



# **Ordoviitsiumi Zebre kihistu stratigraafia ja kasutatavus Lõuna-Eestis**

Magistritöö

Üliõpilane: Aileen Umal

Üliõpilaskood: LARM231982

Juhendajad: Prof Olle Hints

Tavo Ani, Eesti Geoloogiateenistuse vanemgeoloog

Õppekava: Maa süsteemid ja geotehnoloogia

#### Autorideklaratsioon

Kinnitan, et olen koostanud antud lõputöö iseseisvalt ning seda ei ole kellegi teise poolt varem kaitsmisele esitatud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on töös viidatud.

Autor: Aileen Umal

14.01.2026

Töö vastab magistritööle esitatavatele nõuetele.

Juhendaja: Olle Hints

14.01.2026

## Sisukord

|                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------|----|
| Annotatsioon .....                                                         | 4  |
| Abstract .....                                                             | 5  |
| Sissejuhatus .....                                                         | 6  |
| Geoloogiline taust .....                                                   | 7  |
| Uuringuala .....                                                           | 10 |
| Stratigraafia .....                                                        | 11 |
| Alam-Ordoviitsiumi stratigraafia Eestis ja Lätis.....                      | 12 |
| Pakerordi lade (ülemine osa) .....                                         | 12 |
| Kallavere kihistu .....                                                    | 12 |
| Türisalu kihistu .....                                                     | 13 |
| Varangu lade.....                                                          | 13 |
| Hunnebergi ja Billingeni lade.....                                         | 14 |
| Leetse kihistu.....                                                        | 15 |
| Toila kihistu.....                                                         | 15 |
| Zebre kihistu .....                                                        | 15 |
| Võrreldavad stratigraafilised üksused Skandinaavias .....                  | 18 |
| Björkasholmeni kihistu .....                                               | 18 |
| Bruddesta kihistu.....                                                     | 18 |
| Alam-Ordoviitsiumi biostratigraafia .....                                  | 19 |
| Materjal ja meetoodika .....                                               | 21 |
| Röntgendifraktsioonanalüüs (XRD) ja röntgenfluorestsentsanalüüs (XRF)..... | 22 |
| Optiline mikroskoopia .....                                                | 23 |
| Biostratigraafia .....                                                     | 23 |
| Tulemused .....                                                            | 24 |
| Zebre kihistu Aizpute-41 puuraugus .....                                   | 24 |
| Uuritud proovide litoloogiline iseloomustus.....                           | 26 |
| Geokeemia ja mineraloogia.....                                             | 27 |
| Alam-Ordoviitsiumi kivimid Lõuna-Eestis.....                               | 31 |
| Uuritud proovide litoloogiline iseloomustus.....                           | 31 |
| Geokeemia ja mineraloogia.....                                             | 36 |

|                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------|----|
| Arutelu.....                                                            | 40 |
| Zebre kihistu alternatiivid.....                                        | 43 |
| Bjørkasholmeni kihistu .....                                            | 43 |
| Leetse kihistu.....                                                     | 44 |
| Varangu kihistu esinemine Lõuna-Eestis.....                             | 47 |
| Järeldused ja kokkuvõte .....                                           | 48 |
| Tänu sõnad .....                                                        | 50 |
| Kasutatud kirjandus.....                                                | 51 |
| Lisad.....                                                              | 56 |
| Lisa 1. Proovide koondtabel .....                                       | 56 |
| Lisa 2. AU24 prooviseeria XRF tulemused kasutades sulatusmeetodit ..... | 57 |
| Lisa 3. AU24 prooviseeria XRF tulemused kasutades pulbermeetodit .....  | 58 |
| Lisa 4. AU24 prooviseeria XRD tulemused .....                           | 61 |
| Lisa 5. Aizpute-41 puursüdamiku kastid 57–64.....                       | 62 |
| Lisa 6. Petseri 330 puursüdamiku proovid Zebre intervallist.....        | 66 |

## Annotatsioon

Ordoviitsiumi ajastul (u 487-443 mln a tagasi) toimusid murrangulised sündmused planeedi keskkonnas ja elu arengus. Ordoviitsiumi merelised sette kivimid on levinud kõikjal Eestis ning tänu terviklikkusele, heale säilivusele ja kivististerohkusele kujutavad need endast unikaalset Maa ajaloo arhiivi. Mitmed Eestile olulised maapõueressursid on samuti seotud Ordoviitsiumi kivimitega, sh kukersiitpõlevkivi, fosforiit, lubjakivi ja põhjaveekihid. Põhja-Eestis, kus asub Ordoviitsiumi avamus ja paljandid, on ajastu kivimid põhjalikult uuritud ja nende stratigraafiline liigestus üks detailsemaid maailmas. Seevastu Lõuna-Eestis, kus Ordoviitsiumi kihid lasuvad sadade meetrite sügavusel, pärineb kogu teave üksikutest puuraukudest ja piirkonna stratigraafiline klassifikatsioon on üldisem ning esineb lahendamata küsimusi kivimite litoloogia, vanuse ja leviku kohta. Ebaselge stratigraafia on takistuseks maapõue geoloogilisel kaardistamisel ning takistab ka geoloogilise arenguloo detailide mõistmist.

Käesoleva töö fookuses on hallist ja punasest mudakivist koosnev kuni 46 m paksune Zebre kihistu, mille stratotüübid ning tüüpala asuvad Lätis, kuid mis stratigraafiliste skeemide ja levikukaartide järgi esineb ka Lõuna-Eestis, vastates seal suuremale osale Alam-Ordoviitsiumi ladestikust. Eesti Geoloogiateenistuse poolt läbiviidava geoloogilise kaardistamise ja stratigraafiliste üksuste revisjoni käigus ilmnes, et Zebre nime kasutamine Lõuna-Eesti tugiläbilõigetel on ebapiisavalt põhjendatud ja vastuoluline. Antud töö eesmärgiks oli pakkuda olukorrale lahendusvõimalusi ning vajadusel täpsustada või täiendada stratigraafilisi skeeme ja kihistute levikukaarte. Selleks uuriti ja iseloomustati Zebre kihistu läbilõiget stratotüüpsel alal Lääne-Lätis Aizpute-41 puuraugu näitel, kasutades litoloogilisi kirjeldusi, mineraloogilisi (XRD) ja geokeemilisi (XRF) analüüse ning andmeid biostratigraafiliselt oluliste konodontide leviku kohta. Koondati andmestik Zebre nime kasutamisest Eestis ning analüüsiti selle nime all kirjeldatud kihte valitud Eesti puursüdamikes (Põlva, Kuressaare, Ruhnu, Võru, Taagepera jt). Tähelepanu pöörati ka lamavate (Kallavere kihistu) ja lasuvate kihtide (Kriukai kihistu) litoloogiale, Alam- ja Kesk-Ordoviitsiumi biostratigraafiale ning korrelatsioonile Põhja-Eesti läbilõikega.

Läti stratotüüpse Zebre kihistu ja Eestis sama nime all kirjeldatud kihtide võrdlus näitas, et suuremal osal Lõuna-Eestis ei ole Zebre nime kasutamine litoloogiliselt põhjendatud ja sellest tuleks geoloogilisel kaardistamisel ning stratigraafilises skeemis loobuda. Alternatiivsete võimaluste hulgas on Skandinaavias levinud Bjørkasholmeni ja Köpingsklinti nime kasutuselevõtt, kuid kõige otstarbekam oleks laiendada Leetse kihistu kasutamist Põhja- ja Kesk-Eestist lõuna poole. Zebre kihistu võimalik esinemine Eesti-Läti piiri läheduses vajab täiendavaid andmeid. Käesoleva töö käigus ilmnes, et uuematel Ordoviitsiumi stratigraafilistel skeemidel on nii Zebre kui Leetse kihistu ajalist mahtu kujutatud tegelikust väiksemana ning stratigraafiline lünk Alam-Ordoviitsiumis seetõttu väiksem kui seni arvatud. Zebre kihistu ülemine osa kuulub Kesk-Ordoviitsiumisse. Töö tulemusena on antud soovitused Eesti ja Läti Ordoviitsiumi stratigraafiliste skeemide ning kihistute levikukaartide parandamiseks.

## Abstract

The Ordovician period (approximately 487–443 million years ago) was a transformative interval in Earth's environmental history and in the evolution of life. Ordovician marine sediments are widely distributed across Estonia and are characterised by exceptional integrity, preservation, and fossil content, making them a valuable archive of Earth's history. Numerous important natural resources are associated with Ordovician lithologies, including kukersite oil shale, phosphorite, limestone, and groundwater aquifers. In northern Estonia, where Ordovician strata are exposed at the surface, these rocks have been studied in great detail and exhibit one of the most refined stratigraphic records. In contrast, in southern Estonia, the Ordovician sequence lies hundreds of meters below the surface and is known only from sparse borehole data, resulting in a generalised stratigraphy and significant gaps in knowledge regarding lithology, age, and spatial distribution. This stratigraphic uncertainty poses a major challenge for geological mapping and obscures interpretations of regional geological history.

This study focuses on the Zebre Formation, which comprises up to 46 m of grey to red mudstones that are well developed in Latvia. According to existing stratigraphic schemes and distribution maps, the formation extends into southern Estonia, where it is interpreted to constitute a large part of the Lower Ordovician succession. However, a study conducted by the Estonian Geological Survey for the purposes of geological mapping and stratigraphic revision demonstrated that there is no clearly justifiable basis for applying the Zebre Formation to the intervals in question. The aim of this thesis is to propose revisions to, and, where necessary, to refine the current stratigraphic schemes and maps. The Aizpute-41 drill core from the stratotypic area in western Latvia was examined and characterised using detailed lithological descriptions, mineralogical (XRD) and geochemical (XRF) analyses, as well as biostratigraphic data on conodonts. In addition, data related to the use of the Zebre Formation in southern Estonia were compiled, and lithological units assigned to the formation were analysed from Estonian boreholes, including Põlva, Ruhnu, Taagepera, and Kuressaare, etc. Additional attention was also given to the underlying Kallavere Formation and the overlying Kriukai strata, Lower and Middle Ordovician biostratigraphy, and correlations with northern Estonia.

Comparisons between the stratotypic Latvian Zebre Formation and strata assigned the same name in Estonia demonstrate pronounced lithological incompatibility across most of the studied area. For the purposes of geological mapping and stratigraphic standardisation, continued use of the Zebre Formation in most of South Estonia is therefore not recommended. As an alternative, the adoption of a Scandinavian formation, such as the Bjørkåsholmen or Köpingsklint formations, may be considered; however, the most practical solution appears to be the southward extension of the Leetse Formation. Additional data are required to more precisely constrain the distribution of the Zebre Formation near the Latvian border. During the course of this study, it became evident that recent Ordovician stratigraphic schemes assign a shorter temporal range to both the Zebre and Leetse formations, thereby reducing the previously perceived stratigraphic gap in the Lower Ordovician. The upper part of the Zebre Formation is now interpreted as belonging to the Middle Ordovician. Consequently, recommendations for revisions to Estonian and Latvian stratigraphic schemes and formation distribution maps are presented.

## Sissejuhatus

Eestis on Ordoviitsiumi ajastu väga hästi esindatud ja orogeneesist puutumata jäänud aluspõhja settekiivimid on säilinud suuresti tervikuna läbi sadade miljonite aastate. Suur osa Eesti Ordoviitsiumist koosneb karbonaatkiivimistest, mida kasutatakse ehitustoormena ja keemiatööstuses. Lisaks neile on Alam-Ordoviitsiumis esindatud potentsiaalsed maavarad nagu glaukonitliivakivi ja orgaanikarikas mudakivi (graptoliit-argilliit) ning minevikus väetise toormena kasutust leidnud fosforiit.

Ordoviitsiumi kiivimite levila katab terve Eesti, kuid avamus ja paljandid asuvad vaid Põhja-Eesti piires. Käesolev töö keskendub vähem uuritud Lõuna-Eesti Alam-Ordoviitsiumi kiivimite stratigraafiale ja nende levikule. Kiivimikihid ei ole Eesti piires homogeense levikuga: Põhja- ja Kesk-Eestis levinud kihistud asenduvad Lõuna-Eestis üksustega, mis on tuntud meie lõunanaabrite stratigraafias ja levikukaartidel ning Skandinaavias.

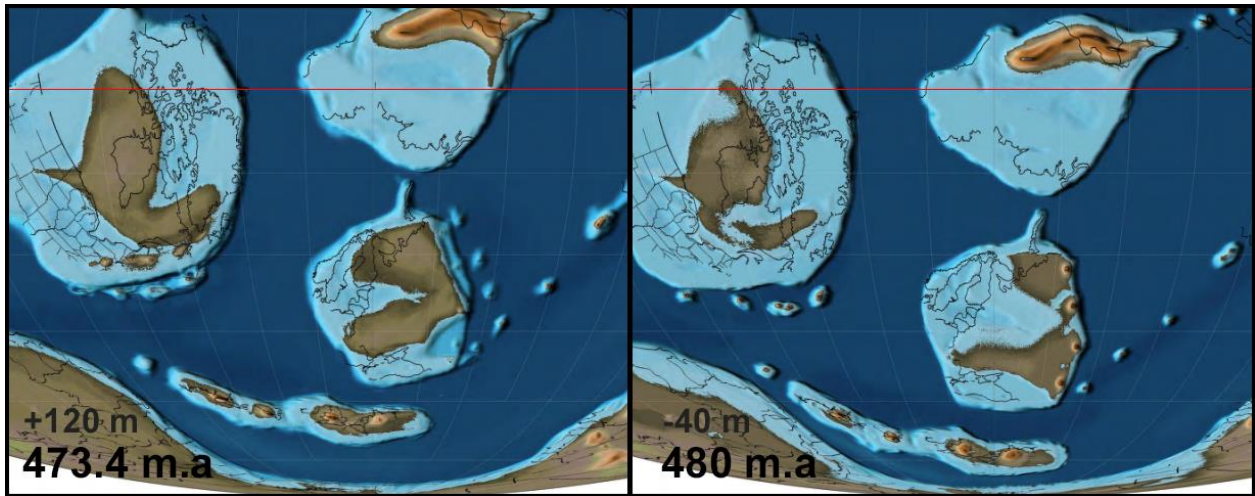
Stratigraafia kui kiivimiüksuste liigestamise süsteem on ajas muutunud. Sõltuvalt piiritlemise meetodite täpsusest, nõuetest ja relevantisusest on kihistute ajalised ja ruumilised piirid korduvalt muutunud ja muutuvad ka edaspidi. Mitmete stratigraafiliste tõlgenduste järgi on Lõuna-Eesti Alam-Ordoviitsiumist kirjeldatud üksuseid, mis ei vasta stratotüüpsetele kirjeldusele ning vajavad seetõttu revisjoni. Üheks selliseks üksuseks on Lätis püstitatud Zebre kihistu.

Magistritöö teema püstitus tekkis koostöös Eesti Geoloogiateenistusega. 2024. a suvel uurisin ametipraktika käigus koos Eesti Geoloogiateenistuse vanemgeoloog Tavo Ani ja Tartu Ülikooli professor Tõnu Meidlaga Lõuna-Eesti puursüdamikke ning geoloogilise kaardistamise jm uuringute raames kogutud andmestikku. Selle tulemusel ilmnas mitu ebakõla kasutusel oleva litostratigraafilise skeemi ja kiivimikehade levikukaartidega, millest suurim puudutab Zebre kihistut ja selle nimega kirjeldatud kiivimikihte mitmes Lõuna-Eesti puursüdamikus.

Käesoleva magistritöö eesmärgiks oli leida lahendus Zebre kihistu probleemile ning teha ettepanekud Eestis kasutusel oleva Ordoviitsiumi stratigraafilise skeemi täiendamiseks või täpsustamiseks. Selleks uuriti ja iseloomustati Zebre kihistu läbilõiget stratotüüpsel alal Lääne-Lätis Aizpute puuraugu näitel, koondati andmestik Zebre nime kasutamisest Eestis ning analüüsiti Zebre nime all kirjeldatud kihte Eesti puursüdamikes. Täiendavalt pöörati tähelepanu lamavate (Kallavere kihistu) ja lasuvate kihtide (Kriukai kihistu) litoloogiale ning Alam- ja Kesk-Ordoviitsiumi biostratigraafiale ja korrelatsioonile Põhja-Eesti läbilõikega. Töö on seotud TalTechi ja Tartu Ülikooli ühise teadusprojektiga, mille raames uuritakse konodontide levikut ja isotoopkoostist mineviku kliimamuutuste rekonstrueerimiseks hõlmates ka Zebre kihistut selle stratotüüpsel alal Lääne-Lätis.

## Geoloogiline taust

Ordoviitsiumi ajastu oli u 486.85 kuni 443.1 miljonit aastat tagasi (Hints jt, 2025). Eestis iseloomustab seda ligi 44 miljonit aastast kestnud perioodi valdavalt mereline keskkond. Käesoleva töö fookuseks on Vara-Ordoviitsiumi ajastik, mis vastab vanusele u 486.85 kuni 471.3 miljonit aastat tagasi. Praegused Eesti alad, mis asuvad Baltika laamal, paiknesid lõunapoolkeral (Joonis 1) kogu ajastu vältel. Alam-Ordoviitsium hõlmab esimest kolmandikku, ning erinevalt Kesk- ja Hilis-Ordoviitsiumi karbonaatsetest settekivimitest on Alam-Ordoviitsium esindatud Eestis valdavalt terrigeense kivimitega. Alam-Ordoviitsiumi stratigraafilised üksused on heterogeensemajad ja ilmestavad järske muutusi settekeskkonnas.



**Joonis 1.** Baltika paleokontinendi asukoht ja šelfimerede levik Alam-Ordoviitsiumis Scotese (2014) järgi. Baltika laam liikus ajastiku jooksul 55° laiuskraadilt ekvaatorile lähemale, millega kaasnes karbonaatsete setete osakaalu kasv.

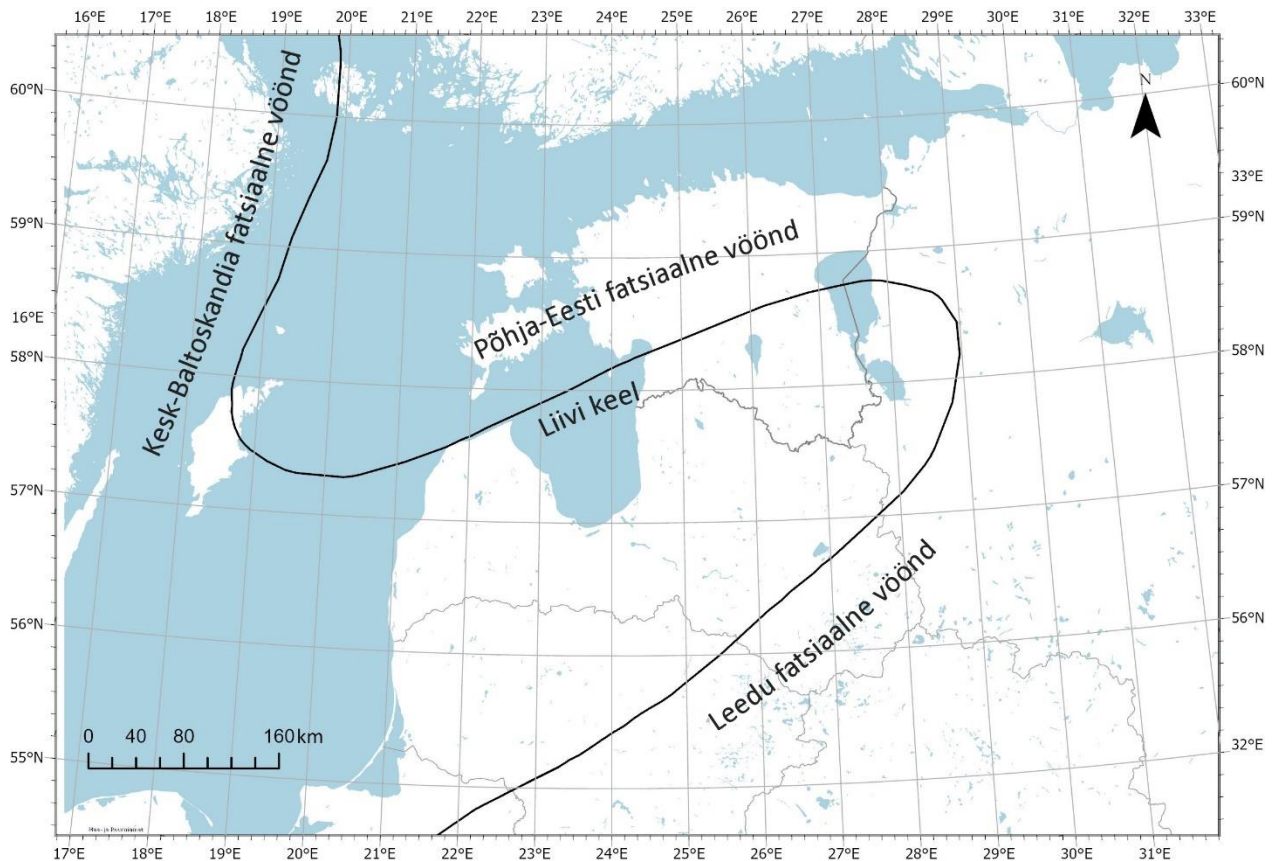
Ordoviitsiumi ajastu jooksul toimus palju olulisi muutusi keskkonnas ja elustikus. Elukeskkonda ja paleogeograafiat (Finney ja Berry, 2010) mõjutasid laamade liikumine, Hilis-Ordoviitsiumi lõpus toimunud Hirnantia jäätumine, ja regressioon Kesk-Ordoviitsiumis, nn Ordoviitsiumi elurikkuse sündmus (GOBE, *Great Ordovician Biodiversification Event*) ning endeemsed faunad, mida soodustas suuresti merelise keskkonna laiaulatuslik levik ja kontinentide kaugus üksteisest.

GOBE ajaline ulatus Maa ajaloos on vaidluse all, tegemist ei olnud ühe spetsiifilise sündmusega vaid sündmuste jadaga, mille tulemuseks oli liigirikkuse märkimisväärne kasv (Servais jt, 2021). Selline bioloogiline protsess toimus epikontinentaalsete alade piires (Fortey, 1984). Ordoviitsiumi mereline keskkond ulatus varasema kontinentaalse mandri peale transgressiooni käigus ja tekkis Ludvigseni (1982) defineeritud *Speciation area effect*. Šelfialadel elutsevad liigid asusid oma levikualadel ning neil oli üksteisega piiratud kokkupuude, mis soodustas kliima- ja piiratud liikide arvukust. Tekkisid liigid, mida Kambriumi ajastul ei leidunud, või mis olid kooslustes väheolulised nagu korallid, peajalgseid, okasnahkseid, ostrakoodid, sammalloomad, konodondid jt (Jaanusson, 1984).

Baltika paleokontinent oli Vara-Ordoviitsiumis tektooniliselt rahulik (Edward jt, 2021). Paleokontinent on moodustunud Arhaikumi ja Proterosoikumi kivimitest ümber Ida-Euroopa kraatoni, vanusega üle 3 miljoni aasta (Cocks ja Torsvik, 2005). See ulatub Skandinaaviast Uurali mägedeni ja hõlmab ka Balti riike, Põhja-



Poolat ja Ukrainat (Kersa, 2024). Paleokontinent jagunes piirkonniti erinevateks osadeks, uuritavate settekihtide levik on piiritletud Balti paleobasseiniga, ala katab Rootsit, Norrat, Balti riike ja otsaga ka Lääne-Venemaad. Paleobasseinis on litofatsiaalseks eristamiseks fatsiaalsed vööndid (joonis 2). Põhja-Eesti fatsiaalne vöönd piiritleb Põhja- ja Kesk-Eestile iseloomuliku litoloogiat Lõuna-Eestis levivast kirjuvärvilisest Läti üksuseid sisaldavast litoloogiast. Potentsiaalne seos Lõuna-Eesti Alam-Ordoviitsiumi setetega võib olla ka Ölandi saarel. Öland asub Kesk-Baltoskandia fatsiaalse vööndi (*Central Baltoscandian confacies belt*) piiridel (joonis 2), see levib Lõuna-Eestist Läti ja Rootsi.



**Joonis 2.** Ordoviitsiumi settebassein Baltialadel. Piir on tõmmatud Jaanusson (1995) järgi ja eraldab Kesk-Baltoskandia, Põhja-Eesti ning Leedu fatsiaalset vööndit. Aluskaart: Maa ja Ruumiamet, 2025.

Perioodil 500–450 mln a tagasi liikus Baltika u 55° laiuskraadilt 30° juurde. Sellega kaasnes karbonaatsete setete kasv, mida ei leidunud Alam-Ordoviitsiumis (Pohl jt, 2014). Paleokontinendi asendi muutus viis piirkonna lähemale soojadele ekvatoriaalaladele, mis suurendas ka murenemisprotsesside intensiivsust.

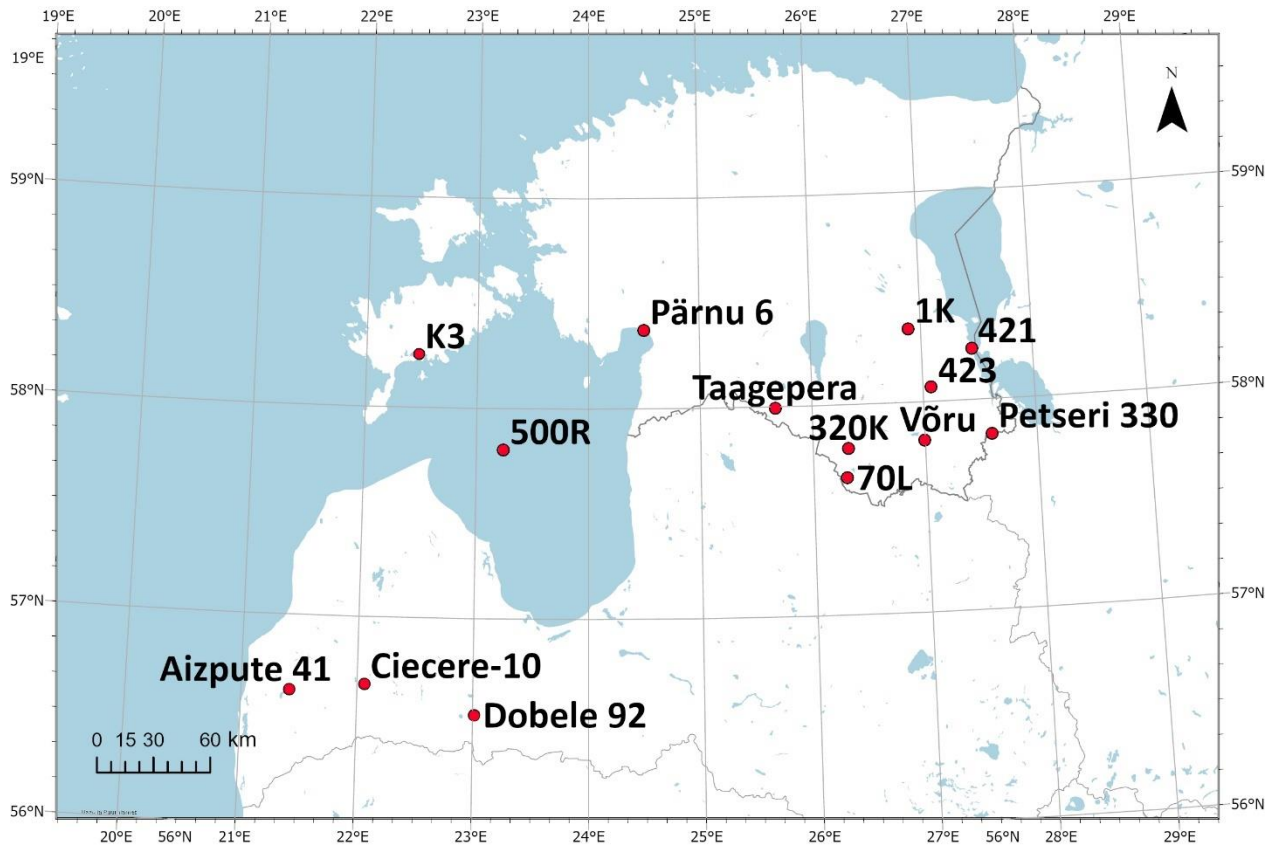
Kõige suurem mõju Vara-Ordoviitsiumi settekeskkondadele oli eustaatiliste meretaseme muutustel, teisisõnu regressioonidel ja transgressioonidel. Regressiooni käigus tekkivad settelüngad ja transgressiooni käigus kasvab settekeskkondade ulatus ning faatsiesed nihkuvad maismaa suunas. Eustaatilisi tsükleid kontrollivad glatsiaalsed protsessid ja muutused ookeaniaheline laamade lahkne mises (Fortey, 1984). Baltika paleokontinenti ümbritses edelast Tornquisti meri (Edward jt, 2021) ja loodes lapetuse ookean. Üldiselt oli suur osa Baltika paleokontinendist Vara-Ordoviitsiumi muutlik keskkond ja

settetingimused on mõjutanud Balti paleobasseinis levivate settekihtide leviku ulatust läbi aja, mis teeb stratigraafiliste üksuste defineerimise ja korreleerimise keeruliseks.

Vara-Ordoviitsiumi kliimat on tõlgendatud mitmeti. Eestis on seda kirjeldatud kui jahedaveelist terrigeense settimisega keskkonda (Meidla jt, 2014), kuid globaalselt oli Vara-Ordoviitsium kõige soojem periood Ordoviitsiumis (Gul jt, 2024). Alates Billingeni lademest lähevad madal mere purdsed settekivimid (liivakivid ja mudakivid) Kesk-Ordoviitsiumis üle karbonaatkivimiteks (lubja-dolokivid ja mergel). Vara-Ordoviitsiumi alguses on määratud paleotemperatuure ulatuses 40-35°C (Edward jt, 2021; Gul jt, 2024), temperatuuri hinnangud on saadud kasutades brahhiopoodides jäädvustunud hapniku isotoopkoostist.

## Uuringuala

Uuringupunktideks said valitud puursüdamikud, kus on kirjeldatud Zebre kihistut (joonis 3), otsimiseks kasutati Eesti Geoloogiateenistuse (2024) puuraukude rakendust ning Puursüdamike andmebaasi (Maa-Amet, 2024). Valimis on puursüdamikud Eestist ja Zebre kihistuga seotud puursüdamikud Lätist. Eesti uuringupunkte valides oli takistuseks Lõuna-Eesti vähene puuritus. Teine takistus oli seotud puursüdamike vanusega. Eelmisel sajandil puuritud südamike kvaliteet on üldiselt halb, eriti purdkivimite puhul, milles esinevad sageli suured puurimiskaod. Lisaks on pikka aega säilitatud ja paljude uurijate poolt kasutatud aleuriitne-savikas materjal lagunema hakanud ja osalt ka proovideks ära kasutatud.



**Joonis 3.** Töös uuritud puuraukude kaart, . 1K – Kaagvere 1, 421- Mehikoorma, 423 – Põlva, 70L – Laanemetsa ja 500R – Ruhnu 500. Aluskaart: Maa- ja Ruumiamet, 2025.

Kõik kaardil toodud puursüdamikud ei ole füüsiliselt olemas; näiteks Petseri 330 ei ole säilinud, kuid 2025. a leiti Arbavere ladudest Petseri käsipalad. Eesti-Läti piirile lähemale liikudes muutub olemasoleva informatsiooni leidmine keeruliseks. Karula 320K puursüdamik on hävinud, alles on ainult pildid käsipaladest ja puursüdamike fragmentidest andmebaasis. Läti piirile lähim puurauk joonisel 3 on Alam-Ordoviitsiumini ulatuv 495 m sügav 70L, mis teoreetiliselt sisaldaks huvialuseid kihistuid, kuid sellest ei ole säilinud südamikukaste, pilte ega käsipalad. Ainukesed kirjeldused Laanemetsa 70 puursüdamikust pärinevad vanadest Mens ja Kala (1963) koostatud geoloogilistest aruannetest.

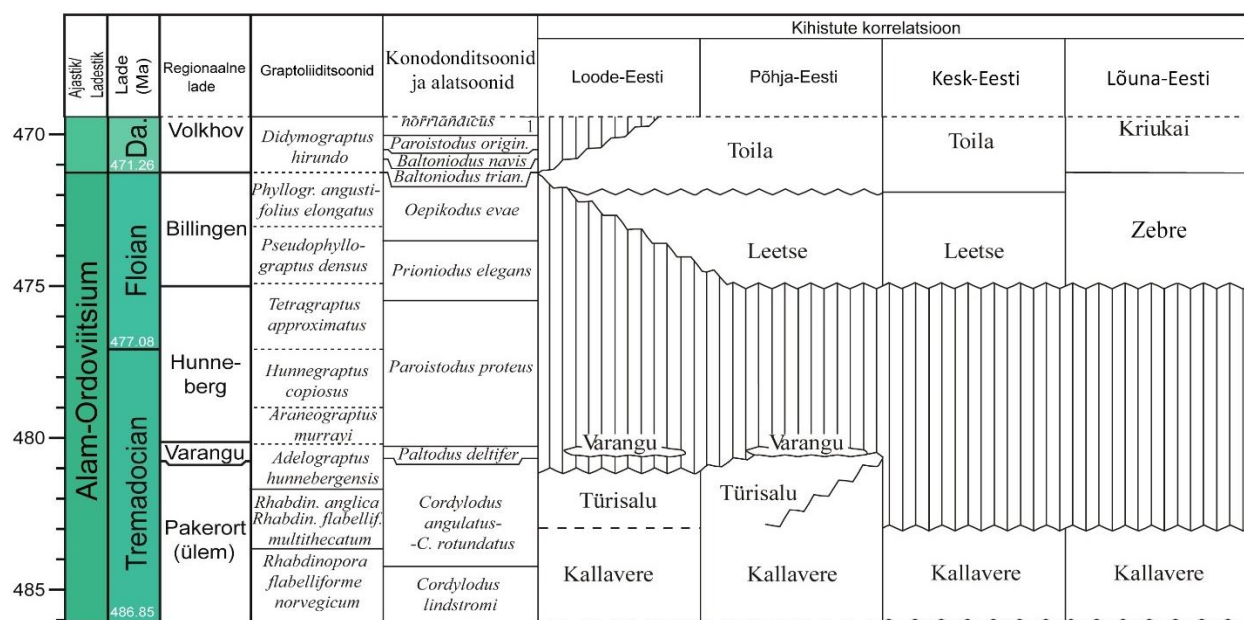
## Stratigraafia

Stratigraafia on teadus, mis keskendub kivimikomplekside kirjeldamisele ja liigestamisele nende vanuse, ruumilise leviku jt omaduste järgi (Murphy ja Salvador, 1999). Eristatakse kronostratigraafiat – liigestamine geo-kronoloogia ehk kivimikehade vanuse alusel, litostratigraafiat – kivimikomplekside liigestamine geoloogiliste tunnuste alusel, biostratigraafiat – liigestamine fosiilsete leidude ja liikide levikutsoonide järgi, sündmus-stratigraafia – korrelatsioon ja liigestamine dateeritavate sündmuste järgi nagu näiteks vulkaanipursked, kemostratigraafiat – liigestamine isotoopsignaalide järgi ja magnetostratigraafiat – liigestamine pooluste magnetvälja asendist kivimite tekkimise ajal. Selle töö fookuses on litostratigraafia ja biostratigraafia. Litostratigraafilised terminid on kihistu ja kihistik, millele vastavad kronostratigraafilised terminid ladestik ja lade.

Esimene detailsem Eesti Ordoviitsiumi stratigraafiline liigestus (joonis 4) pärinevad 19. sajandist C.F. Schmidt'i kirjeldustest, kes jaotas tänase Alam-Ordoviitsiumi geoloogilised üksused *unguliit*-liivakiviks (tuntud ka kui oobulusliivakivi), kildaks, glaukonitliiva- ja lubjakiviks ja Kunda lademe alumise osa *vaginat*-lubjakiviks. 20. saj alguses muutus nimetussüsteem ja üksused nimetati ümber stratotüüpsete paljandite järgi nagu Walchow ja Packerort (vana nimetus Pakri neemele). Joonisel 4 on 1994. a skeemil jaotus detailsem ja vastab põhiosas tänapäevasele kasutusele. Globaalse ajaskaala järgi vastab Alam-Ordoviitsiumile Pakerordi lademe ülemine osa, Varangu lade ning Hunnebergi ja Billingeni lade (joonis 5).

| Schmidt,<br>1858                | Schmidt,<br>1879; 1881            | Schmidt,<br>1897; 1898                                    | Raymond,<br>1916               | Bekker,<br>1922;1925 | Männil ja Meidla,<br>1994 |                              |
|---------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------------------------------|--------------------------------|----------------------|---------------------------|------------------------------|
| Vaginatenskalk                  | Vaginatenskalk B <sub>3</sub>     | <div>B<sub>III</sub> b</div> <div>B<sub>III</sub> a</div> | Kunda                          | Kunda lade           | Ölandi ladestik           | Kunda lade B <sub>III</sub>  |
| Chlortikalk                     | Glaukonit-kalk B <sub>2</sub>     | <div>B<sub>II</sub> b</div> <div>B<sub>II</sub> a</div>   | Walchow                        | Paldiski lade        |                           | Volhovi lade B <sub>II</sub> |
| Grünerde                        | Glaukonit-sand B <sub>1</sub>     |                                                           |                                |                      |                           | Packerort                    |
| Tonschiefer Unguliten Sandstein | Diktyonemaschiefer A <sub>3</sub> |                                                           | Varangu lade A <sub>III</sub>  |                      |                           |                              |
|                                 | Unguliten-sand A <sub>2</sub>     |                                                           | Pakerorti lade A <sub>II</sub> |                      |                           |                              |

**Joonis 4.** Eesti Alam-Ordoviitsiumi stratigraafia areng. Tabel koondatud Rõõmusoks (1997) kokku pandud originaaltabeli järgi.



**Joonis 5.** Alam-Ordoviitsiumi stratigraafilised üksused Eestis. Vertikaalsete triipude ala kujutab vastava ajalõigu kivimite puudumist (stratigraafilist lünka). Vähendatud versioon Stratigraafia Komisjoni Ordoviitsiumi stratigraafilisest skeemist (Meidla jt, 2023).

Viimane uuendatud Ordoviitsiumi stratigraafiline skeem (joonis 5) ilmus aastal 2024 (Meidla jt, 2024). Esinevad mõned erinevused joonisel 4 toodud Männil ja Meidla (1994) jaotusega, kadunud on Latorpi lade, mida asendavad Hunnebergi ja Billingeni lademed, muutunud on ka lademetes ajalisel piiri ja kestus. Põhja- ja Loode-Eesti Alam-Ordoviitsiumi stratigraafia hõlmab endas Kallavere, Türisalu, Varangu ja Leetse kihistut ning Toila kihistu alumist osa (Päite kihistik). Kesk-Eestis on Türisalu ja Varangu suidunud. Lõuna-Eestis sisaldab Alam-Ordoviitsium Kallavere ja Zebre kihistut. Eesti Geoloogiateenistuse stratigraafilistel skeemidel (2023) on esindatud sama liigendus.

## Alam-Ordoviitsiumi stratigraafia Eestis ja Lätis

### Pakerordi lade (ülemine osa)

#### Kallavere kihistu

Kallavere kihistus on esindatud (Heinsalu ja Viira, 1997a) vanimad konodontitsoonid Ordoviitsiumis. Kallavere kihistu on Lõuna-Eesti puursüdamikes nõrgalt tsementeerunud detriitse liivakivi kujul. Kesk- ja Põhja-Eestis esinevad kuni 15 cm paksused argilliitsed vahekihid on kahanenud lõunas vaid paari millimeetristeks lamellideks. Kallavere kihistu jaguneb kolmeks kihistikuks: Maardu, Suurjõe ja Orasoja. Praktikas on kihistikke keeruline eristada, valdav eristamine on asukohaliselt Põhja- ja Kirde-Eestis. Lõuna-Eestis on Kallavere kihistu iseloomult teistsugune ja tõenäoliselt vanem kui Põhja-Eesti läbilõiget iseloomustav Kallavere. Suurjõe kihistiku levila ei ulatu (Rõõmusoks, 1983) uuritud puursüdamikeni,

kaovad defineeritavad omadused nagu Maardu konglomeraatsed vahekihid ja selgelt eristatavad argilliitsed intervallid.

Kallavere kihistu konglomeraatset liivakivi iseloomustab (Heinsalu ja Viira, 1997a) lingulaatsete brahhiopoodide fosfaatsete kodade ja nende fragmentide esinemine (peamiselt perekondadest *Ungula* ja *Schmidtites*) mida seob liivateradega nõrk tsement. Eriti fossiilirikka liivakivi näol on tegemist karbifosforiidiga.

Lätis on Kallavere kihistu esindatud väiksema paksusega kui Eestis, kõige paksemad (üle kümne meetri paksused) Kallavere kihistu läbilõiked on teada Põhja-Lätist, lääne pool kahaneb see alla meetri. Läti Kallavere kihistu Ulst jt (1982) on savikas, keskmiseteraalne tumehall liivakivi Tsuruliši südamik (Põhja-Läti) põhjal koostatud kirjelduse järgi. Vanem Kallavere muutub Läti südamikes toonilt heledamaks, kuid savisisaldus ei kao.

### **Türisalu kihistu**

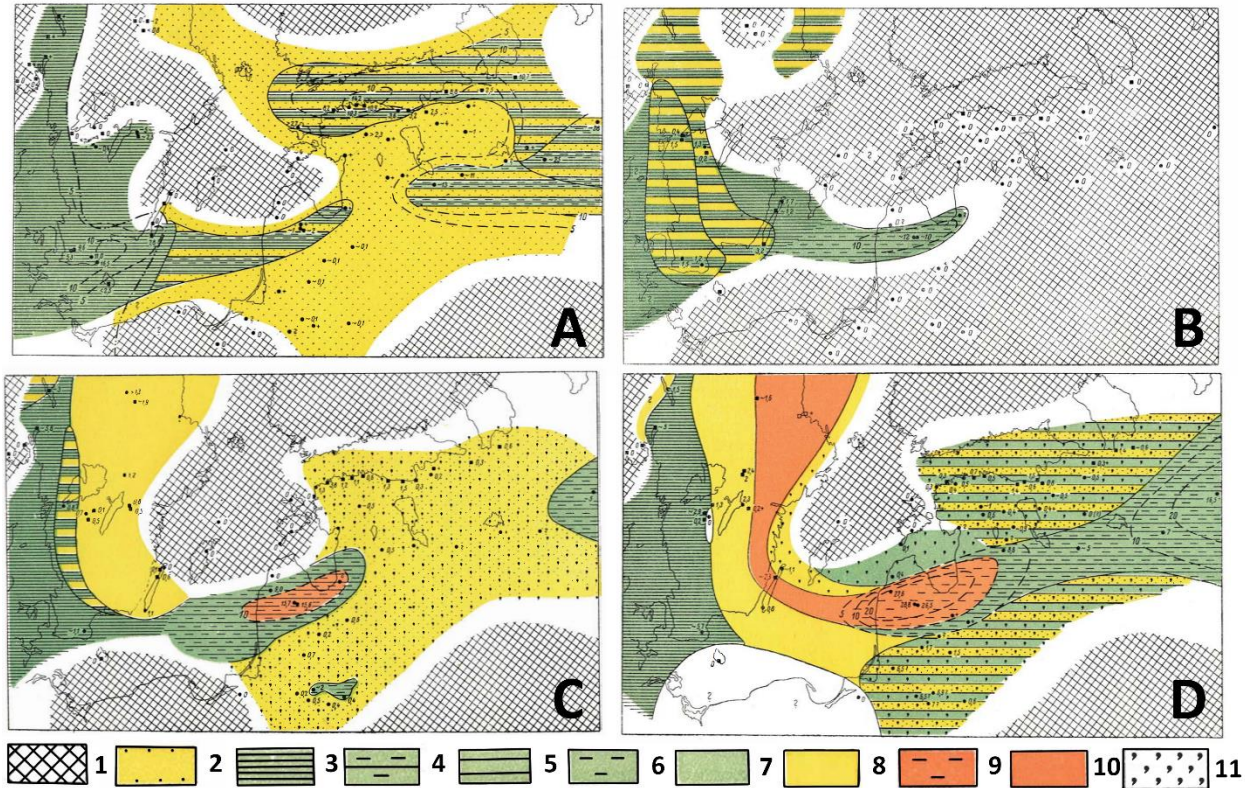
Türisalu kihistu kuulus algselt Selja kihistusse Türisalu kihistiku nime all (Männil ja Rõõmusoks, 1984). Selja kihistu kaotamisel muutusid varasemalt kihistiku staatuses üksused kihistuks. Türisalu kihistu graptoliitargilliit (vanema nimetusega diktüoneema-argilliit või konnatahvel, Rootsis *Alum-Shale*) on Eestis piiratud levikuga, esinedes vaid Põhja-Eestis (Rõõmusoks, 1983) Matsalu lahest Rakvereni. Graptoliitargilliit on kergesti ära tuntav püriitse lisandiga, kuni seitsme meetri paksune (Rõõmusoks, 1983), orgaanikarikas mudakivi. Türisalu kihistu kuulub vanuseliselt Pakerordi ja Varangu lademesse, olles Kirde-Eestis noorem ja Loode-Eestis vanem.

Türisalu kihistu on oma geograafilise leviku tõttu seotud pigem Põhja-Eesti ja Skandinaavia stratigraafiaga. Lõuna-Eestis ja Lätis ei ole see kihistu esindatud. Alam-Ordoviitsiumis on kirjeldatud küll orgaanikarikkamaid kiltjaid intervalle stratigraafiliste üksuste vahemikes, kuid nendel puhkudel ei ole tegu Türisalu kihistuga vaid üksikute vahekihtidega.

### **Varangu lade**

Varangu lademe algus korreleerub (Heinsalu ja Viira, 1997) *Paltodus deltifer pristinus* alamtsooniga, mis algab Türisalu kihistu noorematest kihtidest. Varangu lademele vastab Lätis Zebre kihistu kaks vanimat kihistut – Kumbri ja Lutrini. Eelnevalt kandis Varangu lade *Ceratopyge* lademe nime tuginedes selle kasutusele Skandinaavias, kuid muudeti seoses geograafilise nime põhimõtetega (Männil, 1990). Varangu lademesse (settekeskkond on toodud joonisel 6) kuulub samanimeline kihistu, varasemalt Selja kihistu kihistik (Männil ja Rõõmusoks, 1984). Varangu kihistu kivimite esmakordne (Rõõmusoks, 1983) kirjeldaja oli Artur Luha, kes 1946. aastal kirjeldas helehalli kiltsavi. Kihistu on nelja kuni viie meetri paksune (Heinsalu ja Viira, 1997b) ja koosneb kolmest litoloogiliselt erinevast vahemikust, kõige vanem ja noorem intervall on läätselise leviku ja glaukoniitse-püriitse lisandiga kompaktne savikivi. Keskmise intervall on glaukoniidirikas koos peen-terise kvartsiga, see liivakas vahekiht on püriidivaene. Üldiselt on Varangu kihistu heterogeense iseloomuga, kirjeldused sõltuvad asukohast. Kirjeldustes mainitakse orgaanikarikkamaid tumedaid intervalle ja ka metabentoniiti (K. Suuroja, personaalne kommunikatsioon, 10.07.2024).





**Joonis 6.** Vara-Ordoviitsiumi settekeskkonnad Männil (1966) järgi. Hilisemate andmete järgi (Heinsalu ja Viira, 1997b) on Varangu lade esindatud ka Põhja-Eestis. A – Pakerordi lade, B – Varangu (Ceratopyge) lade, C – Hunnebergi lade, D – Billingeni lade, 1 – maismaa, 2 – kvartslivad, 3 – orgaanikarikas muda, 4 – hallid savid, 5 – karbonaat savika lisandiga, 6 – savi karbonaatse lisandiga, 7 – detriitne lubjakivi, 8 – hall õhuke karbonaadirikas muda, 9 – punasevärviline savi karbonaadi lisandiga, 10 – punasevärvilised karbonaatsed settid, 11. glaukoniit.

Varangu kihistu levib Põhja-Eestis, kuid see ei ole piiranud selle nimetuse kasutust ka mõnede Kesk- ja Lõuna-Eesti puursüdamike kirjeldamisel, näiteks Lõuna-Eesti piiri lähedases Taagepera puursüdamikus.

### *Hunnebergi ja Billingeni lade*

Hunnebergi lademe moodustavad (settekeskkonnad toodud joonisel 6) Leetse kihistu alumised kihistikud, Klooga ja Joa. Lätis ja teoreetiliselt ka Lõuna-Eestis kuuluvad Hunnebergi lademesse Zebre kihistu savikad-argilliitsed kivimid. Läti stratigraafias on, kasutades trilobiitide biostratigraafiat, Hunnebergi lademe alla loetud Zebre kihistu Zirni kihistikku (Meidla, 1997a), sellest järeldatuna on Kumbri ja Lutrini Varangu/Pakerorti lademe arvestuses ning Kalvene ja Zante Billingeni lademe hulka loetud. On oluline märkida, et Zebre esinemine on Eestis tinglik, mistõttu ei saa Lätiga analoogset Zebre jaotust lademetega kohta teha. Kesk- ja Lõuna-Eestis on biostratigraafiline info Hunnebergi ja Billingeni lademe piiri määramiseks ebapiisav (Meidla, 1997a), mistõttu on detailne liigestus ebaselge.

Billingeni lade jaotub Põhja-Eestis kaheks (Meidla, 1997b): vanem karbonaatne glaukoniitne liivakivi ja lubjakivi Leetse kihistust (Mäeküla kihistik) ja noorem Toila kihistu osa (Päite kihistik). Lõuna-Eestis ja ümbritsevates naaberriikides nagu Läti, Leedu ja Kaliningradi enklaav on kivimid peamiselt savikad punased või hallid lubjakivid koos mõne savikama intervalliga (Meidla jt, 2023).

### **Leetse kihistu**

Leetse kihistu jaguneb (Meidla, 1997a) kolmeks kihistikuks: Klooga, Joa ja Mäeküla. Klooga glaukoniitne aleuroliit (paksuses kuni 3 m) ja Joa glaukoniitne aleuriit ja liiv (paksuses kuni 1.2 m) moodustavad alumise osa Leetse kihistust. Glaukoniidi sisaldus on suurem alumises osas, Klooga kihistiku kvartsirikad setted (Mägi, 1970) vähenevad silikaatide poolest (10-20%). Billingeni lademes toimub fatsiaalne muutus, Lõuna-Eestis ebaselge levikuga Mäeküla kihistiku (paksuselt kuni pool meetrit, Meidla (1997b) kaltsiitse tsemendiga liivakivi läheb üle glaukoniitseks lubjakiviks Päite kihistiku piiril. Glaukoniit moodustab kuni 80% Mäeküla kihistiku kivimist.

Leetse ja Toila kihistu vaheline piir on oluline Ordoviitsiumi stratigraafias, varasemad Alam-Ordoviitsiumi kivimid, oma olemuselt terrigeensed ja allogeensed lähevad üle Kesk-Ordoviitsiumis kemogeenseteks karbonaatseteks sette kivimiteks. Leetse kihistu levib (Meidla jt, 2023a) Põhja- ja Kesk-Eestis, kuid ulatub ilmselt ka Ida-Läti ning Kesk- ja Ida-Leedu territooriumitele. Kihistule on kõikjal iseloomulik normaalgradatsioon karbonaatsesse lamamisse.

### **Toila kihistu**

Toila kihistu vanim osa, Päite kihistik on Põhja-Eestis rohekas-hall, väheste glaukoniidi teradega ja halvasti väljakujunenud katkestuspindadega lubjakivi (Meidla, 1997). Kihistu piiril kontaktis Leetse kihistuga esineb kohati glaukoniitse liiva lisand. Lääne-Eestis pole levikut kirjeldatud, kuid Kirde-Eestis on see dolomiidistunud ning kirjuväriline (Röömusoks, 1983). Lõuna-Eestis on biostratigraafiliselt piiritletud lademete-kihistute leviku täpne ulatus ebaselge (Meidla, 1997).

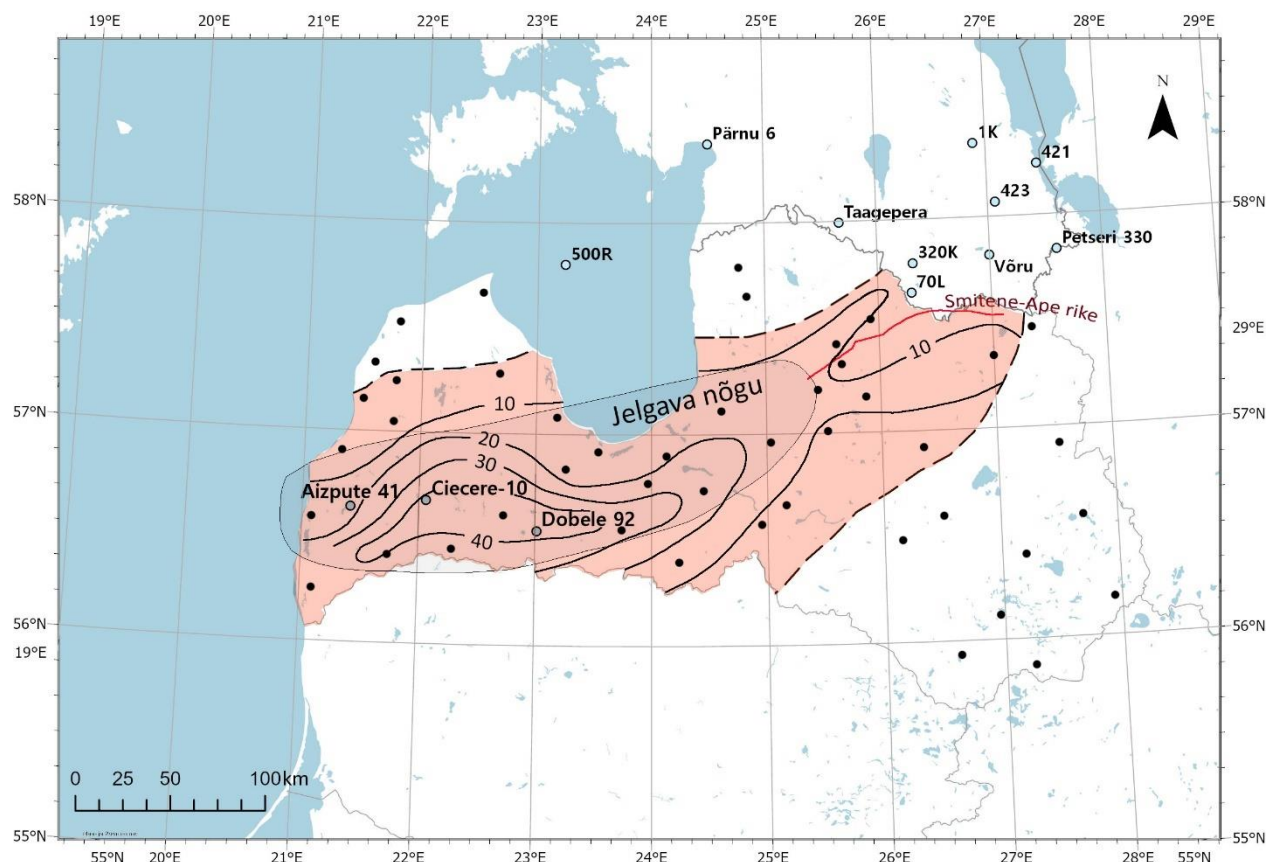
Billingeni lademe noorim kihistu on esindatud Päite kihistikus, lubjakas glaukoniitses liiva- või lubjakivis. Üks Venemaal Peterburis, tol ajal tuntud kui Leningradis, leviv interpretatsioon kirjeldab Päite vahemiku kui Volhovi alumist osa (Orviku, 1960). Kihistu alumise piiri lähedal asub *Prioniodus elegans* konodonditsooni algus.

### **Zebre kihistu**

Kirjeldused Zebre kihistu kohta on vastukäivad, üldiselt homogeenseid kuid kirjusid mudakivi kihistikke eristatakse värvitoonide järgi. Kirjeldused erinevad sõltuvalt kirjeldajast. Ulsti, Gailite ja Springise (1984) kirjeldused põhinevad Cicere-10, Skrudina-28 ja -31, Edole-61 ning Dobe 92 puursüdamike põhjal. Selle magistritöö jooksul uuritud tüüpiline Zebre kihistu läbilõige pärineb puursüdamikust, mida talletatakse Särghaua puursüdamikuhoidlas. Mõnes südamikus lasub Zebre kihistu ülemises osas 10-20 cm paksune glaukoniiti sisaldav kirju dolokivi (Ulst jt, 1982), kuid puursüdamikud (Birini ja Olaine D-4), kus seda on kirjeldatud, asuvad Lääne- ja Kesk-Lätis. Zebre kihistu levik on seotud Jelgava nõo reljeefimoodustisega (Ulst jt, 1984), nõlvasetted on määratletud kohati Leetse kihistu hulka.

Zebre kihistu on Lätis esinev Alam-Ordoviitsiumi stratigraafiline üksus (joonis 7), mis lasub Kallavere kihistu peal. Kihistu jaguneb viieks kihistikuks (Ulst jt, 1982): Lutrini, Kumbri, Zirni, Kalvene ja Zante. Esmalt kirjeldas Zebre kihistut Springis (1974). Zebre üksus (Lätis kuni 46 meetrit paks) kuulub vanuseliselt Latorpi ülemlademesse, kuid Lõuna-Eestis on seda tinglikult arvatud Varangu üleminekuliseks kihistuks (Ulst jt, 1982).

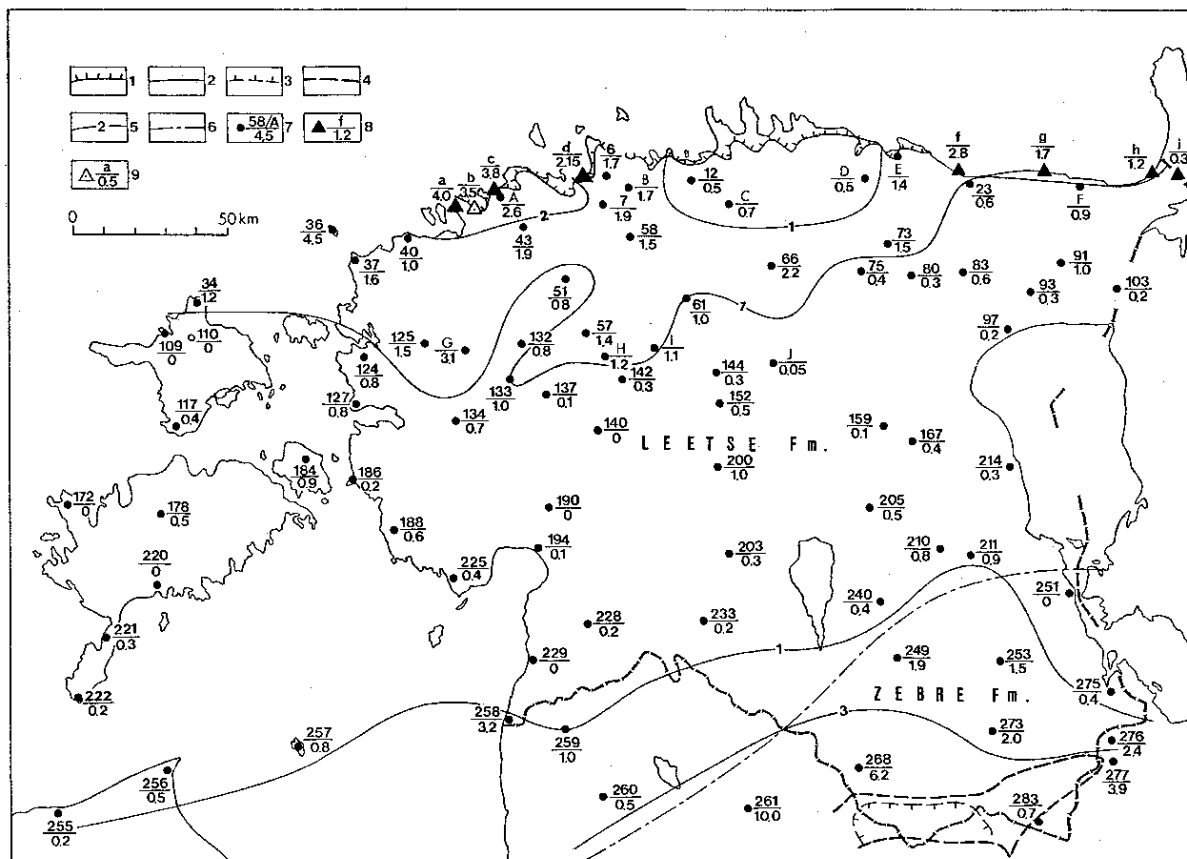




**Joonis 7.** Lõuna-Eestis Zebre kihistu kirjeldusega puursüdamikud kõrvutatud Zebre kihistu leviku kaardiga Lätis koos kasutatud uuringupunktidega. Mustade täppidega on märgitud Ulst (1982) Zebre kihistu uuringupunktid. Helepunase alaga on märgitud Zebre kihistu levik ja isojooned Ulst (1982) jooniste järgi. Jelgava nõo piirid on joonistatud Männil (1966) Ordoviitsiumi paleotektoonika kaardi järgi. Smitene-Ape rike joonistatud Tuuling (2019) joonise põhjal. Uuringupunktid ja isojooned on joonistatud moonutatud kaardi põhjal ja ei esinda seetõttu suurt täpsust. Tegelik paksus Aizpute läbilõikes ei ole siin joonisel täpselt kajastatud. Aluskaart: Maa ja Ruumiamet, 2025.

Lutrini kihistik (Gailite ja Springis, 1984) on holostratotüübis kuni 5.5 meetri paksune sinakas-hall savi tumehallide argillitsete intervallidega. Hilisem Lutrini kihistiku kirjeldus (Paškevičius, 1997) sisaldab ka 5-7 glaukonitliivakivi vahekihti ning valdavalt rohekas-halli või musta argilliti. Kumbri kihistik on (Paškevičius, 1997; Ulst jt, 1984) kuni 5.5 m paks punakaspruun savide intervall koos vahepealsete lubjakivi taskuid sisaldavate argillitsete kihtidega.

Zirni kihistik on paksukihiline punakaspruun savi paksuses 3–15 meetrit (Ulst jt, 1984). Paškevičius (1997) kirjeldab aga Zirni kihistikku kui savikat rohekas-halli savi paksusega kuni 16 meetrit. Kalvene kihistik on sinakas-hall savi paksuses kuni 12 m, Ulst jt (1984) kirjeldasid punakas-pruunikaid laigulisi vööndeid. Paškevičius (1997) kirjeldas seda hoopis rohekas-hallina. Zante kihistik (Ulst jt, 1984) on kuni 14.5 m paksune punakaspruun, kohati rohekashall savi.



**Joonis 8.** Hunnebergi ja Billigeni lademe levik Eestis. Joonisel on näha täpitatud punktiirjoonega märgitud teoreetilist Zebre kihistu levikut. 258 – Ikla, 249 – Otepää, 253 – Põlva, 273 – Võru, 275 – Värska, 276 – Petseri, 283 – Hino (ei ole säilinud), 268 – Karula, 269 – Laanemetsa (ei ole säilinud). Kihipaksuste andmed pärinevad Rõõmusoks (1960), Orviku (1960a), Männil (1966), Rõõmusoks (1983) ja L. Põlma avaldamata andmetel. Zebre kihistu leviku piir on joonistatud Ulst (1982) kaardi järgi Meidla (1997a) poolt.

Eesti alal Zebre kihistu levilast rääkides ei maini Geology and Mineral Resources (Meidla, 1997a) ühtegi kindlat puursüdamiku ja kihistut joonistel kujutades (joonis 8) viitab vaid Läti geoloogiast lähtudes tõenäosusele, et seda leidub Lõuna-Eestis (Meidla, 1997a). Viira (2011) andmetel on Zebre kihistu esindatud Lõuna-Eestis rohekas-halli ja punakaspruuni glaukonitise-savika kuni 4 m paksuse dolokivina, millele järgnevad Kriukai kihistu punakas-pruunid mergli intervallidega savikad dolokivid. Stratigraafiliste jooniste järgi on Zebre kihistu lasumiks Kambriumi aegsetele Kallavere liivakividele ning lamamiks Kriukai kihistule. Uurides detailsemalt Eesti Geoloogiateenistuse puursüdamike andmebaasi leidus Zebre kihistu kirjeldusi (joonis 3) Ruhnu-500 (0.75 m; Põldvere, 2003), Pärnu-6 (0.5 m; Tassa ja Perens, 1980), Mehikoorma-421 (0.02 m; Põldvere, 2005), Laanemetsa-70 (0.6 m; Mens ja Kala, 1963), Petseri-330 (4.5 m; Väärse ja Kajak, 1964), Võru (Puursüdamiku andmebaasi kirjelduste järgi esineb Zebre kihistu kuid aruandes (Vingisaar ja Tassa, 1973) Leetse kihistu nime all), Karula-320K (0.3 m; Väärse ja Kajak, 1964), Põlva-423 (1.5 m; Kajak jt, 1974) ja Kaagvere-K1 (10.95 m Zebre-šakyna vahemik; Kajak ja Kajak, 1963) puursüdamikus. Tsiistre-327 puursüdamiku väljaanne (Põldvere, 2007) toob välja Zebre kihistu leviku ka Tartu-453 puursüdamikus, kus Zebre kihistu paksus on 0.8 m.

Stratigraafiliste läbilõigete kohaselt moodustab Zebre kihistu poole Alam-Ordoviitsiumist Lõuna-Eestis, selline Lõuna-Eesti stratigraafia kujutamine tuli üle esimeste andmebaaside (Einmann jt, 1990) loomisega, kus toodi ka välja ebakindlus olemasoleva korreleeritava andmestiku suhtes. Vaatamata sellele viidi tol hetkel kasutusel olevad skeemid üle ilma suuremate muutusteta. Kihistu Lõuna-Eestisse levikut piirab tugevalt Mõniste kerge, mis paikneb Smitene-Ape rikke lähedal Eesti ja Läti piiri juures (joonis 7). Mõniste kerkega kaasnes kulutus (Puura ja Vaher, 1997), mis ulatus Kambriumi kivimiteni, mistõttu ei ole üllatav, et Ordoviitsiumi kihistute levila on seal ebaühtlane ja muutliku iseloomuga. Geoloogiliste kirjelduste järgi klapib Zebre kihistuga kõige täpsemalt Laanemetsa-70 puursüdamiku läbilõige (Mens ja Kala, 1963), kus leidis 60 cm paksune hallikas-roheline püriidilisandiga savi. Karula-320 ja Petseri-330 (Väärsi ja Kajak, 1964) ning Hino-452 (Kajak jt, 1975) kirjeldused puursüdamikes vastavad pigem Viira (2011) glaukoniitsele-savikale dolokivile.

## Võrreldavad stratigraafilised üksused Skandinaavias

Skandinaavias leidub paar üksust, mis saaksid potentsiaalselt olla seotud Lõuna-Eesti geoloogiaga: Norras kirjeldatud Bjørkasholmeni kihistu, läbi selle ka Köpingsklinti kihistu Rootsis ning Bruddesta kihistu. Erinevalt mustast kildast (meil tuntud Türisalu kihistu, Rootsis nn *Alum Shale* kihistuna), millel on selge paleogeograafiline ja geokeemiline seos, on eelnimetatud kahel kihistul seosed Lõuna-Eesti stratigraafiaga kaudsemad. Üldtendents on seostada Lõuna-Eesti stratigraafia Läti stratigraafiliste üksustega – ehkki see pole takistanud geoloogiliste kirjelduste koostajaid kasutamast üksuseid nagu Varangu Lõuna-Eestis, mis kihistu levikukaartide järgi ei tohiks olla seal esindatud.

### *Bjørkasholmeni kihistu*

Bjørkasholmeni kihistu, varasema nimega Ceratopyge lubjakivi (Egenhoff jt, 2010; Egenhoff jt, 2018), on Norras-Rootsis esindatud 60–120 cm paksune karbonaatne argillitsete vahekihtidega litoloogiline üksus, mis moodustub kolmest kuni viiest transgressiooni mikrotsüklist (Ebbestad, 1999). Kihistu ülemine osa sisaldab glaukoniiti ja esineb pruunikas porsunud dolomiitne tsoon (Ebbestad, 1997). Bjørkasholmeni karbonaadid asetsevad kahe aleuriitse-mudakivi kihistu, *Alum-Shale*-i ja Tøyeni kilda, vahel.

Rootsis vastab Bjørkasholmeni dolomiitsele ülemisele osale Köpingsklinti kihistu. Köpingsklint, vana nimetusega Ceratopyge, on punakaspruun teralismudaline lubjakivi (Stouge, 2004), mis sisaldab rohkelt glaukoniiti ja püriiti. Varasemalt oli sellel 85 cm paksusel kihistul (Stouge, 2004) kolmikjaotus, kuid see kaotati liigse keerulisuse tõttu. Kihistu on ebaühtlase leviku ja paksusega, kadudes Ölandi poole liikudes. Biostratigraafiliselt on kihistul samuti lai jaotus, kattes ajaliselt terve Vara-ordoviitsiumi (Stouge, 2004). Erinevalt Bruddesta kihistust on Köpingsklinti kihistus suurem glaukoniidi sisaldus.

### *Bruddesta kihistu*

Bruddesta kihistu on (Stouge, 2004) fossiiliderikas, punakaspruun kuni helehall mergel. See ühtib Volhovi lademe alumise osa ja Billingeni lademega, asetsedes Alam-Ordoviitsiumi ülemisel piiril. Bruddesta kihistule on iseloomulikud (Stouge, 2004) amforakujulised uurded ja götiitsed tsoonid; kihistu ei sisalda glaukoniiti.

## Alam-Ordoviitsiumi biostratigraafia

Fauna leidmisel on võimalik korreleerida kivimiüksuste vanuseid ja paigutada nad liikide järgi nimetatud biotsoonidesse ja sealtkaudu ka lademetesse. Eesti Alam-Ordoviitsiumi olulisemad biostratigraafilised indikaatorliigid on toodud joonisel 5 ja täpsemalt joonisel 9. Lõuna-Eesti lõikes on oluline konodondi perekond *Cordylodus*, nende Eestis vanimate (Heinsalu ja Viira, 1997a) leitud konodonditsoonid on iseloomulikud Kallavere kihistule: *Cordylodus lindstromi* ning *Cordylodus angulatus*. Kallavere konodonditsoonidele vastavad iseloomulikud graptoliidiliigid *Rhabadinopora flabelliforme norvegicum* ja *Rhabadinopora anglica* ja *Rhabadinopora flabelliforme multithecatum*.

| RAHVUS-<br>VAHELINE<br>LADE | REGIONAALNE<br>LADE | KIHISTU     |            | KONODONT                            |                                                             |
|-----------------------------|---------------------|-------------|------------|-------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
|                             |                     | Põhja-Eesti | Kagu-Eesti | TSOON                               | ALATSOON                                                    |
| DAPINGI                     | KUNDA               | Lõuna       |            | <i>Yangtzeplacognathus crassus</i>  |                                                             |
|                             |                     |             |            | <i>Lenodus variabilis</i>           |                                                             |
|                             |                     | Sillaoru    | Šakyna     |                                     |                                                             |
|                             | VOLKHOV             | Toila       | Kriukai    | ( <i>Baltoniodus norrlandicus</i> ) | ( <i>Lenodus antivariabilis</i> )                           |
|                             |                     |             |            |                                     | ( <i>Trapezogn. quadrangulum</i> )                          |
|                             |                     |             |            | <i>Paroistodus originalis</i>       |                                                             |
|                             |                     |             |            | <i>Baltoniodus navis</i>            |                                                             |
|                             |                     |             |            | <i>Baltoniodus triangularis</i>     |                                                             |
|                             | BILLINGEN           |             |            | <i>Oepikodus evae</i>               |                                                             |
|                             |                     |             |            | ( <i>Prioniodus elegans</i> )       |                                                             |
| FLO                         | HUNNE-<br>BERG      | Leetse      | Zebre      | <i>Paroistodus proteus</i>          | ( <i>Oelandodus elongatus</i> -<br><i>Acodus deltatus</i> ) |
|                             |                     |             |            |                                     | ( <i>Paracordylodus gracilis</i> )                          |
|                             |                     |             |            |                                     | <i>Tripodus</i>                                             |
|                             |                     |             |            |                                     | <i>Drepanoistodus</i> aff.<br><i>D. amoenus</i>             |
| TREMADOCI                   | VARANGU             | Varangu     |            | ( <i>Paltodus deltifer</i> )        |                                                             |

**Joonis 9.** Eesti biostratigraafilised tsoonid, tõlgitud Viira (2011) järgi. Sulgudes esitatud konodonditsoonid ei esinenud Lõuna-Eestis Viira (2011) andmestikul.

Zebre kihistule iseloomulikud konodondid on *Prioniodus elegans* ja *Oepikodus evae*, nende tsoonidele vastavad graptoliidiliigid *Pseudophyllograptus densus* ja *Phyllograptus angustifolius elongatus*. Potentsiaalselt võib olla kasulik ka *Paltodus deltifer*, kinnitamaks Varangu lademe esinemist või puudumist Lõuna-Eestis. Zebre kihistu sisaldab Lätis kihistikuliselt erinevaid tsoone (Meidla, 1997a; Meidla, 1997b). Zirni kihistust on leitud (Meidla, 1997a) graptoliiti *Tetragraptus phyllograptoides* ja konodonti *Parostoidus proteus*, mis piiritleb vastava tsooni. Kõige noorem Zebre kihistik, Zante, sisaldab *Oepikodus evae* (Meidla,

1997b), mis asetab selle Billingeni lademesse. Leetse kihistu kõige alumine osa vastab *Paraistodus proteus* tsoonile, ülemine Mäekalda kihistik sisaldab *Prioniodus elegans* ja *Oepikus evae* konodonditsoone (Meidla, 1997b).

Skandinaavias levinud Bruddesta kihistu ülemine vahemik korreleerub Stouge (2004) andmetel *Oepikus evae* konodonditsooniga, kihistu ülemine intervall aga *Baltoniodus triangularis* ja *Baltoniodus navis* tsoonidega. Seega on tegu on Billingeni ja osaliselt Volhovi lademesse kuuluva kihistuga, millele vastab Eestis Leetse kihistu ja Toila kihistu alumine osa.

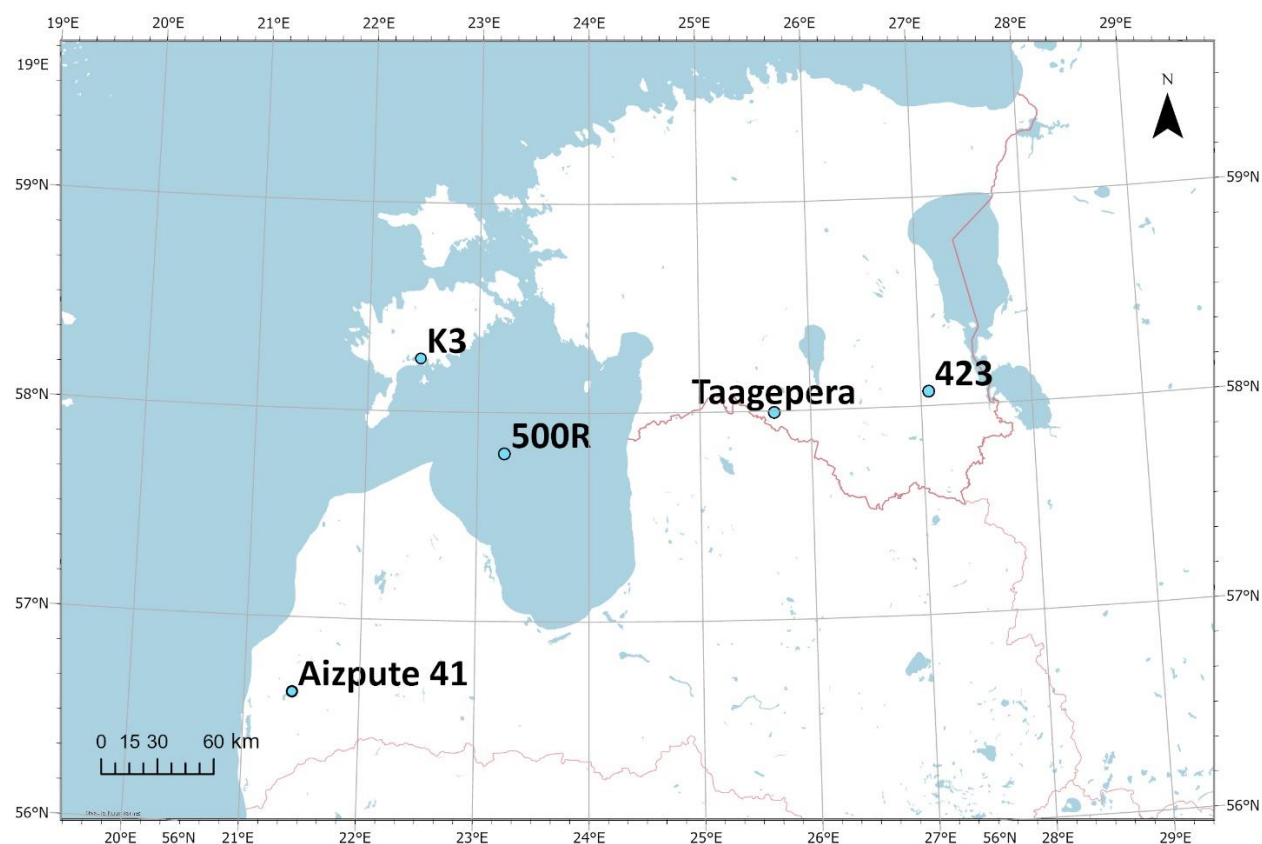
Björkasholmeni kihistu puhul on tegu madalmerelise faatsiesega, mis sisaldab vähe indikaatorliike (Egenhoff jt, 2010), vaid ühte konodondi- ja ühte trilobiidiliiki. Oluline indikaatorvahemik (Ebbestad, 1999) Björkasholmeni kihistus on trilobiit *Bienvillia angelini* esinemine alumises orgaanikarikkamas intervallis. Rootsi Kõpingsklinti kihistu (Stouge, 2004) langeb põhiliselt *Paltodus deltiferi* konodonditsooni, kuid selle kõige ülemine intervall sisaldab *Paraistodus proteus*, *Prioniodus elegans* konodondi tsoone ja osa *Oepikodus evae* alumist tsooni, nende tsoonide järgselt vastab Kõpingsklint Varangu, Hunnebergi ja Billingeni lademele.

## Materjal ja metoodika

Välitöödel Arbavere uurimiskeskuses ja Särghaua õppekeskuses 2024. ja 2025. a uurisin ja kirjeldasin Alam-Ordoviitsiumi kivimeid mitmes puursüdamikus Lõuna-Eestist ja Lätist. Välitöödel osalesid professor Olle Hints, vanemgeoloog Tavo Ani, doktorant Thibaud Lieffroy, järel doktor-teadur Ursula Toom ja professor Tõnu Meidla. Zebre kihistu stratotüüpse ala tugiläbilõikeks valisin puursüdamiku, kus kihistu kogupaksus on 27.2 m ning esindatud on kõik kihistikud nende tüüpilisel kujul. Täiendavalt tutvusin Ordoviitsiumi läbilõikega Baltinava puuraugus Ida-Lätis, paraku jäi Zebre kihistu välja uuritud vahemikest.

Pärast suvist praktikat Eesti Geoloogiateenistuses tekkis võimalus vaadata puursüdamikke edasi Arbaveres jätkates 2024. a alustatud Ordoviitsiumi stratigraafiliste üksuste piiride sobivuse ülevaatamist juba Eesti Geoloogiateenistuses ametis geoloogina 2025. Puursüdamike kohta informatsiooni kogumiseks ja nende kaardil kujutamiseks kasutasin AUQ puursüdamike andmebaasi ja EGT puuraukude rakendust. Sügavusfiltritega oli võimalik andmebaasist välja sorteerida sobiva sügavusega oli puuraugud, mis sisaldasid endas Zebre kihistu kirjeldust ning läbi AUQ andmebaasi oli ligipääs kaasnevale kirjandusele.

Lisaks kirjeldamisele kogusin uuritud läbilõigetest kivimiproove detailsemaks litoloogiliseks, mineraloogiliseks ning geokeemiliseks iseloomustamiseks. 10 proovi (AU24-1–AU24-10) on pärit puursüdamiku Zebre kihistust ja Kriukai kihistu alumisest osast, 7 proovi (AU24-11–AU24-17) koguti Lõuna-Eesti Alam-Ordoviitsiumi Taagepera, Põlva 423, Ruhnu 500 ja Kuressaare K3 puursüdamikest (joonis 10 ja lisa 1).



**Joonis 10.** Südamikud, millest võeti proovid. Aluskaart: Maa- ja Ruumiamet, 2025.



Südamikud, kust proovid võeti, olid vanadest puursüdamike kastidest, neil esines kerge kipsi lisand. Proovimaterjal oli ajaga kuivanud laastudeks ja klibuks. Kohati esines pealmisest kastist pudenenud klibu, see oli eristatav vaid juhtudel kus peale pudenev materjal oli erinevat tooni kui originaalne Zebre kihistiku savi. Ei saa välistada, et üksteise peal asunud kastide materjal pudenes ka sama tooni kihistike peale vahemikes, kust proovid võeti.

Eesti proovid võtsin Kallavere ning Leetse vahemikest ja Taagepera Zebre-taolisest aleuriitsemast intervallist Varangu lademes.. Kuressaare ja Põlva puursüdamike puhul oli võimalik võtta analoogsest stratigraafilisest piirist (Leetse/Toila või Leetse/Kriukai) proove. Ruhnu proov võeti hilisemal kuupäeval Arbaveres, tegu oli lagununud ja porsunud materjaliga. Lisaks proovimaterjalidele pildistasin hiljem võrdlusmaterjalina Arbaveres Petseri 330 proove, mis on sealsest Zebre vahemikust ja lamavatest-lasuvatest kihtidest. Töödeldud pildid on toodud lisas 5.

Enamikest Lõuna-Eesti proovidest oli võimalik teha õhik, nende kirjeldamine oli sellevõrra mitmekülgsem. Õhikute kirjeldamisel ja pildistamisel kasutasin ZEISS Axioskop 40 polarisatsioonimikroskoopi koos ZEISS AxioCam 208 color/202 mono kaameraga. Proovide XRD ja XRF ettevalmistuse ja mõõtmised tegi TalTechi Geoloogia Instituudi mineraloogia-geokeemia labor.

Proovid jahvatasin laborikatseteks ettevalmistamisel kasutades ROCKLABS volframkarbiidist litterveskit. Vastupidavamate proovide nagu Kallavere liivakivide puhul jahvatasin proove neli kuni neli ja pool minutit, mis oli hiljem probleemiks. Kui käsipaladest oli võetud õhikute ja XRF/XRD jaoks piisav proovihulk (kumulatiivselt 20–30 g) siis läks ülejäänud proov uurimiseks Geoloogia instituudi mikropaleontoloogia laborisse, et selgitada konodontide esinemine ja taksonoomiline koosseis.

Töö sõnastuse korrigeerimisel ning materjalide tõlkimisel on kasutatud ChatGPT (2025) generatiivset tehisintellekti.

## Röntgendifraktsioonanalüüs (XRD) ja röntgenfluorestsentsanalüüs (XRF)

Röntgendifraktsioon- ja röntgenfluorestsentsmeetodid on mittedestruktiivsed laboratoorsed meetodid proovide mineraalse ja keemilise koostise määramiseks. Tegu on meetoditega, mis mõlemad kasutavad röntgenkiirgust, et mõõta keemilistele elementidele ja mineraalidele spetsiifilisi omadusi nagu ergastatud aatomist vabanevat energiat (XRF) ja kristallvõre parameetritest lähtuvaid peegeldusnurki (XRD).

XRD-d kasutatakse jahvatatud proovide kristallvõreparameetrite tuvastamiseks läbi iseloomulike difraktsioonikõverate (Loubser ja Verry, 2008). See võimaldab tuvastada sarnase keemilise koostisega, kuid erinevaid kristallvõrega komponente, mis keemilisel analüüsil ei eristu.

XRF pulberanalüüsiks valmistatakse pelletid kasutades umbes 8 g jahvatatud proovi ja liimainet Mowiooli. XRF sulatusmeetodi puhul kuumutatakse proove 950°C kraadini, et eemaldada lenduvad ühendid ja orgaanika. Protsessi käigus määratakse proovi kuumutuskadu ehk LOI (*Loss On Ignition*), mille kaudu saab leida proovi orgaanika ja karbonaatse komponendi sisalduse. Eelnev kuumutamine on vajalik, et vältida sulatamise käigus massi kaotamist. Antud töö proovide puhul ei tehtud kaheastmelist kuumutamist, kuna proovide orgaanikasisalduse määramine ei olnud prioriteet.

Geoloogia instituudis on XRF mõõtmisteks kasutusel roodium-anoodiga WDXRF (*wave dispersive X-ray fluorescence*) analüsaator Bruker S4 PIONEER. Röntgentoru poolt tekitatud röntgenkiired ergastavad proovi. Proovis esinevad keemilised elemendid kiirgavad selle tagajärjel kindla energiaga karakteristlikku kiirgust. Mõõtes selle kiirguse energiat saab teha kindlaks, milliste elementidega on tegu.

XRD analüüsideks on kasutusel röntgendifraktomeeter Bruker D12 ADVANCE, mis kasutab koobalt-anoodi. Saadud tulemustega on võimalik läbi Braggi seaduse arvutada difrakteeruva kiirguse lainepikkus, mis võimaldab tuvastada kristallvõre ülesehituse ning selle järgi proovi mineraloogia. Kristallvõre muutlikkuse tõttu võib esineda difraktsioonispektri tippude liikuvust teatud piires, mis võib olla indikatsioon elementide asendumisest kristallvõres – näiteks dolomiitidel võib muutlikkuse põhjustajaks olla Ca ja Mg vahekord või Fe-lisand.

## Optiline mikroskoopia

Antud magistritöö käigus kogutud proovidest valmistati õhikud vaid tugevamini tsementeerunud proovidest AU24-7 ja AU24-9 ning AU24-11–AU24-17 vahemikust. Pudedamad glaukoniidirikkad proovid vajasisid siiski täiendavat impregneerimist. Põhilisteks töövahenditeks olid Buehler PetroThin õhikumasin, Buehleri lihvimispink, kuumutusplaat, ultrahelivann. Õhikute impregneerimisel ja liimimisel kasutati termokõvastuvat epoksiidvaiku.

## Biostratigraafia

Biostratigraafilise uuringu jaoks valitud karbonaadisisaldusega proovid lahustati u 10% puhverdatud äädikhappe ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) lahuses ja sipelghappes ( $\text{HCOOH}$ ). Sõltuvalt tsementatsioonist võttis protsess nädalaid kuni kuid: Aizpute-41 puuraugu aleuriitsed proovid lahustusi ligikaudu kolm nädalat, Kuressaare K3 Kriukai kihistu dolomiidistunud kivimi lagundamiseks kulus mitu kuud.

Lahustumise järgselt pesti savimineraalid välja ja proov kuivatati. Kasutades raskeid vedelikke (bromoform tihedusega  $2.89 \text{ g / cm}^3$ ), eraldati raske ja kerge fraktsioon. Biostratigraafias suurimat huvi pakkuvad fosfaatse koostisega konodondid kuuluvad raskesse fraktsiooni, erinevalt nt kvartsist ja karbonaatsetest teradest. Bromoform nõrutatakse välja kasutades filtreid ja seda saab taaskasutada.

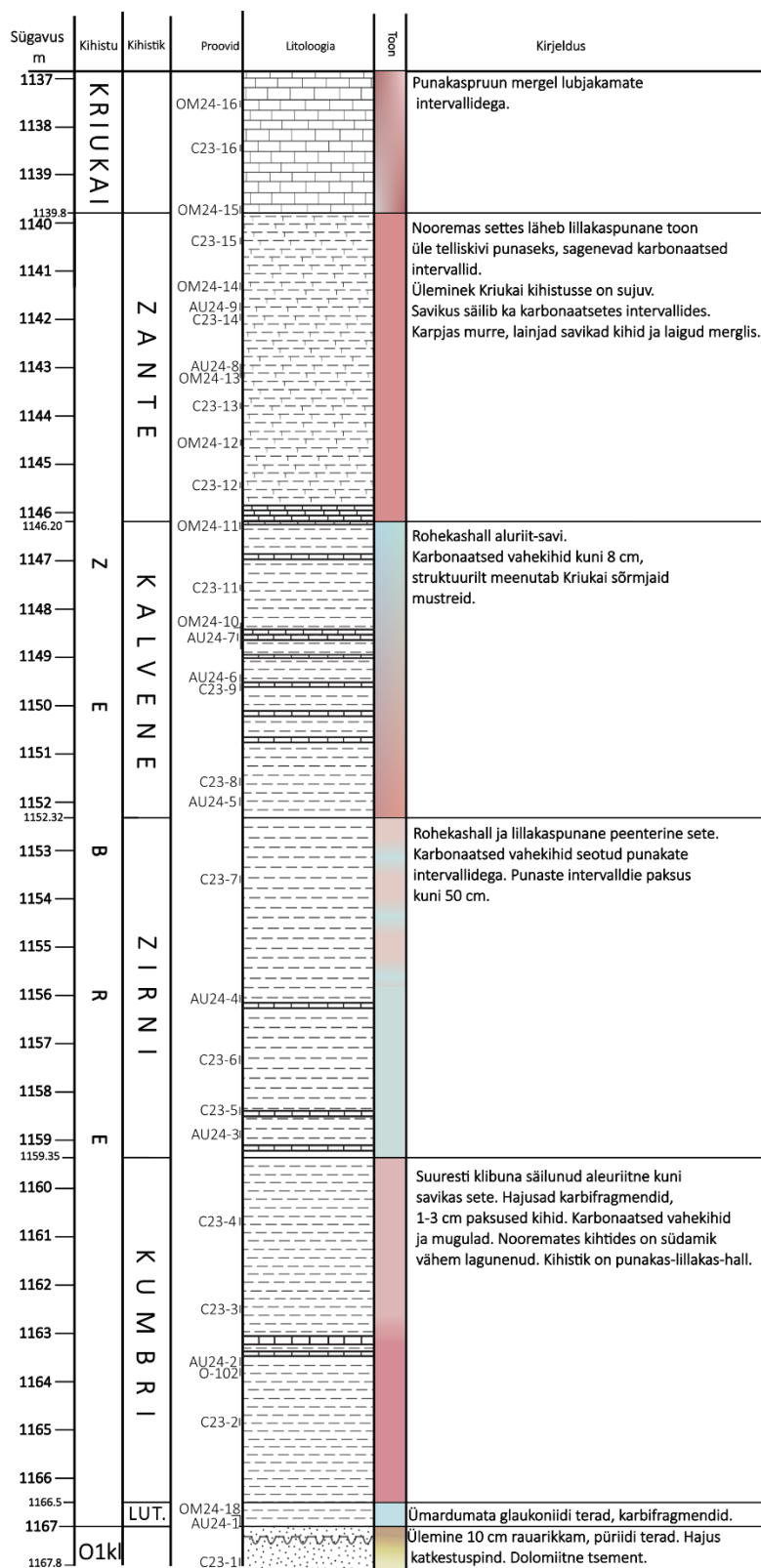
## Tulemused

### Zebre kihistu Aizpute-41 puuraugus

Särghaua puursüdamikuhooldlas koostatud välikirjelduse põhjal joonistasin Aizpute-41 südamikust Zebre kihistu geoloogilise läbilõike koos proovide ja kirjeldustega (joonis 11). Sügavusandmete ebatäpsuse tõttu on kihistike piirid kuni 1 meetrise veamääraga ning AU24 ja OM24 prooviseeriad ei kattu sügavuselt kõikjal. Kirjeldatud puursüdamike kastid koos peale kantud proovidega AU24 seeriast on lisas 5.

Mikroskoobivaatluste alusel oli Aizpute proovide puhul võimalik eristada orgaanika esinemist ja visuaalselt äratuntavaid mineraale nagu glaukoniit ja püriit, mis annavad informatsiooni settekivi tekketingimuste kohta. Siin peatükis kirjeldatud tulemused uuritud proovide keemilise ja mineraalse koostise kohta on esitatud tabelitena lisades 1–3. Mineraloogiliste analüüside tulemused ei kajasta kvantifitseeritud glaukoniidisaldust, see on arvestatud mittekvantifitseeritud mineraalide hulka. Esines potentsiaalset kaaliumi lendumist, mis võis mõjutada karbonaatseid proove nagu puursüdamikust pärit AU24-7 ja AU24-9 ning K3 puursüdamiku proove. Kips on tulemustest välja arvestatud, kuna tegemist on vanades puursüdamikes õhuniiskuse tõttu püriidi lagunemisel moodustunud sekundaarse mineraalina (ühegi proovi kipsisaldus ei olnud piisavalt kõrge, et kahtlustada seda algses mineraalses koostises).

AU24-7 proovis, Kalvene kihistu karbonaatsest intervallist, leidis pika levikuga liik *Drepanoistodus* sp. Liik on liiga üldine, et korreleerida proovi kindla lademega. AU24-9 Zante kihistust on konodontide järgi Volhovi lademe alumine osa (Peep Männik, kirjavahetus 28.04.2025), korreleerudes kas *Baltoniodus triangularis*'e tsooni ülemise või *B. navis*'e tsooni alumise otsaga. Mittekarbonaatseteid proove ei lahustatud AU24 seerias kuid OM24-18 proov Lutrini kihistikust, samal sügavusel AU24-1 prooviga korreleerus *Paroistodus proteuse*'e tsooni alumise osaga.



Joonis 11. Aizpute puursüdamiku litoloogiline läbilõige koos lühikirjeldusega.

### *Uuritud proovide litoloogiline iseloomustus*

#### **AU24-1 1166.92–1167.00 m, Lutrini kihistik**

Aleuriitne hele setend, sisaldas hästi ümardunud glaukoniiditerasid, terasuurst arvestades oli tegu väga halvasti sorteeritud (0.02–0.4 mm) materjaliga. Proov sisaldab ka ilusalt väljakujunenud püriidikristalle ning hajusat punaka tooniga kvartsi. Kiviliistakute peal oli mikroskoobi all näha konodonte. Leidus tumedaid orgaanika kilde, tõenäoliselt graptoliitide fragmente.

#### **AU24-2 1163.57–1163.62 m, Kumbri kihistik**

Punakas peeneteraline põhimass, hajusa glaukoniidiga. Proovi pealispinnal oli selge kipsi kristallisatsioon. Kohati esines ka lillakaskuldset läiget, mille puhul võis tegu olla kalkopüriidiga. Mikroskoobi all oli näha konodontide fragmente ning lamellaarseid vilgugrupi mineraale.

#### **AU24-3 1158.95 m ja AU24-4 1156.1 m, Zirni kihistik**

Aleuriitne või peenem sete, mis sisaldas halvasti ümardunud glaukoniiti ja vähemal määral kvartsiterasid. Zirni kihistiku proovid olid visuaalselt peeneteralisemad kui Kumbri kihistiku proov AU24-2. Proovides esinesid karbifragmentid ja kihiti levivad püriidistunud pesad. Hele-sinakashall homogeenne põhimass, hajusa musta-punaka lisandiga, mis on tingitud rauamineraalide oksüdeerumisest. Mikroskoobis tuvastati märkimisväärselt palju konodonte ja üksikuid graptoliitide fragmente.

#### **AU24-5 1152.0 m, AU24-6 1149.4 m ja AU24-7 1148.6 m, Kalvene kihistik**

AU24-5 ja AU24-6 olid Kalvene kihistiku sinakast ja punakast vahemikust. Selgeid glaukoniidi terasid polnud leida, tegu oli homogeenne peenterise kivimiga. Mikroskoobi all paistsid nurgelised, vähe kulutatud kvartsiterad, mille sorteeritus oli hea kuni keskmine. Üldiselt oli põhimassil hea sorteeritus ja homogeenne koostis, mis viitab settebasseini sügavamale faatsiesele. Proovil paistsid püriidistunud laigud ja mustjaid ebamäärase kujuga orgaanika kiled. Värvitooni arvestamata ei tuvastatud proovidel muud visuaalset erinevust.

AU24-7 proov oli võetud samalt sügavuselt kui biostratigraafiline proov OH24-10. Tegu oli heleda homogeenne mudakiviga karbonaatsest vahekihist, esinesid setetega täitunud käigud. Toonilt oli proov roostelaiguline, vaheldus punakas ja hele toon. Näha olid selgelt eristatavad vilgulehekesed.

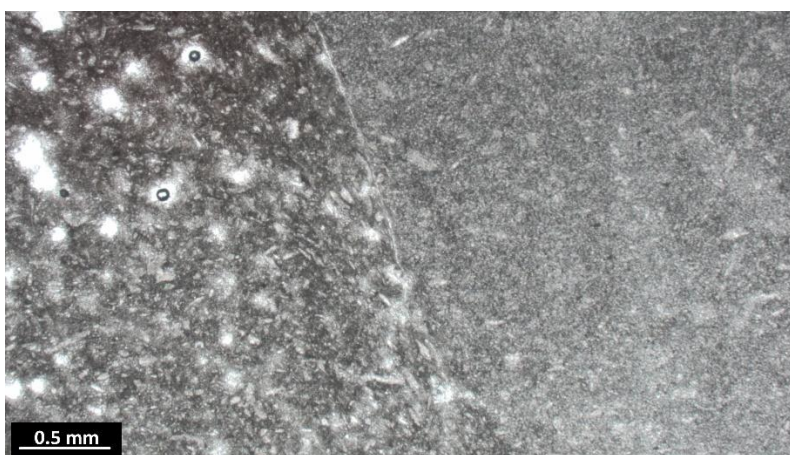
#### **AU24-8 1143.0 m ja AU24-9 1141.8 m, Zante kihistik**

AU24-8 proovis oli visuaalselt suurem savikus Kalvene kihistu proovidega võrreldes, proov esines peenete liistakutena. Puudusid glaukoniit ja püriit. AU24-8 põhimass oli homogeenne aleuriitne-savikas vilguläikeline sete. Kivimi koostist oli keeruline mikroskoobi all hinnata ilma laborianalüüsita, mineraale polnud võimalik eristada.

Proov AU24-9 oli karbonaatsest intervallist. Esines horisontaalselt levivat leostumist, võimalik oli eristada brahhiopoodide bioklaste (joonis 12). Läbilõikes oli vertikaalne hiljem täitunud jäljekivistis (joonis 13), täitematerjal oli jämedateralisem ja halvasti sorteeritud.



**Joonis 12.** Aizpute-41 puuraugu proovi AU24-9 õhik. Õhikul on näha brahiopoodi fragmenti.



**Joonis 13.** Aizpute-41 puuraugu proovi AU24-9 õhik, jäljekivistise täite külgprofiil selgelt eristatava terasuuruse erinevusega. Jämedateraline pool on hiljem täitunud.

#### **AU24-10 1140.2 m, Kriukai kihistu**

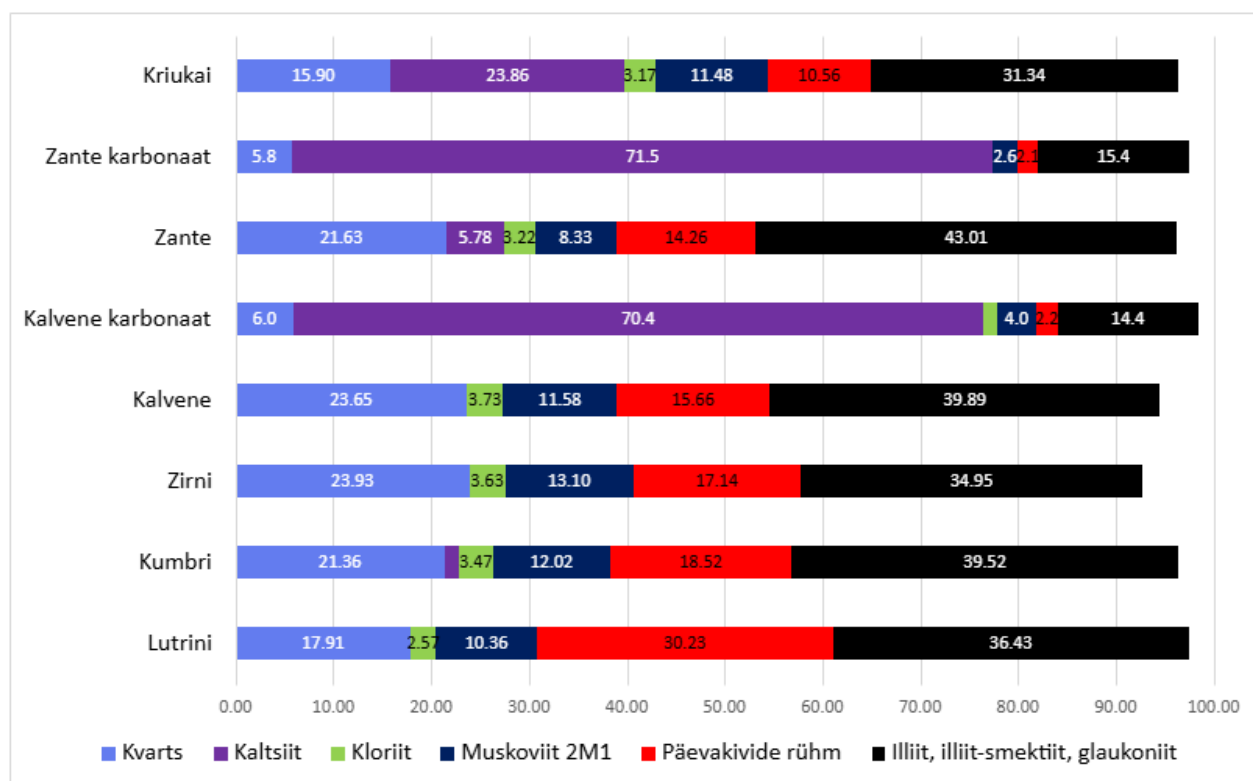
AU24-10 proov oli pärit bioklastide rikkast mikrokristalliinest savikast kiltja struktuuriga vahekihist Kriukai kihistus. Proovis puudus silmaga eristatav glaukoniit, orgaaniline lisand ja püriidistumise ilmingud. Kriukai kihistu proov oli visuaalselt sarnane AU24-8 proovile Zante kihistiku punakamast vahemikust.

#### *Geokeemia ja mineraloogia*

Aizpute proovide geokeemiliste ja mineraloogiliste uuringute tulemused on jaotatud kaheks, karbonaatsed ja mittekarbonaatsed proovid. Zebre kihistu proovide geokeemia tulemused on esitatud keskmistatud väärtustena. Karbonaatsete intervallide mineraloogia ja geokeemia on esitatud eraldi lõigus, need iseloomustavad tsüklilisi muutusi settekeskkonnas. XRF sulatusmeetodi andmed on esitatud oksiididena.

Zebre kihistusse kuuluvate kihistike mineraloogia XRD tulemustel on kõik kihistikud karbonaatide vaesed (joonis 14, lisa 4), dolomiiti ei leidunud üheski proovis, kaltsiiti leidis vähe, 0.2–1.5% piires Lutrini, Kumbri

ja Kalvene kihistikes. Valdavalt koosnevad Zebre proovid kvantifitseerimata savidest (keskmiselt 38.8%), kvartsist (keskmiselt 21.7%), muskoviidist (keskmiselt 11%) ja päevakivide rühma mineraalidest nagu ortoklass ja sanidiin (keskmiselt 7% ja 12.2%), vähem on esindatud albiiti, mida leidub vaid Zirni ja Kalvene kihistikes. Päevakivide rühma mineraalidel on märgatav kahanemistrend nooremates kihistikes nagu Kalvene ja Zante, Lutrini kihistikus on märgatavalt kõrgem sanidiini sisaldus kui teistes nooremates kihistikes. Savimineraalidest on esindatud kaoliniit (keskmiselt 2.4%) ja kloriit (keskmiselt 3.3%). Lisaks põhimineraalidele esines ka üle tuvastuspiiride anataasi (ligikaudu 1%).



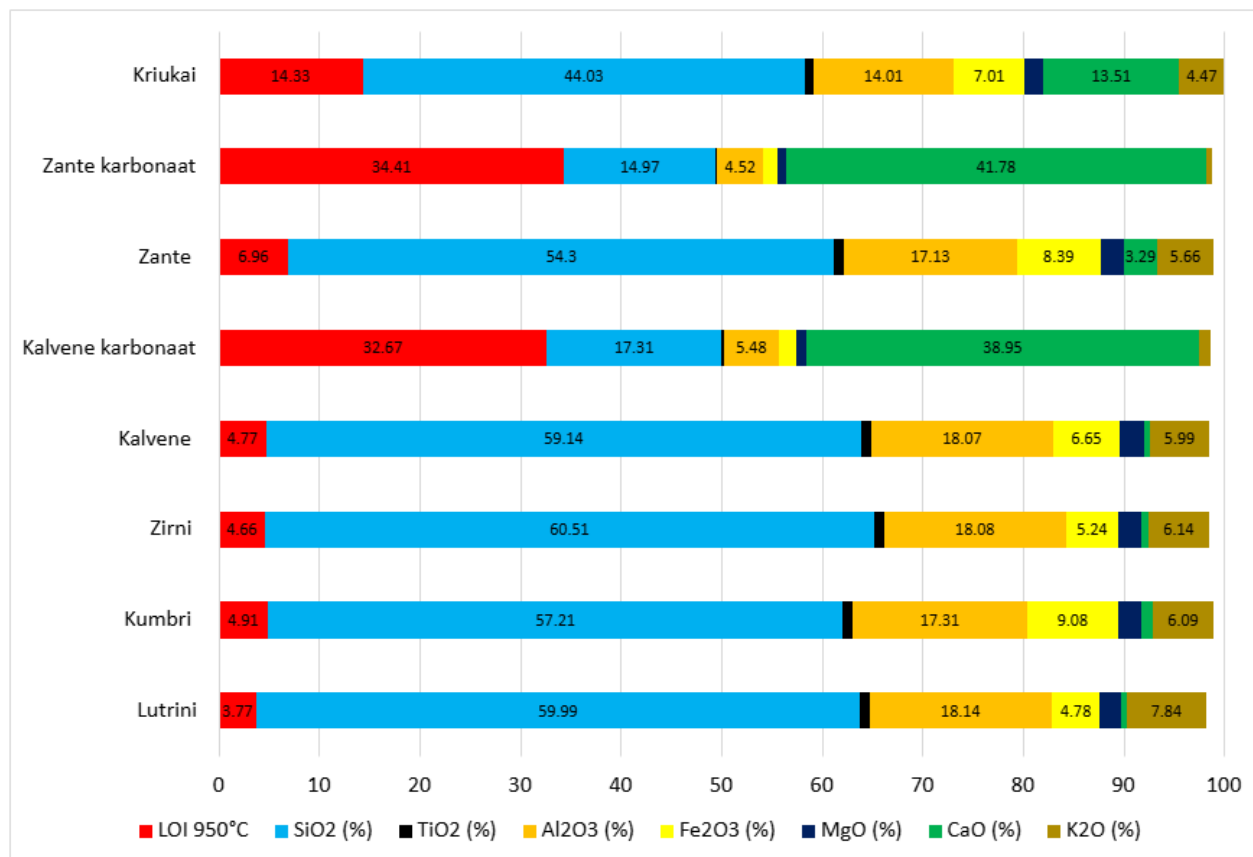
**Joonis 14.** Zebre kihistike keskmistatud mineraalne koostis XRD tulemuste järgi (lisa 3). Mineraalide loetelust on välja arvestatud apatiit, jarosiit, kips ja dolomiit – nende sisaldus oli alla arvestust. Kihistikud/kihistud on reastatud alt-üles vanemast nooremani.

Zebre kihistu savikate proovide LOI on keskmiselt 4.93% (tulemused vahemikus 3.77–6.96%). Esineb LOI väärtuse kasvutrend (joonis 15) nooremates üksustes võrreldes vanematega nagu Lutrini kihistik. SiO<sub>2</sub> osakaal savikates Zebre kihistu üksustes on üle 50%, Zirni kihistikus ka kuni 60%. Proovides on võrdlemisi suur TiO<sub>2</sub> osakaal, kõikide kihistike tulemused on ~1%, erandiks on karbonaatsed intervallid. Zebre kihistu proovides on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 17.8%, Na<sub>2</sub>O 0.38% ja K<sub>2</sub>O 6.26%. Aizpute proovidel on madal väävli- ja mangaanisaldus (alla 0.06% ja alla 0.07%). Magneesium on Zebre kihistus küllaltki muutumatu, keskmiselt 2.29%, väärtused savikates Zebre kihistikes on vahemikus 2.14–2.45%.

Aizpute proovide puhul paistis silma kõrgem jälgelementide sisaldus savikates intervallides (XRF), erandiks oli strontsium, millel oli positiivne korrelatsioon (lisa 2) karbonaatsete proovidega Kalvene ja Zirni kihistikust. Karbonaatidega silmatorkavas negatiivses korrelatsioonis olid elemendid nagu tsirkoonium (~190 ppm võrreldes ~40 ppm karbonaatsetes vahemikes), rubiidium (~200 ppm võrreldes



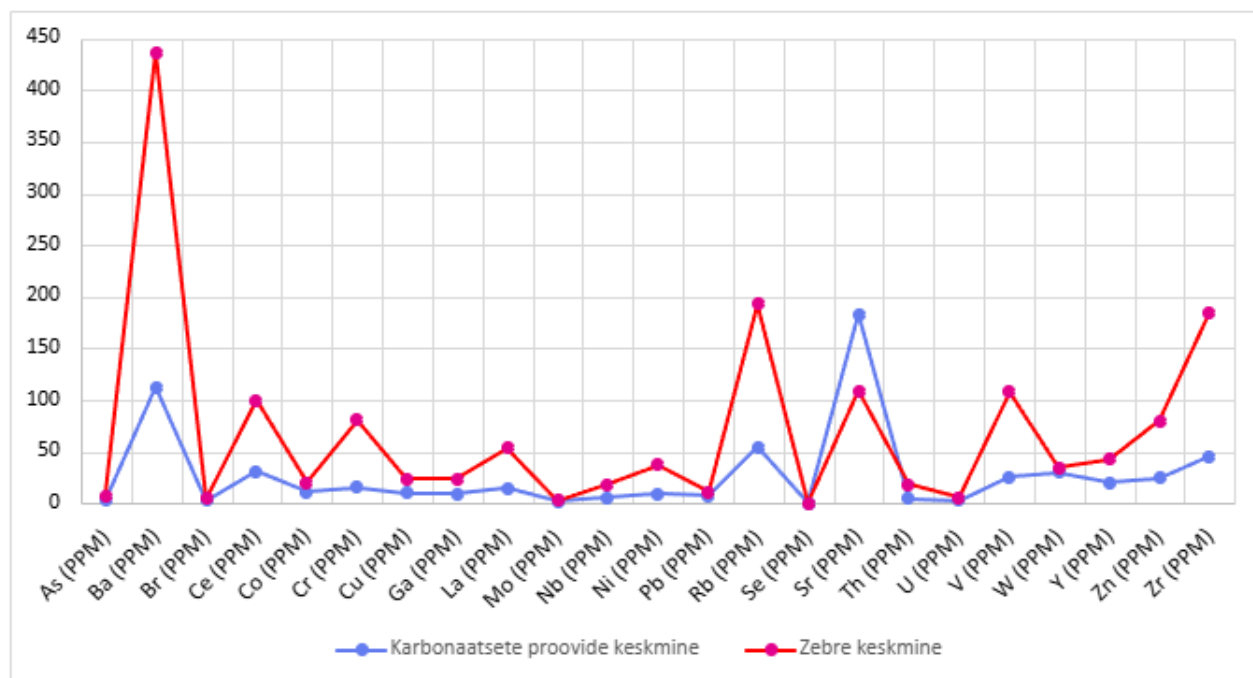
karbonaatides esineva ~55 ppm -iga) ja baarium (~400 ppm võrreldes karbonaatsete proovide ~110 ppm sisaldusega).



**Joonis 15.** Zebre kihistike makroelementkoostis, graafikul on kujutatud savikate intervallide keskmistatud väärtused kihistiku kaupa XRF sulatusmeetodil (lisa 2). Kihistikud on keskmistatud arvestamata karbonaatseid proove.

Karbonaatsete vahekihtide LOI on 950°C juures (lisa 2) Kalvene kihistiku AU24-7 proovis 32.67% ja Zante kihistiku AU24-9 proovis 34.41%. AU24-7 ja AU24-9 karbonaatides domineerib kaltsiit (lisa 4). Erinevalt savikatest intervallidest on karbonaatsete kihtide SiO<sub>2</sub> osakaal vaid 10–20%, TiO<sub>2</sub> sisaldus on 3–4 korda väiksem ning savimineraalide indikaatoriks oleva Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ja K<sub>2</sub>O osakaal on vastavalt 4–5% ja ~1%. K<sub>2</sub>O madal sisaldus on potentsiaalselt seotud kaaliumi lendumisega kaltsiumirikastes proovides. Mangaanisisaldus on suurem karbonaatsetes intervallides kui savikates vahemikes (~0.15% karbonaatsetes võrreldes savikate proovide ~0.04%). Rauaoksiidide sisaldus on väike, olles keskmiselt 1.5%, väävli sisaldus on kaks kuni kuus korda suurem kui savikates intervallides, olles 0.10%. See raua ja väävlioksiidide vahekord ei ole tingitud püriidist.

XRD tulemuste põhjal on proovid AU24-7 ja AU24-9 valdavalt kaltsiidist (keskmiselt 71%) ja kvartsist (keskmiselt 6%). Lisandina esines ka ortoklassi (~2.15%) ning muskoviiti (~3%). Karbonaatsetes vahemikes esines väiksemas sisalduses jälgelemente võrreldes savikate intervallidega (joonis 16), väljaarvatud strontsiumi puhul, mida oli peaaegu kaks korda rohkem võrreldes Zebre proovide keskmistatud sisaldusega.



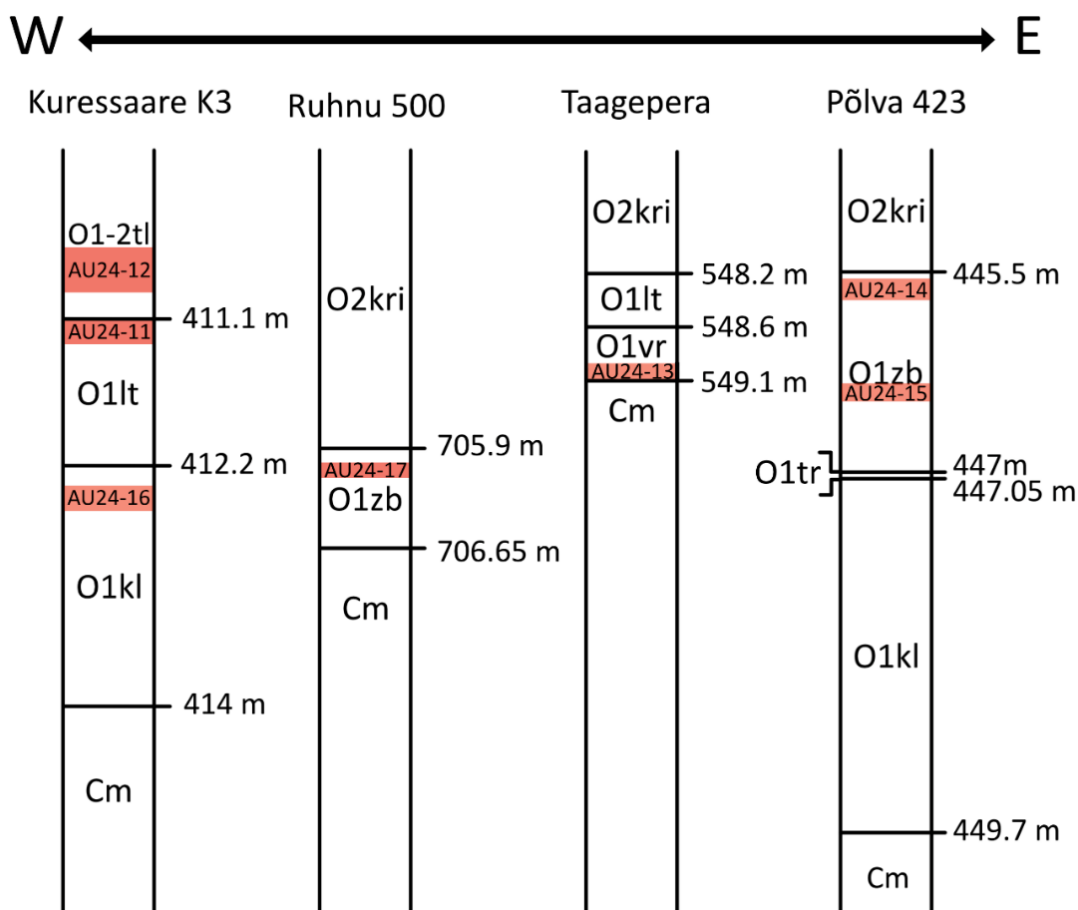
**Joonis 16.** Jälgelementide sisalduse erinevus keskmistatud karbonaatsete proovide ja Zebre savikate intervallide proovide vahel.

## Alam-Ordoviitsiumi kivimid Lõuna-Eestis

### Uuritud proovide litoloogiline iseloomustus

**AU24-11, Kuressaare K3, 411.1–411.2 m, Leetse kihistu ja AU24-14, Põlva 423, 445.3–445.63 m, Zebre kihistu (joonis 17)**

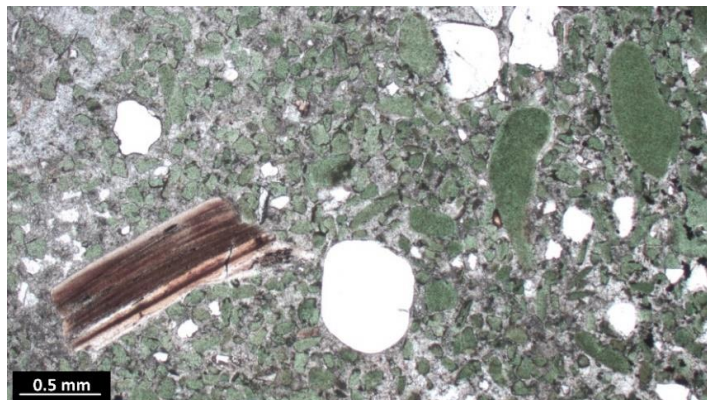
Glaukoniit-liivakivi (joonised 18–20), terasuurus hästi ümardunud kvartsil alates 1 mm teradest kuni eristamatu põhimassini, glaukoniidikogus on intervalliti vahelduv, glaukoniitne põhimass vahetub kvartsiga, mis viitab settimise tsüklilisusele. Pruunika tooniga laikudel esineb maatriksis mikrokaverne, mis näitab, et tsement terade vahel oli karbonaatne ja toimus osaline lahustumine. Sarnaselt AU24-14 prooviga kasvab püriidi konkretsioonide hulk ja suurus (kuni 1.4 mm pikad dendriitsed kasvud) Leetse piirist sügavamale, piiri lähedal esineb peitkristalne punakas peitkristalne mass savika lisandiga.



**Joonis 17.** Eesti puursüdamike läbilõigete Alam-Ordoviitsium, punasega on märgitud proovide asukohad. Ruhnu puursüdamiku stratigraafia (2003) puursüdamiku kirjeldusele, Põlva puursüdamiku jaoks on kasutatud Kajak jt, (1974) aruannet ning Taagepera ja Kuressaare südamike puhul on lähtutud geoloogia.info kodulehel esitatud andmetest.

AU24-14 Põlva puursüdamiku proov on ligikaudu 11 cm pikkusest vahemikust Latorpi ülemlademest (joonis 17). Andmebaasis on proovitud intervall Zebre kihistust, kuid litoloogiliselt vastab Leetse kihistule. Ülemises 2 cm hästi kuni väga hästi ümardunud glaukoniiditerad suurusega kuni 2.25 mm. Glaukoniit

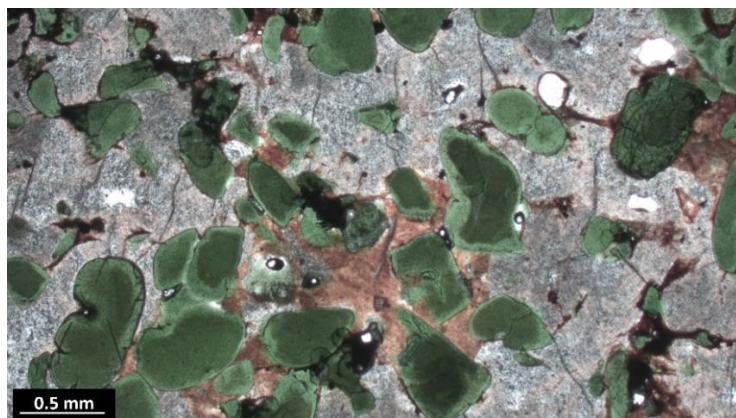
esineb vööndite kaupa, üleval on tihedam mustjas-rohekas glaukoniit, punaka alatooniga. Erinevalt AU24-11 proovist ääristab glaukoniiditerasid püriidikirme. Maatriksi moodustavad (joonis 19) kaltsiidikristallide konkretsioonid ja väga hajus kvartsi esinemine. Kvarts on ebaühtlase ümardumisega, esineb soppides ja on seotud settimissündmustega. Proovis on näha brahhiopoodide fragmente.



**Joonis 18.** Kuressaare K3 puuraugu proovi AU24-11 (411.1–411.2 m, Leetse kihistu) õhik.



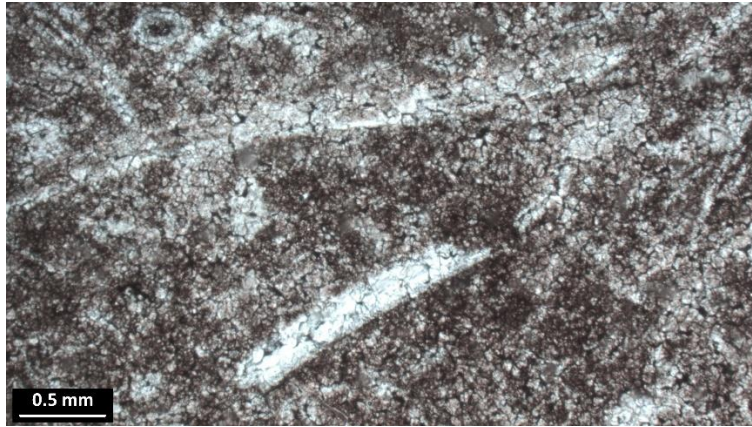
**Joonis 19.** Kuressaare K3 puuraugu proovi AU24-11 (411.1–411.2 m, Leetse kihistu) õhik polariseeritud valguses.



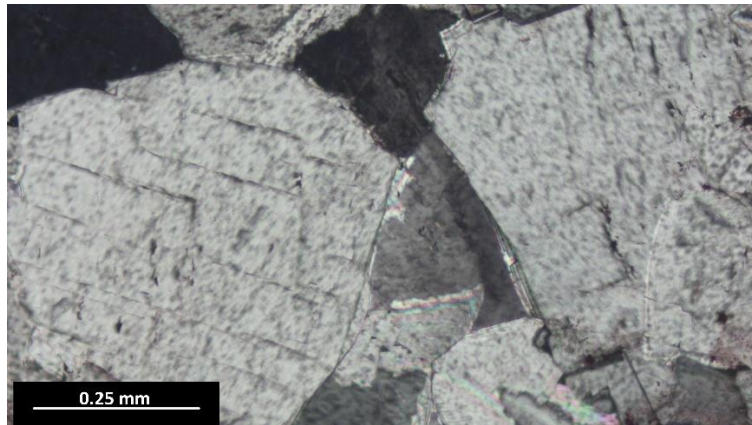
**Joonis 20.** Põlva 423 puuraugu proovi AU24-14 (445.3–445.63 m, Leetse kihistu) õhik. Dolomiitses maatriksis esineb glaukoniit.

**AU24-12, Kuressaare K3, 411.05–410.88 m, Kriukai kihistu**

Dolomiit (joonised 21–22), kohati euheedriline, punakas toon peene glaukoniidiga. Esinevad hematiitse iseloomuga sooned. Käsipala nurgas on suurem glaukoniidikogum poolvertikaalses jaotuses. Mikroskoobi all paistsid bioklastid.



**Joonis 21.** Kuressaare K3 puuraugu proovi AU24-12 (411.05–410.88 m, Kriukai kihistu) õhik. Põhimassis on ümberkristalliseerunud bioklaste.



**Joonis 22.** Kuressaare K3 puuraugu proovi AU24-12 (411.05–410.88 m, Kriukai kihistu) õhik. Dolomiidikristallid polariseeritud valguses.

**AU24-13, Taagepera, 548.60–548.90 m, Varangu? kihistu**

Peeneteraline lamellaarseteks laastudeks lagunenud proov (joonis 23). Terasuuruselt peenliiv (0.2–0.08 mm). Koosneb kvartsist, hajusalt sisalduvad ka mustad orgaanika fragmendid. Kvartsi terade peal on koorikulaadsed äärised, mis viitab karbonaatsele tsemendile. Külgvaates selgineb ka kvartsi leviku iseloom, kvartsi on rikkamalt intervalliti, vahelduvad lamellaarsemad tumedate horisontaalsete lasumistega mineraalid (biotiit ja muskoviit). Hästi sorteeritud sete. Settefaatsies platvormil, kalda lähedal. Pisikesed tsonaalsed punased laigud rauarikkama mineraaliga.



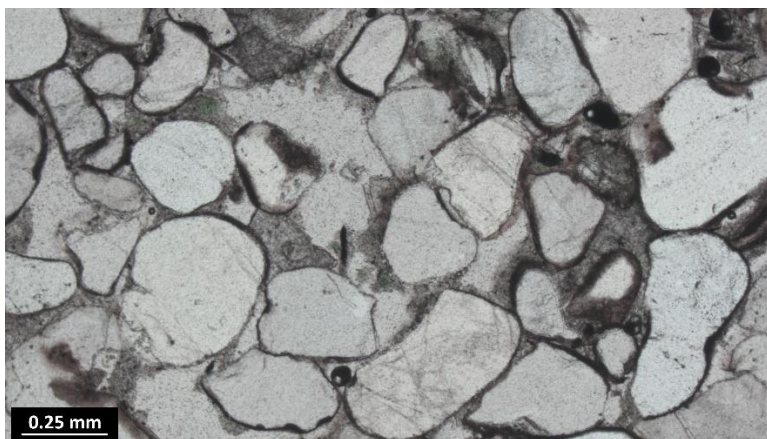


**Joonis 23.** Taagepera puursüdamiku Varangu? kihistu, intervall on vahemikus 549.1–548.6 m

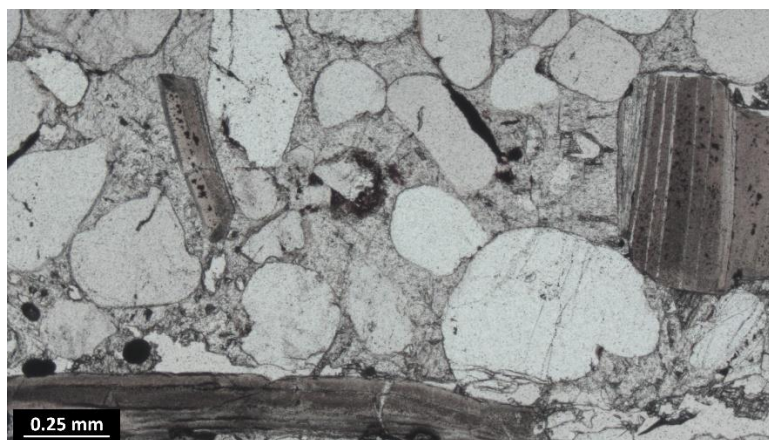
**AU24-15, Põlva 423, 445.89–445.95 m ja AU24-16, Kuressaare K3, 412.5–412.38 m, Kallavere kihistu**

AU24-15 ja AU24-16 on mõlemad Kallavere kihistu liivakivid. AU24-15 proovi moodustavad hästi ümardatud kvartsi terad (joonis 24) suurusega 0.16–0.83 mm. Arvestatav kogus bioklastilist materjali (lingulaatsete brahhiopoodide fragmendid), peeneteraline glaukoniit maatriksis, hajusalt kasvanud kaltsiitne tsement. Lisandub harv peeneteraline püriit, mis on üldjuhul keskmiselt kuni hästi väljakujunenud kristallidega tühimikes või brahhiopoodide fragmentidel.

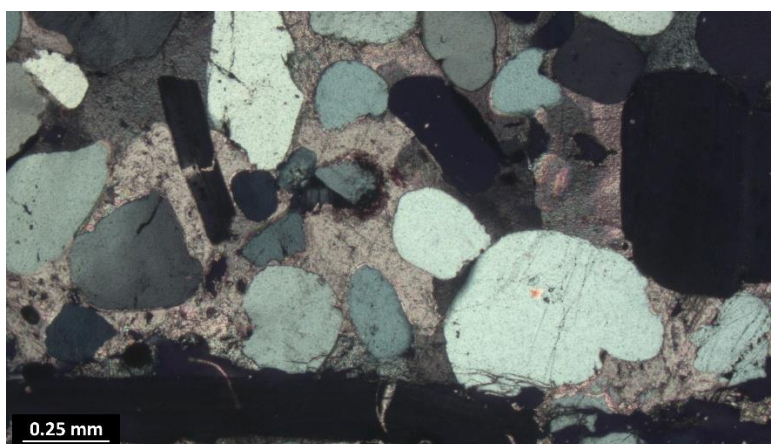
AU24-16 proovi moodustavad pealtnäha muguljad konkretsioonid põhimassis. Põhimassis (joonised 25–26) esineb kvarts ja mõni üksik püriidikristall kvartsiterade peal. Kvartsiteradel on must koorik. Hästi ümardunud keskmise sorteeritusega kvartsiterad on suurusevahemikus 0.16–0.5 mm. Esineb laiguti leviv karbonaatne tsement, milles on eristada vaid põhimassi ja kvartsiteri. Esineb ka dendriitse kasvuga püriidi jätkeid. Glaukoniiti esineb hajusalt väikeste kulunud ümardunud kristallidena suurustes 0.016–0.08 mm.



**Joonis 24.** Põlva 423 puuraugu proovi AU24-15 (445.89–445.95 m, Kallavere kihistu) õhik. Pildil on kerge fosfaatsete või püriitsete laikudega kvartsiterad.



**Joonis 25.** Kuressaare K3 puuraugu proovi AU24-16 (412.5–412.38 m, Kallavere kihistu) õhik. Põhimassi moodustavad kvarts ja fosfaatsed bioklastid.

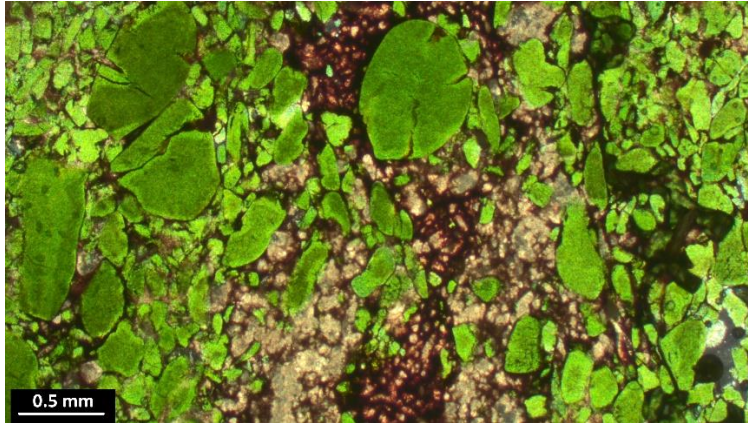


**Joonis 26.** Kuressaare K3 puuraugu proovi AU24-16 (412.5–412.38 m, Kallavere kihistu) õhik polariseeritud valguse all. Sama vaade kui joonisel 24.

#### **AU24-17, Ruhnu 500, 706.15–706.20 m, "Zebre" kihistu**

Purdne ja porsunud rauaoksiidse tsemendiga glaukoniit-liivakivi, milles teisi mineraale ei esine. Glaukoniit on (joonis 27) keskmise kuni hea ümardatusega, kuid halva sorteeritusega. Esmasel vaatlusel meenutas proov tugevama tsemendiga porsunud või leetunud pinnast.



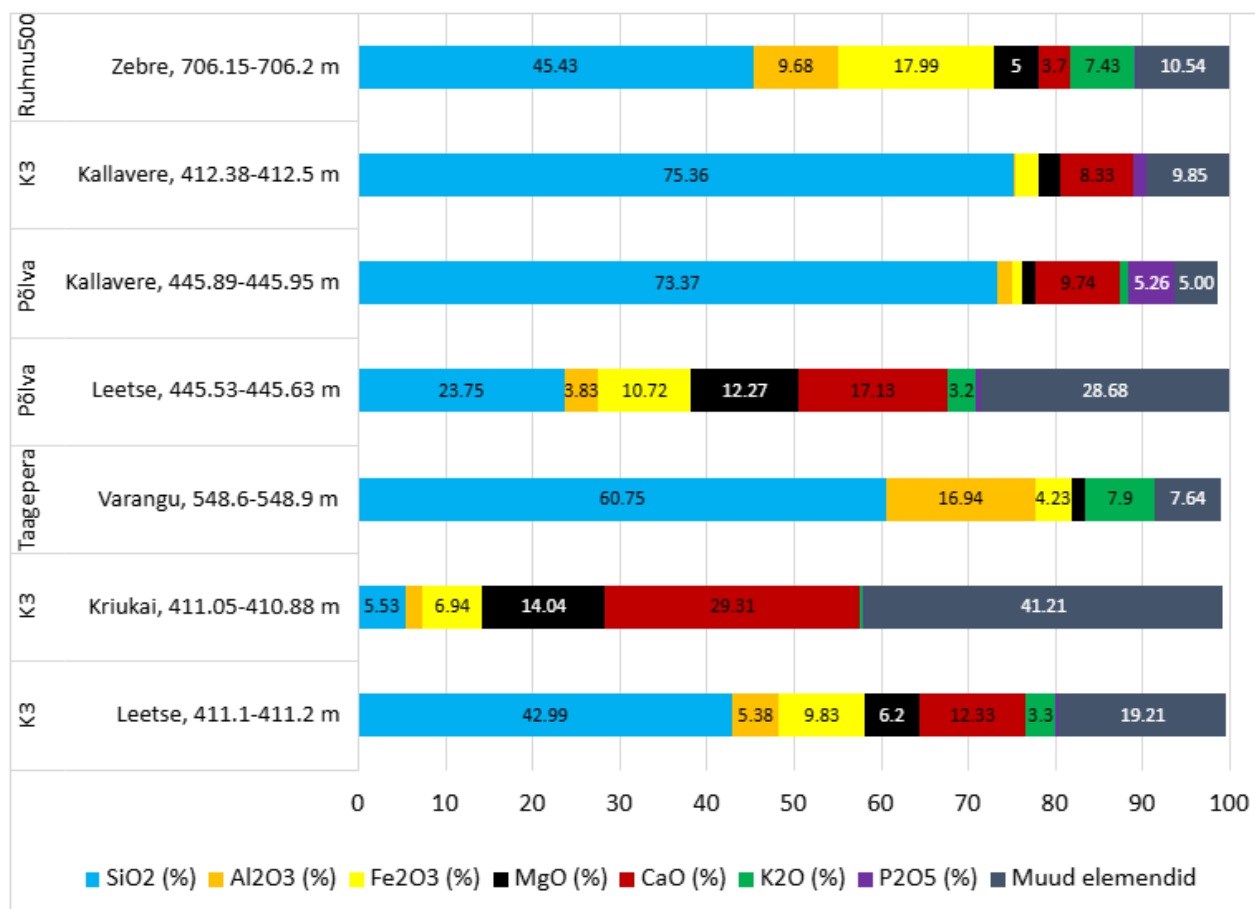


**Joonis 27.** Ruhnu 500 puuraugu proovi AU24-17 (706.15–706.20, 'Zebre' kihistu) õhik. Pilt on värvilisem õhiku suurema paksuse tõttu mitmekordsel impregneerimisel. Näha on glauconiitset põhimassi karbonaatses tsemendis.

Proovide biostratigraafiline analüüs ei andnud palju informatsiooni Lõuna-Eesti proovide kohta. Kuressaare puuraugu Leetse kihistu proovist AU24-11 tuvastati *O. evae* tsooni konodondid, mis viitavad Billingeni lademe keskmisele osale (Peep Männik, isiklik kommunikatsioon 28.04.2025), mis sobitub hästi praeguse Leetse jaotusega. Teistest proovidest ei leidunud määratavaid konodonte.

### *Geokeemia ja mineraloogia*

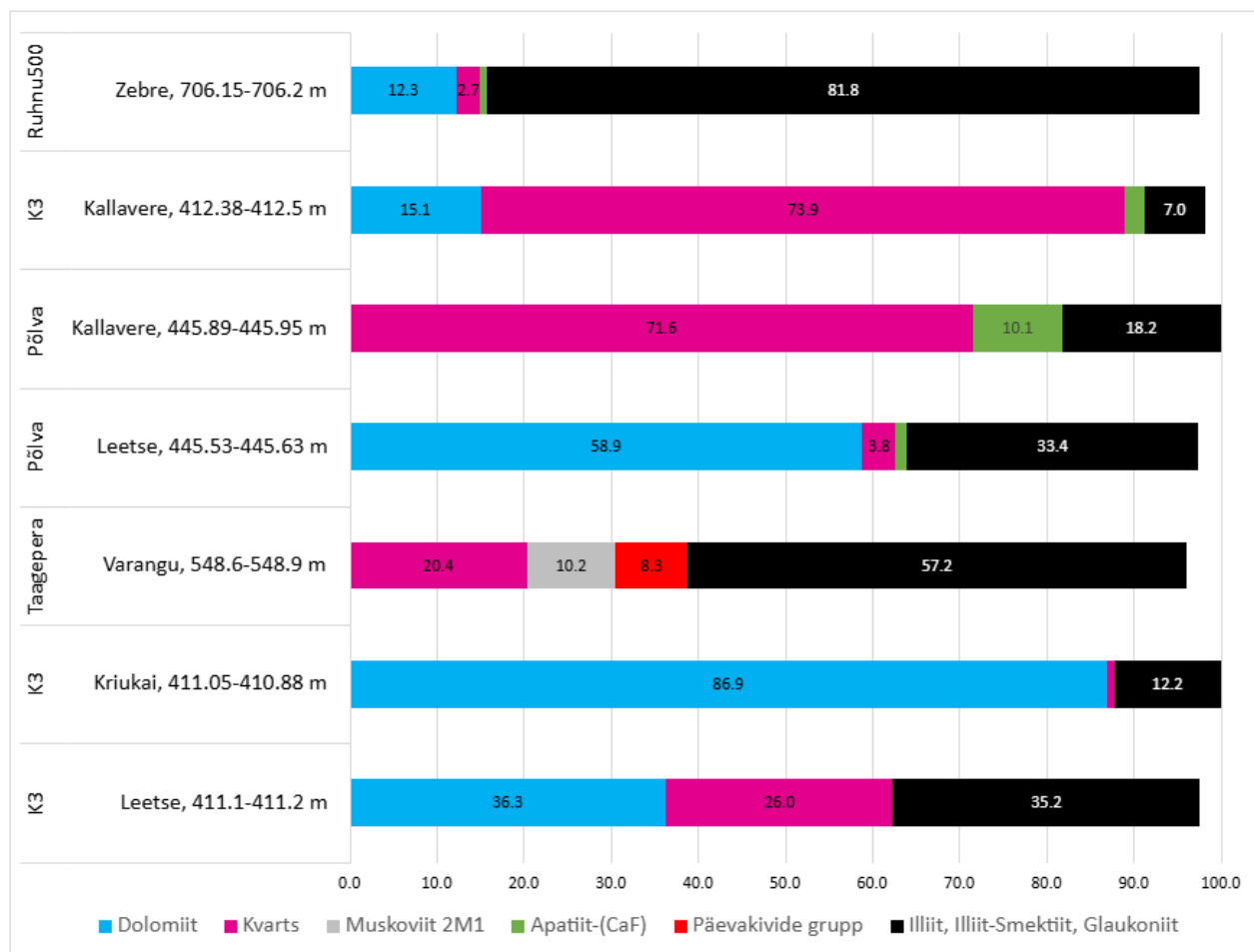
Kallavere kihistu proovid (Põlva AU24-15 ja Kuressaare AU24-16) on madala orgaanika/karbonaatse lisandiga, LOI väärtus on Põlva puursüdamiku proovis 4.45% ja Kuressaare puursüdamikus 9.36% (lisa 2) Sulatusmeetodiga saadud tulemused on toodud joonisel 25.  $\text{SiO}_2$  on mõlemas üle 70%, olles keskmiselt 74.36%.  $\text{TiO}_2$  (~0.12%, madalam Kuressaare Kallavere kihistus),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (Põlva proovis 1.74% ja Kuressaare proovis 0.1%) ja  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (~1–2% mõlemas) on võrdlemisi madal. Põlva proovis on rohkem savimineraalide komponente nagu  $\text{Na}_2\text{O}$  (0.13%) ja  $\text{K}_2\text{O}$  (0.97%) erinevalt Kuressaare proovidest, kus  $\text{K}_2\text{O}$  on 0.05% ja  $\text{Na}_2\text{O}$  0.04%. Põlva proov paistab silma kõrge fosforilisandiga,  $\text{P}_2\text{O}_5$  sisaldus on 5.26% XRF sulatusmeetodi andmetel. Mõlemal Kallavere kihistu proovil on sarnane S (~0.17%), CaO (~9%) ja MgO (2.04%) sisaldus.



**Joonis 28.** Lõuna-Eesti proovide geokeemia XRF sulatusmeetodil. Muud elemendid on CO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, MnO, Na<sub>2</sub>O, SO<sub>3</sub> ja Cl.

Mineraalse koostise poolest koosneb Kallavere kihistu valdavalt kvartsist (72–73%), apatiidist (AU24-15 proov on apatiitsem väärtusega 14.44% võrreldes AU24-16 4.1%) ja dolomiidist (AU24-15 proovis 5.4%, AU24-16 proovis 14.7%). Kallavere proovide puhul esines kohati kõrgeenenud jälgelementide sisaldus koobalti ja volframi puhul, kuid see signaal pärineb litterveskist. AU24-16 proovis on võrreldes kõikide proovidega kümnetes kordades suurem plii sisaldus (lisa 3), 673 ppm ehk 0.06%. AU24-15 proov sisaldas erinevalt AU24-16 proovist kõrgemas sisalduses elemente nagu ütrium (150 ppm), ja strontsium (422 ppm).

Taagepera puursüdamikust pärit proovi AU24-13 (Varangu? kihistu) LOI oli 6.66%, see koosneb valdavalt ränist (joonis 28), rauaühendeid ei esine palju, vaid 4.2%, kusjuures väävlühendeid XRF sulatusmeetod ei tuvastanud. Titaani (0.81%) ja alumiiniumi (16.94%) hulk on arvestatav, lisaks alumiiniumile on ka kõrge K<sub>2</sub>O kogus, 7.89%. Na<sub>2</sub>O on seevastu madal, vaid 0.14%. Mangaani-, kaltsiumi- ja fosforisisaldus on kõik alla 0.13%. Põhimineraalide koostis on AU24-13 proovis (joonis 28) kvarts (20.4%), muskoviit (10.2%), ortoklass (8.3%) ja jarosiit (2.8%). Varangu kihistu sisaldab palju huvitavaid jälgelemente (lisa 3) nagu tsirkoon (171 ppm), vanaadium (130 ppm), rubiidium (165 ppm), nikkel (51 ppm) ja molübdeen (9.6 ppm).



**Joonis 29.** Lõuna-Eesti puuraukude proovide AU24-11–AU24-17 mineraalne koostis XRD analüüsi põhjal. Joonisel on kujutatud mineraalid, mis moodustavad üle 5%, mittekvantifitseeritud väärtused sisaldavad endas illiiti, illiit-smektiiti ja glaukoniiti.

Leetse kihistust on kaks proovi, AU24-14 Põlva 423 puursüdamikust ja AU24-11 Kuressaare puursüdamikust. Kaks Leetse proovi on küllaltki erinevad (joonised 27–28). AU24-14 LOI on 27.24%, silikaatne osakaal on 23.75%,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  sisaldus on 10.72%. Valdavalt savimineraalidest on pärit  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (3.83%) ja  $\text{K}_2\text{O}$  3.18%, naatriumi osakaal on väike (0.08%). Tegu on karbonaatse prooviga,  $\text{CaO}$  sisaldus on 17.13% ja  $\text{MgO}$  sisaldus on 12.27%. Väävlisisaldus on 1%, leidub ka keskmisest kõrgem kogus fosforiühendeid (0.55%). AU24-11 proovi LOI on 17.78%,  $\text{SiO}_2$  sisaldus on 42.99%,  $\text{TiO}$  0.53%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  5.38% ja  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  9.83%. Esineb kõrgem väävl- ja fosforiühendite hulk (0.48% ja 0.55%).  $\text{Na}_2\text{O}$  on vähesel määral, vaid 0.08% kuid  $\text{K}_2\text{O}$  on seevastu 3.33%. Tegu on vähem karbonaatse prooviga kui AU24-14,  $\text{CaO}$  on 12.33% ja  $\text{MgO}$  on 6.20%. AU24-11 koosneb 36.3% dolomiidist ja 26% kvartsist, vähemal määral sisaldub apatiiti (1.4%), püriiti (0.5%), kaltsiiti (0.7%) ja anataasi (0.5%). Jälgelementidest (lisa 3) on Kuressaare proovis suuremas koguses kroomi (107 ppm), strontsiumi (116 ppm) ja volframi (106 ppm). AU24-14 koosneb 58.9% dolomiidist ja kvartsist (3.8%), kõrvalmineraalid on ortoklass 1.1% ja püriit 1.5%.

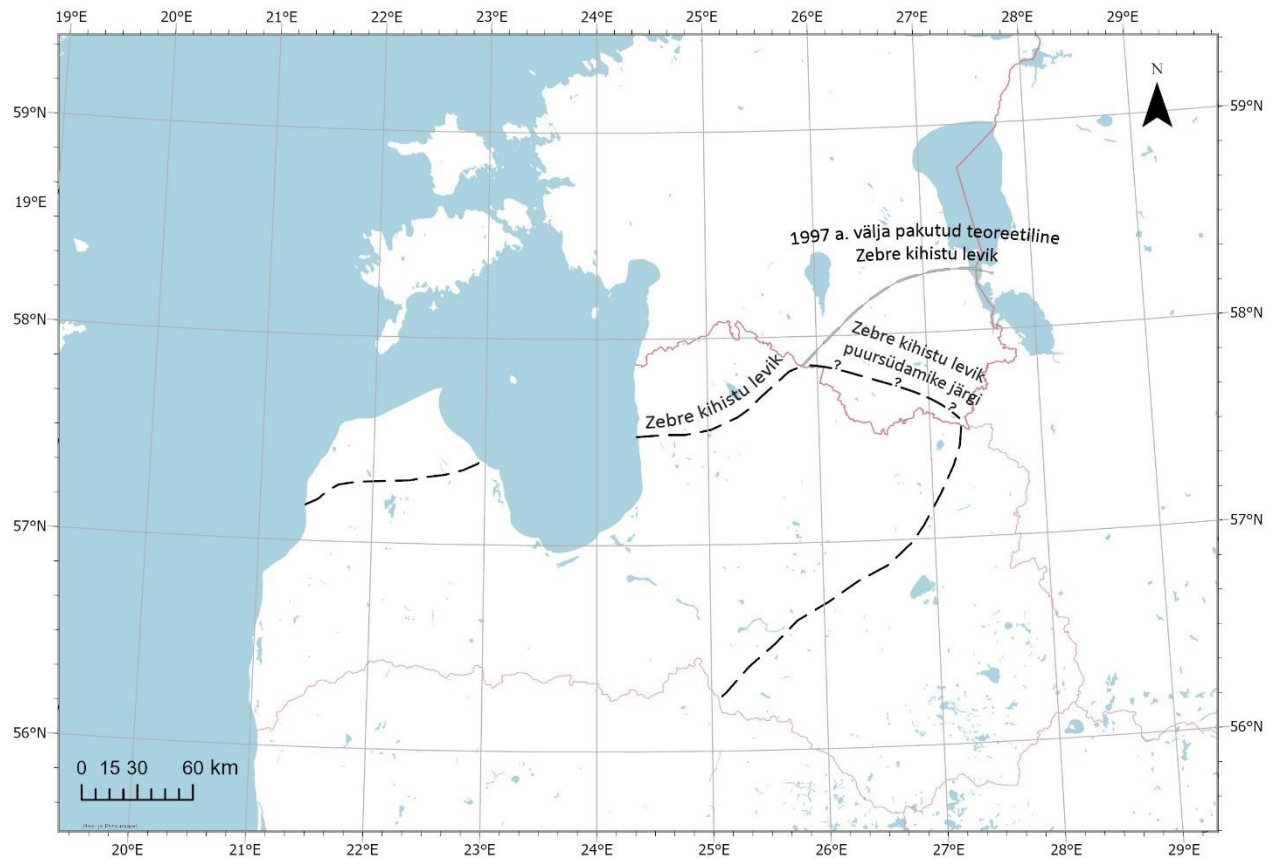
Kuressaare K3 puursüdamikust pärit AU24-12 Kriukai kihistu proovi LOI on 40.53%, räni- ja alumiiniumi sisaldus on väike, 5.53% ja 1.87%.  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  sisaldus on 6.94%,  $\text{MnO}$  on 0.39%,  $\text{MgO}$  on 14.04% ja  $\text{CaO}$  on 29.31%. Savimineraalide ja päevakivide komponente on vähe,  $\text{Na}_2\text{O}$  sisaldus on 0.05% ja  $\text{K}_2\text{O}$  sisaldus on

0.36%. Mineraalse koostise poolest on AU24-12 86.9% dolomiit ja 0.9% kvarts, ülejäänud mineraalid olid alla tuvastuspiiri või kvantifitseerimata. Jälgelemente on proovis vähe, kõrgema sisaldusega on strontsium (75 ppm) ja volfram (52.6 ppm) (lisa 3).

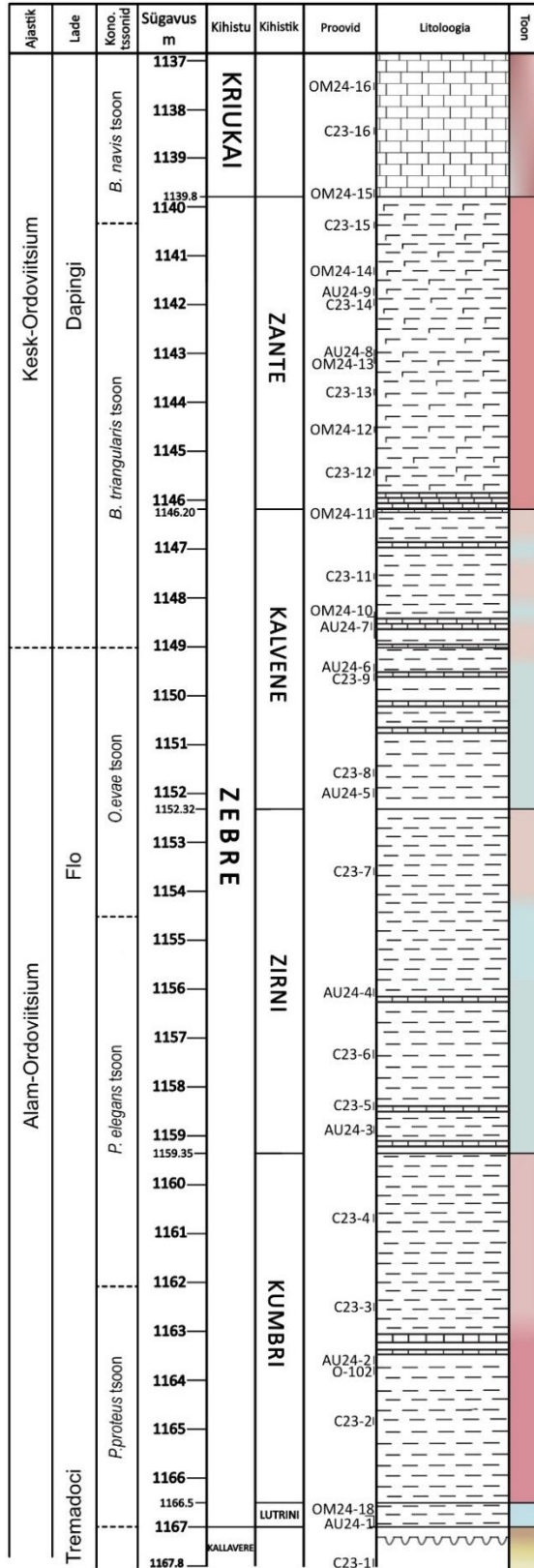
'Zebre' kihistu proov Ruhnu puursüdamikust koosneb (joonis 29) valdavalt mittekvantifitseeritud glaukoniidist ja savimineraalidest (82.8%) ja dolomiidist (12.3%). Vähemal määral sisaldab see kvartsi (2.7%), hematiiti (1.1%) ja apatiiti (0.8%).

## Arutelu

Lõuna-Eestis on Zebre kihistu nimetust kasutatud kümnes puursüdamikus (joonis 3), kuid nende litoloogiline kirjeldus ei vasta üldjuhul Lätis esinevale Zebre üksusele. Erandiks on Laanemetsa 70 puursüdamik (Mens ja Kala, 1963), mille geokeemiline ( $\text{SiO}_2$  50.5%,  $\text{TiO}$  0.91% ja  $\text{Al}_2\text{O}_3$  18.32%) koostis on Zebre kihistust kõige paremini korreleeruv Lutrini kihistiku prooviga. Samasugune kivim ei esine aga Karula 320 ega Võru puursüdamikus. Üldjuhul on Eestist kirjeldatud 'Zebre' kihistu puhul tegemist ümardumata jämedateralise glaukoniidi lisandiga tugevalt tsementeerunud dolomiidistunud lubjaka liiva- kuni lubjakiviga. Geograafiliselt ulatuvad Lõuna-Eestis Zebre kihistu kirjeldusega puursüdamikud kaugemale kui Meidla (1997a) poolt näidatud Zebre kihistu levila piir. Zebre nime on Eesti stratigraafias kasutanud mitmed autorid (Mens ja Kala, 1963; Põldvere, 2007; Põldvere, 2003; Kajak jt, 1974; Põldvere jt, 1999) kui tüüpnimetust keeruliselt määratavale settele, mis ei sobitu selge definitsiooni järgi kusagile mujale. Arvestades seda on realistlik Zebre kihistu levik Lõuna-Eestisse tagasihoidlikum (joonis 30).



**Joonis 30.** Zebre leviku väljapakutud ulatus Lõuna-Eestis. Halli joonega on kujutatud Zebre kihistu levila piir Meidla (1997a) järgi. Kihistu levik Lõuna-Eestisse ei ole täpselt määratletud, piir on tõmmatud arvestades Mens ja Kala (1963) aluspõhja aruande geoloogilisi kirjeldusi Laanemetsa 70 puursüdamiku kohta. Aluskaart: Maa- ja Ruumiamet, 2025.



Joonis 31. Aizpute-41 läbilõige Liefroy (2024; personaalne kommunikatsioon, 2026) esmase biostratigraafilise analüüsi andmetel.



Aizpute-41 puursüdamikus esines litoloogilistes kirjeldustes varasemalt mainimata karbonaatseid intervale. Need tuvastati mitmes kihistikus (joonis 31), kuid suurim esinemissagedus oli Kalvene ja Zante kihistik. Zante kihistiku karbonaatse intervalli biostratigraafiline analüüs viitab *B. triangularis*-e konodonditsoonile, mis kuulub Dapingi globaallademesse ja Volhovi lademesse. Üleminek Kriukai kihistusse on seeläbi siirdeline ning enne selgelt piiritlevat karbonaatset üksust esineb Kriukaile litoloogiliselt sarnaseid lühikesi settetsükleid. Lieffroy (2024; personaalne kommunikatsioon, 2026) esmased tulemused näitavad, et Aizpute-41 puursüdamiku Zebre kihistu ei kuulu ainult Alam-Ordoviitsiumisse, vaid Kesk-Ordoviitsium algab juba Kalvene kihistiku keskelt. Need uued dateeringud võimaldavad täpsustada stratigraafilist skeem ning laiendada Zebre kihistu ajalist mahtu (joonised 31 ja 33).

Litostatigraafiliste põhimõtete alusel peaksid üksused olema selgelt defineeritud ja vastama kirjeldustele, mis on püstitatud stratotüüpse paljandi või tugipuuraugu abil. Hetkel on kasutusel Lätist laenatud Zebre kihistu, mille stratotüübid ja tüüpala on Lätis, ning Eestist ei ole säilinud ühtegi stratotüüpsele kirjeldusele vastavat puursüdamikku, mida kasutada tugiläbilõikena. Praegusel kujul on Ordoviitsiumi stratigraafiline skeem ja ka geoloogilise kaardistamise juhend eksitav. Ilma detailsema uurimiseta jääb mulje, et Lõuna-Eesti Alam-Ordoviitsiumi moodustab Kallavere kihistu peal lasuv Zebre kihistu savikas kivim. Valikuid selle vastuolu lahendamiseks on mitu: kas kasutada edasi Zebre nimetust ja täpsustada kihistu definitsiooni, võtta Zebre asemel kasutusele mõni juba väljapakutud mujal kasutust leidnud ja litoloogiliselt sobiv üksus, või luua uus kihistu.

Zebre nimetuse kasutamise jätkamine Eestis oleks teoreetiliselt võimalik, kuna mõnes Kesk- ja Lääne-Läti puursüdamikus on iseloomustatud sarnast glauconiiti sisaldavat dolomiitset 10–20 cm paksust ülemist kihti (Ulst jt, 1982). Siiski on selle puhul tegemist erandliku intervalliga Birini ja Olaine D-4 puursüdamikes ja see ei vasta kihistu põhidefinitsioonile. Vaadeldud Lõuna-Eesti südamikes on dolomiitne intervall õhukesem, piirdudes kuni 10 cm-ga Kuressaare ja Põlva puursüdamiku näitel. Zebre kihistu litoloogiat on eelkõige iseloomustatud kui Jelgava nõoga seotud paksu kirjude savidega esindatud kompleksi. Jätkates Zebre nimetuse kasutamist on vaja ühtse arusaamise tagamiseks selgelt eristada savide ja karbonaatide osakaal Eesti 'Zebre' kihistus ning lisada täpsustavat litoloogiat, et välistada ekslik arvamus savide levikust Lõuna-Eesti Alam-Ordoviitsiumis. Muidu viite kihistikku hõlmava kihistu alajaotust ei ole võimalik Lõuna-Eesti geoloogilises läbilõikes kasutada, sest Zebre kihistikke eristatakse peamiselt värvi erinevuste põhjal ning Lõuna-Eestis leiduvale glauconiitsele dolokivile ei vasta mitte ühegi kihistiku kirjeldus, rääkimata vahelduvast tonaalsusest. Hetkeseisuga on vaja litoloogia mõistmiseks lugeda individuaalselt puursüdamike kirjeldusi.

Üksuse litoloogilise kirjelduse mitesobivuse puhul oleks võimalik määrata ümber seni Zebre kihistu raamidesse paigutatud geoloogilised intervallid teise kihistu nime alla. Potentsiaalseid alternatiive on nii Skandinaavia kui ka Eesti stratigraafiast.

Viimase alternatiivina on võimalik pakkuda välja uus kihistu või kihistik. Nimelt on meil on litoloogiline üksus, mis ei vasta kehtivatele geoloogilistele kirjeldustele ning mille levik on Lõuna-Eesti puursüdamikes küllaltki läbiv. Võttes aluseks mõne esinduslikuma puursüdamiku, näiteks Põlva-423 või Tartu-453, oleks võimalik luua uus stratigraafiline üksus hetkel Zebre nimetust kandvale intervallile. Tegu on ulatusliku protsessiga, millel on palju samme, lisaks adekvaatse nimetuse leidmisele on vaja välja valida ning läbi

uurida piisavalt esinduslik stratotüüp ja luua uue kihistu kirjeldus, mis on esindatud ametlikus publikatsioonis. Potentsiaalsed nimed puursüdamike järgi, mida pole veel stratigraafilise üksuse jaoks kasutatud, on näiteks Taagepera, Põlva või Mehikoorma. Arvestades väikeseid kihipaksuseid, Eesti stratigraafia niigi kirjut ja mitmekesisest ülesehitust, käsil oleva kihistu ebaselget levilat ja Lõuna-Eesti vähest puuritust ei ole uue üksuse defineerimine hetkel siiski mõistlik.

Kõikidest väljapakutud variantidest on kõige mõistlikum leida sobiv alternatiiv segadust tekitavale kihistule ning sobitada see olemasoleva stratigraafilise üksuse alla, mis kirjeldaks kihistut täpsemalt kui praegune Zebre kihistu nomenklatuur.

## Zebre kihistu alternatiivid

### *Björkasholmeni kihistu*

Björkasholmeni kihistu on mitmest mikrotsüklist moodustuv hallide kilda vahekihtidega lubjakivi, mille ülemises intervallis esineb glaukoniitlubjakivi. Rootsisis on eraldatud välja Björkasholmeni kihistu ülemine osa omaette kihistuna Köpingsklinti nime all (Stouge, 2004), mis erinevalt Björkasholmeni kihistust, sisaldab läbivalt glaukoniiti. Eestis leiduvad 'Zebre' vahemikud on üldiselt dolomiitsed, kuid erinevalt Björkasholmeni kihistust, lasuvad Lõuna-Eesti Alam-Ordoviitsiumi kivimid sügavamal, mis võib seletada glaukoniitse dolomiidi esinemist glaukoniitlubjakivi asemel. On oluline mainida, et Norra ja Rootsi üksused on tugevalt seotud orgaanikarikka mudakiviga (*Alum Shale*), olles selle lasumiks. Türisalu kihistu levila piirdub Põhja-Eestiga, kuid aleuriitseid orgaanikarikkaid mudakivi vahekihte esineb kohati ka Lõuna-Eestis, ehkki nende ulatus on piiratud ja paksus väike. Sellise leviku tõttu ei ole võimalik lähtuda kihistu originaalsest piiritingimustest (Ebbestad, 1997) – lubimuda ja kilda intervallide ilmumine musta kilda peal.

Björkasholmeni kihistu on ajaliselt piiratud mahuga ning seotud Skandinaavias regressiooni ja transgressiooni tsüklitega (Egenhoff jt, 2010), mida vaadeldud puursüdamikes ei tuvastatud. Arvestades Lõuna-Eestis nähtud glaukoniitset karbonaatkivimit vastaks see vaid Björkasholmeni kihistu ülemise 20 cm kirjeldusele. Sellest lähtuvalt on mõistlikum vaadata Rootsisis Björkasholmeni kihistust välja eraldatud Köpingsklinti kihistut. Köpingsklinti kihistu punakad-violetjad muda- ja lubjakivid vastavad definitsioonilt paremini uuritava intervalliga Lõuna-Eestis. Ka Stouge (2004) mainitud aleuriidi ja liivakivide intervallid on võimalik leida hetkel Zebre nime kandvatest kihtidest käesoleva töö uuringute põhjal. Vanuse poolest on Köpingsklinti kihistu lai, vastates Varangu ja Hunnebergi lademele, mis on üle poole Alam-Ordoviitsiumist. Usaldusväärsust vähendab kihistu ebaühtlane levik, Ölandi poole liikudes suidub kihistu välja. Fatsiaalselt on siiski tegemist sarnase madalaveelise karbonaatse platvormi keskkonnaga nii Köpingsklinti kui ka Lõuna-Eestis leiduva 'Zebre' kihistu puhul. Erinevalt Lõuna-Eesti kivimitest on töös kirjeldatud Rootsi ja Norra kihistike iseloomustavaks omaduseks meretaseme kõikumist peegeldav tsüklilisus – kildad vahelduvad karbonaatidega, lubjakivis muutub süstemaatiliselt terasuurus. Lõuna-Eesti kivimite uuringud viitavad rahulikumale keskkonnale ning transgressiooni ja regressiooni tsüklitele, milles puudub järsk kivimitüübi vaheldumine kihistu siseselt. Geokeemilised ja mineraloogilised võrdlusandmed on kasutatud Stouge (2004) ja Egenhoff (2010) publikatsioonidest puudu, mistõttu ei ole võimalik uuritud Lõuna-Eesti puursüdamike tulemusi Björkasholmeni ja Köpingsklinti kihistu andmetega siiski otseselt kõrvutada.

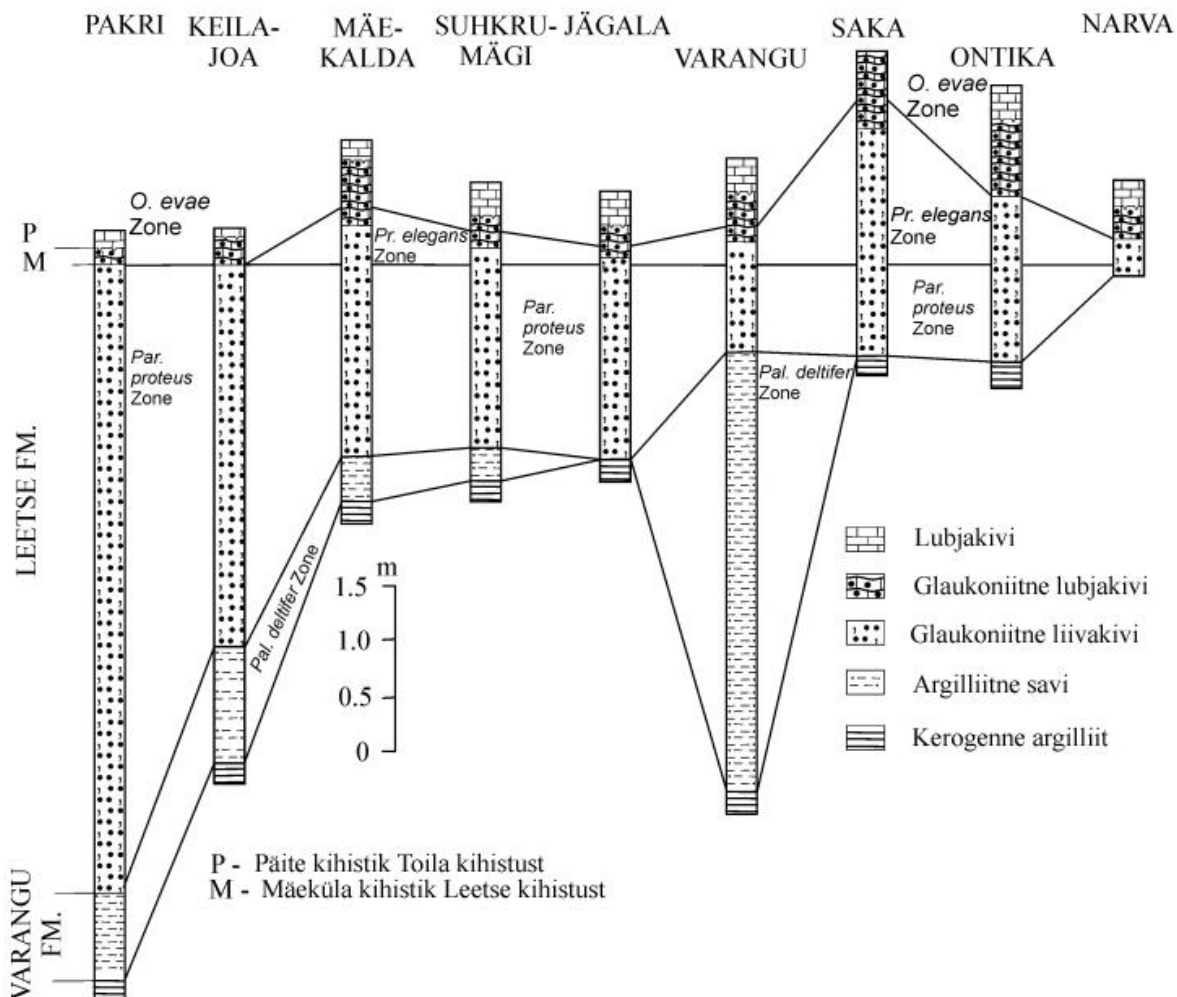
Arvestades Eesti stratigraafia puudusi ja probleeme, mis tekkisid Zebre kihistu nime kasutusele võtmisega, peab olema ettevaatlik teise välismaise stratigraafilise üksuse kasutuselevõttuga, sest eesmärk ei ole asendada ühte võõrast nime teisega vaid muuta Eesti Ordoviitsiumi stratigraafiline skeem täpsemaks ja selgemini arusaadavaks. Arvestades Eesti stratigraafias leiduvate erinevustega Skandinaavia stratigraafiaga võrreldes, ei ole mõistlik võtta kasutusele üksust, mille definitsioon ja lasumine on tihedalt seotud lamami-lasumi suhetega. Kirjeldatud üksused on eraldatud musta kilda kihtide järgi, mida Lõuna-Eestis ei esine. Kronostratigraafiliselt leiab seoseid settimiskeskondade ja faatsiestega, kuid kihistut kirjeldades välitingimustes on puudus tunnustest, mis lubaksid eristada Kõpingsklinti kihistut Leetse kihistust.

### *Leetse kihistu*

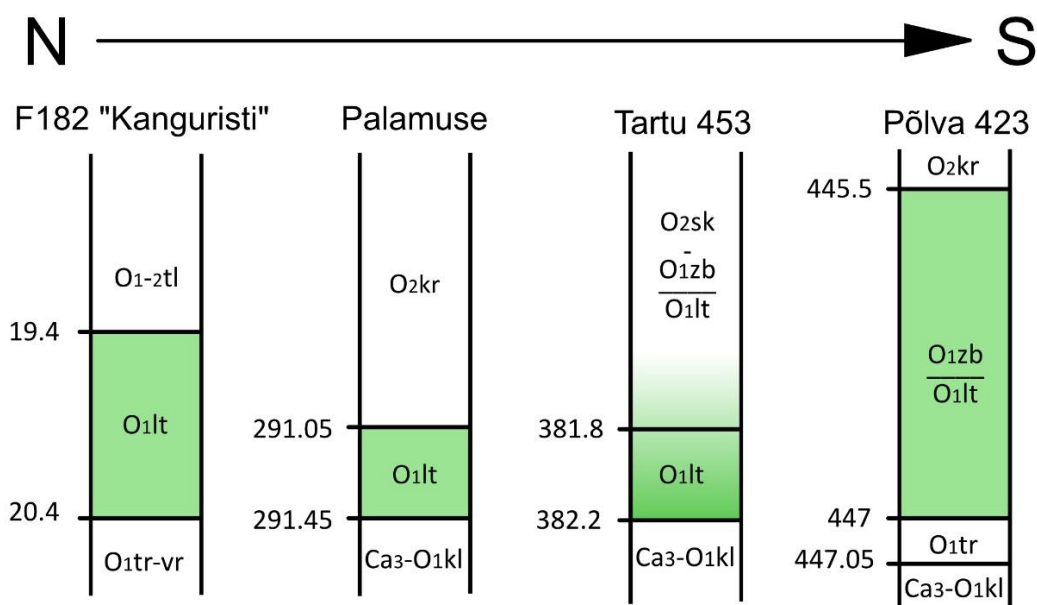
Jelgava nõo geoloogilised kirjeldused (Ulst jt, 1984) ei ole piiritletud Zebre ja Leetse üleminekut täpselt, kuid üldistavalt on pinnavormi sügavamas osas Zebre mudad ja paleobassini madalamas osas Leetse glaukoniitsed setted. Võttes aluseks Läti kirjanduses mainitud Leetse kihistu ilmingu faatsiese muutusel, ei ole välistatud selle jätkumine Lõuna-Eestis. Leetse kihistu levila kaartide järgi ulatub Leetse kihistu põhjast-lõunasse vähemalt Kesk-Eestini ning sealt lõuna poole teadmata ulatuseni. Kronostratigraafiliselt on Leetse ja Zebre kihistud sarnase vanuse ja ajalise mahuga. Leetse kihistu kolmest kihistikust vastavad uuritud puursüdami ke intervallid kõige paremini Mäeküla kihistikule, mida iseloomustab erinevalt Klooga ja Joa kihistiku aleuriitsetest setetest suurem karbonaatsus. Mäeküla kihistikku iseloomustab karbonaatse tsemendi ja glaukoniidiga liivakivi. Uuritud Lõuna-Eesti puursüdami ke mineraloogia ei vasta ilmtingimata liivakividele. Põlva 423 puursüdami ke on kvartsi sisaldus 3.8% ning Kuressaare K3 südami ke 26%.

Leetse kihistu ei ole ühtlane, Põhja-Eestis erineb see ida-lääne suunal settimise kiiruse, ja -keskkonna poolest ning kihistu sisemine ehitus on läätseline ning muutlik (joonis 32). Kesk- ja Lõuna-Eestisse ulatudes tõenäoliselt see muutlikkus suureneb, kuid detailsemad andmed selle kohta puuduvad. Leetse kihistu esindatus Põhja- ja Lõuna-Eestis arvestades hetkest Zebre kihistut Leetse kihistu hulka on toodud joonisel 33.

Lõuna-Eesti puursüdami kes ja Petseri 330 südami ke tuvastatud (lisa 6) kirjuvärvilisus ja dolomiitsus on tingitud hilisematest füüsikalistest protsessidest mitte algsetest settimisetingimustest. Sügavamal lasuvad kivimid saavad rohkem survet ja toimuvad diagenetilised muutused maapõues liikuva põhjavee ja lasuvate kivimite raskuse tõttu. Ida poole liikudes Eesti litoloogias muutuvad kivimid kirjumaks, mis seletab ka Petseri 330 südami ke punakas-kollakat tooni sarnaselt Narva piirkonna kivimitele.



**Joonis 32.** Varangu ja Leetse kihistu levik Põhja-Eestis ida-lääne lõikes, Viira jt (2006) järgi. Kihistu paksus väheneb läänest itta.



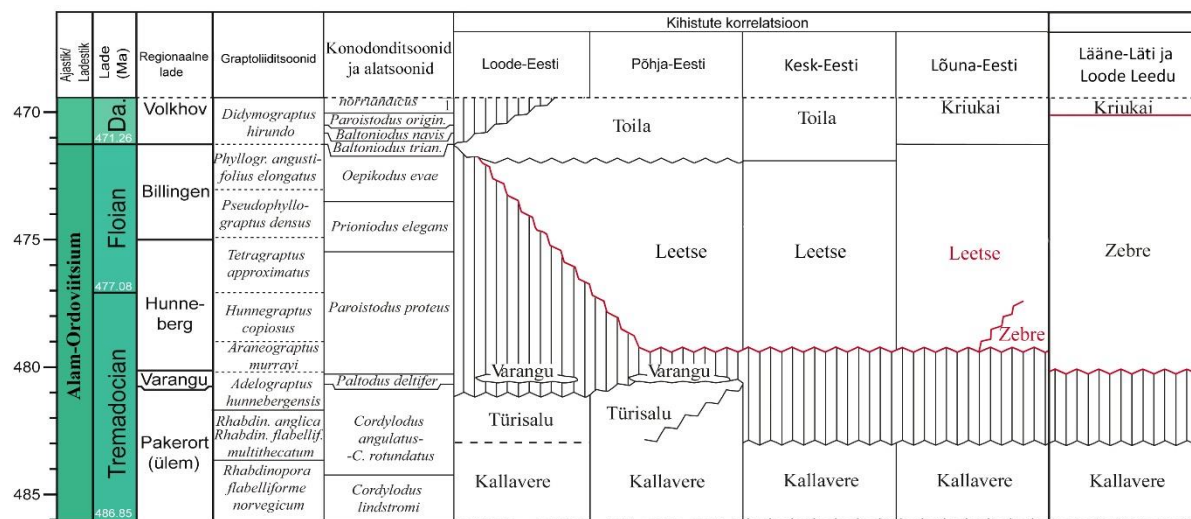
**Joonis 33.** Leetse kihistu põhja-lõuna suunaline profiil, Tartu 453 ja Põlva 423 läbilõikes on Zebre kihistu loetud Leetse kihistuks. F182 puursüdamik on joonistatud Puura jt (1977) andmete põhjal. Palamuse läbilõige on joonistatud Kõrvel jt (1963) andmete põhjal.

Zebre kihistuna kirjeldatud kivimiüksuste iseloom on erinev Lõuna-Eesti mandrilistest puursüdamikes ja Ruhnu 500 puursüdamikus. Mandri-Eestis on valdavalt 30-35% mittekvantifitseeritud glaukoniiti sisaldav dolokivi. Ruhnu puursüdamikus on intervall vähem dolomiidistunud (15% võrreldes Mandri-Eesti 36.3-58.9% dolomiidiga), kuid see puursüdamik on halvasti säilinud ning ei pruugi peegeldada kivimi algseid omadusi täiel määral. Lahustumisprotsessidega saab olla selgitatud ka kõrgem glaukoniidisaldus, mis ulatub üle 80%. Nende vahemike erinevus on tingitud settimistingimustest ja hilisematest diageneetiliste protsesside ulatusest. XRF analüüsi tulemused on vaatamata proovide mineraloogilisele erinevusele võrdlemisi sarnased. Sellest lähtudes võib liigitada Ruhnu ja Mandri-Eesti 'Zebre' vahemikud ühe definitsiooni alla.

Põlva 423 südamikus kirjeldatud 'Zebre' kihistu (Kajak jt, 1975) on litoloogiliselt väga sarnane Kuressaare K3 puursüdamikus nähtud kivimile. Põlva 423 puhul on see kirjeldatud Zebre kihistuna ning Kuressaare puursüdamikus on see kirjeldatud (Tassa ja Perens, 1990) Leetse kihistuna. Selle põhjus on ilmne: puursüdamikku kirjeldades lähtuti kehtivast ametlikust rajoneeritud stratigraafia joonisest. Põlva 423 puursüdamik vastas Lõuna-Eesti rajoonile, mistõttu määrati litoloogia Lõuna-Eesti tulba järgi. Kivimite struktuuri ja geokeemia järgi ilmnevad siiski teatud erinevused: Põlva 423 kivim on karbonaatsem ning sisaldab apatiiti. Kuressaare proov sisaldab rohkem terrigeenset materjali liiva kujul, kuid mõlemat iseloomustab sarnane glaukoniidi ja savimineraalide (illiit-smektiit) osakaal, u 35%. Jälgelementide erinevus esineb vaid Cr, W ja Sr puhul, esimesed kaks elementi on sellised, mille sisaldus võib olla tingitud jahvatusanuma enda keemilisest koostisest ning Sr sisaldus on seotud karbonaatsusega.

Arvestades kõikide kirjeldatud alternatiivsete kihistute litoloogiat, geokeemilist ja mineraloogilist iseloomu, biostratigraafiat ning levikut, on mõistlik lugeda uuritud 'Zebre' kihistu nime kandvad glaukoniitsed-liivakad karbonaatkivimid Leetse kihistusse. Puursüdamike puuduse tõttu on kihistu täpset levikut

keeruline määrata. Selge on see, et kiht levib praegustel skeemidel kaugemale kui aruandes kirjeldatud läbilõiked seda näitavad. Joonisel 34 on kujutatud väljapakutud alternatiiv Lõuna-Eesti stratigraafilisele skeemile, mis annab senisest täpsema ülevaate Alam-Ordoviitsiumi ja Kesk-Ordoviitsiumi vanimate kihtide litoloogiast.



**Joonis 34.** Käesoleva töö ning kirjanduse analüüsi tulemusel täpsustatud Alam-Ordoviitsiumi stratigraafiline liigestus (joonise alus: Meidla jt, 2023). Läti Zebre levik on uuendatud esialgsete Aizpute puursüdamiku biostratigraafiliste uuringute (Liefroy jt, 2024) järgi.

## Varangu kihistu esinemine Lõuna-Eestis

Taagepera puursüdamikus on kirjeldatud Varangu kihistut (Tassa ja Perens, 1982). Analüüsides varasemaid paleogeograafilisi kaarte (Männil, 1966) ja hetkel kehtivat stratigraafilist skeemi (Meidla jt, 2023) on ilmne, et Varangu kihistu ei levi Lõuna-Eestis. Tegu on valkjashalli ja kiltja pudedega, kasvades karbonaatsuse poolest kihistu ülemises osas. Uuritud proovimaterjali põhjal ei saa anda kindlat vastust küsimusele, kas Taageperast pärit AU24-13 proov on käsitletav Varangu kihistuna kuna määratavaid konodonte proovist ei tuvastatud. Kõikidest Lõuna-Eestist võetud proovidest on Taagepera Varangu kihistu proov kõige lähedasem Aizpute puursüdamikust pärit tüüpilise Zebre kihistu kivimiga, kuid esineb kõrgem väävli, arseeni, koobalti ja plii sisaldus. Need kõrgemad sisaldused on seletatavad teatud mineraalide esinemisega kivimis, näiteks arsenopüriit, mis sisaldab endas nii arseeni kui ka väävli ning esineb tihti koos nikliga.

Vaatamata geokeemilisele sarnasusele ei ole mõistlik hetkel seostada Zebre kihistut ja Taagepera aleuriitset setendit. Võrreldes Zebre kihistu leviku kaarti (Ulst jt, 1982) ning Taagepera puursüdamiku asukohta, oleks Varangu kihistu asendamine Zebre kihistuga anomaalne määratlus. Varangu kihistuna kirjeldatud kiht Taagepera puuraugus vajab kindlasti detailsemat uurimist tulevikus.



## Järeldused ja kokkuvõte

Võrreldes Põhja- ja Kesk-Eestiga on Ordoviitsiumi kivimid Lõuna-Eestis oluliselt vähem uuritud, kuna kihid lasuvad sügaval ning tugipuuraukude arv on väike. Seetõttu on info stratigraafiliste üksuste leviku kohta üldine ja potentsiaalselt ebatäpne. Käesoleva töö tulemusel saab öelda, et varasemalt tõenäosuse põhjal kirjeldatud Zebre kihistu levimine Lõuna-Eestisse on suuresti põhjendamata. Siiani kasutatud stratigraafilise skeemi alusel on Lõuna-Eesti geoloogia esindatud Kallavere kihistu liivakivi ja Zebre kihistu savidenaga, kuid reaalsus on sellest erinev.

Lõuna-Eestis kirjeldatud 'Zebre' intervalli uuringute põhjal on selge vajadus kihistu ümbernimetamisele. Arvestades Skandinaavias levinud Björkasholmeni kihistu tsüklilisust ja Köpingsklinti kihistu ebaühtlast levikut, on mõistlikum siduda kõnealused kihid Leetse kihistuga. Leetse kihistu on Zebre kihistuga üleminekuline ning selle levik ulatub teadaolevalt vähemalt Kesk-Eestisse. Zebre kihistu revisjon skeemil laiendaks Leetse kihistu levikut Kesk-Eesti piirkonnast Lõuna-Eestisse ning peegeldaks kivimikihtide reaalsest litoloogiast senisest täpsemini.

Käesoleva töö raames varasemaid andmeid ja teaduskirjandust analüüsid ilmnes, et uuematel Ordoviitsiumi stratigraafilistel skeemidel (nt Meidla jt, 2023, 2024) on nii Zebre kui Leetse kihistu ajalist mahtu kujutatud tegelikust väiksemana ning korrelatsiooni kronostratigraafiliste üksustega ebatäpselt. Konodontide biostratigraafia Põhja-Eestist (Viira jt, 2006; Löfgren et al., 2005) ning esialgsed andmed Aizpute puuraugust Lätis (Liefroy jt, 2024) näitavad, et mõlemad nimetatud kivimikehad hõlmavad *P. proteus*-e, *B. elegans*-i, ja *O. evae* tsoone ning esindavad seega Hunnebergi ja Billingeni regionaalset ladet. Seetõttu on ajaline lünk Alam-Ordoviitsiumis märgatavalt väiksem kui seni arvatud.

- Autori soovitus on viia läbi stratigraafilise rajoneerimise piiride paikapidavuse analüüs. Nt Taagepera puursüdamikus on kirjeldatud Varangu kihistut, mis ei vasta kehtivatele rajoonidele.
- Eesti Geoloogiateenistuse poolt oleks mõistlik uurida Zebre kihistu jt vähetuntud stratigraafiliste üksuste iseloomu ja ulatust Lõuna-Eestis hoolikalt valitud asukohaga uute sügavat tugipuuraukude abil. Eesti-Läti piiri juures saaks hinnata Zebre kihistu olemasolu ning otsustada nime edasise kasutamise küsimust Eesti stratigraafilistes skeemides.
- Aizpute-41 puuraugu Zebre kihistu Kalvene ja Zante kihistikes tuvastati mitmeid varem geoloogilistes kirjeldustes mainimata karbonaatseid intervalle. Seetõttu on võimalik täiendada Zebre kihistu definitsiooni, kuid detailsem ülevaade tuleb vajab täiendavate Läti puursüdamike uuringuid.
- Lisaks tehtud analüüsidele oleks soovitatav teha Lõuna-Eesti 'Zebre' kihistu jaoks granulomeetria, detailsem savimineraloogia ja lahustumatu jäägi uuringud, mis aitaksid täpsustada glaukoniidi ja savide sisaldust.
- Kõnealuste kihtide vanuse ning tekke selgitamiseks Kesk- ja Lõuna-Eestis on vajalikud täiendavad konodontide biostratigraafilised uuringud.
- Kuressaare K3 puursüdamikust Kriukai kihistu basaalkihtidest tuvastatud unikaalsete kristallograafiliste parameetritega dolomiit, mis väärib detailsemat uuringut dolomiidi geneesi selgitamiseks.

Kokkuvõtteks tuleb tõdeda, et Lõuna-Eesti Ordoviitsiumi geoloogias on puudulikult uuritud aspekte ning kivimikehade omaduste, vanuse ja leviku täpsustamine vajab edaspidist tööd. Käesoleva töö tulemusena oli võimalik parandada Zebre ja Leetse kihistu kujutamist nii stratigraafilistel skeemidel kui levikukaardil ning paremini mõista nende üksuste omavahelist kivimilist ja vanuselist suhet.

Ordoviitsiumi stratigraafia revisjoni ja edaspidiste aluspõhja uuringutega on võimalik täiendada teaduslikku ülevaadet Balti paleobasseini arengust ja lademetest Vara- ja Kesk-Ordoviitsiumis ning anda kvaliteetsem tööriist Eesti aluspõhja kirjeldamiseks ja kaardistamiseks.

## Tänuõnad

Soovin südamest tänada oma juhendajaid **Olle Hints**i ja **Tavo Ani**, kes olid alati valmis kuulama muresid ja ideid ning pakkuma järjepidevat ja sisukat suunamist kogu töö vältel. Nad panustasid tööle hindamatut aega ja tähelepanu. Ühised ülevaatused aitasid samm-sammult parandada nii teksti kui ka jooniste kvaliteeti.

Tänan **Eesti Geoloogiateenistust** magistritöö teema pakkumise ning ligipääsu eest proovimaterjalidele, programmidele, kirjandusele ja andmebaasidele.

Soovin tänada professor **Tõnu Meidlat** geokeemiliste tulemuste ülevaatamise ja väärtuslike nõuannete eest ning vanemteadur **Peep Männikut** ja doktorant-nooremteadur **Thibaud Lieffroyd** biostratigraafiliste analüüside ja kiire tagasiside eest. Tänan ka **Jaak Nõlvakut** teemakohaste mõtete ja kirjanduse soovitamise eest.

Tänan **Geoloogia Instituudi** töötajaid proovide ettevalmistamise, analüüside ja tulemuste tõlgendamise abi eest, eraldi tänu **Toivo Kallastele** laboris jagatud teadmiste ja koostöö eest ja **Kristjan Urtsonile** õhikutepraktikumi läbiviimise eest.

Samuti tänan **Nata-Ly Pantšenkot** ja **Erki Lehte** abi ja toetuse eest kogu töö valmimise jooksul ning õigekirjakontrolli eest.

Ima kõigi teieta ei oleks see töö sellisel kujul valminud.

Käesoleva töö valmimist toetas osaliselt Eesti Teadusagentuuri grant PRG1701 "Kasvahoonekliimast jääaega: Ordoviitsiumi kliimamuutuste rekonstruktsioon ja mõju elustikule Baltika kontinendil".

## Kasutatud kirjandus

- Cocks, L. R. ja Torsvik, T. H. (2005). Baltica from the late Precambrian to mid-Palaeozoic times: The gain and loss of a terrane's identity. *Earth-Science Reviews*, 72(1-2), 39–66.  
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2005.04.001>
- Ebbestad, J. O. R. (1999). Trilobites of the Tremadoc Bjørkåsholmen formation in the Oslo region, Norway. *Fossils and Strata*, 1 –118. <https://doi.org/10.18261/8200377024-1999-01>
- Ebbestad, J. O. R. (1997). Bjørkåsholmen Formation (Upper Tremadoc) in Norway: regional correlation and trilobite distribution. Stouge, S. (toim.), *WOGOGOB-94 Symposium. Working Group on Ordovician Geology of Baltoscandia, Bornholm-94* (lk 27–35). GEUS
- Edward, O., Korte, C., Ullmann, C., Colmenar, J., Thibault, N., Bagnoli, G., Stouge, S. ja Rasmussen, C. M. (2021). Baltic perspective on early to early late Ordovician  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  records and its Paleoenvironmental significance. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 37.  
<https://doi.org/10.1002/essoar.10507187.1>
- Eesti Geoloogiateenistus. (2023). Eesti puuraukude rakendus [Kaart]. Kasutatud 28.10.2024.  
<https://gis.egt.ee/portal/apps/dashboards/99f758ac4ef548f686b831adb3199378>
- Eesti Geoloogiateenistus. (2023). Stratigraafiline skeem. <https://www.egt.ee/juhendid-oppematerjalid/juhendid/stratigraafia>
- Egenhoff, S., Cassle, C., Maletz, J., Frisk, Å. M., Ebbestad, J. O. ja Stübner, K. (2010). Sedimentology and sequence stratigraphy of a pronounced early Ordovician sea-level fall on Baltica — The Bjørkåsholmen formation in Norway and Sweden. *Sedimentary Geology*, 224(1-4), 1–14.  
<https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2009.12.003>
- Egenhoff, S., Maletz, J., Ahlberg, P., Mast, A., Frisk, Å. M., Ebbestad, J. O. ja Newby, W. (2018). Sedimentology of the lower Ordovician (upper Tremadocian) Bjørkåsholmen formation at Flagabro, southern Sweden. *GFF*, 140(1), 55–65.  
<https://doi.org/10.1080/11035897.2018.1445777>
- Einmann, A. , Kivisilla, J., Kala, E., Saadre, T., Kajak, K., Eltermann, G., Täht, T., Thalberg, S., Kuk, M., Kajak, H. ja Mändmaa, M. (1990). TK "Eesti Geoloogia" geoloogilise infopanga loomine. Programm "Puurauk" (v. 9012) (EGF 4424). Geoloogia valitsus.  
<https://fond.egt.ee/fond/egf/4424>
- Finney, S. C. ja Berry, W. B. N. (toim.). (2010). *The Ordovician Earth System*. Geological Society of America. <https://doi.org/10.1130/SPE466>
- Fortey, R. A. (1984). Global earlier Ordovician transgressions and regressions and their biological importance. Bruton, D. L. (toim), *Aspects of the Ordovician System* (295, lk 37–50). Paleontological Contributions from the University of Oslo, Universitetsforlaget.

- Gul, B., Ainsaar, L. ja Meidla, T. (2024). Baltoscandian middle Ordovician brachiopod oxygen stable isotope trends: Implications for palaeotemperature changes. *Baltica*, 87–97.  
<https://doi.org/10.5200/Baltica.2024.2.1>
- Heinsalu, H. ja Viira, V. (1997a). Pakerorti lade. Raukas, A. ja Teedumäe, A. (toim.), *Geology and mineral resources of Estonia* (lk 52–58). Estonian Academy Publishers. <https://geoloogia.info/geology/>
- Heinsalu, H., ja Viira, V. (1997b). Varangu Stage. Raukas, A. ja Teedumäe, A. (toim.), *Geology and mineral resources of Estonia* (lk 58–58). Estonian Academy Publishers. <https://geoloogia.info/geology/>
- Hints, O., Ani, T., Aren, M., Hang, T., Kaljo, D., Marandi, A., Meidla, T., Männik, P., Nirgi, S., Paiste, T., Ploom, K., Roosalu, R., Sibul, I. ja Soesoo, A. (2025). Geoloogiline ajaskaala 2024. Eesti Stratigraafia Komisjon. <https://doi.org/10.23679/1031>.
- Jaanusson, V. (1984). What is so special about the Ordovician? Bruton, D. L. (toim.). *Aspects of the Ordovician System* (295; lk 1–3). Paleontological Contributions from the University of Oslo, Universitetsforlaget.
- Jaanusson, V. (1995). Confacies differentiation and upper Middle Ordovician correlation in the Baltoscandian basin. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences. Geology*, 44, 73–86.  
<https://doi.org/10.3176/geol.1995.2.01>
- Kajak, K. ja Kajak, H. (1963). *Tartu Rühma aruanne komplekssest geoloogilis-hüdrogeoloogilisest kaardistamisest mõõtkavas 1:200 000 (1:100 000) ENSV kaguosas (leht O-35-XV) 1959.-1962. a* (EGF 2046). Geoloogia Valitsus. <https://fond.egt.ee/fond/egf/2046>
- Kajak, K., Kajak, H., Kivisilla, J., Pastuhhova, A., Petersell, V., Puura, V., Saadre, T. ja Remmel, P. (1974). *Aruanne komplekssest geoloogilis-hüdrogeoloogilisest kaardistamisest mõõtkavas 1:200 000 Eesti idaosas ja Pihkva oblasti lääneserval (leht O-35-XVI) 1970.-1973. a* (EGF 3303). Geoloogia Valitsus. <https://fond.egt.ee/fond/egf/3303>
- Kajak, K., Kajak, H., Kivisilla, J., Puura, V., Sarapik, J., Tsheban, E. ja Gromov O. (1975). *Lõuna-Eesti Rühma aruanne komplekssest geoloogilis-hüdrogeoloogilisest kaardistamisest mõõtkavas 1:200 000 kaardilehe O-35-XXII lõunaosa territooriumil (Aluksne, Misso, Katshanovo ümbruses) 1974–1975. a* (EGF 3376). Geoloogiafond. <https://fond.egt.ee/fond/egf/3376>
- Kersa, K. (2024, mai 5). New species from proto-Baltic Sea 450 million years ago. *Eesti Rahvusringhääling*. <https://news.err.ee/1609332768/new-species-from-proto-baltic-sea-450-million-years-ago>
- Körvel, V., Körvel, N. ja Rohtlaan, A. (1963). *Rakvere Rühma aruanne komplekssest geoloogilis-hüdrogeoloogilisest kaardistamisest mõõtkavas 1:200 000 lehel O-35-IX 1960.-1963. a* (EGF:2072). Geoloogiafond. <https://fond.egt.ee/fond/egf/2072>
- Lieffroy, T., Ainsaar, L., Männik, P., Meidla, P., Nõlvak, J. ja Hints, O. (2024). Lower and Middle Ordovician bio- and chemostratigraphy of the drill core, Latvia. *XI Baltic Stratigraphical Conference. Abstracts and Field Guide*, 22–22.

- Loubser, M. ja Verry, S. (2008). Combining XRF and XRD analyses and sample preparation to solve mineralogical problems. *South African Journal of Geology*, 111(2-3), 229–238.  
<https://doi.org/10.2113/gssaig.111.2-3.229>
- Ludvigsen, R. (1982). *Upper Cambrian and Lower Ordovician trilobite biostratigraphy of the Rabbitkettle Formation, Western District of Mackenzie*. Royal Ontario Museum.  
<https://doi.org/10.5962/bhl.title.52077>
- Meidla, T. (1997a). Hunnebergi lade. Raukas, A. ja Teedumäe, A. (toim.), *Geology and mineral resources of Estonia* (lk 58–60). Estonian Academy Publishers. <https://geoloogia.info/geology/>
- Meidla, T. (1997b). Billingeni lade. Raukas, A. ja Teedumäe, A. (toim.), *Geology and mineral resources of Estonia* (lk 60–61). Estonian Academy Publishers. <https://geoloogia.info/geology/>
- Meidla, T., Ainsaar, L. ja Hints, O. (2023). About the Ordovician System in Estonia. Hints, O ja Toom, U. (toim.), *ISOS-14 Field Guide: The Ordovician of Estonia* (lk 9–14). TalTech Department of Geology.  
<https://kirjandus.geoloogia.info/en/reference/48412>
- Meidla, T., Ainsaar, L., Hints, O. ja Radzevičius, S. (2023a). Ordovician of the Eastern Baltic palaeobasin and the Tornquist Sea margin of Baltica. *Geological Society, London, Special Publications*, 532(1), 317–343. <https://doi.org/10.1144/SP532-2022-141>
- Meidla, T., Ainsaar, L. ja Hints, O. (2014). The Ordovician System in Estonia. Bauert, H., Hints, O., Meidla, T., Männik, P. (toim.), *4th Annual Meeting of IGCP 591, Estonia, 10-19 June 2014. Abstracts and Field Guide* (lk 116–122). University of Tartu.
- Mens, K. ja Kala, E. (1963). *Aruanne puursüdamiku detailuuringu tulemustest Laanemetsa struktuuri-hüdrogeoloogilises puuraugus (EGF 1938)*. Geoloogia Valitsus. <https://fond.egt.ee/fond/egf/1938>
- Murphy, M. A. ja Salvador, A. (1999). International Stratigraphic Guide - An abridged version. *Episodes*, 22, 255–271.
- Mägi, S. (1970). Отложения онтикаского яруса Средней и Западной Эстонии [Ontika seeria setetest Kesk- ja Lääne-Eestis]. *Eesti NSV Teaduste Akadeemia Toimetised. Keemia, Geoloogia*, 19, 141–146. <https://doi.org/10.3176/chem.geol.1970.2.08>
- Männil, R. (1966). *История развития Балтийского бассейна в ордовике [Balti Basseini areng Ordoviitsiumis]* (lk 1–200). Valgus, Tallinn. <https://paleoarchive.com/literature/Mannil1966-EvolutionBalticBasinOrdovician.pdf>
- Männil, R. (1990). The Ordovician of Estonia. Kaljo, D., Nestor, H. (toim.), *Field Meeting Estonia 1990. An Excursion Guidebook* (lk 11–20). Estonian Academy of Sciences.
- Männil, R. ja Meidla, T. (1994). Estonia, Latvia, Lithuania, Byelorussia, parts of Russia, the Ukraine and Moldova (East European Platform). Webby, B. D., Ross, R. J. Y. Y. (toim.), *The Ordovician System of the East European Platform and Tuva (southeastern Russia). Correlation charts and explanatory notes* (A; Vol. 28, lk 1–52). International Union of Geological Sciences.



- Orviku, K. (1960). Литофациальные особенности ордовикских горизонтов волхов (BII), кунда (BIII) и азери (Cla) в северно [Litofacial peculiarities of Ordovician horizons Volkhov (BII), Kunda (BIII) and Aseri (Cla) in the North of Estonia SSR]. Sokolov, B. S. (toim.), Стратиграфия и корреляция ордовика и силура. Междунар Геол. Конгр., XXI сессия. Докл сов геологов. Проблема 7 [International Geological Congress, XXI session. Reports of Soviet geologists. Problem 7] (lk 71–82). Gosudarstvennoe nauchno-tehnicheskoye izdatel'stvo neftyanoi i gorno-toplivnoi literatury, Leningrad.
- Paškevičius, J. (1997). *The geology of the Baltic Republics* (lk 1–387). Vilnius University, Geological Survey of Lithuania.
- Pohl, A., Donnadieu, Y., Le Hir, G., Buoncristiani, J. ja Vennin, E. (2014). Effect of the Ordovician paleogeography on the (in)stability of the climate. *Climate of the Past*, 10(6), 2053–2066. <https://doi.org/10.5194/cp-10-2053-2014>
- Puursüdamike andmebaas. Geoportaal, Maa-amet. Kasutatud 29.12.2024. <https://geoportaal.maaamet.ee/est/ruumiandmed/geoloogilised-andmed/puursudamike-andmebaas-p382.html>
- Puura, V. ja Vaher, R. (1997). Cover structure. Raukas, A. ja Teedumäe, A. (toim.), *Geology and mineral resources of Estonia* (lk 167–177). Estonian Academy Publishers.
- Puura, V., Klein, V., Koppelmaa, H., Gromov, O., Kala, E., Kivisilla, J., Keerup, O., Niin, M., Niin, S. ja Petersell, V. (1977). *Aruanne kristalliinse vundamendi süvakaardistamisest Kunda-Kiviõli piirkonnas (Põhja-Eesti) mõõtkavas 1:500 000 1974.-1977. a* (EGF 3476). Geoloogia Valitsus. <https://fond.egt.ee/fond/egf/3476>
- Pöldvere, A., Kleesment, A., Mens, K., Meidla, T., Kiipli, T. ja Männik, P. (1999). *Tugiläbilõigete täienduurimine. III etapp* (EGF:6363). Geoloogiafond. <https://fond.egt.ee/fond/egf/6363>
- Pöldvere, A. (toim). (2007). Tsiistre (327) drill core. *Estonian Geological Sections Bulletin* (Vol. 8, lk 1–55). Eesti Geoloogiakeskus. <https://fond.egt.ee/fond/egf/9313>
- Pöldvere, A. (toim). (2005). Mehikoorma (421) drill core. *Mehikoorma (421) drill core* (Vol. 6, lk 1–67). Eesti Geoloogiakeskus. <https://fond.egt.ee/fond/egf/9313>
- Pöldvere, A. (toim). (2003). Ruhnu (500) drill core. *Ruhnu (500) drill core* (Vol. 5, lk. 1–76). Eesti Geoloogiakeskus. <https://fond.egt.ee/fond/egf/9313>
- Rõõmusoks, A. (1960). Ордовикская система [Ordovician System]. *Геология СССР. Том XXVIII. Эстонская ССР [Geology of USSR. Vol XXVIII. Estonian SSR]* (lk 55–113). Gosudarstvennoe nauchno-tehnicheskoye izdatel'stvo neftyanoi i gorno-toplivnoi literatury leningradskoe otdelenie. <https://www.geokniga.org/books/177>
- Scotese, C.R., 2014. Atlas of Cambrian and Early Ordovician Paleogeographic Maps (Mollweide Projection), Maps 81–88, Volume 5, The Early Paleozoic, PALEOMAP Atlas for ArcGIS, PALEOMAP Project, Evanston, IL.

- Servais, T., Cascales-Miñana, B. ja Harper, D. A. (2021). The great Ordovician Biodiversification event (GOBE) is not a single event. *Paleontological Research*, 25(4). <https://doi.org/10.2517/2021pr001>
- Stouge, S. (2004). Ordovician siliciclastics and carbonates of Öland, Sweden. *Erlanger Geologische Abhandlungen*, 91–111.
- Tassa, V. ja Perens, H. (1982). *Aruanne mineraalvee otsingutest Taagepera sanatooriumile 1981.-1982. a* (EGF 3912). Geoloogia Valitsus. <https://fond.egt.ee/fond/egf/3912>
- Tassa, V. ja Peren, H. (1980). *Aruanne mineraalvee otsingutest Pärnus 1977.-1980. a* (EGF 3679). Geoloogia Valitsus. <https://fond.egt.ee/fond/egf/3679>
- Viira, V., Löfgren, A., Mägi, S. ja Wickström, J. (2001). An Early to Middle Ordovician succession of conodont faunas at Mäekalda, northern Estonia. *Geological Magazine*, 138, 699–718. <https://doi.org/10.1017/S0016756801005945>
- Viira, V., Mens, K. ja Nemliher, J. (2006). Lower Ordovician Leetse formation in the North Estonian Klint area. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences. Geology*, 55(2), 156–174. <https://doi.org/10.3176/geol.2006.2.05>
- Viira, V. (2011). Lower and middle Ordovician conodonts from the subsurface of SE Estonia and adjacent Russia. *Estonian Journal of Earth Sciences*, 60(1), 1–21. <https://doi.org/10.3176/earth.2011.1.01>
- Vingisaar, P. ja Tassa, V. (1973). *Aruanne mineraalvee otsingutest Võru linnas* (EGF 3247). Geoloogia Valitsus. <https://fond.egt.ee/fond/egf/3247>
- Väärsi, A., ja Kajak, K. (1964). *Aruanne Võru Rühma komplekssest geoloogilis-hüdrogeoloogilisest kaardistamisest mõõtkavas 1:200 000 ENSV kaguosas (lehtede O-35-XXI ja O-35-XXII põhjapoolsed osad)* (EGF:2301). Geoloogiafond. <https://fond.egt.ee/fond/egf/2301>
- Ulst, R. Ž., Gailite, L. K. ja Springis, T. K. (1984). Lithostratigraphic subdivision of the subsurface Ordovician rocks of the Jelgeva Depression. Männil, Ralf, Mens, K. (toim.), *Стратиграфия древнепалеозойских отложений Прибалтики [Vara-Paleosoikumi setete stratigraafia Baltikumis]* (lk 63–76). Eesti NSV Teaduste Akadeemia.
- Ulst, R., Gailite, L. ja Yakovleva, V. (1982). *Ордовик Латвии [Ordoviitsium Lätis]*. Zinatne.

## Lisad

### Lisa 1. Proovide koondtabel

| <b>Tabel 1.</b> Proovide koondtabel, Aizpute sügavused ei ole absoluutsed ning neil on mõõteviga. |                         |                     |                 |                                              |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|---------------------|-----------------|----------------------------------------------|
| <b>Puursüdamik</b>                                                                                | <b>Kihistu/Kihistik</b> | <b>Proovinumber</b> | <b>Sügavus</b>  | <b>Märkmed</b>                               |
| Aizpute-41                                                                                        | Zebre / Lutrini         | AU24-1              | 1166.92–1167.0  |                                              |
| Aizpute-41                                                                                        | Zebre / Kumbri          | AU24-2              | 1163.57–1163.62 |                                              |
| Aizpute-41                                                                                        | Zebre / Zirni           | AU24-3              | 1158.95         |                                              |
| Aizpute-41                                                                                        | Zebre / Zirni           | AU24-4              | 1156.1          |                                              |
| Aizpute-41                                                                                        | Zebre / Kalvene         | AU24-5              | 1152.0          |                                              |
| Aizpute-41                                                                                        | Zebre / Kalvene         | AU24-6              | 1149.4          |                                              |
| Aizpute-41                                                                                        | Zebre / Kalvene         | AU24-7              | 1148.6          | Karbonaatne intervall                        |
| Aizpute-41                                                                                        | Zebre / Zante           | AU24-8              | 1143.0          |                                              |
| Aizpute-41                                                                                        | Zebre / Zante           | AU24-9              | 1141.8          | Karbonaatne intervall                        |
| Aizpute-41                                                                                        | Kriukai                 | AU24-10             | 1140.2          |                                              |
| Kuressaare K3                                                                                     | Leetse                  | AU24-11             | 411.1–411.2     |                                              |
| Kuressaare K3                                                                                     | Toila                   | AU24-12             | 410.83–411      |                                              |
| Taagepera                                                                                         | Varangu                 | AU24-13             | 549.1           | Sügavus umbkaudne, suur kadu                 |
| Põlva                                                                                             | Leetse                  | AU24-14             | 445.53–445.63   | Vana kirjelduse järgi Zebre (Kajak jt, 1974) |
| Põlva                                                                                             | Kallavere               | AU24-15             | 445.86–445.92   |                                              |
| Kuressaare K3                                                                                     | Kallavere               | AU24-16             | 412.38–412.5    |                                              |
| Ruhnu 500                                                                                         | Zebre                   | AU24-17             | 706.15–706.20   |                                              |

**Lisa 2. AU24 prooviseeria XRF tulemused kasutades sulatusmeetodit**

| Proov   | Puursüdamik   | Üksus     | LOI<br>950 ° | SiO <sub>2</sub><br>(%) | TiO <sub>2</sub><br>(%) | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub><br>(%) | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub><br>(%) | MnO<br>(%) | MgO<br>(%) | CaO<br>(%) | Na <sub>2</sub> O<br>(%) | K <sub>2</sub> O<br>(%) | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub><br>(%) | SO <sub>3</sub><br>(%) | Sum<br>(%) |
|---------|---------------|-----------|--------------|-------------------------|-------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|------------|------------|------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------------------|------------------------|------------|
| AU24-1  | Aizpute-41    | Lutrini   | 3.77         | 59.99                   | 0.98                    | 18.14                                 | 4.78                                  | 0.03       | 2.14       | 0.56       | 0.27                     | 7.84                    | 0.31                                 | 0.05                   | 98.88      |
| AU24-2  | Aizpute-41    | Kumbri    | 4.91         | 57.21                   | 0.98                    | 17.31                                 | 9.08                                  | 0.04       | 2.28       | 1.14       | 0.39                     | 6.09                    | 0.24                                 | 0.02                   | 99.69      |
| AU24-3  | Aizpute-41    | Zirni     | 4.61         | 60.91                   | 1.03                    | 17.59                                 | 5.04                                  | 0.03       | 2.19       | 0.82       | 0.4                      | 6.11                    | 0.5                                  | 0.06                   | 99.29      |
| AU24-4  | Aizpute-41    | Zirni     | 4.71         | 60.11                   | 1.04                    | 18.57                                 | 5.45                                  | 0.04       | 2.36       | 0.5        | 0.44                     | 6.16                    | 0.26                                 | 0.02                   | 99.66      |
| AU24-5  | Aizpute-41    | Kalvene   | 4.79         | 60.04                   | 1.02                    | 18                                    | 5.3                                   | 0.04       | 2.31       | 0.66       | 0.52                     | 5.9                     | 0.33                                 | 0.05                   | 98.95      |
| AU24-6  | Aizpute-41    | Kalvene   | 4.75         | 58.25                   | 1.03                    | 18.14                                 | 8                                     | 0.04       | 2.45       | 0.47       | 0.3                      | 6.08                    | 0.22                                 | 0.01                   | 99.75      |
| AU24-7  | Aizpute-41    | Kalvene   | 32.67        | 17.31                   | 0.28                    | 5.48                                  | 1.76                                  | 0.14       | 1.03       | 38.95      | 0.14                     | 1.15                    | 0.08                                 | 0.1                    | 99.08      |
| AU24-8  | Aizpute-41    | Zante     | 6.96         | 54.3                    | 0.98                    | 17.13                                 | 8.39                                  | 0.05       | 2.29       | 3.29       | 0.33                     | 5.66                    | 0.11                                 | 0.01                   | 99.51      |
| AU24-9  | Aizpute-41    | Zante     | 34.41        | 14.97                   | 0.25                    | 4.52                                  | 1.4                                   | 0.16       | 0.92       | 41.78      | 0.14                     | 0.62                    | 0.06                                 | 0.12                   | 99.35      |
| AU24-10 | Aizpute-41    | Kriukai   | 14.33        | 44.03                   | 0.79                    | 14.01                                 | 7.01                                  | 0.07       | 1.88       | 13.51      | 0.16                     | 4.47                    | 0.08                                 | 0.02                   | 100.36     |
| AU24-11 | Kuressaare K3 | Leetse    | 17.78        | 42.99                   | 0.53                    | 5.38                                  | 9.83                                  | 0.32       | 6.2        | 12.33      | 0.08                     | 3.33                    | 0.5                                  | 0.48                   | 99.74      |
| AU24-12 | Kuressaare K3 | Toila     | 40.53        | 5.53                    | 0.11                    | 1.87                                  | 6.94                                  | 0.39       | 14.04      | 29.31      | 0.05                     | 0.36                    | 0.09                                 | 0.11                   | 99.34      |
| AU24-13 | Taagepera     | Varangu   | 6.66         | 60.75                   | 0.81                    | 16.94                                 | 4.23                                  | 0.02       | 1.51       | 0.12       | 0.14                     | 7.89                    | 0.04                                 | 0                      | 99.12      |
| AU24-14 | Põlva 423     | Leetse    | 27.24        | 23.75                   | 0.08                    | 3.83                                  | 10.72                                 | 0.18       | 12.27      | 17.13      | 0.08                     | 3.18                    | 0.55                                 | 1                      | 100.03     |
| AU24-15 | Põlva 423     | Kallavere | 4.45         | 73.37                   | 0.21                    | 1.74                                  | 1.13                                  | 0.03       | 1.57       | 9.74       | 0.13                     | 0.97                    | 5.26                                 | 0.16                   | 98.75      |
| AU24-16 | Kuressaare K3 | Kallavere | 9.36         | 75.36                   | 0.04                    | 0.1                                   | 2.73                                  | 0.21       | 2.51       | 8.33       | 0.04                     | 0.05                    | 1.51                                 | 0.18                   | 100.42     |
| AU24-17 | Ruhnu 500     | Zebre     | 9.9          | 45.43                   | 0.26                    | 9.68                                  | 17.99                                 | 0.08       | 5          | 3.7        | 0.19                     | 7.43                    | 0.24                                 | 0.02                   | 99.91      |

### Lisa 3. AU24 prooviseeria XRF tulemused kasutades pulbermeetodit

| <b>Tabel 3. AU24 prooviseeria geokeemilise analüüsi tulemused kasutades röntgenfluoresents pulbermeetodit.</b> |        |        |        |        |        |        |        |        |        |         |         |         |         |         |         |         |         |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                                                                                                                | AU24-1 | AU24-2 | AU24-3 | AU24-4 | AU24-5 | AU24-6 | AU24-7 | AU24-8 | AU24-9 | AU24-10 | AU24-11 | AU24-12 | AU24-13 | AU24-14 | AU24-15 | AU24-16 | AU24-17 |
| SiO <sub>2</sub> (%)                                                                                           | 59.99  | 57.23  | 60.91  | 60.11  | 60.04  | 58.25  | 17.31  | 54.30  | 14.97  | 44.03   | 42.99   | 5.53    | 60.75   | 23.75   | 73.37   | 75.36   | 45.43   |
| TiO <sub>2</sub> (%)                                                                                           | 1.01   | 0.99   | 1.06   | 1.03   | 1.04   | 1.04   | 0.28   | 0.98   | 0.25   | 0.82    | 0.53    | 0.11    | 0.82    | 0.09    | 0.23    | 0.05    | 0.29    |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)                                                                             | 18.14  | 17.31  | 17.59  | 18.57  | 18.00  | 18.14  | 5.48   | 17.13  | 4.52   | 14.01   | 5.38    | 1.87    | 16.39   | 3.83    | 1.74    | 0.09    | 9.68    |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)                                                                             | 4.93   | 9.08   | 5.18   | 5.45   | 5.53   | 8.00   | 1.79   | 8.65   | 1.43   | 7.01    | 9.83    | 6.94    | 4.30    | 10.72   | 1.12    | 2.81    | 17.99   |
| MnO (%)                                                                                                        | 0.03   | 0.04   | 0.04   | 0.04   | 0.04   | 0.04   | 0.14   | 0.05   | 0.16   | 0.07    | 0.34    | 0.42    | 0.02    | 0.18    | 0.03    | 0.22    | 0.08    |
| MgO (%)                                                                                                        | 2.21   | 2.28   | 2.19   | 2.46   | 2.42   | 2.45   | 1.20   | 2.43   | 0.92   | 1.88    | 6.20    | 14.04   | 1.72    | 12.27   | 1.57    | 2.51    | 5.00    |
| CaO (%)                                                                                                        | 0.53   | 1.12   | 0.82   | 0.48   | 0.76   | 0.46   | 38.95  | 3.28   | 41.78  | 13.11   | 12.33   | 29.31   | 0.11    | 17.13   | 9.74    | 8.33    | 3.70    |
| Na <sub>2</sub> O (%)                                                                                          | 0.31   | 0.38   | 0.42   | 0.47   | 0.46   | 0.28   | 0.14   | 0.32   | 0.08   | 0.20    | 0.12    | 0.03    | 0.13    | 0.06    | 0.16    | 0.04    | 0.19    |
| K <sub>2</sub> O (%)                                                                                           | 7.84   | 5.90   | 5.96   | 6.04   | 5.90   | 6.00   | 1.88   | 5.53   | 1.49   | 4.48    | 3.33    | 0.90    | 7.64    | 3.91    | 0.97    | 0.05    | 7.43    |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)                                                                              | 0.27   | 0.22   | 0.44   | 0.23   | 0.29   | 0.20   | 0.07   | 0.09   | 0.06   | 0.08    | 0.45    | 0.09    | 0.04    | 0.42    | 5.26    | 1.51    | 0.16    |
| S (%)                                                                                                          | 0.06   | 0.01   | 0.27   | 0.03   | 0.27   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01    | 0.08    | 0.02    | 1.32    | 0.16    | 0.22    | 0.57    | 0.02    |
| Cl (%)                                                                                                         | 0.16   | 0.22   | 0.22   | 0.18   | 0.17   | 0.08   | 0.06   | 0.11   | 0.05   | 0.05    | 0.02    | 0.02    | 0.01    | 0.10    | 0.02    | 0.02    | 0.09    |
| Sum (%)                                                                                                        | 99.60  | 100.0  | 100.0  | 100.1  | 100.0  | 100.0  | 100.1  | 100.1  | 100.3  | 100.3   | 99.70   | 99.90   | 100.2   | 100.1   | 100.0   | 101.40  | 100.20  |

|                 | AU24-1 | AU24-2 | AU24-3 | AU24-4 | AU24-5 | AU24-6 | AU24-7 | AU24-8 | AU24-9 | AU24-10 | AU24-11 | AU24-12 | AU24-13 | AU24-14 | AU24-15 | AU24-16 | AU24-17 |
|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| <b>As (ppm)</b> | 11.60  | 7.30   | 11.10  | 1.70   | 8.00   | 6.80   | 0.00   | 4.50   | 4.30   | 4.80    | 13.00   | 0.00    | 38.00   | 6.30    | 2.10    | 57.80   | 2.70    |
| <b>Ba (ppm)</b> | 453    | 431.2  | 441.1  | 439.1  | 440.9  | 433.5  | 101.2  | 413.4  | 123.0  | 338.3   | 41.50   | 33.20   | 320.1   | 77.00   | 101.3   | 15.60   | 39.00   |
| <b>Br (ppm)</b> | 3.00   | 7.60   | 3.60   | 7.70   | 4.50   | 2.00   | 2.80   | 3.30   | 3.30   | 1.60    | 0.10    | 0.70    | 0.60    | 13.60   | 0.00    | 0.00    | 4.00    |
| <b>Ce (ppm)</b> | 87.10  | 98.10  | 131.6  | 94.10  | 100.5  | 95.30  | 39.60  | 89.20  | 22.00  | 79.70   | 40.10   | 17.50   | 69.60   | 22.40   | 188.2   | 85.40   | 15.00   |
| <b>Co (ppm)</b> | 28.50  | 16.80  | 21.10  | 20.00  | 21.10  | 17.30  | 13.10  | 15.60  | 8.50   | 15.40   | 13.20   | 4.60    | 79.60   | 32.50   | 149.1   | 148.4   | 13.80   |
| <b>Cr (ppm)</b> | 85.00  | 76.40  | 85.10  | 80.00  | 80.10  | 75.80  | 19.80  | 78.60  | 11.50  | 56.70   | 107.4   | 5.00    | 74.00   | 54.00   | 40.50   | 1.30    | 169.7   |
| <b>Cu (ppm)</b> | 35.10  | 18.50  | 12.40  | 58.50  | 15.00  | 11.30  | 10.90  | 13.90  | 8.90   | 15.90   | 10.60   | 6.60    | 37.00   | 66.50   | 34.10   | 49.00   | 10.20   |
| <b>F (%)</b>    | 0.13   | 0.11   | 0.14   | 0.14   | 0.12   | 0.13   | 0.07   | 0.13   | 0.06   | 0.14    | 0.20    | 0.03    | 0.11    | 0.21    | 0.79    | 0.24    | 0.13    |
| <b>Ga (ppm)</b> | 25.20  | 22.10  | 21.60  | 24.10  | 22.50  | 25.00  | 11.30  | 23.00  | 5.80   | 17.30   | 11.00   | 3.20    | 22.70   | 12.20   | 1.70    | 1.00    | 23.80   |
| <b>La (ppm)</b> | 53.00  | 57.20  | 57.70  | 55.00  | 49.80  | 54.90  | 4.50   | 44.80  | 23.40  | 39.40   | 18.10   | 11.30   | 51.30   | 9.00    | 68.00   | 28.60   | 9.20    |
| <b>Mo (ppm)</b> | 1.50   | 4.30   | 1.40   | 2.90   | 2.20   | 1.30   | 0.30   | 3.30   | 2.40   | 2.30    | 2.10    | 1.40    | 9.60    | 2.90    | 1.20    | 6.00    | 1.40    |
| <b>Nb (ppm)</b> | 18.10  | 16.50  | 18.10  | 18.20  | 18.70  | 18.70  | 5.50   | 18.30  | 4.40   | 16.10   | 12.20   | 3.40    | 15.40   | 1.80    | 5.50    | 0.80    | 6.30    |
| <b>Ni (ppm)</b> | 44.30  | 36.30  | 35.10  | 39.00  | 30.60  | 37.10  | 8.20   | 34.00  | 9.80   | 31.10   | 7.70    | 0.60    | 51.00   | 15.10   | 6.40    | 16.70   | 12.20   |
| <b>Pb (ppm)</b> | 10.20  | 7.00   | 16.90  | 10.00  | 13.80  | 6.90   | 5.80   | 13.20  | 7.80   | 10.90   | 10.40   | 6.90    | 46.10   | 6.60    | 11.10   | 673.7   | 0.00    |
| <b>Rb (ppm)</b> | 191.1  | 185.3  | 184.2  | 196.5  | 194.6  | 208.4  | 59.60  | 188.7  | 49.30  | 149.1   | 107.6   | 26.70   | 165.4   | 105.5   | 18.50   | 3.10    | 240.4   |



Aileen Umal, Ordoviitsiumi Zebre kihistu stratigraafia

|                     |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |        |        |       |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|-------|
| <b>Se<br/>(ppm)</b> | 0.00  | 0.20  | 0.20  | 0.00  | 0.00  | 0.80  | 0.00  | 0.10  | 0.00  | 0.00  | 0.20  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.70   | 3.50   | 0.00  |
| <b>Sr<br/>(ppm)</b> | 101.9 | 99.10 | 116.4 | 98.70 | 108.2 | 110.9 | 166.9 | 122.0 | 199.1 | 161.7 | 116.0 | 74.90 | 89.90 | 81.80 | 421.9  | 185.3  | 55.80 |
| <b>Th<br/>(ppm)</b> | 19.10 | 15.40 | 22.40 | 14.20 | 21.20 | 16.20 | 2.30  | 18.80 | 6.40  | 9.50  | 7.00  | 3.60  | 7.30  | 4.10  | 13.10  | 0.00   | 3.40  |
| <b>U<br/>(ppm)</b>  | 6.40  | 2.40  | 6.70  | 1.60  | 5.90  | 6.50  | 0.00  | 5.20  | 4.90  | 3.00  | 2.50  | 3.20  | 7.30  | 3.60  | 18.20  | 6.10   | 1.00  |
| <b>V<br/>(ppm)</b>  | 98.20 | 129.7 | 125.4 | 95.80 | 117.3 | 93.40 | 29.20 | 96.30 | 22.00 | 79.40 | 57.40 | 8.60  | 129.2 | 32.70 | 107.6  | 7.50   | 39.70 |
| <b>W<br/>(ppm)</b>  | 53.30 | 29.10 | 37.20 | 17.30 | 41.90 | 30.00 | 23.20 | 31.80 | 37.10 | 19.30 | 106.2 | 52.60 | 53.30 | 45.50 | 1351.8 | 1005.1 | 47.30 |
| <b>Y<br/>(ppm)</b>  | 38.60 | 37.80 | 62.80 | 43.50 | 52.20 | 39.60 | 18.70 | 24.50 | 20.60 | 24.10 | 24.30 | 9.80  | 15.50 | 20.00 | 149.2  | 47.70  | 14.10 |
| <b>Zn<br/>(ppm)</b> | 80.10 | 82.10 | 77.60 | 76.50 | 77.50 | 84.30 | 25.10 | 79.60 | 24.30 | 63.50 | 21.10 | 18.90 | 38.40 | 18.70 | 6.60   | 3.40   | 23.80 |

## Lisa 4. AU24 prooviseeria XRD tulemused

**Tabel 2.** AU24 prooviseeria geokeemilise analüüsi tulemused kasutades röntgendifraktomeeriat.

|                                                                 | AU24-1 | AU24-2 | AU24-3 | AU24-4 | AU24-5 | AU24-6 | AU24-7 | AU24-8 | AU24-9 | AU24-10 | AU24-11 | AU24-12 | AU24-13 | AU24-14 | AU24-15 | AU24-16 | AU24-17 |
|-----------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Dolomiit                                                        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |         | 36.3    | 86.9    |         | 58.9    | 5.4     | 14.7    | 12.3    |
| Ortoklass                                                       | 9      | 8      | 5.2    | 5.1    | 5.9    | 5.2    | 2.2    | 7.2    | 2.1    | 4.9     | 0.6     |         | 8.3     | 1.1     | 0.8     | 0.2     |         |
| Kvarts                                                          | 17.9   | 21.3   | 25.7   | 22.1   | 24.4   | 22.9   | 6      | 21.6   | 5.8    | 15.9    | 26      | 0.8     | 20.4    | 3.8     | 72.3    | 73      | 2.7     |
| Püriit                                                          | 0.3    | 0.7    | 0.2    | 0.3    | 0.4    | 0.5    |        | 0.5    | 0.1    | 0.2     | 0.5     |         | 0.7     | 1.5     | 0.2     | 0.4     |         |
| Kaltsiit                                                        | 0.2    | 1.5    | 0.3    | 0.3    | 0.2    | 0.2    | 70.4   | 5.8    | 71.5   | 23.9    | 0.7     | 0.2     | 0.1     | 0.2     |         |         |         |
| Kloriit                                                         | 2.5    | 3.5    | 3.3    | 3.9    | 3.4    | 4      | 1.5    | 3.2    | 0.3    | 3.2     | 0.5     | 0.2     | 0.1     | 0.2     | 0.6     |         |         |
| Muskoviit                                                       | 10.3   | 11.5   | 12.7   | 13.5   | 11.3   | 11.8   | 4      | 8.3    | 2.6    | 11.5    | 1.1     | 0.8     | 10.2    |         | 0.9     | 0.1     |         |
| Anataas                                                         | 0.9    | 0.7    | 0.7    | 0.9    | 1      | 0.8    | 0.1    | 0.8    | 0.1    | 0.5     | 0.5     |         | 0.5     |         |         |         |         |
| Apatiit                                                         | 0.4    | 0.2    | 0.7    | 0.3    | 0.5    | 0.5    |        | 0.2    |        |         | 1.4     |         | 0.1     | 1.5     | 14.44   | 4.1     | 0.8     |
| Sanidiin                                                        | 21.2   | 10.9   | 11.7   | 12.2   | 10.1   | 10.1   | 0.8    | 7.1    | 1.1    | 5.6     | 1.1     | 1.3     | 20.4    | 1.2     | 0.7     |         |         |
| Kaoliniit                                                       | 1.6    | 2.4    | 2.9    | 2.9    | 2.9    | 2.8    | 0.6    | 2.5    | 0.9    | 3.2     | 0.4     |         | 0.4     | 0.6     |         |         |         |
| Albiit (low)                                                    | 0.5    | 0.6    | 2.4    | 2      | 2.6    | 0.6    |        | 1      |        | 0.6     | 0.8     |         | 0.1     | 0.8     | 0.5     | 0.8     | 0.8     |
| Kips                                                            | 0.2    | 0.4    | 0.6    | 0.4    | 0.4    | 0.3    |        | 0.3    |        | 0.1     |         | 0.4     | 0.3     | 0.1     |         |         |         |
| Jarosiit                                                        |        |        |        |        |        |        |        |        |        | 0.3     | 0.5     |         | 2.8     | 0.5     |         |         |         |
| Päevakivi                                                       | 30.2   | 18.9   | 16.9   | 17.4   | 16.1   | 15.3   | 3      | 14.3   | 3.2    | 10.6    |         |         |         | 0.3     | 1.5     | 0.2     |         |
| Hematiit                                                        |        |        |        |        |        |        |        |        |        | 1.5     |         |         |         | 0.3     |         |         | 1.1     |
| Mitte-kvantifitseeritud (illiit, illiit-smektiit ja glaukoniit) | 4.8    | 19.4   | 16.7   | 18.7   | 20.8   | 25     | 11.4   | 27.2   | 12.3   | 18      | 29.6    | 9.4     | 35.6    | 29      | 2.66    | 6.5     | 82.3    |

## Lisa 5. Aizpute-41 puursüdamiku kastid 57–64



**Kast 57.** Zante savide poolt domineeritud kihistiku üleminek Kriukai karbonaatsele kihistule sügavusel 1140.8 m kuid tuleb arvestada kadudega, sügavus on umbkaudne ja jääb vahemikku 1130–1141 m. AU24-10 proov võetud savikamast intervallist Kriukai kihistus sügavusel 1140.2 m.



**Kast 58.** Kastis on hallikas-punakas kirju Zante kihistik. AU24-8 võetud sügavusel 1143.0 m ja AU24-9 karbonaatsest intervallist sügavusel 1141.1 m.



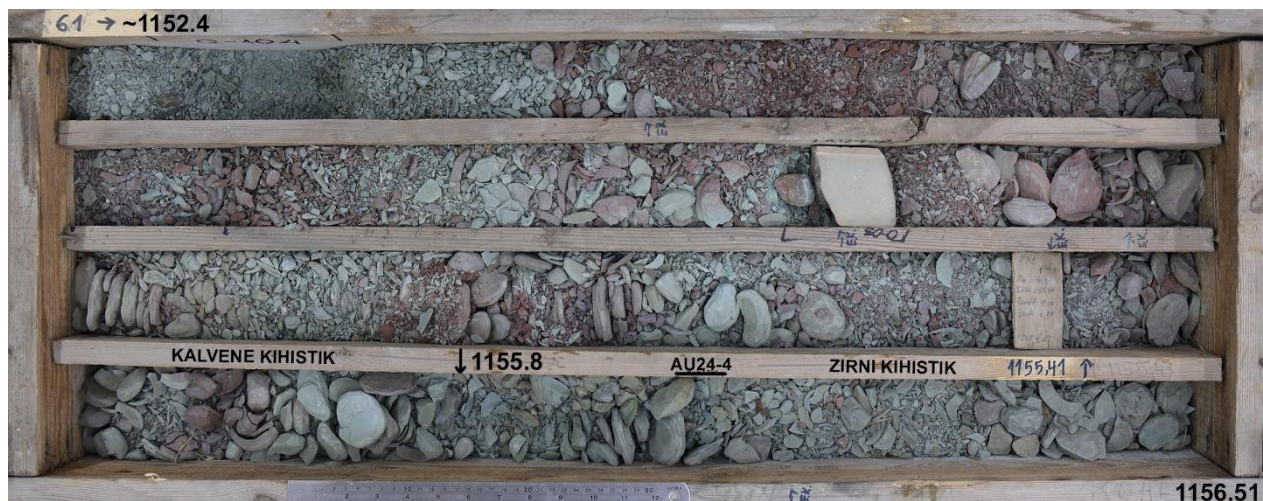


**Kast 59.** Kalvene kihistiku üleminek Zante kihistikule sügavusel 1146.2 m. Jooksvalt kasvab karbonaatsete intervallide esinemissagedus ja paksus.



**Kast 60.** Kalvene kirju kihistu. AU24-5 proov on võetud sügavuselt 1152.0 m, AU24-6 sügavuselt 1149.4 m ja AU24-7 karbonaatsest vahemikust sügavusel 1148.6 m.



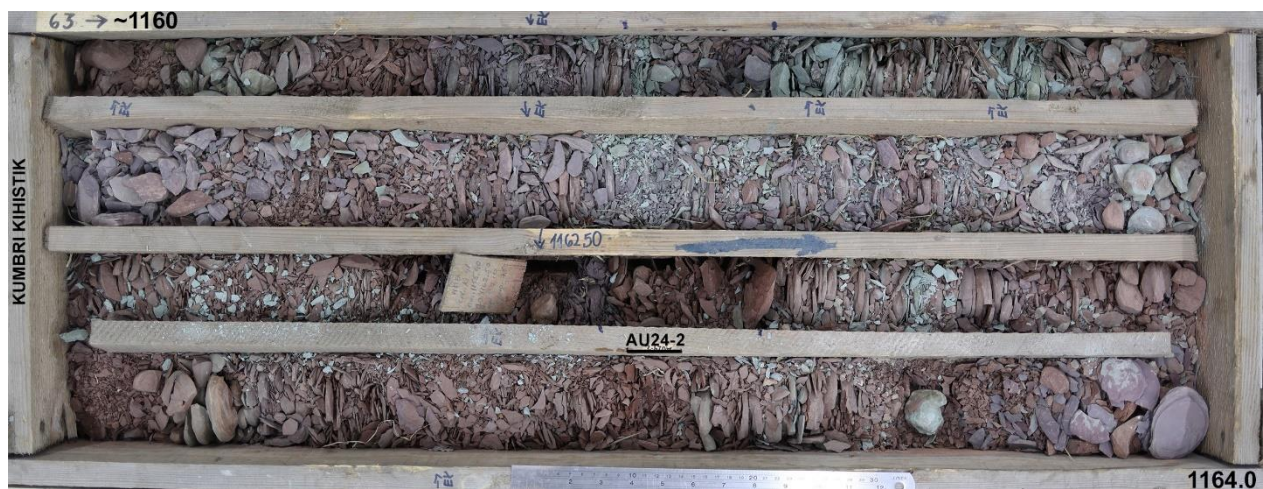


**Kast 61.** Zirni kihistiku hallikas savi, sügavusel 1155.8 ilmuvad esimesed Kalvene punakas hallid mudakivid. Esinevad esimesed paksemad karbonaatsed vahekihid. AU24-4 võetud sügavusel 1156.1 m.



**Kast 62.** Kumbri kihistiku punakad setted lähevad sujuvalt üle hallikaks Zirni kihistikus sügavusel 1159.35 m, proov AU24-3 võetud sügavusel 1158.95 m.





**Kast 63.** Kast sisaldab Kumbri kihistike punakat setet. Hall lisand on pudenenud teisest kastist. Proov AU24-2 on sügavusel 1163.57–1163.62.

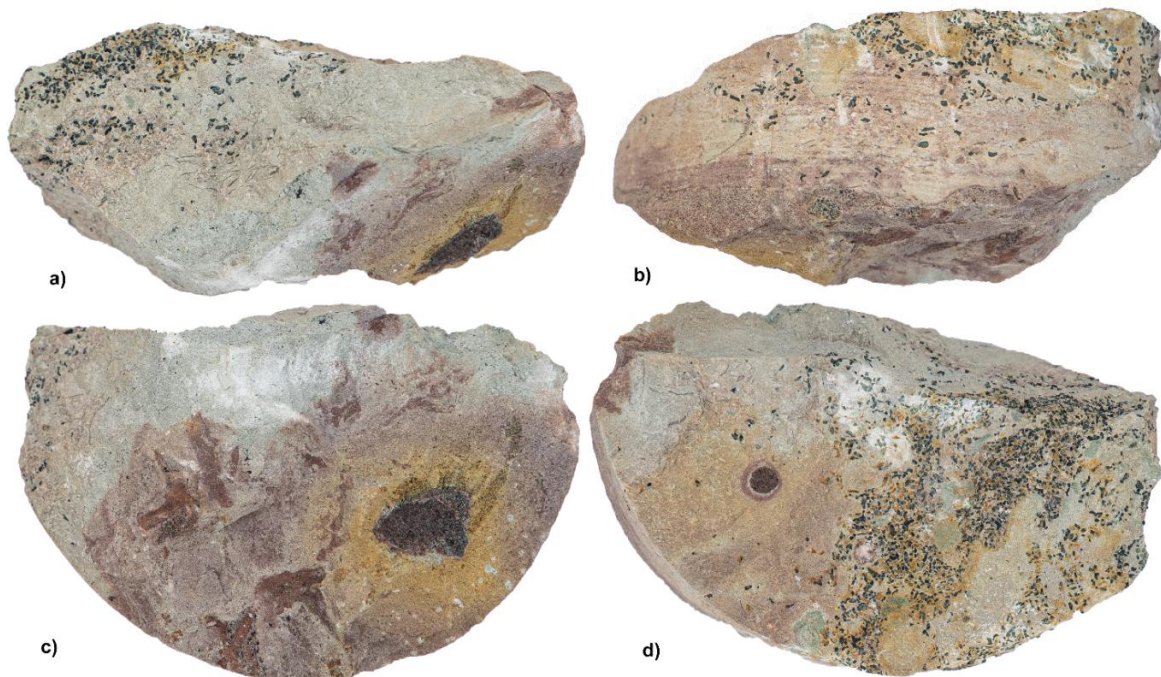


**Kast 64.** Kastis on Kumbri kihistiku punased ja Lutrini kihistiku hallid mudakivid, mis lasuvad Kambriumi-aegse Deimena liivakivide peal. AU24-1 proov on sügavusel 1166.92–1167.0 .



## Lisa 6. Petseri 330 puursüdamiku proovid Zebre intervallist

Petseri 330, proov 4490, 441.1 m  
2 cm

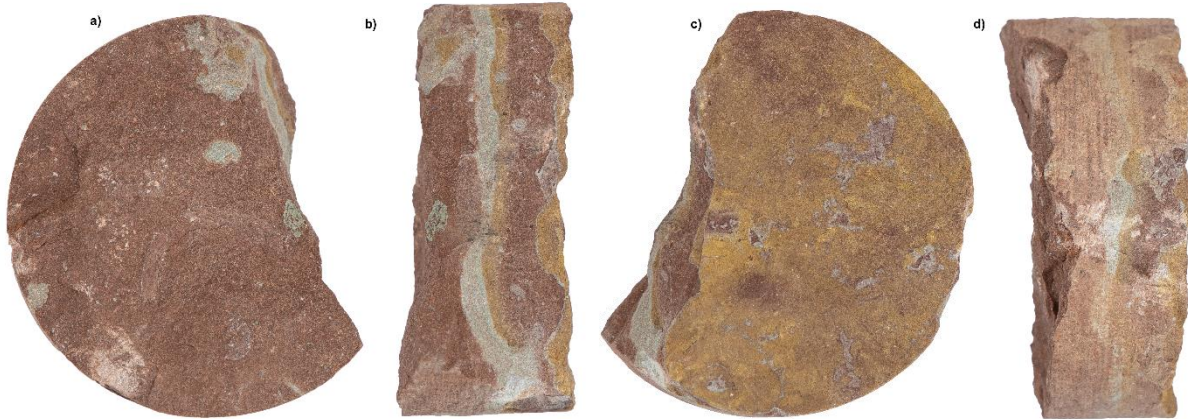


Petseri 330, proov 4488, 443.0 m  
2 cm





Petseri 330, proov 4497, 443.45  
2 cm



Petseri 330, proov 4489, 443.7 m  
2 cm







Petseri 330, proov 4991A, 444.25 m

2 cm



a)



b)



c)

Petseri 330, proov 4492, 444.5 m

2 cm



a)



b)



c)



d)

## **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks<sup>1</sup>**

Mina Aileen Umal

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Ordoviitsiumi Zebre kihistu stratigraafia ja kasutatavus Lõuna-Eestis“,

mille juhendajad on Olle Hints ja Tavo Ani,

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

---

06.01.2026

---

<sup>1</sup> Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingulise tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. jq 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.