the interpretation of sedimentary conditions.

The aim of the doctoral thesis is to clarify the conditions of carbonate sedimentary environments in the Frasnian in the Devonian Baltic Palaeobasin, during the period of sedimentation of the Pļaviņas Regional Stage based on a detailed facies analysis and a complex of laboratory research methods.

To achieve the aim of the thesis, the following tasks were set:

- 1) analyze previous studies on sedimentation conditions in the Devonian Frasnian and Baltic Devonian palaeobasin;
- 2) analyze the current literature on carbonate sedimentology and carbonate deposition in shallow continental seas;
- 3) analyze carbonate rock structures and paleontologically characterize them;
- 4) document and analyze geological sections in quarries and exposures in the Baltic States, particularly in Latvia and southeastern Estonia.
- 5) correlate the geological sections studied and distinguish between the Members of Pļaviņas Formation;
- 6) analyze selected carbonate rock samples by XRD, XRF, TOC, *Biomarker*, carbon, and oxygen stable isotope methods.
- 7) distinguish facies and their associations and interpret their sedimentary environments both in time and in the study area.
- 8) assess the factors influencing sedimentary environments and their changes;
- 9) distinguish modern and ancient analogues of the Baltic Frasnian carbonate sedimentary basin.

1.1. An insight into the history of Devonian carbonate rock research in Latvia

As early as 150 years ago, a general picture of facies changes in the Upper Devonian carbonate rocks in Latvia and its neighboring regions had already been established. The first study dates to 1861 by Grewingk. Further extensive data on this complex of carbonate rocks and organisms was obtained, and studies were conducted between the 1920s and the 1940s. These studies were performed by N. Delle, E. Kraus, and H. Bielenstein, among others. These studies mainly focused on the stratigraphic subdivision and refinement of this carbonate rock assemblage.

During the same period, Upper Devonian carbonate rocks in Latvia were studied by Matulis *et al.* These studies were conducted to determine the distribution of different types of dolomites as well as the practical possibilities of extraction and their potential use to produce building materials.

Extensive work on the composition, stratigraphic subdivision, and facies zonation of Upper Devonian sediments in Latvia was conducted in the 1960s. They were carried out by researchers such as P. Liepiņš, J. Ābolkalns, V. Grāvītis, V. Sorokins, L. Savvaitova, and others. Within the framework of these studies, lithological and facies maps of several formations, as well as geological sections, were drawn.

Later studies (Stinkulis, 1998) found no support for a sedimentogenic origin of the dolomites and suggested that the Latvian Devonian dolomites were formed by early and late sedimentary and rock alteration processes.

V. Sorokin in several of his studies (Sorokin, 1978, 1981, etc.), has extensively and in detail analyzed the composition, distribution, and formation of the Frasnian Stage and its various parts in the northwestern part of the East European Platform. He concluded that two types of dolomites occurred in the Devonian carbonate rocks of Latvia: sedimentogenic-diagenetic and post-sedimentary dolomite, formed by the migration of magnesium compounds with water through underlying or overlying dolomites.

Sorokin's publications are accompanied by detailed lithological and palaeogeographical maps for the different stages of the Frasnian as well as geological sections, including correlated cross sections. These studies combined sedimentological and paleontological research methods and focused on cyclo-stratigraphy. V. Sorokin, in his monograph of 1978 (Sorokin, 1978), expresses the opinion that 14 rhythms can be traced in the Pļaviņas Formation. He distinguished them as rhythms of degree X and they are most likely comparable to the "meter-thick cycles" of today-cyclicality of fifth degree (Catuneanu, 2006).

Extensive long-term studies on the composition, structure, and formation of carbonate rocks from the Devonian Frasnian Stage have also been conducted in Estonia and Lithuania. Many of these studies were conducted by the same authors, as noted above. One of the most recent comprehensive compilations of Estonian geology notes that in the present territory of Estonia, in the northwestern part of the Main Devonian Field, marine transgression gradually started from the east (towards the Moscow syncline) at the beginning of the Frasnian (Teedumae *et al.*, 2006).

Over the last decade, it has been argued that it is problematic to determine the direction of connection of the Pļaviņas and Daugavas basins to the world ocean. The above-mentioned indications of a west-to-east transition of the enclosed basin to the open sea (Sorokin 1978; Brangulis 1998) do not correspond to the direction where the ocean is closest to the basin-to the southwest, towards present-day territory of Poland (Lukševičs *et al.*, 2012). Comparison of the composition of the Frasnian sediments with data on the patterns of Devonian climate change has also suggested the influence of climate aridization and humidification on sediment composition in the Baltic Devonian basin (Lukševičs *et al.*, 2012).

1.2. Results of sedimentological studies of carbonate rocks of the Pļaviņas Formation in Latvia

The Upper Devonian Frasnian Pļaviņas Formation is distributed over most of Latvia. The Pļaviņas Formation consists mainly of dolomites with interbeds of marls, sandstones, siltstones, limestones, and clays, with occasional thin interbeds of gypsum. The carbonate rocks of the Pļaviņas Formation overlie the Amata Formation in a coherent, concordant manner, although intermittent sedimentation has been observed in some places (Brangulis *et al.*, 1998).

The Upper Devonian sedimentary rocks are part of the Baltic Devonian carbonate rock assemblage, which is generally thick and of considerable lateral extent.

The sedimentary rocks of the Pļaviņas Regional Stage are widespread not only in Latvia, but also throughout the Eastern European Platform and, at the same time, in the Main Devonian Field (MDF), influenced by the Pļaviņas transgression (Sorokin, 1978). The Pļaviņas Formation and its Members have analogs in Estonia and northeastern Russia – the Snetnaya Gora, Pskov, and Chudovo Members, or at least parts of them. The proportions of limestones and marls increases towards the east. In general, Sorokin pointed out that towards the east, there are sea conditions of normal salinity, which are favorable for the existence of organisms (Sorokin, 1978).

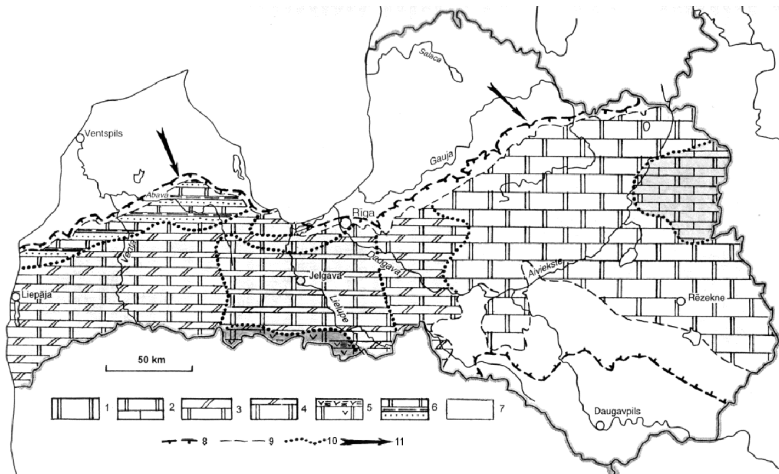


Figure 1. Lithological-facies scheme of the Pļaviņas Formation (modified after: T. Arharova and L. Birger, 1979, schematic)

Legend: Complexes of lithofacies: 1 – dolomites (80–95%); 2 – dolomites (40–75%) and limestones (20–45%); 3 – dolomites (50–75%) and dolomitic marls (20–35%); 4 – dolomites (75–85%) and dolomitic marls (till 15%); 5 – dolomites (till 65%) and clays (10–30%) with gypsum admixture; 6 – dolomites (50–60%), dolomitic marls (till 20%), sandstones and clays (till 30%); 7 – blank area; 8 – boundary of the Pļaviņas Regional Stage; 9 – boundary of the Pļaviņas Regional Stage in full thickness; 10 – boundaries of lithofacies complexes; 11 – dominant sediment influx direction.

Changes in sedimentary conditions in the Baltic Devonian Basin have not been previously analyzed and interpreted in terms of climate change and temperature fluctuations. Perhaps too much importance has been attached to local and global tectonic processes.

Exposures representing the Pļaviņas Formation can be found on the banks of the Abava, Daugava, Dubna, Gauja, Palsa, Riežupe, Radžupīte, and Venta rivers. The most numerous exposures of the Pļaviņas Formation can be found on the banks of the Daugava River from Rīga to Līvāni. The most characteristic exposures of the Pļaviņas Formation are near the village of Pļaviņas, on the right bank of the river Daugava. It should be noted, however, that most of the exposures have been flooded after the construction of the Pļaviņas hydroelectric station. In the saddle part of Latvia, the maximum thickness of the Pļaviņas Formation reaches almost 50 meters (near the Rīga-Pleskava saddle). Towards the northwest and west, the thickness decreases to 20 m. The lowest thickness is in the Latvian-Lithuanian bend, approximately 11–15 m in the northern part and a maximum of 27.4 meters in the southeastern part near the village of Skaistkalne (Brangulis *et al.*, 1998).

The Pļaviņas Formation is divided into four Members, based on the composition of carbonate rocks, studies of cyclic structure, and differences in the complex of organisms. The Pļaviņas Formation starts with the Koknese Member, which consists of dolomitic marls, clays, clayey dolomites, and dolomites, as well as sandstones. This is followed by the Sēlija, Atzele, and Ape Members, which are mostly dominated by metasomatic dolomites. Metasomatic dolomites are also known as replacement dolomites. The carbonate rocks of the Atzele Member are consistent with the maximum marine transgression during the Late Devonian (Brangulis *et al.*, 1998).

The dolomites of the Pļaviņas Formation contain stromatoporoids, brachiopods, gastropods, cephalopods, crinoids, algal and coral fossils, oncoliths, and stromatolites. Fish fossils are rarely observed, but in fewer cases, it is possible to find charred plant remains (Lukševičs, Stinkulis, 2018a). These organisms live in seas with normal salinity, often with relatively freshwater conditions (low freshwater inflow).

Coarse crystalline dolomites occur in the Pļaviņas Formation, near the village of Ape; they are recrystallized and are called "Apites" because they were found only within the Ape Member and for the first time in the vicinity of the village of Ape. They form lenticular bodies with a surface area of 30 km, a length of 80 km, and a thickness of up to 5.0 to 5.5 meters. The researchers suggest that the "Apites" were formed during the Pļaviņas period, in episodes of small-scale regressions. The "Apites" ceased to form when new transgressions began (Brangulis *et al.*, 1998).

During the Pļaviņas time, a relatively shallow epicontinental sea formed in the Baltic Devonian Basin. The influx of debris and freshwater from the Baltic Shield was drastically reduced. Over time, a particular facies zonation developed

in the basin, with changes in sediment composition, fossil abundance, and species from east to west, as described above. Compared to the facies of earlier Devonian basins, this facies zonation is distinct. According to earlier research, the diversity of invertebrates with normal marine salinity increases toward the easternmost part of the Latvia. This includes gastropods, brachiopods, bivalves, crinoids, and stromatoporoids (Stinkulis, 1998). According to Sorokin, this confirms that continental and shallow basins are bodies of water connected to the open sea to the east (Sorokin, 1978 and 1981).

It is assumed that the basin narrowed considerably towards the west, with occasional slight increases in water salinity. This part of the basin was dominated by dolomite. Lagoons, or shallow sea bays of uniform depth, are thought to have existed in western Latvia. Here, the influence of the open sea was practically invisible, and clays with dolomite interbeds, dolomites, and dolomitic marls were formed. The remains of organisms, such as algae, various plants, brachiopods, and fish, also confirm this (Sorokin, 1981; Stinkulis, 1998).

During the glacial period, the sea, which had normal salinity, moved towards the large regions of the Eastern European Platform. This is evidenced by limestones containing a variety of invertebrates that remain typical of the sea. The lower part of the Atzele Member of the Pļaviņas Formation (the transgressive part of the Atzele Member) corresponds to the maximum Late Devonian marine transgression (Sorokin, 1978, 1981; Stinkulis, 1998). The Atzele Member contains dolomites with diverse remains of organisms throughout the territory of Latvia, indicating the establishment of a normal salinity basin practically throughout the territory of Latvia (Lukševičs, Stinkulis, 2018b).

2. MATERIALS AND METHODS

Fourteen geological sites in Latvia and southeastern Estonia were studied (Fig. 2). In addition to the geological objects studied by the author of the doctoral thesis, data from the bachelor's thesis of Kristaps Seilis on the Vizulī Rock were also used.

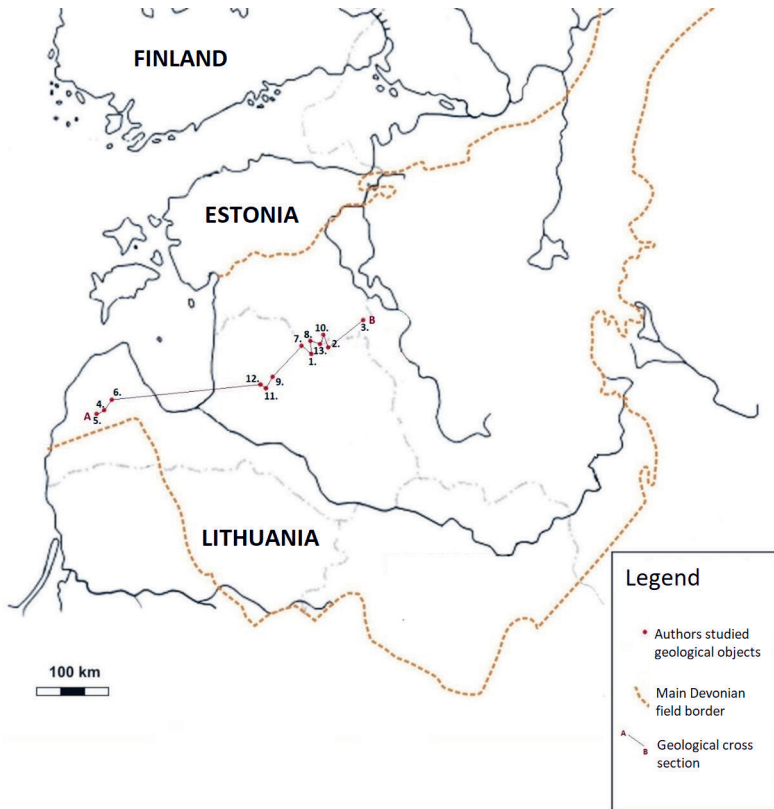


Figure 2. Schematic map (modified after: Meškis, 2013) of the Main Devonian Field (MDF) with distribution of study objects.

Geological objects of Pļaviņas RS studied by the author: 1. Randāti cliffs (57°26'54.1 "N 26°20'47.7 "E); 2. Grūbe dolomite exposure (57°31'35.0 "N 26°46'44.3 "E); 3. Marinova quarry exposure (57°44'26.0 "N 27°31'21.6 "E); 4. Riežupe exposures (56°59'16.7 "N 22°02'40.7 "E); 5. Venta falls exposure (56°58'04.7 "N 21°58'40.2 "E); 6. Īvande waterfalls exposure (57°04'05.0 "N 22°17'43.0 "E); 7.9 "E); 9. Lauciņi (Cēsis) abandoned dolomite quarry (57°19'4.6 "N 25°19'0.3 "E); 10. Kalkahju (Peetri) exposure (57°32'48.9 "N 26°34'49.7 "E); 11. Īļāki cliff (57°13'28.2 "N 25°13'32.8 "E); 12. Vizulī cliff (57°13'31.9 "N 25°13'25.3 "E); 13. Kalameci and Markuzi ravine exposures (57°32'30.6 "N 26°26'40.1 "E).

Experience during the development of this study showed that the layer surfaces and structures are better preserved than the microstructures and original textures. Therefore, the focus was on documenting the layers in geological exposures and studying sawed and polished macro sample slabs. During the fieldworks, geological sections were also drawn for the studied exposures, correlations were made between them, the conditions were studied and described in detail, and the structures within them were described and analyzed.

From some of the carbonate rock samples collected, slabs (meso samples) were created with the main aim of determining the structures to interpret the original sedimentary conditions.

After field studies, geological section analysis, and macro studies, three reference exposures (Randāti cliffs and Riežupe exposures, as well as Īļaki cliff) were selected, which in the author's opinion would require more detailed studies of the sedimentary environments using analytical laboratory methods. Carbonate rocks from the two exposures mentioned above (Randāti cliffs and Riežupe exposures) were further analyzed on a micro-scale based on the morphological and other characteristics of the selected carbonate rock samples.

Detailed X-ray diffraction (XRD), X-ray fluorescence (XRF), *Biomarker* and Total organic carbon (TOC) analyses were carried out on two geological objects within the same stratigraphic unit but in different locations in the territory of Latvia to determine the peculiarities and differences in the sedimentary conditions of the central part of the Baltic Devonian paleobasin.

Carbon and oxygen stable isotope analyses were performed on 46 samples from seven exposure sections. Samples for these analyses were collected from the exposure of the Dārziems dolomite quarry, the exposure of the Marinova dolomite quarry, the rocks of the Īvande falls, the Kalkahju (Peetri) exposure, the Randāti cliffs, and the exposure of the abandoned Ape dolomite quarry. Sampling intervals ranged from 0.1 m (Ape abandoned dolomite quarry) to 1.0 m (Dārziems dolomite quarry).

2.1. Sample preparation for XRD, XRF, Biomarker, TOC analysis and carbon and oxygen stable isotope analysis

Sample preparation for XRD, XRF, *Biomarker*, TOC, and carbon and oxygen stable isotope analyses was carried out at the University of Vienna, Faculty of Earth Sciences, Geography, and Astronomy, Centre for Geodynamics and Sedimentology, in collaboration with Prof. Dr. Geol. Michael Wagreich, Assoc. Prof. Dr. Geol. Prof. Susanne Gier.

Firstly, smaller carbonate rock samples were cut from each larger sample at the Rock Research Laboratory of the Academic Center for Natural Sciences at the University of Latvia.

After that, each sample was ground (pulverized) into a fine, unstructured powder (the crystallites are chaotically arranged) with a grain size of 10 to 20

microns (μm). Pulverization was performed at the Center for Geodynamics and Sedimentology, University of Vienna, using a *Retsch RS 200* planetary mill and a *Fritsch Vibrating Cup Mill Pulverisette 9* planetary mill.

The following parameters were selected in the control panel of the machine: 1000 rpm and a program time of 3 minutes. These parameters were optimal and sufficient for pulverizing each carbonate rock sample to the required powder fraction.

2.2. X-ray diffractometric (XRD) analysis

XRD analysis was used in this doctoral thesis to identify the minerals present in carbonate rocks based on X-ray diffraction patterns and to refine the sedimentary environments of these rocks.

XRD analyses were performed on samples from three geological reference sections selected by the author of the study: Randāti cliffs and Riežupe exposures, and Īļaki cliff. A total of 23 carbonate rock samples were analyzed using XRD methodology. One sample was obtained from each identified and separated exposed layer.

All the samples were initially prepared in a structured, powdered form. Samples for XRD analysis were prepared at the Center for Geodynamics and Sedimentology, University of Vienna, using a *Halten* 5 cm diameter holder 2–70° with a recess diameter of 16 mm.

XRD analyses of carbonate rock samples from the Pļaviņas Regional Stage (Randāti cliffs and Riežupe exposures and Īļaki cliff) collected during the field studies were performed at the Centre for Geodynamics and Sedimentology, University of Vienna, using a *Panalytical X'pert Pro* X-ray diffractometer.

X-ray diffraction images were taken with CuK α radiation at step 2–70° 40 with an exposure time of 5 seconds and a step length of 0.0167°. When starting each scan, a voltage of 40 kV and a current of 40 mA were selected in *X'Pert Data Collection*. The X-ray diffractometer was equipped with a high-resolution goniometer and a multichannel *PIXcel* beam detector.

X-ray diffractogram processing and quantitative and qualitative analyses of the mineral phases were performed using *X'Pert High Score Plus* software and the *Rietveld* refinement method.

2.3. X-ray fluorescence (XRF) analysis

The XRF analysis method was used in a doctoral thesis study to identify the trace element and oxide concentrations of key elements in carbonate rocks based on the results (Azami *et al.*, 2021).

XRF analyses were carried out on 7 selected samples from the Īļaki cliff. The concentrations of Ca, Mg, Si, Al, Mn, Ti, Zr, and other trace elements in *ppm* were determined. In general, it should be noted that the error of the equipment

may be in the range of 1–3%. The oxide concentrations of the main elements present in the carbonate rocks were also determined: MgO, Al₂O₂, SiO₂, P₂O₅, K₂O, CaO, TiO₂, MnO un Fe₂O₃.

XRF analyses were performed on a *Bruker Tracer IV* handheld device.

2.4. TOC analysis

TOC, or total organic carbon, analysis is a method for determining the concentrations of residual organic matter in sedimentary rocks. TOC analyses were conducted on five carbonate rock samples that showed the highest organic matter content organoleptically by coloration determination. Three (3) samples were from the Randāti cliffs and two (2) samples from the Riežupe exposures. The TOC analyses were performed by the author at the Department of Environmental Geosciences, Center for Earth Sciences, University of Vienna. A *Multiphase Carbon Determinator RC-612* was used. The sample processing temperature was 550° C.

2.5. Biomarker lipid analysis

Biomarker lipid analyses of the carbonate rock samples were performed at the Center for Geodynamics and Sedimentology at the University of Vienna. The same five samples analyzed using TOC were also analyzed using this method. The *Biomarker* lipid method has been used to readily extract soluble organic matter (i.e., bitumen) from carbonate rock samples (El-Shafiey *et al.*, 2014). Gas chromatography-mass spectrometry (*GC-MS*) and gas chromatography with flame ionization detection (*GC-FID*) were used.

Before the extraction process, 40 ml of dichloromethane:methanol (3:1 ratio) was added to the pulverized carbonate rock sample. The extraction was performed using the *CEM MARS X* microwave-assisted extraction method. The heating time was 15 min at 80° C and 600 W. Because of the very low organic matter content, the results of this method did not show significant values (they were very low), which are therefore not applicable to this study (Aderoju, Bend, 2018) and further interpretation.

2.6. Carbon and oxygen stable isotope analysis

Powdered samples were separated from each selected carbonate rock sample at the University of Latvia, Rock Research Laboratory (LU DAC, Jelgavas iela 1, Riga).

Carbon and oxygen stable isotope analyses were performed at the Institute of Geology, Tallinn University of Technology, Estonia, in collaboration with Dr. Geol. Tõnu Martma. Carbon and oxygen stable isotope analyses were carried out on samples from seven complete sections: the Ape abandoned dolomite quarry

and the Lauciņi (Cēsis) dolomite exposure, the Marinova dolomite exposure, the Īvande falls exposure, the Kalkahju (Peetri) exposure, the Randāti cliffs and the Ape abandoned dolomite quarry. The sampling intervals of the carbonate rocks sampled and analyzed ranged from 0.1 m to 1.0 m.

In total, the author prepared 46 carbonate rock samples for stable isotope analysis. The isotope analyses were performed using a *GasBench II Preparation Line*. The equipment was coupled to a *Thermo Scientific Delta V Advantage* mass spectrometer. The stable isotope results obtained are presented in terms of the accepted δ as a deviation in ppm from the standard VPDB values (*Vienna Peedee Belemnite*).

3. RESULTS

Based on macroscopic studies of exposure documentation, as well as macroscopic studies of rock slabs in the Rock Research Laboratory, the author has distinguished 12 facies and 3 facies associations in the carbonate and clayey sediments of the Pļaviņas Formation.

Table 1. Carbonate rock facies and their associations

Facies	Bed thickness, lithology	Structures	Bounding contact surfaces	Fossils and ichnofossils	Basin depth, indicative	Interpretation	Facies associations
F1 Carbonate rocks with wavy lamination and wave ripples	Beds 0.3–1.5 m thick; clays, clayey dolomites and dolomites, dolomitic marl	Wavy laminae and wave ripple marks and desiccation cracks, halite pseudomorphs	Even, sub-horizontal to horizontal, non-erosive	No fossils or trace fossils found	Shallow to medium depth water	Intertidal to supratidal zone (Flügel, 2004), some tidal processes and wave influence. Desiccation cracks indicates on subaerial exposure episodes, arid climate evidence. Laminae suggests on sedimentation in lagoons or tidal flats (Īļāki cliff) (Masse <i>et al.</i> , 2003). Laminae also suggests on sedimentation in intertidal to supratidal zone (Flügel, 2004).	FA1
F2 Carbonate rocks with both regular and irregular lamination	Bed thickness 0.2–2.3 m; dolomites and limestone	Regular and irregular lamination (current/sea-sonal), tidal bundles	Even, sub-horizontal to horizontal	No fossils or trace fossils found	Shallow water	Intertidal to supratidal zone, influence of tides.	FA1, FA2

Table 1 continued

Facies	Bed thickness, lithology	Structures	Bounding contact surfaces	Fossils and ichnofossils	Basin depth, indicative	Interpretation	Facies associations
F3 Carbonate rocks with disrupted lamination	Bed thickness 0.3–0.7 m; dolomites	Disturbed lamination	Irregular erosional surfaces	Bioturbation (ichnofossils)	Shallow sea	Disturbed lamination and rare bioturbation marks suggest deposition in tidal flat or tidal channel environments (Meškis, 2013).	FA1, FA2
F4 Carbonate rocks containing biodetritrus	Beds 0.5–1.0 m thick; dolomites	Even layering, homogenous	Even, sub-horizontal	Gastropod and brachiopod biodetritrus	Shallow	Presence of biodetritrus indicates high-energy environments, shallow basin and material re-washing.	FA2
F5 Stromatopoid carbonate rocks	Beds 0.15–1.5 m thick; dolomites and dolomitic marls	Stromatopoids of rounded shape. In some cases, evidence of overturning	Uneven surfaces, with small erosional pits	Stromatopoids, with diameter up to 30 cm	Shallow sea conditions	Normal salinity, shallow water (Garland, 1997).	FA2
F6 Carbonate rocks containing various invertebrate fossils and bioturbation	Beds 0.1–1.5 m thick; clayey dolomites, dolomites, and dolomitic marl	Bioturbation and even layering	Even, sub-horizontal	Gastropods, brachiopods etc.), bioturbation signs (traces of <i>Planolites</i> , <i>Locketia</i> and <i>Thalassinoides</i> also rare vertebrate fossils)	Shallow sea conditions	Shallow water episodes (Meškis, 2013). Trace fossils suggest sedimentation in tidal flats or tidal channels. Re-washed fossils indicate active hydrodynamic regime (Shen, <i>et al.</i> , 2008).	FA2

Table 1 continued

Facies	Bed thickness, lithology	Structures	Bounding contact surfaces	Fossils and ichnofossils	Basin depth, indicative	Interpretation	Facies associations
F7 Ooidal carbonate rocks	Beds 0.1–0.2 m thick; dolomites	Uneven distribution of ooids	Uneven	No fossils or trace fossils found	Shallow sea conditions	Presence of ooids indicate shallow water, normal salinity, high-energy environment (Li, <i>et al.</i> , 2019).	FA2
F8 Carbonate rocks with interlayers of sandy material	One 0.2 m thick layer	Alteration of clastic material and dolomite	Even, sub-horizontal or wavy bedding, witnessed	No body or trace fossils found	Shallow sea conditions	Shallow-water carbonate sedimentation with peritidal clastic material influx.	FA3
F9 Carbonate rocks composed of lithoclasts	Beds 0.3–0.6 m thick	Lithoclasts of dolomite of various shapes and degree of roundness, located in dolomite matrix	Uneven surfaces, with small erosional pits	No body or trace fossils found	Wave activity zone, shallow sea conditions	Storm events. The predominant presence of faceted lithoclasts suggests minimal material transportation and the prevalence of active hydrodynamic environments (Immenhauser, 2009).	FA3
F10 Karstified carbonate rocks	Beds 0.3–0.5 m thick; dolomites and dolomitic marl	Carbonate rock breccias	Uneven surfaces, with small erosional pits	No organism remains or trace fossils found	Shallow sea conditions	Palaeokarst during sub-aerial exposure (Immenhauser, 2009).	FA1

Table 1 continued

Facies	Bed thickness, lithology	Structures	Bounding contact surfaces	Fossils and ichnofossils	Basin depth, indicative	Interpretation	Facies associations
F11 Carbonate rocks with clayey interlayers	Beds 0.05–1.6 m thick; clays, clayey dolomites, and dolomites with clay interlayers	Clayey and carbonate (mostly, dolomite) material alteration	Even, subhorizontal to horizontal	No organism remains or trace fossils found	Shallow sea conditions	Periodic influx of clay in carbonate sedimentation area. Bedding pattern indicates tidal influence (Nichols, 2007).	FA1, FA2
F12 Clayey carbonate rocks	Beds 0.1–0.7 m thick; clayey dolomites and clayey dolomitic marls	Regular layering	Even, subhorizontal	No organism remains or trace fossils found	Shallow water	Rather thick clay layers as well as regular layering suggest increase in clay input and low-energy environments (Messadi <i>et al.</i> , 2016).	FA1, FA2

Distinguished facies associations:

FA1 – middle to upper intertidal zone;

FA2 – shallow, normal salinity sea;

FA3 – carbonate rocks affected by storms or other active hydrodynamic regime events.

A

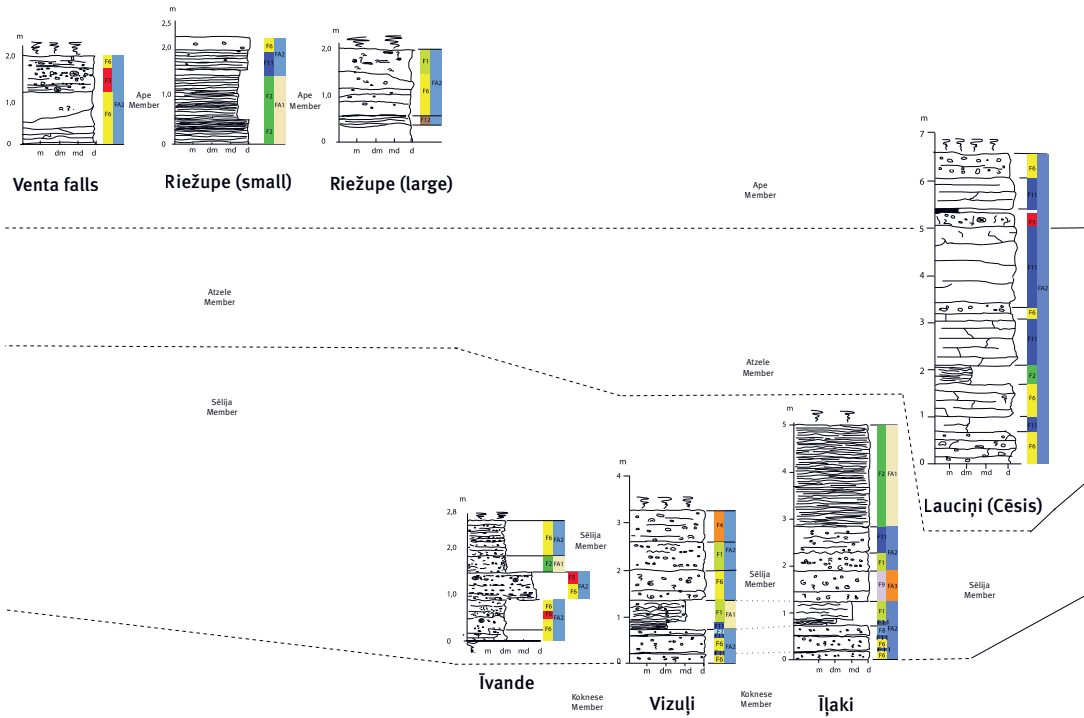
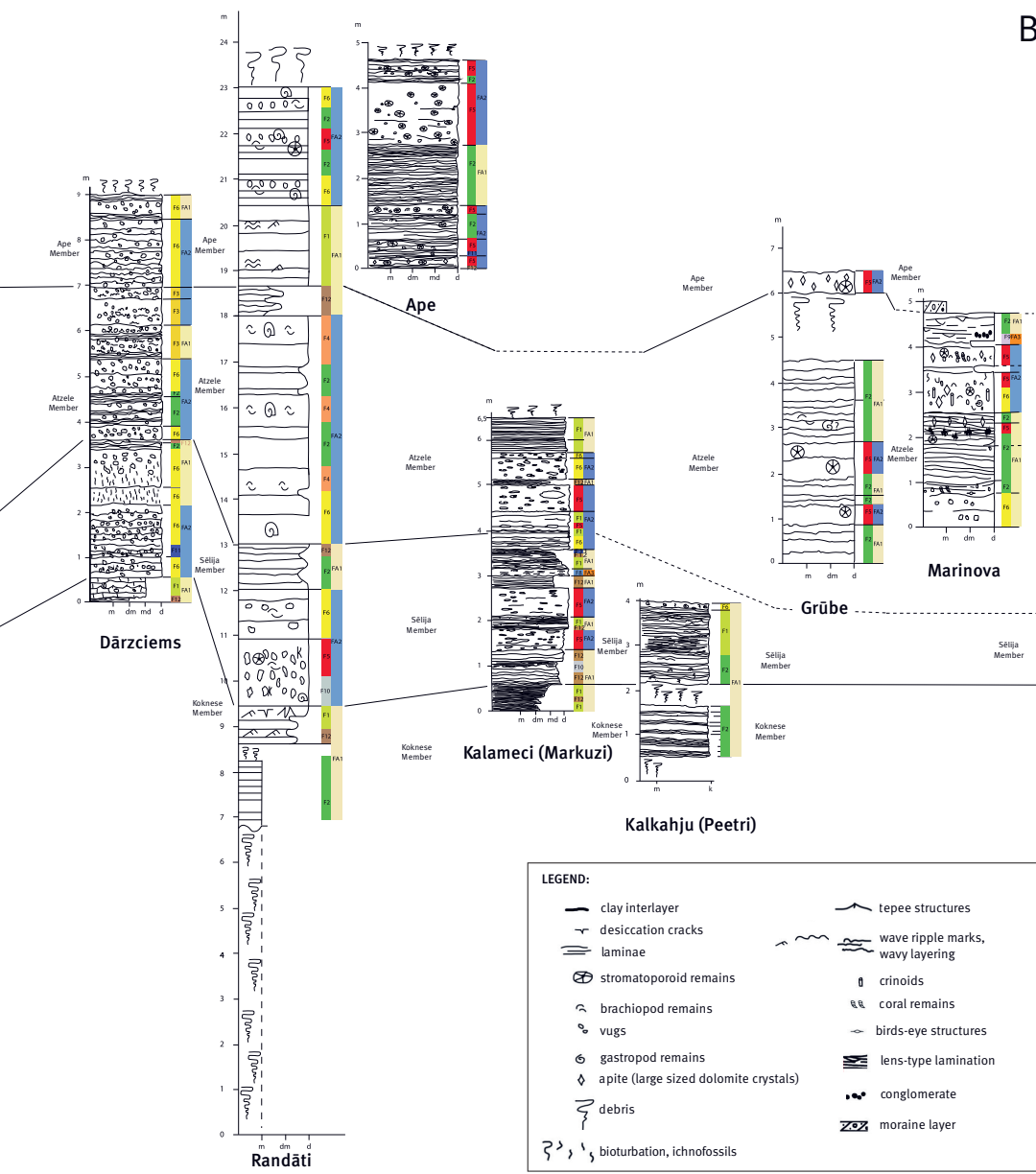


Figure 3. Correlation of the studied geological exposures by F, FA and distinguished



Members, from west (A) to east (B); see Figure 2 for location

3.1. X-ray diffractometric (XRD) analysis results and interpretation

X-ray diffractometric analysis of dolomites from the Riežupe exposures (Fig. 4) shows that, as expected, the dominant mineral is dolomite, with minor admixtures of quartz and the clay mineral illite. Since the quartz could not be identified macroscopically, it most likely represents a siliciclastic material, sand, or aleurite. But during the exposure, clay was also noticed. It can also be noted that all 8 samples analyzed from the two exposures of the Riežupe show very similar quantitative curves, and there is visually no change in mineral concentrations.

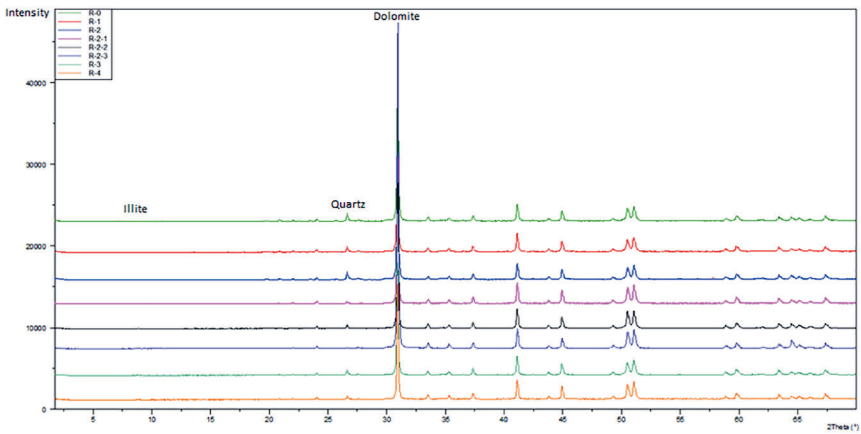


Figure 4. Composite plot of XRD analyses of samples from the Riežupe exposures. The names of the minerals are attached to their main (most intense) reflections

X-ray diffractometry analyses of carbonate rock samples from the Randāti cliffs exposures (Fig. 5) also support the hypothesis that dolomite is strongly dominant, with minor quartz and calcite and a minor clay mineral (illite).

The quartz was most likely associated with a siliciclastic admixture of sand or aleurite. During the exposure, illite, a clay admixture, was also found macroscopically. Calcite is most likely secondary, as the Randāti cliffs are not located in the area of distribution of dolomitized limestones (Brangulis *et al.*, 1998; Stinkulis, 1998).

All 8 analyzed carbonate rock samples from the Randāti cliffs show very similar quantitative curves and, like the samples from the Riežupe exposures, show virtually no changes in mineral concentrations.

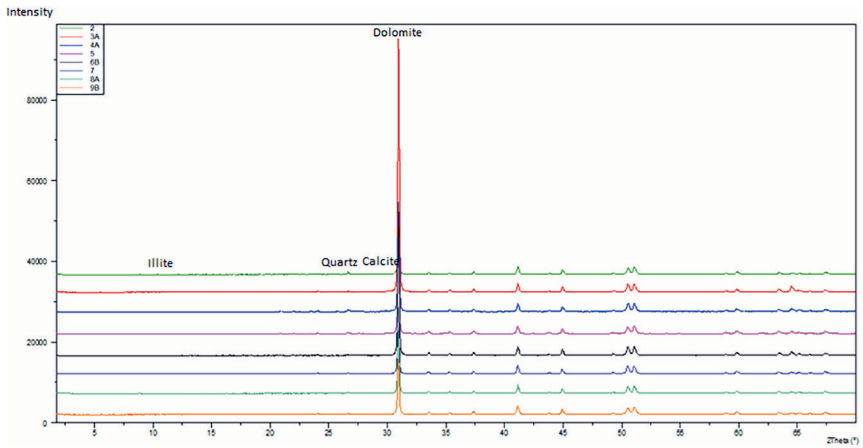


Figure 5. Composite plot of XRD analyses of samples from the Randāti cliffs exposure

The high dolomite content in the X-ray diffractometry image is consistent with the data from the exposure and rock slab studies, which show a strong dominance of dolomite in the carbonate rock strata studied. The addition of quartz indicates the presence of siliciclastic material, whereas calcite confirms the minor influence of secondary calcite on the studied carbonate rocks (Azami *et al.*, 2021).

3.2. X-ray fluorescence spectroscopy (XRF) analysis results and interpretation

According to the X-ray fluorescence spectroscopy (XRF) analyses, the studied dolomite samples are rich in CaO (50.21–59.17 wt%), MgO (17.36–28.28 wt%) and SiO₂ (7.52–21.26 wt%). In contrast, dolomite samples are low in Al₂O₃ (3.69–7.92 wt%), Fe₂O₃ (1.25–2.42 wt%), K₂O (1.38–4.07 wt%), TiO₂ (0.16–0.45 wt%), P₂O₅ (0–0.16 wt%), MnO (0.09–0.12 wt%).

Calcium and magnesium oxides are associated with dolomite as rocks and minerals, whereas silicon and aluminum oxides are associated with sand–aleurite and clay. Admixtures between the crystals as well as in the pores and vugs are most likely what caused the comparatively high concentration of iron oxide. As seen in the exposures and macro samples, the dolomites are often pinkish and yellowish, corresponding to the color determined by the iron compounds. The origin and distribution of manganese oxide can be similarly explained; in some places, the black absorption of manganese oxides and hydroxides can be observed in dolomites. The accumulation of K, Ti, and P in rocks can occur during sedimentation and during early and late post-sedimentation processes.

The dolomite samples contain low amounts of elements such as Zr (14–45 ppm), Cu (21–30 ppm), Zn (18–28 ppm), Ni (4–9 ppm), Cr (6–32 ppm), and Mo (0–5 ppm). In addition, the Sr (61–121 ppm) are lower than those typically expressed in marine carbonate rocks at 80–900 ppm (Vincent *et al.*, 2006; Li *et al.*, 2015). Dolomites generally contain less Sr than limestones because the dolomite crystal lattice may contain lower amounts of this element. Nevertheless, dolomites formed in normal salinity basins contain Sr–470–550 ppm, whereas dolomites from evaporite basins contain Sr–500–700 ppm (Qing and Mountjoy, 1989; Weizer, 1983; Land, 1991 – cited in Li *et al.*, 2015). The reduced Sr values in the Pļaviņas Formation dolomites can presumably be explained in a similar way to Li *et al.* (2015) – the dolomites have been stripped of less abundant elements by recrystallization – post-sedimentation processes.

The percentage values (wt%) of the three most abundant oxides (CaO, MgO and SiO₂) were correlated with the concentrations of the less abundant elements CaO (50.21–59.17 wt%), MgO (17.36–28.28 wt%) and SiO₂ (7.52–21.26 wt%). No correlations were observed between the amounts of these elements during the study.

However, it has been concluded that the elevated MnO/CaO and Fe₂O₃ / CaO ratios in the Īlāki cliffs carbonate rock samples indicate post-sedimentation alterations (De Winter, Claeys, 2016), as does the reduced strontium abundance. In contrast, elevated MnO and Fe₂O₃ concentrations, combined with very low Sr/CaO concentrations, could indicate increased paleoenvironmental activity (Richardson *et al.*, 2004).

3.3. Results of stable isotope analyses of oxygen and carbon and their interpretation

A total of 46 dolomite samples were analyzed for carbon and oxygen stable isotopes.

The $\delta^{13}\text{C}$ values for the studied dolomites vary from -4.82‰ to 0.73‰ , while the $\delta^{18}\text{O}$ values for the studied dolomites vary from -8.57‰ to -3.09‰ .

For carbonate platform dolomites, the following stable isotope values of C and O predominate: $\delta^{13}\text{C}$ -3 – $+3\text{‰}$; and $\delta^{18}\text{O}$ -10 – $+3$ (Land, 1980). Mean $\delta^{13}\text{C}$ values for Phanerozoic marine carbonate rocks are -1‰ – 4‰ , around, on average, 2‰ in the Devonian (Mackensen and Schmiedl, 2019). These data are in general agreement with the results obtained in this doctoral thesis, confirming the origin of sedimentary marls.

The carbon isotope values are similar in the studied sites, including the Getliņi and Gaujiena boreholes, but they are lower (mostly -2 – -4‰) in the Īvande, Riežupe and Getliņi sites (central part of the study area – west) and higher, around 1‰ , in the Ape site (northeastern part of the study area). This phenomenon can probably be explained by freshwater inflow to the western part of the basin (Amthor *et al.*, 1993), but this needs to be verified in future

studies with a wider dataset. Freshwater inflow into marine basins reduces $\delta^{13}\text{C}$ values (Colombie *et al.*, 2010).

The oxygen isotopic values of the dolomites obtained in this study were lower than those usually found in sediments of marine origin (Land, 1980). This can be explained by the influence of atmospheric water during post-sedimentation processes. Oxygen isotope values change much more rapidly than carbon isotope values during post-sedimentation processes because changes in oxygen isotope values require a much lower water/rock ratio than changes in carbon isotope values (Sharp, 2017). The decrease in mean $\delta^{18}\text{O}$ values from about -4 to -6‰ from west to east is quite remarkable, probably attributable to differences in post-sedimentation processes, with a greater influence of atmospheric water in the eastern part of the study areas. This is probably not the case for the Pļaviņas time, but for later time periods.

It is unlikely that the sediments studied were generally deposited in a basin with increased water salinity, including an evaporite basin, as they have lower $\delta^{13}\text{C}$ values (Warren, 2018).

The carbon and oxygen stable isotope ratio results verify that post-sedimentation processes have had a substantial impact on the carbonate rocks of the Pļaviņas Formation, in this case dolomites.

Most likely, the range of $\delta^{13}\text{C}$ values in dolomites from Marinova could also indicate a slight increase in freshwater influence over time.

The relatively large difference between the $\delta^{18}\text{O}$ values could also indicate late crystallization of the dolomite. Slightly variable $\delta^{13}\text{C}$ values – small negative and positive values – may indicate weak mixing of seawater and atmospheric (precipitation) waters (Immenhauser *et al.*, 2003; Wendte, Uyeno, 2005).

The values of stable isotopes of carbon and oxygen in the dolomites of the Dārzciems dolomite quarry vary minimally, indicating relatively stable sedimentation conditions. Marine conditions with normal salinity are prevalent (Colombie *et al.*, 2010).

The $\delta^{13}\text{C}$ values of the stable carbon isotopes in the Īvande falls exposure decrease from -2.07 at the bottom of the exposure to -4.82‰ towards the top of the exposure. At the very top of the exposure (sample Ī-5), the stable carbon isotope values increase sharply to -0.23‰ . Overall, the decrease in carbon stable isotope values over time indicated a gradual influx of freshwater into the marine basin. In contrast, the sharp increase in carbon values observed in the last exposure layer indicates the formation of dolomite in an environment where the salinity of the water in the basin has increased rapidly or there has been less freshwater influx from continental or atmospheric waters (Kleesment *et al.*, 2013).

In limestones from the Kalkahju (Peetri) exposure, carbon stable isotope values are lower at the bottom of the exposure, like the samples from the Īvande falls exposure, but increase upwards to -0.68 and -1.39‰ . These results suggest that the evaporite basin evolved over time, with increasing water salinity and less influence from atmospheric waters (Kleesment *et al.*, 2013).

In the Randāti cliffs, the values of stable carbon analyses in the studied dolomites vary very little and are close to zero (mostly, slightly negative values). These results indicate little variation in marine conditions. The occasional positive values (0.09, 0.01, and 0.73, respectively) indicate slightly increased water salinity in the basin during these specific periods of carbonate sedimentation (Warren, 2018).

The highly variable $\delta^{13}\text{C}$ values of the stable carbon isotopes (ranging from -3.82 to 1.85‰ in the two exposures of the Riežupe) indicate that the dolomite formed in an environment where marine waters periodically mixed with atmospheric waters (precipitation) (Kleesment *et al.*, 2013). The salinity of the water varied. Similar sedimentation conditions were also present in dolomites from the Īvande Falls exposure and partly in carbonate rock samples from the Kalkahju (Peetri) exposure.

3.4. TOC analysis results and interpretation

Total organic carbon (TOC) analyses provided important data for estimating the amount of original organic material in the studied carbonate rock samples.

In the two samples with the highest visually assessed organic matter content from the Randāti cliffs, the organic carbon content varies from 0.524% in sample 5 to 0.419% in sample 9b.

However, in the three samples with the highest visually assessed organic matter content from the Riežupe exposure, the organic carbon content of sample R-0 is 0.449%, sample R-2 is 0.388%, and sample R-3 is 0.409%.

The carbonate rock samples from the Riežupe exposures and the Randāti cliffs exhibit analytical results that indicate the absence of anoxic conditions during carbonate sedimentation (Da Silva, Boulvain, 2004). This suggests that the organic matter was oxidized or leached out during the sedimentation and post-sedimentation processes. However, it also marks the original extent of organic matter; that is, organic matter was originally more abundant in these layers than in the others. Therefore, it can be inferred that the sedimentary environment was oxic with oxic shallow seabed conditions and medium organic activity or oligotrophic conditions (Da Silva, Boulvain, 2004).

3.5. Fossils and ichnofossils in carbonate rocks studied

Fossils in the central part of the Baltic Devonian palaeobasin are mostly poorly preserved; therefore, it has not been possible to determine the exact remains of organisms. During this research, the author noticed that at sites in western Latvia, both fossils and rock structures were poorly preserved because of heavy dolomitization, probably due also to the recrystallization of dolomite.

However, towards the northeast of Latvia and southeast of Estonia, it was possible to observe more original structures, remains of organisms, and, in some

places, ichnofossils that were not identifiable to the genus but could be assigned to type, class, or subclass.

In determining the sedimentary environment, the stromatoporoid remnants found in the Pļaviņas Formations carbonate rocks are crucial.

Stromatoporoids at the study sites varied in diameter from 2 to 30 cm. The remains, or vugs in place of dissolved remains, were mostly spherical shape. Most of the stromatoporoids studied (where the shape could be determined) were bulbous (see Fig. 6), but the rounded shape can also be explained by not being in a living position but being over-washed. In almost all cases, the stromatoporoids were displaced, sometimes rolled on their sides, or overturned. Since subaerial sedimentation conditions frequently arose during this period, and since increased water salinity created unfavorable living conditions for these organisms, stromatoporoid carbonate rocks (F5) were not found in the carbonate rocks of the Koknese Member. In the carbonate rocks of the Sēlija Member, stromatoporoids (their fossils, more often vugs at the places of dissolved stromatoporoids) occur in 15% of the exposure of the Īvande falls (rounded vugs at the places of dissolved stromatoporoids, up to 6 cm in diameter, arranged “in chains”), 22% in the Randāti cliffs (undetermined shapes and sizes), and 31% in the Kalameci and Markuzi ravine exposure (vugs in place of dissolved stromatoporoids, up to 10 cm in diameter, circular in shape). In the carbonate rocks of the Atzele Member, stromatoporoid layers classified as facies F5 were found only in the far northeast of the study area: 27% in the Kalameci and Markuzi ravine exposure (vugs in places of dissolved stromatoporoids, small to large in size – about 20 cm in diameter, bulbous), 25% in the Grūbe dolomite exposure (bulbous, up to 30 cm in diameter, chaotically arranged), and 23% in the Marinova dolomite exposure (undetermined shape and size). In the carbonate rocks of the Apes Member, facies F5 occurs in 25% of the Venta falls exposure (small, round-shaped vugs, arranged “in chains”), 13% in the Laučiņi (Cēsis) dolomite quarry exposure (found only in exposures 7th layer – up to 15 cm in diameter, spherical, rounded shape), 14% in the Randāti cliffs (unidentifiable shapes and sizes), 51% in the exposure of the abandoned Ape dolomite quarry (sizes from 1 cm in diameter (1. In the Ape dolomite exposure (1 cm in diameter, up to 5 cm in diameter, chaotically arranged) and 100% in the Grūbe dolomite exposure (dense aggregation of rounded stromatoporoids, up to 5 cm in diameter, chaotically arranged).

Almost all study sites contained stromatoporoids together with other remains of organisms, such as brachiopods, algae and others. The Venta falls, the Cēsis (Laučiņi) site, and the exposure of the Īvande waterfalls, where only stromatoporoid remains were found throughout the entire section, at different intervals. For example, in the Grūbe exposure, stromatoporoid remains were found together with other remains of organisms, except in layer 7 of the exposure, where only stromatoporoid remains were studied. During the studies of Ape abandoned dolomite quarry, almost all section layers contained only stromatoporoid

remains, except for layer 3, where brachiopod fossils were also found. The brachiopod remains found are also, in all cases, either arranged “in chains” or chaotically, indicating over-washing and the possible influence of wave action.



Figure 6. Stromatoporoid fossil shape in carbonate rocks of the Devonian Pļaviņas Formation: (A) bulbous, (B) laminar forms (modified after Kershaw, Motus, 2016)

The remains of brachiopods and gastropods were also mostly over-washed, and the detritus of these organisms was common. In most of the study sites, the remains of organisms are arranged in 'chains.' Their sizes range from 0.5 cm to approximately 4–5 cm. In one case (layer 5 of the Marina exposure), a cluster of crinoids was also found, the structure of which also suggested that the remains were re-washed. In one of the exposure layers of the Dārzciems dolomite quarry (layer 4), *Chaetocladus* algae remains were also found. Algal remains of the same genus were also found in layer 4 of the Vizuļi cliff.

Signs of bioturbation (trace fossils) have been found in the exposure of the Dārzciems dolomite quarry in almost all its layers – passages 1 to 2 mm wide, mostly vertical, heterogeneous in structure, small, and highly disturbed; it has not been possible to determine their specific affiliation. Similar bioturbation features (both the same width and structure of the passages) have also been found in Layer 1 of the Īļāki cliff, in two layers of the Vizuļi cliff (Layer 5 and Layer 7), in the upper part of the Kalemeci and Markuzi ravine exposures (Layer 9, Layer 13, and Layer 14), and in Layers 1, 2, 2, and 5 of the Īvande falls exposure. In all the above-mentioned layers of the study sites, it was not possible to determine the ichnofossil affiliation. Bioturbation has also been detected in layer 12 of the Kalkahju (Peetri) exposure (in this case *Chondrites* trace fossils were identified) and in several layers of the Dārzciems dolomite quarry: layer 1, layer 3, layer 4, layer 5, layer 6, and layer 9 (in all cases *Planolites* trace fossils were identified). *Planolites* traces were also identified in Layer 1 of the Kalemeci and Markuzi ravine exposures. *Chondrites* traces were formed in dense carbonate sediments with a generally calm sedimentary environments (low wave energy), a shallow marine basin, and often tidal influences on this environment (Mešķis, 2013). *Planolites* are also worm-like organisms that have lived and formed burrows in shallow waters and often in the intertidal zone (Mešķis, 2013).

4. DISCUSSION

The results of this doctoral thesis confirm previous studies (Gravitis, 1967; Sorokin, 1978; Stinkulis, 1998; Pontén, Plink-Björklund, 2009; and others) that during the Devonian Pļaviņas time there were variable, but mostly shallow sea conditions, water depth changed several times and there were even episodes of subaerial exposures.

Previous studies have interpreted the central part of the Baltic palaeobasin, which is the sedimentary basin of the Pļaviņas time, as a shallow sea (Gravitis, 1967; Sorokin, 1978).

The data obtained in the doctoral thesis study confirm that the area of the Pļaviņas basin corresponding to the western and northeastern parts of Latvia and the southeastern part of Estonia, according to the classification of carbonate rock platforms in the modern scientific literature, most probably corresponds to an epicontinental carbonate platform, with a lower probability that it was an epicontinental carbonate slope (James, Jones, 2016).

Both the continental carbonate slope and continental carbonate platform are characterized by two zones, up to hundreds of kilometers wide, with a calm hydrodynamic regime: 1) the transition between land and basin under confined conditions, and 2) the transition between basin and open ocean. Between these zones is a tens of kilometers wide zone with an active hydrodynamic regime, mainly driven by tidal and wave actions (James, Jones, 2016).

Studies carried out on the inner parts of the modern carbonate sedimentary basins of the Bahamas archipelago and the Florida Peninsula coast, which are considered analogs of ancient epicontinental carbonate sedimentary basins, show that the environment of carbonate sediment deposition has been generally calm and that the influence of waves and tides on carbonate sedimentation processes has been minimal. In these areas, the sedimentation processes are mainly affected by relatively rare storm episodes (Tucker and Wright, 1990).

However, opinions differ on the possible influence of tides on ancient and extensive continental platforms, with Irwin's study suggesting that their influence was negligible (Irwin, 1965), whereas others have suggested that it was large and even widely felt (Pratt, James, 1986). This is thought to depend on the location of the basin and its connection to the global ocean.

In several geological sections documented during this dissertation studies, carbonate rocks with poorly preserved remains of organisms were cyclically replaced by laminitic and/or clayey sedimentary rocks, where tidal features have been detected.

Tidal rhythmites have been found in Īļāki cliffs, Vizūļi cliff and also in Kalkahju (Peetri) exposure, the Dārzcīems dolomite exposure, as well as in the Kalameci and Markuzi ravine exposures. The study has also provided evidence of tidal rhythms in some intervals of the Randāti cliffs (Layer 2, Layer 5, Layer 7 and Layer 8). Carbonate rocks have also been studied in Layer 2 of

the Marinova exposure, where 'bird's eye' structures, or fenestrae, have been found, which are typical of the middle intertidal zone (Tucker, Wright, 1990).

Some of the most common features of intertidal rhythmites observed by the author in Pļaviņas Formation carbonate rocks are:

- Bands or layers of micrite and clay minerals on layered carbonate rocks;
- Tidal bundles, which indicate periodic long-term changes (seasonal) and changes in the length of the week due to the gravitational influence of the Moon and Sun;
- Reaction surfaces, bidirectional slope layering, and rising ripple layering showing different flow directions;
- Alteration of carbonate and clastic material – *wavy bedding* (Guangquan, Lidong, 2021) – in the first layer of the Īļāki cliff;
- Tidal rhythms in clayey beds.

In the Baltic Late Devonian clastic sedimentation basins, tidal influence has been widely noted in many studies (Pontén, PlinkBjörklund, 2009; Lukševičs *et al.*, 2011; Vasilkova *et al.*, 2012).

In this thesis, the most pronounced storm layers were discovered and described in the Atzele Member at the top of Marinova quarry exposure, Estonia. However, it is possible that much weaker and smaller storms, caused by moderate to strong undulations, influenced the over-washing of stromatopora, brachiopods, crinoids, and gastropods, fragmentation, detrital flushing of organism remains, and the formation of layered concentrations of chaotic structure, which was widely observed at many of the 14 study sites, in particular in the Sēlija and Atzele Members, especially those sites located in the central and northeastern parts of the study area, where the author believes that the Z and Y zones of the carbonate platform were present.

All the study sites in the dissertation have been linked to specific Members of the Pļaviņas Formation – the Koknese Member, as well as the Members of Sēlija, Atzele and Ape have been identified. The most complete sections covering all four Members have been studied in the exposure of the Dārzcīems dolomite quarry and in the Randāti cliffs. Only the uppermost Member of the Pļaviņas Formation, the Ape Member, has been found in several of the study sites (in the Venta falls exposure, both Riežupe exposures and the Ape abandoned dolomite quarry exposure).

The 'meter-thick cycles' identified by the author in some places are characteristic of carbonate platforms (Tucker, Wright, 1990), and their formation has also been suggested in other studies to be due to tidal flat progradation (Pratt, James, 1986), eustatic water-level fluctuations, and even regional tectonic processes (Tucker, Garland, 2010).

There is a pronounced cyclicity in the Kalameci and Markuzi ravine exposures, as well as in the Dārzcīems dolomite quarry exposure. In the Kalkahju (Peetri) exposure, weaker cycles were also noted. Every cycle starts with fossilized dolomites, ooids, and no indications of subaerial exposure. It concludes with

laminitic layered dolomites, which frequently have desiccation cracks that indicate on subaerial exposure. The thickness of the cycles varies from 0.5–0.8 m in the Dārziems dolomite quarry, while in the Kalameci and Markuzi ravine exposures they vary from 0.5 to 1.5 m thick. In the Kalkahju (Peetri) exposure in Estonia, cycles have also been found to be even thinner, at approximately 0.2–0.4 m thick. If the water level does not change, the thickness of the cycle is close to the water depth (Immenhauser, 2009). This suggests that the basin was distinctly shallower towards the north and, conditionally, also towards the northeast.

The study revealed that almost all study sites contained stromatoporoid remains or vugs at places of dissolved stromatoporoid remains. Stromatoporoids inhabit shallow, warm water and an active hydrodynamic regime (Tosolini *et al.*, 2012), while brachiopods and gastropods are also inhabitants of shallow seas. The layered assemblages of fossils and their detritus observed in places indicate the re-washing of the remains of organisms and their debris material, and are therefore likely to indicate a slope facing the basin (Shen *et al.*, 2008; Flügel, 2004; Machel, Hunter, 1994). Since the studied sedimentary rocks were deposited in the interior of a shallow continental sea, its slope, however, cannot be understood as the slope of the entire carbonate platform towards the open sea (Brangulis *et al.*, 1998). It is possible that the organism remains were washed away by storms (Gutteridge, 1989). Washed plants and organisms remain, and their detritus may also occur in tidal flats (Laya, Tucker, 2012), but this is not an unambiguous indicator of sedimentary environments.

In the Holy Cross Mountains in Poland (Luczynski, 1998), Devonian stromatoporoids have been found in several quarries in the area, mostly in the living position and not over-washed, as in the Baltic Devonian palaeobasin, suggesting relatively shallow marine conditions in what is now southern Poland, but calm and without strong currents, tides, or wave action, suggesting a *back-reef setting*. In only one isolated case was the stromatoporoid found to have been over-washed, that is, affected by storms.

The stromatoporoids in the objects studied by the author were overturned, rolled, or moved in almost all cases, and were not in a living position (when identifiable). They are almost always arranged in “chains”, much less frequently they are arranged chaotically (Garland, 1997 and Tucker, Wright, 1990). Watkins, in his study (Watkins, 1975) of Silurian brachiopods and stromatoporoids on Visby Island (Baltic Sea region, Sweden), noted that brachiopod remains, and their detritus are often arranged among other remains, chaotically, but not among stromatoporoids. This finding supports the idea that sedimentation was influenced by wave action. According to the Polish paleontologist Grzegorz Racki (1993), brachiopod assemblages live mainly in shallow marine conditions, including lagoons, whereas stromatoporoids live in slightly deeper parts of the basin, but also in shallow seas. In this case, Rackis' conclusions were drawn for stromatoporoids in the living position, which contrasts with the author's study of the carbonate rocks of the Pławiņas Formation, where they

do not occur in the living position. During the thesis research, it was found that stromatoporoids are often very small in size – in some locations only 1 cm to 7 cm in diameter. In the carbonate rocks of the Sēlija Member in the exposure of the Īvande falls, they are small, up to 6 cm in diameter, and arranged “in chains”; in the carbonate rocks of the Atzele Member in the exposure of the Venta falls, they are small, up to 2–3 cm in diameter, and arranged “in chains”; In the carbonate rocks of the Ape Member, in the exposure of the Ape abandoned dolomite quarry, they are 1–7 cm in diameter, arranged “in chains”; and in the Grūbe dolomite exposure, they are up to 5 cm in diameter, arranged chaotically. As Racki pointed out, small stromatoporoid sizes are indicative of high mortality among young organisms, specifically those living under high stress conditions, which can be caused by cyclic changes in environmental conditions (e.g., changes in basin depth and water salinity) (Racki, 1993), resulting in a lack of opportunity for them to grow larger and develop. On this basis, we hypothesized that the small stromatoporoid remains (up to approximately 7 cm in diameter) were likely to have been deposited in lagoon conditions where water levels periodically dropped, resulting in an increase in seawater salinity. This zone corresponds to zone Z according to Irwin's classification (Irwin, 1965) and to the shoreward slope of the reef, which corresponds to the transition to zone Y. The larger stromatoporoids (8 cm to 30 cm in diameter), on the other hand, were found on the reef slope facing the open basin (Zone Y). In all cases, regardless of zonation, periodic episodes of storms or strong waves occurred, resulting in the rounded (*bulbous*) stromatoporoids being overturned and often displaced. This is sometimes confirmed by layered carbonate rocks, indicating shallow basin conditions in cases where small stromatoporoid remains have been found. However, in this case, there was no pronounced tidal influence on sedimentation, and there was bimodal wave action in the seaward-coastal direction and water currents (Luczynski, 2008). It is possible that the stromatoporoids in the carbonate rocks studied by the authors were arranged in the lower areas between carbonate sediment shoals that were parallel or subparallel to the shoreline.

Garland (1997) pointed out that bulbous stromatoporoids are characteristic of lagoonal (i.e., offshore) conditions, whereas reef or Y-zone conditions are usually characterized by tabular or dome-shaped stromatoporoids (Garland, 1997). In the dissertation study sites from the Upper Devonian, it was also found that bulbous stromatoporoid remains were arranged in size on the reef slope facing the open sea (also Zone Y, after: Irwin, 1965).

Considering all the results obtained in the course of the study, it can be concluded that the spatial variability of the study sites is rather low, which confirms the existence of an epicontinental platform in the central part of the Baltic Palaeobasin during the Pļaviņas time.

Interpreting the carbon and oxygen stable isotope results obtained for dolomites from the Pļaviņas Regional Stage and comparing them with other studies, both in the Baltics and elsewhere (Kleesment *et al.*, 2013; Amthor *et al.*, 1993;

Colombie *et al.*, 2010; Wendte, Uyeno, 2005, etc.), it is concluded that the carbon isotope ($\delta^{13}\text{C}$) values in the study area are most likely influenced by intermittent mixing of fresh and marine waters, presumably as a result of precipitation (atmospheric waters). The results of the stable isotope analysis also support the possibility of freshwater influx from the southwest and/or south. The oxygen isotope data ($\delta^{18}\text{O}$) are often elevated, which could indicate an increased influence of atmospheric water in post-sedimentation processes. As Sharp (2017) pointed out, carbon isotopes are mainly sourced from carbonate rocks, organic matter, and CO_2 , whereas oxygen isotopes are sourced from carbonate ions and water (H_2O). Hence, a much smaller water-rock ratio is sufficient to change the oxygen isotope values compared to the carbon isotope values. Further studies using larger datasets are needed to determine the influence of these factors on a larger scale.

Also the results of X-ray fluorescence spectrometry (XRF) analysis suggest that the reduced Sr values in the Pļaviņas Formation dolomites could indicate that the studied dolomites have been stripped of less abundant chemical elements during post-sedimentation processes (Li *et al.*, 2015), but in any case the presence of Sr indicates on marine conditions.

All study sites located in the northeastern part of the study area (Dārzciems dolomite quarry (Sēlija and Atzele Members), Ape abandoned dolomite quarry (Ape Member), Kalameci and Markuzi ravine (Koknese, Sēlija and Atzele Members), Kalkahju (Peetri) exposure (Koknese and Sēlija Members), etc.), are distinguished by a distinct abundance of laminites (facies F1, F2 and F3), suggesting that in this direction, i.e. to the northeast of the present territory of Latvia, there was a zone Z of the continental platform (according to James, Jones, 2016 and Irwin, 1965), which is the analogue of lagoonal and tidal flat conditions in shelf marine carbonate platforms. In conclusion, the highest abundance of laminites is found in the carbonate rocks of the exposures of the Sēlija and Atzele Members in the northeastern part of the study area.

Dr. geol. Vija Hodireva in her doctoral thesis (Hodireva, 1997) points out that the Ape and Dārzciems carbonate rocks contain a large amount of layered dolomites and that the layers of these rocks are cyclically repeated in the section. These dolomites correspond to the laminites previously studied by the authors. In general, zone Z of the continental platform confirms the hypothesis of tidal-flat-type sedimentation.

From the Late Carboniferous to the Early Permian, a vast continental sea formed in modern northern China (Ordos Basin with an area of approximately 280 000 km²), where carbonate sediments accumulated and interacted with clastic material. Chinese geologists Zhang Guangquan and Mi Lidong described this basin and its various tidal features in detail in their study (Guangquan, Lidong, 2021). The Particularly noteworthy is the intermixing of carbonate basement and clastic material with undulating layering, such as that found in the Sēlijas Member of the Pļaviņas Formation in the 1st layer of Iļāki cliff exposure.

In other parts of the world, such as Maojing Province in southern China, the lower part of the Devonian Frasnian is mostly composed of reef-building organisms and pure organogenic carbonate rock. The proportion of pure carbonate rocks, with rare remains of organisms and plants, increase (Shen *et al.*, 2017).

In addition, on the African continent in the Sirte (*SIRT*) Basin in Libya, the Paleogene is dominated by extensive shallow marine carbonate platforms, in some places as large as 300 km². The Sirtes Carbonate Basin has a total area of nearly 230 000 km². Thick carbonate rock layers were deposited because of sedimentation and transgressive processes. It should be noted that the basin has been expanded (both vertically and laterally) by tectonic processes from the Cretaceous to the Eocene epoch. Limestone and carbonate shales were the main formations. In this study, in addition to modern standard carbonate-rock research methods, seismicity was applied to distinguish seismic facies (Abdalla *et al.*, 2023). During the period of carbonate sedimentation in this basin (Paleocene to Middle Eocene), there were sauna-type (*hothouse*) climatic conditions, similar to those of the Devonian Płaviņas time. However, it is important to mention that in the Sirte Basin, sedimentation was accompanied by both transgression and gradual sinking of the carbonate platform by tectonic processes (Abdalla *et al.*, 2023). It can therefore be concluded that these sedimentary conditions are not analogue to the Devonian Płaviņas time.

A large carbonate platform was studied (Xu *et al.*, 2023) during the Middle Cretaceous in southern Iran. This carbonate platform, the *Cenomanian*, is in the Zagros Massif and is composed of reef organisms and hermatypic corals, similar to modern carbonate platforms in the Bahamas and the Great Barrier Reef. Like the Płaviņas period in the central part of the Baltic Devonian palaeobasin, the carbonate sediments accumulated in shallow seas and lagoon-type shoals during the Middle Cretaceous to form the Kenomen carbonate platform (Xu *et al.*, 2023). However, there is one important difference that prevents comparison with the Płaviņas Basin: in the carbonate rocks of the Płaviņas Basin, the author of this thesis did not observe distinct features of such extensive reef formations, specifically, barrier reefs. Only rare organogenic layers that can be classified as reef formations have been found in the exposure of the Marinova quarry (upper part of the Atzele Member) and in the upper part of the exposure of the abandoned Ape quarry in layer 6 (Ape Member).

One important and close analog of the Baltic Devonian palaeobasin to the continental platform is the Eucla *basin* in southern Australia (O'Connell, *et al.* 2012), where carbonate rocks and their facies (both laminitic and rich in remains of organisms, etc.) are quite similar to those studied in the Płaviņas Formation. The continental platform of the Eucla Basin (120 000 km²) is similar in size to the modern Great Barrier Reef and considerably larger than the modern Bahamas Basin (78 000 km²). Unlike the carbonate rocks of the Płaviņas that the author studied, the sedimentary rocks of the Eucla carbonate platform are

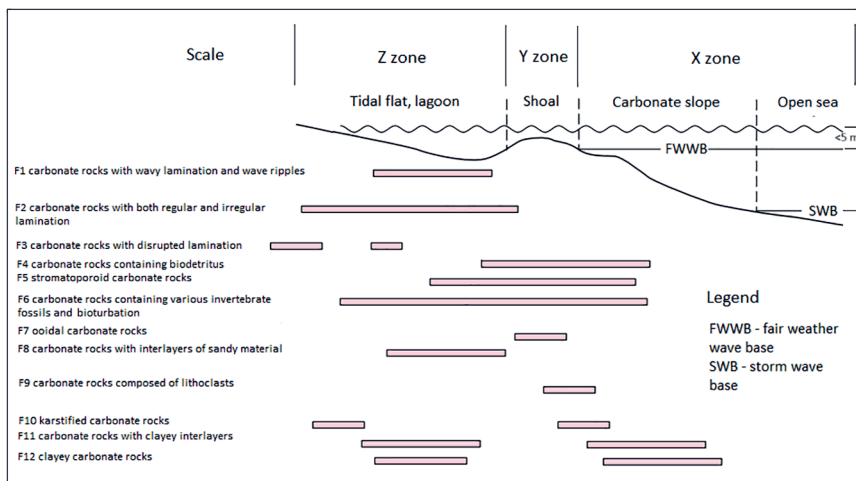


Figure 7. Two-dimensional model of carbonate-rock sedimentation with position of facies for the epicontinental basin of the Pļaviņas time (Danefelds, Meškis, 2024: *in press*)

primarily subtropical limestones that have been little or not altered by dolomitization processes, which facilitates the interpretation of sedimentary processes.

The results of this thesis are not directly applicable to other carbonate sedimentary basins worldwide because, although several continents were covered by epicontinental seas during the Devonian period, there are also quite different examples. For example, in the Appalachian Basin, the Devonian conditions during the Frasnian were predominantly deep water, with rare exceptions in the eastern part of the basin, where there were shallow seas and a small-scale mass extinction episode (Bush *et al.*, 2015).

In the course of the study, by reviewing data from other carbonate sedimentological studies and evaluating the results obtained, the author was able to construct a model of the carbonate sedimentation of the Pļaviņas time (central part of the Baltic palaeobasin) with a planar distribution of the separated facies (Fig. 7), as well as a distribution by approximate depths of carbonate sedimentation in a shallow epicontinental marine basin.

The studies carried out in the course of the thesis have shown that layered dolomites and laminites, as well as localized tidal features and signs of wave action, are most abundant in the northern and northeastern parts of the study area in the Sēlija and Atzele Members, while dolomites with remains of organisms and homogeneous dolomites are relatively more abundant in the western part of the study area.

Carbonate rocks of the Koknese Member were found in the study area only in the northeast, in the lower part of the exposure of the Dārziems dolomite

quarry, in the lower part of the Randāti cliffs, in the lower part of the Kalameci and Markuzi ravine exposure and in the lower part of the Kalkahju (Peetri) exposure. These rocks are mainly clayey carbonate rocks, often with halite pseudomorphoses, indicating an aride climate. The carbonate rocks of the Koknese Member are classified as Zone Z type (after Irwin, 1965).

During the Sēlijas period, basin transgression began, with a gradual increase in the thickness of the carbonate rock layers (both cycles, and individual layers) and in the diversity of organisms in the basin. Layered dolomites and laminites (with no or minimal amount of organism remains) are more common in the northeastern part of the study area, whereas thicker layers are found towards the west, where the diversity and abundance of organisms are also increasing. The carbonate rocks of the Sēlija Member exhibit cyclicity in certain areas (such as the Kalameci and Markuzi ravine exposures, the Sēlija Member, and other locations), which suggests the gradual and periodic impact of tidal processes on carbonate sedimentation. In the carbonate rocks of the Sēlija Member, a distinction is made between zone Z (northeasterly direction) and Zone X (westerly direction). Cyclic and tidal influences (including tidal rhythms) on carbonate sedimentation were observed in the northeastern part of the study area. Indications that the connection to the open ocean was in the northeast and a circumscribed basin was in the west can be determined by the number of laminae (Irwin, 1965).

Carbonate rocks with detrital remains were found to be more common towards the southwest and in the central part of the study area – in the Vizūļi cliff (Sēlija Member), cyclically also in the Randāti cliffs locality (Atzele Member). These areas correspond to the local Y-zone (Irwin, 1965). The scoured material shows a reef slope facing the open sea located to the west. However, distinct storm layers, such as conglomerates or breccias, were found in the northeastern part of the study area and, in one case, in the western part, i.e. at the top of the exposure of the Marinova quarry (corresponding to the end of the Atzele time) and in the middle of the Īļāki cliff (corresponding to the middle of the Sēlija time). The correlation between the detritus of organisms found in the Vizūļi cliff and the storm layer (breccia) found in the Īļāki cliff indicates that during the Sēlijas time there was a Y zone (Irwin, 1965) facing the open sea in this area. This is not indicative of a reef; however, no reef characteristics have been found, such as distinct organogenic carbonate rocks, were identified. It is likely that this local uplift can be classified as a carbonate shoal with its slope facing the open sea (to the southwest, south). The interpretation of the conglomerate studied in the upper part of the Marinova quarry suggests that there was a local, small reef covered with carbonate sediments (organogenic carbonate rocks are rich in stromatoporoids, gastropods, barchiopods, corals, crinoids, and other organisms). This was evidenced by the fact that the conglomerate was composed of rounded limestone fragments. There is also gradation layering in which the size of the lithoclasts increases downwards (it should also be noted

that the lithoclasts lie on top of the previous layer). The conglomerates studied in the upper part of the Marinova quarry exposure indicate a distinct Y-zone-type sedimentation: a reef slope with a high hydrodynamic regime.

In the lower part of the Atzele Member (northeast of the study area), thicker, massive dolomitic layers with fewer remains of organisms occur, which is consistent with the conclusions of earlier studies that the Late Devonian maximum transgression episode (Sorokin, 1978; Sorokin, 1981) was localized at the beginning of the Atzele period. According to the author, an exception is the Marinova locality, where there was a reef of the local type, mentioned earlier.

Ooid shoals are thought to have developed episodically in the vicinity of Īļāki cliff and Vizuļi cliff during the Sēlijas time (Li *et al.*, 2019), as evidenced by locally abundant ooid assemblages. During the same period (Sēlijas Member), breccias were found in the Kalameci and Markuzi ravine exposures, suggesting a possible palaeokarst distribution in the area – these processes occur in areas subject to more abrupt changes in basin water levels – water levels have fallen (presumably also ooid shoals or tidal flats). The Atzele carbonate rocks also have a distinction between Zone Z and Zone X, the zonation of these zones partly coinciding with the zonation of the Sēlija carbonate rocks according to Irwin's classification (Irwin, 1965).

During the Ape period, sedimentation conditions were calm (no detritus, storm layers or other structures characterizing an active hydrodynamic environment), but water depths have changed over time, as indicated by the distribution of layered carbonate rocks in some places, both in the far northeast (the exposure of the abandoned Ape dolomite quarry) and in the west (the small exposure of the Riežupe cliffs).

As pointed out in the relatively recent literature on Devonian sedimentary rocks in Latvia (Lukševičs, Stinkulis, 2018b; Pontén, Plink-Björklund, 2007), at that time the specifics of water exchange between the Baltic Devonian continental basin and the rest of the world ocean were not yet clear.

This thesis concludes that layered dolomites and similar sediments (FA1) correspond to Zone Z (after Irwin 1965), which is inland from the active hydrodynamic regime zone (Zone Y, after Irwin 1965). The distribution of organic-rich (mainly FA2) carbonate rocks generally increases towards the west and southwest, which is classified as Zone X of the carbonate platform. Thus, contrary to what Sorokin and Brangulis (Sorokin, 1978 and 1981; Brangulis, 1998) suggested in their studies in the last century, it can be concluded that the basin connection to the world ocean during the Devonian Pļaviņas time was located southwest of the study area. Already in year 2012, Prof. Dr. Ervīns Lukševičs and colleagues (Lukševičs *et al.*, 2012) pointed to features suggesting that the open connection to the world ocean during Sēlija and Atzele periods was located in the southwestern and southern direction (present-day territory of Poland). The results obtained by the author of this thesis and interpretation of the data confirm this.

5. CONCLUSIONS

Summarizing the results obtained in the doctoral thesis study on sedimentation conditions and their characteristics during the Pļaviņas time in the central part of the Baltic Palaeobasin, the data and results obtained during the research allow to draw the following conclusions:

- Organism associations, ichnofossils, carbon and oxygen stable isotope data indicate that the carbonate rocks of the Pļaviņas Formation in Latvia and southeastern Estonia were formed in marine conditions;
- The sedimentary rocks of the Koknese Member and the lower part of the Sēlija Member were formed in the middle and upper intertidal zones. A significant amount of clayey material was deposited into the basin at this time, and the presence of halite pseudomorphs indicates that an aride climate prevailed during the early stage of Koknese time;
- Sedimentation conditions in the upper and middle parts of the Sēlija Member and the Atzele Member were variable during the formation of the sediments, but the lower intertidal zone dominated. This indicates that a slight rise in the water level in the basin started during the Sēlija period and continued at the beginning of the Atzele time, as shown by the increasing thickness of the cycles in the geological section of the Kalameci and Markuzi ravine exposures and in the section of the Dārziems dolomite quarry;
- During the sedimentation of the carbonate rocks of the Ape Member, sedimentary conditions were calm, mainly open sea conditions, and it is likely that a periodic basin transgression developed, starting in the Sēlija period and continuing into the Atzele period, but it was smaller in magnitude, as the maximum transgression episode occurred at the beginning of the Atzele period;
- Sedimentation processes in the study area were periodically affected by storm activity during the Pļaviņas period, but sedimentation conditions were mainly calm to relatively active. The most pronounced storm layer was found at the upper part of the Marinova quarry exposure, where a conglomeratic storm layer (tempestite) formed, corresponding to Zone Y according to Irwin's (1965) classification;
- Sedimentation processes in the Pļaviņas period were also influenced by short episodes of subaerial exposures, when desiccation cracks and other structures were formed;
- In the northeastern part of the study area, the observed cyclicity of sediments during the Pļaviņas period indicates on water depths of up to about 1.6 m. The cycles are most likely the result of progradation of parts of the carbonate platform, as the rest of the basin shows no evidence of cyclicity in relation to water-level fluctuations;

- The bulbous stromatoporoid fossils found in the carbonate rocks studied, their size and position, indicate sedimentation in lagoonal or offshore conditions (smaller stromatoporoid remains) or on a reef slope facing the open sea; in both cases, they are overturned or subducted and arranged “in chains,” in other places also chaotically, suggesting the influence of wave action (often also storm episodes) on sedimentation;
- Dolomitization processes and recrystallization of dolomite significantly influenced the initial textures, structures, and chemical and mineral compositions of the carbonate rocks studied, as confirmed not only by field studies but also by XRD, XRF, TOC, and carbon and oxygen stable isotope analyses;
- During the sedimentation processes, the Pļaviņas basin has been characterized by oxic shallow seabed conditions and medium organic activity (oligotrophic conditions). The dolomite layers of the middle and upper parts of the Randāti cliffs studied, as well as the dolomite layers of the entire geological section of the Riežupe large exposure, initially had a higher content of organic matter, but this was reduced by oxidation;
- During the Sēlija and Atzele periods, there was a part of the basin that was enclosed to the northeast, but that does not exclude the possibility that the enclosed part could also been in the south and southwest directions. Nevertheless, in the south and southwest directions, there are more indications that lead to the conclusion of an open-type basin (dolomites rich in organisms);
- The sedimentary rocks generally show little variation in composition, structure, and the assemblages of organisms they contain over their distribution area, suggest an epicontinental platform in the central part of the Baltic Palaeobasin during the Pļaviņas period;
- Tidal processes have had a significant influence on the sedimentary conditions of the Sēlija, Atzele, and Ape Members.

ACKNOWLEDGEMENTS

The research has been carried out with the financial support of the European Social Fund Project University of Latvia grant No. 8.2.2.0/20/I/006, “Strengthening of the capacity of doctoral studies at the University of Latvia within the framework of the new doctoral model” registration number ESS2021/434.

I would like to express my deepest gratitude to the scientific supervisor of this thesis, Ao. Prof. Dr.geol. Ģirts Stinkulis for his advice, healthy criticism and selfless help throughout the whole study. We would also like to thank Professor Geol. Ervīns Lukševics for his advice in the determination of the remains of organisms in the initial phase of the study. Thanks to Dr.geol. Sandijs Meškis for cooperation in preparation of several reports and assistance in identification of trace fossils at the study sites of interest. We would also like to thank Professor Geol. Michael Wagreich and A. Prof. Dr.geol. Sussanne Gier for hosting, advising, and allowing the use of the laboratory for the XRD, XRF, *Biomarker* and TOC analyses.

Thanks also to Dr.geol. Tõnu Martma from Tallinn University of Technology (Estonia) for his help with oxygen and carbon stable isotope analyses.

I would also like to thank my family, including my wife Linda Danefelde, for their patience, understanding, and support.

LITERATŪRAS SARAKSTS

LIST OF REFERENCES

- Aderoju, T., Bend, S. 2018. Reconstruction of the palaeoecosystem and palaeodepositional environment within the Upper Devonian – Lower Mississippian Bakken Formation: A biomarker approach. *Organic Geochemistry* 119 (2018), 91–100.
- Amthor, J. E., Mountjoy, E. W., & Machel, H. G. (1993). Subsurface dolomites in Upper Devonian Leduc build-ups, central part pr Rimbey-Medowbrook reef trend, Alberta, Canada. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 41, 164–184.
- Azami, S. H., Wagreich, M., Mehrizi, M. M., Gharai, M. H. M., Gier, S., Leckie, M. R. 2021. Sedimentology and sediment geochemistry of the pelagic Paryab section (Zagros Mountains, Iran): Implications for sea-level fluctuations and paleoenvironments during the late Paleocene to Middle Eocene. *Arabian Journal of Geosciences*. 14: 1032.
- Brangulis, A., Kuršs, V., Misāns, J., Stinkulis, Ģ. 1998. *Geology of Latvia*. Riga: State Geological Survey 70.
- Bush, M.A., Csonka, J.D., DiRenzo, G.V., Over, D.J., Beard, J.A., 2015. Revised correlation of the Frasnian-Famennian boundary and Kellwasser Events (Upper Devonian) in the shallow marine paleoenvironments of New York State. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 433 (2015), 233–246.
- Colombie, C., Lecuyer, C., & Strasser, A. (2010). Carbon and oxygen isotope records of palaeoenvironmental and carbonate production changes in shallow marine carbonates (Kimmeridgian, Swiss Jura). *Geological Magazine*, 148, 133–153.
- Da Silva, A.C., De Wleeschouwer, D., Boulvain, F., Crucifix, M., Claeys, P. 2011. Precessional and semi-precessional climate forcing of the mid-Devonian monsoon-like dynamics. *Climate of the Past*, 8, 337–351.
- Da Silva, A.C., Boulvain, F. (2004). From paleosols to carbonate mounds, the facies and environments of the Middle Frasnian platform in Belgium. *Geological Quarterly*, 2004, 48 (3): 253–266.
- De Winter, J.N., Claeys, P. 2016. Micro X-ray fluorescence (IXRF) line scanning of Cretaceous rudist bivalves: A new method for reproducible trace element profiles in bivalve calcite. *Sedimentology*, 1–21.
- Flügel, E. 2004. *Microfacies of carbonate rocks: analysis, interpretation and application*.
- Garland, J. 1997. *Middle to Upper Devonian (Givetian and Frasnian) Shallow-Water Carbonates of Western Europe: Facies Analysis and Cyclicity*. Doctoral thesis. University of Durham.
- Gravitis V. A. 1967. *About the facial changes of the carbonate part of the French Jurassic in the Gulben Depression and on its northern and eastern defenses. Voprosy geologii srednego i verhnego paleozoja Pribaltiki [Problems of the geology of the Middle and Upper Paleozoic of Pribaltika]*. Under ed. Egorov D.F. – Riga' pp. 54–84.
- Guangquan, Z., & Lidong, M. (2021). Sedimentary facies of the clastic platform carbonate sediment strata of the epicontinental sea in the Daniudi Gasfield, Ordos Basin. *Natural Gas Industry B* 8 (2012), 239–251.

- Gutteridge, P. 1989. Control of carbonate sedimentation in Brigantian intrashell basin (Derbyshire). *Yorkshire Geological Society, Occasional Publications*, No. 6, p. 171–187.
- Hardy, R. G., & Tucker, M. E. (1988). X-ray powder diffraction of sediments. *Techniques in Sedimentology*, 121–122.
- Immenhauser, A. 2009. Estimation of paleo-water depth from physical rock records. *Earth-Science Reviews*, 96 (2009), Elsevier, 107–139.
- Irwin, M. W. 1965. General theory of epeiric clear water sedimentation. *AAPG Bulletin*, 49, 4, 445–459.
- James, N. P., Jones, B. 2016. *Origin of Carbonate Sedimentary Rocks*. John Wiley & Sons, 320 p.
- Jones, B. 2005. Dolomite crystal architecture: Genetic implications for the origin of the Tertiary dolostones of the Cayman Islands. *Journal of Sedimentary Research*, 75, 177–189.
- Kershaw, S., Mõtus, M. 2016. Paleoecology of corals and stromatoporoids in a Late Silurian biostrome in Estonia. *Acta Palaeontologica Polonica* 61 (1): 33–50.
- K. Kleesment, K. Urtson, T. Kiipli, T. Martma, A. Poldvere, T. Kallaste, A. Shogenova, and K. Shogenov, 2013. Temporal evolution, petrography, and composition of dolostones in the Upper Devonian Pla vinas Regional Stage in southern Estonia and northern Latvia. *Estonian Journal of Earth*
- O'Connell, L. G., James, N. P., & Bone, Y. (2012). The Miocene Nullarbour Limestone in southern Australia was deposited on a vast subtropical epeiric platform. *Sedimentary Geology*, 253–254. 1–16.
- Laya, J. C., Tucker, M. E. 2012. Facies analysis and depositional environments of Permian carbonates in the Venezuelan Andes: Paleogeographic implications for Northern Gondwana. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 331, 1–26.
- Land, L.S., 1980. The isotopic and trace-element geochemistry of dolomite are state-of-the-art. In: Zenger, D.H., et al. (Editor.) Concepts and Models of Dolomitization. *Society of Economic Paleontologists and Mineralogists (SEPM), Special Publication*, 28, 87–110, Tulsa, Oklahoma.
- Li, F., Gong, Q., Burne, R.V., Tang, H., Su, C., Zeng, K., Zhang, Y., Tan, X. 2019. Ooid factories operated under hothouse conditions during the earliest Triassic in South China. *Global and Planetary Change*, 172 (2019), 336–354.
- Li, Q., Jiang, Z., Hu, W., You, X. 2015. Origin of dolomite in Middle Triassic Zhouchongcun Formation, Central Lower Yangtze Region, Southeast China. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, 1:89–100.
- Liepin'sh P. P. 1963. *Usloviya formirovaniya franskiikh otlozhenij Pribaltiki [The formation of the Frankish territories of the Baltic]*. Franskije otlozhenija Latvijskoj SSR. Riga' pp. 311–337.
- Luczynski, P. 1998. Stromatoporoid morphology in the Devonian of the Holy Cross Mountains, Poland: *Acta Palaeontologica Polonica* 43, 4, 653–663.
- Lukševičs, E., Ahlberg, P. E., Stinkulis, Ģ., Vasiļkova, J., Zupiņš, I. 2011. Frasnian vertebrate taphonomy and sedimentology of macrofossil concentrations from the Langsēde Cliff, Latvia. *Lethaia*, 45, pp. 356–370.

- Lukševičs, E., Stinkulis, Ģ. 2018a. Stratigraphic division, structure, composition, and regional differences in sedimentary cover; II, 3.1., Book.: Latvia. Latvia, Latvia. Nikodemus, O., Kļaviņš, M., Krišjāne, Z., Zelčs, V. (eds.). Riga: Academic Publishing House of the University of Latvia, pp. 38–58.
- Lukševičs, E., Stinkulis, Ģ. 2018b. Devonian and Carboniferous Sedimentary Basins II, 6.4. Earth, Nature, Nation, and State. Nikodemus, O., Kļaviņš, M., Krišjāne, Z., Zelčs, V. (eds.). Riga: Academic Publishing House of the University of Latvia, pp. 154–160.
- Lukševičs, E., Stinkulis, Ģ., Mūrnieks, A., Popovs, K. 2012. Geological evolution of the Baltic Artesian Basin. In. Riga University of Latvia, 7–52.
- Mackensen, A., & Schmiedl, G. (2019). Stable carbon isotopes in paleoceanography: atmosphere, oceans, and sediments. *Earth-Science Reviews*, 197, 102893.
- Masse, J.P., Fenerci, M., & Pernarcic, E. (2003). Paleobathymetric reconstruction of peridial carbonates Late Barremian, Urgonian, sequences of Procence (SE France). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 200 (2003), Elsevier, 65–81.
- Messadi, A.M., Mardassi, B., Ouali, J.A., Touir, J., 2016. Sedimentology, diagenesis, clay mineralogy, and sequential analysis model of the Upper Paleocene evaporite-carbonate ramp succession from the Tamerza area (Gafsa Basin: Southern Tunisia). *Journal of African Earth Sciences*, 118 (2016), 205–230.
- Nichols, G. 1999. *Sedimentology and Stratigraphy*. Blackwell Science. 229–240.
- Pemberton, S.G., Frey, R.W. 1982. Trace fossil nomenclature and the Planolites–Paleophycus dilemma. *Journal of Palaeontology*, 56, 843–881.
- Pontén, A., Plink-Björklund, P. 2009. Regressive to transgressive transitions reflected in tidal bars in the Middle Devonian Baltic Basin. *Sedimentary Geology*, 218, 48–60.
- Reading, H. G., & Collinson, J. D. (1996). Clastic coasts. In: Reading, H. G. (ed), *Sedimentary Environments: Processes, Facies and Stratigraphy*. Blackwell Science, 154–231.
- Racki, G. 1993. Brachiopod assemblages in the Devonian Kowala Formation of the Holy Cross Mountains. *Acta Palaeontologica Polonica* 37 (2–4), 297–357.
- Richardson, C.A., Peharda, M., Kennedy, H., Kennedy, P., Onofri, V. 2004. Age, growth rate, and season of recruitment of *Pinna nobilis* (L) in the Croatian Adriatic were determined from the Mg:Ca and Sr:Ca shell profiles. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 299, 1–16.
- Sharp, Z.D. 2017. *Principles of Stable Isotope Geochemistry*. Upper Saddle River, N.J.: Pearson/Prentice Hall.
- Shen, J.W., Webb, G.E., Jell, J.S. 2008. Platform margins, reef facies, and microbial carbonates: A comparison of Devonian reef complexes in the Canning Basin, Western Australia, and Guilin region, South China. *Earth-Science Reviews* 88 (2008), 33–59.
- Sorokin, V. S. 1978. *Etapy razvitiya severo-zapada Rossiiskoi platformy v franskom veke [Stages of development of the north-west of the Russian platform in the Frankish age]*. Riga' 282 p.
- Sorokin, V. 1997. Plavinas Formation. Book. *Encyclopedia of Latvian Nature. Volume 4*. Preses nams Rīga, 160–167.

- Stinkule, A., Stinkulis, G. 2017. *Latvian quartz sands*. Academic Publishing House of the University of Latvia, 77, pp.
- Stow, A.W.D. 2007. *Sedimentary Rocks in the Field*. Manson Publishing.
- Teedumae A, Shogenova A, Kallaste T. Dolomitization and sedimentary cyclicity of the Ordovician, Silurian, and Devonian rocks in South Estonia. *Proc. Estonian Acad. Sci. Geol.* 55, 1, 67–87.
- Tucker, M. E., and Wright, V. P. (1990). *Carbonate Sedimentology*. Blackwell Scientific Publications, 482 p.
- Veizer, J. 1983. Trace elements and isotopes in sedimentary carbonates. *Reviews in Mineralogy*, 11.
- Vincent, B., Rambeaur, C., Emmanue, L. & Loreau, J. (2006). Sedimentology and trace element geochemistry of shallow-marine carbonates: An approach to palaeoenvironmental analysis along the Pagny-sur-Meuse Section (Upper Jurassic, France). *Facies*, 52(1): 69–84.
- Warren, J. 2018. Stable isotopes in evaporite systems: Part II – d13C (Carbon). Salty matter (Saltwork Consultants. com).
- Watkins, R. 1975. Silurian brachiopods in stromatoporoid biofilms *Lethaia*, Vol. 8, 53–61.
- Wendte, J., Uyeno, T. 2005. Sequence stratigraphy and evolution of the Middle to Upper Devonian Beaverhill Lake strata in south-central Alberta. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 53, 250–254.
- Wright, V. P. and Burchette, T. P. (1996). Shallow-Water Carbonate Environments. In. *Sedimentary environments: processes, facies and stratigraphy*. 3rd edn. Oxford: Blackwell Science. 325–394.
- Xu, Y., Hu, X., Garzanti, E., Sun, G., Jiang, J., Li, J., Zhang, S., Schlagintweit, F., Rao, Z. 2023. Carbonate factories and their critical control over carbonate platform geometry (mid-Cretaceous, southern Iran). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 635 (2023), 111680.

Nepublicētie avoti / Unpublished sources

- Hodireva, V. 1997. *Latvijas Devona dolomītu litoloģiski rūpnieciskie tipi*. Promocijas darbs ģeoloģijas doktora grāda iegūšanai vispārīgās ģeoloģijas apakšnozarē. Rīga, LU./ Hodireva, V. 1997. *Lithological-industrial types of Latvian Devonian dolomites*. Thesis for the degree of Doctor of Geology in the sub-discipline of general geology. Riga, Latvia.
- Meškis, S. 2013. Pēdu fosiliju kompleksi galvenā devona lauka Franas stāva nogulumos. Disertācija. *Disertationes Geologicae Universitas Latviensis*, Nr. 26. / Meškis, S. 2013. Foot fossil complexes in the main Devonian field Frana Stage sediments. Dissertation. *Disertationes Geologicae Universitas Latviensis*, No.26.
- Stinkulis, G. 1998. *Latvijas devona klastisko-karbonātiežu un kaļķakmeņu-dolomītu pārejas zonu sedimentoloģija un mineraloģija*. Promocijas darbs. Rīga, LU. / Stinkulis, G. 1998. *Sedimentology and mineralogy of the Devonian clastic-carbonate-rock and limestone-dolomite transition zones of Latvia*. PhD thesis. Riga, Latvia.